

製パン工程における熱的操作に関する研究

2012

山田 盛二

目 次

記号	iv
製パンの分野における用語	vi
第1章 緒論	1
1.1 緒言	1
1.2 製パン技術における課題	4
1.2.1 冷凍生地製パン法における課題	4
1.2.2 食パン焼成工程における課題	5
1.3 本研究の目的	6
1.4 本論文の構成	6
1.5 結言	8
1.6 文献	9
第2章 パン生地，クラムの有効熱伝導度	12
2.1 緒言	12
2.2 測定原理	13
2.3 測定装置および方法	14
2.3.1 熱伝導度の測定法	14
2.3.2 比熱の測定法	14
2.3.3 密度と空隙率の測定法	18
2.4 測定結果	20
2.4.1 パン生地の有効熱伝導度（未発酵段階）	20
2.4.2 パン生地の有効熱伝導度（発酵工程）	20
2.4.3 パンクラムの有効熱伝導度	23
2.4.4 小倉餡の有効熱伝導度	27
2.5 結言	29
2.6 文献	29
第3章 冷凍生地製パン法における冷凍条件	31
3.1 緒言	31
3.2 実験方法	31
3.2.1 試料	32
3.2.2 測定方法	32
3.3 数値計算	34
3.3.1 解析モデル	34

3.3.2	熱伝導方程式	36
3.3.3	パン生地 of 温度変化	37
3.3.4	パン生地 of 凍結速度	40
3.4	凍結速度がパン生地 of 障害に及ぼす影響	42
3.4.1	生地 of 冷凍障害	42
3.4.2	製パン試験	45
3.5	最低到達温度がパン生地 of 障害に及ぼす影響	48
3.5.1	酵母 of 活性への影響	48
3.5.2	生地構造への影響	53
3.5.3	適正な冷凍条件 of 検討	53
3.6	結言	65
3.7	文献	67
第4章 冷凍生地製パン法における解凍条件		68
4.1	緒言	68
4.2	実験方法	68
4.2.1	冷凍生地製パン法	68
4.2.2	解凍条件	69
4.2.3	測定方法	71
4.3	数値計算	71
4.3.1	熱伝導方程式	71
4.3.2	パン生地 of 生地凍結率	73
4.4	測定結果	76
4.4.1	生地内での温度変化	76
4.4.2	最大氷結晶生成帯 of 滞留時間	79
4.4.3	製パン試験	79
4.5	結言	82
4.6	文献	85
第5章 食パン of 焼成工程における温度場と有効熱伝導度 of 測定		86
5.1	緒言	86
5.2	試料および実験方法	87
5.2.1	試料	87
5.2.2	集積型薄膜熱電対	87
a)	製作方法	87
b)	薄膜 of 組成と構造	89
c)	薄膜 of 熱起電力特性	89
d)	焼鈍 of 効果	93

5.2.3	集積型細線熱電対	93
5.2.4	実験装置	96
5.3	実験結果および考察	96
5.3.1	温度および熱流束	96
5.3.2	伝熱モデル	100
5.3.3	クラムの有効熱伝導度	102
5.3.4	クラストの有効熱伝導度	104
5.4	結言	104
5.5	文献	106
第6章	食パンの焼成工程におけるクラストの形成と有効熱伝導度	108
6.1	緒言	108
6.2	試料および実験方法	108
6.2.1	試料	108
6.2.2	実験装置および方法	109
6.3	測定結果	113
6.3.1	クラスト部の高密度化	113
6.3.2	熱流束の測定	120
6.3.3	焼成工程におけるエネルギー消費	120
6.3.4	クラスト形成のメカニズム	123
6.3.5	クラストの有効熱伝導度	128
6.4	結言	131
6.5	文献	132
第7章	結論	134
	本研究に関連する論文	137
	謝辞	139

記号

- A : nondimensional temperature ($=4\pi\lambda\theta/Q$), -
 B : nondimensional time ($=\ln(4\kappa t/r^2)$), -
 C_p : specific heat capacity, J/(kg·K)
 d : diameter of dough, m
 h : heat transfer coefficient, W/(m²·K)
 h : thermal diffusivity, m²/s
 H : latent heat per unit volume of dough of melting, W/m³
 J : Bessel function of the first kind
 l : length of tray, m
 l_a : distance from surface, m
 l_c : thickness of crust, m
 m : amount of moisture evaporation, kg
 Pr : Prandtl number, -
 q : heat flux, W/m²
 Q : calorific value, W
 r : radius of probe, m
 r : radius of dough, m
 R : cylindrical coordinate, m
 Re : Reynolds number, -
 t : time, s
 t_{zi} : the transit time through the temperature zone of the maximum ice crystal formation, s
 u : parameter, -
 u : wind velocity, m/s
 Y : Bessel function of the second kind
 v : freezing rate, m/s
 z : distance from the top side of tray, m
 Z : cylindrical coordinate, m
 z_{tr} : thickness of tray, m
 α : latent heat of bread dough on melting, J/kg
 γ : Euler's constant, -
 θ : temperature, °C
 θ_{dea} : deactivation temperature of yeast, °C
 θ_{fr} : freezing temperature, °C
 θ_{ge} : gelatinization temperature, °C
 κ : thermal diffusivity, m²/s
 λ : thermal conductivity, W/(m·K)

λ_e : effective thermal conductivity, W/(m· K)
 π : circumference ratio, -
 ρ : mass density, kg/m³
 ϕ : porosity, -
 ψ : frozen ratio, -

subscripts

0 : initial
0 : zero-dimensional
1 : one-dimensional
av : average
A : air in oven chamber
c : continuous
cet : center
d : dispersal
end : end
g : air
H : hot junction
i : indefinite number
j : indefinite number
lmt : limit
ma : minimum achieved
p : probe
p : pan
R : reference junction
s : sample
top : top
tr : tray

製パンの分野における用語

[原材料, 製品]

Buns	: ハンバーガーバンズに代表される丸い形状の小型パン
Crumb	: クラム. 焼成したパンの内側の柔らかい部分
Crust	: クラスト. 焼成したパンの外周部にある乾燥・着色した硬い部分
Dough	: 生地. 配合原材料がすべてミキシングされた段階のもので, 糊化する前の状態
Emulsifier	: 乳化剤. 水と油を均一に乳濁化させた状態に保たせる性質をもった品質改良剤
Filling	: フィリング. パンやケーキに注入する充填物
Flour	: 小麦粉. 一般的に蛋白含量の多い強力粉がパン用に使用される
Frozen dough	: 冷凍生地
Gluten	: グルテン. 小麦特有の蛋白で, 酵母の発生した炭酸ガスを保持する役割を持つ
Nonfat dry milk	: 脱脂粉乳. 牛乳から油脂分を分離・乾燥させた粉末
Open-top white bread	: 山型食パン. パン型にふたをしないで焼き上げた, 上部の形状が丸い食パン
Pullman white bread	: 角型食パン. パン型にふたをして焼き上げた, 形状が直方体の食パン
Shortening	: ショートニング. 動植物性の硬化油脂に微細な気泡状の窒素ガスを含ませた, パン・ケーキ用の油脂
Starch (granule)	: 澱粉(粒). 小麦粉の主要成分
Yeast	: 酵母. 糖分をアルコールと炭酸ガスに分解する
Yeast food	: イーストフード. 食品添加物で, 酵母の発育促進とパン生地の物性改良を目的としている

[製法, 工程, 設備, 現象]

Baking	: 発酵後の生地を焼成する操作, 工程
Caving	: ケービング, 腰折れ. 食パンの上面や側面が折れ曲がって変形する現象
Cooling	: 焼成後のパンを冷却する操作, 工程
Crust color	: パンの焼色
Deactivation temperature	: 酵母の活性が著しく低下する失活温度

Divider	: 生地を所定の重量に分割する装置
Dividing	: 分割. 生地を所定の重量に分割する操作, 工程
Freezing	: パン生地を冷凍する操作, 工程
Frozen dough method	: 冷凍生地製パン法
Frozen preservation	: 冷凍したパン生地を冷凍保存する操作, 工程
Grain	: 肌目. クラム部分の評価指標
Lid	: 食パン用の型に被せるふた
Mixer	: ミキサー. 原材料をミキシング(混合・混捏)して生地を作る装置
Mixing	: ミキシング. 原材料を混合・混捏して生地を作る操作, 工程
Moulder	: 丸目後の生地を整形する装置
Moulding	: 整形. 丸目後の生地の形状を整える操作, 工程
Oven	: オーブン. 発酵後のパン生地を焼成する装置
Oven-fresh bread	: 焼立てパン
Oven kick	: オーブンキック, 窯伸び. 焼成工程におけるパン生地の膨張現象
Proof	: 生地を醗酵させる操作, 工程
Proofer	: 醗酵室
Rounder	: 分割後の生地を丸める装置
Rounding	: 丸目. 分割後の生地を丸める操作, 工程
Sponge-dough method	: 中種法. 小麦粉の大部と酵母をあらかじめミキシングして発酵させる製法. 卸製品向けの大型生産ラインで一般的に採用されている
Staling	: 老化. 時間の経過とともに, パンの食感が劣化し, 風味が損なわれる現象
Straight dough method	: 直捏法. ストレート法. 配合原料全てを同時にミキシングして製パンする方法. オーブンフレッシュベーカーリーや冷凍生地製パン法に用いられる
Thaw	: 冷凍保存しているパン生地を解凍する操作, 工程
Tin	: 食パン用の型
Wholesale bread	: 卸売りのパン
Yeast activity	: 酵母活性

第1章 緒論

1.1 緒言

わが国の製パン技術は、大正時代にその礎が築かれ、世界的な歴史から見ると至って浅いものではあるが、1918年(大正7年)に日本全国で起こった米騒動、戦前の配給パン加工や戦後の学校給食といった時代背景の影響を受け、食品としてのパンは主食である米に準ずる独自の食文化を持つ。このような背景から、現在においても国内におけるパン用小麦粉総量のおよそ半分は食事用である食パン向けに消費されている実状にある。日本のパンを代表する、この食パンは形状や味がシンプルであるがゆえに、原材料のみならず製法や先人が培ってきた独自の製造ノウハウによって特徴づけられる微妙な品質の差別化も、消費者の嗜好性に強い影響を及ぼす。

製パン工場において、製品品質を大きく左右する主要な工程には、製パン技能を持つ経験豊かな職人が就き、生産現場における製法、技の伝承によって、製品品質が受け継がれてきた。組立生産のような他の業種における製造工場と大きく異なる点は、酵母という微生物を原材料に使用していることである。すなわち、生産プロセスにおいては製品品質に影響を及ぼさずに酵母の活性を停止させることが不可能であるため、一度生産を開始すると製品が完成に至るまで生産を中断させることができない。そのような生産工程にあって、加工前の原材料の貯蔵から製品化された後の配送まで、ほぼ全ての工程において熱的操作が必要である。とりわけパン生地のみキシング(Mixing)と並び、焼成(Baking)は最終的に製品品質を確定させる最も重要な工程の一つとして、通常は最も経験のある職人がその任を担ってきた。焼成担当者が操作を誤り、パン生地への火通りが不十分な場合、食品衛生的な問題が生じたり、十分なクラスト(一般的に耳と呼ばれる周辺部の褐変化した部分)が形成されず、ケーピングと呼ばれる不具合(製品側面が凹んだ変形状態)が生じたりする。反面、焼成に時間を掛けすぎると、近年の嗜好として消費者から敬遠されている厚く硬いクラストが形成されるばかりか、製品側面が折れて凹む変形が生じる。経験が豊かなパン焼き職人であれば与えられた作業環境の中で理想とする

パンの焼き具合をイメージしコントロールすることはできるが、さらに理想とする焼成条件を得るために装置に求められる必要な仕様を導きだすことは現状では期待できない。製パン業界全体の技術の底上げには客観的な数値による製造条件の定量化が望まれており、相応の時間を要すると考えられている。

我が国における製パン産業では、自動化された大型生産ラインで製造し、包装して小売店等へ配送する卸売り製品と、一般的にオープンフレッシュベーカリーと称される小型の店舗内で製品を製造して販売する店頭製品があり、どちらの製品もほぼ同様の生産工程で製造される。店頭製品の製造の場合、原材料の仕込みから、製品として焼成して冷却させるまでに必要な所要時間は、概ね5~7時間である。作業者を交替させることによって1日の24時間を生産に充てることができる工場での卸売り製品の製造の場合と比較して、店舗ではその日の販売時間帯に合わせて生産を行うため、たとえば午前10時の開店に製品の品揃えをするためには、午前3時頃からの勤務という厳しい労働条件が課せられる。

そこで、店頭製品の製造における労働条件の改善や生産・配送の合理化などといった

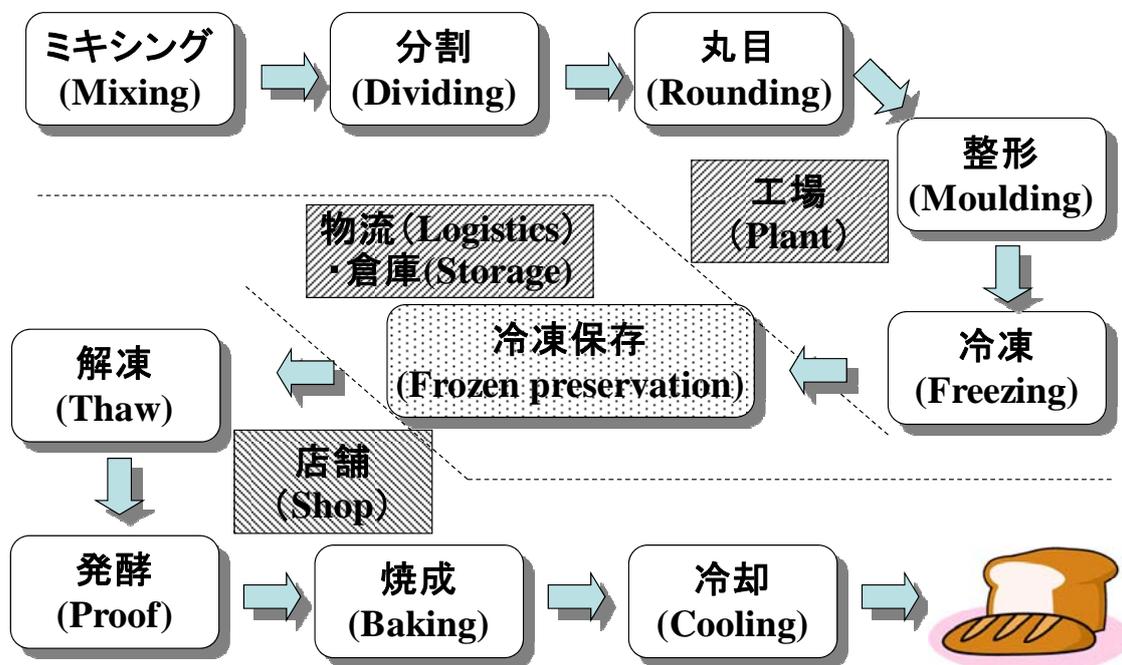


Fig. 1-1 Industrial operation for bread making by frozen dough method.

利点を持ち、現在注目を集めている技術の一つとして冷凍生地製パン法(Frozen Dough Method)が挙げられる。農林水産省総合食料局が発表した資料[1]によると、この30年間パン全体の生産数量はほぼ横ばいであるにも関わらず、冷凍生地の生産量だけは昭和61年から15年間連続して成長を続けてきた。その間に、冷凍生地用に使用される量の対前年比の平均増加率は10%を超え、現在ではパン用に使用される小麦粉量(120万トン)の内、実に7%程度(8.3万トン)の小麦粉量が冷凍生地用として使用されるまでに至っている。

冷凍生地製パン法は、Fig. 1-1 に示す通り、通常の製パン工程によってミキシング(Mixing)したパン生地を分割(Dividing)・丸目(Rounding)した後、あるいは整形(Moulding)まで行ったパン生地をいったん冷凍(Freezing)・冷凍保存(Frozen preservation)し、生産状況に合わせて適当な数量の生地を解凍(Thaw)させ、発酵(Proof)・焼成(Baking)・冷却(Cooling)させる製法である。製品として流通している冷凍パン生地の賞味期限は、焼成した製品の賞味期限(2~5日程度)と比較して3ヶ月程度と長く、製造メーカーとしても物流による長距離配送や少量の計画生産を図ることが可能になる。一般的な製パン法では仕込みから焼成・冷却までに5~7時間を要し、冷凍生地を使用しないオーブンフレッシュベーカリーでは厳しい労働条件が課せられるが、作業開始から2~3時間で製品を製造することができる冷凍生地製パン法を採用することによって、労働条件の大幅な軽減が図られる。

この冷凍生地製パン法では、社団法人日本冷凍食品協会において定められている冷凍食品の定義に従って、食品中の水分や油脂が凍結・凝固するほどの低温(-18℃以下)にすることにより、酵母の活動を抑える。パン生地は、通常やや温度が低めの-30~-40℃程度の冷凍庫で急速冷凍され、冷凍後は一定数量毎に包装・梱包されて冷凍用とは別の-25℃程度に温度制御された保管用の冷凍庫で長期間にわたり冷凍保存される。

冷凍生地を使用してパンを製造する際は、保管用の冷凍庫から取り出したパン生地を、その製造する前夜にトレーに移し載せ、酵母の活動が抑制される温度(約0℃)の冷蔵庫内で夜間に解凍を行う。パン生地は、翌朝解凍された状態から生産状況に合わせて通常の製パン工程における発酵以降の操作が行われ、比較的短時間の内に店頭で製品が並ぶ。前述のような午前10時開店の店舗であれば、当日の午前7時頃からの作業で十分対応が可能となる。

1.2 製パン技術における課題

1.2.1 冷凍生地製パン法における課題

§ 1.1 に述べた冷凍生地製パン法において、パン生地を冷凍あるいは解凍する条件によっては、生地が十分に発酵しない、生地の炭酸ガス保持性が低い等の障害が起こる。パン生地の冷凍および解凍条件が酵母の活性や生地構造に及ぼす影響を明らかにした上で、酵母が十分に発酵し、炭酸ガス保持性の高い生地を得るための製造条件の追求や生産設備の設計を図る必要がある。

パン生地が冷凍の際に障害を受けた場合、発酵によって本来発生すべき炭酸ガスが十分に発生しなかったり、発生した炭酸ガスをパン生地が保持しきれずに生地外部に漏洩する。その結果、最終製品の外観では、設計どおりの製品体積が出ない、生地の剛性が低く扁平な形状になるなどの不具合が生じる。クラム(パンの内側の白く柔らかい湿潤層部分)の状態を示す内相の評価としては、気泡を形成する膜が厚くなる、気泡のばらつきが増し、平均径が大きくなる、などの不具合が生じる[2-4]。さらに冷凍あるいは解凍直後の状態におけるパン生地に関しては、障害を受けているか否かを外観から判断することは困難であるので、確実に障害が軽微に抑えられる冷凍・解凍の条件をあらかじめ知っておくことが望まれる。

これまでに、田尻ら[5]は、生地の発酵状態を変えて冷凍した生地を用いて食パンを製造し、生地のガス発生量や食パンの内相を比較した。さらに 25~27℃の室温での緩慢解凍と 35℃の発酵蒸器を使用した急速解凍によって、解凍条件の違いが生地の粘性やガス発生量に与える影響についても比較した。久保ら[6,7]は、パン生地を冷凍する際、冷凍庫内の温度を変えることで急速・緩慢の条件を定義し、その生地で作ったパンの比体積や内相を比較した。冷凍条件や解凍条件[8,9]などのパン生地の製造条件に関する研究は進められつつある[10]が、新しい酵母の開発[11-13]や原材料の添加[14-20]、処理方法[21]に関する研究の場合と比較して、未解決の課題が多いのが実状である。

1.2.2 食パン焼成工程における課題

パンは、量り出した原材料の混合・混捏から始まり、分割・丸目・中間発酵・整形・最終発酵・焼成・冷却といった工程を経て生産される。原材料に含まれる酵母は温度によって活性(発酵)の速度が変化するため、また酵母の死滅後においても焼成後には次工程である仕上げ加工を行うための温度まで製品を安定して冷却させる必要性から、ほぼ全ての工程において温度管理は必要である。温度以外の管理指標としては、混捏後の生地物性(弾性・伸展性：麩切れと呼ばれる過剰なミキシングに至らない適期において最大の弾性と伸展性を示す状態が良好と判断される)、分割時における生地重量の確度、丸目や整形時における生地形状、最終発酵時における見掛けの生地体積、焼成時における製品形状や表面の焼き色といった項目が挙げられる。これらの各工程に定められたパンの状態が確保できるよう、ミキサーや発酵室などの当該生産設備への入力値が所要の条件を満たすように設定されるべきである。

そのような以上に述べた生産工程のなかでも、焼成工程は最終製品の品質を確定させる最も重要な工程の一つである。日本国内で最も多く消費されているパンの製品カテゴリーである食パンの焼成工程においては、生地の状態を視認することができず、型から取り出されるまで品質を確認することができない。生地温度の上昇にともなって生じる物理現象あるいは化学反応が、どの時点において、どのように生地内部で起こっているのかを、生産現場では確認することができない。そのため、結果として焼き上がった製品を見た後に試行錯誤的に温度や時間といったオーブンの設定を調整する以外に方法がない状況にある。

最終製品の品質を決定づける焼成工程では、生地内部で炭酸ガスの溶出等による内圧の増加と同時に、生地周辺部では水分蒸発や褐色変化によるクラストの形成も並行して起こっているため、その工程内における時系列的な“火加減”が製品体積や焼き色、クラスト性状といった異なる品質に関連しており、理想とする品質を得るには生地内部と生地周辺部の経時的な現象を把握する必要がある。

これまでに、長尾[22,23]らは、金属容器内において水分量の異なる食品および食品モデル系を試料として加熱した際の一次元熱移動について考察した。陶ら[24]は、パンを固・液・気の3相系とみなす簡便な熱伝導モデルを考案した。このように、食品や食パ

ンのような多孔質体の焼成工程における温度分布についての数値シミュレーション等の研究は進められつつある[25-27]が、焼成工程における中の食パン中の熱と物質の移動を明確に把握するには至っていない。

1.3 本研究の目的

本研究は、§1.2までに述べた研究の背景に鑑み、製パン工程の中でも最終製品の品質が熱的操作に最も強く依存する焼成工程と冷凍・解凍の工程に注目して、これらの工程においてその状態が経時的に変化する焼成前のパン生地および焼成後のクラム、クラストの性状を研究対象とし、現在解決すべき技術課題を克服することを目的とする。そのために次の3つの研究課題に取り組む。

第1の課題は、パン生地およびクラムの熱物性値、とくに有効熱伝導度を測定して温度との関係を明らかにし、製造条件や装置設計の最適化のための数値シミュレーションの高度化を図ることである。

第2の課題は、冷凍生地製パン法における冷凍障害を軽微に抑え、設計された品質を確保するための冷凍・解凍の条件を求めることであり、さらに求められた条件の優位性を実際の製パン結果において実現し、確認することである。

第3の課題は、食パン焼成工程における熱および物質移動の現象を明らかにするとともに、クラスト形成のメカニズムを解明し、さらに従来測定が困難であったクラストの有効熱伝導度を求めることである。

1.4 本論文の構成

本研究では、§1.3に述べた3つの課題に対処するために「製パン工程における熱的操作に関する研究」に取り組む。すなわち、熱移動という可視化が困難なエネルギー移動によって生じるパン内部の温度分布の履歴や物質移動の状態を調べ、パンという加工

食品の理想的な品質を得るための製造条件についての知見を得ることを目標に、以下に示す内容について研究を行う。

第1章は緒論であり、研究の背景や研究の目的を概説する。製パン工程における熱的操作の重要性を説明し、本研究では、とくに製品の品質に強い影響を及ぼす焼成工程と冷凍生地製パン法における冷凍・解凍の工程に注目することを述べる。

第2章では、本研究の第1の課題に関して、「パン生地、クラムの有効熱伝導度」の測定を行う。冷凍・解凍工程におけるパン生地の凍結温度や、焼成工程における温度の上昇で澱粉が周囲の水分を吸収し、不可逆変化が起きる糊化温度を含んだ広範な温度域で、パン生地およびクラム(湿潤層)の有効熱伝導度を測定する。得られた値よりパンの発酵工程での状態変化にともなう有効熱伝導度の温度特性を検討し、また、焼成工程における澱粉の糊化や冷凍工程におけるパン生地の状態変化などの温度に依存する諸現象について考察する。

第3章と第4章では、本研究の第2の課題に関して、冷凍生地製パン法における冷凍工程および解凍工程における熱的操作に注目する。第3章では、「冷凍生地製パン法における冷凍条件」を研究する。パン生地の冷凍工程における凍結速度と最低到達温度(履歴における最低温度)に注目し、直接差分法による数値解法を用いて、パン生地を冷凍させる際にパン生地内に生じる凍結速度分布や温度履歴を調べる。また、凍結速度と最低到達温度をパラメーターとして製パン試験を行い、計算と実験の結果を比較する。酵母活性による設計どおりの炭酸ガスの発生とガス保持性の高いパン生地を実現し、気泡径が小さく揃ったクラムを実現するために、凍結速度と最低到達温度がどのような影響を及ぼすかを検討する。

第4章では、「冷凍生地製パン法における解凍条件」を研究する。冷凍パン生地の解凍工程における生地内部の温度分布の変化を、温度に依存する生地の凍結率と最大氷結晶生成帯と呼ばれる温度域([凍結温度]~[凍結温度-4℃])における滞留時間に注目して、直接差分法を用いた数値計算により求める。これらの凍結率と滞留時間の調整が十分でない場合、パン生地にガス保持力の低下などの障害を与え、最終製品の品質低下を招くことについて検討する。また、生地のガス保持率の測定・製パン試験を行い、数値計算の結果と比較し検討する。

第5章と第6章では、本研究の第3の課題に関して、食パン焼成工程における熱および物質移動に注目する。第5章では、「食パンの焼成工程における温度場と有効熱伝導度の測定」を研究する。角形食パンの焼成工程において、パン生地内の温度分布の経時変化を調べるとともに、クラスト(乾燥層)の近傍における有効熱伝導度を測定することにより、食パンの焼成工程で生じるパンの型からパン生地の内部への熱移動や外部への水分蒸発などの諸現象についての知見を得る。ポリイミドフィルム上に異種金属を真空蒸着して、所定の間隔で5点の測温接点を集積した薄膜熱電対と9点の測温接点を集積した細線による熱電対の2種類の熱電対を作製し、クラストの近傍における温度場の時間変化を測定する。焼成工程における食パン内部の温度場と熱移動の解析結果からパン生地の有効熱伝導度を導き、温度変化にともなう諸現象についての知見を得る。

第6章では、「食パンの焼成工程におけるクラストの形成と有効熱伝導度」について研究する。角形食パンの焼成工程において、パン生地への熱移動量の経時変化を調べるとともに、潜熱あるいは顕熱として消費される経過を検証する。さまざまな条件での焼成工程における水分蒸発量やパン生地表層部分の見掛け密度の分布、熱移動量の時間変化に注目する。水分蒸発量の測定結果から、内部のクラム(湿潤層)からクラスト(乾燥層)が形成されるメカニズムを考察し、パン生地表層部の見掛けの密度の変化から、クラストにおける気泡の破裂が生むパンの高密度化の現象を考察する。パン生地への熱流束の測定結果から、乾燥し高密度化したクラストの有効熱伝導度を評価する。

第7章は本論文の結論であり、第2～6章で得られた結言をもとに、本研究全体を通じて得られた研究の成果をとりまとめる。

1.5 結言

本章では、製パン工程における製造技術について概説し、熱的操作をともなう冷凍・解凍・発酵・焼成工程の特徴とその技術課題を分析し、第2～6章ではこれらの工程における熱的操作とパン生地・クラム・クラストの状態の変化に注目する研究を行うことを述べた。

1.6 文献

- [1] 社団法人食品需給研究センターホームページ, <http://www.fmric.or.jp/stat/stat.html>.
- [2] 井上好文; 「冷凍生地の理論(I)」, 製パン技術資料, 344, (1993), pp.1-23, 日本パン技術者協会.
- [3] 井上好文; 「冷凍生地の理論(II)」, 製パン技術資料, 346, (1993), pp.1-27, 日本パン技術者協会.
- [4] 井上好文; 「冷凍生地の理論(III)」, 製パン技術資料, 350, (1993), pp.1-29. 日本パン技術者協会.
- [5] 田尻尚士, 松本熊市, 原和子; 「冷凍パン生地の食パン製造への応用(第1報)」, 近畿大学農学部紀要, 9, (1976), pp.45-56.
- [6] 久保さつき, 水谷令子, 杉本卓也; 「冷凍パン生地製造条件の検討」, 鈴鹿短期大学紀要, 15, (1995), pp.173-183.
- [7] 久保さつき, 水谷令子; 「パン生地における冷凍障害」, 鈴鹿短期大学紀要, 12, (1992), pp.63-72.
- [8] K. H. Hsu, R. C. Hosney, P. A. Seib; “Frozen Dough. II. Effects of Freezing and Storing Condition on the Stability of Yeasted Doughs”, *Cereal Chem.*, 56, (1979), pp.424-426.
- [9] 山内宏昭, 一ノ瀬靖則, 高田兼則, 入来規雄, 椎名武夫, 小林猛; 「冷凍生地食パンの老化に関する速度論的解析」, 日本食品工業学会, 46, (1999), pp.212-219.
- [10] 久保さつき, 水谷令子; 「冷凍パン生地における混捏温度の影響」, 鈴鹿短期大学紀要, 13, (1993), pp.243-249.
- [11] 日野明寛, 遠藤久則, 高野博幸; 「冷凍生地製パン用酵母の育種とその耐性機構」, 凍結及び乾燥研究会会誌, 37, (1991), pp.130-137.
- [12] 田中康夫, 飯泉正子; 「酵母の冷凍障害に対するパン生地成分の保護効果について」, 聖徳大学研究紀要, 26, (1993), pp.33-37.
- [13] 韓英淑, 河合弘康; 「冷凍耐性酵母の検索とそのパン生地発酵特性」, 日本家政学会

- 誌, 41(2), (1990), pp.115-121.
- [14] 田尻尚士; 「冷凍パン生地の食パン製造への応用(第 3 報) 親油性界面活性剤の添加効果」, 近畿大学農学部紀要, 18, (1985), pp.59-67.
- [15] 田尻尚士; 「冷凍パン生地の食パン製造への応用(第 4 報): 親油性界面活性剤と増粘剤の併用効果」, 近畿大学農学部紀要, 19, (1986), pp.37-46.
- [16] Hiroyasu Kawai, Yuka Isobe, Yukie Tsuchida; “Loading of Exogenous Trehalose into Baker’s Yeast and It’s Influence on Freeze Trehalose in Frozen Dough”, *Kansai Univ. of Welfare Sciences*, 8, (2005), pp.89-97.
- [17] Sadako Takahashi, Keiko Karasawa; “Effects of Galactooligosaccharides Syrup on Breadmaking Properties of Non-frozen and Frozen Dough Using Freeze Tolerant Yeast and Baker’s Yeast”, *J. Home Econ. Jpn.*, 45(8), (1994), pp.681-688.
- [18] 高野博幸; 「冷凍生地製パン用冷凍耐性酵母の開発動向」, 発酵工学会誌, 66(4), (1988), pp.346.
- [19] 田中康夫; 「冷凍パン生地における酵母の凍結障害」, 凍結及び乾燥研究会会誌, 28, (1982), pp.83-85.
- [20] 田中康夫; 「冷凍生地とパン酵母の凍結障害」, 発酵工学会誌, 59(3), (1981), pp.273-274.
- [21] 水谷令子, 久保さつき, 川村吉也; 「冷凍パン生地の品質改良に関する研究」, 鈴鹿短期大学紀要, 15, (1995), pp.185-193.
- [22] Keiko Nagao, Sachio Matsumoto; “Preparation of Food Model for Examining Heat Transfer in Cooking under the Control of Moisture”, *日本調理学会誌*, Vol.32, No.1, (1999), pp.10-17.
- [23] Keiko Nagao, Sachio Matsumoto; “Thermal Conduction along by the One-Dimensional Axis in Foodstuffs during Heating in a Metal Vessel”, *日本調理学会誌*, Vol.52, No.3, (2001), pp.241-249.
- [24] K. Tao, T. Tadano, I. Suzuki; 「パンの有効熱伝導率の実測と伝熱モデル」, 熱物性, 18, (2004), pp.7-13.
- [25] S. S. Sablani, M. Marcotte, O. D. Baik, F. Castaigne; “Modeling of Simultaneous Heat

and Water Transport in the Baking Process”, *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.*, 31, (1998), pp.201-209.

[26] Nantawan Therdthai, Weibiao Zhou, Thomas Adamczak; “Optimisation of the Temperature Profile in Bread Baking”, *Journal of Food Engineering*, 55, (2002), pp.41-48.

[27] Nantawan Therdthai, Weibiao Zhou, Thomas Adamczak; “Simulation of Starch Gelatinisation during Baking in a Travelling-tray Oven by Integrating a Three-dimensional CFD model with a Kinetic Model”, *Journal of Food Engineering*, 65, (2004), pp.543-550.

第2章 パン生地, クラムの有効熱伝導度

2.1 緒言

食品は一般的に固・液・気が多成分3相系であり, 熱的操作時には熱と同時に物質が複合的に移動する複雑な系である. その食品中に含有される固形分や油分・水分等の割合は個体によってさまざまであり, 個別の食品に最適な製造条件は, 生産の現場において, その都度, 試行錯誤的に決定されてきた.

製パン工程における熱的操作については, 発酵工程における酵母からの炭酸ガスの発生や焼成工程における水分蒸発および表層部の着色, 冷凍工程における生地の状態変化や酵母の失活等, 温度に依存するさまざまな物理的・化学的現象がともなう. これまでにも熱的操作による温度変化の推測のための研究が数多く試みられてきた[1-4].

しかし, 熱的操作による被対象物の温度変化を数値計算で推定するためには, 熱物性値, とりわけ有効熱伝導度が必要であるが, 既存の文献値は限られた温度域でのものであった[5-7]. とくに, 発酵の前後におけるパン生地や焼成工程において形成されるパンのクラストとクラムの有効熱伝導度を温度や空隙率等に応じて系統的に示した例は少なく[8], 発酵工程における生地について状態が経時変化する条件下での有効熱伝導度の値を連続的に測定した研究はなかった.

パン生地は発酵工程で固液分散系の状態から多孔質体の状態に変化するとき, 60分程度で気泡の平均径が1mm程にまで成長し, 空隙率は0.8の程度に達する. したがって, 有効熱伝導度の測定には試料の温度変化速度を低く抑えながら多孔質の有効熱伝導度を数秒~十秒の程度の短時間で測定できる手法を選ぶことが重要である.

本章では, 測定法として小林ら[9]が開発した非定常プローブ法を選び, パンの生地とクラムの有効熱伝導度を凍結温度や澱粉の糊化温度を含む温度域で測定し, その挙動を温度の関数の形で記述する.

2.2 測定原理

有効熱伝導度の測定には、既報の非定常プローブ法[9]による熱伝導度測定装置を使用した。その測定原理の要点は、以下のとおりである。半径 r の軸対称の棒状熱源（比熱 C_{PP} 、密度 ρ_P ）であるプローブを想定し、それに単位長さ単位時間当りに熱量 Q をステップ状に与え、その棒状熱源の周囲の試料（熱伝導度 λ 、熱拡散率 κ 、比熱 C_{PS} 、密度 ρ_S ）への熱伝導について考える。ただし、試料に比べて熱伝導度が十分高いプローブは完全導体とみなし、またプローブ外表面と試料の間には接触抵抗がないものとする。プローブと試料の初期温度が θ_0 である場合、時刻 t におけるプローブの温度 θ_p は、Carslawら[10]により式(2-1)で与えられる。

$$\theta_p - \theta_0 = \frac{2Q\alpha^2}{\pi^3\lambda} \int_0^\infty \frac{\{1 - \exp(-\kappa t u^2/r^2)\} du}{u^3 \Delta(u)} \quad (2-1)$$

ここで、

$$\alpha = 2C_{PS}\rho_S/(C_{PP}\rho_P) \quad (2-2)$$

$$\Delta(u) = \{uJ_0(u) - \alpha J_1(u)\}^2 + \{uY_0(u) - \alpha Y_1(u)\}^2 \quad (2-3)$$

であり、 C_{PS} 、 C_{PP} は試料とプローブの比熱、 ρ_S 、 ρ_P は密度であり、 $J_0(u)$ 、 $J_1(u)$ 、 $Y_0(u)$ 、 $Y_1(u)$ は、それぞれ 第1種0次、第1種1次、第2種0次、第2種1次の Bessel 関数、 u は媒介変数である。式(2-1)は、

$$A = 4\pi\lambda(\theta_p - \theta_0)/Q \quad (2-4)$$

$$B = \ln(4\kappa t/r^2) \quad (2-5)$$

とした無次元数で整理すると式(2-6)のように表すことができる。

$$A = \frac{8\alpha^2}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{\{1 - \exp(-u^2(\exp B)/4)\} du}{u^3 \Delta(u)} \quad (2-6)$$

Fig. 2-1 に α の値が異なる場合の式(2-6)による温度上昇曲線 (θ_p-t 関係)を $A-B$ 関係の形で示す. Fig. 2-1 には, 従来の非定常プローブ法で熱伝導度を求める際に用いられた式,

$$A = B - \gamma \quad (2-7)$$

($\gamma=0.5772$, Euler 定数) も示す. 試料の密度 ρ_s および比熱 C_{PS} が既知で α の値が定まれば, 実験により得られる温度上昇曲線と式(2-6)とを比較することにより, 温度上昇曲線が直線状となる以前の曲線から, 熱伝導度を求めることができる.

2.3 測定装置および方法

2.3.1 熱伝導度の測定法

熱伝導度測定装置のブロック線図を Fig. 2-2 に示す. 試料は, 内径 60mm の銅製の円筒容器に充填された状態で一定の温度に保たれ, その中心軸上に外形 2mm の測定用プローブが固定されている. なお, 試料円筒容器は冷凍庫内に設置し, 容器外側に巻いた電気ヒーターに供給する電力を調整することにより, 試料の温度を $-80 \sim +100^\circ\text{C}$ の範囲で変化させた. 一方, プローブ内の発熱体にはステップ状に一定の電流が流される. プローブの温度上昇は, 熱起電力補償装置, 直流増幅器, デジタル・メモリを使用して測定し, これをパーソナル・コンピューターに転送して, 熱伝導度の計算を行った. 1 回の熱伝導度測定は, 10~40s の時間で行った.

2.3.2 比熱の測定法

実験に用いたパン生地は, 製法として全ての原材料を一回のミキシング時に投入するストレート法を選定し, Table 2-1 に示すような製パン業界では一般的に採用されている食パンの原材料配合に従って製造した. 試料の比熱 C_{PS} は, セイコー電子工業製熱分析システム (型式: SSC5200H, DSC120) を使用し, 凍結温度 $\theta_f (= -3.2^\circ\text{C})$ を含む $-40 \sim 90^\circ\text{C}$ の温度域において測定した. パン生地の比熱の測定結果をパン生地の温度 θ_s の関数の形で次式に表す.

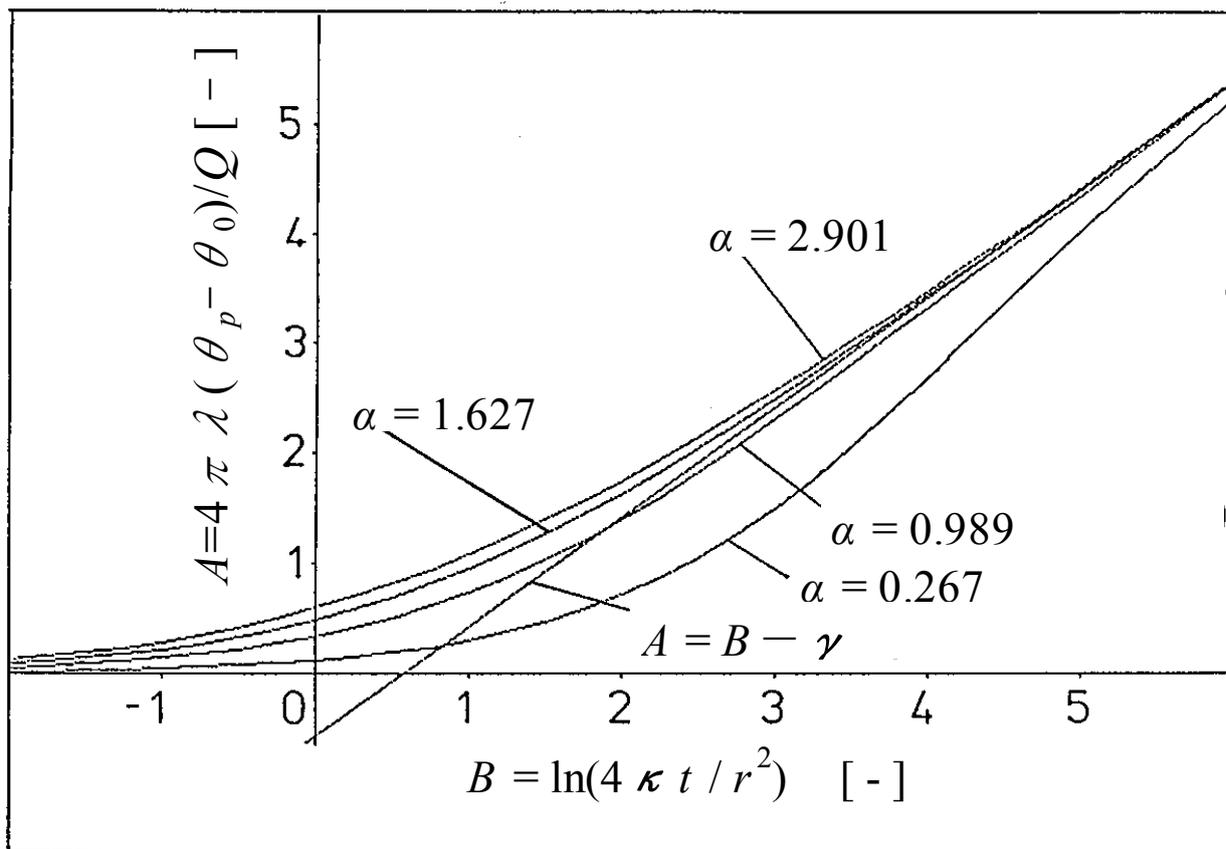


Fig. 2-1 Heating temperature curve.

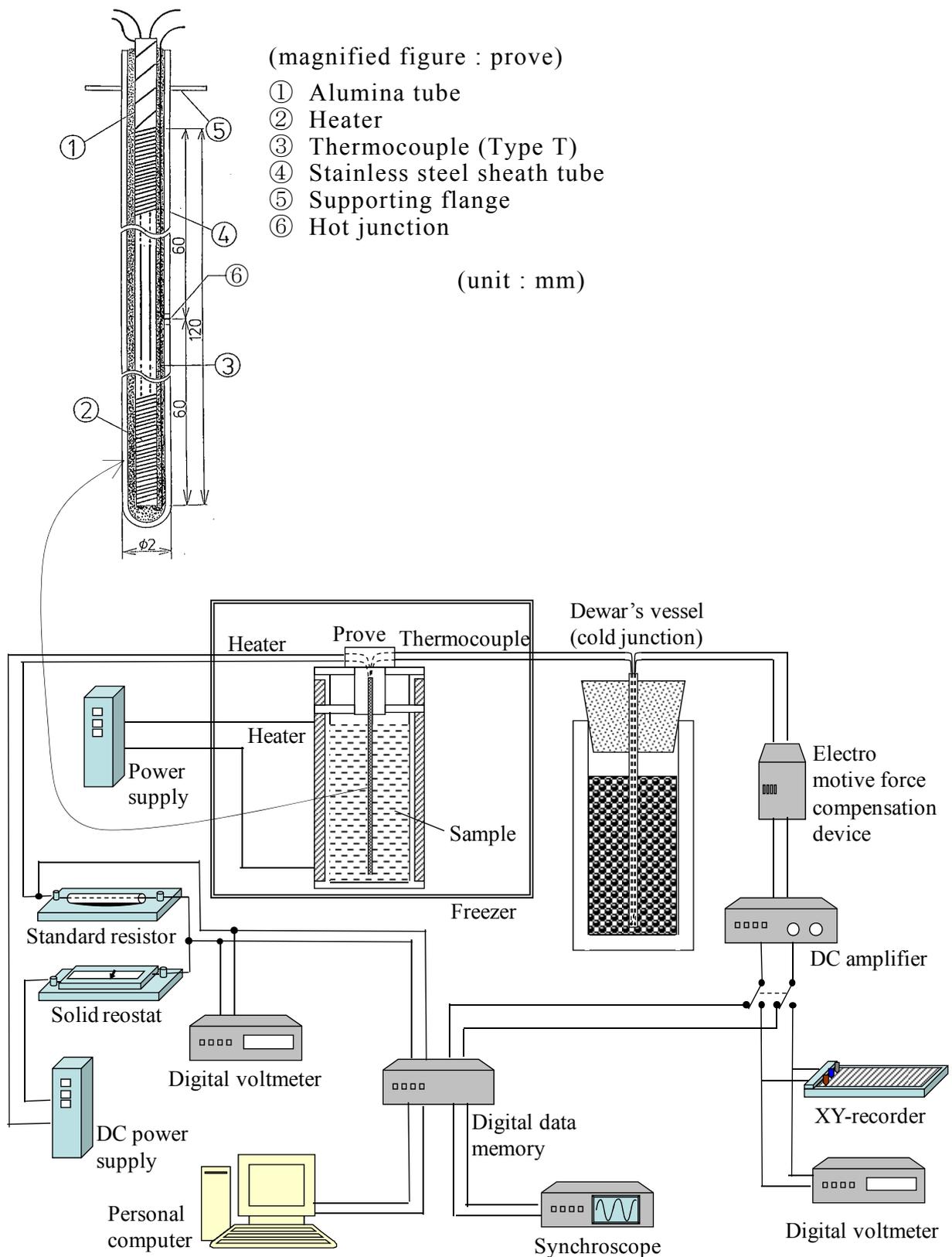


Fig. 2-2 Block diagram of the experimental apparatus.

Table 2-1 Dough formula. (white bread)

Ingredinet	Weight percent	Ingredinet	Weight percent
Flour	53.9	Shortning	3.22
Water	34.5	Salt	1.08
Yeast	3.22	Nonfat dry milk	1.08
Yeast food	0.27		
Emulsifier	0.05	Sugar	2.68

$$\theta_S \geq \theta_{fr} ; \quad C_{PS} = 0.00405 \theta_S + 2.01 \quad (2-8)$$

$$\theta_S < \theta_{fr} ; \quad C_{PS} = 0.00788 \theta_S + 1.35 \quad (2-9)$$

このパン生地を使用して角形食パンと山形食パンを製造した。パン生地は所定の重量(190g)に分割した後丸目を行って食パン用の型に詰めて整形し、最終発酵(温度=38℃, 相対湿度=85%, 発酵時間=50-60min), 焼成(200℃:トレイ式オーブン使用, 焼成時間=35min), 冷却(25℃, 100min)を経て、試料とした。なお、最終発酵から焼成に移すタイミングとしては、角形食パンで発酵した生地の上表面が型高さから下30mmにまで、山形食パンで同様に型高さと同じ高さにまで膨張した時点で、オーブンに移して焼成した。パンクラムの比熱については、山形食パンと角形食パンの値に明確な違いが見られなかったため、ともに次式で表す。

$$\theta_S \geq \theta_{fr} ; \quad C_{PS} = 0.00364 \theta_S + 2.600 \quad (2-10)$$

$$\theta_S < \theta_{fr} ; \quad C_{PS} = 0.00709 \theta_S + 2.531 \quad (2-11)$$

2.3.3 密度と空隙率の測定法

パン生地の密度 ρ は内容積が既知である容器中の試料の重量を測定し、その質量を容器の内容積で除することによって求めた。発酵工程における空隙率の変化は、メスシリンダーに入れたパン生地の体積増加量から計算した。パンクラムについては、食パンの周辺部を立方体(80mm × 80mm × 80mm)の形状に切削し、その重量の測定値を体積で除することで見掛け密度を求めた。クラムは1次元的に圧縮することで高密度化し、短縮された長さの値から空隙率を算出した。

試料の密度に関しては、温度および状態による外観上の差異が微小であることから、温度依存性は考慮しないで常温における値を使用した。密度と空隙率の代表的な値をTable 2-2に示す。これらの物性値を用いて算出される熱伝導度の精度に関して、入力する比熱や密度のばらつきは、ほぼ同程度の割合の差異として熱伝導度の値に影響を及ぼすことを確認した。

Table 2-2 Apparent density and porosity of bread.

	Dough	Crumb of Pullman Bread	Crumb of Open-top Bread
Apparent density (kg/m ³)	1110	169	150
Porosity (—)	0.000	0.848	0.865

2.4 測定結果

2.4.1 パン生地の有効熱伝導度(未発酵段階)

Fig. 2-3 に未発酵のパン生地の有効熱伝導度を示す. 横軸に試料温度 θ_s , 縦軸にパン生地 の有効熱伝導度 λ_e をとった. なお, 生地が 10°C以上の測定には発酵による体積膨張の影響が生じないように酵母を添加していない生地を用いた. 凍結温度 θ_{fr} (=-3.2°C)以上の領域では温度の上昇とともに有効熱伝導度が徐々に高くなるが, デンプンの糊化(澱粉と水の分散系を加熱する際に, 温度の上昇とともに澱粉粒が吸水して次第に膨張し, 最終的に崩壊してゲル状に変化する不可逆現象)が始まる温度 θ_{ge} (=56°C)以上では, ほぼ一定値をとる. さらに, 一度高温まで昇温した生地は, 温度を下げてても有効熱伝導度はあまり変わらない(記号 ●). 澱粉は糊化する際に澱粉粒子が周囲の自由水を吸着して膨潤することにより, 生地内部の自由水の割合は減少して結合水の割合が増加する現象が起こる[11]. その変態の過程で澱粉糊化後の生地の有効熱伝導度は, 生地を再度下げて糊化する以前の生地の有効熱伝導度には戻らず, 高い値を示したものと考えられる. また, 低温度域におけるパン生地の有効熱伝導度は, 凍結温度付近で急激に変化している. 凍結後の有効熱伝導度は凍結前よりも2倍程度大きい値を示すようになり, 凍結温度以下の温度領域では温度の低下にともなって, 有効熱伝導度の値は低下している. パン生地の有効熱伝導度 λ_e について次式で表す.

$$\theta_s \geq \theta_{fr} ; \quad \lambda_e = 0.0020 \theta_s + 0.265 \quad (2-12)$$

$$\theta_s < \theta_{fr} ; \quad \lambda_e = -0.00061 \theta_s + 0.720 \quad (2-13)$$

2.4.2 パン生地の有効熱伝導度(発酵工程)

パン生地の温度 θ_s を変えて発酵させた場合における空隙率の変化を, 横軸に発酵時間 t , 縦軸に空隙率 ϕ をとって Fig. 2-4 に示す. パン生地の発酵工程においては酵母の活性化により生地内に多数の細かい空隙が形成されて大きい体積膨張が生じる. 生地はある空隙率の値までは見かけの体積が一様に増加するようすが観察される. これを越えて空隙率が大きくなると生成したガスが生地内から漏洩するようになり, 生地の空隙率は

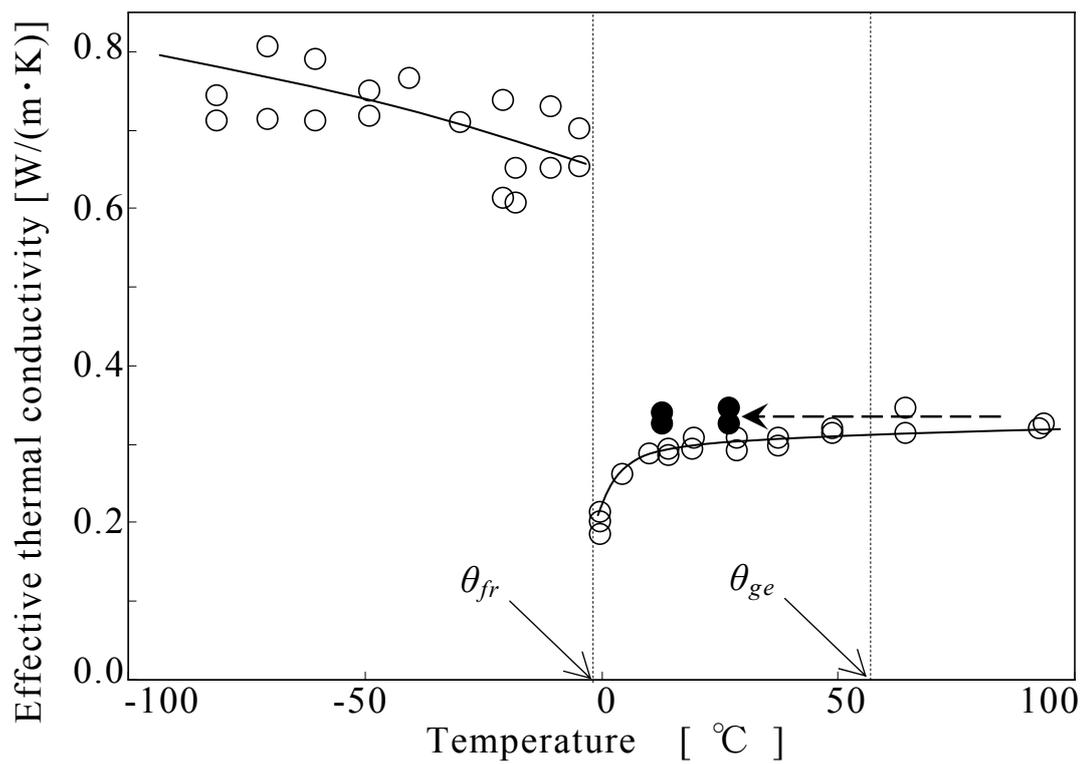


Fig. 2-3 Effective thermal conductivity of bread dough versus temperature.

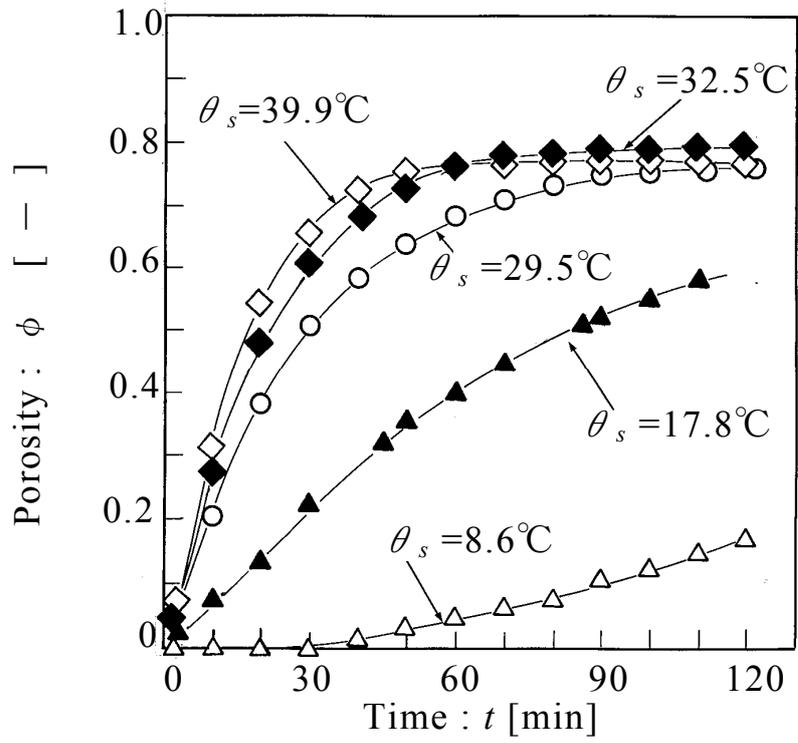


Fig. 2-4 Change of porosity of bread dough during proofing process.

飽和状態に近づく。

温度条件を 29.5℃とした発酵工程において、パン生地を経時的な有効熱伝導度 λ_e の変化を測定し、結果を Fig. 2-5 に示す。Fig. 2-4 の結果から時間の経過とともに空隙率の増加による体積膨張が進行していることが分かるが、それによっても生地の有効熱伝導度も低下する。発酵時間が 90 分を越える時点で測定値がばらついているのは、生成したガスの発生量が生地の持つガス保持力を越え、それは生地内部においても気泡間のガスの漏洩による生地の不規則な挙動を起こすためであると考えられる。

このような系の有効熱伝導度は、単に成分組成のみならず成分の三次元空間構造にも依存するため、さまざまな伝熱モデルが考案されている[12]。代表的な伝熱モデルを Fig. 2-6 に示す。とくに加工食品を解析の対象とする場合に、配合や製法によっても熱物性値は異なるため、サンプル数分の実測データを揃えることが事実上困難な際には、これらのモデルが便宜的に使用される。Fig. 2-7 には、Figs. 2-4, 2-5 の測定結果から横軸に空隙率 ϕ 、縦軸にパン生地の有効熱伝導度 λ_e をとり、Maxwell-Eucken の式による推算値と併せて示す。測定結果は、Maxwell-Eucken の式による推算値に近い値をとった。

2.4.3 パンクラムの有効熱伝導度

焼成したパンの内側の柔らかい部分であるクラムの有効熱伝導度を測定した結果を Fig. 2-8 に示す。横軸にはクラムの温度、縦軸には有効熱伝導度をとった。ここでも図中に一点鎖線で示す凍結温度 $\theta_{fr} (= -4.6^\circ\text{C})$ 付近においては、有効熱伝導度の著しい変化がみられ、クラムが凍結している場合、未凍結の状態と比較して 2 倍程度の値を示す。図中、凍結した角形食パンの凍結温度近傍において測定した値が著しく高い結果を示しているが、これは測定時においてプローブの昇温によりクラムが溶解し、潜熱の影響が出たためと考えられる。角形食パン(記号 ○) は山形食パン(記号 △) に比べて有効熱伝導度が高いが、これは角形食パン($\rho = 168.5 \text{ kg/m}^3$) が山形食パン($\rho = 147.6 \text{ kg/m}^3$) よりみかけの密度が大きく、この密度差により有効熱伝導度に差が生じていると思われる。角形食パンと山形食パンのクラムの有効熱伝導度を Fig. 2-5 に示したパン生地の発酵終了時(50~60 分)における有効熱伝導度と比較すると、29.5℃近傍において、近い値を示していることが分かった。角形食パンの有効熱伝導度について式(2-14, 2-15)、山形食

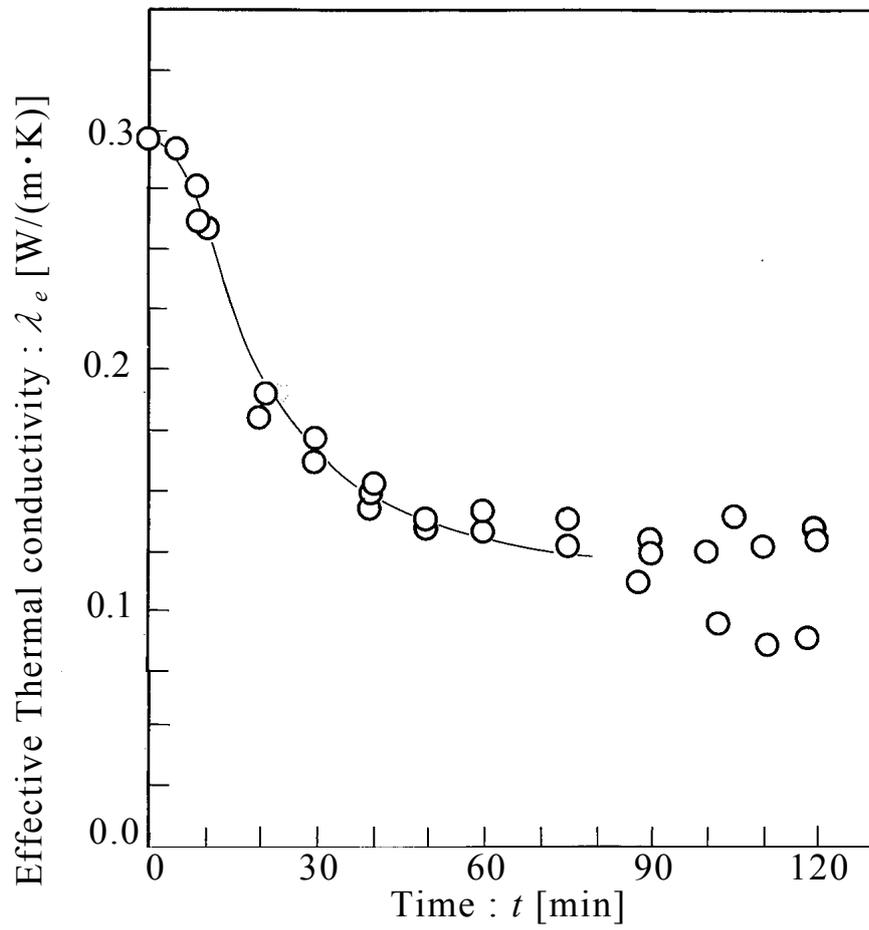


Fig. 2-5 Change of effective thermal conductivity of bread dough during proofing process. ($\theta_s=29.5^\circ\text{C}$)

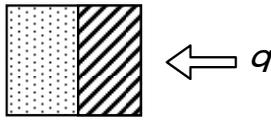
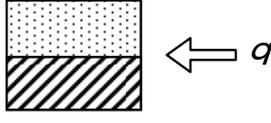
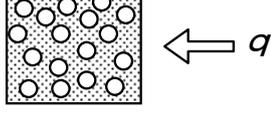
Model	Theoretical equation	Structure
Series	$\lambda_e = \frac{1}{(1-\phi)/\lambda_c + \phi/\lambda_d}$	
Parallel	$\lambda_e = (1-\phi) \cdot \lambda_c + \phi \cdot \lambda_d$	
Maxwell-Eucken	$\lambda_e = \lambda_c \frac{\lambda_d + 2\lambda_c - 2\phi(\lambda_c - \lambda_d)}{\lambda_d + 2\lambda_c + \phi(\lambda_c - \lambda_d)}$	

Fig. 2-6 Heat transfer models applied to food.

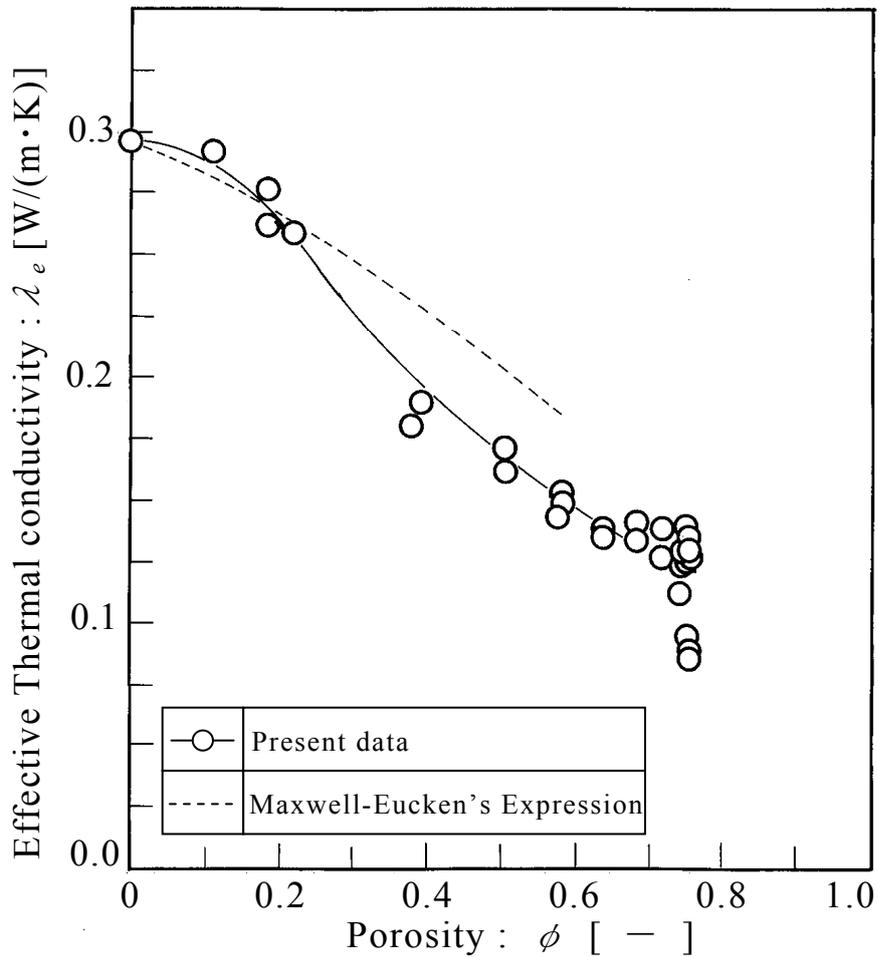


Fig. 2-7 Relationship of ϕ and λ_e of bread dough during proofing process. ($\theta_s = 29.5^\circ\text{C}$)

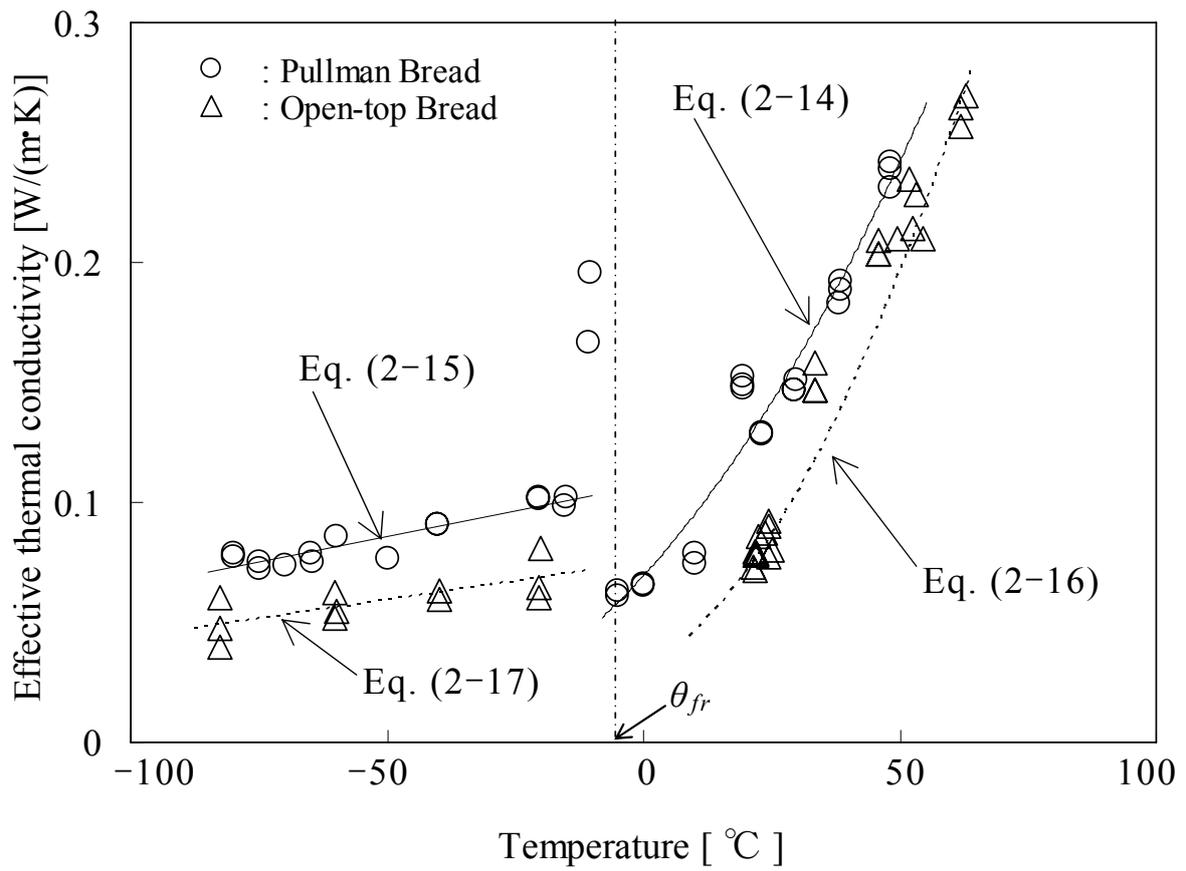


Fig. 2-8 Effective thermal conductivity of bread crumb.

パンの有効熱伝導度については式(2-16), (2-17)に表す. Fig. 2-8 には, 式(2-14), (2-15)を実線で示し, 式(2-16), (2-17)は破線で示した.

$$\theta_s \geq \theta_{fr} ; \quad \lambda_e = 0.0000223 \theta_s^2 + 0.00230 \theta_s + 0.0695 \quad (2-14)$$

$$\theta_s < \theta_{fr} ; \quad \lambda_e = 0.000434 \theta_s + 0.108 \quad (2-15)$$

$$\theta_s \geq \theta_{fr} ; \quad \lambda_e = 0.0000425 \theta_s^2 + 0.00119 \theta_s + 0.0302 \quad (2-16)$$

$$\theta_s < \theta_{fr} ; \quad \lambda_e = 0.000312 \theta_s + 0.0747 \quad (2-17)$$

パンの焼成工程では内部温度の上昇に伴って, 炭酸ガスの溶出・アルコールや水分の蒸発による体積膨張等の現象が見られるようになり, 水分については蒸発・凝縮による移動に伴う熱移動量が無視できなくなる. 今後には, 本研究では測定できていない焼成工程(40~100°C)における生地とクラムの有効熱伝導度を求めることが重要である. この点に関して, 陶らは, パンの水分容積率と温度をパラメーターとする有効熱伝導度の実験式を導き出している[8].

2.4.4 小倉餡の有効熱伝導度

小倉餡は, 製パンに使用している代表的な充填物であるが, その有効熱伝導度が測定された例は見られない. Fig. 2-9 に凍結温度 θ_{fr} ($=-4.1^\circ\text{C}$)を含む温度領域で測定した小倉餡の有効熱伝導度を示す. 横軸には小倉餡の温度 θ_s , 縦軸には有効熱伝導度 λ_e をとった. 凍結温度付近において測定値が大きく変化するのはパン生地, クラムの場合と同様であるが, 温度による差異が見られず, 定数として表す. Fig. 2-9 には, 式(2-18, 2-19)を実線で示した.

$$\theta_s \geq \theta_{fr} ; \quad \lambda_e = 0.465 \quad (2-18)$$

$$\theta_s < \theta_{fr} ; \quad \lambda_e = 0.965 \quad (2-19)$$

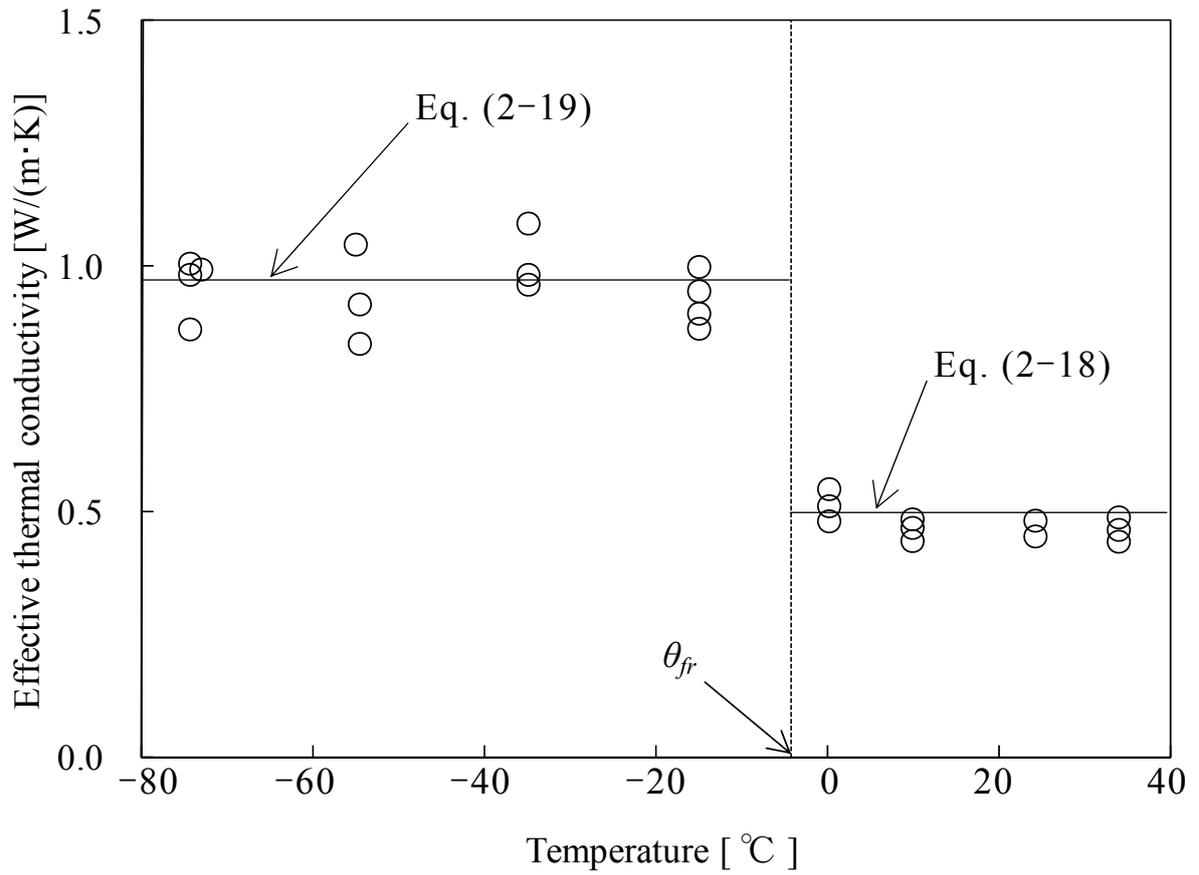


Fig. 2-9 Effective thermal conductivity of Ogura-ann (red bean curd).

2.5 結言

従来測定が困難であったパン生地やクラムの有効熱伝導度を測定し、以下の結論を得た。

- (1) 配合の段階で酵母を加えない生地を未発酵の状態におけるパン生地とみなし、その有効熱伝導度を凍結温度や澱粉の糊化温度を含む広範囲の温度域において測定し、温度の関数として表現することができた。得られたパン生地の有効熱伝導度は、含有する水の影響を強く受け、凍結温度前後にて冷凍生地の有効熱伝導度が未凍結の生地と比較して2倍程度の値をとることがわかった。
- (2) パン生地の発酵工程において空隙率が経時的に変化する状況下で有効熱伝導度を測定し、空隙率との相関を調べた。測定した値は、Euckenの式による推定値とよく一致した。
- (3) 空隙率が異なる2種の食パン(山形、角形)について、凍結温度を含む広範囲な温度域においてクラムの有効熱伝導度を測定し、その温度との依存性を調べた。得られたパン生地の有効熱伝導度は、未発酵の生地の場合と同様に、含有する水の影響を強く受け、凍結温度前後においてクラムの有効熱伝導度が未凍結のクラムの場合に比較して2倍程度の値をとることがわかった。

2.6 文献

- [1] 福山弦根, 佐藤勲, 斉藤卓志; 「パン焼成時の熱移動に対する水分移動の影響」, 日本機械学会熱工学講演会講演論文集, 01-9, (2001), pp.273-274.
- [2] R. Echigo, H. Yoshida and J. H. Yun; “Transient Heat and Mass Transfer with Condensable Vapor in Porous Media”, Proc. 10th Int. Heat Transf. Conf., vol. 5, (1994), pp.231-236.
- [3] Karin Thorvaldsson, Christina Skjoldebrand; “Water Diffusion in Bread during Baking”, Lebensm.-Wiss. U.-Technol., 31, (1998), pp.658-663.

- [4] Nantawan Therdthai, Weibiao Zhou; “Recent Advances in the Studies of Bread Baking Process and Their Impacts on the Bread Baking Technology”, Food Sci. Technol. Res., 9(3), (2003), pp.219-226.
- [5] 日本熱物性学会編; 「新編熱物性ハンドブック」, (2008), p.524, 養賢堂.
- [6] 唯野哲男, 陶慧, 安田洋也; 「パンの有効熱伝導度に関する研究」, 日本大学農獣医学部学術研究報告, 47, (1990), pp.202-209.
- [7] 陶慧, 鈴木功, 唯野哲男; 「焼成中の食パンと焼成後の食パン製品の有効熱拡散率の相違に関する研究」, 日本大学農獣医学部学術研究報告, 52, (1995), pp.175-179.
- [8] 陶慧, 鈴木功; 「食パンの高温域における有効熱伝導度の測定」, 日本食品保蔵科学会誌, 32(4), (2006), pp.141-145.
- [9] 小林清志, 山田盛二, 高野孝義; 「粘弾性体の熱伝導率測定に関する研究」, 第 12 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1991), pp.351-354.
- [10] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger; “Conduction of Heat in Solids”, Second, Ed., (1959), pp.342-343, Oxford University Press.
- [11] 二國次郎; 「澱粉科学ハンドブック」, (1977), p.34, 朝倉書店.
- [12] 日本熱物性学会編; 「新編熱物性ハンドブック」, (2008), p.531, 養賢堂.

第3章 冷凍生地製パン法における冷凍条件

3.1 緒言

冷凍生地製パン法における熱的操作にともなう生地の冷凍障害の問題はまだ十分に解決されていない。冷凍パン生地の製造工場ではサイズ，形状，配合が異なる食パンやロールパン，デニッシュなどの製品アイテムを連続的に生産し，店舗や焼成工場では必要数のみの冷凍パン生地を解凍し，発酵以降の加工操作を行うが，生地が経た温度履歴によっては，設計通りの発酵ガス量が得られなかったり，製品にした際に内相が粗れたりする品質劣化を生じることがある。

パン生地が受ける発酵ガス量の低下や脆弱な生地構造などの冷凍障害は，主に冷凍時における凍結速度と保存時まで含めた時間における最低到達温度(履歴における最低温度)に起因するとされている[1, 2]。酵母はパン生地の凍結温度より低い温度域において活性が消失する。また，冷凍時における氷結晶の成長にともなって生地の構造が脆弱になる。そのため，発酵ガスを保持しきれずに体積収縮などの不具合が生じる。

本章では，パン生地の冷凍工程における凍結速度と最低到達温度に注目し，これらの要因がパン生地に障害を与えるメカニズムと最終製品に与える影響について検討する。パン生地を冷凍させる際に生地内に生じる凍結速度分布や温度履歴を数値計算によって調べる。また，凍結速度と最低到達温度をパラメーターとして製造条件を変えた製パンを行い，比較検討する。酵母の活性状態と生地の構造の両面から冷凍障害を低減させる熱的操作法を見出し，生産性を向上する工場での生産条件について示唆する。

3.2 実験方法

3.2.1 試料

実験に用いたパン生地は、冷凍生地製パン法において一般的に採用されているストレート法による食パン配合 (Table 3-1) に従って製造した。一次発酵を行い、発芽、活性化させた酵母は、冷凍耐性が著しく低下するため [3, 4]、一部の原材料をあらかじめ混合する中種法は連続製パンラインで通常採用されているものの、生地を冷凍する操作に対して適していない。パン生地は全ての原材料をミキサーによって混合・混捏し、所定の重量 (190g, 60g) に分割した後丸目を行った。

丸目を行った生地玉をトレーに並べ、プログラマブルに $-15\sim-40^{\circ}\text{C}$ の温度帯で温度調整が可能な低温槽内で 180 分冷凍した。使用したトレーの材質と熱物性値を Table 3-2 に示す。冷凍した生地の保存期間は 6~28 日とした。

上記の保存期間を経過したパン生地は、 0°C での解凍、 25°C での復温の後に再丸目を行って食パン用の型に詰めて整形し、最終発酵、焼成、冷却の工程を経て、食パン (角形; 生地重量=190g×6 個, 山形; 生地重量=190g×1 個), バンズ (生地重量=60g×1 個) に仕上げた。

本研究における数値計算で使用したパン生地の熱物性値 (有効熱伝導度 λ_e , 密度 ρ , 比熱 C_p , 生地凍結時の潜熱 H , 凍結温度 θ_{fr}) には、第 2 章にて測定した値を用いた (Table 3-3)。また、パン生地の有効熱伝導度 λ_e と比熱 C_p は、次の実験式で温度の関数として与えた。

$$\theta \geq \theta_{fr} \quad \lambda_e = 0.0020 \theta + 0.265 \quad (3-1)$$

$$C_p = 0.00405 \theta + 2.007 \quad (3-2)$$

$$\theta < \theta_{fr} \quad \lambda_e = 0.00061 \theta + 0.720 \quad (3-3)$$

$$C_p = 0.00788 \theta + 1.345 \quad (3-4)$$

3.2.2 測定方法

解凍した冷凍パン生地に関して、発酵による炭酸ガス発生量と生地内部の内蔵ガス量の測定には、アトー製のファーモグラフ (型式: AF-1000) を使用した。また、生地を凍結切断、グルタルアルデヒドによる固定、リン酸緩衝液による洗浄に続いて、50~100%エ

Table 3-1 Dough formula. (white bread)

Ingredient	Weight percent	Ingredient	Weight percent
Flour	53.9	Shortening	3.23
Water	34.5	Salt	1.08
Yeast	3.20 - 4.28	Nonfat dry milk	1.08
Yeast food	0.27		
Emulsifier	0.05	Sugar	2.69

Table 3-2 Material and thermophysical properties of trays.

	Aluminum	Styrofoam
Density, ρ [kg/m ³]	2710	15.9
Specific heat capacity, C_p [kJ/(kg·K)]	0.904	2.8
Thermal conductivity, λ [W/(m·K)]	222	0.042

Table 3-3 Thermophysical properties of bread dough.

Density, ρ [kg/m ³] (at 25°C)	1110 ± 10
Latent heat of melting, H [kJ/kg]	88.8 ($\theta = \theta_{fr}$)
Freezing point, θ_{fr} [°C]	-3.2

タノールによる脱水，酢酸イソアミルへの置換後，臨界点乾燥を行い，得られた試料を金蒸着した後，トプコン製走査型電子顕微鏡(型式：ALPHA-30A)により10～15kVで観察した。

冷凍生地を用いて製造した食パンのテクスチャーの測定には，アイテクノ製物性解析システム(型式：IPC-134A)を使用した。円筒形のプランジャー(ϕ 13mm)で16mmにスライスした試料を一定条件(圧縮率:56.3%)で圧縮した際の最大応力を測定して硬さを求めた。焼成後の製品については，体積および形状(長径，短径，高さ)をアステックス製の非接触式ボリューム計測器(型式：SELNAC-VM)を使用して，得られた体積の数値を製品の重量で除して製品の比体積を求めた。内相の評価については，ニレコ製の画像解析装置(型式：LUZEX-UⅢ)を用いて気泡の面積を測定し，その平均値と標準偏差を求めた。

3.3 数値計算

3.3.1 解析モデル

パン生地の冷凍工程における生地内部の温度履歴を把握することを目的として，パン生地を冷凍する際の熱移動問題について直接差分法によるパン生地内部の温度分布変化の数値計算を行った。パン生地の形状は半径 r ，高さ z_{top} ，半径を示す部分の高さ z_{cet} を測定した。パン生地の断面形状の一例(生地重量=190g)を Fig. 3-1 に示す。計算では，パン生地の断面形状が $R=0$ ， $Z=z_{cet}$ を中心とする楕円 ($0 \leq Z \leq z_{top}$ ， $-r \leq R \leq r$) で表される軸対称体であるとし，座標は円筒座標を用いた。すなわち，熱伝導計算は軸方向(Z 方向)と半径方向(R 方向)の二次元について行った。仮定として，生地が凍結する過程において凍結率は温度に依存せず，氷結晶の安定核が形成された後は，常に凍結温度において液相から固相への相変化が生じるものとして潜熱を扱い，計算を行った。生地形状の値(半径 r ，高さ z_{top} ，半径を示す部分の高さ z_{cet})は，実測値から求めた生地重量の関数として与えた。本研究において使用したパン生地の形状を Table 3-4 に示す。

Fig. 3-1 は，パン生地の冷凍過程において，底部の生地の一部が凍結温度に至った時点での温度分布を示す。各メッシュは，計算過程において求められた温度によって初期

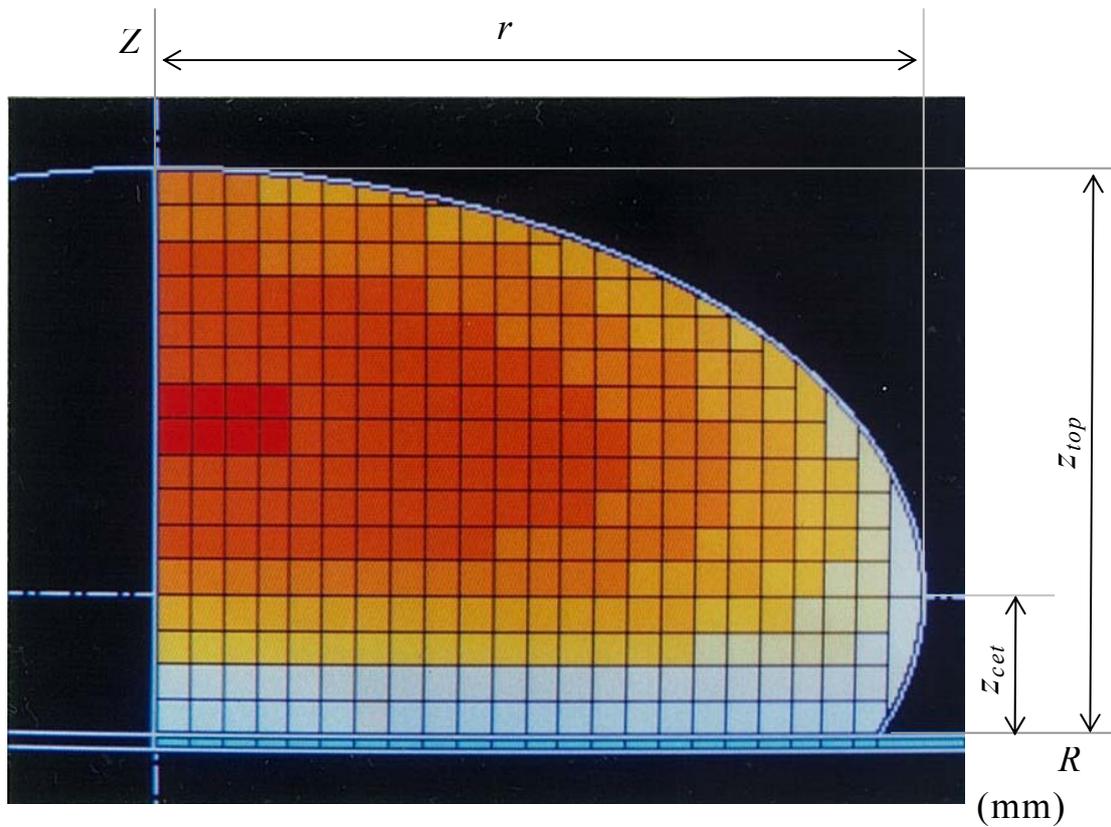


Fig. 3-1 Temperature distribution of bread dough at a time point when the bottom part reached the freezing temperature in a freezing process. Dough mass=190g

Table 3-4 Size of bread dough.

Dough mass	r	z_{top}	z_{cet}
60 g	30 mm	28 mm	8 mm
190 g	47 mm	34 mm	9 mm

温度から凍結温度までを8等分して段階的な暖色で表示した。いっぽう凍結温度から計算上で設定した最低温度までを8等分して段階的な寒色で表示した。この図では、最高の温度(赤色)が18℃、最低の温度(水色)が約-4℃、凍結温度(白色)が-3.2℃にあたる。

3.3.2 熱伝導方程式

円筒座標を用いて、軸および半径方向への熱移動を表す基礎方程式は、

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) + H \quad (3-5)$$

である。ここにおいて、 θ はパン生地温度(℃)、 ρ は密度(kg/m³)、 C_p は比熱(J/(kg·K))、 λ は熱伝導度(W/(m·K))、 H は生地の凍結時における潜熱(W/m³)、 t は時間(s)、 z は軸方向長さ、 r は半径方向長さである。

初期条件($t=0$)として均一な温度分布を有する状態($\theta = \theta_0$)にあるパン生地が、代表長さ l 、厚さ z_{tr} のトレイ上に配され、トレイとともに所定温度に設定された冷凍庫内で対流熱伝達によって冷却される場合について考える。境界条件として熱媒体である空気の温度と流速を与え、熱伝達率を算出した。

$$\text{初期条件 } t=0 \quad \theta = \theta_0 \quad (3-6)$$

$$\text{境界条件 } t > 0, \quad 0 < Z \leq z_{tr} \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial Z} = h(\theta - \theta_g) \quad (3-7)$$

$$t > 0, \quad Z > z_{tr} \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial R} = h(\theta - \theta_g) \quad (3-8)$$

パン生地とトレイ表面における熱伝達率 h はそれぞれ式(3-9)と式(3-10)によって与えた。

$$h d / \lambda = 2 + 0.60 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (3-9)$$

$$h l / \lambda = 0.664 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (3-10)$$

ここで、 Pr と Re は、それぞれパン生地の外径 d (式(3-9))と風の流れ方向におけるトレイの長さ l (式(3-10))を代表長さとする Reynolds 数と Prandtl 数である。式(3-9)は、球周りの強制対流熱伝達に関する Ranz-Marshall の実験式、式(3-10)は水平平板におけ

る強制対流熱伝達の式である。実際のパン生地を冷凍するには、前面から後方へ冷気が循環する構造の冷凍庫を使用しており、パン生地およびトレーは概ね水平方向の流れ場で冷却される。風速 u は、無指向性風速計で実測した。式(3-9)において、直径 d は対象となる生地と同重量の球形生地の相当径を代入した。

3.3.3 パン生地の温度変化

初期状態において一様な温度に保たれたパン生地を冷凍庫内で冷却する際の生地の内部の温度変化について、実測値と計算結果を併せて Fig. 3-2 に示す。横軸には冷凍開始後の時間、縦軸には温度をとった。図中の生地の温度は、中心軸上で底面から高さの 1/4 の位置における温度である。境界条件には任意の温度を入力できるが、ここでは約 -30°C に設定された実際の冷凍庫内温度の実測値を入れて計算した。これは本プログラムの利用法の一つとして、実際の生産ラインを流れる製品の品質管理手法として位置づける意味がある。生産設備の運転状況の把握からトラブル時におけるパン生地の冷凍障害の予測および対策といった目的に活用するためである。生地は凍結温度 θ_{fr} 近傍まで低下した後いったん温度変化が緩やかになり、凍結した時点から再度温度が低下する。計算結果と実測値にはよい一致が見られ、本計算がパン生地の冷凍過程をよく再現することがわかった。

本研究においては、所定の重量(190g)に分割して丸目を行いトレーに並べた生地玉を、いったん、同一条件で酵母の活性がほぼ停止する 0°C まで冷却した後、プログラマブルに $-15\sim-40^{\circ}\text{C}$ の温度帯で温度調整が可能な冷凍庫内で冷凍した。最低到達温度の違いによる影響を取り除く目的で同温度を -15°C として条件を揃えたので、冷凍庫内の風速やパン生地を載せるトレーの材質や厚さ z_{tr} を変えることによって凍結速度を変化させた。冷凍庫にてパン生地を冷凍する際の操作条件を Table 3-5 に示す。使用したトレーと冷凍庫の温度および風速の組み合わせで①～⑩の条件を設定した。

Figs. 3-3 a)～c)に、冷凍庫内の風速 u やトレーを変えて生地を冷凍させた場合に冷凍したパン生地内部に生じる凍結時間の RZ 分布を示す。 R はパン生地の半径方向長さ、 Z は垂直軸方向の長さである。 RZ 平面には生地の中心軸を通る断面をとった。図の R

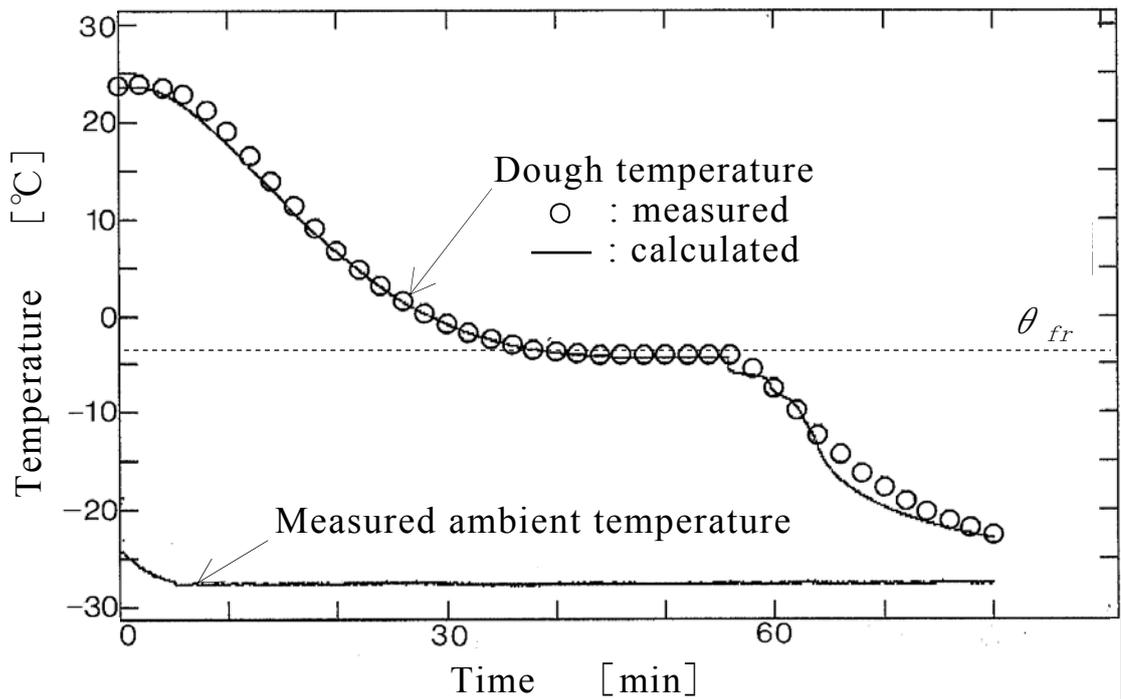
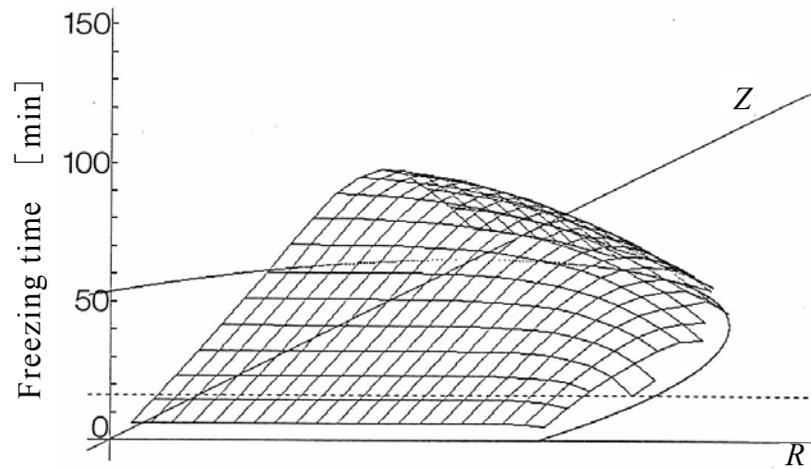


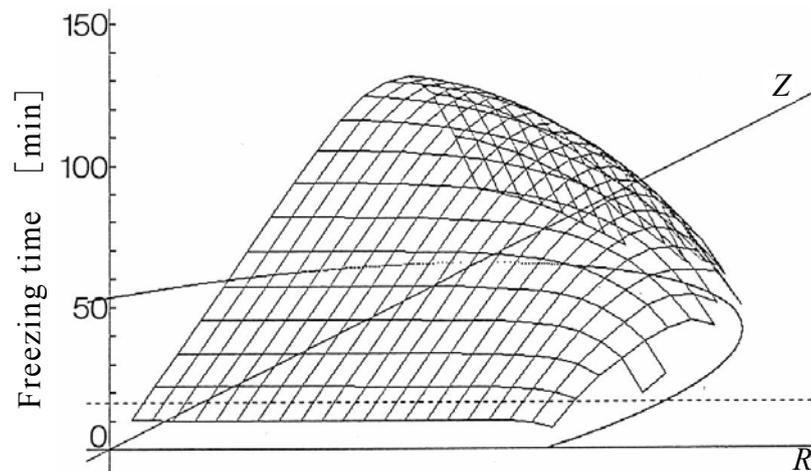
Fig. 3-2 Temperature change of dough during freezing.
Dough mass = 190g

Table 3-5 Freezing conditions for bread dough.

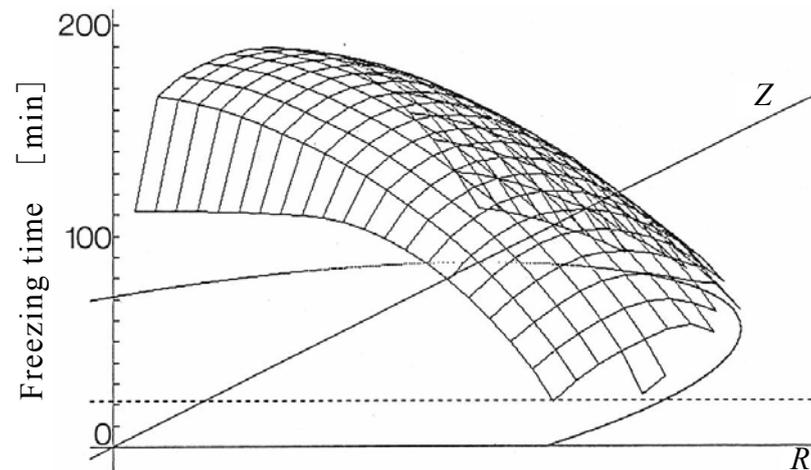
Tray		Aluminum ($z_{tr} = 2 \text{ mm}$)			Styroform ($z_{tr} = 20 \text{ mm}$)	
Refrigerator temp.		-10°C (180min)	-15°C (180min)	-40°C (10 min) ⇒ -15°C (170min)	-15°C (180min)	-40°C (15 min) ⇒ -15°C (165min)
u (m/s)	0.2	①	③	⑤	⑦	⑨
	1.0	②	④	⑥	⑧	⑩



a) dough frozen on an aluminum tray, $u = 1.0$ (m/s);④



b) dough frozen on an aluminum tray, $u = 0.2$ (m/s);③



c) dough frozen on a styrofoam tray, $u = 0.2$ (m/s);⑦

Fig. 3-3 Freezing time distribution of bread dough during freezing.
(Dough mass = 190g, $\theta_g = -15^\circ\text{C}$)

Z平面上には生地断面の輪郭を実線で、半径を示す部分の高さ z_{cet} を破線で示した。

Figs. 3-3 の a), b), c) は、それぞれ Table 3-5 における④, ③, ⑦の条件によって冷凍したパン生地内部の凍結時間の分布を示す。Figs. 3-3 a)~c) を比較すると、a) と b) のアルミニウム製トレーで生地を冷凍させた場合には、トレーに接触している生地底部から凍結し始め、中心軸上で生地高さの 3/4 程度の部位が最も遅く凍結することがわかる。風速 u が速い場合 a) には、遅い場合 b) と比較して凍結時間分布の形状はほぼ同様であり、全体的に凍結時間が短くなっていることが分かる。熱伝導性の低い c) の発泡スチロール製トレーで冷凍させた場合には、底面近傍の部位の凍結が著しく遅く、生地全体が凍結するために長い時間を必要とする。最終的に凍結するパン生地の部位も中心軸上で生地高さの 1/4 程度の部位であることがわかる。

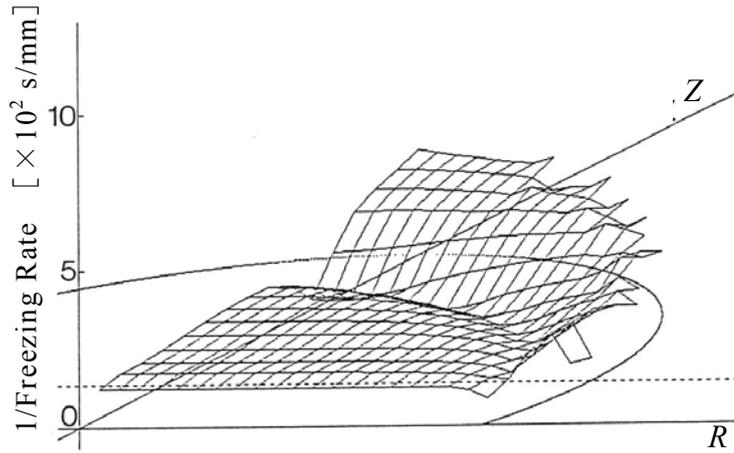
3.3.4 パン生地の凍結速度

パン生地に限らず水分を含んだ物質を冷凍する際に生成する氷の結晶は、その成長とともに構造組織の破壊を助長する。凍結速度は、その氷結晶の成長と深い関係がある。これまでも緩慢な冷凍方法では生地構造が破壊されるとして、そのような冷凍方法は敬遠されてきた。凍結速度については単位時間当りの被冷却物の低下温度などに注目して議論されている場合もあり、統一的な見解はないのが現状である。

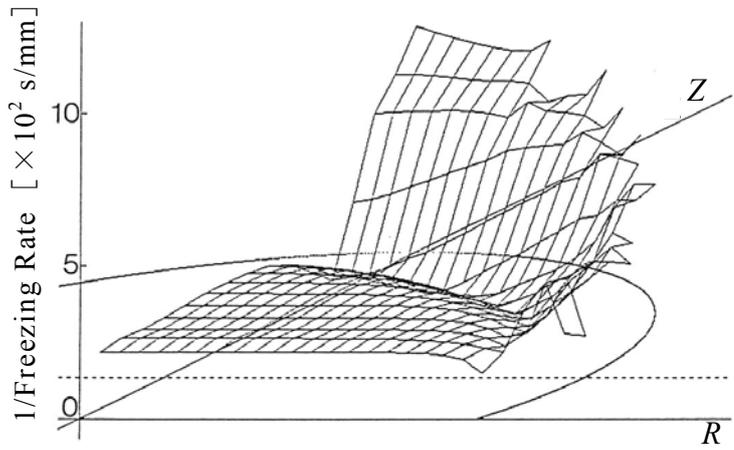
本研究で定義する凍結速度 v は、各部位の微小区間における生地が凍り始めてから凍り終わるまでの時間でその微小区間の代表長さを除したものである。これは物理的には凍結界面の境界層の移動速度を意味する。

Fig. 3-4 に、風速とトレーの材質を変えて生地を冷凍させた場合の生地内部における凍結速度 v の分布を凍結速度 v の逆数の形 ($1/v$) で示す。 R はパン生地の半径方向長さ、 Z は垂直軸方向の長さである。 RZ 平面には生地の中心軸を通る断面をとった。図の RZ 平面上には生地断面の輪郭を実線で、半径を示す部分の高さ z_{cet} を破線で示した。縦軸には凍結速度 v の逆数 ($1/v$) をとったので、凍結速度が遅く緩慢冷凍される部位は高い値で示される。

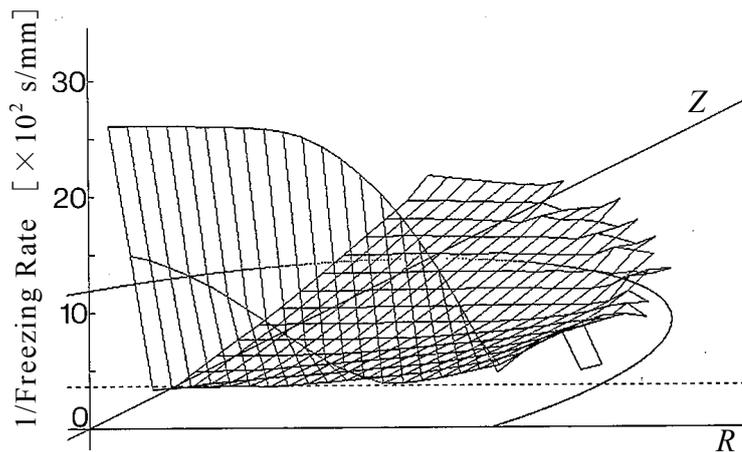
§ 3.3.3 で述べた Figs. 3-3 a), b), c) の場合と同様に、Fig. 3-4 中の a), b), c) は、それぞれ Table 3-5 における④, ③, ⑦の条件によってパン生地を冷凍した場合の



a) dough frozen on an aluminum tray, $u = 1.0$ (m/s);④



b) dough frozen on an aluminum tray, $u = 0.2$ (m/s);③



c) dough frozen on a styrofoam tray, $u = 0.2$ (m/s);⑦

Fig. 3-4 Freezing rate distribution of bread dough during freezing.
(Dough mass = 190g, $\theta_g = -15^\circ\text{C}$)

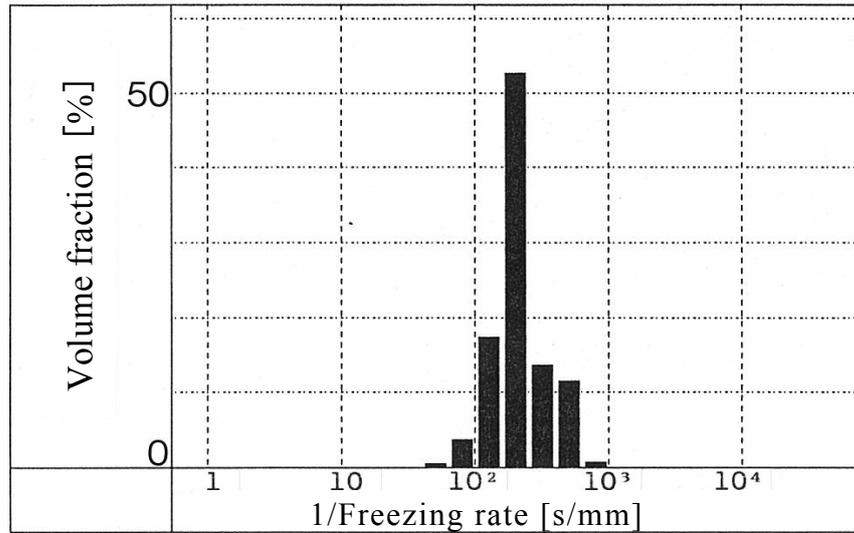
ものであり，ここではパン生地内部の凍結速度の分布を示す．Figs. 3-4 の a)～c)を比較すると，a)と b)のアルミニウム製トレーで生地を冷凍させた場合には，上側表面近傍が若干緩慢冷凍になっている程度で速度が概ね一定の急速冷凍に対応する．c)発泡スチロール製トレーで冷凍させた場合では，底面近傍で凍結速度が著しく遅い．また，a)風速のみを上げた場合には，b)と比較して凍結速度分布の形状はほぼ同様に全体的に凍結速度は上昇している．

これらの冷凍条件によって生地内部に生じる各凍結速度について，生地全体の重量に対する占有体積割合の分布を Figs. 3-5 a), b)に示す．縦軸には生地全体の重量に対する占有重量の割合をとり，横軸には凍結速度の逆数を対数目盛りでとっている．発泡スチロール製トレーを使用した場合では凍結速度が遅い方へシフトしているほか， $(1/v)$ の範囲が $10^{1.8} \sim 10^{3.6} [s/mm]$ と比較的広い範囲に及んでおり，同一生地内においてもその部位によって障害の程度に差が生じることが推測できる．

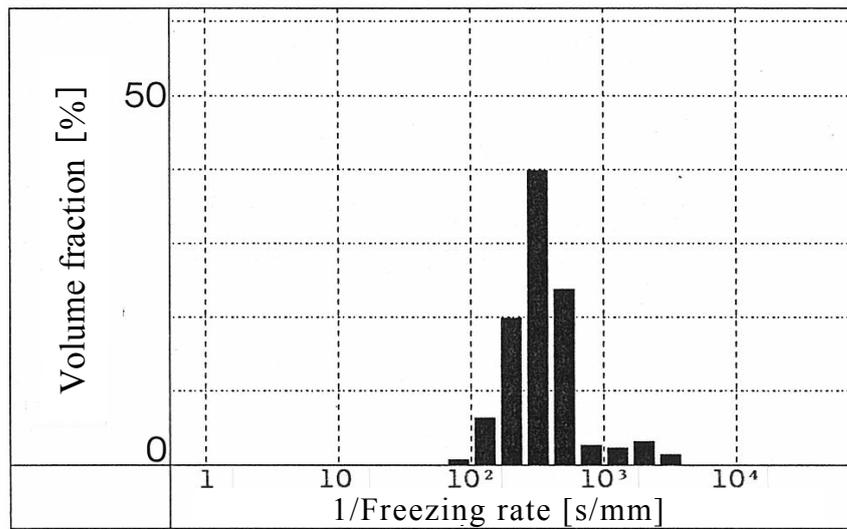
3.4 凍結速度がパン生地の障害に及ぼす影響

3.4.1 生地の冷凍障害

凍結速度に起因する生地の冷凍障害について述べる．冷却条件を変えてパン生地をさまざまな凍結速度で冷凍し，保存後に解凍して生地のガス発生量と保持率を測定した．その結果を Fig. 3-6 と Fig. 3-7 に示す．これらの図の横軸には凍結速度の逆数を対数目盛りでとって示した．190g のパン生地を 8.0g ずつに分割して 2 枚の銅板(100mm×100mm×t 3mm)に挟み，1mm の厚さの薄板状にして冷凍した．生地全体がほぼ同時に凍結するため，生地冷凍時の温度測定値から [凍結温度±0.1℃] の温度帯の通過時間を代表長さの 1mm で除して凍結速度を求めた．§3.3 に記載の数値計算による場合と本節の測定による場合では計算方法がたがいに異なるため，数値計算で得られる凍結速度の値と本節の測定値からの算出値とは絶対値では比較できないが，ガス発生量は極端に凍結速度が遅い ($(1/\text{凍結速度})$ が $4 \times 10^3 (s/mm)$ 以上の) 部分を除き，凍結速度の低下にとまって緩やかな上昇傾向を示す．いっぽう，ガス保持率 (= (内蔵ガス量/発生ガス量) ×



a) dough frozen on an aluminum tray; ③



b) dough frozen on a styrofoam tray; ⑦

Fig. 3-5 Volume fraction of bread dough freezing rate during freezing.
 (Dough mass = 190g, $\theta_g = -15^\circ\text{C}$, $u = 0.2$ (m/s))

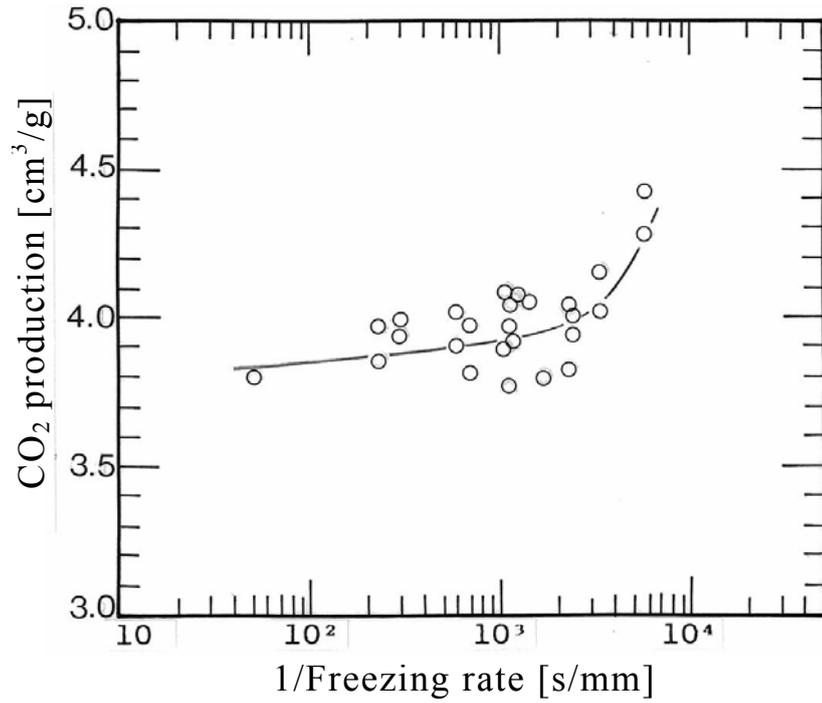


Fig. 3-6 Effect of freezing rate on the CO₂ production of bread dough.

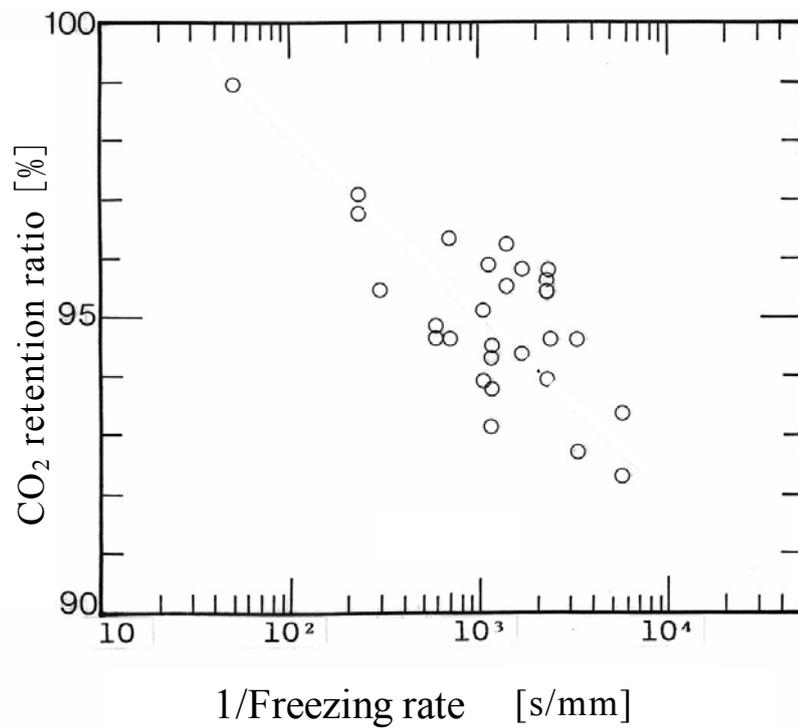


Fig. 3-7 Effect of freezing rate on the CO₂ retention ratio of bread dough.

100) は、凍結速度の低下にともない直線的に低下している。生地構造の破壊が進行した結果、生地からのガス漏洩量が増加していることがわかる。

§ 3.3.4 に述べたように、同一の生地の内部でも部位によって凍結速度に差が生じるが、生地の構造にどのような影響を及ぼしているのかを電子顕微鏡により観察した。Fig. 3-8 は、Table 3-5 中⑥の冷凍条件(アルミニウムトレイ使用、風速 $u=1.0\text{m/s}$ 、冷凍庫内温度 $=-40^{\circ}\text{C}$ (10min) $\Rightarrow -15^{\circ}\text{C}$ (170min))によってパン生地を冷凍させた場合において、生地内部に生じる凍結速度の分布を計算した結果である。 R はパン生地の半径方向長さ、 Z は垂直軸方向の長さである。 RZ 平面には生地の中心軸を通る断面をとり、縦軸は凍結速度の逆数 ($1/v$) をとった。試料は Fig. 3-8 に示した (R, Z) が記号○と◎に相当する部位からサンプリングした。パン生地の中心軸上で、記号○は生地表面から 1mm の深さにおける部位、記号◎は 13mm の深さにおける部位である。計算結果によると記号◎の部位における凍結速度は記号○の部位と比較して 8 倍ほど高い。Figs. 3-9 a), b) にそれぞれ記号◎の部位と記号○の部位からサンプリングした生地に § 3.2.2 に記述した前処理を行って得られた SEM 画像を示す。これらの画像からは、凍結速度が遅い部位の生地では澱粉粒を被っているグルテンネットワークがくびれて、細く脆弱になっているようすが観察できる。

3.4.2 製パン試験

Fig. 3-10 に、パン生地を冷凍した際の平均凍結速度 v_{av} とその生地で製パンして得られた山形食パンの比体積との関係を示す。ここで、平均凍結速度 v_{av} とは、部位によって異なる凍結速度の重みをつけた生地を全体にわたって平均したものである。図の横軸には、平均凍結速度の逆数 ($1/v_{av}$) を対数目盛でとった。測定結果は、山形食パンの比体積が平均凍結速度の逆数に反比例しており、凍結速度が速い条件下において比体積の大きい製品が得られることがわかった。これは生地のガス保持力の測定結果からも推測できることであるが、急速凍結させた生地では発酵工程で発生したガスを生地内部に十分に内蔵しており、その結果、比体積の大きい(気泡を多く含む)パンが得られたものと考えられる。

冷凍パン生地を用いて製造した角形食パンに関して、クラムの部分の硬さの測定を行

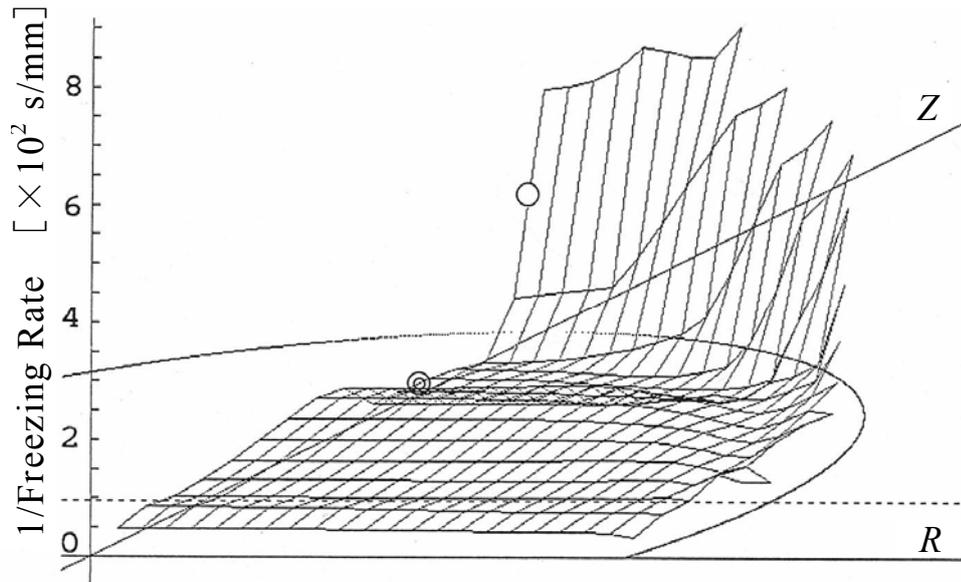


Fig. 3-8 Calculated distribution of freezing rate in bread dough.
 ○ : Sampling point ($1/\nu = 2.5 \times 10^3 \text{ s/mm}$)
 ◎ : Sampling point ($1/\nu = 0.3 \times 10^3 \text{ s/mm}$)

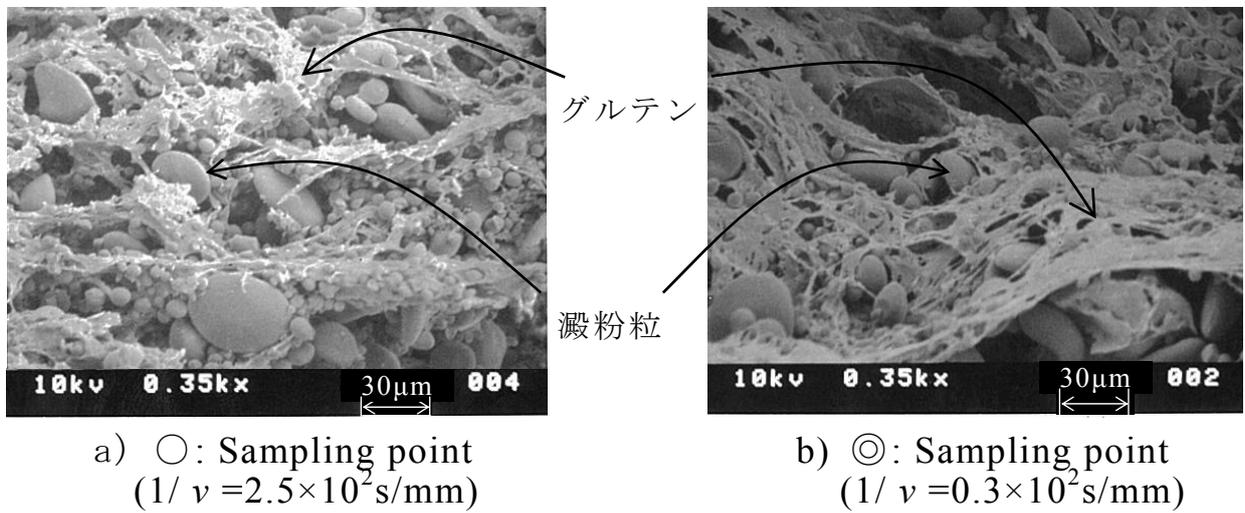


Fig. 3-9 SEM images of bread doughs after freezing process a) and b).

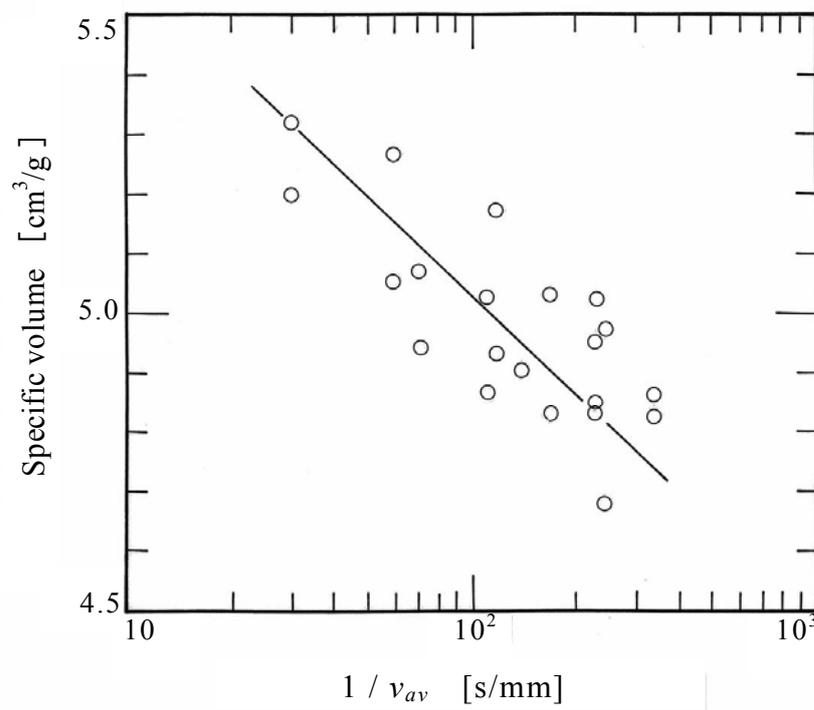


Fig. 3-10 Specific volume of open-top bread made from frozen dough.

った。この硬さも含めテクスチャー解析で得られるレオロジカルな特性値は、実際にパンを食べたときの食感と密接に関連しており、試料を食して比較するパネル試験等の試料の同時比較ができない試料に関して検討する際には非常に有効なデータを得ることができる。

焼成後のパンは老化してクラムの硬化が経時的に進むため、Fig. 3-11 には横軸に焼成後の経過日数を取り、クラムの硬さの推移を示した。凍結速度の低下にともない、総じて硬化も顕著であった。一般的に柔らかいソフトな食感のパンは肌目が細かくよく膜伸びしていることが特徴であり、冷凍障害によって生地構造が破壊され十分に伸びなくなったパン生地ではソフトな食感のパンが得難いことが Fig. 3-11 の結果から推察される。

冷凍生地を用いて作製した角型食パンについて、そのスライス面の内相の評価に関する測定結果を Fig. 3-12 に示す。横軸には平均凍結速度の逆数($1/v_{av}$)が対数目盛でとっており、縦軸には気泡の面積の平均値と標準偏差をとった。急速に凍結させ作製した冷凍生地による角型食パンは、気泡の面積の平均値が小さく(肌目が密)、標準偏差が小さい(肌目が揃っている)、一般的に高い評価の内相が得られていることが確かめられた。Fig. 3-13 には、凍結速度の異なる生地を 6 日間保存した後に解凍して製パンした山形食パンを 1 日後にスライスした断面の画像を示す。 $(1/v_{av})$ が大となる緩慢な冷凍条件下で生地を凍結させた d) の場合には、作製したパンの内相が粗れることが視覚的にも分かる。

3.5 最低到達温度がパン生地の障害に及ぼす影響

3.5.1 酵母の活性への影響

冷凍工程におけるパン生地の最低到達温度 θ_{ma} が酵母の活性に与える影響については、これまでも研究されてきたが [5, 6]、これらは異なる 2・3 点の温度で冷凍した生地について冷凍温度で保存した時間と酵母活性の経時変化の関係を調べたものであり、最低到達温度と酵母活性との関係を詳細に調べた報告は見られない。Fig. 3-14 には、異なる最低到達温度で 1 時間および 6 日間保存したパン生地について、解凍後の発酵工程にお

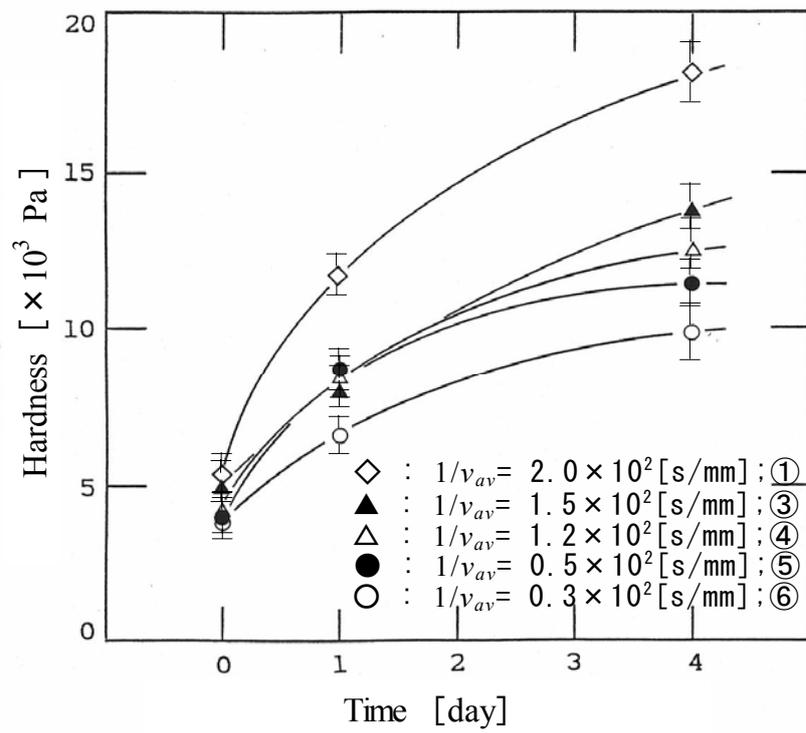


Fig. 3-11 Hardness changes in bread crumbs made from frozen dough.

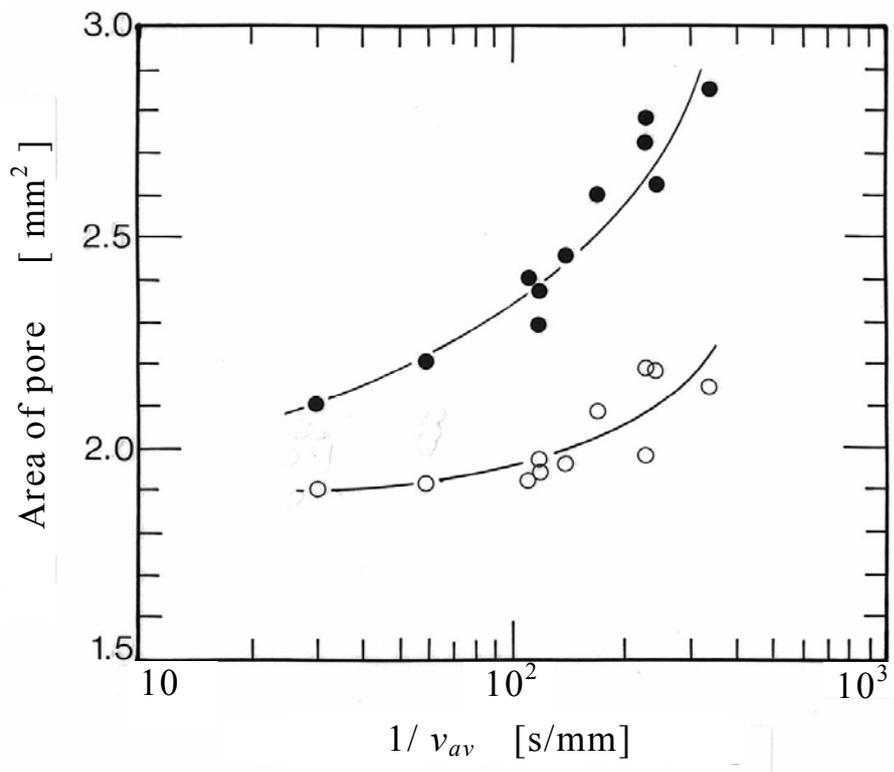
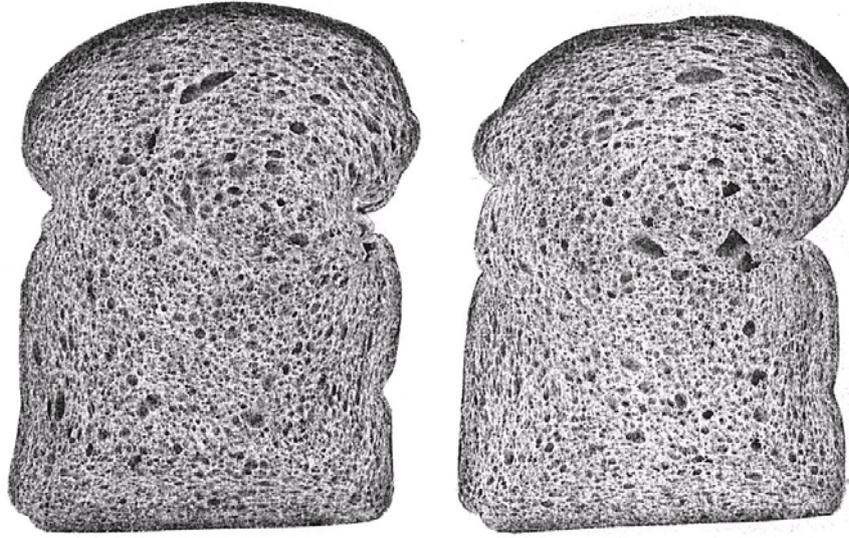
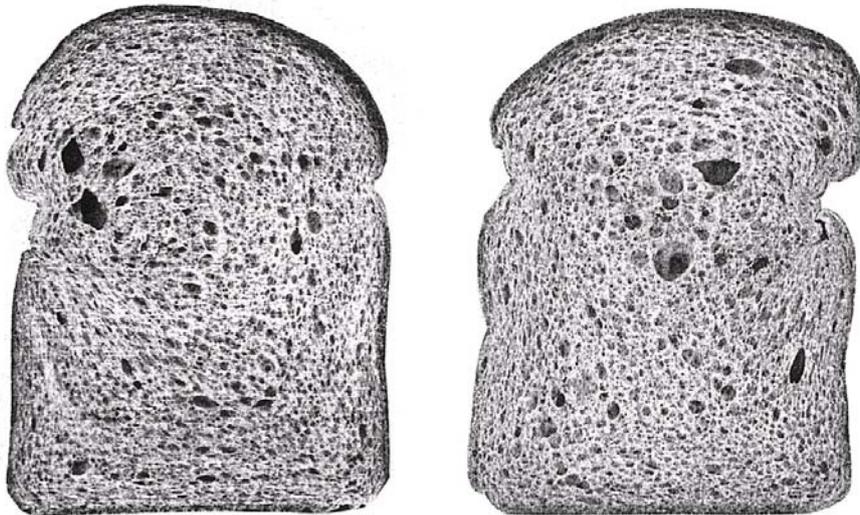


Fig. 3-12 Analysis of pores in bread made from frozen dough.
 ○: Means of the area
 ●: Standard deviation of the area



a) $1/v_{av} = 1.2 \times 10^2$ s/mm; ④ b) $1/v_{av} = 1.5 \times 10^2$ s/mm; ③



c) $1/v_{av} = 2.3 \times 10^2$ s/mm; ⑧ d) $1/v_{av} = 3.7 \times 10^2$ s/mm; ⑦

Fig. 3-13 Comparison of bread made from frozen dough stored for 6 days.

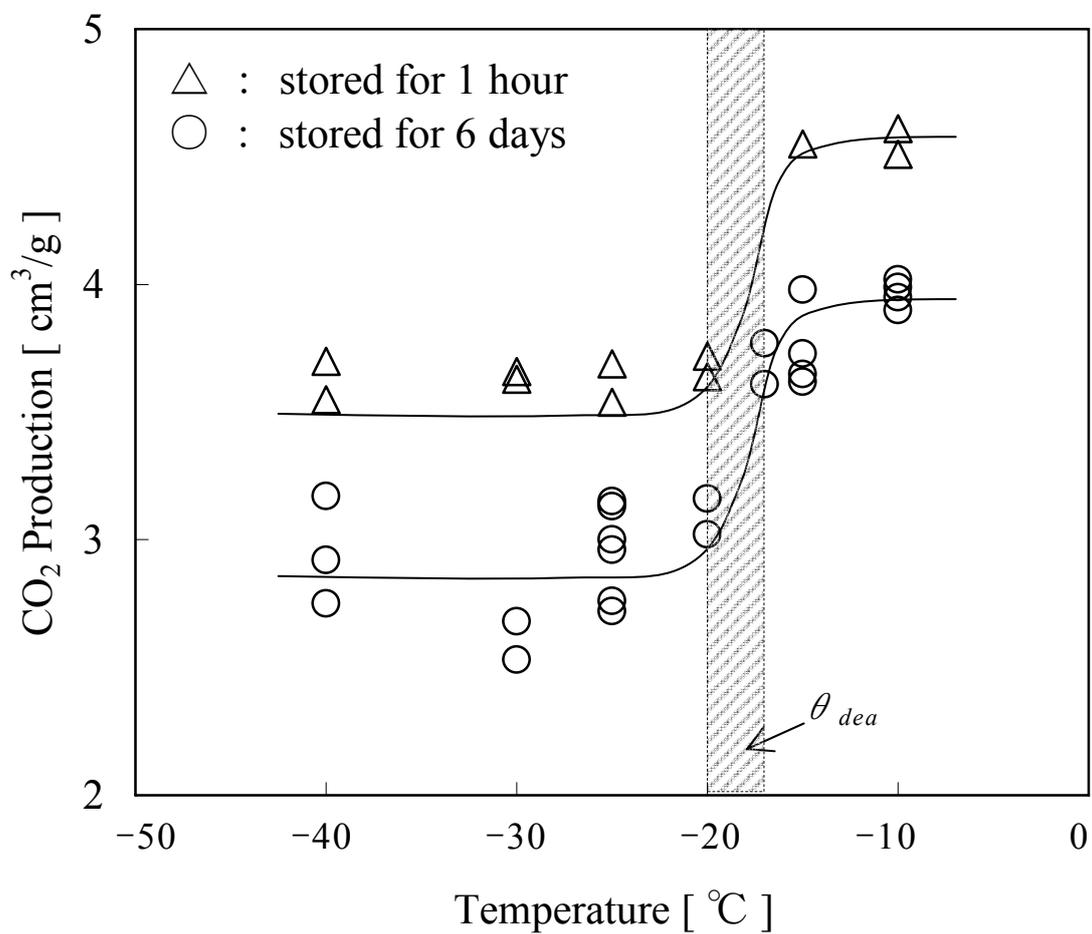


Fig. 3-14 Effect of minimum achieved temperature of bread dough on CO₂ production. (Dough mass = 190g)

ける CO₂ ガス発生量を調べた結果を示した。横軸には最低到達温度 (=保存温度) を、縦軸にはガス発生量をとった。なお、パン生地の試料は、凍結速度を揃える目的でいったん -10℃ で凍結させた後、所定の温度 (-40 ~ -10℃) にて再度温度調整し保存したものである。

時間の経過により -10 ~ -40℃ の最低到達温度域にわたって全体的なガス発生量の低下が見られる。保存時間が 1 時間あるいは 6 日間のどちらのパン生地においても -17 ~ -20℃ の温度帯において著しくガス発生量が低下することが認められ、酵母が失活する温度 θ_{dea} の存在が確認できた。

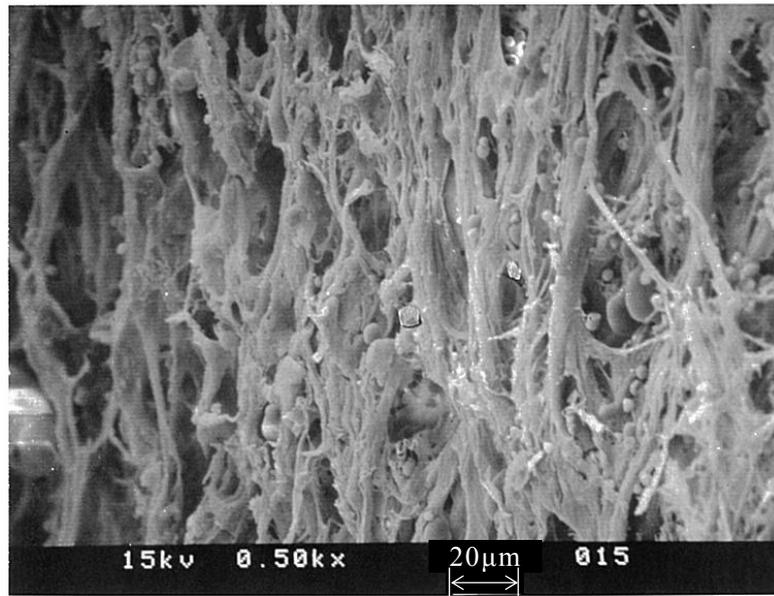
3.5.2 生地構造への影響

Figs. 3-15 a), b) には § 3.4 で確認された酵母の失活温度を挟んだ温度で保存したそれぞれのパン生地に § 3.2.2 に記述した前処理を行って得られた SEM 画像を示す。最低到達温度 θ_{ma} が -10℃ であった生地 a) に比べてみみると、-40℃ まで最低到達温度が下げられた生地 b) では、グルテン構造が明らかに脆弱になっており、障害を受けていることがわかる。パン生地の粘弾性については、棒状に整形し、両端を固定した生地の中央を一定速度で引き伸ばしたものについて抵抗力と伸展性を測定するエクステンソグラフ [7] と呼ばれる装置を用いて測定した。グルテン構造が脆弱になったパン生地では、抵抗力と伸展性がともに低下していることを別途エクステンソグラフによる測定を通じて確認した。

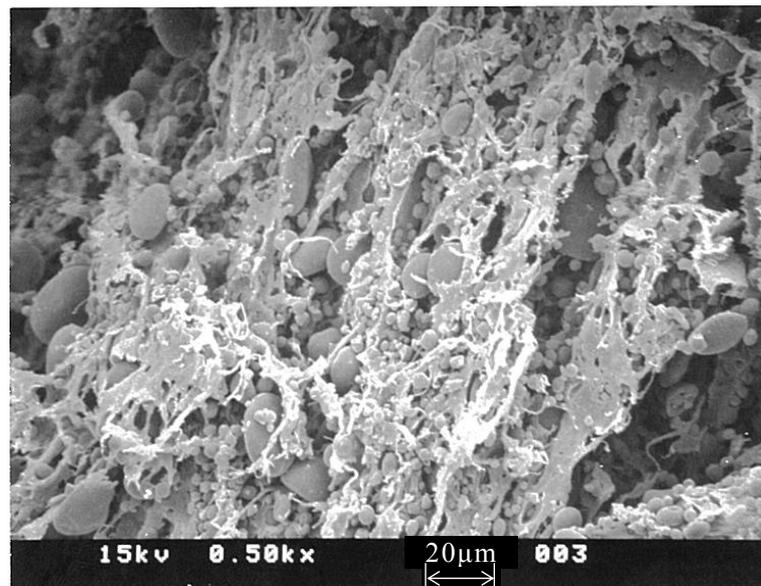
3.5.3 適正な冷凍条件の検討

パン生地を冷凍させる工程では、生産効率や凍結速度を上げるために保存温度より低い温度で急速に冷凍する場合が多い。本研究においては、パン生地を冷凍させる際の最低到達温度 θ_{ma} をあらかじめ設定し、Fig. 3-16 に示すフローチャートに従って、冷凍庫内の空気の温度 θ_g を求め計算を行った。計算の手順は以下の通りである。

- (1) Fig. 3-1 に示すパン生地の断面を R 軸方向には半径を均等に i 個、Z 軸方向には高さを均等に j 個の格子で分割し、それぞれの格子に初期条件として生地温度 $\theta_{(i,j)1}$ を入力する。



a) stored for 6 days at -10°C



b) stored for 6 days at -40°C

Fig. 3-15 SEM images of bread doughs after freezing process a) and b). (Dough mass = 190g)

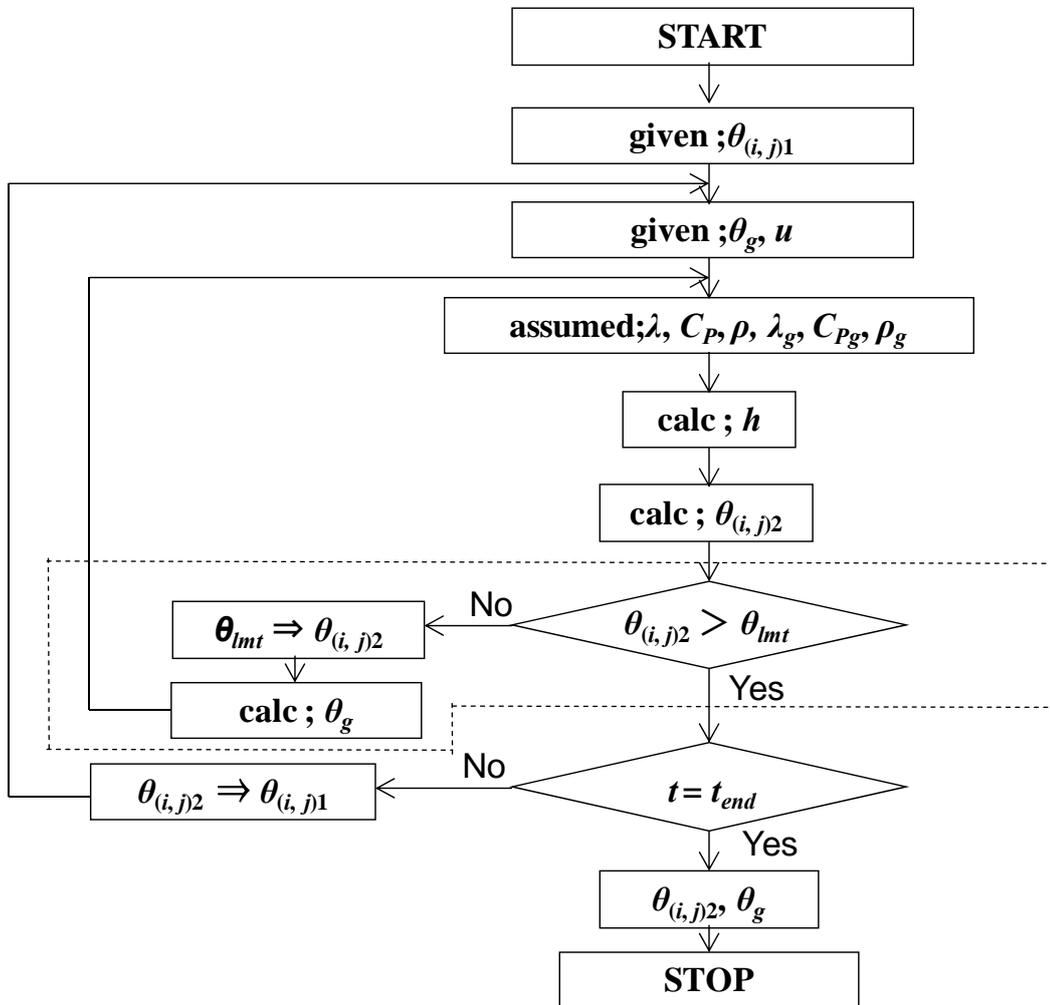


Fig. 3-16 Flow chart for calculating the desirable freezing temperature.

- (2) 冷凍庫内の空気の温度 θ_g と流速 u は時間ごとに与える.
- (3) 各格子のパン生地の有効熱伝導度 λ_e , 比熱 C_p , 密度 ρ と冷凍庫内の空気の熱伝導度 λ_g , 比熱 C_{pg} , 密度 ρ_g は温度の関数として与える.
- (4) 式(3-9), 式(3-10)より熱伝達率 h を求めて, パン生地への熱移動量を計算し, 1回のタイムステップ後の生地温度 $\theta_{(i,j)2}$ を求める. ここで, すべての格子の生地が最低到達温度 θ_{ma} 以上であれば次のタイムステップに移り, (2)の手順から繰り返し計算する.
- (5) いずれかの格子の生地が最低到達温度以下の場合には, 該当する生地温度 $\theta_{(i,j)2}$ に最低到達温度 θ_{ma} を代入して式(3-7)より冷凍庫内の空気の温度 θ_g を求め(フローチャートの点線で囲んだ部分の処理), 同じタイムステップで(3)の手順に戻って, 再度生地温度 $\theta_{(i,j)2}$ を求める. ここにおいてすべての格子の生地温度 $\theta_{(i,j)2}$ は, 最低到達温度 θ_{ma} 以上となる.
- (6) 冷凍時間 t が, 冷凍終了時間 t_{end} となったところで, 計算を終了する.

Fig. 3-17には, 冷凍庫の初期の空気の温度を -40°C , パン生地を冷凍させる際の最低到達温度 θ_{ma} を -15°C に設定し, パン生地全体がこの最低到達温度以上に保持されるための冷凍庫内の空気の温度を数値解析によって求めた結果を示す. 横軸には冷凍時間, 縦軸には温度をとった. 得られた温度条件は, 初期の冷凍庫内の空気の温度から最低到達温度として設定した温度へほぼステップ状に上昇する結果であった. 併せてこの条件で冷凍したパン生地について, 中心軸上で生地高さの1/2の高さの点における温度の実測値も計算結果と併せてプロットした.

この計算結果をもとに Fig. 3-18 の表中に示す条件に従ってパン生地を冷凍し, 1時間または6日間保存した後に解凍し, 発酵工程におけるガス発生量(記号○(1時間保存), △(6日間保存))を測定した. Fig. 3-18には, 意図的に初期の冷凍庫内の空気の温度からの温度操作を30分程度遅らせて製造したパン生地のガス発生量(記号●(1時間保存), ▲(6日間保存))も併せて示した. 図の横軸には保存温度をとってあり, 横軸の温度で保存した生地のガス保持率を破線で示した. Fig. 3-14の結果と比較して, 酵母の失活温度以上に生地全体を保持した場合と生地の一部を過度に冷却した場合のガス保持率の違いが示された. 数値解析の結果に従って冷凍した生地(記号○, △)のガス発生量が

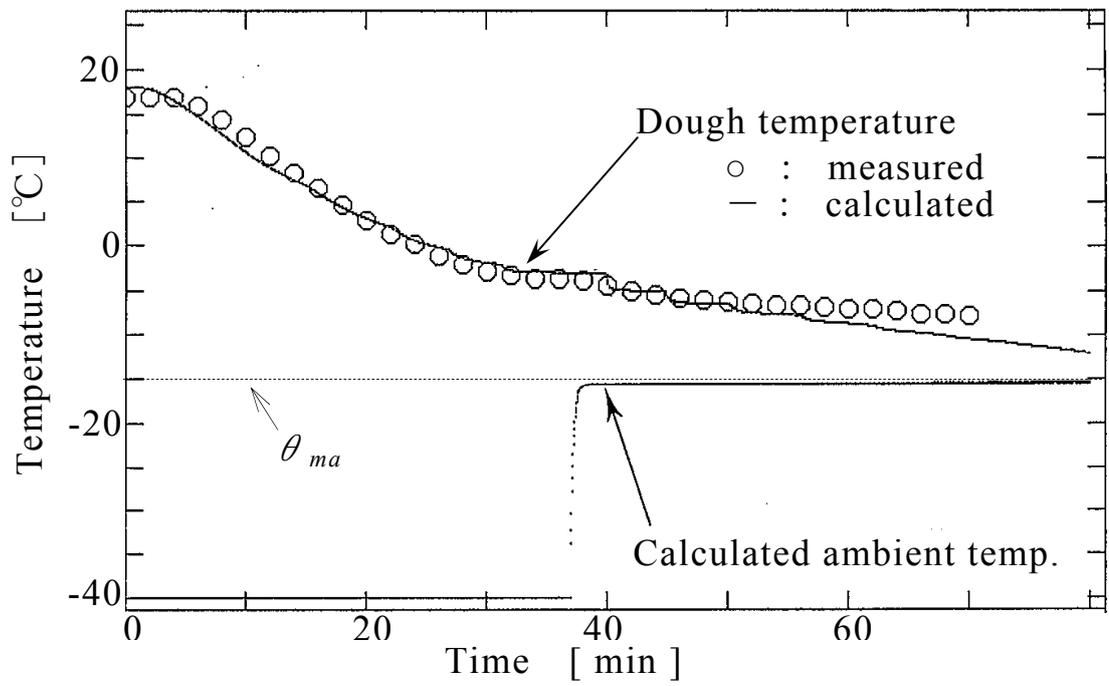


Fig. 3-17 Calculated result of freezing temperature for holding desirable CO₂ production of bread dough.
(Dough mass = 190g)

Symbol	Refrigerator temp.	
	-40°C	-15°C
○, △	0~36 min	36~180 min
●, ▲	0~70 min	70~180 min

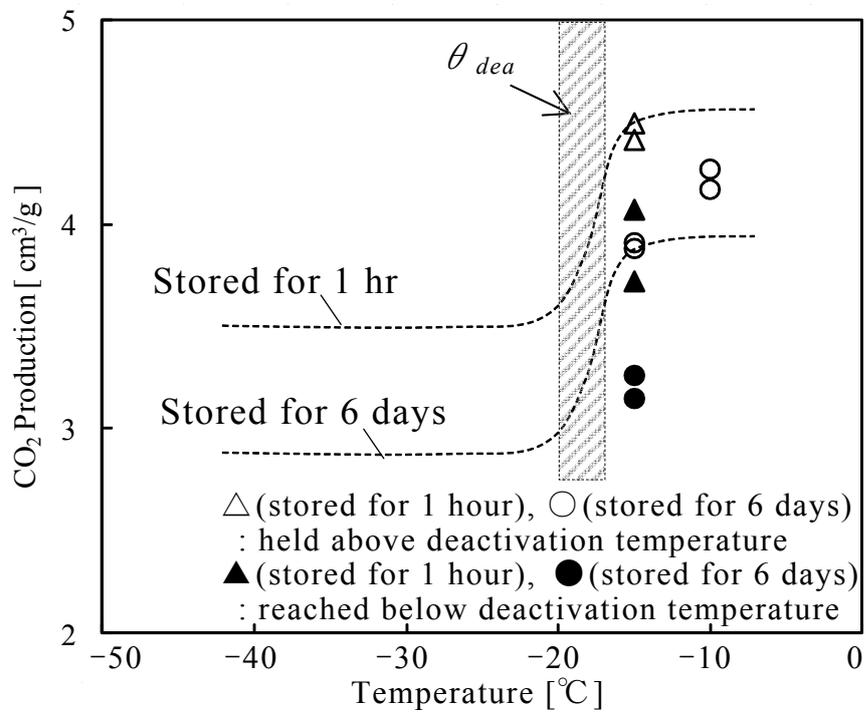


Fig. 3-18 Effect of minimum freezing temperature achieved on CO₂ production by bread dough.
(Dough mass = 190g)

Fig. 3-14 において得られた結果と同程度の値を示したのに対して、酵母の失活温度以下の過度な低温にて冷凍した生地(記号●, ▲)ではガス発生量が十分ではない。安定した設計通りの酵母活性を得るためには、使用した酵母に特有の失活温度以下に最低到達温度を低下させないことが重要であることが示唆された。また、それらの生地を用いて山形食パンを製造し、比体積を測定した結果を Fig. 3-19 に示す。最低到達温度が失活温度以上に保持された冷凍条件の試料(記号○, △)では、失活温度以下に冷却された試料(記号●, ▲)と比較して比体積が高い値を示す。

生地冷凍時の最低到達温度が酵母の失活温度 θ_{dea} ($=-17\sim 20^{\circ}\text{C}$) を下回ることによる障害への影響をさらに確認するため、Fig. 3-20 に示すように冷凍庫内の空気の温度を変化させ、生地内部に生じる最低到達温度の分布が異なる生地を製造して製パンを行った。Fig. 3-20 の横軸には冷凍時間を取り、縦軸には温度をとって、冷凍庫内温度と併せて冷凍するパン生地の中心軸上で生地高さの 1/2 の高さの点における温度の実測値もプロットした。酵母の失活温度をまたぐ温度間 ($-40^{\circ}\text{C}\Rightarrow -10^{\circ}\text{C}$) で冷却温度を上昇させるときには、試料間での冷凍条件の再現性を上げるため、 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の変化率にて 300 秒間上昇させた。酵母が冷凍障害を受けて最終発酵工程におけるガス発生量が異なった場合、焼き上がった製品の形状や内相を比較することが困難であるので、パンズの製造の際には各試料のガス発生量を合わせる目的で酵母の量を調整した。具体的には、冷凍工程で障害を受け失活した後の状態においてガス発生量を予め測定し、もっとも障害が少なくガス発生量が多い条件の試料を基準として、それぞれの試料のガス発生量に反比例する量の酵母を配合した。冷却温度を切り替えるタイミングをずらすことにより生地内部に生じる最低到達温度の分布を計算した。その計算結果の一例を Fig. 3-21 に示す。 R はパン生地の半径方向長さ、 Z は垂直軸方向の長さである。 RZ 平面には生地の中心軸を通る断面をとった。図の RZ 平面上には生地断面の輪郭を実線で、半径を示す部分の高さ z_{cet} を破線で示した。生地の重量は 60g として、縦軸に最低到達温度を示す。 -40°C で冷凍する時間が 10 分と短い場合 a) には、冷凍終了後において生地全体が酵母の失活温度以上となるが、その時間を 45 分に延長 b) すると冷凍終了後においてほぼ生地全体が酵母の失活温度以上となり、さらに 65 分まで延長 c) すると生地全体が冷凍庫内の空気の温度に近い温度にまで低下し、完全に酵母の失活温度を下回る。

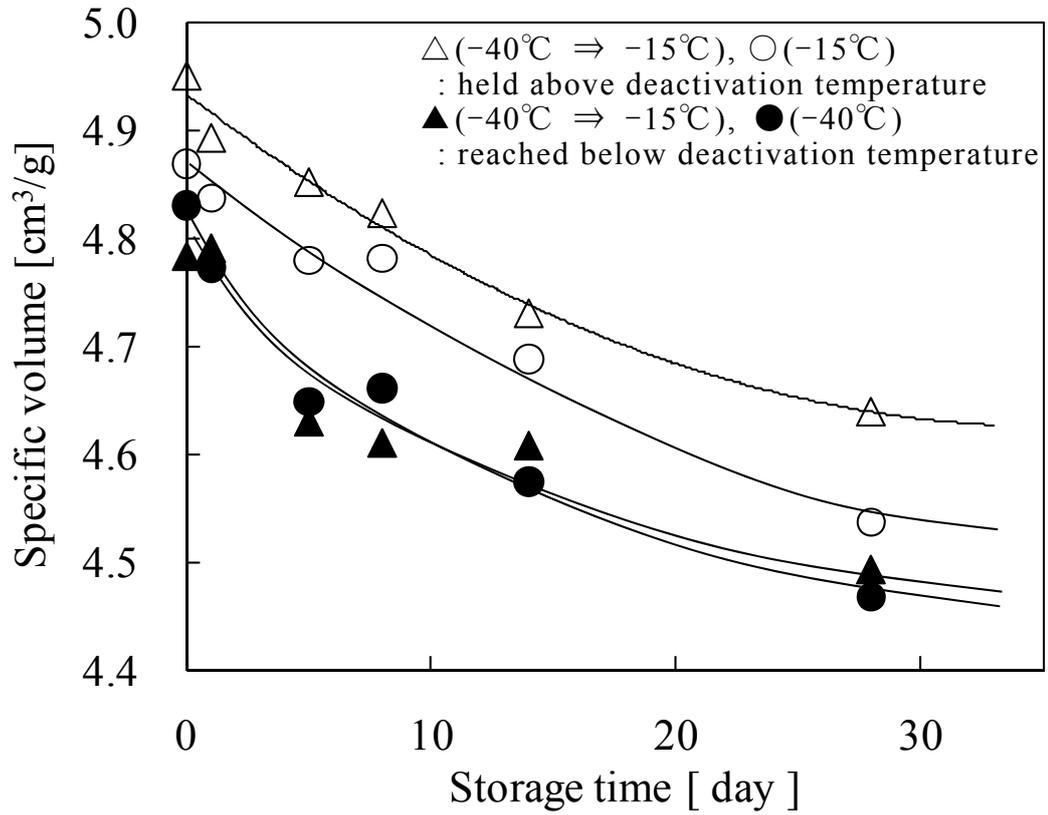


Fig. 3-19 Specific volume of open-top bread made from frozen dough. (Dough mass = 190g)

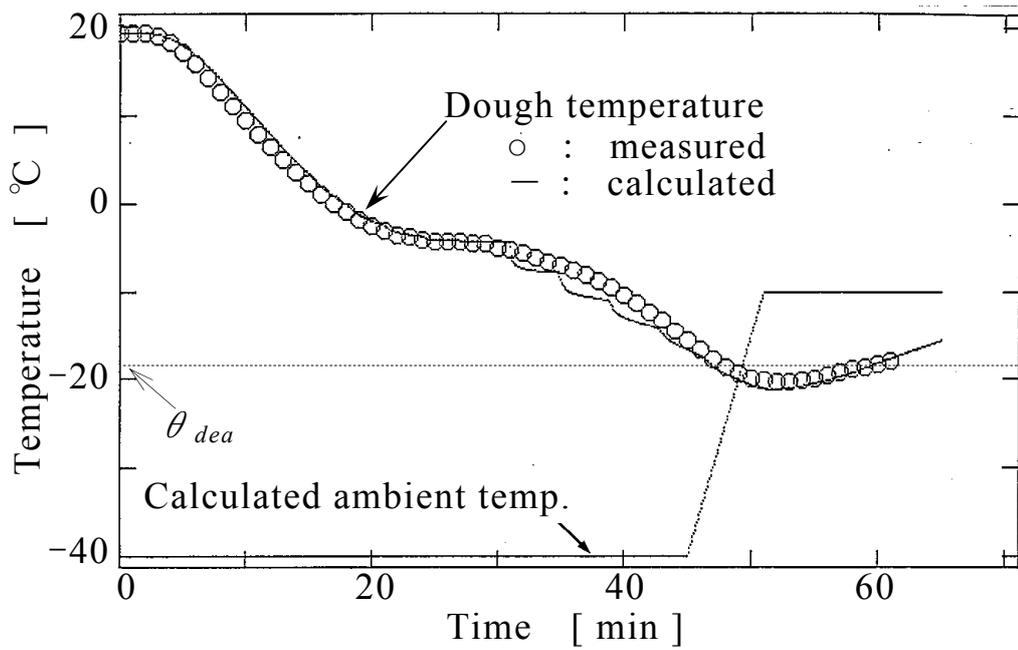


Fig. 3-20 Temperature changes in bread dough during freezing.
(Dough mass = 60g)

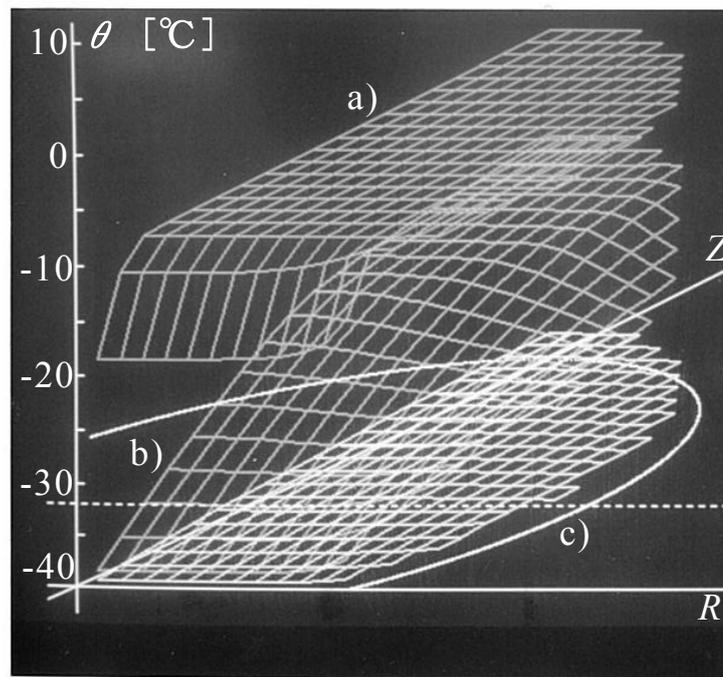


Fig. 3-21 Calculated distribution of the minimum achieved temperature. (Dough mass=60g)

- a) -40°C (0-10min) \Rightarrow -10°C (15-180min)
- b) -40°C (0-45min) \Rightarrow -10°C (50-180min)
- c) -40°C (0-65min) \Rightarrow -10°C (70-180min)

冷凍庫内温度を -40°C から -10°C へ変化させてパン生地を冷凍した実験では、アルミニウム製のトレーに接触し、急速に冷却される底部近傍の生地において、最低到達温度が低い値を示している。また、パン生地が凍結した場合、生地の有効熱伝導度の上昇と比熱の低下が起こるため、生地全体が凍結した状態 (Fig. 3-21 中 b)) からの温度の低下が顕著であること (Fig. 3-21 中 c)) が示唆された。本研究において行った冷凍条件と最低到達温度の荷重平均値を Table 3-6 に示す。Table 3-6 の各条件によって冷凍した生地内部には部分的に最低到達温度が酵母の失活温度を下回っている試料も含まれることが Fig. 3-21 から推察される。

生地内部に最低到達温度の分布を生じさせて 6 日間冷凍保存し、解凍後における生地のガス保持率と最低到達温度の平均値との関係の測定値を Fig. 3-22 に示す。比較のために一定の温度でパン生地を冷凍した場合の値を併せてプロットした。酵母の失活温度を考慮すると、一定の温度でパン生地を冷凍した場合のガス保持率は実線で示すように推察される。Fig. 3-14 でも確認されている傾向と同様に、一定温度での冷凍条件下では $-15\sim-20^{\circ}\text{C}$ の温度帯において急激にガス保持率が低下する傾向が確認できた。生地内部に最低到達温度の分布が生じる条件では、最低到達温度の低下にともなって、パン生地のガス保持率の低下が確認できるが、これは最低到達温度が酵母の失活温度を下回り、障害を受けた生地の部分の割合が高くなっていることによるものと考えている。

冷凍した生地を用いて製造したパンの比体積と最低到達温度の平均値との関係を Fig. 3-23 に示す。酵母の失活温度を考慮すると、一定の温度で冷凍したパン生地を用いて製造したパンの比体積は実線で示すように推察される。試料はバンズである。測定結果からは、最低到達温度が低い条件下において比体積の大きい製品が得られることがわかった。これは生地のガス保持力が低下する一方で抵抗力も落ちた結果、わずかな力でも膨らみやすい物性が発現したためである。

Fig. 3-24 には、製品の形状係数として $[\text{高さ}/\sqrt{(\text{短径}\times\text{長径})}]$ を縦軸にとり、バンズの測定結果をプロットした。酵母の失活温度を考慮すると、一定の温度で冷凍したパン生地を用いて製造したパンの形状係数は実線で示すように推察される。障害を受けて生地構造が脆弱化し伸展性と抵抗力が低下した生地は、ガス保持率が低下することによって気泡径が大きくなり、結果として生地は十分な高さを保持する強度を保持できずに

Table 3-6 Freezing condition and average minimum achieved temp. of bread dough.

		Ambient temp.		Ave. θ_{ma}
		-40°C	-10°C	
Time [min]	①	—	0 ~ 180	-10.0 °C
	②	0 ~ 10	15 ~ 180	-10.4 °C
	③	0 ~ 15	20 ~ 180	-12.1 °C
	④	0 ~ 25	30 ~ 180	-15.0 °C
	⑤	0 ~ 35	40 ~ 180	-20.0 °C
	⑥	0 ~ 45	50 ~ 180	-27.6 °C
	⑦	0 ~ 65	70 ~ 180	-38.3 °C
	⑧	0 ~ 180	—	-40.0 °C

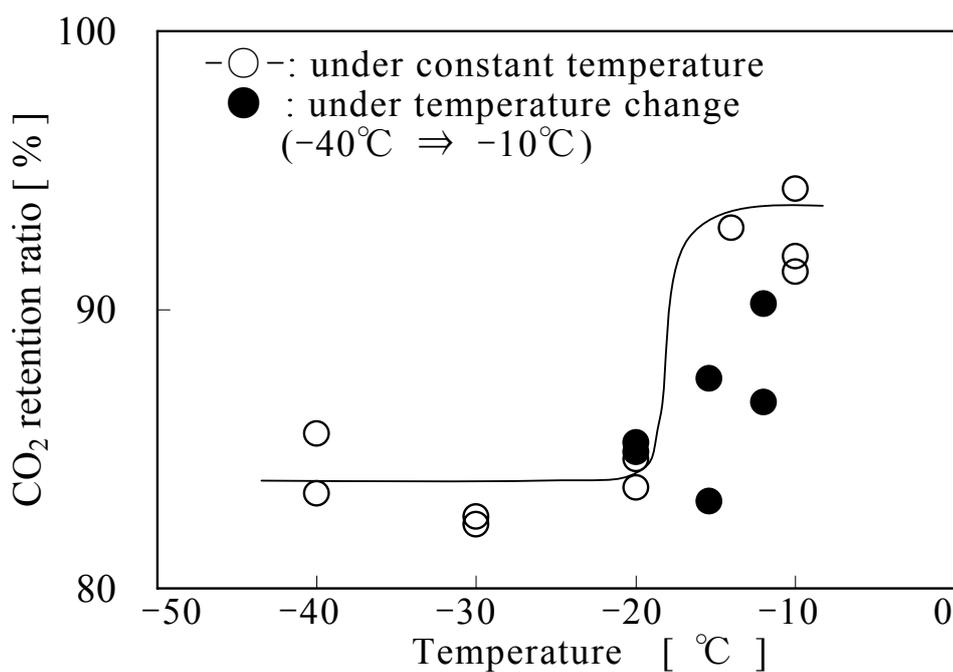


Fig. 3-22 Relationship between the minimum achieved temperature and CO₂ retention ratio.
 (Dough mass = 60g)

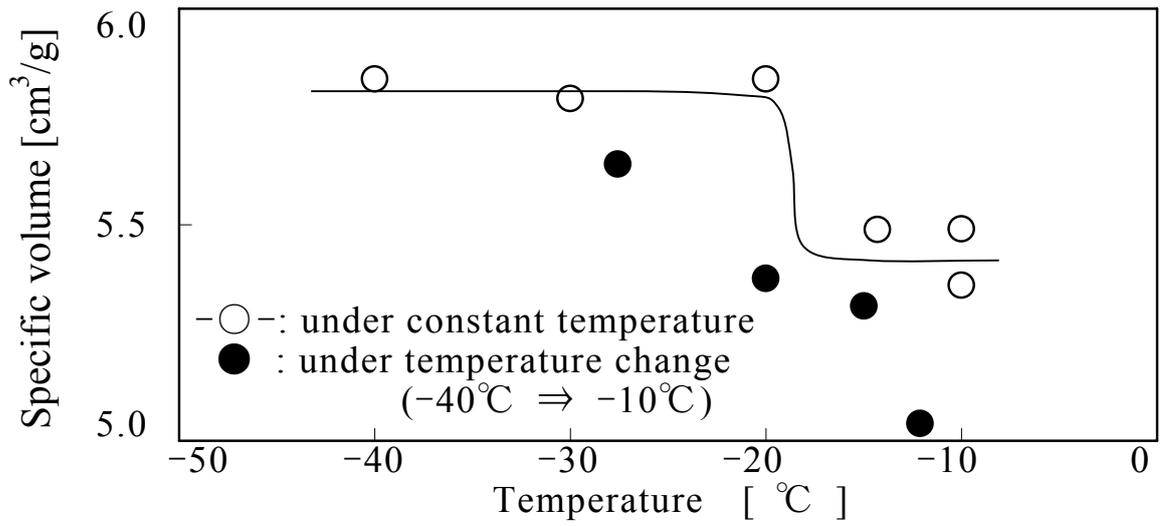


Fig. 3-23 Specific volume of buns made from frozen dough stored for 6 days.

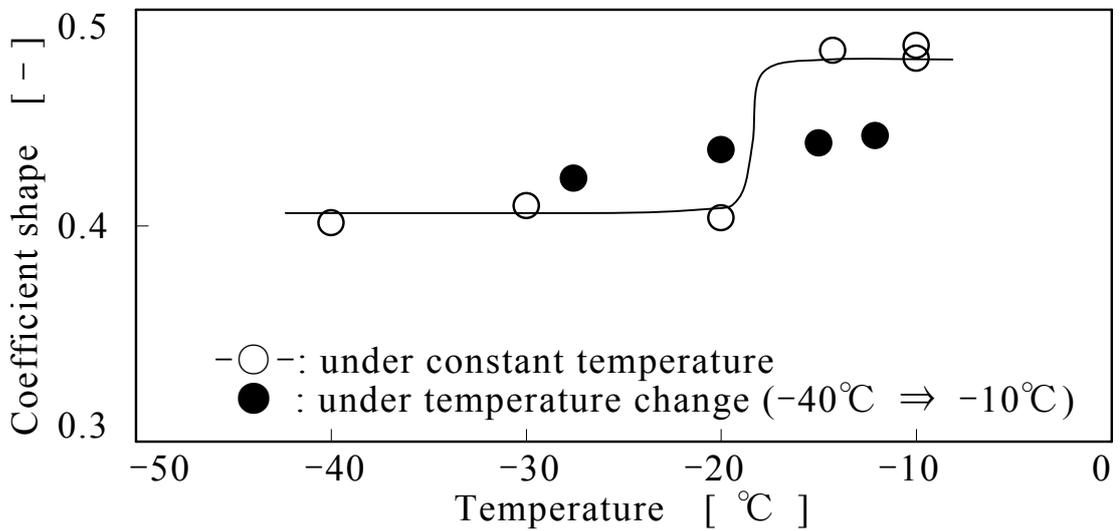


Fig. 3-24 Coefficient of shape of buns made from frozen dough stored for 6 days.

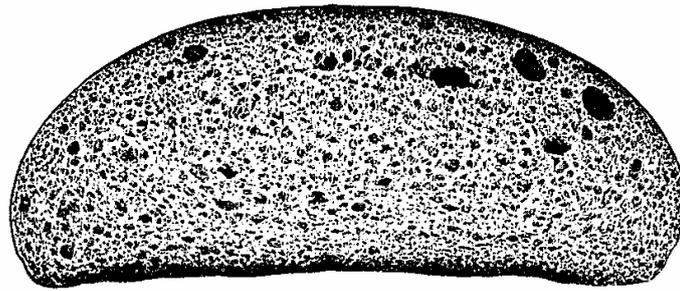
扁平な外観形状をとる。最低到達温度の低下にともない、形状係数が低い値を示しており、障害を大きく受けた製品においてより扁平な形状の製品ができることがわかった。

冷凍パン生地を用いて製造したバンズをスライスした断面画像を Figs. 3-25 a)～d) に示す。パン生地の冷凍条件は、それぞれ Table 3-6 の①-a), ②-b), ⑥-c), ⑧-d) に対応しており、最低到達温度を常に酵母の失活温度以上に保持して凍結させた試料 a), b) と生地の一部が酵母の失活温度以下に低下して凍結させた試料 c), および生地全体が酵母の失活温度以下に低下して凍結させた試料 d) を示す。最低到達温度を常に酵母の失活温度以上に保持して凍結させて作製した冷凍生地による製品 a), b) は、外観形状に高さがあり、内相の肌目(気泡)が密で揃っている、高い評価の内相が得られることを視覚的にも確かめることができた。

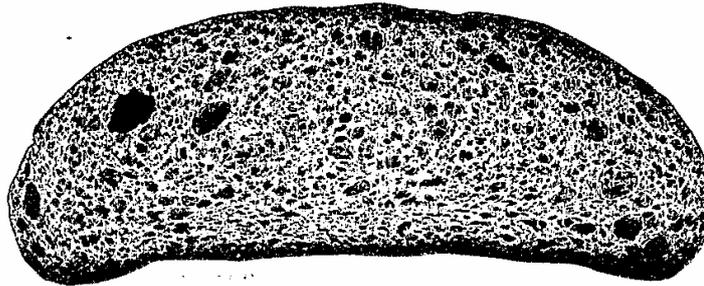
3.6 結言

第2章で測定したパン生地の有効熱伝導度を用い、パン生地を冷凍する際における生地内部の経時的な温度分布の変化について、直接差分法による数値計算を行い、並行して行った製パンの試料についての実験の結果と比較して、以下の結論を得た。

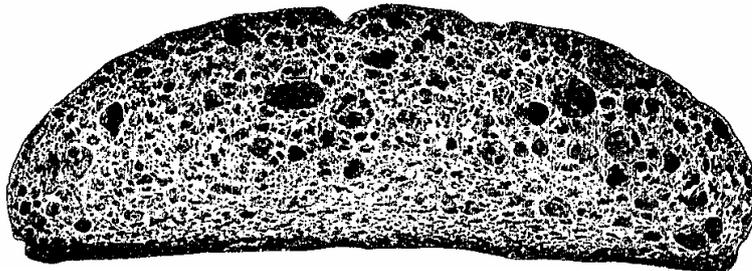
- (1) パン生地の冷凍工程での温度変化に関して、数値計算の結果が実測値とよく一致した。数値計算の結果は実際の冷凍工程における状態変化を良好にシミュレートできることがわかった。
- (2) パン生地を冷凍させる際の凍結速度を推測することによって、緩慢な冷凍条件下では生地構造が脆弱になることがわかった。
- (3) 冷凍パン生地は保存後解凍されるまでに辿った温度履歴が、製パンした製品品質に強い影響を及ぼす。最低到達温度が $-17\sim-20^{\circ}\text{C}$ の温度域に存在する酵母の失活温度を一度でも下回ることがあると、失活温度を下回った領域における生地の発酵ガス量は著しく低下することがわかった。
- (4) パン生地の最低到達温度を推測することにより、冷凍パン生地が冷凍工程で受ける二次的障害として、酵母の失活によって生地構造が脆弱になり、ガス保持率が低



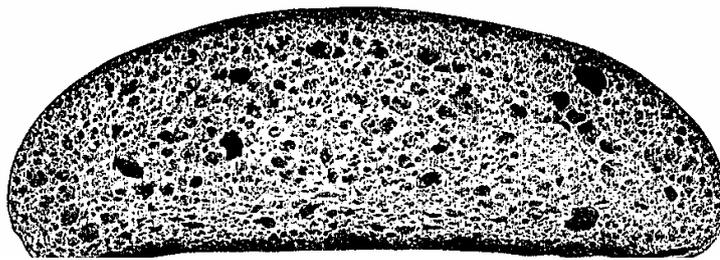
a) -10°C 0-180min ①



b) -40°C (0-10min) \Rightarrow -10°C (15-180min) ②



c) -40°C (0-45min) \Rightarrow -10°C (50-180min) ⑥



d) -40°C 0-180min ⑧

Fig. 3-25 Comparison of buns made from frozen dough stored for 6 days.

下することがわかった。

- (5) パン生地の最低到達温度を酵母の失活温度以上に常に保持する条件でパン生地を冷凍し、その生地を用いて製パンを行ったところ、パン生地が受ける冷凍障害が軽微であり、良好なガス発生量とガス保持力が得られたため、良好な品質(外観：設計通りの体積と形状、内相：均一で細やかな気泡)が得られる条件が数値計算の結果より求められた。

3.7 文献

- [1] 田中康夫, 中江利明; 「冷凍生地の理論と実際」, (1982), p.262, 食研センター.
- [2] 田中康夫; 「冷凍生地におけるパン酵母の冷凍障害」, 日本食品工業学会, 28, (1981), p.100.
- [3] 二國次郎; 「澱粉科学ハンドブック」, (1977), p.34, 朝倉書店.
- [4] 山口忠次, 古河民穂, 大野加代子, 南部庸子; 「発酵パンの鮮度保持の検討:(第1報) 冷凍生地について」, 中村学園研究紀要, 9, (1976), pp.81-86.
- [5] 高崎貞子, 唐沢恵子; 「冷凍生地製パン性に与える小麦全粒粉混入の影響」, 日本調理学会誌, 28, (1995), pp.8-13.
- [6] 山田盛二, 荻須昭雄, 平岩隆夫; 「冷凍パン生地製造過程における冷凍障害」, 第15回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (1994), pp.355-358.
- [7] 田中康夫, 松本博; 「製パンの科学< I > 製パンプロセスの科学」, (1991), p.69, 光琳.

第4章 冷凍生地製パン法における解凍条件

4.1 緒言

第3章ではパン生地の冷凍工程における最適な熱的操作条件について検討し、製パンによる検証を行った。一方、冷凍工程で凍結させたパン生地の解凍工程における熱的操作の条件がパン生地の温度履歴に与える影響を把握することが重要であるが、この点についての研究は進んでいない。急速解凍あるいは緩慢解凍といった表現によって食品の品質に及ぼす影響が報告されているにすぎない[1]。田尻らは自然解凍(25~27℃の室温にて解凍)の条件と急速解凍(35℃の発酵蒸器で解凍)の条件によるパン生地を比較し、急速解凍したパン生地においてパン酵母の発酵能力が低下したことを報告した[2]。久保らは低温解凍(5℃)、室温解凍(24℃)、高温解凍(38℃)の条件のなかでは低温解凍がもっとも適当であることを報告した[3]。いずれの実験でも解凍後における生地の温度の差異や解凍時において凝縮した水分の付着が実験結果に影響を及ぼした。

本章では、パン生地の冷凍障害を生む解凍工程における要因を明らかにし、適切な解凍条件を求める。冷凍パン生地の解凍工程における生地内部の温度分布の変化を、温度に依存する生地の凍結率を考慮して、数値計算によって調べる。また、生地の生成ガス保持率の測定や製パンを行い、数値計算の結果と比較し、従来から定説になっている最大氷結晶生成帯(zone of maximum ice crystal formation, [凍結温度]~[凍結温度-4℃])での滞留時間 t_{zi} と製品の品質(比体積, 形状係数(=高さ/ $\sqrt{\text{短径} \times \text{長径}}$)), 内相の気泡径, 製品の硬さ)との関係を検討する。

4.2 実験方法

4.2.1 冷凍生地製パン法

実験に用いたパン生地は、第3章における試料と同様に標準的な食パン配合に準じて

作製した。混捏，分割後のパン生地は， -25°C の冷凍庫内で急速冷凍し，6日間冷凍保存した。

一定期間冷凍保存したパン生地は § 4.2.2 に示す条件に従って解凍し，整形，発酵，焼成の工程を経て，製パンを行った。試料として，生地のテクスチャーが比体積や形状などの外観に強い影響を与えるバンズ(生地重量：60g)と，内相やクラム部分の硬化度を測定するために角形食パン(総生地重量： $190\text{g}\times 6=1140\text{g}$)を作製した。なお，バンズを作製する際には，190gの生地を解凍後に所定の重量(60g)に分割して，その後の整形以降の工程に移し，製パンを行った。

4.2.2 解凍条件

冷凍生地を扱う店舗等での作業手順としては，使用する前日にパン生地をトレー上に載せ，夜間に冷蔵庫内で解凍させる方法が一般的である。解凍後におけるイーストの発酵を極力抑え，安定した状態の生地を得るために，冷蔵庫は通常の $0\sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度に設定されている。パン生地の解凍時における冷凍障害としては，氷結晶の成長による生地構造の破壊が挙げられる。解凍工程におけるパン生地の冷凍障害は氷結晶の成長に起因すると述べたが，生産工程では冷凍障害を軽微に抑えるために，最大氷結晶生成帯の滞留時間を短くすることによって対処している。食品中の氷結晶成長速度を測定した例は見られないが，Luyet[4]はポリビニルピロリドン(PVP)の50%水溶液について氷結晶の核発生速度と成長速度を調べて，成長速度が急速に増加し最大に達する温度帯を示し，細胞内での氷結晶生成についても同様であると報告している。

そこで本研究では，解凍時の雰囲気温度を変化させることによって，氷の再結晶に影響すると考えられる条件を設定した。試料であるパン生地は，凍結温度 θ_{fr} ； -3.2°C 付近での温度履歴の違いを解凍条件として与えられる。Table 4-1 に各試料における解凍条件とともに，§ 4.3 に示す数値計算により求めた最大氷結晶生成帯の滞留時間 t_{zi} を示す。この最大氷結晶生成帯について明確に解説された文献は見られないが，凍結温度 θ_{fr} より 4°C 低い温度において凍結率が50%程度となる食品が多いため， $(\theta_{fr}\sim \theta_{fr}-4^{\circ}\text{C})$ の温度帯を最大氷結晶生成帯と見なすことが多い。本研究では， $(\theta_{fr}(=-3.2^{\circ}\text{C})\sim \theta_{fr}-4^{\circ}\text{C}(=-7.2^{\circ}\text{C}))$ の温度帯を最大氷結晶生成帯と定義した。解凍時間は960 minとし，それぞれの試料が解凍終了時の生地温度は 3°C となるように冷蔵庫内の空気の温度を調整

Table 4-1 Thawing conditions and transit time through the zone of maximum ice crystal formation (t_{zi}) of bread dough ($\theta_{fr} = -3.2^\circ\text{C}$).

	Ambient temperature	t_{zi} (min)
①	3.0°C (0-960min)	156
②	-3.0°C (0-840min) \Rightarrow 3.0°C (840-960min)	676
③	-3.5°C (0-840min) \Rightarrow 3.0°C (840-960min)	691
④	-4.0°C (0-840min) \Rightarrow 3.0°C (840-960min)	681
⑤	-5.0°C (0-840min) \Rightarrow 3.0°C (840-960min)	664

した。冷蔵庫内の空気の温度をパン生地の凍結温度近傍(②: $-3.0^{\circ}\text{C} > \theta_{fr}$, ③: $-3.5^{\circ}\text{C} < \theta_{fr}$, ④: $-4.0^{\circ}\text{C} < \theta_{fr}$, ⑤: $-5.0^{\circ}\text{C} < \theta_{fr}$)の温度に調整して 840 min 昇温させた後に, 3°C で 120 min 解凍させた試料はいずれも最大氷結晶生成帯の滞留時間 t_{zi} に大きな差は見られなかった。なお, パン生地の解凍には設定温度に対して $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の範囲内で庫内の空気の温度を制御する冷蔵庫を使用した。

4.2.3 測定方法

解凍した冷凍パン生地を凍結切断, グルタルアルデヒドによる固定, リン酸緩衝液による洗浄に続いて, 50~100%エタノールによる脱水, 酢酸イソアミルへの置換後, 臨界点乾燥を行い, 得られた試料を金蒸着した後, トプコン製走査型電子顕微鏡(型式: ALPHA-30A)により 10~15kV で観察した。

冷凍生地を用いて製造した食パンのテクスチャーの測定には, アイテクノ製物性解析システム(型式: IPC-134A)を使用した。円筒形のプランジャー($\phi 13\text{mm}$)で 16mm にスライスした試料を一定条件(圧縮率: 56.3%)で圧縮した際の最大応力を測定して硬さを求めた。焼成後の製品については, 体積および形状(長径, 短径, 高さ)をアステックス製の非接触式ボリウム計測器(型式: SELNAC-VM)を使用して, 得られた体積の数値を製品の重量で除して製品の比体積を求めた。内相の評価については, ニレコ製の画像解析装置(型式: LUZEX-UⅢ)を用いて気泡の面積を測定し平均値を求めた。

4.3 数値計算

4.3.1 熱伝導方程式

冷凍した食パンの丸玉生地を解凍する際の熱移動問題について, 直接差分法による数値計算を行い, 生地内部温度の変化を推測した。計算に使用した熱伝導方程式と解析モデルは第3章で使用したものと同様である。

パン生地の断面形状の一例(生地重量=190g)を Fig. 3-1 に示したとおり, 計算では, パン生地の断面形状が $R=0$, $Z= z_{cet}$ を中心とする楕円 ($0 \leq Z \leq z_{top}$, $-r \leq R \leq r$) で表さ

れる軸対称体であるとし、座標は円筒座標を用いた。すなわち、熱伝導計算は軸方向 (Z 方向) と半径方向 (R 方向) の二次元について行った。生地形状の値 (半径 r , 高さ z_{top} , 半径を示す部分の高さ z_{cet}) は、実測値から求めた生地重量の関数として与えた。

円筒座標を用いて、軸および半径方向への熱移動を表す基礎方程式は、

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) + H \quad (4-1)$$

である。ここにおいて、 θ はパン生地の温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 ρ は密度 (kg/m^3)、 C_p は比熱 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)、 λ は熱伝導度 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、 H は生地の凍結時における潜熱 (W/m^3)、 t は時間 (s)、 z は軸方向長さ、 r は半径方向長さである。

初期条件 ($t = 0$) として均一な温度分布を有する状態 ($\theta = \theta_0$) にあるパン生地が、代表長さ l 、厚さ z_{tr} のトレイ上に配され、トレイとともに所定温度に設定された冷蔵庫内で対流熱伝達によって加熱される場合について考える。境界条件として熱媒体である空気の温度と流速を与え、熱伝達率を算出した。

$$\text{初期条件 } t = 0 \quad \theta = \theta_0 \quad (4-2)$$

$$\text{境界条件 } t > 0, \quad 0 < Z \leq z_{tr} \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial Z} = h (\theta - \theta_g) \quad (4-3)$$

$$t > 0, \quad Z > z_{tr} \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial R} = h (\theta - \theta_g) \quad (4-4)$$

パン生地とトレイ表面における熱伝達率 h はそれぞれ式 (4-5) と式 (4-6) によって与えた。

$$h d / \lambda = 2 + 0.60 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (4-5)$$

$$h l / \lambda = 0.664 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (4-6)$$

ここで、 Pr と Re は、それぞれパン生地の外径 d (式 (4-5)) と風の流れ方向におけるトレイの長さ l (式 (4-6)) を代表長さとする Reynolds 数と Prandtl 数である。式 (4-5) は、球周りの強制対流熱伝達に関する Ranz-Marshall の実験式、式 (4-6) は水平平板における強制対流熱伝達の式である。実際のパン生地の解凍には、前面から後方へ冷気が循環する構造の冷蔵庫を使用しており、パン生地およびトレイは概ね水平方向の流れ場で加熱

される。風速 u は、無指向性風速計で実測した。式(4-5)において、直径 d は対象となる生地と同重量の球形生地の相当径を代入した。

4.3.2 パン生地の生地凍結率

式(4-1)の発熱項 H は、パン生地の凍結率 Ψ を考慮すると式(4-7)のように表すことができる。

$$H = \sigma \rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (4-7)$$

ここで σ は単位質量あたりにおけるパン生地の融解潜熱、 ρ は密度である。凍結率 Ψ がパン生地の温度 θ の関数として与えられる場合、

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4-8)$$

と表現できるため、式(4-7)、(4-8)を式(4-1)に代入すると、

$$\rho (C_p - \sigma \frac{\partial \Psi}{\partial \theta}) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) \quad (4-9)$$

となる。パン生地の凍結率の温度依存性は、Fig. 4-1 に示す示差走査熱量計 (Differential scanning calorimetry, 以下 DSC) で測定した生地の解凍工程における吸熱曲線をもとに、破線で示したベースラインと実線で表される吸収熱曲線との間の斜線部分の面積より凍結率を算出した。数値計算に用いたパン生地の凍結率を Fig. 4-2 に実線で示す。横軸にはパン生地の温度を、縦軸にはパン生地の凍結率をとった。試料の 20mg の重量のパン生地を採取し、 -50°C から 30°C までの温度帯を $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の速度で昇温させた。DSC の測定値を目盛づけるための基準物質にはアルミナを用いた。厳密には、パン生地は -20°C 程度の温度では未凍結率部分が残存すると考えられるが [5]、ここでは計算の過程で解凍時の潜熱を条件として与える $-20^{\circ}\text{C} \sim \theta_{fr} (= -3.2^{\circ}\text{C})$ の温度帯についてのみ状態変化を考慮

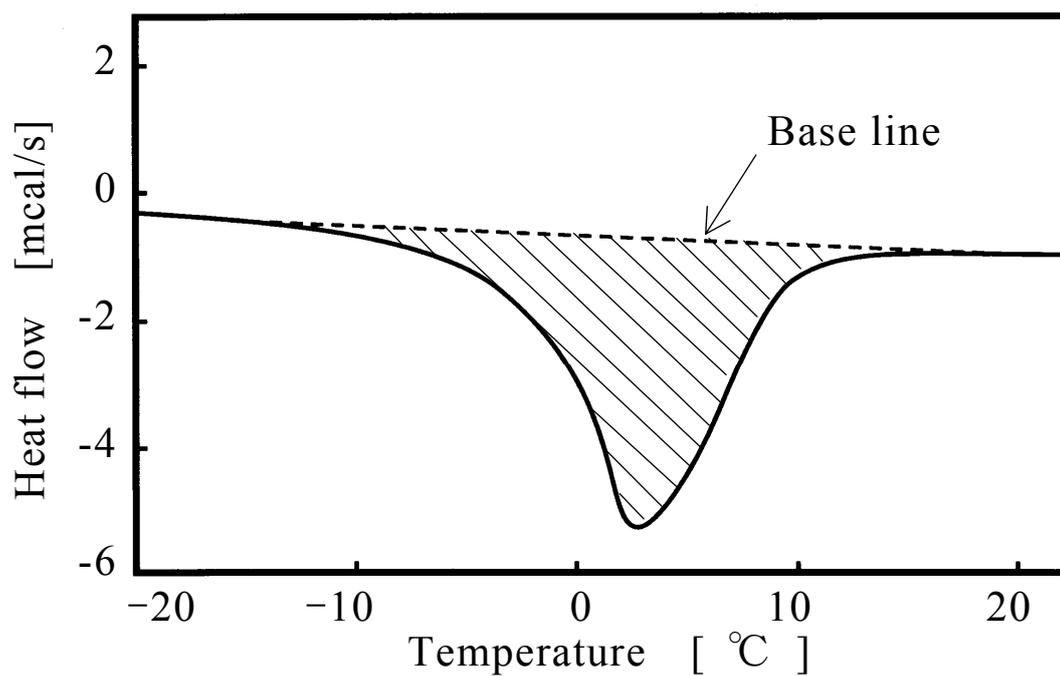


Fig. 4-1 DSC heating curve of bread dough.
Heating rate : 5°C/min(-50°C ⇒ 30°C)
Sample weight : 20mg
Reference : alumina

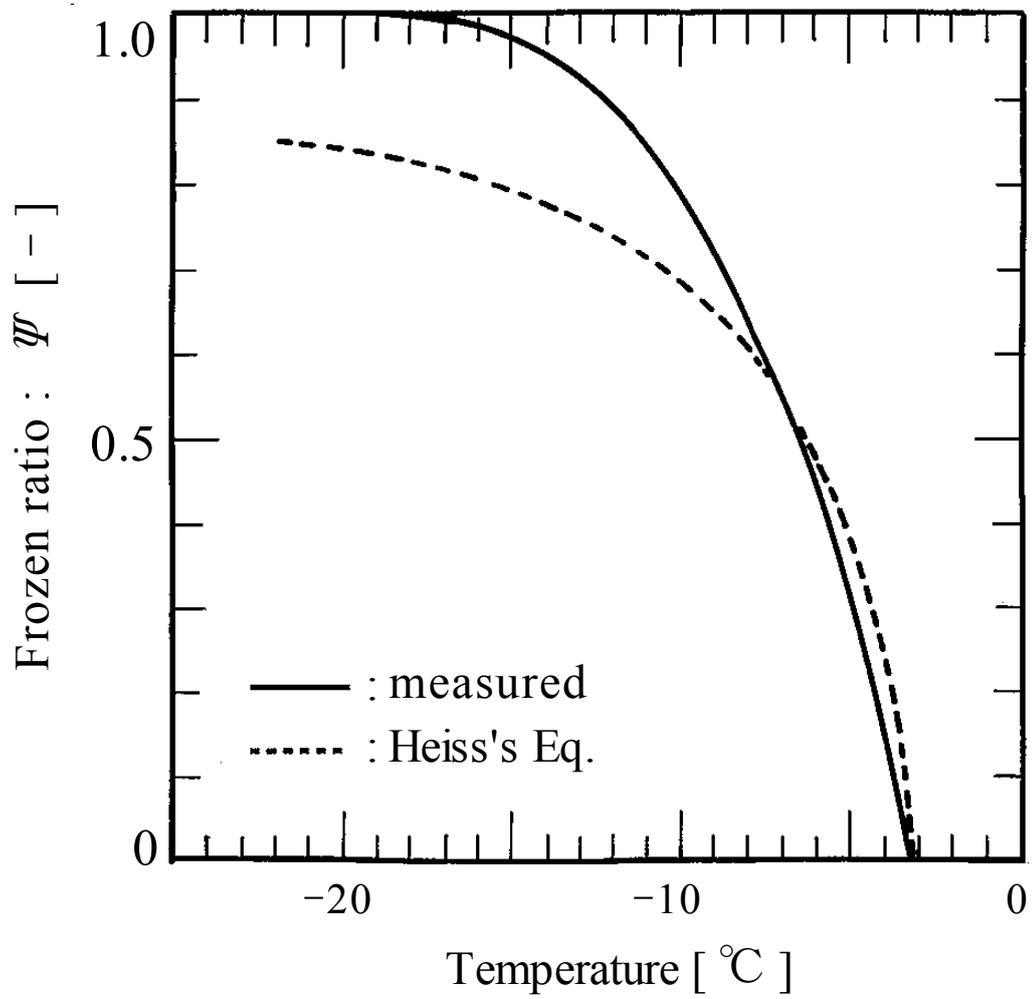


Fig. 4-2 Temperature dependence of frozen ratio of bread dough calculated from DSC data.

した．凍結率の実測例は少なく，Heiss が希薄溶液に対して導いた近似式[6]，

$$\Psi = 1 - \theta_{fr} / \theta \quad (\theta \leq \theta_{fr}) \quad (4-10)$$

が使用されることが多い．式(4-10)で θ_{fr} は試料の凍結温度であり，パン生地の凍結温度 $\theta_{fr} = -3.2^\circ\text{C}$ である．式(4-10)を Fig. 4-2 に破線で示した．

4.4 測定結果

4.4.1 生地内での温度変化

Fig. 4-3 にパン生地解凍工程における生地中心部の温度変化について，実測値と計算結果を併せて示す．横軸には解凍時間を取り，縦軸には温度をとった．冷蔵庫内の空気の温度は 3°C である．冷凍工程においては生地の温度が凍結温度に留まって状態変化のみが生じたが，解凍工程では，そのような現象は現れず，生地の温度は凍結温度 $\theta_{fr} = -3.2^\circ\text{C}$ を越えた時点で急激に上昇した．一方，凍結温度においてのみ解凍が起こるものとして計算した場合(破線)，得られた結果は実際の現象とは異なる傾向を示し，計算の仮定が不適切であることが示された．パン生地の凍結率を計算に考慮することによって，数値計算の結果は実測値に近い傾向を示し，本計算結果の妥当性が示された．しかし，この計算では解凍時の潜熱を単純に比熱に置き換えて計算したため，計算結果が実測値に十分には一致しなかった．固相・液相の分散系についての熱物性値のとり扱い法の検討があるのが望ましい．なお，最大氷結晶生成帯での滞留時間 t_{zi} について，計算値は実測値より 60 分程度短い，いずれの試料でもほぼ一律に偏っていた．

数値計算で得られたパン生地内部における解凍時間の分布を Fig. 4-4 に示す．解凍条件は，Table 4-1 に示した①の条件である． R 軸にはパン生地の半径方向長さ， Z 軸には垂直軸方向の長さを， RZ 平面には生地の中心軸を通る断面をとった．図の RZ 平面上には生地断面の輪郭を実線で，半径を示す部分の高さ z_{cet} を破線で示した．縦軸には解凍時間をとった．ここで解凍時間とは，(凍結率)=0 となる時間を意味している．解凍

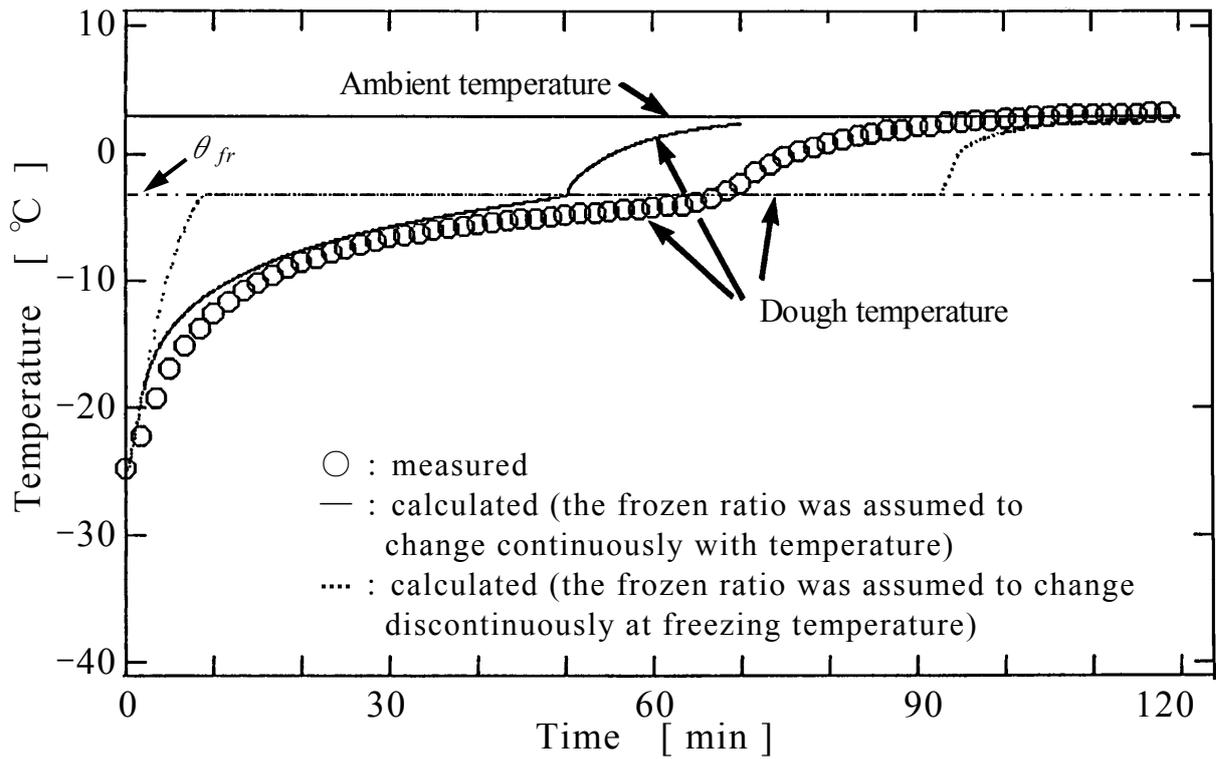


Fig. 4-3 Temperature change of dough during thawing.

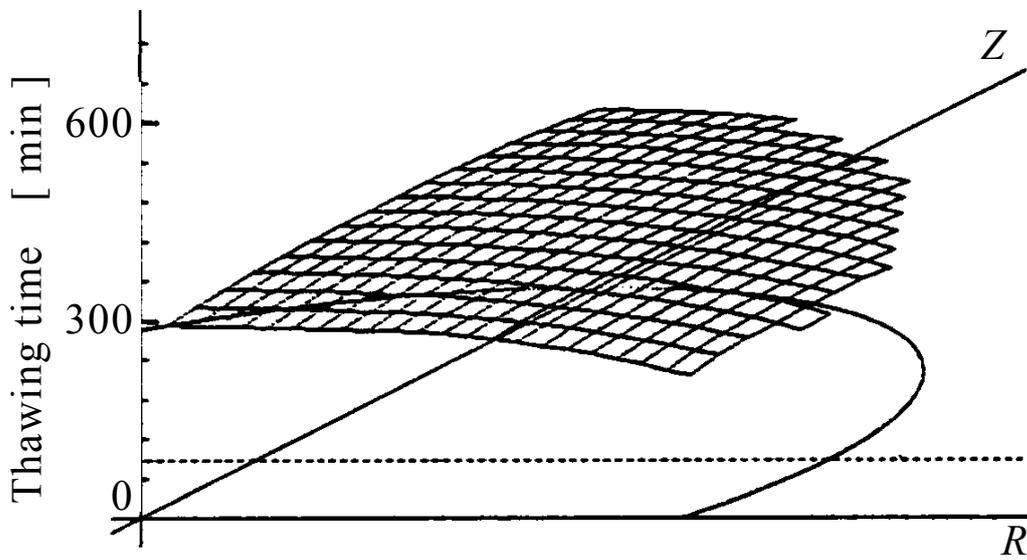


Fig. 4-4 Calculated distribution of thawing time in bread dough. (ambient temp. ; 3.0°C (0-960min) ①)

工程では生地部位による解凍時間の差が小さいことがわかる。解凍開始後、生地全体の温度がほぼ均一に温度上昇するが、これは凍結状態にあるパン生地の温度伝導性が高いことによる。

4.4.2 最大氷結晶生成帯の滞留時間

Figs. 4-5 a), b)に最大氷結晶生成帯での滞留時間 t_{zi} の生地内分布についての計算例を示す。R軸にはパン生地の半径方向長さ、Z軸には垂直軸方向の長さを、RZ平面には生地の中心軸を通る断面をとった。図のRZ平面上には生地断面の輪郭を実線で、半径を示す部分の高さ z_{cel} を破線で示した。縦軸には最大氷結晶生成帯での滞留時間 t_{zi} をとった。解凍条件は、a)が Table 4-1 に示した①の条件(3℃において 960 min 解凍)であり、b)は⑤の条件(-5℃において 840 min 昇温した後に 3℃において 120 min 解凍)である。解凍条件の違いにより最大氷結晶生成帯での滞留時間 t_{zi} が大きく異なる。いずれの試料でも、生地部位による t_{zi} の差は小さい。したがって、解凍条件の違いにより生じる生地の冷凍障害の程度は、冷凍工程とは異なり、部位による分布がわずかであって、生地全体に均等化されていることが推測される。Figs. 4-6 a), b)に、前述の Figs. 4-5 a), b)の計算例に示した2種の条件に従って解凍したパン生地のSEM画像を示す。パン生地は、凍結切断、グルタルアルデヒドによる固定、リン酸緩衝液による洗浄に続いて、50~100%エタノールによる脱水、酢酸イソアミルへの置換後、臨界点乾燥を行い、得られた試料を金蒸着した後、トプコン製走査型電子顕微鏡(型式: ALPHA-30A)により10~15kVで観察した。比較的急速な解凍条件による試料 a)では澱粉粒を取り巻く帯状のグルテン構造が明瞭に確認できる。一方、緩慢な解凍条件の下で解凍した試料 b)は、生地のグルテン構造が細く脆弱化しており、過多の障害を受けていることがわかる。

4.4.3 製パン試験

Table 4-1 に示す解凍条件にしたがって作製したパン生地を使用し、製パンを行なった。その製品の品質についての測定結果を以下に述べる。製パンにあたっては、二次発酵(proofing)の工程で生地膨張率を一律にして焼成した。生地が障害を受けて発酵工程での生成ガスの漏洩が多くなることによって膨張が遅れた場合、発酵時間を延長して対

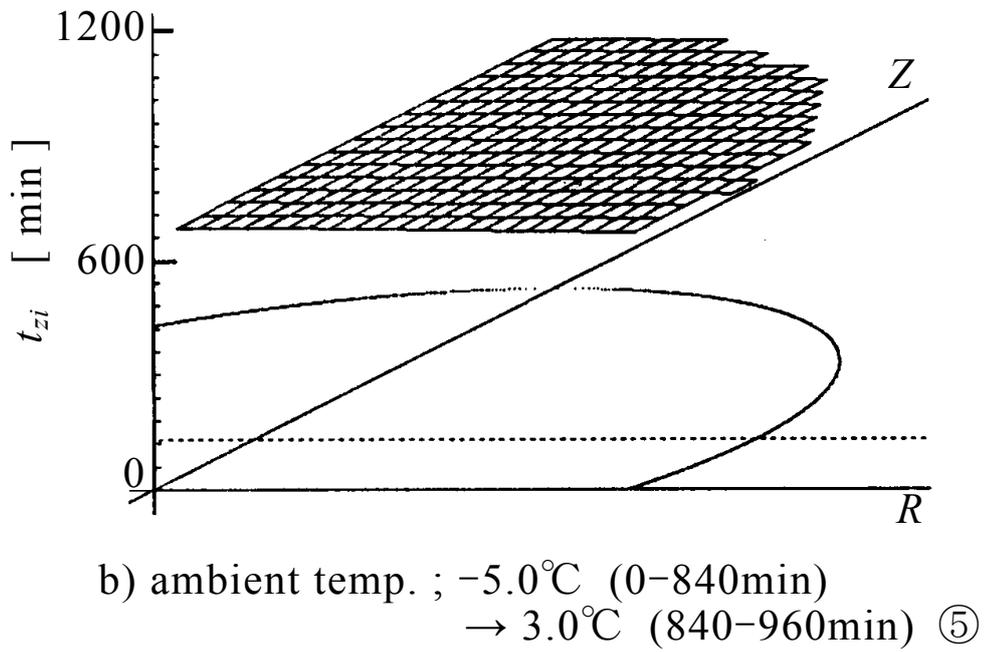
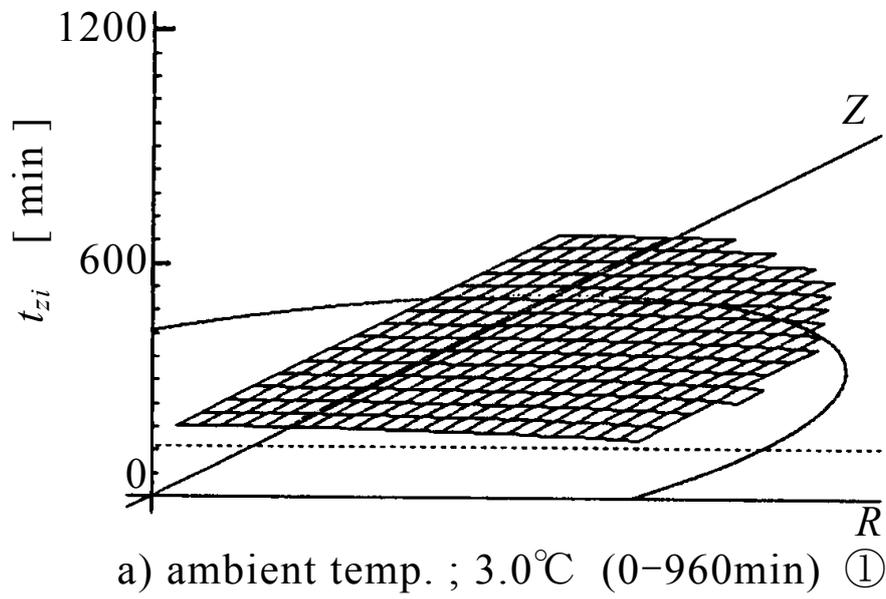
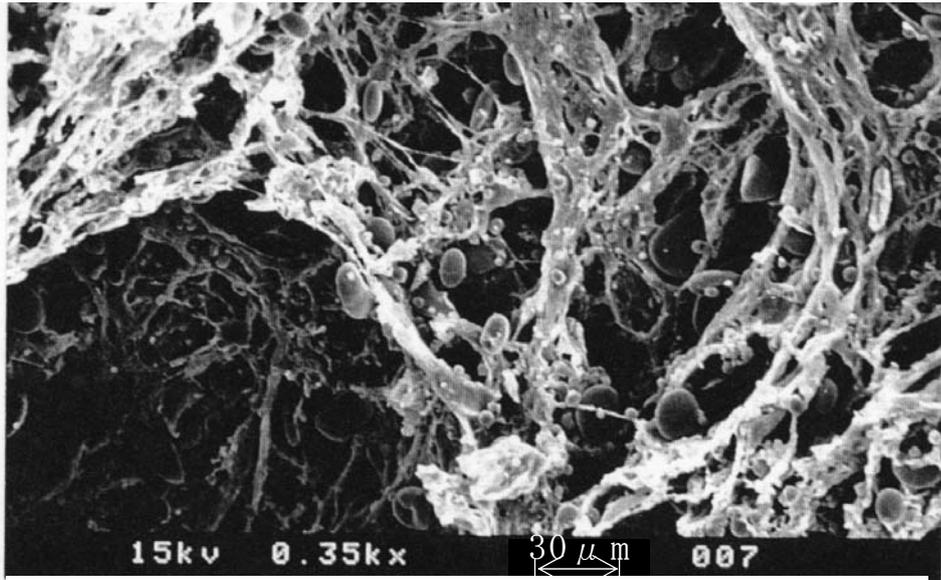
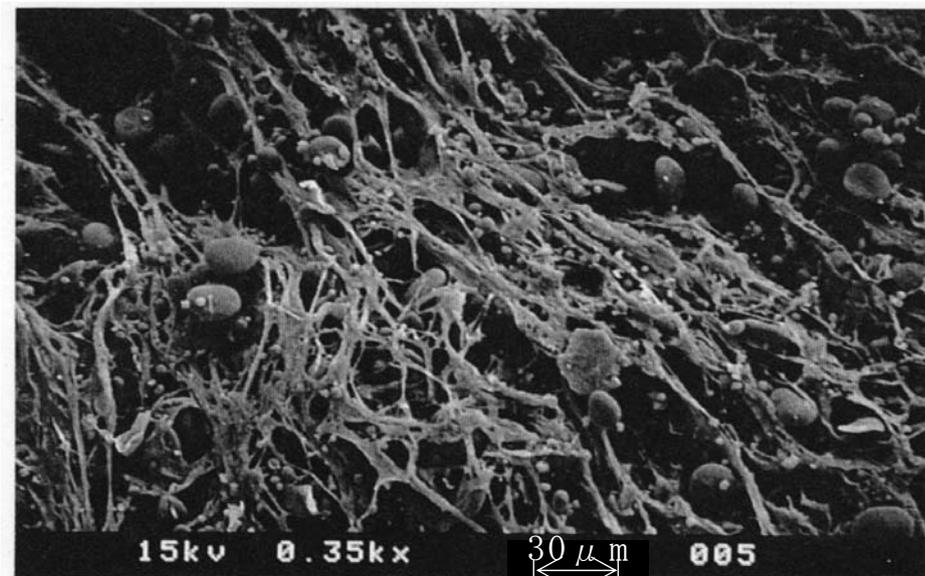


Fig. 4-5 Calculated distribution of t_{zi} .



a) ambient temp. ; 3.0°C (0-960min) ①



b) ambient temp. ; -5.0°C (0-840min)
→ 3.0°C (840-960min) ⑤

Fig. 4-6 SEM images of bread dough structure after thawing processes a) and b).

応する。

製品の品質は、大きく外観の品質と内相の品質に分けることができる。外観については型を使用しないで焼成するバンズを製造し比較した。Fig. 4-7には作製したバンズの比体積について、Fig. 4-8には高さを($\sqrt{\text{短径} \times \text{長径}}$)で除した値で示した形状係数についての結果を示す。比較的急速に解凍した試料(①, $t_{zi}; 156\text{min}$)においては、比体積が大きく、かつ形状係数が高いが、今回定義した最大氷結晶生成帯での滞留時間 t_{zi} では、計算結果と製品の品質が合致しない試料(②, $t_{zi}; 676\text{min}$ ⑤, $t_{zi}; 664\text{min}$)もあった。

内相(肌目)については、型を使用して焼成する角形食パンを作製して、そのクラム部分の気泡の面積を測定した。測定結果を Fig. 4-9 に示す。縦軸に気泡の面積の平均値をとり、解凍条件の異なる試料で比較した。製パンの条件はバンズの場合と同様に、二次発酵の工程で生地膨張率を一律にした。障害が著しい生地では二次発酵の工程において生地内の気泡の結合が進行するため、肌目が大きく、膜が厚い内相の製品になる傾向があった。解凍条件の初期設定温度がパン生地の凍結温度(-3.2°C)前後の試料において品質は大きく変わるが、 t_{zi} の長い試料については肌目が大きく、膜厚な製品となる傾向があった。ただし、気泡の面積と最大氷結晶生成帯での滞留時間 t_{zi} の値との間の関係は明らかではない。冷凍障害を推測する指標については、さらに検討を要する。

クラムのテクスチャーは内相の状態によるところが大きく、肌目が細かく、膜伸びの良いパンは概ね口当りがソフトで、しっとりとした食感が得られる。Fig. 4-10には、食パンのクラム部分における焼成後の硬さの経時変化を示す。概ね t_{zi} の短い試料①に対し、 t_{zi} の長い試料②～⑤において硬さの値が高いことがわかった。

4.5 結言

第2章で測定したパン生地の有効熱伝導度を用いて直接差分法による数値計算を行い、パン生地を解凍する際における生地内部の経時的な温度分布の変化を調べ、以下の結論を得た。

- (1) パン生地の解凍工程での温度変化については、数値計算の結果は実測値とよい一致

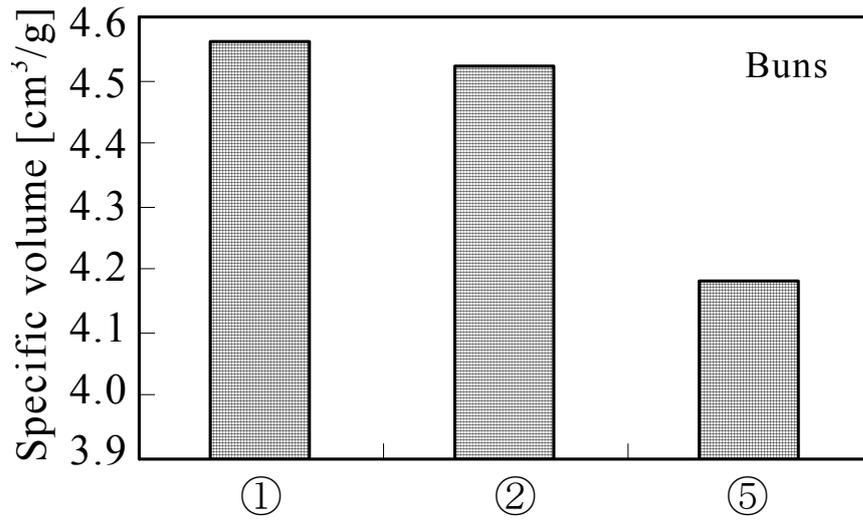


Fig. 4-7 Effect of thawing condition on specific volume of baked bread ①, ② and ⑤ thawed by conditions listed in Table 4-1.

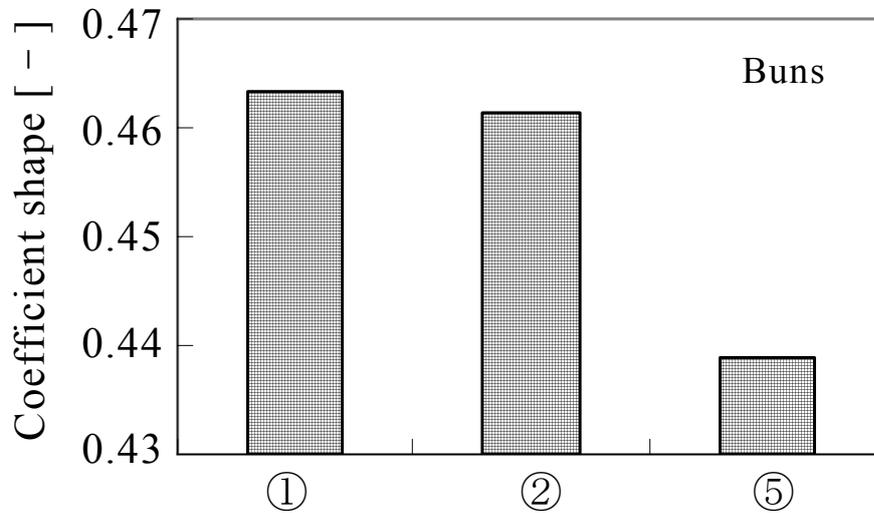


Fig. 4-8 Effect of thawing condition on coefficient of shape of baked bread ①, ② and ⑤ thawed by conditions listed in Table 4-1.

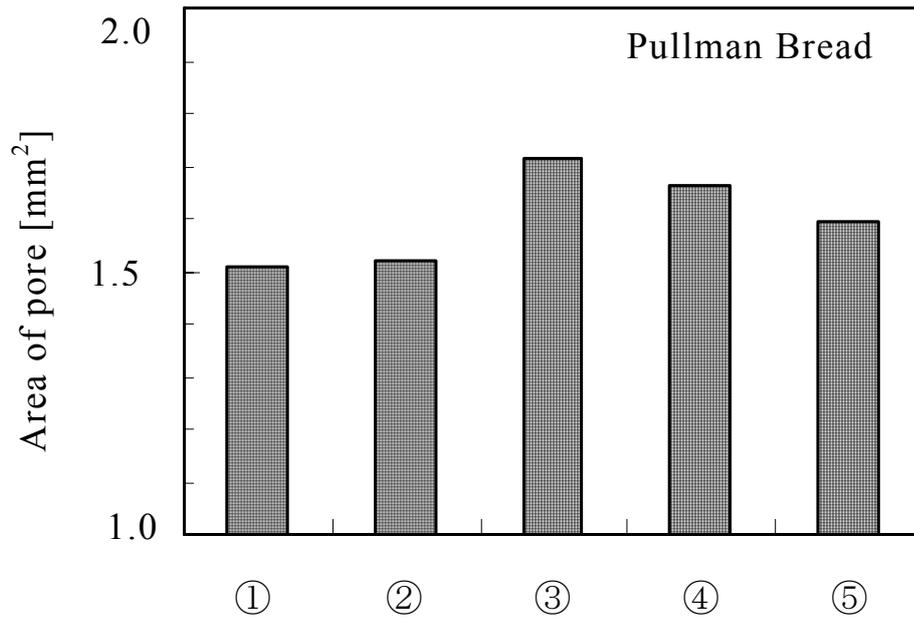


Fig. 4-9 Result of image analysis for pore in bread.

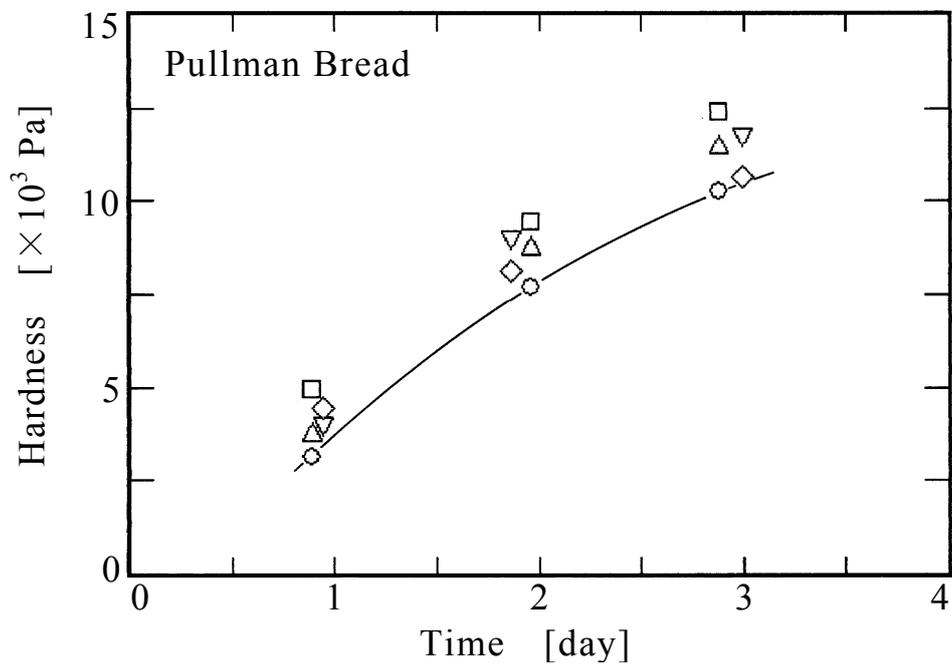


Fig. 4-10 Hardness change of crumb of bread prepared from frozen dough.

Symbols : ○ ; ① △ ; ② □ ; ③ ▽ ; ④ ◇ ; ⑤

を示した。解凍工程では生地内の温度分布は比較的均一な状態で上昇していき、全体の状態変化も短時間の内に完了することがわかった。実際の解凍工程における状態変化を良好にシミュレートできることがわかった。

(2) 実用面の問題として解凍工程での生地への障害レベルを推定する指標については、従来から言われてきた最大氷結晶生成帯の滞留時間で概ねまとめられるが、一部の試料においては矛盾する結果も得られた。この点については、さらに検討を要する。製品の外観品質は、最大氷結晶生成帯での滞留時間が短く急速に解凍した試料において、比体積が大きく、かつ形状係数が高い傾向が確認できた。同様に内相(肌目)については、試料のクラム部分の気泡の面積が小さく膜が薄い製品になる傾向が見られ、テクスチャーについてはクラム部分の硬さの値が低くなることがわかった。

4.6 文献

- [1] 加藤舜朗；「食品冷凍の理論と応用」，(1979)，pp.424-451，光琳.
- [2] 田尻尚志，松本熊市，原和子；「冷凍パン生地の食パン製造への応用（第1報）」，近畿大学農学部紀要，9，(1976)，pp.45-56.
- [3] 久保さつき，水谷令子，杉本卓也；「冷凍パン生地製造条件の検討」，鈴鹿短期大学紀要，15，(1995)，pp.173-183.
- [4] 矢野俊正，桐栄良三；「食品工学基礎講座 加熱と冷却」，5巻，(1992)，pp.126-127，光琳.
- [5] 堀込広明；「食品解凍の最新技術」，(1992)，pp.1-41，研修社.
- [6] 矢野俊正，桐栄良三；「食品工学基礎講座 加熱と冷却」，5巻，(1992)，pp.122-123，光琳.

第5章 食パンの焼成工程における温度場と有効熱伝導度の測定

5.1 緒言

食パンは吸湿性をもち、イースト活性化によって体積膨張して、毛細状の多孔質に変化する。食パン生地は焼成工程では、伝導伝熱、対流伝熱、ふく射伝熱、相変化、水分移動が複合的に起こる。食パン生地では、澱粉が糊化し、タンパク質の熱変性により凝固して、パンの形が決定される。さらに、メイラード反応などの着色反応が起こり、また香気成分が生成されて、外観、色、香りを含む食パンの最終的な品質が決定される。ここで、焼成工程でのパン生地内部の温度や含水率の経時的変化は、食品の品質の中でも、とくに食感に強く影響すると言われている。それゆえ、焼成工程における熱と水分の移動のメカニズムの定量的な把握は重要である。

これまでに、焼成後の食パンの有効熱伝導度の測定[1, 2]、焼成工程でのクラスト形成のメカニズムの研究[3]、焼成工程における生地内部温度のシミュレーション[4, 5]等の研究はあったが、焼成中の食パンにおける熱・水分移動現象を調べる研究は少なかった[6-8]。

焼成工程における蒸発面(気液の移動境界)近傍の熱・水分移動を評価するためには位置精度に優れた多数の測温接点を設けて、パン生地内部の熱移動量を測定することが必要である。

本章では、角形食パンの焼成工程における生地内部の温度場の時間変化を明らかにするために、ポリイミドフィルム上に異種金属を真空蒸着し、所定の間隔で5点の測温接点を集積した薄膜熱電対と9点の測温接点を集積した細線による熱電対を作製し、食パンのクラストとクラムの境界を含むパン生地内部の温度分布を測定する。加えて、焼成工程中のパン生地温度およびパン型からパン生地へ流れる熱流束を測定し、焼成中パン生地の水分移動を含む有効熱伝導度を求める。有効熱伝導度は、伝導伝熱、相変化、水分移動の影響を考慮した。

5.2 試料および実験方法

5.2.1 試料

試料には安定した品質が期待できる食パン用の冷凍生地を使用した。使用した冷凍生地は、Table 3-1 において示した配合によるものである。

食パン型には 1.5 斤(120×180×135mm)のサイズのものを使用した。約 640g の生地を解凍・前発酵・丸め・整形・最終発酵を経て、生地の体積が食パン型の約 8 割になった時点で焼成を行った。

5.2.2 集積型薄膜熱電対

a) 製作方法

真空蒸着によって製作する薄膜熱電対の素材には、熱起電力が高い、純金属である等の点を考慮して選定する必要がある。これらの条件を満たす金属として Fe と Ni を選択した。しかし、ポリイミド基板上への Fe の密着性が悪く、酸化によって薄膜の抵抗値が経時的に低下する傾向が見られた。そこで、Fe の代替金属として Cu を選んだ。Cu は Fe と比較して起電力は低いですが、蒸着が容易で、劣化しにくい特徴があり、基板への密着性も良好であった。最終的に、Cu-Ni の組合せを選択した。

Fig. 5-1 に作製した薄膜熱電対の測温部の構成図を示す。1.6mm 間隔で 5 点の測温接点①～⑤をもつ。Fig. 5-2 に基板上での熱電対配置の写真を示す。薄膜熱電対の製作手順として、厚さ 125 μm の耐熱性に優れるポリイミドフィルム上に、ワイヤー放電加工機で製作した 2 種類のハードマスクを順次交換し Ni および Cu を成膜する。斜線で示す 0.4 × 0.4mm の領域が Ni および Cu を重ねて成膜した部分である。その後、抵抗値の経時変化を防ぐために基板耐熱温度である 400°C 窒素雰囲気中でエージングする。基準接点温度の測定には直径 0.1mm の T 型熱電対を Fig. 5-2 に示す基準接点部に貼り付けた。銅線は少量の導電性接着剤にて接合し、各基準接点部分の温度を一定にするために、厚さ 0.2mm の銅板を両面に貼付けた。蒸着は抵抗加熱式真空蒸着装置を用いて真空度約 1.6×10^{-5} torr で行った。成膜された薄膜の厚さは両金属とも約 0.5 μm であり、抵抗値の経

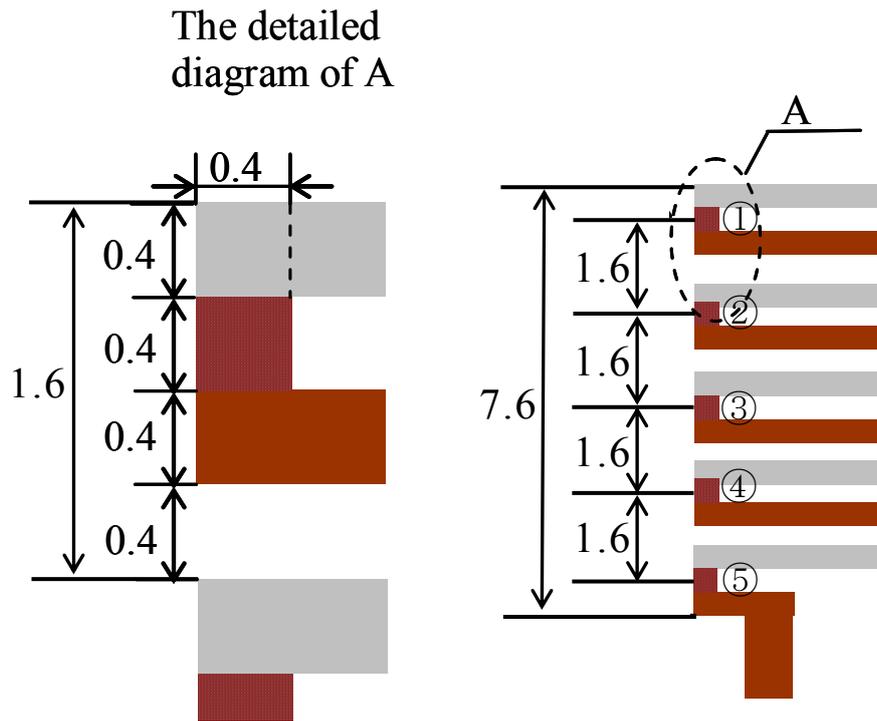


Fig. 5-1 Hot junctions. (unit : mm)

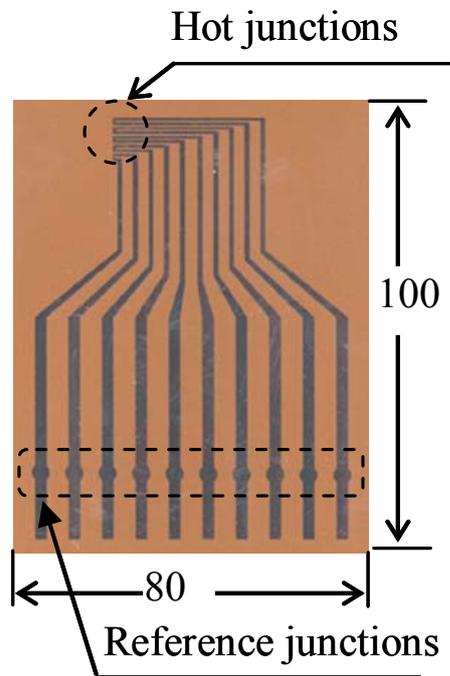


Fig. 5-2 Thin film thermocouples. (unit : mm)

時変化は認められなかった。

b) 薄膜の組成と構造

抵抗加熱式真空蒸着装置で蒸着ボートなどの加熱材料(蒸発源)と蒸発物質が直接に接触している場合には、加熱材料が不純物として膜中に混入することがある[9]。そこで、エネルギー分散型X線分光法(EDX)、電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)による薄膜の組成分析を行った。その結果、蒸着源の金属以外の物質はフィッティングせず、薄膜の組成はバルクのそれと等しいことが分かった。

Fig. 5-3にCu薄膜、Ni薄膜の走査型電子顕微鏡(SEM)断面画像を示す。両者とも蒸着回数による積層構造が観察される。Ni薄膜についてはその構造がより鮮明に観察される。

c) 薄膜の熱起電力特性

薄膜熱電対の熱起電力を測定した。ポリイミド基板が80×100mmと小さいので、Fig. 5-4に示す方法で熱起電力を校正した。基準接点側である蒸着膜と銅素線の接合点を銅プレートで挟み、氷水にて低温度(約0°C)の一定値に保持する。測温接点側でも蒸着膜の接合点を銅プレートで挟み、ヒーターで加熱する。変圧器でヒーターへの印加電圧を変更して約10°Cごとに100°C程度まで測温接点の温度を上げて、基準接点と測温接点間で生じる熱起電力を測定した。熱起電力が発生している状態での基準接点の温度 θ_R と測温接点の温度 θ_H の測定には、直径0.1mmのT型熱電対を用いた。起電力はハイブリッドレコーダー(横河DR230)で記録した。

薄膜熱電対の熱起電力を測定した結果をFig. 5-5に示す。図中には、細線によるバルクの熱起電力を併せて示す。横軸は基準接点と測温接点との温度差、縦軸は基準接点と測温接点との温度差によって生じた熱起電力である。破線で示すバルクの熱起電力と比較して約15%低い、温度差と熱起電力の間には線形の関係が認められる。なお、Cu膜はバルクのCu線との間で熱起電力をほとんど生じず、薄膜熱電対の熱起電力がバルクのCu-Niの熱起電力より低いのはNi膜とCu膜もしくはNi膜とCu線との間の熱起電力がバルクのCu-Niの熱起電力から逸脱していることによるものと推測される。

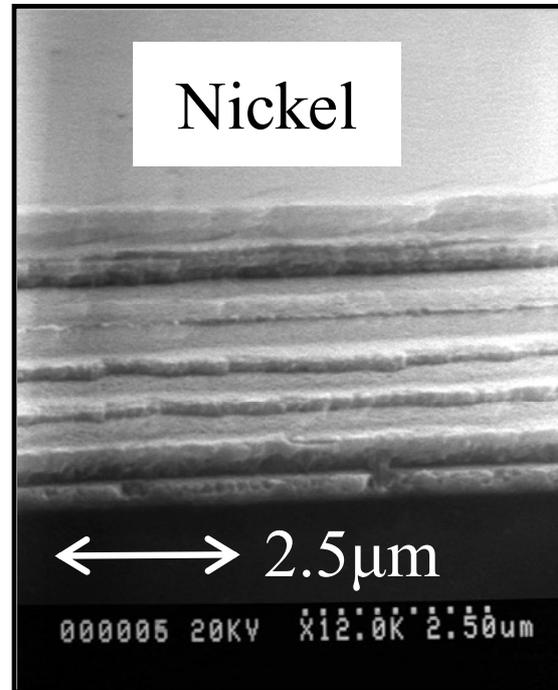
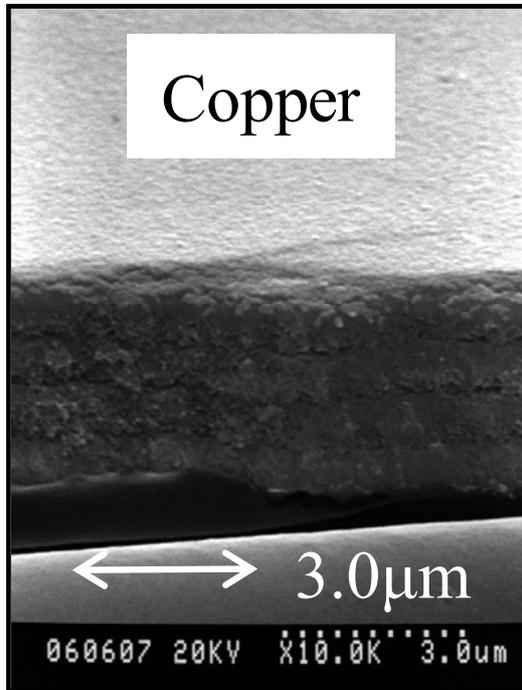


Fig. 5-3 Cross sections of copper and nickel films.

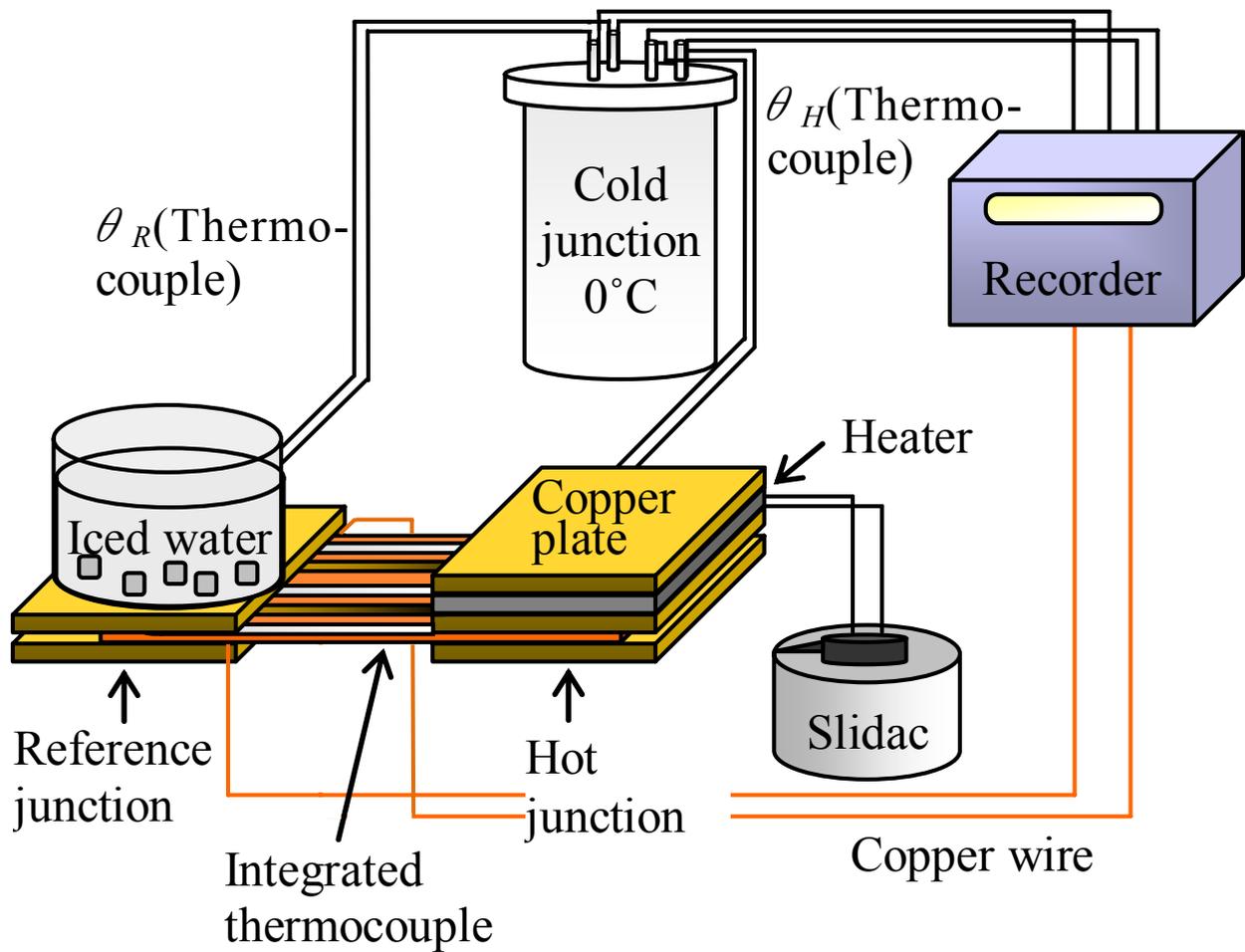


Fig. 5-4 Schematic diagram of thermal electromotive force calibration.

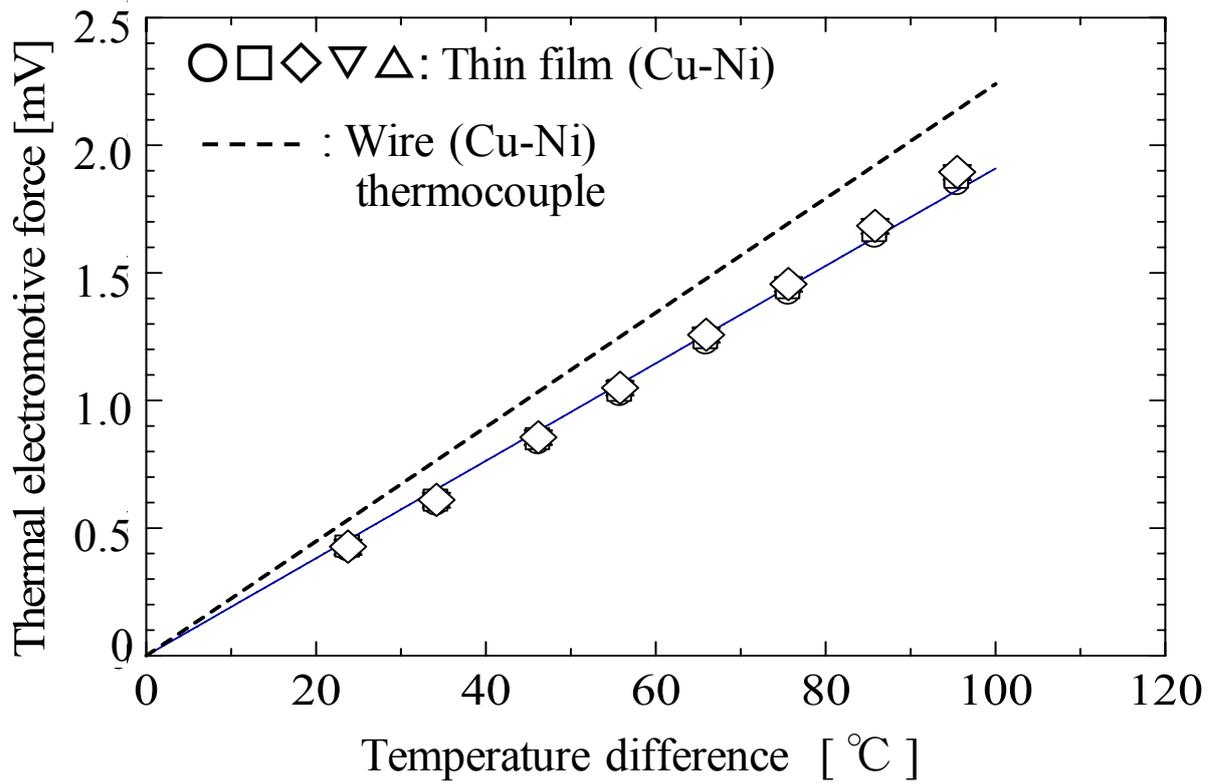


Fig. 5-5 Calibration of thermal electromotive force.

d) 焼鈍の効果

熱起電力低下の原因を調べるため、Cu、Ni 薄膜について見掛けの密度を測定したが、常温でのバルクの密度と比較してほぼ同じであった。薄膜内のマイクロな欠陥によって電気的性質が変化しているものと考えられる。

そこで、ガラス板上に蒸着した Ni 薄膜を、Ni の再結晶温度である 600℃で焼鈍した。焼鈍した薄膜の熱起電力特性を Fig. 5-6 に示す。薄膜の起電力がバルクの Cu-Ni の起電力とほぼ同程度に回復することが分かった。Cu 薄膜の場合には蒸着中にふく射を受けて、基板温度が Cu の再結晶温度である 200℃程度まで上昇する。このため擬似的に焼鈍された状態となりバルクの場合との熱起電力差を発生しなかったと考えられる。

以上のように、再結晶温度で焼鈍することにより成膜によって生じたマイクロな欠陥を回復させ、バルクの場合と同じ熱起電力が生じることが分かった。しかし、本研究で使用しているポリイミドフィルムの耐熱温度が約 400℃であり焼鈍ができない。このため Fig. 5-6 に示す薄膜熱電対の熱起電力から基準接点との温度差を計算し、基準接点温度の変化を測定することにより、クラスト近傍の温度測定を行った。

5.2.3 集積型細線熱電対

集積型薄膜熱電対の特徴として、焼成工程中のパン生地中に挿入しても、測温接点間の相対的な位置が変化しないことが挙げられる。しかし、実際の測定では薄膜熱電対の基準接点部も焼成工程中に温度変化が生じる生地中にあるため、起電力較正と温度換算による測温精度、継続的な使用による耐久性の面での欠点がある。そのため相対的な温度は測定できるが、焼成工程中の熱物性値を推定するためには利用し難い。

そこで、薄膜熱電対による測定の結果を補完しつつ、過渡的なパン焼成中の熱物性値を推定する手段として、基板上に多数の細い熱電対素線(細線)を一定の間隔で集積させた集積型細線熱電対を製作した。基板にはポリイミドフィルムを使用した。その厚さを 50 μm とし、熱容量を小さくした。細線には空間分解能を高めるために、直径 50 μm の K 型(クロメル-アルメル)熱電対を使用した。測温接点は、1mm 間隔の階段状にした。基板上に素線が通る直径 100 μm の穴を加工し、その部分に測温接点を配置した。Fig. 5-7 に製作した集積型細線熱電対の接点部の写真と接点配置図を示す。

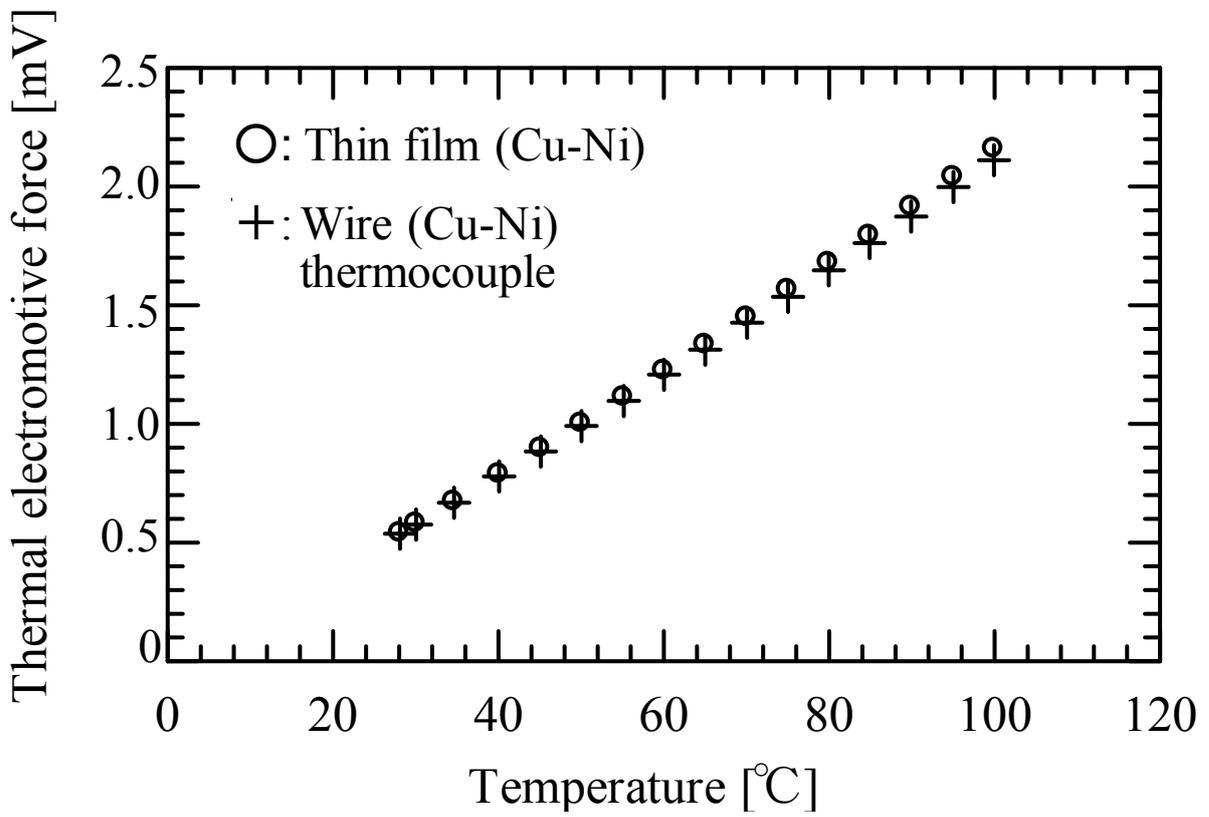


Fig. 5-6 Effect of annealing

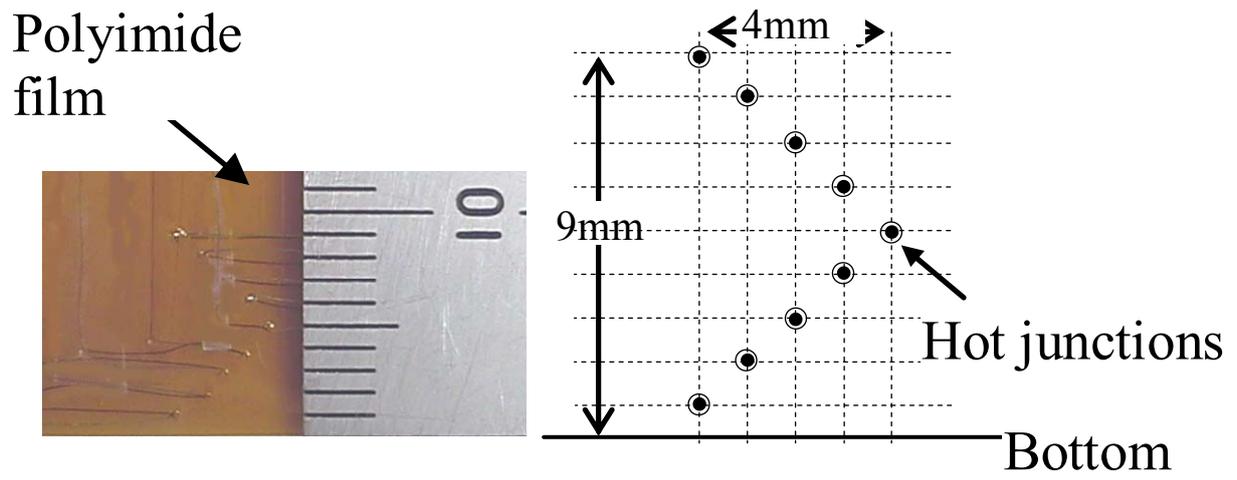


Fig. 5-7 Integrated thin wire thermocouple.

5.2.4 実験装置

媒体として空気を対流させて被加熱物を加熱するコンベクション式の電気オーブン(クリナップ FE-600)を使用して, 食パンの焼成の実験を行った. その実験に用いた実験装置の概要を Fig. 5-8 に示す. 集積型薄膜熱電対(80×100 mm)B, あるいは集積型細線熱電対(70×80 mm)B を, とともに食パン型 A の長手方向中心部分に食パン型底面に垂直になるように取り付けた. 食パン型への固定には, 熱伝導度が低く耐熱性に優れた特徴を有する直径 0.1 mm ポリフッ化ビニリデン(PVDF)線を用いた. 集積型薄膜熱電対 B による測温点は, 食パン型底面直上の 1.0 mm の箇所を含むピッチ 1.6 mm(Fig. 5-1)の 5 点である. 集積型細線熱電対 B の測温点は, 熱流束センサー C, 集積型細線熱電対 B の測温接点を含む食パン型底面 0~9 mm および中心温度の計 11 点である. 食パン型底面から食パン生地への熱流束は, 熱流束センサー(CAPTEC, HF-20, 寸法 20 mm×20 mm×0.4 mm)を熱伝導性の高い専用ペーストを用いて, 食パン型底部内面の中心に貼って測定した. このセンサー C は熱流束に比例する電圧を出力する. 各測定データは, 電圧記録計で A/D 変換した後, パーソナルコンピュータに転送し, 換算処理を行った. なお, 熱流束センサーは別途に製作した較正装置によって±5 %の測定精度もつことを確認している.

5.3 実験結果及び考察

5.3.1 温度および熱流束

オーブン炉内の空気温度 θ_A (以後焼成温度と呼ぶ) を 180 °C で焼成したパン生地について集積型薄膜熱電対によって温度の測定した, その結果を Fig. 5-9 に示す. 横軸が焼成時間, 縦軸が集積型薄膜熱電対と基準接点温度測定用熱電対の熱起電力の和を温度に換算したものである. 図には, 直径 0.1mm の T 型熱電対で測定した基準接点温度 θ_R を実線で, 1 気圧における水の沸点である 100°C を破線で併せて示す. 食パン型底面より高さ 1.0 mm, 2.6 mm, 4.2 mm の位置にある接点の温度は全焼成期間を通じて徐々に上昇するが, 高さ 5.8 mm, 7.4 mm の位置にある接点の温度は 100 °C 近傍で維持される.

Fig. 5-10 には, 焼成温度 θ_A 180 °C で食パンを焼成した際に集積型細線熱電対で測定したパン生地の温度, 食パン型からパン生地への熱流束の時間変化を示す. 横軸に焼成時間を取り, 左側の縦軸に温度および右側の縦軸に熱流束をとった. 図には, 1 気圧に

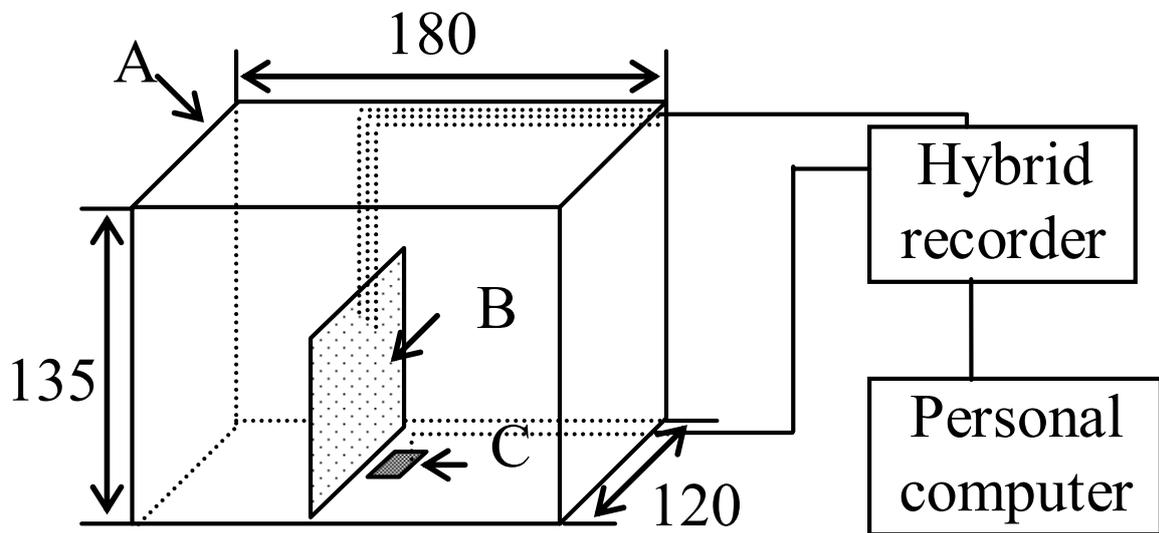


Fig. 5-8 Experimental apparatus for measurement of temperature and heat flux. (unit: mm)
 (A: Baking tin, B: Integrated thin film thermocouple and integrated thin wire thermocouples, C: Heat flux sensor)

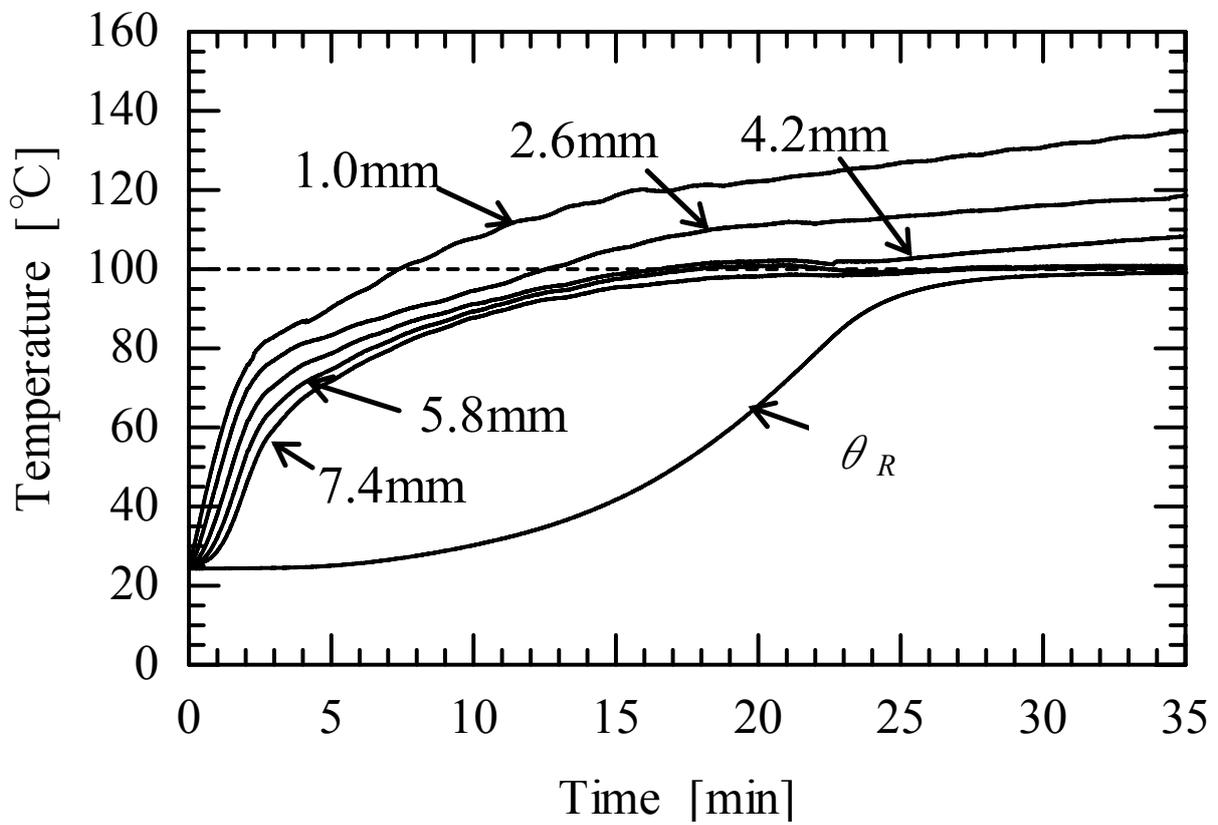


Fig. 5-9 Change of dough temperature measured by integrated thin film thermocouples in baking process. ($\theta_A=180^\circ\text{C}$, dough weight=640g)

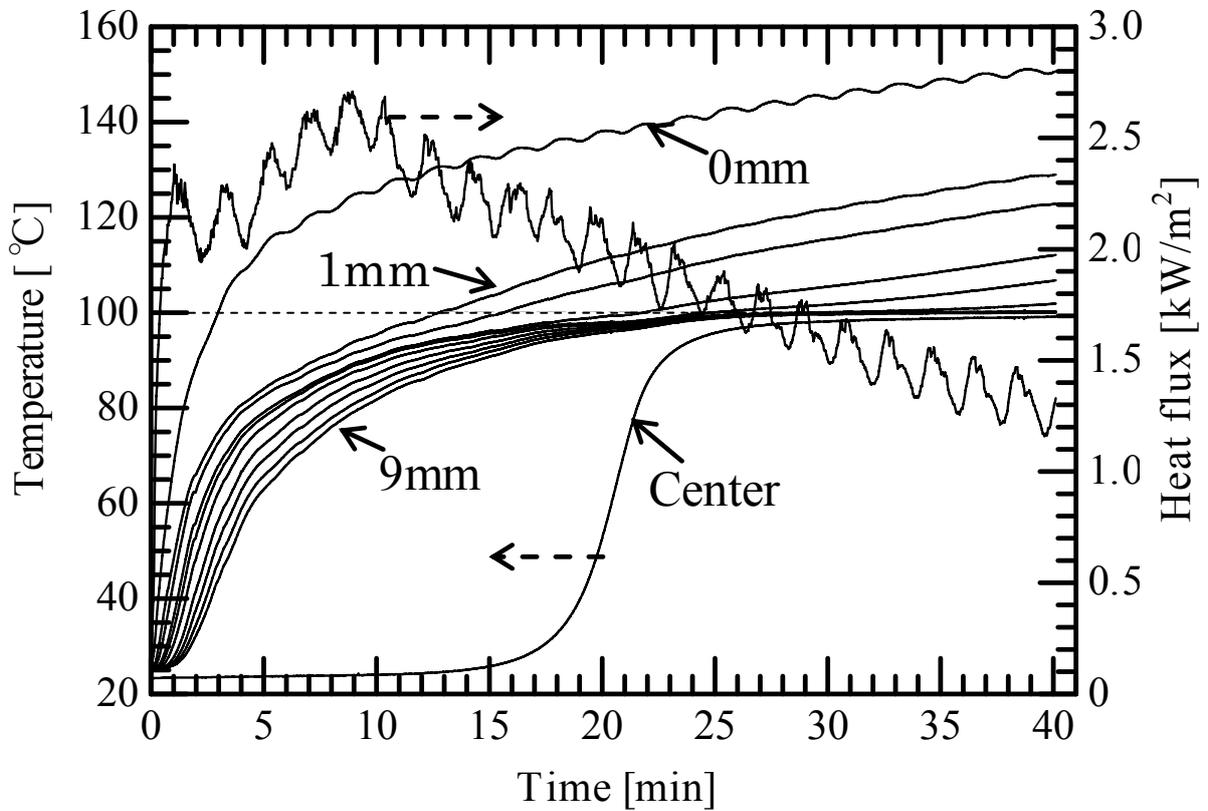


Fig. 5-10 Change of dough temperature and heat flux measured by integrated thin wire thermocouples in baking process.

($\theta_A = 180^\circ\text{C}$, dough weight=640g)

おける水の沸点である 100℃を破線で併せて示す．本実験で使用したオーブン炉内の対流ファンは一定の速度で回転しており，焼成温度の制御は電気ヒーターの ON-OFF 制御で行っている．そのため，熱流束に約 2 分の周期的な変動が見られる．熱流束は焼成開始後 9 分程度までは上昇するものの、その後は低下する．温度は食パン型底面より高さ 0 ～5 mm の位置では，焼成時間が進むにしたがって 100℃を越えたが，6 mm 以上では 100℃近傍の温度に収束した．すなわち，蒸発面の存在が明瞭に確認できる．このことは，集積型薄膜熱電対による測定結果 (Fig. 5-9) と概ね一致する．

5.3.2 伝熱モデル

食パン等の非均一系の熱伝導度は有効熱伝導度としてとり扱う．ここでは，Fig. 5-11 に示すモデルで考える焼成工程中の水分移動の寄与（空隙内での水蒸気の拡散，蒸発・凝縮による潜熱輸送）を含めた有効熱伝導度に相当する量を考える．

本研究における温度測定範囲はパン表層 10 mm で，パン生地全体と比べて小さい範囲である．実験から表層近傍中心部の熱流束は焼成温度に関係なく温度差に比例し，食パン型から生地への熱流は 1 次元的に流れることがわかっている．また，Fig. 5-10 から温度場の勾配がほぼ一定である時間帯（たとえば 5～10 分）が存在することがわかる．

食パン型から生地へ熱流が 1 次元的に流れており，温度勾配が一定であれば，その比例係数は熱伝導度と等価な量とみなすことができる．そのとき，各測温接点間の距離を l ，その間隔での有効熱伝導度を λ_{ei} ($i=1, 2, 3, \dots$) とすると，食パン型から生地に流入する熱流束 q は，次式で表される．

$$q = \frac{\lambda_{e1} \cdot (\theta_0 - \theta_1)}{l} = \frac{\lambda_{e2} \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{l} = \frac{\lambda_{e3} \cdot (\theta_2 - \theta_3)}{l} \quad (5-1)$$

したがって，食パン型の底面における熱流束，温度，測温間隔から，食パン焼成工程中の生地内の有効熱伝導度が計算できる．

Fig. 5-10 で，焼成開始後の 5 分間に，表面の急激な温度上昇，窯伸びによる体積の膨張，澱粉の糊化などの変化が著しく温度勾配が一定にならない．そのため式 (5-1)

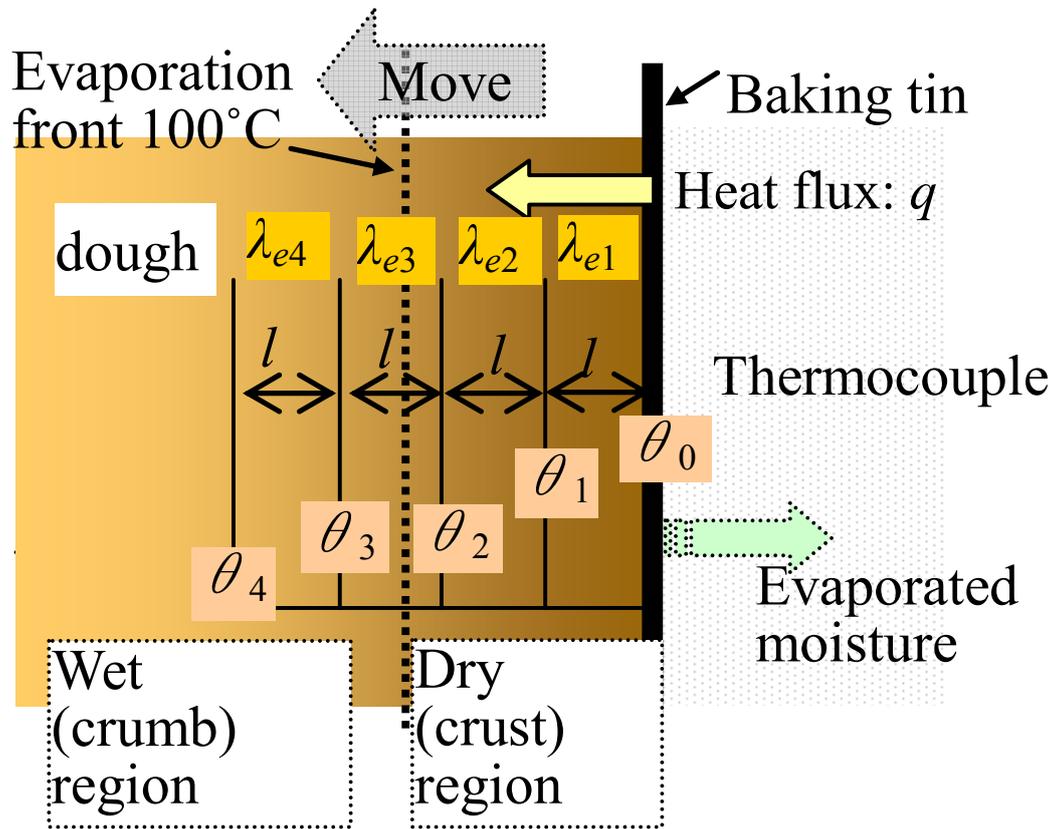


Fig. 5-11 Effective thermal conductivity of crumb and crust in baking process.

は成立しない。一方、焼成開始後 5 分～10 分の間には温度、熱流束ともに変化するが、パン生地内部の温度上昇はほぼ一定になる。すなわち、食パン型からパン生地に流れる熱流束、熱電対間隔 (1 mm) および温度差から、100 °C 以下の水分を含むパン生地 (クラム) の有効熱伝導度を計算することができる。また、焼成開始後 25 分以降には、クラムの温度が 100 °C を越え、水分が蒸発し乾燥したクラスト領域の有効熱伝導度も 100 °C 以下の水分を含むパン生地 (クラム) の場合と同様の方法で計算できる。

5.3.3 クラムの有効熱伝導度

Fig. 5-12 は、焼成温度 180 °C でパン生地を焼成した際の温度、熱流束の時間変化から高さ 1～7 mm の間の位置にある測温接点での焼成中における見掛け上の熱伝導度 λ_{ei} ($i=1, 2, 3 \dots 7$) を式 (5-1) より計算したものである。横軸は生地の平均温度、縦軸が有効熱伝導度である。有効熱伝導度は澱粉糊化度、空隙などの構造の違いなどにより場所ごとに異なる。

概して、有効熱伝導度は温度が高くなるにしたがって上昇するが、 λ_{e2} 、 λ_{e3} は高温側で低下する。これはパン生地表面層においてクラストが形成され始めた影響によるものと考えられる。クラムの有効熱伝導度は、67～95 °C の範囲で 0.7～2.2 W/(m·K) であった。Fig. 5-12 には第 2 章において非定常プローブ法で測定された焼成後のクラムの有効熱伝導度 (記号 $-○-$) を併せて示すが、本章で測定した値は破線で示す非定常プローブ法による測定結果の外挿値よりもかなり大きい。

空隙が液相 (水) および気相 (空気と水蒸気) で占められている固-液-気の 3 相分散系の場合、含水率が増加するにしたがって有効熱伝導度は次第に増加し、飽和時の有効熱伝導度に達する [10]。また、温度が上昇し空隙に占める水分の飽和度が増加し、70 °C を越えると飽和時の値以上の最大値をもつと言われている。いっぽう、パン生地は 55～65 °C で澱粉の糊化が起こり、74 °C でグルテンの凝固が始まる。澱粉の糊化とは、澱粉成分のアミロースとアミロペクチンが規則正しく配列しているものが、加熱によりアミロースとアミロペクチンの結合が緩み、水分子が入り込めるようになる反応である。この温度領域でパン生地の構造的変化は完了し、分散していた空隙が連結し、水は自由に移動可能になる。そのため、焼成中のクラムの有効熱伝導度は水分移動の寄

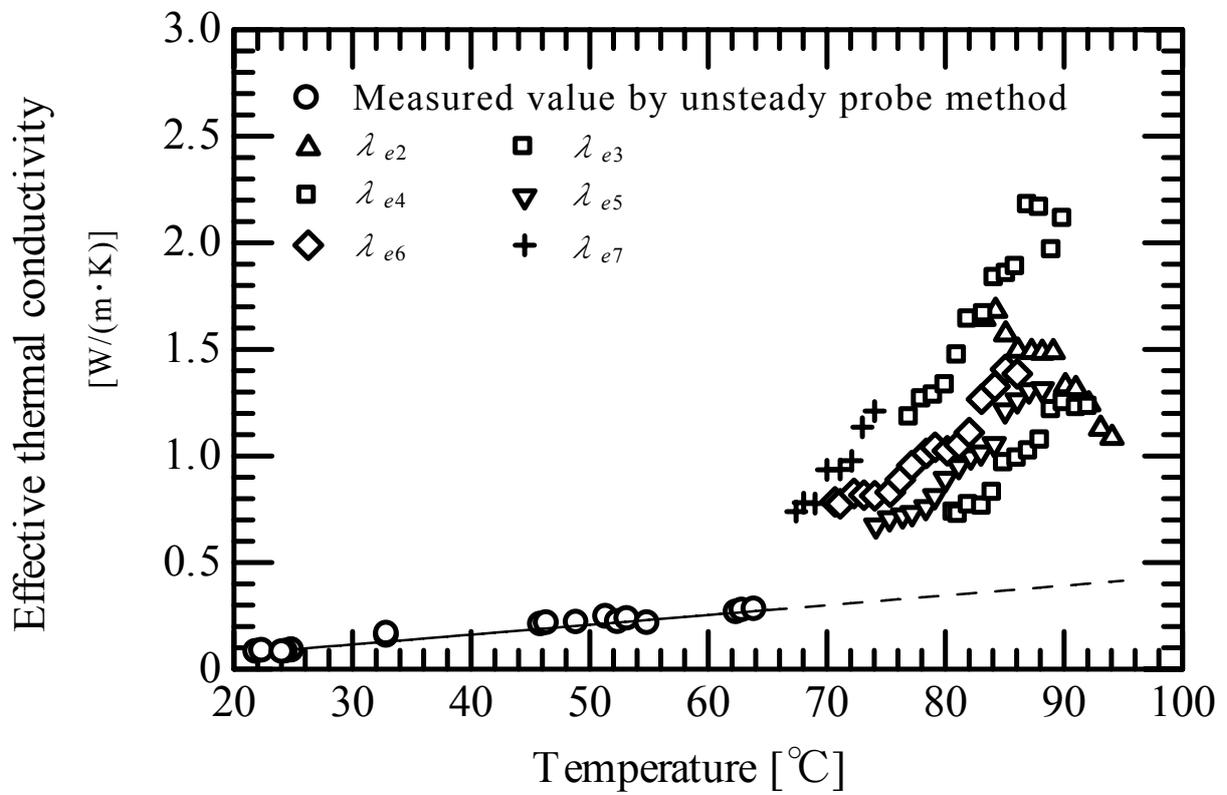


Fig. 5-12 Effective thermal conductivity of crumb in baking process.

($\theta_A=180^\circ\text{C}$ dough weight=640g)

与により Fig. 5-12 に破線で示す外挿値より大きくなると考えられる。

5.3.4 クラストの有効熱伝導度

クラストは、焼成の進行にともない水分が蒸発し、低含水率 (dry) 状態で空気層と生地層が 1 次元的な層状構造を作って高密度化する。そこで、測定試料はクラム部を 1 次元的に圧縮して高密度化し、真空凍結乾燥機で減圧して、水分を完全に除去したものとし、その有効熱伝導度を平板比較法で測定した。

Fig. 5-13 に、焼成後のクラム試料 (初期空隙率 $\phi=0.804$) を圧縮し、脱水して製作した平板状試料の有効熱伝導度を平板比較法により測定した結果を示す。横軸が平均温度、縦軸が有効熱伝導度である。

Fig. 5-13 には併せて、焼成温度 160 °C で焼成した際の高さ 0~1 mm 間の位置の測温接点にある温度、熱流束から計算した有効熱伝導度を示す。本実験で使用したオープン炉内の焼成温度の制御を電気ヒーターの ON-OFF 制御で行っており、パン生地への熱流束に周期的な変動が生じたため、求めた有効熱伝導度も図に示すように 6% 程度のばらつきが見られた。計算結果は 112~132 °C で 0.074~0.084 W/(m·K) であった。焼成工程中のクラストの有効熱伝導度は、空隙率 ϕ が 0.2~0.3 程度に圧縮された乾燥クラムの有効熱伝導度に相当するものであった。これは、焼成が進行すると水分を含むクラム領域の表層部分が乾燥、収縮して高密度化し、クラストが形成されることに対応する。乾燥したクラスト領域の有効熱伝導度はクラム領域のそれと比べ低い。

5.4 結言

本章では、食パンの焼成工程におけるパン生地内の伝熱機構の解明を目的として集積型の薄膜熱電対、細線熱電対を作製し、実際の食パン焼成工程においてクラストとクラムの境界を含む生地表層部近傍の温度場の時間変化を測定し、また食パン型からパン生地への熱流束を測定し、以下の結論を得た。

(1) 作製した集積型の薄膜熱電対、細線熱電対は、その高い位置精度によりクラスト近傍の温度場を良く測定する。

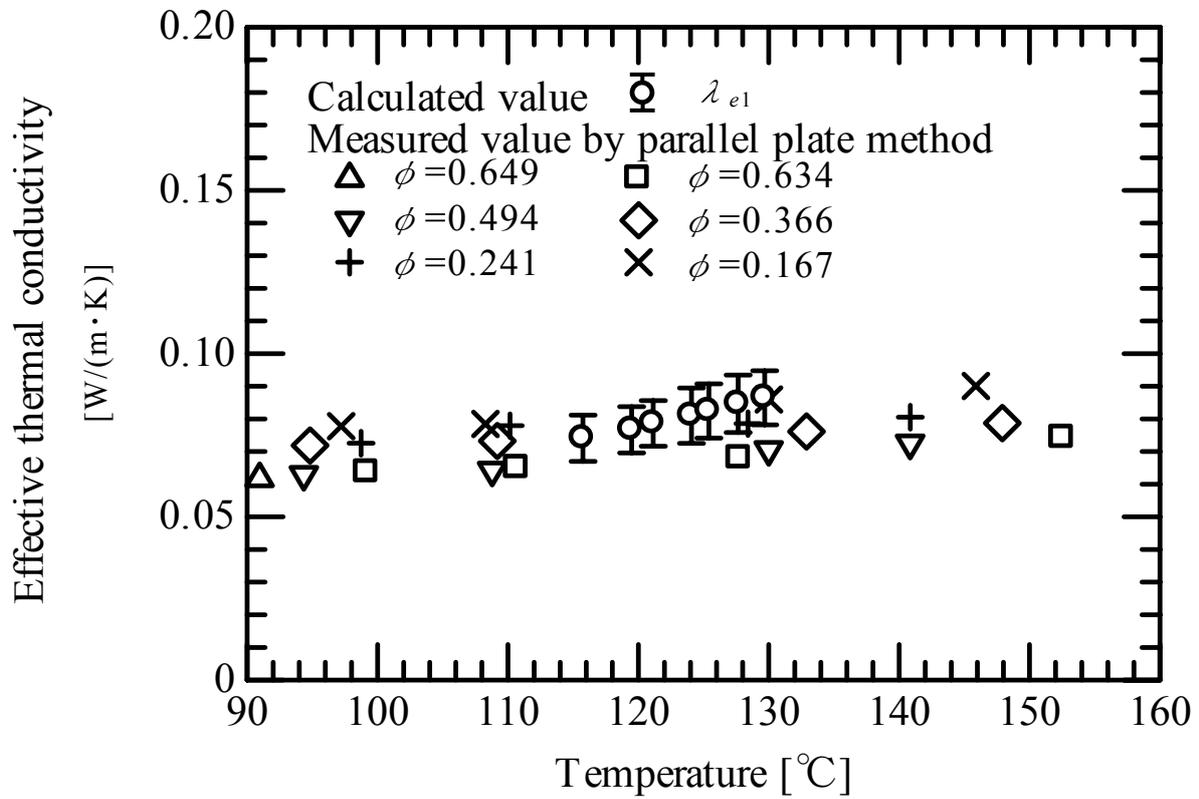


Fig. 5-13 Effective thermal conductivity of crust in baking process.

($\theta_A = 160^\circ\text{C}$, dough weight=640g)

(2) 集積型細線熱電対で測定した食パン焼成工程中のパン生地温度, および食パン型からパン生地に流れる熱流束より, 焼成工程中の水分移動の寄与を含めたパン生地, クラムおよびクラストの有効熱伝導度を計算した. 焼成中のクラムの有効熱伝導度は, 定常状態における有効熱伝導度と比較して空隙内での水蒸気の拡散, 蒸発・凝縮による潜熱輸送のために高いことがわかった. 乾燥したクラストの有効熱伝導度はクラムのそれと比べて低いことがわかった.

5.5 文献

- [1] K. Tao, T. Tadano, I. Suzuki; “Effective Thermal Conductivity of Solid Material in Bread”, 熱物性, 16, (2002) pp. 108-113.
- [2] K. Tao, T. Tadano, I. Suzuki; “Effective Thermal Conductivity Measurement and Analytical Heat Transfer Model on White Bread”, 熱物性, 18, (2004) pp. 7-13.
- [3] B. Zanoni, C. Peri, S. Pierucci; “Study of the Bread Baking Process – I . A Phenomenological Model”, Journal of Food Engineering, 19(1993), pp. 389-398.
- [4] B. Zanoni, S. Pierucci, C. Peri; “Study of the Bread Baking Process – II . Mathematical Modelling”, Journal of Food Engineering, 23(1994), pp. 321-336.
- [5] J. Zhang, A. K. Datta; “Mathematical Modeling of Bread Baking Process”, Journal of Food Engineering, 75, (2006) pp. 78-89.
- [6] 竹村賢二, 斉藤卓志, 佐藤勲; 「食品加工時の伝熱現象の把握 - パン焼成時の熱移動と水分移動 -」, 第 37 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.1, (2000.5) pp. 159-160.
- [7] S. S. Sablani, M. Marcotte, O. D. Baik, F. Castaigne; “Modeling of Simultaneous Heat and Water Transport in the Baking Process”, Lebensm.-Wiss. U.-Technol., 31, (1998) pp. 201-209.
- [8] L. Zhou, V. M. Puri, R. C. Ananthawaran; “Measurement of Coefficients for Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food Product”, Drying Technology, 12(3), (1994) pp. 607-627.
- [9] 日本学術振興会薄膜第 131 委員会編; 「薄膜ハンドブック」, (1983) p. 99, オー

ム社.

- [10] 竹内雍; 「多孔質体の性質とその応用技術」, (1999), pp. 395-400, フジ・テクノシステムズ.

第6章 食パンの焼成工程におけるクラストの形成と有効熱伝導度

6.1 緒言

第5章では、焼成工程における食パン型近傍の生地・クラム・クラストの温度場を測定するとともに水分移動を含んだ生地・クラム・クラストの有効熱伝導度について調べた。焼成工程では、パンの生地の内部で炭酸ガスの溶出やアルコールの蒸発によって内圧が増加し、生地の周辺部では水分蒸発や褐変反応が起こって、高密度化と着色の現象が生じ、日常語では“パンの耳”と呼ばれるクラスト(乾燥層)が形成される。パンの焼成工程におけるクラスト形成に関する報告は少ない。クラストを焼成後における水分含量が17%以下の剥離できる硬化部分と定義してその着色状態や厚さを評価したり[1-3]、内部の温度分布やクラスト部の着色をモデリングしたりする[4,5]研究があるに止まっていた。

本章では、焼成工程におけるパン生地の温度、食パン型の温度、パン生地を流れる熱流束を測定し、水分蒸発による重量変化と比較し、焼成工程における熱移動量や潜熱と顕熱の発生の割合を求め、パン生地の内部における熱と水分の移動の機構を調べる。さらに食パンの焼成工程における熱と水分移動に関する現象に注目し、発酵工程において形成された気泡から炭酸ガスが漏洩して空隙率が減少するクラスト形成のメカニズムと形成されたクラストの性状(厚さ、空隙率分布)との関係を考察する。また、パン生地の表層部の温度と熱流束と別途に測定した焼成工程における水分蒸発量から、焼成工程において乾燥し高密度化したクラストの有効熱伝導度を推定する。

6.2 試料および実験方法

6.2.1 試料

本研究では、大型生産ラインに多く採用されている中種法によって作製した角形食パ

ンを試料とする。中種法とは、使用する原材料の一部を混捏し、あらかじめ3～5時間発酵させた後に、残りの原材料を加えて、再度混捏を行う方法である。製品の硬化が緩やかになる特徴があるため、この中種法は卸売りのパン製品に対して適した製法である。本章における試料のパンの配合は、Table 6-1 に示すものとした。この配合は標準的な食パンの配合に準じるものである。1試料あたりの生地重量は1530g(=510g×3玉)の3斤サイズの食パンのものとした。発酵工程終了時におけるパン生地の熱物性値をTable 6-2 に示す。Table 6-1 に示した給水量0.353と比較して、生地中の含水率の値が0.451と高いのは、Table 6-1の水に原材料中に含まれる水分が加算されているためである。

6.2.2 実験装置および方法

角形食パンの焼成には、媒体として炉内の空気を対流させて被加熱物を加熱するコンベクション式オーブンを使用した(Fig. 6-1)。このタイプのオーブンによれば、炉内の空気の温度や風速を制御することによって被加熱物の温度を比較的容易に制御することができる上、食パン型の全六面をほぼ等しい温度に加熱できる。本研究では、別回路の温度コントローラーを接続して、送風機による炉内冷却の機能を付加させた。風速はインバーター制御によって、0～2.0 m/sの範囲で任意に調整することができる。制御器へは炉内の空気の温度、あるいは食パン型の温度を設定して炉内の空気の温度と風速を制御することができる。本研究においては、炉内の空気の温度を180～250℃、食パン型の温度を110～160℃に設定し、5～40分の時間の間で焼成を行った。なお、食パン型の温度を設定した場合、設定温度に対して±0.3℃の範囲内で食パン型の温度を制御できていることを確認している。

食パン型の各面から生地への熱流束は、熱流束センサー(VATELL社製 Episensor Type-B, 寸法:25mm×25mm×0.6mm)を食パン型内面のFig. 6-2に示す計4ヶ所の位置に貼付して測定した。熱流束センサーから得られる出力は、熱流束に対して各センサーに固有の係数を乗じた直流電圧出力として得ることができ、データロガーでA/D変換した後、パーソナル・コンピュータに転送して、計算処理を行った。

焼成工程中の食パンは炉内において常時強制対流による不規則な力を受けることから、炉内にある食パンの重量変化を精度よく測定することは困難である。本章において、焼

Table 6-1 Specification of dough formula of white bread.

Ingredient	Weight %	Ingredient	Weight %
Flour	55.2	Shortening	3.29
Water	35.3	Salt	1.10
Yeast	1.10	Nonfat dry milk	1.10
Yeast food	0.11		
Emulsifier	0.06	Sugar	2.74

Table 6-2 Thermophysical properties of fermented dough.

Density [kg/m^3]	1110 ± 10
Specific heat [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	2.09 ± 0.08
Porosity [-]	0.709 ± 0.010
Moisture content [-]	0.451 ± 0.006

(at 25°C)

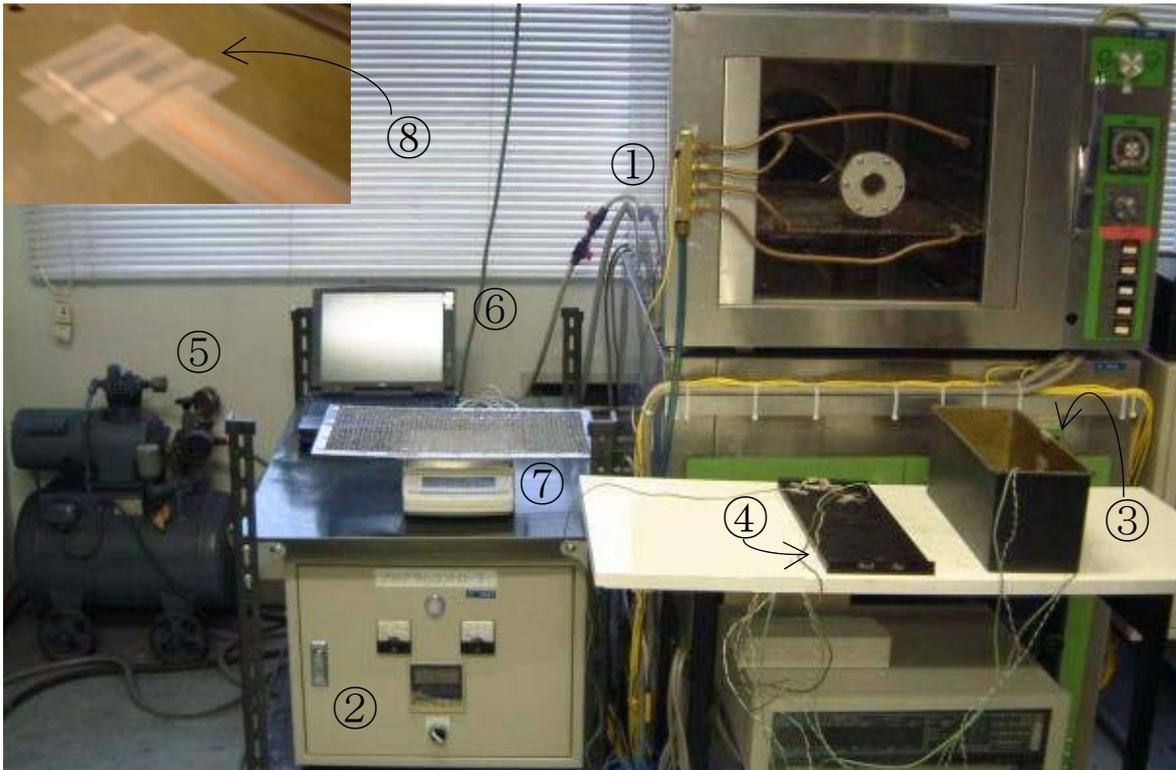


Fig. 6-1 Experimental apparatus for heat flux measurement during bread baking. (①oven, ②control unit, ③tin, ④lid, ⑤air compressor, ⑥computer, ⑦scale, ⑧heat flux sensor)

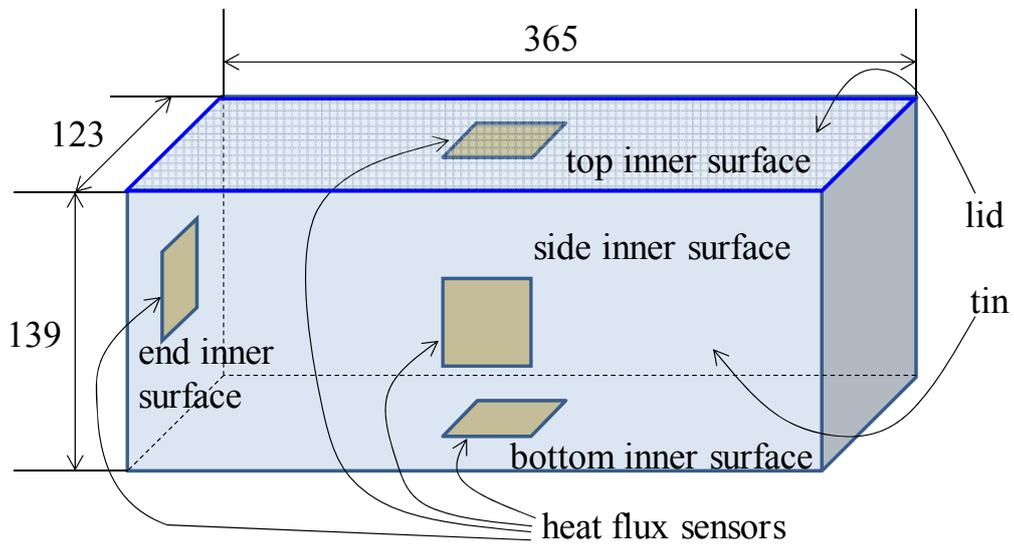
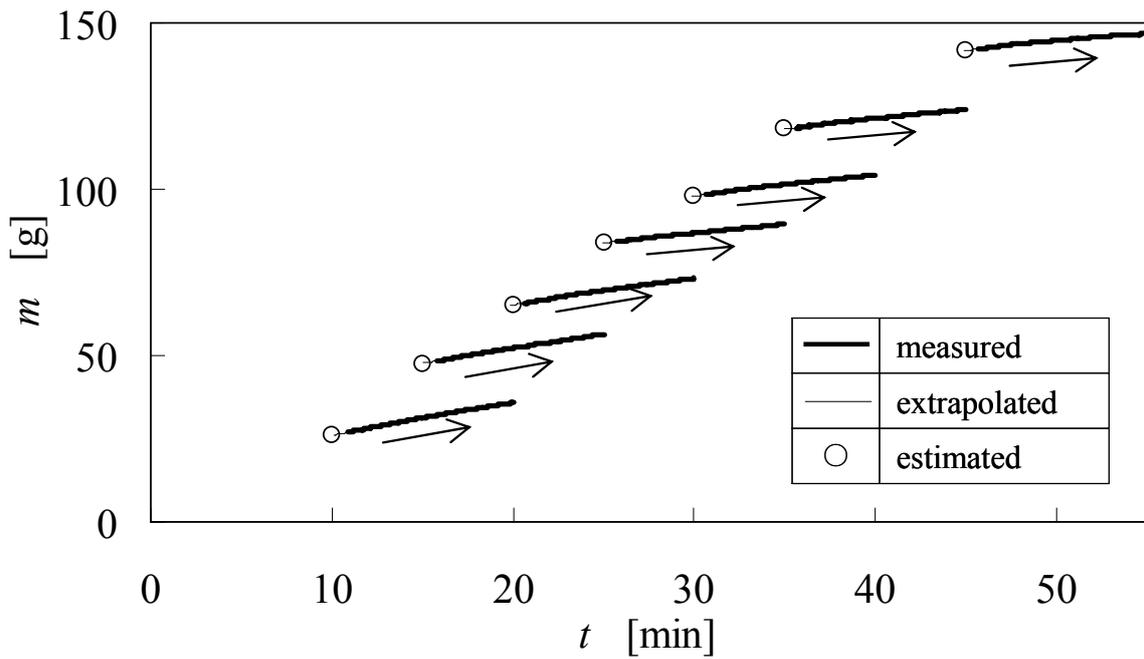
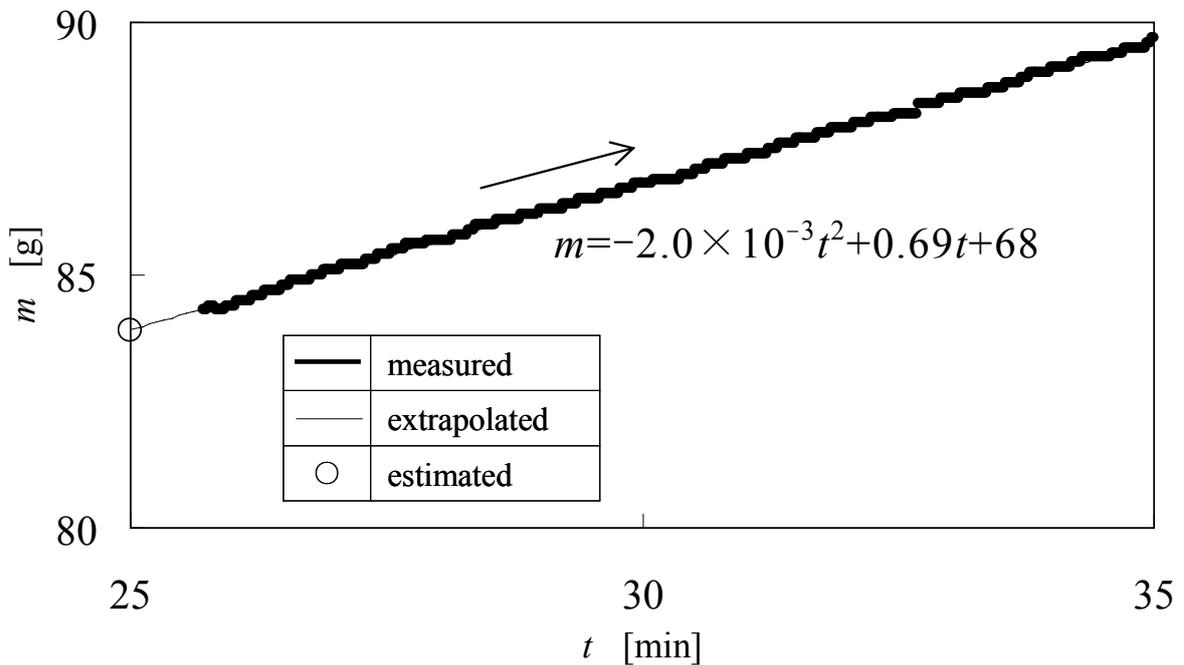


Fig. 6-2 Tin and measuring points for heat flux during bread baking. (unit : mm)



a) baking temp. : $\theta_p=130^\circ\text{C}$



b) baking temp. : $\theta_p=130^\circ\text{C}$ (magnification)

Figs. 6-3 Change of bread dough weight after baking.

成工程における食パンの水分蒸発量は、焼成条件である食パン型の側面の温度 θ_p と焼成時間をあらかじめ決めておき、焼成前後における試料の重量差から求めた。焼成直前におけるパン生地の重量は、食パン型にパン生地が入っている状態で重量を測定し、あらかじめ測定した食パン型の重量を引いて求めた。焼成直後における食パンの重量は、以下の手順により求めた。

- ① 食パン型を所定の焼成時間終了後にオーブンから取り出し、すばやくふたを外した後に食パンを食パン型から取り出す。
- ② 取り出した食パンを電子天秤に載せ、取り出してから約 10 分間の重量変化(水分蒸発量)を連続的に測定する。
- ③ 食パン型をオーブンから取り出してから重量変化を測定し始めるまでの時間(約 20 ~30 秒)を計っておき、重量の測定値を焼成終了時まで外挿して焼成直後の食パンの重量を求める。

Fig. 6-3 に食パン型の温度 θ_p を 130°C に設定した際の水分蒸発量 m の測定結果を太い実線で示す。横軸には焼成開始からの時間 t を、縦軸には水分蒸発量 m をとった。図 a) には 10~45 分の時間で焼成した結果を示し、図 b) には焼成時間が 25 分の場合における結果を拡大したものを示す。水分蒸発量 m の変化は焼成開始後の経過時間に対する 2 次関数で表し、測定値を細い実線で外挿して焼成終了時における水分蒸発量(○印)を推定した。外挿による水分蒸発量の補外量は $0.2\sim 0.8\text{g}$ であった。

6.3 測定結果

6.3.1 クラスト部の高密度化

食パンの焼成工程では、周辺部の生地から温度の上昇によってクラム(糊化)、クラスト(乾燥)へと状態が変化する。前工程である最終発酵工程においてパン生地内部には炭酸ガスやアルコールが生成されることから、パン生地の温度の上昇にともなって炭酸ガスの溶出やアルコールの蒸発が起こる。周辺部の生地がクラム・クラストへ変化する過程では、パン生地の温度の上昇にともなって内圧が上昇することで気泡が潰れて包含ガス

の漏洩が起こり、生地(クラム・クラスト)が高密度化していく。いっぽう、パン生地は全体が糊化してクラムへ変化するものの、周辺部を除く大部分は乾燥せずクラストには至らない。周辺部を除く内側の生地では焼成工程における包含ガスの漏洩は起こりにくく、気泡が潰れる現象も見られない。Fig. 6-4 に、食パンの中央部のクラムと周辺部の(クラム+クラスト)について焼成時間 t による空隙率 ϕ の変化を測定した結果を示す。横軸に焼成時間 t をとり、縦軸には空隙率 ϕ をとった。焼成した食パンは、20mm でスライスして食パンの中央部とクラストを含む周辺部の 30 mm 角の試料について空隙率 ϕ を求めた。なお、クラストを含む食パンの周辺部の試料については、焼成と冷却工程において垂直方向の重力の影響を受けない食パンの側面の部位から採取した。食パンは、焼成後に常温まで冷却してもクラムとクラストの含水率は等しくならない。そこで、30mm 角の試料を乾燥させた固形分の重量を同体積の未発酵パン生地の固形分重量(乾燥重量)で除して充填率を求め、その値を 1 から引いて空隙率 ϕ を求めた。焼成時間を 15~45 分として実験を行い、食パン型温度を 120~150°C に制御した。いずれの試料でも焼成時間が長いほど空隙率は、初期状態($\phi=0.78$)と比較して中央のクラム部分では上昇し、25 分以上の焼成時間の場合には 0.83 程度であった。周辺部分では試料の空隙率は低下したが、温度条件による有意な違いは見られず、ほぼ同様に变化した。本実験では、食パン型の温度が指定の温度になるまでの焼成初期には炉内の空気の温度を 220°C にしてある。食パン型の温度が内圧を上昇させる要因となる、炭酸ガスの溶出温度 50°C やアルコールの蒸発温度 78°C 等を通過するまで時間ほどの試料においてもほぼ等しくなった。試料周辺部の高密度化は、試料の温度の上昇に伴う内圧の増加によって表層側の気泡からガスが抜けるため、パン生地中心部の温度上昇が類似している試料間では有意差が見られなかった。

食パン型近傍の試料の密度分布をより詳細に調べるために、焼成時間 t を 35 分、焼成時の食パン型温度 θ_p を 140°C として食パンを焼成した。焼成された食パンのクラストを含む側面の周辺部から直方体(縦 20×横 20×奥行 40mm)の試料を切り取り、クラストが形成されている表面側から 1mm 毎に切削した。Fig. 6-4 と同様に、クラストを含む食パンの周辺部の試料については、焼成と冷却工程において垂直方向の重力の影響を受けない食パンの側面の部位から採取した。切削した試料は乾燥させて重量を測定した。試料

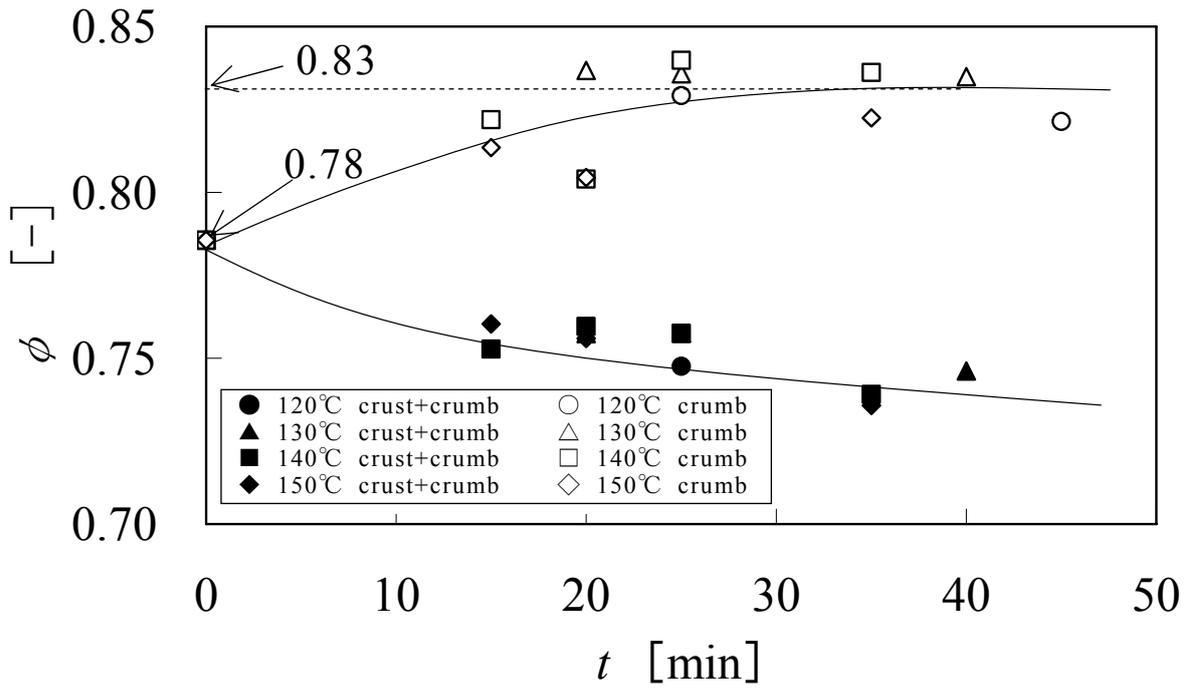


Fig. 6-4 Porosity change in the central (crumb) and circumferential (crust) portion of bread dough.

の充填率($1-\phi$)は,乾燥させた固形分の重量を同体積の未発酵パン生地の固形分重量(乾燥重量)で除して求めた.結果を Fig. 6-5 に示す.横軸にはパン表面側からの距離 l_c をとり,縦軸には試料の充填率($1-\phi$)をとった.図には,焼成前の平均充填率($0.22=1-0.78$,破線)と Fig. 6-4 で得られた中央部のクラムの充填率($0.17=1-0.83$,細い実線)を併せて示す.もともと表層部の部位(表面~表面下 1mm)においては,焼成開始前の状態と比較して3倍以上の充填率にまで高密度化したが,表面下 10mm より中央側のクラム部の充填率は,焼成前の平均充填率(0.22)より低下し Fig. 6-4 で得られた中央部のクラムの充填率(0.17)に近かった.

食パンの焼成工程において生じる試料周辺部の高密度化に対して,焼成前の状態からの生地の移動について考察する.焼成時間 t を 35 分,焼成時の食パン型温度 θ_p を 140°C として食パンを焼成し,食パン型近傍の試料の充填率分布を求めた Fig. 6-5 より,高密度化する以前にあった生地の位置を推定した結果を Fig. 6-6 に示す.横軸にはパン表面側からの距離 l_a をとり,縦軸には焼成後の試料の充填率($1-\phi$)をとった.高密度化している部位を含む試料周辺部について, l_a 方向に微小区間で区切って焼成後の充填率を焼成前の充填率(0.22)で除し,高密度化する以前における各微小区間の l_a 方向の長さを求めた.その各微小区間の l_a 方向の長さを試料表層部より積算して,焼成する前にあった位置を求め,太い実線で示す.図には, Fig. 6-4 で得られた中央部のクラムの充填率($0.17=1-0.83$)と Fig. 6-5 より求めた焼成後における食パン型近傍の試料の充填率分布を併せて細い実線で示す.図の上部には,生地表面より 1mm 間隔の位置にあった焼成前の生地が焼成後に移動した位置を示す.上段に焼成前の生地について均等な 1mm 間隔の位置を示し,下段に焼成後の移動した位置を示した.上段と下段の図の間隔を比較すると,焼成後の食パンにおいて試料表面から下約 7mm の位置で焼成前の充填率と同等の値を示していることがわかり,この部位は焼成前には表面から下約 17mm に位置していたことを示している.このことは,焼成前の生地について表面から下約 17mm までに位置している部分の気泡が潰れ,生地の高密度化が生じていることを示唆する.

異なるさまざまな焼成時間(5~45分)で食パンを作製して, Fig. 6-5 の場合と同様に焼成後の食パンについて周辺部(側面)の充填率とパン表面からの距離 l_a を測定し,焼成時間 t との関係性を求めた.その結果を Fig. 6-7 に示す.横軸にはパン表面側からの距離

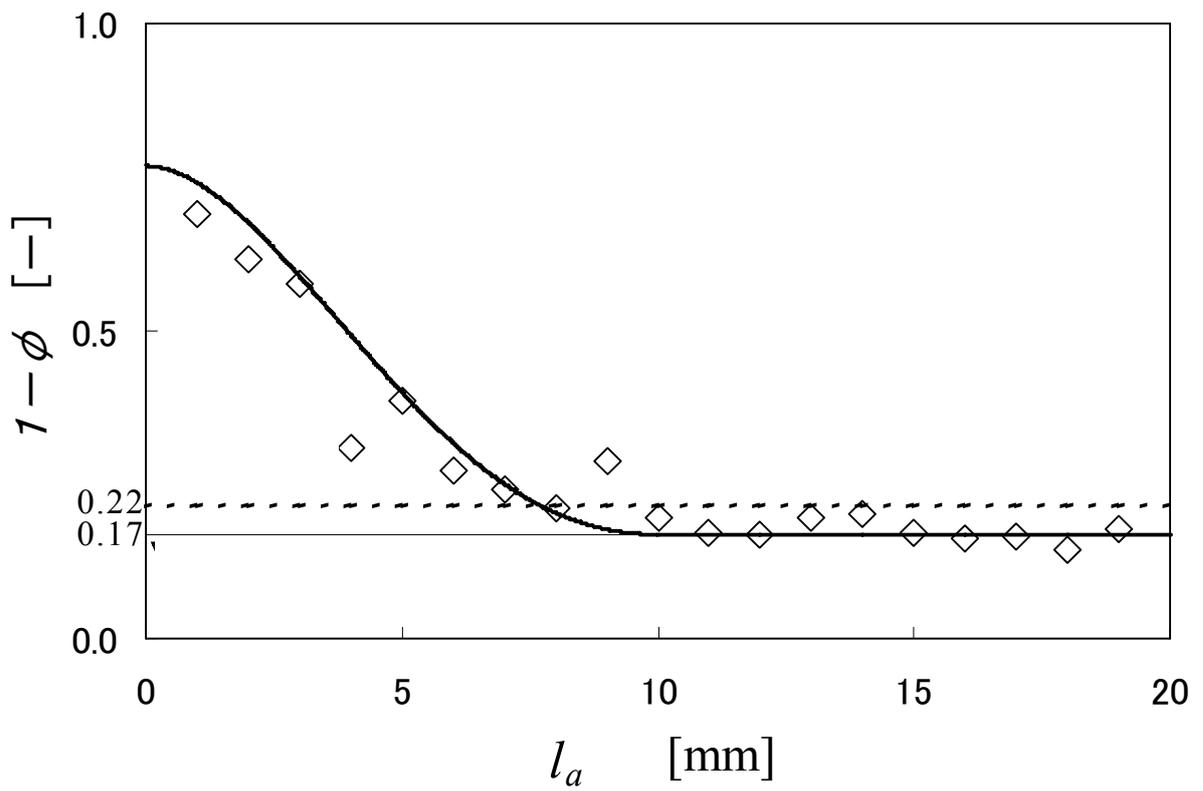


Fig. 6-5 Density distribution of bread dough near side surface.
 ($\theta_p = 140^\circ\text{C}$, $t = 35\text{min}$)

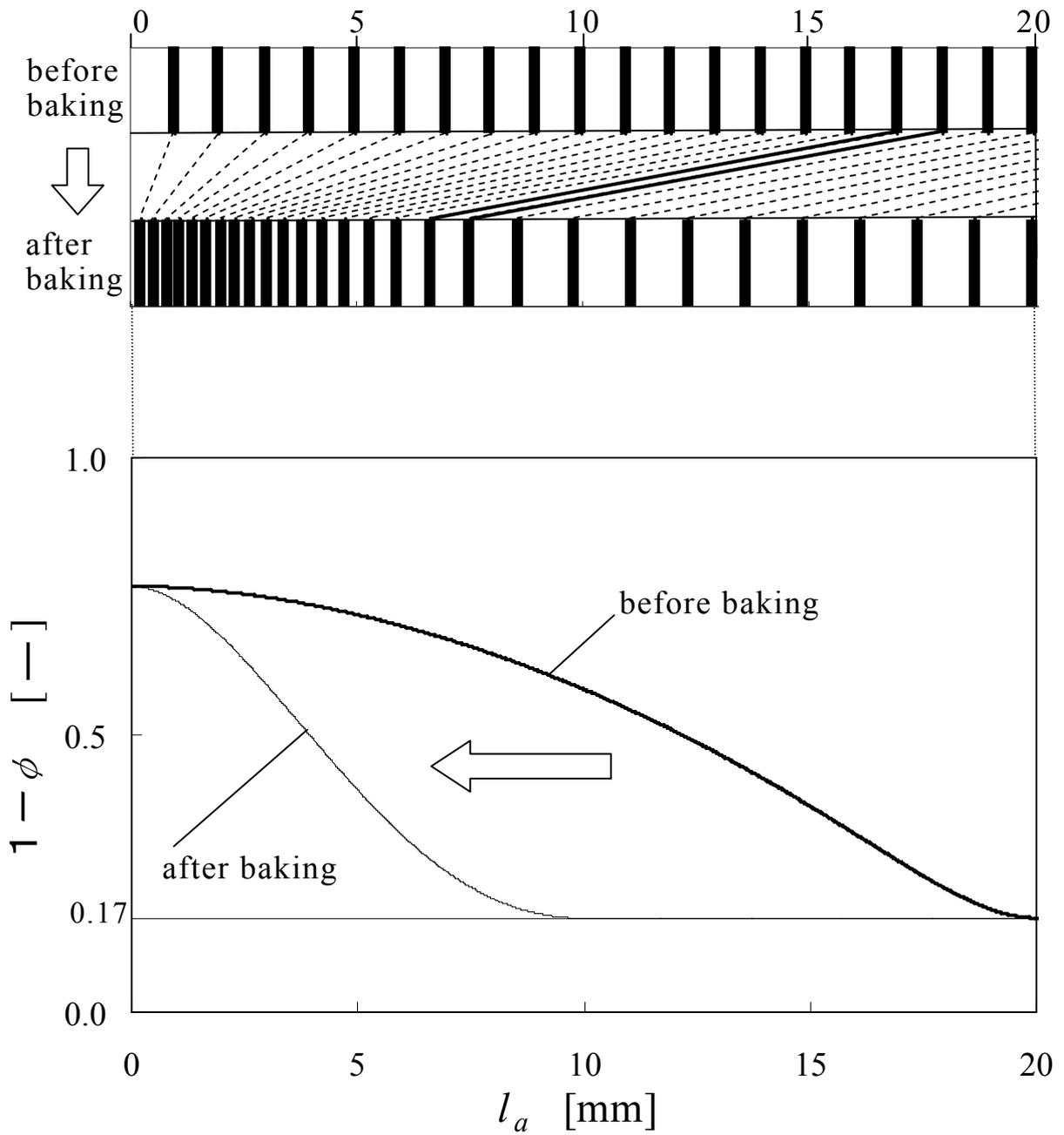


Fig. 6-6 Position changes of bread dough near side surface before and after baking. ($\theta_p=140^\circ\text{C}$, $t=35\text{min}$)

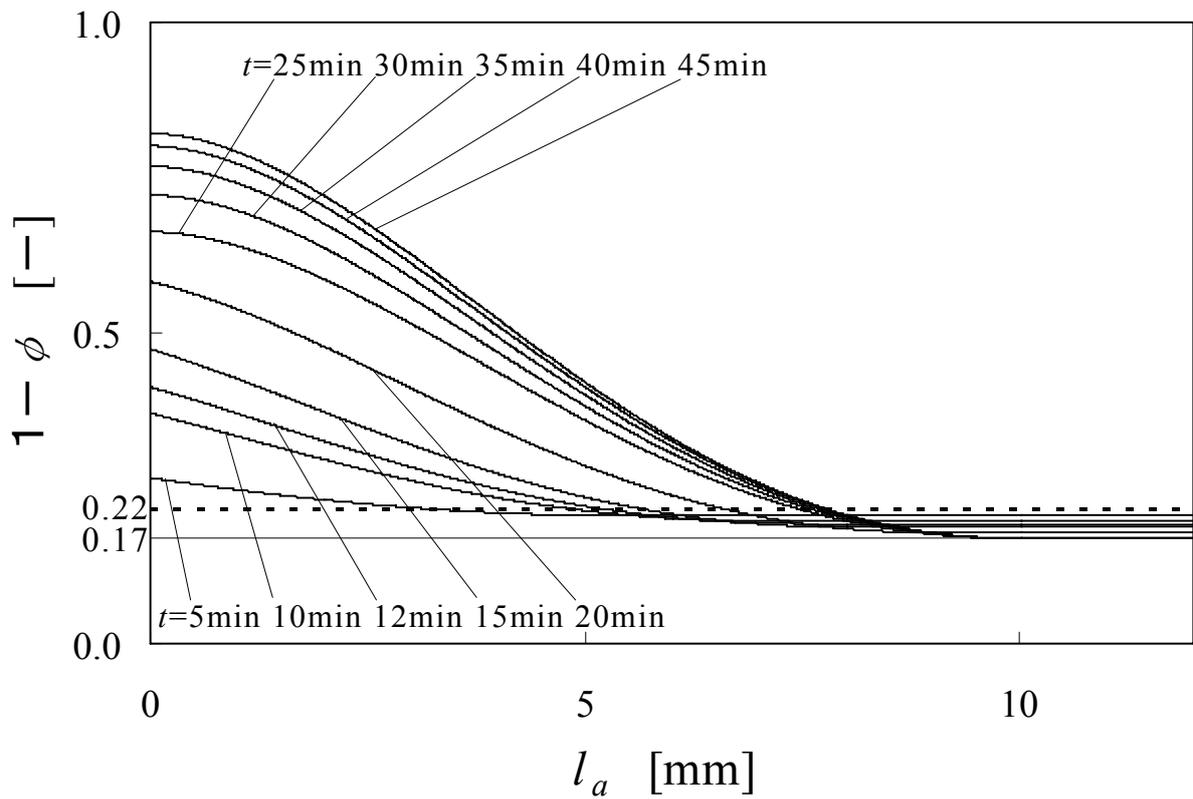


Fig. 6-7 Relation between filling fraction ($1 - \phi$) and distance from surface of bread l_a through baking time.
 ($\theta_p = 140^\circ\text{C}$, $t = 5 \sim 45\text{min}$)

l_a をとり，縦軸には試料の充填率 $(1-\phi)$ をとった．その図には，焼成前の平均充填率 $(0.22=1-0.78)$ と Fig. 6-4 で得られた中央部のクラムの充填率 $(0.17=1-0.83)$ を細い実線で併せて示す．焼成時間が短いために中央部の温度が澱粉の糊化温度に達せず，全体がクラムに変化していない試料(焼成時間：5～15 分)に関しては，クラムに変化している部分のみを取り出して測定した．生地表面から下 10mm より中央部分の空隙率は Fig. 6-4 で求められた各焼成時間のクラムの値をとるものと仮定して，充填率を生地表面から 30mm までの領域について平均値を求め，Fig. 6-4 のクラストを含む試料周辺部の空隙率 ϕ から計算される充填率 $(1-\phi)$ とほぼ合致していることを確認している．

6.3.2 熱流束の測定

Fig. 6-8 に角形食パンの焼成工程における食パン型の上面及び側面の温度 θ_p とそれらの面を通過する熱流束 q の測定結果の 1 例を示す．横軸に焼成時間 t をとり，左の縦軸には食パン型の温度 θ_p を，右の縦軸には熱流束 q をとった．熱流束については，外部からパン生地へ流れる方向の流束を正とした．通常，角形食パンを焼成する場合，二次発酵で最終体積の 75% 程度まで発酵させる．焼成工程でオープンキックと呼ばれる急激な体積膨張を経て，最終的な製品形状に至る．Fig. 6-8 で，焼成初期において上面温度がいったん低下した後に再度上昇しているのは，この体積膨張によりパン生地がふたに接触することの影響である．体積膨張は，側面における熱流束にも影響を及ぼし，食パンの体積がほぼ安定した後は食パン型温度の変化にともなう緩やかな上昇があり，側面における熱流束の経時変化は上面における熱流束の経時変化と類似した緩やかな低下向をとる．

6.3.3 焼成工程におけるエネルギー消費

食パンは焼成工程において，生地中における全保有水分量の約 20% を蒸発させる．焼成時の食パン型温度 θ_p を 140°C として食パンを焼成した場合の，焼成時間にともなうパン生地からの水分蒸発量の積算値 m の変化を Fig. 6-9 に示す．横軸には焼成時間 t をとり，縦軸は水分蒸発量の積算値 m をとった．水分の蒸発は，焼成開始後の早い段階で発生しており，焼成開始 5 分後に取り出した食パンについてもすでに生地重量の変化が認

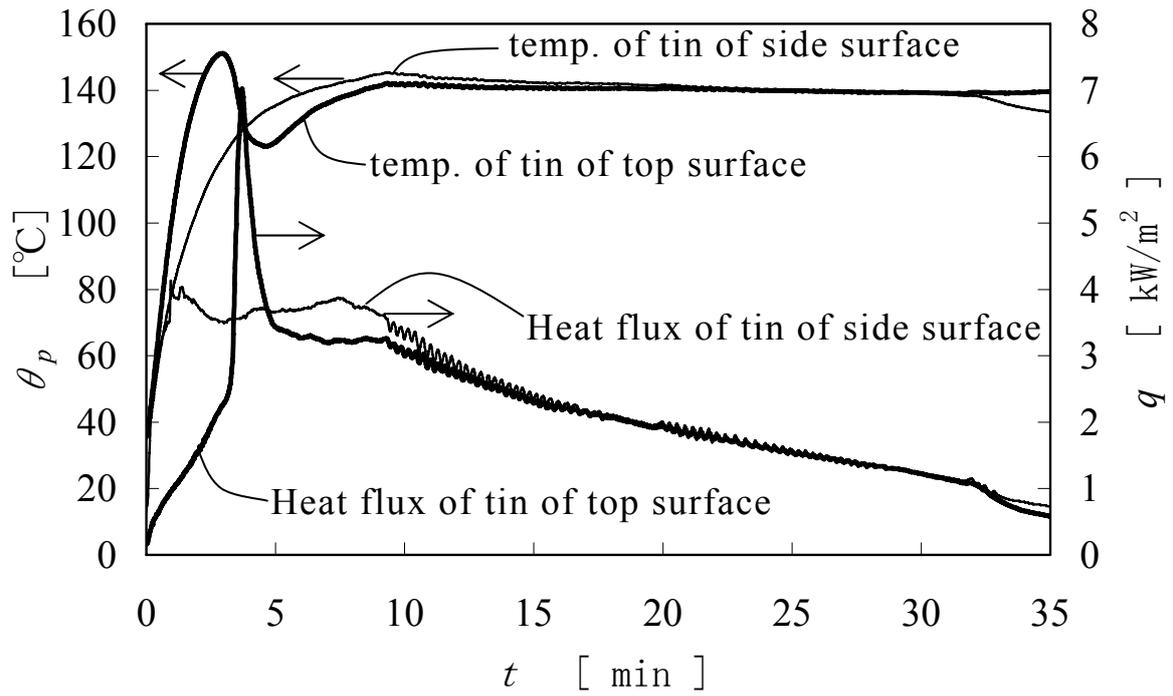


Fig. 6-8 Change of temperature and heat flux during bread baking. ($\theta_p=140^\circ\text{C}$)

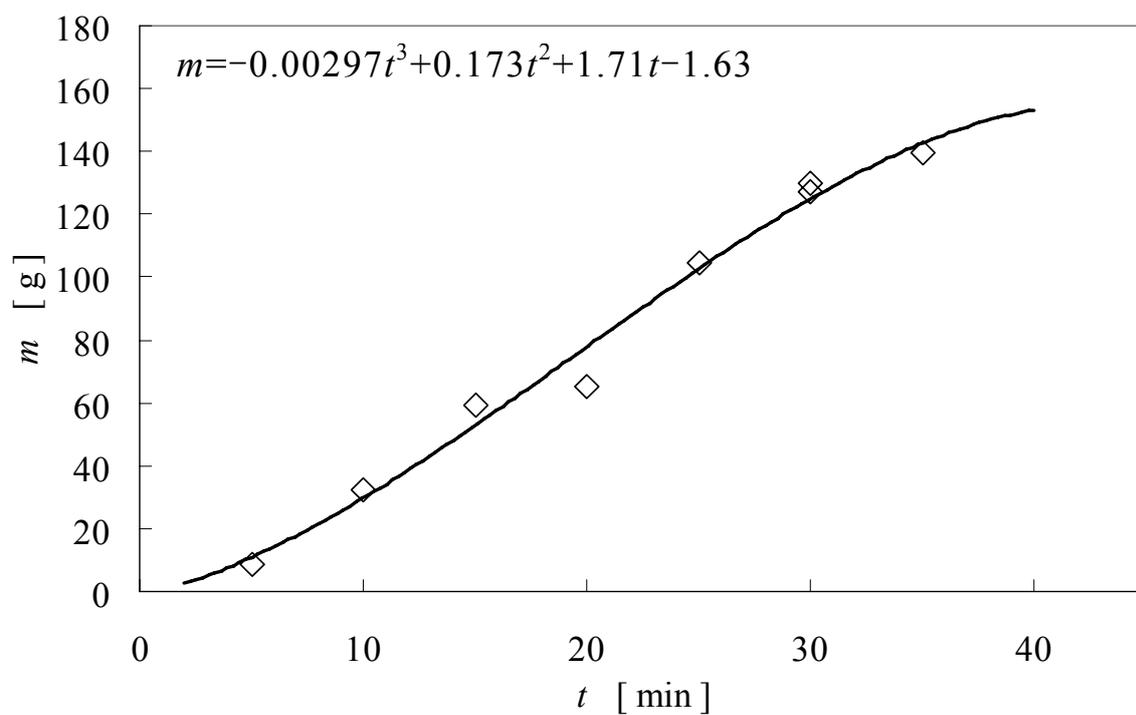


Fig. 6-9 Relationship between the baking time and amount of moisture evaporation of Pullman bread. ($\theta_p = 140^\circ\text{C}$)

められた。水分蒸発量の積算値は、焼成時間の三次関数で良好に近似できる。

そこで Fig. 6-9 の近似曲線から蒸発の潜熱を算出し、一回微分を行うことにより焼成工程における潜熱分の吸熱量 Q を求めて Fig. 6-10 に示す。横軸には焼成時間 t をとり、縦軸には吸熱量 Q をとった。食パン焼成時の食パン型温度 θ_p は 140°C である。さらに Fig. 6-10 には、食パン型の全ての面についてパン生地へ流れる熱流束から求めた全吸熱量の経時変化を示した。全吸熱量から潜熱分の吸熱量を差し引いた熱量を顕熱分の吸熱量とみなすと、焼成開始後 10 分頃までの初期の時点では供給される熱量の大部分がパン生地の温度上昇のための顕熱として消費され、焼成後期においては吸収熱量の 80% 以上が生地中の水分を蒸発させる潜熱として使われることがわかった。パンを焼成するオーブンは、電気容量が 10kW 程度の機種で、3 斤サイズの食パンを 1~6 本同時に焼成するが、吸熱量の最大値は 0.5kW 程度であり、著しく低い。

6.3.4 クラスト形成のメカニズム

これまでに得られた結果を利用して、クラストが形成されていく過程を推定する。一般的にクラストとは、パン周辺部の褐色変化した部位を指すが、本研究では Fig. 6-11 に示したように、水分が蒸発して乾燥した部位をクラストと定義した。§ 6.3.3 の Fig. 6-9 に示す水分蒸発量を乾燥したパン生地の厚さに換算してクラストの厚さ l_c を求め、Fig. 6-12 に示す。横軸には焼成時間 t をとり、縦軸はクラストの厚さ l_c をとった。ただし、食パン型の全ての 6 面から単位面積あたりにたがいに等しい量の水分が蒸発し、かつ試料の周辺部から蒸発したものと仮定した。Fig. 6-12 に示したクラストの厚さ l_c は食パンの焼成工程における高密度化の影響を考慮していない。そこで § 6.3.1 の Fig. 6-6 に示したように高密度化によって生じる焼成直前の位置からの移動分を考慮し、高密度化した後におけるクラストの厚さを求めた。Fig. 6-13 には、高密度化した後のクラストの厚さ l_c の経時変化を示す。横軸には焼成時間 t をとり、縦軸はクラストの厚さ l_c をとった。その図には高密度化を考慮しなかった場合の値も併せて示す。Fig. 6-13 は、高密度化を考慮しないと水分蒸発量を表す Fig. 6-9 の場合と同様に変曲点を有する 3 次関数で近似できる形状をとったが、高密度化を考慮すると上に凸の単調増加曲線になった。

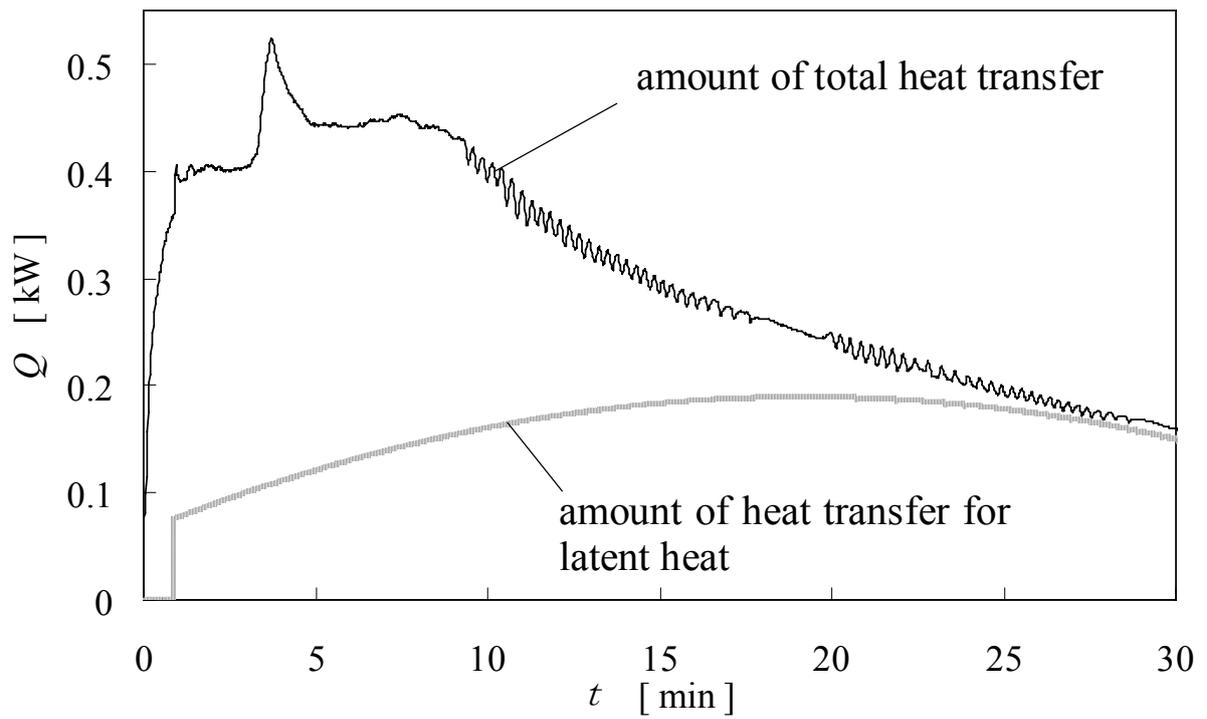


Fig. 6-10 Change of heat transfer during Pullman bread baking. ($\theta_p=140^\circ\text{C}$)

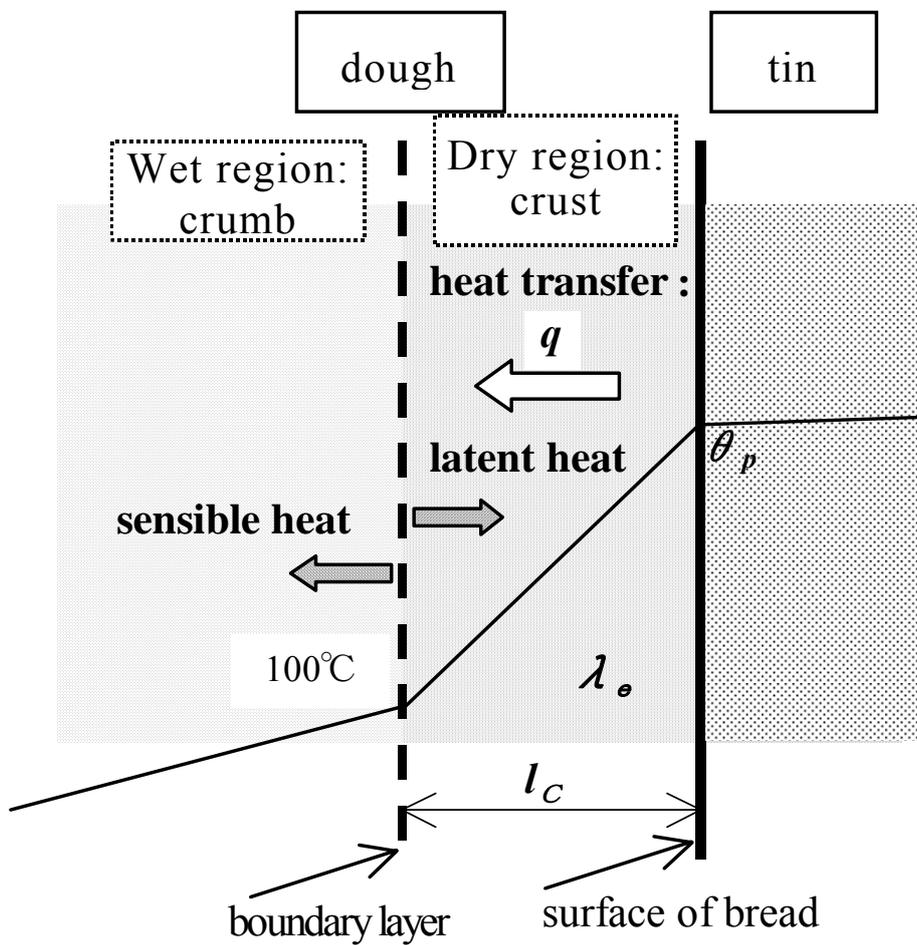


Fig. 6-11 Model of heat transfer in crust.

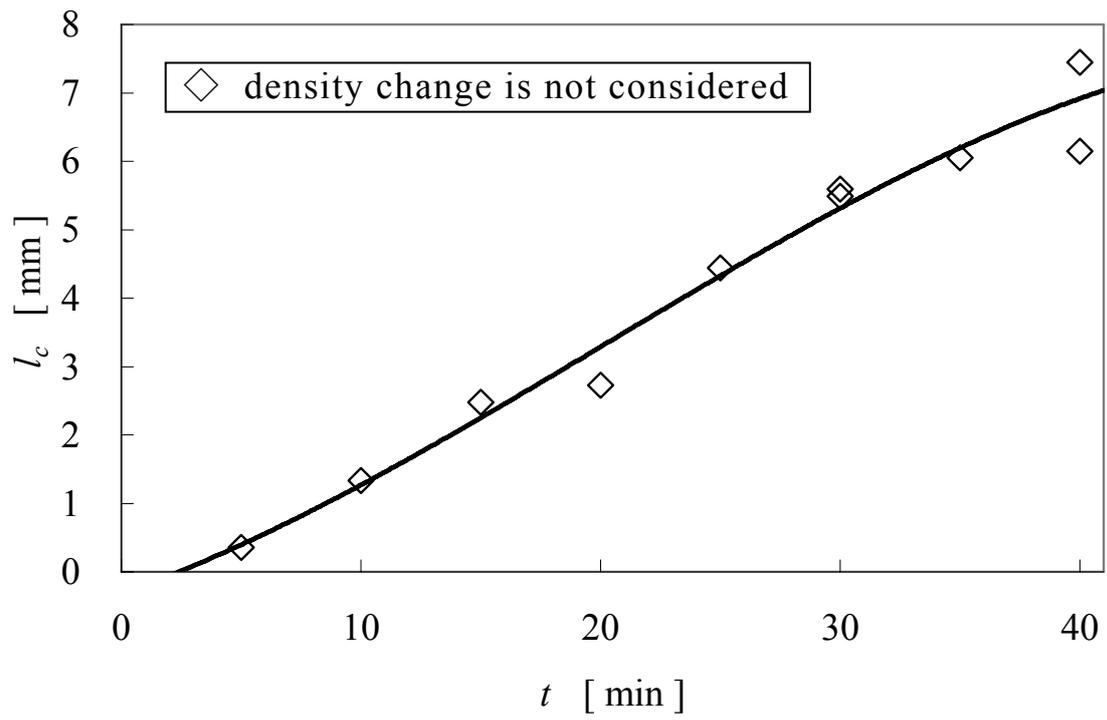


Fig. 6-12 Calculated of time change of crust thickness.
($\theta_p=140^\circ\text{C}$)

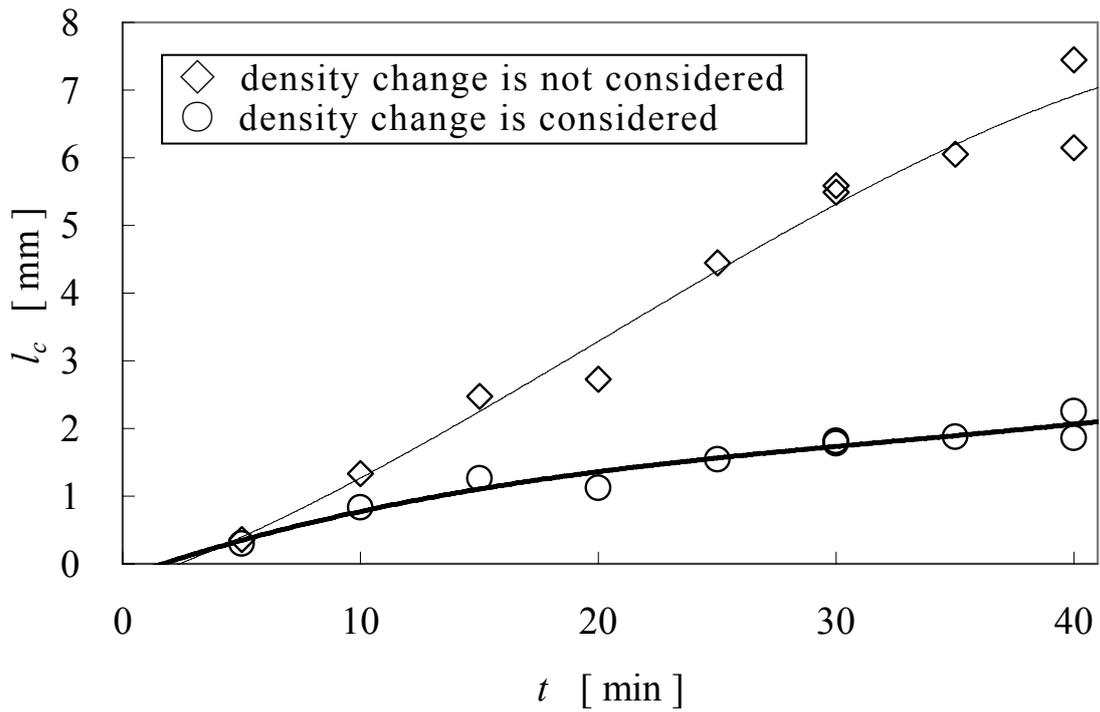


Fig. 6-13 Calculated of time change of crust thickness.
 ($\theta_p=140^\circ\text{C}$)

パンの焼成工程において、食パン型の6面では同一のクラストが形成されると仮定して、5～45分の焼成時間における水分蒸発面の位置を示す。Fig. 6-13より得られた各焼成時間に対応した水分蒸発面の位置を焼成後の食パンの充填率分布の図(Fig. 6-7)に加える。水分蒸発面の位置を○印でプロットし、Fig. 6-14に示す。横軸にはパン表面側からの距離 l_a をとり、縦軸には試料の充填率 $(1-\phi)$ をとった。図には、焼成前の平均充填率 $(0.22=1-0.78)$ を破線で Fig. 6-4 で得られた中央部のクラムの充填率 $(0.17=1-0.83)$ を細い実線で併せて示す。図から焼成工程は、水分蒸発面の後退とクラストの高密度化が並行して進行する焼成初期と、主にクラスト厚がゆっくり増加する後期に大別できることがわかる。焼成開始直後においては、発酵工程から継続した生地内部のガス発生によりパン生地が体積膨張を続けているが、オープンキックが終了して製品としての外観形状が確定するまでの数分の間は、内圧の上昇も限られており、生地周辺部の高密度化も限定的な範囲に留まる。水分蒸発量は、焼成後期において高い値を示すが、クラストの高密度化が起こり、並行して内部の生地が膨張する。気孔が小さくなった周辺部を進行する結果、見かけ上、クラストの成長が抑えられる。

6.3.5 クラストの有効熱伝導度

食パンの焼成工程におけるクラストの有効熱伝導度 λ_e を、これまでに得られた食パン型各面における熱流束 q と温度 θ_p 、クラストの厚さ l_c から推算する。計算に際して、次の仮定を置く。

- (1) 食パン型と接触しているパン生地は、その内部に 100°C の水分蒸発面を有し、内側の湿潤層と、外側の乾燥層とに区画される(Fig. 6-11),
 - (2) 水分の移動は食パン外部への蒸発のみとし、食パン内部における水分の移動はない,
 - (3) クラスト層内部に生じる温度勾配は直線的である,
 - (4) 食パン型の6つの面においてたがいに同一の構造のクラストが形成される,
- このとき、微小な時間内にパン生地に入る熱流束は、

$$q = \lambda_e \cdot (\theta_p - 100) / l_c$$

と表される。

この式を用い、食パンを焼成する工程における食パン型の上面・側面・底面の各面に

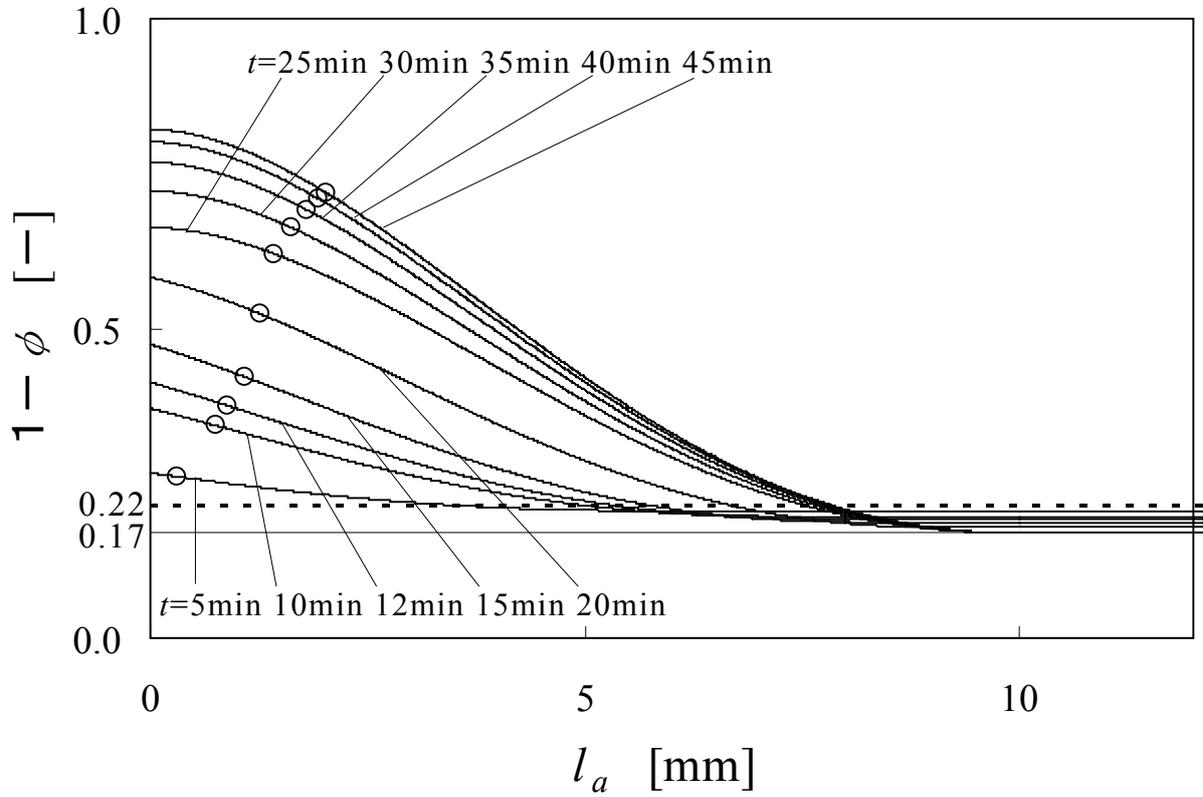


Fig. 6-14 Relation between filling fraction ($1 - \phi$) and distance from surface of bread l_a through baking time with position of boundary phase of evaporation(\circ).
 ($\theta_p = 140^\circ\text{C}$, $t = 5 \sim 45\text{min}$)

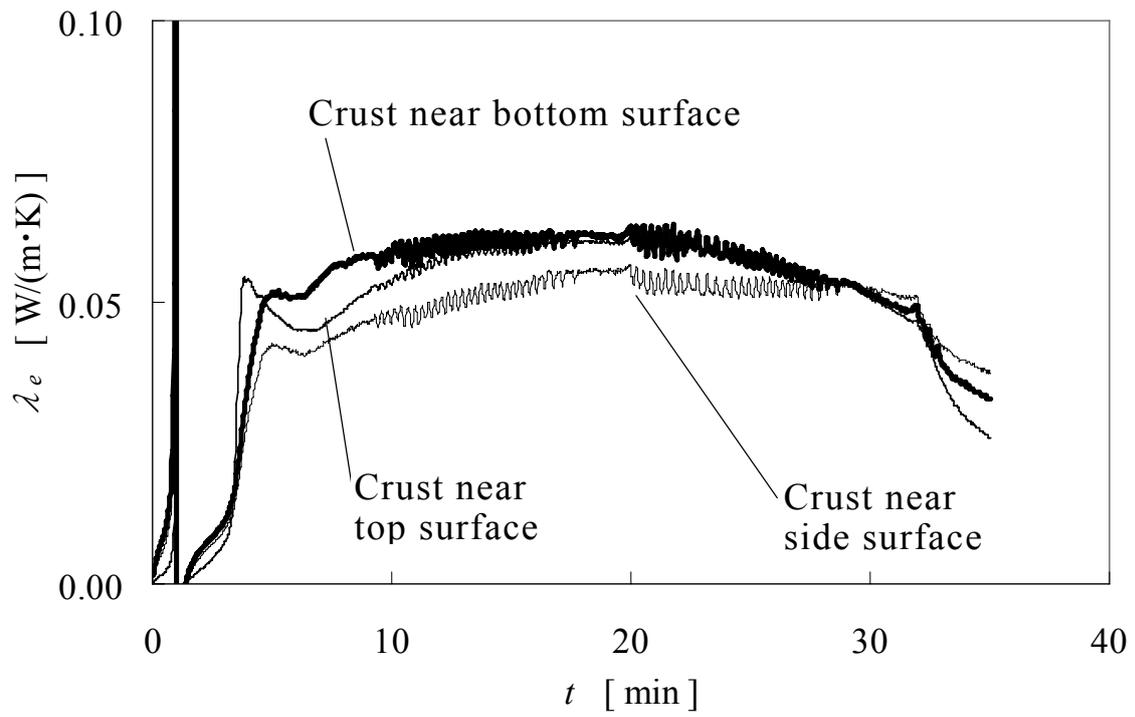


Fig. 6-15 Effective thermal conductivity of the bread crust during Pullman bread baking. ($\theta_p=140^\circ\text{C}$)

近い部分のクラストについて有効熱伝導度 λ_c を求めた。食パン焼成時の食パン型温度 θ_p は 140°C である。その結果を Fig. 6-15 に示す。クラストの有効熱伝導度は、オーブンキックが終了して形状が安定した時点以降には 0.04 ~ 0.06 W/(m·K) の値を示した。クラストの有効熱伝導度が測定された例は稀少である [6]。Zanoni ら [7] は、102°C で重量が安定するまで乾燥させた円柱形状のクラムについて、熱拡散率と比熱、密度を測定して有効熱伝導度を求め、空隙率の関数の形で表した。本研究で作製した食パンのクラスト部の空隙率を Zanoni らが表した関数に代入して有効熱伝導度を計算すると 0.18 W/(m·K) 程度の値になる。しかし、焼成時において形成されるクラストの厚さとそこを流れる熱流束を測定して有効熱伝導度を導出する本研究の手法とは異なる。食パンの焼成工程における熱および水分移動問題を解決していくためには、生地やクラム [8, 9]、クラストなどの生産工程において性状が変化する物質の熱物性値が、その温度や空隙率、含水率への依存性も含めて求められることが望まれるが、本論文の § 6.3.4 で提案したモデルに基づくクラストの有効熱伝導度の推定値は、パン生地内部の温度分布のみならず、クラストの厚さや空隙率の推定など、品質に関連する量のシミュレーション [10, 11] に活用されうる。

6.4 結言

本章では、焼成工程におけるパン生地表層部の温度、熱流束、水分蒸発量、食パンの表層部分と中央部分の空隙率を測定し、以下の結論を得た。

- (1) 角形食パンの焼成工程において食パン型からパン生地に流れる熱量が明らかになり、潜熱あるいは顕熱として消費される熱量の割合の経時変化を示すことができた。焼成初期において熱量はおもに生地温度を上昇させるための顕熱として消費されるが、時間の経過とともに減少し、焼成終了の直前においては、供給される熱量の大部分が水分を蒸発させるための潜熱として消費されることがわかった。
- (2) 角形食パンの焼成工程で見られる生地周辺部の高密度化は、焼成中期まで著しく進行するが、その後は急速に鈍化することがわかった。

- (3) クラスト形成として 100℃の水分蒸発面の進行に，生地の高密度化と生地水分の蒸発が複合的に作用して，クラストの厚さの増加の挙動は焼成時間に対して上に凸の単調増加曲線となることがわかった．
- (4) 食パン型の各面の近傍において水分蒸発により形成される乾燥した部位をクラストと定義し，焼成工程における当該部の有効熱伝導度を推定することができた．

6.5 文献

- [1] 佐藤秀美，畑江敬子，島田淳子；「食品のクラスト層形成および着色状態に及ぼすヒータの放射特性の影響 - 放射伝熱量が一定の場合 -」，日本食品科学工学会誌，39(9)，(1992)，pp.784-789.
- [2] 佐藤秀美，畑江敬子，島田淳子；「食品のクラスト層形成および着色状態に及ぼすヒータの放射特性の影響 - ヒータへの電気入力一定の場合 -」，日本食品科学工学会誌，42(9)，(1995)，pp.643-648.
- [3] 佐藤秀美，畑江敬子，島田淳子；「トーストの物性に及ぼす加熱前の水分含量および熱源の放射特性の影響」，日本食品科学工学会誌，42(4)，(1995)，pp.248-253.
- [4] 陶慧，鈴木功；「イングリッシュマフィンの焼成中の有効熱拡散率」，第 29 回日本熱物性シンポジウム講演論文集，(2008)，pp.22-24.
- [5] B. Zanoni, C. Peri, D. Bruno; “Modeling of Browning Kinetics of Bread Crust during Baking”, *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.*, 28, (1995), pp.604-609.
- [6] 日本熱物性学会；「新編熱物性ハンドブック」，(2008)，p.525，養賢堂.
- [7] B. Zanoni, C. Peri, R. Gianotti; “Determination of the Thermal Diffusivity of Bread as a Function of Porosity”, *Journal of Food Engineering*, 26, (1995), pp.497-510.
- [8] 陶慧，椎野哲男，鈴木功；「パン固形物の有効熱伝導度」，熱物性，16，(2002)，pp.108-113.
- [9] 陶慧，椎野哲男，鈴木功；「パンの有効熱伝導率の実測と伝熱モデル」，熱物性，18，(2004)，pp.7-13

- [10] B. Broyart, G. Trystram; “Modeling Heat and Mass Transfer during the Continuous Baking of Biscuits”, *Journal of Food Engineering*, 51, (2002), pp.47-57.
- [11] N. Therdthai, W. Zhou, T. Adamczak; “Two-dimensional CFD Modeling and Simulation of an Industrial Continuous Bread Baking Oven”, *Journal of Food Engineering*, 60, (2003), pp.211-217.

第7章 結論

わが国における製パン産業は、大規模な生産ラインにおける装置産業化への移行と並行して、小規模な店舗では、冷凍生地製パン法の開発により労働条件の大幅な軽減が図られている。しかし、製造条件の中でもとりわけ品質への影響が大きい熱的操作は、明確な操作量が示される例が少なく、この分野での研究開発が強く望まれている。

このような背景のもとで、本研究では製パン工程の中でも最終製品の品質が熱的操作によりもっとも強く依存する焼成工程と冷凍・解凍の工程における熱的操作に注目した。これらの工程においては、経時的に状態が変化する焼成前のパン生地および焼成後のクラム、クラストの性状を改善する熱的操作を研究対象に定め、とくに次の3つの研究課題に取り組んだ。

第1の課題は、製造条件や装置設計の最適化のための数値シミュレーションの高度化のために必要なパン生地およびクラムの熱物性値、とくに有効熱伝導度の値を求めることであった。

第2章では、この点について研究した。対象物は、固・液・気の複雑な多成分3相系であるパン生地、クラム、小倉餡であった。有効熱伝導度の測定時における試料の温度上昇が最小限に抑えられる方法として非定常プローブ法を選んだ。酵母を付加しない生地について、その有効熱伝導度を凍結温度や澱粉の糊化温度を含む $-80\sim+100^{\circ}\text{C}$ の温度域において測定し、その結果を温度の関数として示した。その有効熱伝導度の値は、基本的に温度上昇に伴って増加するが、凍結温度前後では凍結した生地の有効熱伝導度が未凍結の生地のその2倍程度の値をとることがわかった。空隙率がたがいに異なる2種の食パン(山形、角形)について、クラムの有効熱伝導度を凍結温度を含む $-80\sim 60^{\circ}\text{C}$ の温度域において測定し、温度の関数として示した。その有効熱伝導度は、未発酵の生地の場合と同様に、凍結温度の前後ではクラムの有効熱伝導度が未凍結のクラムのその2倍程度の値をとることがわかった。以上のことから、生地やクラムの有効熱伝導度は含有する水の影響を強く受けることがわかった。パン生地の発酵工程において経時的に空

隙率が変化するときの有効熱伝導度を測定し、空隙率との関係を調べた。有効熱伝導度は空隙率の増加とともに減少し、Eucken の式による推算とよく一致することがわかった。

第 2 の課題は、冷凍生地製パン法における冷凍障害を軽微に抑え、設計された品質を確保するための冷凍・解凍の条件を求めることであった。

第 3 章では、冷凍生地製パン法における冷凍工程でのパン生地内部の温度分布変化を推定するために数値計算を行い、この計算が冷凍工程におけるパン生地の状態変化を良好にシミュレートするものであることを確認した。冷凍パン生地は保存後解凍されるまでに辿った温度履歴が製品の品質に強い影響を及ぼし、冷凍および保存工程におけるパン生地の最低到達温度が $-17\sim-20^{\circ}\text{C}$ の温度域に存在する酵母の失活温度を一度でも下回ると酵母が失活し、生地の発酵ガス量が著しく低下することがわかった。パン生地の最低到達温度が酵母の失活温度以下になると、酵母の失活が起こって生地構造が脆弱になりガス保持性が低下することがわかった。パン生地を冷凍させる際の凍結速度の低下にともなって、生地構造は一律に脆弱になることがわかった。さらに、さまざまな冷凍条件でパン生地の製パンを行い、パン生地が受ける冷凍障害が軽微であり、良好な品質(外観：設計通りの体積と形状、内相：均一で細やかな気泡)が得られる条件が第 3 章に示した計算により示唆されることを確認した。

第 4 章では、パン生地の解凍工程での温度変化について、生地の凍結率を考慮する数値計算を行った。その結果は実測値と良好な一致を示した。解凍工程では生地内の温度は比較的均一に生地の凍結温度まで上昇し、生地の状態変化は短時間で完了することがわかった。実際の製パン工程における解凍工程で生じる生地の障害レベルを推定する指標としては、従来から用いられてきた最大氷結晶生成帯域での滞留時間が一つの重要な指標としてなりうることがわかった。

第 3 の課題は、食パン焼成工程における熱および物質移動の現象を明らかにするとともに、クラスト形成のメカニズムを明らかにし、従来測定が困難であったクラストの有効熱伝導度を求めることであった。

第 5 章では、集積型の薄膜熱電対と細線熱電対を作製し、焼成工程下にあるクラスト

近傍の食パンの温度場を測定した。食パン焼成工程中のパン生地温度と食パン型からパン生地に流れる熱流束を測定し、焼成工程中の水分移動の寄与を含めたパン生地、クラムおよびクラストの有効熱伝導度と伝熱量の評価を試みた。水分移動の寄与を含めたクラムの有効熱伝導度は、相変化をとみなさない系の熱伝導度に比べてはるかに高いことがわかった。乾燥したクラストの有効熱伝導度はクラムのそれと比べて低いことがわかった。

第6章では、食パンの焼成工程において食パン型からパン生地に熱エネルギー量、潜熱あるいは顕熱として消費される割合の経時変化を評価した。熱エネルギーは、焼成初期においてはおもに生地温度を上昇させるための顕熱として消費される。その顕熱として消費されるエネルギーの割合は焼成の時間の経過とともに減少し、焼成終了の直前においては、供給される熱量の大部分が水分を蒸発させるための潜熱として消費されることがわかった。角形食パンの焼成工程で見られるパン生地周辺部の高密度化の現象は、焼成工程の中期までは進行するが、その後にはその傾向が鈍化することがわかった。クラストが形成されるとき、高密度化と生地水分の蒸発乾燥が同時に起こるが、その際のクラストの厚さの変化は焼成時間に対して上に凸の単調増加曲線として表すことがわかった。食パン型の各面の近傍において水分蒸発により形成される乾燥した部位をクラストと定義し、焼成工程における当該部の有効熱伝導度を推定することができた。

本研究の結果、製パン工程における熱的制御に関して技術の進展を図ることができた。冷凍生地の生産工場では過度の低温度までパン生地を冷却しないように生地のサイズごとに冷凍時間をマニュアル化し、製品の品質の安定化を図ることが可能になった。冷凍生地を使用してパンを焼成する店舗に、パン生地の障害が軽微な条件でパン生地を解凍するための設備(特許公開 2009-254306, 発明の名称: 冷凍パン生地の解凍装置)を開発して斡旋することができた。大型の生産ラインでパンを焼成する工場では、着色とクラストの厚さに応じてパンの品質に強く影響するオーブンの焼成条件を専用の測定装置(特許公開平 7-301391, 発明の名称: 断熱容器及び該断熱容器を用いた測定装置)を使用して、設定することができるようになった。

本研究に関連する論文

第2章

- [2-1] 山田盛二, 高野孝義, 小林清志; 「製造および保存過程における食パンの有効熱伝導度の測定」, 熱物性, Vol.10, No.2/3, (1996), pp.54-58.

第3章

- [3-1] 山田盛二, 荻須昭雄, 平岩隆夫; 「冷凍条件に起因するパン生地の障害に関する研究(凍結速度の影響)」, 熱物性, Vol.25, No.3, (2011), pp.121-128.
- [3-2] 山田盛二, 荻須昭雄, 平岩隆夫; 「冷凍条件に起因するパン生地の障害に関する研究(第2報 最低到達温度の影響)」, 熱物性, Vol.25, No.3, (2011), pp.129-135.

第4章

- [4-1] 山田盛二, 渡邊裕史, 梶山正秀, 平岩隆夫; 「パン生地の冷凍障害に関する研究(解凍条件が製品品質に及ぼす影響)」, 熱物性, Vol.13, No.1, (1999), pp.7-12.

第5章

- [5-1] 小松雅一, 山田盛二, 高野孝義; 「食パン焼成過程における集積型熱電対を用いたパン生地有効熱伝導度の測定」, 熱物性, Vol.20, No.4, (2006), pp.179-185.
- [5-2] Masakazu Komatsu, Seiji Yamada, Takayoshi Takano: “Measurement of Dough Effective Thermal Conductivity Using an Integrated Thermocouple during the Bread Baking Process”, Heat Transfer - Asian Research, Vol.36, No.6, (2007), pp.373-385.

第6章

- [6-1] 山田盛二, 平岩隆夫, 高野孝義; 「食パン焼成時におけるクラストの有効熱伝導度」, 熱物性, Vol.18, No.4, (2004), pp.130-135.

- [6-2] Seiji Yamada, Takao Hiraiwa, Takayoshi Takano; 「A Study of Heat and Mass Transfer in the Bread Baking Process」, Proceedings of the 16th European Conference on Thermophysical Properties, (2002), pp.327-329.

謝辞

本論文をまとめるにあたり，細やかなご指導とご助言ならびに校閲を賜りました京都大学・牧野俊郎教授に深く感謝の意を表します．本論文の審査ならびにご助言を賜りました京都大学・吉田英生教授，中部主敬教授に厚く御礼申し上げます．本論文の審査にあたり，学力試問を実施して頂きました京都大学・西脇眞二教授，松本充弘准教授に謹んで感謝申し上げます．

本研究への扉を開いて頂き，食品であるパンと熱物性を研究対象として基礎から御指導を頂きました豊田工業大学元学長・小林清志先生，豊田工業大学・高野孝義准教授に深く感謝致します．静岡理工科大学・荒木信幸学長におかれましては，本論文の作成にあたり，永きに渡って御配慮を頂きました．心から御礼申し上げます．

敷島製パン・平岩隆夫顧問には，製パン技術ならびに品質評価に関する多大なる指導を賜りました．業務改革部・小松雅一課長には，食パンの焼成工程における熱と水分移動の課題に関して有益なご助言と絶大なるご支援を頂きました．冷凍生地製パン法では，元開発部の荻須昭雄氏，梶山正秀氏，渡邊裕史氏から多くの御貢献を頂きました．皆様は共同研究者として共に本研究に携われ，多岐に渡って小職への御助力を賜りました．ありがとうございました．

研究者としての環境を与えて頂きました敷島製パン株式会社・盛田淳夫社長をはじめ，御指導・御鞭撻を賜りました関係各位の皆様に深く感謝申し上げます．

最後に，健康面やメンタル面で常に配慮し続けて陰ながら私をサポートしてくれた妻・美智恵，娘・知奈美と，私の置かれている状況に構わず，作業中のパソコンのディスプレイ前に現れては癒しながら試練を課し続けてくれた愛猫・ブルーに感謝します．家族のみんなに，本当にありがとう．