

マイクロ波加熱によるサツマイモの糖度変化

著者	松田 寛子
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2009
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001059/

修士学位論文

マイクロ波加熱によるサツマイモの糖度変化

平成21年度

(2010年3月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

食品機能保全科学専攻

松田寛子

目次

第1章 序章	5
1-1. 背景	5
1-2. 研究目的	6
1-3. サツマイモについて	6
1-3-1. 分類	6
1-3-2. 成分	6
1-3-3. サツマイモの横断面組織構造	6
1-3-4. 選び方および保存	6
1-3-5. サツマイモ澱粉とマルトース生成過程	7
1-3-6. β -アミラーゼ	7
1-4. 電子レンジによるサツマイモの調理	7
第2章 生サツマイモ内の糊化特性	9
2-1. 糊化温度	9
2-1-1. 実験方法	9
2-1-2. 結果および考察	10
2-2. 第2章の結論	12
第3章 マイクロ波加熱下での温度履歴および糖度変化	13
3-1. 実験方法	13
3-1-1. サンプル	13
3-1-2. サンプル形状	13
3-1-3. 実験装置	14
3-1-4. 加熱条件	15
3-2. サツマイモ内の温度計測	15
3-2-1. 温度測定部位	15
3-2-2. 結果および考察	16
3-3. 糖度測定	18
3-3-1. 測定温度帯	18
3-3-2. 測定方法	19
3-3-3. 検量線	20
3-3-4. 糖度計算方法	21
3-3-5. 結果および考察	22
3-4. 第3章の結論	23
第4章 糊化温度 GT および糖化温度 ST の滞在時間の重要性の検証	25

4-1. 糊化度測定.....	25
4-1-1. 実験方法.....	25
4-1-2. 一定温度下での糊化度.....	26
4-1-3. 生サツマイモ澱粉の終末糊化度の算出.....	28
4-2. 糖度測定.....	29
4-2-1. 測定方法.....	29
4-2-2. 糖度算出方法.....	29
4-2-3. 結果および考察.....	29
4-2-4. 結論.....	30
4-3. 第4章の結論.....	30
第5章 糊化・糖化および酵素失活を考慮した数学モデルの構築.....	31
5-1. 反応速度式基本プログラム.....	31
5-1-1. 反応速度式の設定.....	31
5-1-2. 反応速度式の決定.....	34
5-1-3. 計算に必要な速度定数.....	35
5-2. 基本プログラムの改正.....	36
5-2-1. 工学的な視点からの変更.....	36
5-2-2. 生物学的な視点での変更.....	37
5-2-3. 結果.....	38
5-3. マイクロ波加熱下での温度上昇に基づく反応シミュレーション.....	41
5-3-1. 低出力 100W 加熱.....	41
5-3-2. 高出力 600W 加熱.....	43
5-4. 第5章の結論.....	45
第6章 マイクロ波加熱下における3次元熱伝導解析および反応シミュレーション.....	46
6-1. 要素モデルの作成.....	46
6-1-1. 形状および寸法.....	46
6-1-3. 境界条件の設定.....	48
6-1-4. 電場の設定.....	49
6-2. 計算プログラムでの設定.....	54
6-2-1. WAVEj ω	54
6-2-2. FORTRAN.....	54
6-2-3. Femap.....	55
6-3. 結果および考察.....	56
6-3-1. 温度.....	56
6-3-2. 各反応の比較.....	62
6-3-3. 糖度の比較.....	69

6-4. 第6章の結論	71
第7章 総括	72
文献目録	74
謝辞	76

第1章 序章

1-1. 背景

マイクロ波の食品への利用は、調理、再加熱、解凍、殺菌、乾燥などにおいて幅広く利用されてきた。マイクロ波は1 mm ~ 10 cm (300MHz ~ 30 GHz) と非常に波長が短い電波で、このマイクロ波を利用した食品への加熱は、従来の遠赤外線を含む赤外線により対流・輻射による熱伝導で温度上昇を引き起こす方法に比べ、速いことがあげられる。食品は自由に動ける電荷担体をわずかにしか持たないので、誘電体とみなされるが、この誘電体を電場の下におくと誘電分極が生じ、マイクロ波の交番電場に配向しようとして激しく振動回転を繰り返すことで摩擦熱が発生し、温度上昇を引き起こす。この“誘電加熱”の原理により被加熱物だけが内部から加熱されるために①熱効率が低い ②加熱時間が短い ③加熱装置自体はほとんど加熱されない ④作業環境がよい ⑤加熱方法が簡単等の特徴を持っている^[1]。

現在、このようなマイクロ波を用いたマイクロ波加熱装置（電子レンジ）の食品への利用は、現代の生活スタイルに合っているということから広く利用されている。しかし、調理手法としては、おいしさが引き出されないといった不十分な点もあげられる。この問題に関与する、マイクロ波加熱の食品への影響やサツマイモに関する研究は、広く行われている。これらを大まかにまとめると植物学、食品化学・栄養学、食品工学のように分類できる (Table 1-1)。

Table 1-1 既往の研究

研究分野	着目点	主な論文
植物学	品種・組織別の澱粉特性および加熱による内部構造変化に着目	時村金愛ら(2004) ^[2] , HAGENIMANA V.ら(1992) ^[3] , WILLIAM M.ら(1982) ^[4] など
食品化学・栄養学	蒸す・焼く・揚げるといった調理方法および酵素の特性に着目	小倉長雄ら(1998) ^[5] , 山口美代子ら(1994) ^[6] , 桐淵壽子ら(1976) ^[7] など
食品工学	温度履歴に着目、その後実測値や伝熱特性を基にシミュレーションを作成	田中史彦ら(2006) ^[8] , 澤井淳ら(2004) ^[9] , O.O.FASINE ら(2003) ^[10] など

また、これらの研究分野では、サツマイモの糊化特性、調理法に応じたサツマイモの糖度変化、および糖化反応の進行、さらにはマイクロ波加熱の伝熱特性を個々に評価している。しかし、この研究分野の着目点を全て考慮した上で、マイクロ波加熱によるサツマイモの糖度変化を追究する必要があると考えた。よって、研究では、全ての評価方法を考慮し、マイクロ波加熱下での全反応過程の知見を得ることによって、“調理工学”という視点で研究を進める。

1-2. 研究目的

1-1. 背景で述べたように、調理工学的視点から研究を進めた過去の研究において、サツマイモのおいしさ・甘味に関与しているマルトースの生成には糊化反応や糖化反応での酵素が十分に作用することが重要であることが分かった。この糊化・糖化反応には最適な温度帯、糊化温度(以下、GT (Gelatinization Temp.)) および糖化温度(以下、ST (Saccharification Temp.)) と最適な滞在時間が必要である。よって、本研究では、マイクロ波加熱下での、サツマイモの糊化・糖化および失活までの酵素作用を考慮した数学モデルの構築を目的として、温度と糊化・糖化反応を実測し、予測計算との比較によってモデルの妥当性を検証する。

1-3. サツマイモについて

1-3-1. 分類

ヒルガオ科。根が肥大した塊根(イモ)を食用にする。また、本研究で用いたベニアズマは、コガネセンカと関東 85 号を掛け合わせたもの。品質などはベニコマチと同様である。ベニコマチは、コガネセンカと高系 14 号を掛け合わせたもの。外皮は鮮紅色、肉は濃い黄色で長紡錘形である。ふかすとホクホクとして味が良い。貯蔵性がある^[11]。

1-3-2. 成分

サツマイモの主成分は炭水化物で、約 30%程度を含み、その大部分は澱粉である。糖分は 1~3 %でショ糖が多く、ブドウ糖や果糖はわずかに含まれているにすぎない。食物繊維(ダイエタリーファイバー)が他のイモよりも多く含まれている。また、焼き芋や蒸し芋などが甘味に強いのは、強力な β -アミラーゼを含み、加熱初期段階で相当量の澱粉がマルトース(麦芽糖)とデキストリンに変わるためである^[11]。

1-3-3. サツマイモの横断面組織構造

サツマイモの横断面組織構造を Fig.1-1 示す。表層部はデンプン粒が大きく、量も多い。一方、内部の中心柱における維管束周辺のデンプン粒は小さい。中心部は柔細胞という点にあたるのだが、この柔細胞のデンプン量が最も多い^[12]。

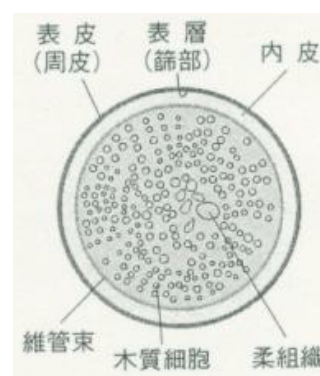


Fig.1-1 サツマイモの横断面組織構造^[12]

1-3-4. 選び方および保存

選び方は、皮がなめらかでつやがあり、はげていないもの、太さがほどよく、身のしまったものがよい。黒い斑点のあるものや傷があるものは避ける。

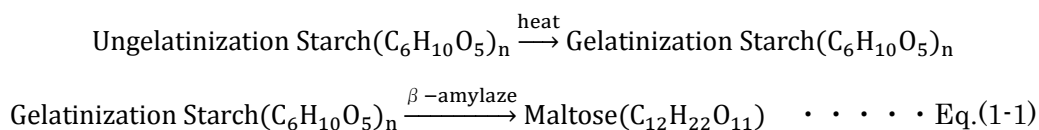
保存する場合、適温は 13~14 °Cで、温度が低すぎると腐りやすいため冷蔵庫に入れては

いけない [11].

また、サツマイモの貯蔵にはキュアリング貯蔵が多く用いられている [13]が、この貯蔵法は、本研究室の施設上と実験開始期間の都合上困難であるため、行わなかった。そのため、気温が下がり始めた10月上旬から1月下旬にスーパーで購入後、1週間以内に実験を行った。

1-3-5. サツマイモ澱粉とマルトース生成過程

サツマイモの甘味成分はマルトース（麦芽糖）である。このマルトースは2つの重要な反応を経て生成される（Eq.(1-1)）。



サツマイモには強力な糖化作用をもつβ-アミラーゼが多く含まれており、貯蔵中あるいは加熱中に澱粉が糊化され、糊化された澱粉が分解されてマルトースが生成される。サツマイモ澱粉の糊化開始温度は、65.8℃である [14]。また、80℃付近では糊化が完了する [15]。糊化の進行と共にアミロース（グルコース数 250～300，分子量 5 万）とアミロペクチン（グルコース数 1000，分子量 18 万）が溶出する。その後、β-アミラーゼがアミロースのみに作用し、マルトースを生成する [16]。

1-3-6. β-アミラーゼ

前述したマルトースの生成過程には、β-アミラーゼの作用が重要であると考えられる。β-アミラーゼは、澱粉の非還元末端にエキソ型で作用し、順次にマルトースを遊離する酵素と認識されている。一方、α-アミラーゼの場合は、澱粉をランダムに切るつまりエンド型に加水分解する酵素である [17]。

サツマイモのβ-アミラーゼには、55℃に至適温度をもつ水溶性のものと、75℃に至適温度をもつ耐熱性の高い不溶型のものが存在するといわれている。また、サツマイモのβ-アミラーゼは85℃以上で失活するといわれている [18]。

1-4. 電子レンジによるサツマイモの調理

電子レンジにより加熱調理されたサツマイモは、糖度が低いといわれている。この原因としては、文献によって異なるが、「電子レンジで急速に加熱されるために、β-アミラーゼの作用時間が少なく、澱粉が一部しか糖化しないためである [11].」という“酵素作用短時間”説と、「加熱温度が急速に上昇する電子レンジ加熱の場合には、β-アミラーゼが速く失活するため、マルトースの量が少なく甘みが少ない [8].」という“酵素失活”説があげられる。

しかし、電子レンジ（一般家庭での出力 600W）加熱の場合、β-アミラーゼが急速に失活していくことが分かっている [7]。加熱 20～40 秒では約 30%，60 秒では約 85 秒，90 秒ではほとんど完全に失活している。さらに、β-アミラーゼの活性が残っている時点では澱

粉の糊化が不十分であり，糊化が進むと β -アミラーゼが失活してくる．よって，糊化後から酵素失活までの酵素作用時間（糖化反応）が非常に短いため，十分に澱粉がマルトースに変化することができない．これらの理由から，前述した“酵素作用短時間”説および“酵素失活”説，共に糖度が上昇しない原因に値すると考えられる．

第2章 生サツマイモ内の糊化特性

第1章において、文献値を基に、サツマイモに関するいくつかの項目について示した。しかし、それらの値を得るための実験対象となっているのは、精製試料である。本研究では、生サツマイモを対象としているため、精製澱粉を対象として示された値が、生サツマイモ澱粉にも用いることが可能であるのかを検証する必要がある。本章では、精製澱粉と生サツマイモ澱粉の糊化温度について検証する。

2-1. 糊化温度

精製澱粉は、サツマイモから化学的に処理されることによって、生サツマイモから純粋に澱粉のみを抽出してつくられている^[19]。しかし、本研究で対象となる澱粉は、生サツマイモの細胞内に存在している澱粉である。よって、生サツマイモ澱粉の糊化温度の検証を行う。

2-1-1. 実験方法

測定は、サンプルを作製後、示差走査熱量測定(Differential Scanning Calorimetry:DSC)を用いて行った。

2-1-1-1. サンプル調製

サンプルは、サツマイモの皮を除去した後、おろし金を用いてペースト状にした。この際、ペースト後は直ちに測定した。

サツマイモの中心部と側面部とに存在する澱粉は、粒の大きさや量が異なる(Fig.1-1)。よって、ここでペースト状にすることにより、中心部および側面部の澱粉粒の大きさや量を均一にすることを目的とした。

2-1-1-2. DSC システム

測定には、PERKIN ELMER Pyris 1 の DSC システムを用いた。温度および熱流速のキャリブレーションにはインディウムを用い、耐熱性アルミ製容器(KIT No.0219-0041)にて測定を行い、リファレンスには空パンを用いた。また、初期温度は 30℃、到達温度を 90℃とした。昇温速度は、5℃/min とした。DSC 測定後は、パンに針で穴をあけ 105℃恒温槽で 24h 放置し、重量を測定した。

サツマイモの糊化度を測定する際には、サンプルのペーストを前述した容器に入れ、同様の温度間および昇温速度で測定を行った。測定は 3 サンプル行った。

2-1-1-3. 糊化度計算方法

サンプルの糊化度の算出は、乾物量 (Eq.(2-1)) を求めたのち、DSC から得られた熱量から糊化度を算出した (Eq.(2-2),(2-3)).

$$\text{乾物量 } W_{\text{dried sample}} \text{ (mg)} = (W_{\text{After DSC}} + W_{\text{pan}}) - W_{\text{pan}} \quad \dots \dots \text{Eq.(2-1)}$$

$$\text{糊化吸熱量 } \Delta H \text{ (J / g}_{\text{sample}}) = \frac{\Delta H_{\text{DSC}}}{W_{\text{Dried sample}}} \quad \dots \dots \text{Eq.(2-2)}$$

$$\text{糊化度 } Xg(-) = \frac{\Delta H_{\text{raw}} - \Delta H_{\text{sample}}}{\Delta H_{\text{raw}}} \quad \dots \dots \text{Eq.(2-3)}$$

2-1-1-4. 顕微鏡観察

DSC 測定と合わせて顕微鏡 (生物顕微鏡 : OLYMPUS 製 BX 50-33, 100 Xoil, カメラ : NIKON 製 DIGITAL SIGHT DS-L1) を用いた顕微鏡法でも偏光十字の消失の観察を行った。顕微鏡で観察する際は、ペースト状での観察が困難であった。そのため、ペースト作製と同様のサツマイモを、生の状態でスライス状にし、ホットステージ (ホットステージ : LINKMAN 製 HFS 91, 顕微鏡用冷却加熱装置 : LINKMAN 製 TH-600P) 上で DSC と同様の 30~90℃まで 5℃/min で昇温させ、中心および側面部の 2 か所を撮影した。この時の撮影温度帯は、40~90℃まで 5℃間隔とした。40℃での断面は、生の状態と澱粉が未糊化であることや細胞の状態の変化がないため、この温度帯からの撮影とした。

2-1-2. 結果および考察

測定結果を Table 2-1, Fig.2-1 に示す。

Table 2-1 生サツマイモ澱粉測定結果

	平均	標準偏差
糊化温度(on set)(℃)	76.3	±2.32
糊化終了温度(end)(℃)	81.1	±1.91
糊化吸熱量(ΔH)(J/g)	4.10	±1.22

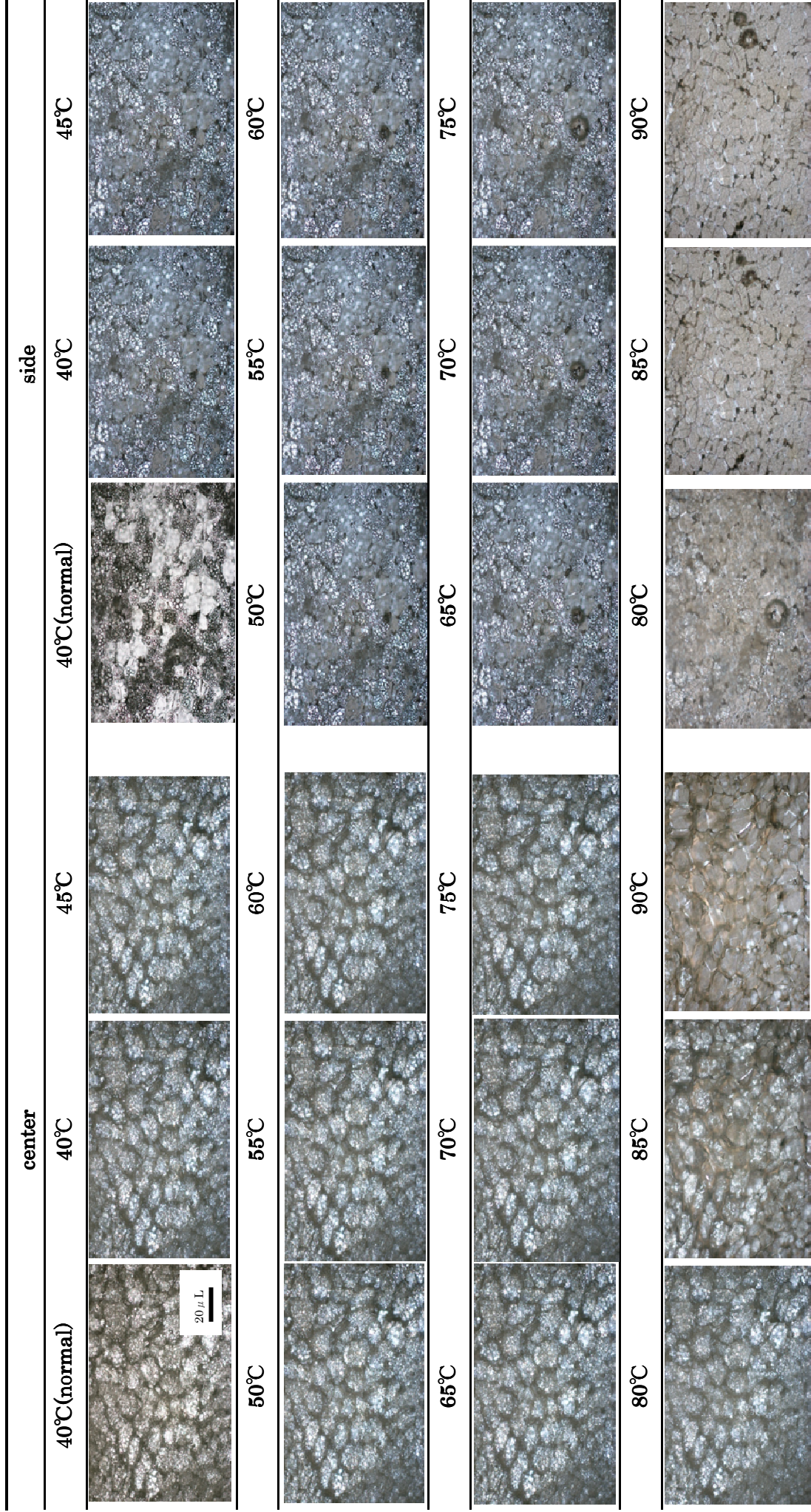


Fig.2-1 生サツママイモ糊化温度測定結果 (顕微鏡法)

Table 2-1 より，生サツマイモ澱粉の糊化温度は，精製澱粉よりも約 10℃も高く，糊化温度は 76℃(±2.3℃)，糊化終了温度は 81℃(±1.9℃)となった．また，Fig.2-1 では，ペースト状の観察はできなかったものの，65.8℃付近の 65℃および 70℃では，生(40℃)の状態とさほど変わらず，未糊化澱粉の象徴である偏光十字は 80℃付近から崩れ始めた．この時，Fig.2-2 で示したようにそれぞれの断面に小さな部屋のようなものが観察できる．これは，細胞壁であり，この細胞壁内でアミロプラスト膜につつまれて澱粉粒子が存在している [20], [21]．

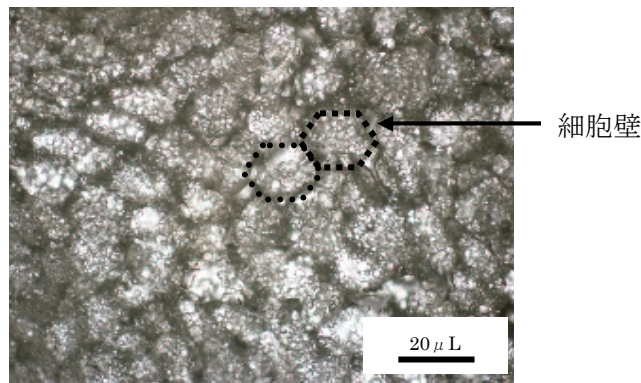


Fig.2-2 サツマイモ組織内の細胞壁

細胞壁が破壊されることによって，生サツマイモ内の澱粉が溶出し，糊化が進行すると考えられる．また，細胞壁の構成成分であるペクチンやセルロースの破壊温度が約 100℃ [22]であり，この破壊温度が精製澱粉とは異なる糊化温度帯の原因になっているとも考えられる．さらに，生サツマイモの澱粉内にはいくつかの共存物が存在しているため [23]，精製されることでその共存物も除去され糊化温度に影響が生じたとも考えられる．

2-2. 第2章の結論

結果より，精製澱粉と生サツマイモ澱粉との糊化温度に差が生じたのは，細胞壁の構成成分であるペクチンの破壊温度が大きく影響していると考えられる．よって，精製澱粉の 65.8℃という糊化温度を用いての解析は，本研究には適していないということが明確となった．よって，以後サツマイモ澱粉の糊化温度は 76℃(±2.3℃)，糊化終了温度は 81℃(±1.9℃)として実験を進める．

第3章 マイクロ波加熱下での温度履歴および糖度変化

マイクロ波加熱を用いたサツマイモの加熱は、短時間でサツマイモ内部の温度が急上昇するために、本来の甘味（糖度）が引き出されないということが考えられる。そのため、本章ではマイクロ波加熱の伝熱特性を明らかにすることを目的とし、リアルタイムでのサツマイモ内の温度を計測するとともに、温度に伴った糖度も合わせて測定した。

3-1. 実験方法

3-1-1. サンプル

サツマイモは、千葉県産紅東を用いた。

3-1-2. サンプル形状

本研究でサンプル形状は、再現性や解析のしやすさを考慮して、皮を除去した後円筒形に成形した。成形後、上下にアルミテープで覆うことによって、側面方向のみのマイクロ波照射に制限し、さらにポリエチレン製プラスチックフィルムで覆った (Fig.3-1)。皮の有無による糖度の差も生じたが、詳細については巻末に添付する。しかし、皮を除去しないと温度分布の斑が生じてしまうこともわかっているため、本実験では皮を除去したサツマイモをサンプルとして用いた。

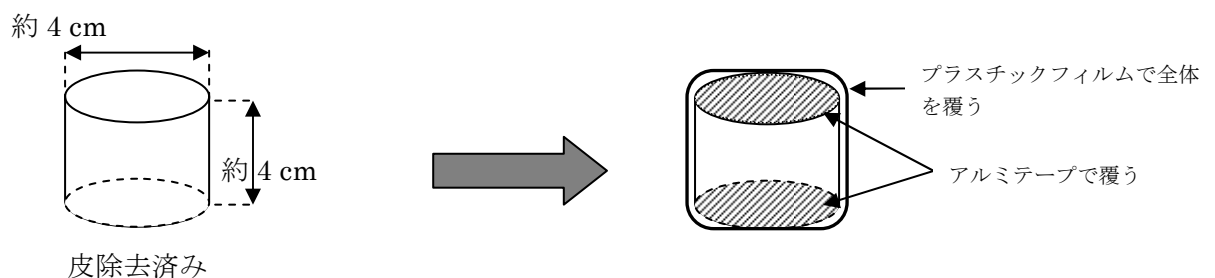
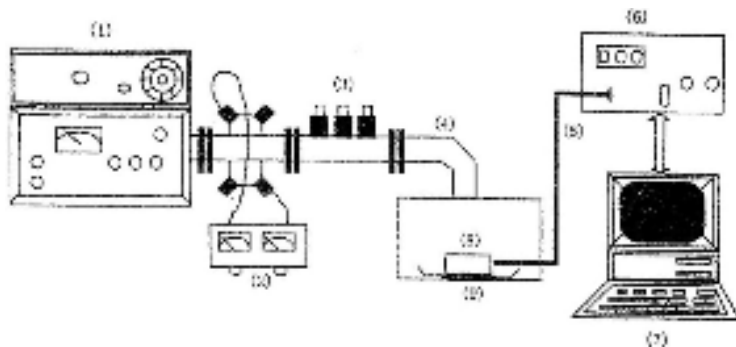


Fig. 3-1 サンプル形状

3-1-3 . 実験装置

実験装置は、マイクロ波発振器、パワーモニター、整合器、導波管、加熱庫等からなり、マイクロ波はマイクロ波発振器から導波管を伝播し加熱庫に入射する。発振周波数は 2450MHz、出力範囲は 0 ~1.5kW 連続調整可能である。装置図を Fig.3-2 に示す。また、加熱庫内部の寸法等の詳細を Fig.3-3 に示す。Fig.3-3 は後に第 5 章でのシミュレーションに用いる。



- | | | |
|-------------|---------------|-----------|
| (1) 発振器 | (2) パワーモニター | (3) 整合器 |
| (4) 導波管 | (5) 光ファイバー温度計 | (6) 温度記録器 |
| (7) コンピューター | (8) 食品サンプル | (9) 加熱庫 |

Fig.3-2 マイクロ波加熱実験装置

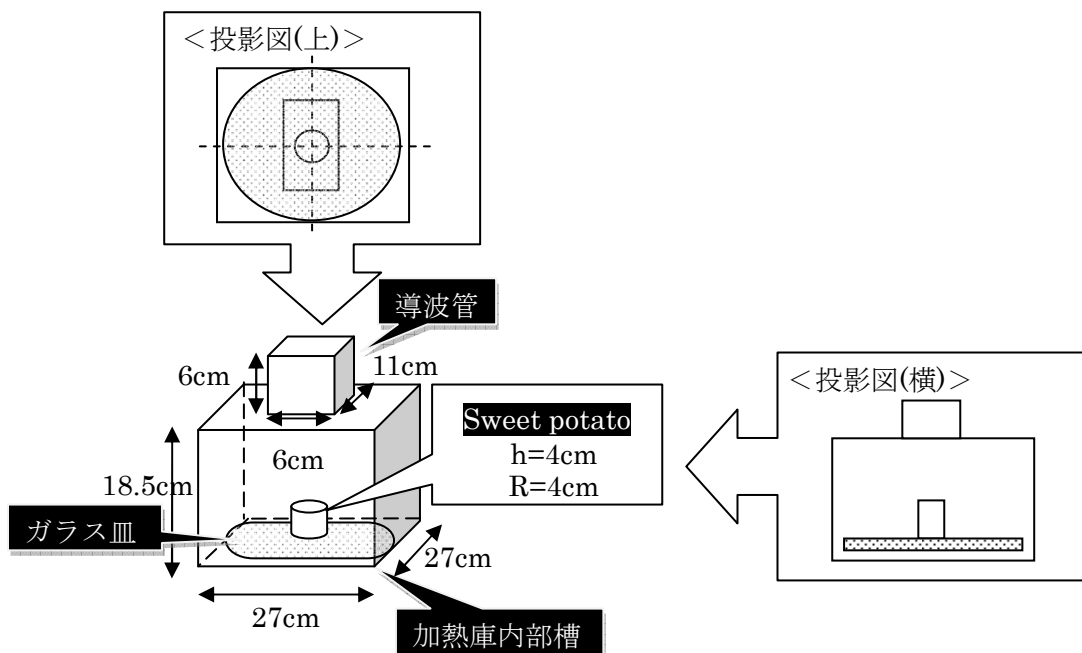


Fig.3-3 加熱庫内部槽、導波管、ガラス皿、サンプル
(h : 高さ, R : 直径) の寸法および投影図

3-1-4. 加熱条件

さらに加熱出力は、家庭用の電子レンジ出力を考慮し、解凍モードにあたる低出力 100W と温めモードにあたる高出力 600W とした。出力は、発振器の目盛を 100W, 600W とするよう調節し、サンプルとなるサツマイモを加熱庫に入れた状態で加熱を開始し、同時にパワーモニターの入射電力および反射電力を読み取った。入射電力と反射電力の関係を Table. 3-1 に示す。

Table3-1 入射電力と反射電力の関係

設定出力(W)	入射電力(W)	反射電力(W)	推定吸収電力(W)	加熱時間(s)	エネルギー(J)
100	100	0~21.4	78.9~100	216	21600
600	600	335.1~392.1	207.9~264.9	36	21600

Table 3-1 より、(入射電力) - (反射電力) = (推定吸収電力) とすると、推定吸収電力は 100W の場合 78.9~100W, 600W の場合は 207.9~264.9W となる。本来ならば、推定吸収電力等を考慮しなければならない。しかし、本実験では、推定吸収電力に関しては考慮せず、入射電力が 100% 試料に照射されたと見なし、両出力の同等のエネルギーとなるように加熱時間を算出した。

3-2. サツマイモ内の温度計測

3-1. で示したサンプルおよび加熱条件で、中心部と側面部の温度履歴を測定した。

3-2-1. 温度測定部位

サンプルを作製した後、中心部 ($r = 0 \text{ cm}$)、側面部 ($r = 1.5 \text{ cm}$) に、深さ約 1.5 cm の部分に光ファイバー温度計 (FIBEROPTIC THERMOMETER PROBE: 安立計器株式会社 F1000-2S, B05002, $-190 \sim 260 \text{ }^\circ\text{C}$, 計測装置: 安立光ファイバー温度計 FX9020-1) を差し込んだ (Fig.3-4)。温度は、100W 加熱では中心部・側面部ともに 2 秒ごと、600W 加熱では、ともに 1 秒ごとに測定した。それぞれ 3 回ずつ測定した。

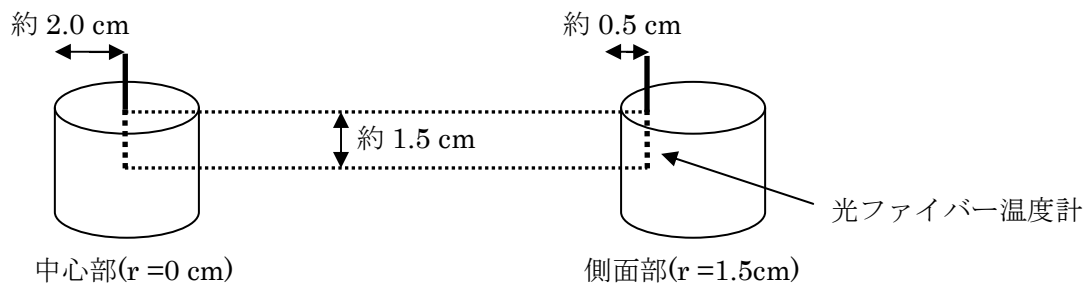


Fig. 3-4 温度履歴測定サンプル形状

3-2-2. 結果および考察

両部分の測定結果を Fig.3-5 に示す。

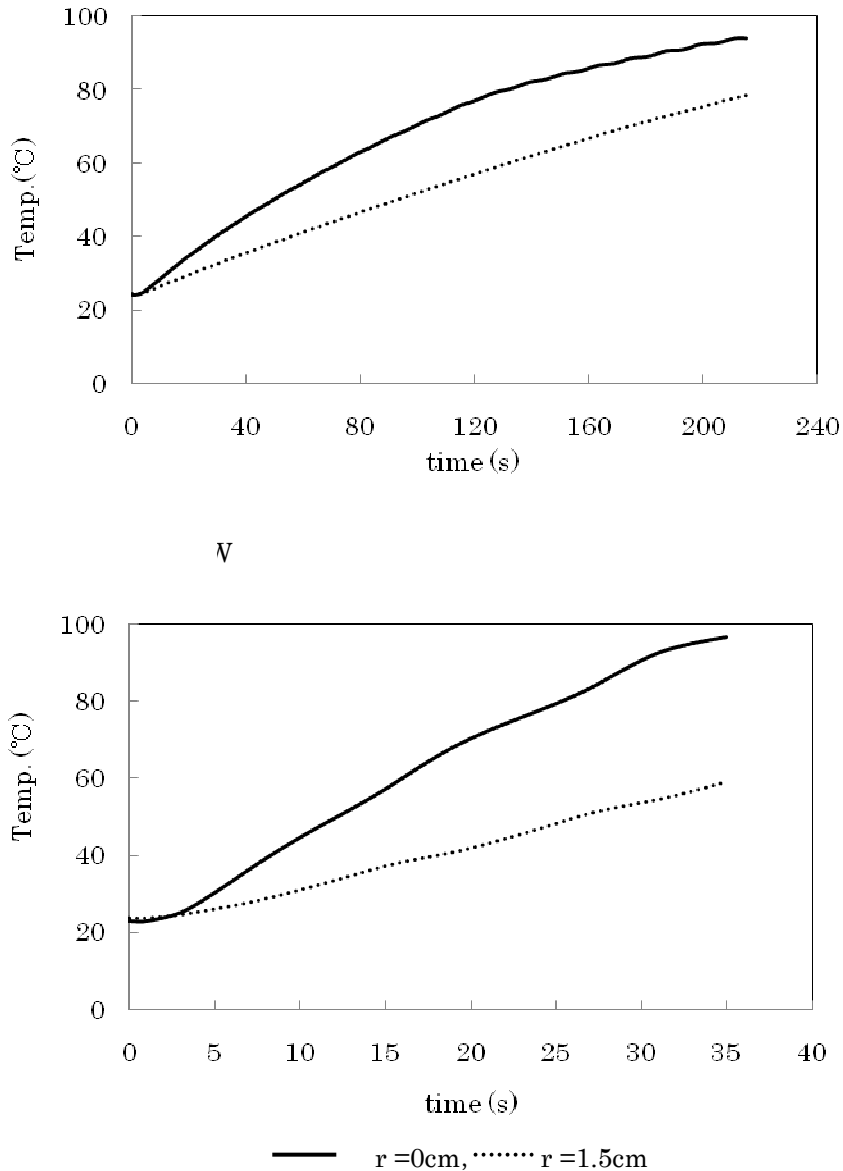






Fig.3-5 温度履歴測定結果

両出力においても側面部よりも中心部の方が速く昇温している、

100W 加熱では、中心部はなめらかな曲線を描いている昇温し、側面部は直線的に昇温している。一方、600W 加熱では、両測定部分とも直線的に昇温し、加熱時間が短いにも関わらず勾配が非常に大きい。また、両出力の中心部の最終到達温度はほぼ同等値であるが、側面部の温度差は両出力間で約 20°Cであり、加熱終了後の 600W加熱は湯気が出ているにも関わらず、サツマイモ特有の甘い香りではなく土臭さが残っていた。

Table 3-2 では、生および両出力の加熱終了後・さらに比較としてオープン加熱で調理した焼き芋の断面写真および外観評価を示した。この際、焼き芋はヘルシオ（SHARP（Tokyo, Japan） AX-HC1-R）の自動調理メニュー（雰囲気温度 250℃，1800 s）にて調理した。

Table 3-2 加熱試料別観察結果

加熱試料	感触	色	断面
未加熱（生）	粉っぽい （ざらざらしている）。 硬い。粘性は無い。	クリーム色	
100W	粉っぽさは全く無く、 粘性がある。やわらかい。 焼き芋程甘くはないが、土臭さもな 柔らかいため、食せた	真黄色	
600W	粉っぽい。粘性は無い。 硬く、土臭さも残り食せない。	クリーム色。 部分によっては 黄色	
焼き芋	粘性があり、内部はやわらかい。 側面部は皮があるため硬い。 市販の焼き芋と同様に 甘くおいしく食せる。	中心部は真黄色。 側面部は白色	

焼き芋のように、側面から中心部にかけて徐々に伝導伝熱加熱様式による調理が、最もサツマイモの糖度を引き出すことができるといわれている。

3-3. 糖度測定

Fig.3-5 を特定の温度帯で区切り，その温度帯に伴った加熱時間の糖度を測定した。

3-3-1. 測定温度帯

Fig.3-5 を GT・ST に基づいて，側面部と中心部がそれぞれ常温～40℃，40～60℃，60～80℃，80℃以上となるような加熱時間を抽出し (Fig.3-5'，Table 3-3)，特定の加熱時間終了後，各温度測定部位(Fig.3-4 参照)の周辺約 3mm(r=3mm)高さ 5 mm を採取した。

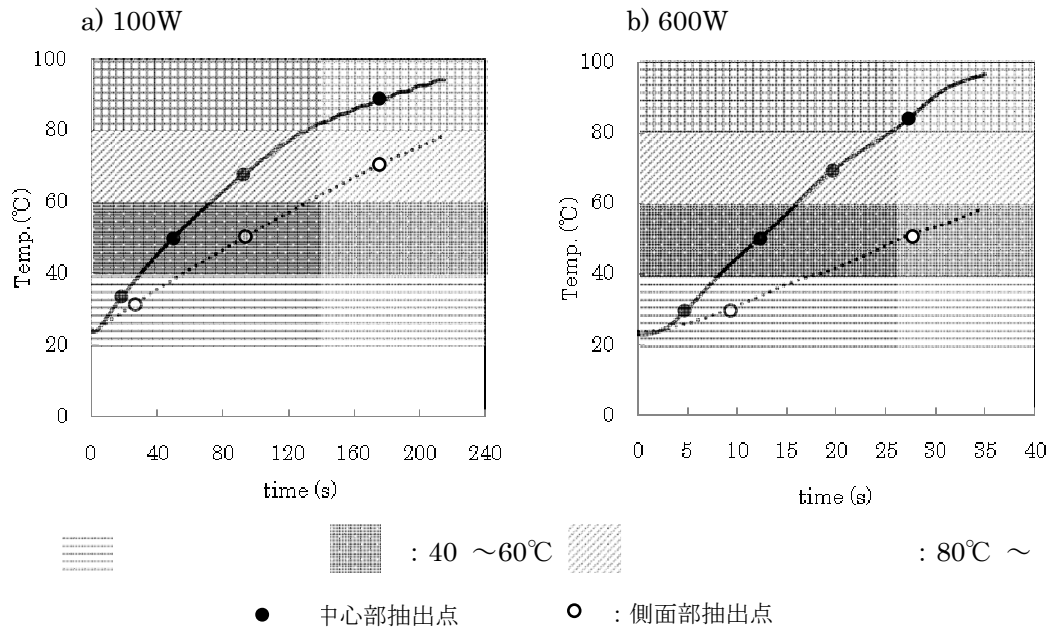


Fig.3-5' GT・ST に基づいた履歴温度履歴の温度帯別加熱時間

Table 3-3 温度帯別加熱時間

出力	測定部位	温度帯				加熱終了後 到達温度(°C)
		常温～40℃	40～60℃	60～80℃	80℃～	
100W	中心部(r=0cm)	20	50	100	180	94.0
	側面部(r=1.5cm)	30	100	180	—	78.0
600W	中心部(r=0cm)	5	13	20	27	95.0
	側面部(r=1.5cm)	10	27	—	—	59.0

3-3-2. 測定方法

測定は、抽出液を作製し、高速液体クロマトグラフィー（High Performance Liquid Chromatography：HPLC）を用いた。

3-3-2-1. 抽出液調製法

3-1. と同様のサンプル形状で、3-3-1. で温度帯別の加熱時間に基づいて加熱処理をし、直ちにレンジ内からサンプルを取り出して氷水で冷却することにより、反応を停止した。その後、Fig.3-6 の方法で抽出液を調整した。ここで用いた 0.01 M 水酸化ナトリウム水溶液は、水酸化ナトリウム（和光純薬）0.4 g を蒸留水で溶解し、1 L にメスアップして調整した。

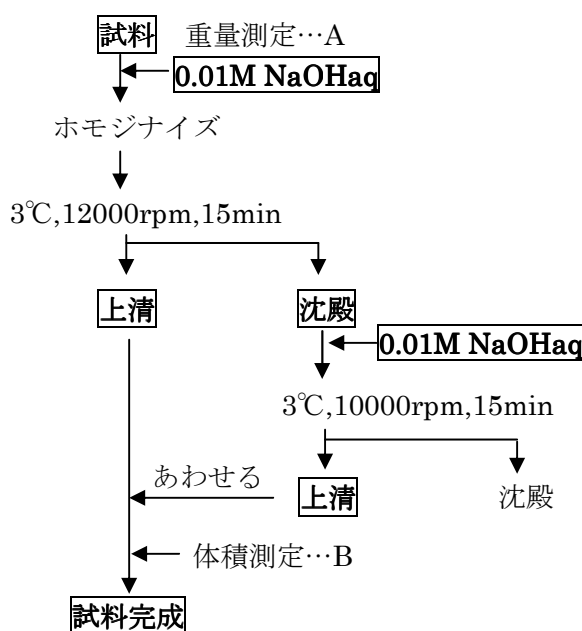


Fig.3-6 抽出液調製方法

3-3-2-2. HPLC システム

島津製作所（Kyoto, Japan）の HPLC システムを用いた。

ポンプ LC-6A，RI 検出器 D-6A，クロマトパック C-R4A，カラムオーブン CTO-6A を用いた。順相カラムは、BIORAD Aminex HPX87H（300 mm× 7.8 mm）を使用した。カラムオーブン内の温度設定は 40°C，バッファーは蒸留水を用い，流量は 0.6 mL / min，サンプル（抽出液）注入量は 20 μL とした。

3-3-3. 検量線

抽出液を調製し、HPLC 分析において糖度測定をした後、数値として表す際には検量線が必要となる。バッファーは蒸留水であり自ら調整した試料ではないため、保存上での成分変化等はないと考える。よって、全ての糖度計算過程において、個々で得た検量線の値を用いることとする。

3-3-3-1. サンプル調製

市販のマルトース（東京化成）を用いて、0・20・40・50・70 $\mu\text{g}/\text{mL}$ のマルトース溶液を調整した。マルトースは、長時間放置しておくとう分解してしまうため、調整後は直ちに、前述した条件で HPLC 分析した。

3-3-3-2. 結果

得られた検量線を Fig.3-7 に示す。統計学的に直線であるといえるため、Fig.3-7 を検量線として Eq.(1)の値を計算に用いる。

$$y = 82.165 x \quad \dots \dots \text{Eq.(3-1)}$$

※ $R^2=0.987$

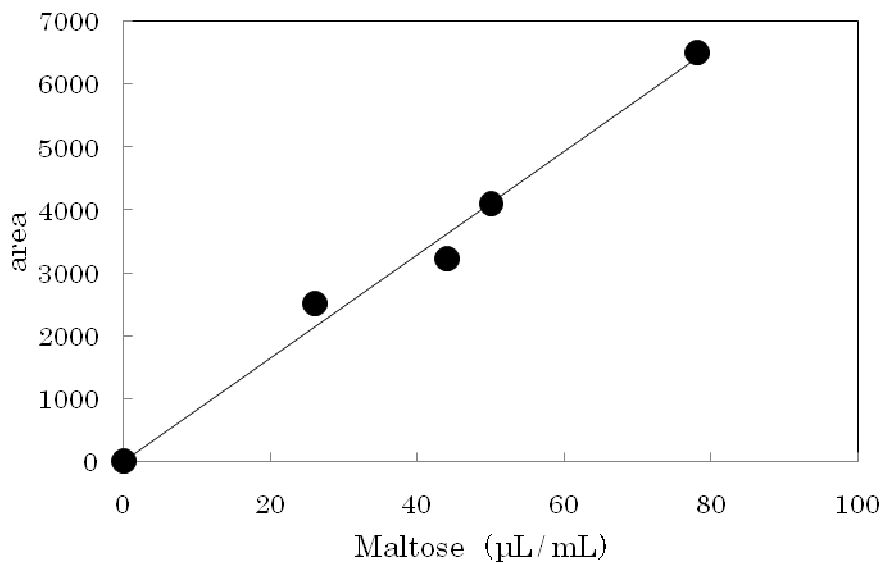


Fig.3-7 検量線

3-3-4. 糖度計算方法

本章の全ての糖度は、含水率、乾物量、および HPLC 分析したサンプル注入量 (20 μ L あたり) の糖度によって求めた。

3-3-4-1. 含水率

Eq.(3-2)より求めた。

秤量皿の空重量を W_0 (g), 検体を入れた際の重量 W_1 (g), 100°C恒温槽で 24 時間放置後の重量を W_{2N} (g) とする。

$$\text{含水率(wet\%)} = \frac{W_1 - W_{2N}}{W_1 - W_0} \times 100 \quad \dots \dots \dots \text{Eq.(3-2)}$$

3-3-4-2. 乾物量

採取から調製した抽出液中の乾物量を Eq.(3-3)より求めた。

採取した重量 A (g), 最終体積 B (mL), 含水率 C (%) とする。

$$\text{乾物量 } X(\mu\text{g dry / mL}) = A \times \frac{100 - C}{100} \times \frac{1}{B} \times 10^6 \quad \dots \dots \dots \text{Eq.(3-3)}$$

3-3-4-3. HPLC 分析より求めた糖度

3-3-3-2より求めた検量線の勾配を用いて、抽出液中の糖度を Eq.(3-4)により求めた。HPLC 分析によって求めたエリア値 D (-) とする。

$$\text{糖度 } E(\mu\text{g maltose / mL}) = \frac{D}{82.165} \quad \dots \dots \dots \text{Eq.(3-4)}$$

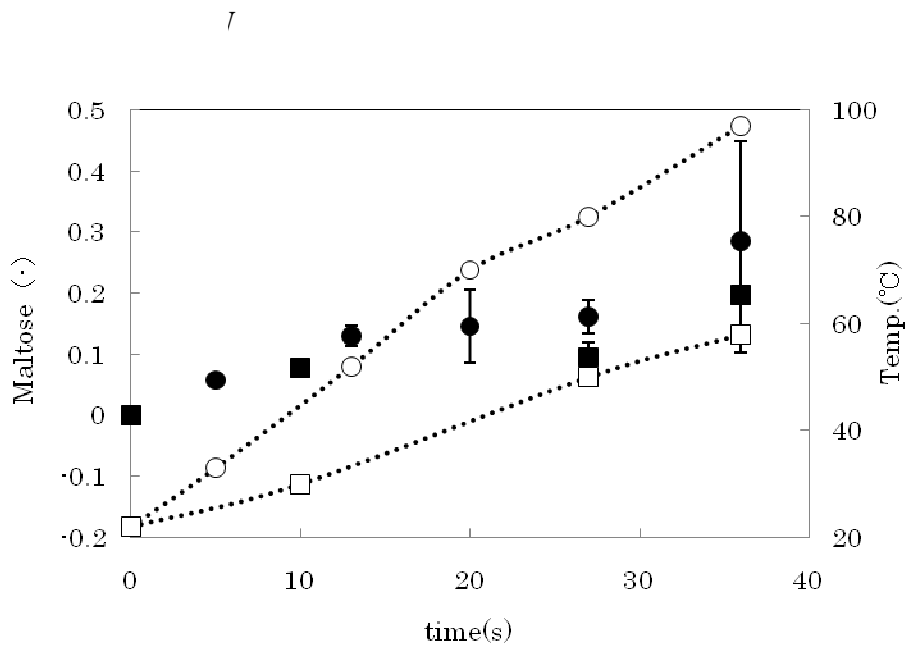
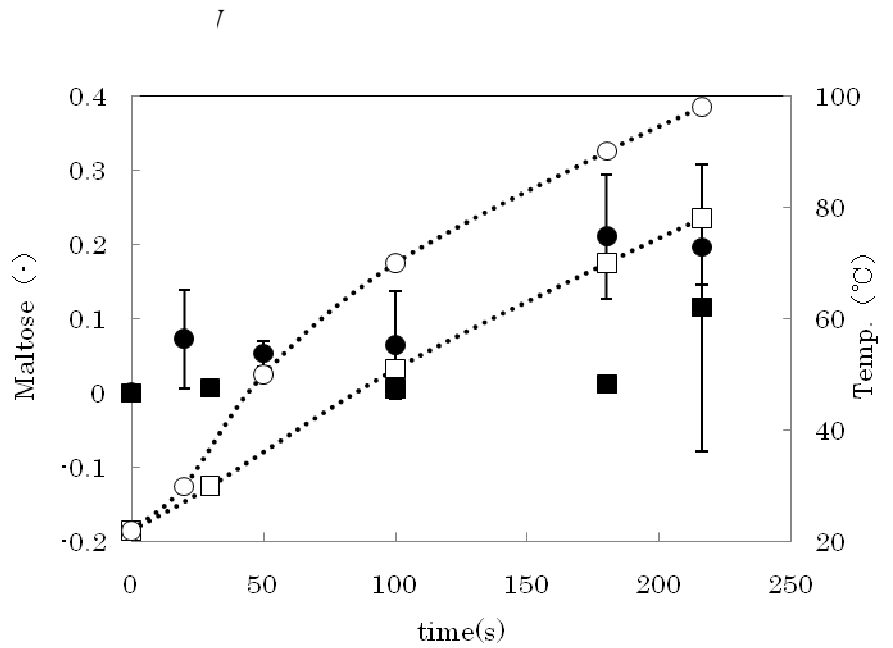
3-3-4-4. サンプル糖度

Eq.(3-2)~Eq.(3-4)より、乾物量に対する糖度の割合を算出した。この際、単位は(μ g maltose / μ g dry solid)となり、無次元化として示すことができる。

$$\text{糖度 } M(-) = \frac{E}{X} \quad \dots \dots \dots \text{Eq.(3-5)}$$

3-3-5. 結果および考察

測定結果を温度履歴と合わせて Fig.3-8 に示す.



● 中心部糖度 ●○● 中心部温度 ■ 側面部糖度 ●□● 部温度

Fig.3-8 温度帯に伴った糖度測定結果

比較のために、オーブン加熱（雰囲気温度 250°C, 1800 秒）および過熱水蒸気加熱（雰囲気温度 250°C, 1800 秒）における自動メニューでの焼き芋の糖度は、両者共に 0.25(-)であった。また、Sawai ら¹⁰⁾によると、赤外線ヒータで 40 分加熱した際の中心部および側面部の糖度は、0.3(-)および 0.25(-)であり、別の文献値¹²⁴⁾での生サツマイモは 0.02(-)であったため、測定法や算出法としては妥当性が示された。

100W 加熱では、中心部の 20~40°C の温度帯と側面部の生の糖度を誤差として考えると、中心部の場合、温度帯ごとに徐々に糖度が高くなっていることが分かる。一方、側面部は、60~80°C の温度帯まで糖度が非常に低い状態であるにも関わらず、加熱終了後には中心部とほぼ同じ値を示している。これは、加熱開始 180~216 秒に相当する。中心部の場合、温度がゆっくりと上昇するとともに、糖度もゆっくりと上昇している。この原因としては、GT・ST に相当する 60~80°C の滞在時間が約 80 秒間あり、この時間内で糊化と糖化が並行して十分に行われたと考えられる。また、側面部に関しては、この温度帯の滞在時間が後半の約 45 秒であり、急激に糖度が上昇したのはこのためであると考えられる。つまり、GT・ST の滞在時間が約 45 秒程度あれば、糖度の上昇はある程度期待できると考えられる。

一方、600W 加熱では、前述した滞在時間は加熱開始から 20 秒から 27 秒の約 7 秒間であり、100W 加熱と比べて約 1/4 である。中心部の糖度も、値としては 100W 加熱と同等値を示しているが、Table.3-2 の断面図の状態から判断すると生と匂いの見た目もよく似ており、食せなかった。しかし、100W 加熱の中心部より温度が 100°C 近くまで上昇しており、80~100°C 間に滞在している加熱開始 27 秒から 36 秒の約 9 秒間で糖度が急激に上昇していることが分かる。これは、滞在時間約 7 秒間で糊化し、80~100°C 間で糖化した可能性があるとも考えられる。その一方、他の原因としては、不溶性の β -アミラーゼの存在である。この β -アミラーゼ活性の至適温度は、70~80 °C 以降であるといわれている¹⁰⁾。しかし、この不溶型 β -アミラーゼの分析は困難であるため、本研究では追究しない。また、側面部に関しては、前述した温度帯の滞在時間はないのにも関わらず、糖度は約 0.2(-)にまで上昇していることが分かる。

文献¹²⁴⁾によると、60°C で 90 分、70°C で 90 分蒸したサツマイモの糖度は 0.094(-)、0.16(-)であった。第 2 章での生サツマイモの糊化特性より、前述した 60、70°C での糖度の上昇は期待できない。よって、この文献値での糖度は、食した場合甘味が感じない値であると考えられる。よって、サツマイモの糖度は約 0.2(-)から甘味が感じられると考えられる。

しかし、現段階の結果では、100W 加熱と 600W 加熱で糖度が 0.2(-)以上となり、同等値であるにも関わらず、600W 加熱時のサツマイモを食せないという結果が得られた。この結果に関しては説明中である。

3-4. 第 3 章の結論

両出力とも加熱終了後の糖度は、オーブンおよび SHS で調理された焼き芋の値と同程度の糖度が得られ、文献値と実測値から、甘味を感じる糖度は約 0.2(-)以上であることが分かった。本結果より、両出力間での糖度の顕著な差は見られなかった。しかし、糊化温度に到達していない 600W 側面に関しても、糖度は焼き芋程度まで達している。この原因に関して

は不明だが、ここで得られた結果は、エラーバーの値が大きいため、今後データを増やすことでエラーバーを小さくし両出力間での糖度の上昇を再検討する。

第4章 糊化温度 GT および糖化温度 ST の滞在時間の重要性の検証

前章より,どの加熱調理においても,糊化温度 $GT=65.8\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,糖化温度 $ST=60\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ の滞在および滞在時間が重要であると考えられ,これを満たしてさえいれば,マイクロ波加熱でも十分な糖度上昇が期待できるといえる. よって,本章では,一次元平板モデルによって GT および ST の滞在時間の重要性の検証を目的とした.

4-1. 糊化度測定

GT・STに基づいた一定温度で一定時間放置したサツマイモの糊化度を測定した.

4-1-1. 実験方法

測定は第2章と同様,サンプルを作製後,DSCを用いて行った.

4-1-1-1. サンプル作製

サツマイモは前章までと同様千葉県産紅あずまを用い,水洗いせずに皮を除去した後,おろし金を用いてペースト状にした. このペーストをパウチ状容器(5×10 cm)に菓さじ1杯程度入れ,小型真空包装機(古川製作所製 EVC II型)でシールし,平板状にした.

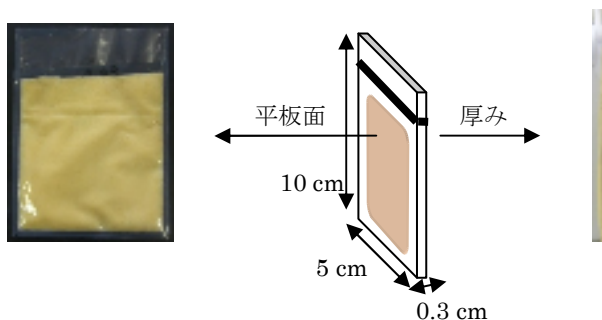


Fig.4-1 パウチ状容器およびサンプル形状

4-1-1-2. DSC システム, 糊化度計算方法

2-1-1-2. および 2-1-1-3. と同様の方法を用いた.

4-1-2. 一定温度下での糊化度

第2章で算出した生サツマイモ澱粉の糊化温度 $76^{\circ}\text{C}(\pm 2.3^{\circ}\text{C})$ 、糊化終了温度 $81^{\circ}\text{C}(\pm 1.9^{\circ}\text{C})$ を基に、一定温度における糊化度の測定を行った。

4-1-2-1. 実験方法

サンプルを一定温度 (65, 75, 80, 85 $^{\circ}\text{C}$) に設定した恒温水槽に一定時間 (0,0.2(10s),0.3(20s),0.5(30s),1,3,5,15,30,60 min) 放置後、直ちに氷水で 5min 急冷した。その後、DSC を用いて糊化度を測定した。DSC 測定後は、パンに針で穴をあけ 105 $^{\circ}\text{C}$ 恒温槽で 24h 放置し、重量を測定した。

4-1-2-2. 結果および考察

各温度における糊化度は Table 4-1 および Fig.4-2 のようになった。

Table 4-1 各温度における糊化度測定結果

Heating time(min)	Gelatinization ratio(-)			
	65 $^{\circ}\text{C}$	75 $^{\circ}\text{C}$	80 $^{\circ}\text{C}$	85 $^{\circ}\text{C}$
0	0	0	0	0
0.2	-	-	-	0.59
0.3	-	-	-	1
0.5	-	-	-	1
1	-	0.10	0.18	1
5	0.12	-	-	1
15	-	-	-	1
30	-	0.40	1	1
60	0.46	0.75	1	1

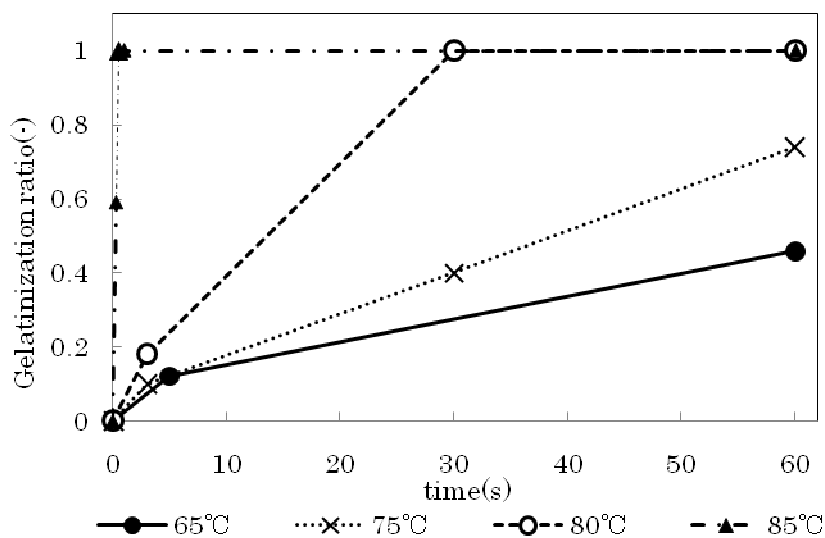



Fig.4-2 各温度における糊化度の経時変化

糊化温度帯以下の温度帯での測定結果にはばらつきが大きく、生の状態から加熱した際、熱量は 4.1 J/g であったが（第 2 章参照）、この値よりも小さくなってしまい糊化度を算出すると負の値となってしまった。よって、Table 4-1 および Fig. 4-2 には、抜粋した値を示した。この現象が起きる理由としては、糊化温度帯以下で定温加熱処理を主なうことで、細胞壁の主成分であるペクチンを破壊しやすい状態にし、糊化温度帯にまで上昇させた時に糊化しやすい環境を作り上げているのではないかと考えられる。よって、恒温槽で加熱した後に DSC 測定を行うのではなく、別の方法として、一定温度加熱も DSC 内で行うような測定条件に変更して測定した（Fig. 4-3、 内の温度：4-1-2-1.同様）。

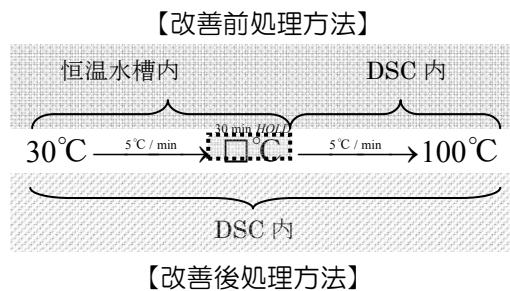


Fig. 4-3 改善前後処理方法の装置内昇温方法

しかし、この方法を用いても、同じようにばらつきが生じてしまった。再度検証が必要であるが、本研究では、Table 4-1 および Fig. 4-2 の値を用いて以後検証を進めた。

結果より、それぞれの温度間には糊化進行速度に違いがあることが明確となった。つまり、糊化温度帯以下では長時間放置しても糊化度が 1 になることはないと考えられ、その温度における糊化度の限界（平衡）値が存在すると考えられる。

4-1-3. 生サツマイモ澱粉の終末糊化度の算出

4-1-3. での結果における 60min 加熱終了の段階で、得られた糊化度を各温度における糊化度とし、終末糊化度 (the terminal extent of gelatinization : TEG) ^[25] と定義した。

各温度における TEG を合わせ、Fig.4-4 に示す。この際、Fig.2-1 での顕微鏡の観察結果より 40・50℃の糊化度を 0 として、併せて示した。

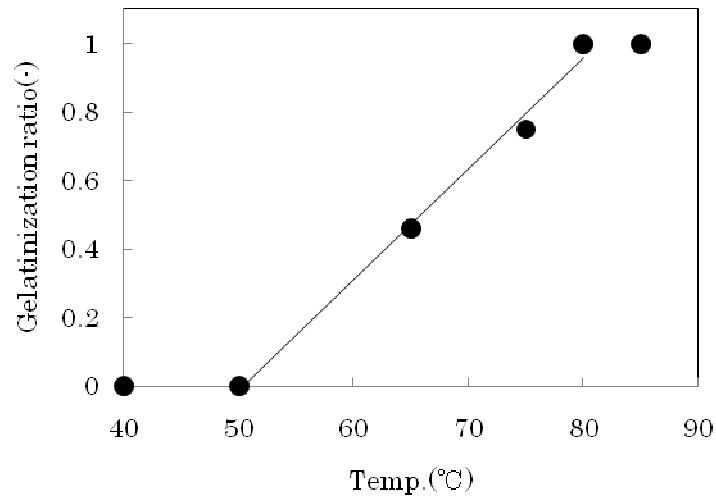


Fig.4-4 TEG 算出結果

TEG 直線を作成する際の対象温度は、50℃～80℃間とし、 $T > 50^\circ\text{C} =$ 糊化度 0 および $80^\circ\text{C} < T =$ 糊化度 1 とした。よって、得られた直線は、Eq.(4-1)となった。

$$y = 0.0323x - 1.63 \quad \dots \dots \text{Eq.(4-1)}$$

※ $R^2 = 0.992$

4-2. 糖度測定

4-1. の糊化度を測定したサンプルの糖度測定を行った.

4-2-1. 測定方法

3-3-2. とほぼ同様であるが, 恒温水槽の設定温度は糊化温度帯付近の 75, 80, 85°C とした. この温度帯で, 4-1-2-1. と同様の加熱時間で加熱し, 直ちに氷水で 5min 急冷した. その後, 抽出液調製し HPLC で測定した.

4-2-2. 糖度算出方法

3-3-4. と同様の方法を用いた.

4-2-3. 結果および考察

得られた結果を, Table 4-2 および Fig.4-5 に示す.

Table 4-2 各温度における糖度測定結果

Heating time(min)	Maltose(-)					
	75°C	SD(-)	80°C	SD(-)	85°C	SD(-)
0	0.007	0.0026	0.007	0.0009	0.009	0
0.2	-	-	-	-	0.031	0.0028
0.3	-	-	-	-	0.130	0.0042
0.5	0.015	0.0206	0.153	0.0008	0.163	0.0116
1	0.036	0.0207	0.207	0.0019	0.181	0.0247
3	0.082	0.0449	0.249	0.0101	0.127	0.0087
5	0.110	0.0112	0.277	0.0032	0.162	0.0393
15	0.123	0.0052	0.291	0.0013	0.108	0.0024
30	0.134	0.0008	0.241	0.0069	0.098	0.0046
60	0.146	0.0002	0.308	0.0094	0.128	0

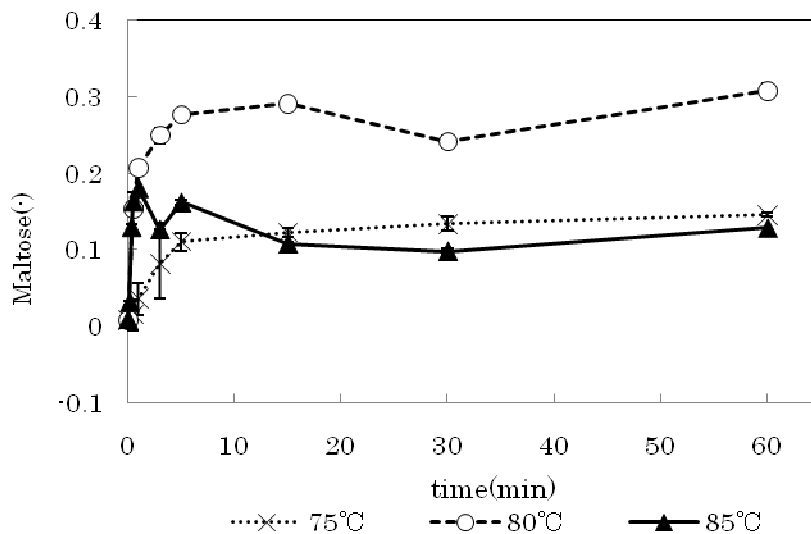


Fig.4-5 各温度における糖度の経時変化

4-1. で得た糊化度と合わせて比較すると、糊化温度帯付近である 75℃では、他 2 つの温度帯よりも低く、糖度は加熱開始 5min で示した 0.1 でほぼ一定となっている。Table 4-1 より 5min での糊化度は $0.10 < X_g < 0.40$ と予測できる。しかし、TEG は 0.75 にまで到達するため、5 min 以降の糖度の上昇も期待できるはずである。さらに、85℃では加熱開始 0.3min(20s)で糊化度 1 に到達しているにも関わらず、1 min の糖度をピークに減少し、3 min では 75℃と同様、ほぼ一定値を示している。一方、80℃では糊化の進行は前述した両温度帯の中間の速度をとり、糖度は加熱終了時まで上昇し続ける。また、糖度は焼き芋と同程度の値となったため、十分甘いと評価できる値であることが分かる。

このように、糊化が進行しているにも関わらず、糖度の上昇がさほど見られなかった原因として考えられるのは、糖化反応に関わる“ β -アミラーゼ”が関与していると考えられる。通常の酵素は、60℃付近に至適温度をもつといわれるが、サツマイモには 2 つのアイソザイムの β -アミラーゼが存在しているといわれており⁵⁾、55℃付近に至適温度を持つ水溶性酵素と、75℃付近に至適温度を持つ不溶性酵素とがある。前者は 65℃で失活するに対し、後者の酵素は、耐熱性が強く、85℃まで糖度が上昇する。よって、サツマイモの調理の際には後者の作用が大きく関与するといわれている。

小倉らは不溶性酵素が作用することにより、70℃以上では糖度の上昇が期待できると示しているが、本実験では 75℃の糖度上昇は見られなかった。しかし、不溶性酵素の存在を考慮して本実験の考察をすると、本研究で用いているサツマイモの不溶性酵素は、80℃を至適温度とし、85℃付近が失活温度であると予測できる。つまり、85℃の加熱開始 1min までは糖度が上昇傾向にあったにも関わらず、そこをピークに糖度が減少および一定値を示した原因としては、この酵素の失活が影響していると考えられる。

4-2-4. 結論

サツマイモの糖度を最も上昇させるためには、80℃以下で十分糊化させた後に 80℃付近を維持して加熱することが有効的であるといえる。この際、85℃まで温度を上げてしまうと約 1min で、酵素が失活してしまいそれ以上の糖度上昇が期待できない。

4-3. 第 4 章の結論

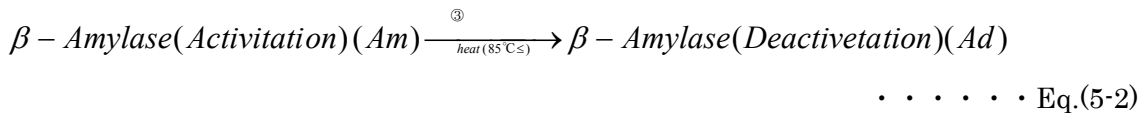
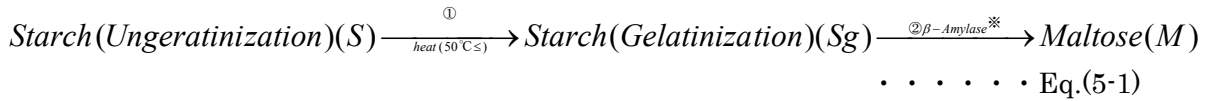
結果より、糊化温度帯以下で長時間加熱しても糊化度 1 を示すことはなく、各温度帯での終末糊化度 TEG が存在することが分かった。TEG は、直線式で示すことができた。さらに、糊化度と同様の条件で糖度の測定を行ったところ、不溶性酵素の作用が最大であると考えられる 80℃の糖度が最も高かった。

よって、サツマイモの糖度を上昇させるには、80℃を長時間維持することが最も有効であると考えられる。また、この温度帯を維持すれば、加熱方式に関係なく高い糖度を得ることが可能であると考えられる。

第5章 糊化・糖化および酵素失活を考慮した数学モデルの構築

これまでの第2, 3章において, サツマイモ本来の甘さを得るためには, 加熱様式に関係なく 80°C付近の GT・ST 温度帯を維持することが重要であることが分かった. 逆に, この温度帯の滞在時間が短ければ故意的に低い糖度を得ることが可能となる.

サツマイモの糖化反応は以下の過程を経て進行している.



よって, サツマイモ内で起きる反応は, ①糊化反応, ②糖化反応, ③失活の3つの反応に着目し, それぞれの反応における反応速度式を微分方程式により求めていき, 使用言語としては微分方程式を解くのに適している FORTRAN を用いて計算した.

5-1. 反応速度式基本プログラム

ここでは, 基本プログラムの作成を目的としているため, 第一段階として, すべての反応を最も簡易的な一次反応と仮定した.

5-1-1. 反応速度式の設定

5-1-1-1. 糊化反応

五味ら^[26]の研究により, 温度一定のときの糊化反応速度は次式で表される.

$$\frac{dX}{dt} = -kX \quad \dots \dots \dots \text{Eq.(5-3)}$$

ここで, X はその温度と水分における TEG に対する糊化していない澱粉割合である. 澱粉濃度を以下のように表すと, Eq.(5-3)は Eq.(5-4)となる.

C_S : 未糊化澱粉濃度 [g/g-solid], C_{Sg} : 糊化澱粉濃度 [g/g-solid],
 C_{ST} : 終末糊化澱粉濃度 [g/g-solid]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{C_{ST} - C_{Sg}}{C_{ST}} \right) = -k_g \left(\frac{C_{ST} - C_{Sg}}{C_{ST}} \right) \quad \dots \dots \dots \text{Eq.(5-4)}$$

C_{ST} は極短い時間では一定(偽定常)と仮定すると

$$\frac{dC_{Sg}}{dt} = -\frac{dC_S}{dt} = k_g (C_{ST} - C_{Sg}) \quad \dots \dots \dots \text{Eq.(5-5)}$$

ここで, k_g は糊化の速度定数で, アレニウスの式により表されるとする.

$$k_g = k_{g0} \exp\left(-\frac{E_g}{RT}\right) \quad \dots \dots \dots \text{Eq.(5-5)}$$

また, 最終糊化率 (TEG) は

$$TEG = \frac{C_{ST}}{C_{Sg}} \quad \dots \dots \dots \text{Eq. (5-6)}$$

5-1-1-2. TEG について

糊化澱粉が糖化によって消費される場合、最終糊化率が、最終的に糊化する澱粉の割合なのか、未糊化澱粉の割合と考えるかによって取り扱いが異なる。前者の場合 (Eq.(5-5)) は、糊化後、糖化反応によって糊化澱粉が消費されつつ再度糊化反応によって補給される。しかし、後者の場合は補給されない。水分と温度によって糊化しない量が決まるとすると、糊化速度式は以下のように表される。

$$\frac{dX}{dt} = -kX \quad \dots \dots \dots \text{Eq. (5-3)}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{C_{ST} - (C_{Sg} - C_S)}{C_{ST}} \right) = -k_g \left(\frac{C_{ST} - (C_{Sg} - C_S)}{C_{ST}} \right) \quad \dots \dots \dots \text{Eq. (5-4)}$$

C_{ST} は極短い時間では一定 (偽定常) と仮定すると

$$-\frac{dC_S}{dt} = \frac{dC_{Sg}}{dt} = k_g (C_{ST} - (C_{Sg} - C_S)) \quad \dots \dots \dots \text{Eq. (5-5)}$$

5-1-1-3. 糖化反応

糖化速度は次式で表されるとする。

$$\frac{dC_M}{dt} = -\frac{dC_{Sg}}{dt} = A_E C_{Sg} \quad \dots \dots \dots \text{Eq. (5-7)}$$

ここで、 A_E は酵素活性を表し、次式で表されるとする。

$$A_E = k_E C_{Am} \quad \dots \dots \dots \text{Eq. (5-8)}$$

また、 C_{Am} は活性酵素濃度 [g/g-solid] で、次式により減少すると仮定する。

$$\frac{dC_{Am}}{dt} = -k_D C_{Am} \quad \dots \dots \dots \text{Eq. (5-9)}$$

5-1-1-4. 各濃度変化

未糊化澱粉, 糊化澱粉, マルトース, 酵素の濃度を示すと以下のようなになる.

$$C_S : -\frac{dC_S}{dt} = k_g (C_{ST} - (C_{S0} - C_S))$$

$$C_{Sg} : \frac{dC_{Sg}}{dt} = k_g (C_{ST} - (C_{S0} - C_S)) - k_E C_{Am} C_{Sg}$$

$$C_M : \frac{dC_M}{dt} = k_E C_{Am} C_{Sg}$$

$$C_{Am} : \frac{dC_{Am}}{dt} = -k_D C_{Am}$$

無次元化 $X_S = \frac{C_S}{C_{S0}}$, $X_{Sg} = \frac{C_{Sg}}{C_{S0}}$, $X_M = \frac{C_M}{C_{S0}}$, $X_{Am} = \frac{C_{Am}}{C_{Am0}}$ とおくと

$$X_S : -\frac{dX_S}{dt} = k_g (T_{EG} - (1 - X_S))$$

$$\begin{aligned} X_{Sg} : \frac{dX_{Sg}}{dt} &= k_g (T_{EG} - (1 - X_S)) - k_E C_{Am0} X_{Am} X_{Sg} \\ &= k_g (T_{EG} - (1 - X_S)) - (k_E C_{Am0}) X_{Am} X_{Sg} \\ &= k_g (T_{EG} - (1 - X_S)) - k'_E X_{Am} X_{Sg} \end{aligned}$$

$$X_M : \frac{dX_M}{dt} = k'_E X_{Am} X_{Sg}$$

$$X_{Am} : \frac{dX_{Am}}{dt} = -k_D X_{Am}$$

5-1-2. 反応速度式の決定

全ての反応速度式を示すと以下のようになる.

5-1-2-1. 糊化反応

・未糊化率

$$\frac{d[X_s]}{dt} = -k_s (TEG - (1.0 - [X_s])) \quad \dots \dots \text{Eq.(5-11)}$$

・糊化率

$$\frac{d[X_{sg}]}{dt} = k_s (TEG - (1.0 - [X]) - [M]) \quad \dots \dots \text{Eq.(5-12)}$$

5-1-2-2. 糖化反応

$$\frac{d[X_M]}{dt} = -\frac{d[X_{sg}]}{dt} = k_E [X_{sg}] \quad \dots \dots \text{Eq.(5-13)}$$

5-1-2-3. 酵素失活

$$\frac{d[E]}{dt} = -k_E \bullet [E] \quad \dots \dots \text{Eq.(5-14)}$$

5-1-3. 計算に必要な速度定数

計算を行う際、それぞれの反応速度定数が必要となる。

5-1-3-1. 糊化速度

頻度因子 k_0 および活性化エネルギー E は、Pravisani ら [27] の値を使用する。

$$Ea = 2.35 \cdot 10^5 (J/mol), k_{s0} = 3.7 \cdot 10^{35} (s^{-1})$$

5-1-3-2. TEG

水分一定として、実測値 Eq.(9) を用い、温度の関数とした。

$$TEG = 0.0323x - 1.63 \quad (50 \leq T \leq 80) \quad \dots \dots \dots \text{Eq.(5-10)}$$

5-1-3-3. 糖化速度

糖化速度の速度定数は、文献値がなく自ら値を予測し、算出した。

$$Ea = 50.0 \text{ kcal/mol} = 209 \text{ kJ/mol}$$

$X_{A_m} = 1$ として

$$\frac{dX_M}{dt} = -\frac{dX_{sg}}{dt} = k'_E X_{sg} \rightarrow X_{sg} = \exp(-k'_E t)$$

例として、75°C, 1800s で 1/e になるとすると

$$\frac{1}{1800} = k_{E0} \exp\left(-\frac{209000}{8.314T}\right) \rightarrow k_{E0} = 1.2 \times 10^{28}$$

よって、 $Ea = 209 \text{ kJ/mol}$, $k_{E0} = 1.2 \times 10^{28}$

5-1-3-4. 失活速度

失活速度の速度定数も、文献値がなく糖化速度定数と同様の方法で用いた。

$$Ea = 100.0 \text{ kcal/mol} = 418 \text{ kJ/mol}$$

例として、90°C, 300s で 1/e になるとすると

$$\frac{1}{300} = k_{d0} \exp\left(-\frac{418000}{8.314T}\right) \rightarrow k_{d0} = 4.7 \times 10^{57}$$

10^{57} は FORTRAN では取り扱えないので、対数表記とする。

$$k_d = k_{d0} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \rightarrow \ln k_d = \ln k_{d0} - \frac{E}{RT} \rightarrow \ln(k_{d0}) = 133.8$$

よって、 $Ea = 418 \text{ kJ/mol}$, $\ln(k_{d0}) = 133.8$

5-2. 基本プログラムの改正

5-1. による基本プログラムでは、すべての反応を一次反応として考えていた。一次反応の反応式は、



と表される。反応速度は反応物質の濃度に比例するため、

$$v = -\frac{d[A]}{dt} = k[A] \quad \dots \dots \text{Eq.(5-15)}$$

と書かれる。つまり、未糊化澱粉量の増減が、糊化澱粉の生成量にも直接影響するという考え方である。糊化反応においては、五味ら [26] によって、糊化反応は一次反応と仮定できると分かっている。また、酵素失活についても殆どの文献において、酵素の失活を一次反応としている。しかし、糖化反応に関しては、酵素の失活（濃度）が関与するため、一次反応と仮定するのは妥当でない。よって、ここでは主に糖化反応に着目し、より生体物質での反応に近い式となるよう再検討する。

5-2-1. 工学的な視点からの変更

糖化反応は、酵素活性の有無に大きく左右される。そのため、糖化反応速度は酵素自体の反応速度を用いるべきであると考えられる。よって、4-1-2-3. を Sawai ら [9] の研究結果に基づいて変更した。Sawai ら [9] は具体的な視点から酵素の活性およびマルトースの生成量の研究を行い、マルトースの生成は Eq.(5-16) で算出できると考えている。

$$\frac{dM}{dt} = k(\gamma S - M_0) \quad \dots \dots \text{Eq.(5-16)}$$

M₀: マルトース初期濃度 [mg/mL]

k: β - アミラーゼ反応速度定数 [s⁻¹]

M: マルトース濃度 [mg/mL]

γ: 糊化澱粉のマルトース転化率 1.056

S: 糊化澱粉濃度 [mg/mL],

(molecular weight of maltose/ molecular

t: 時間 [s]

weight of two glucose in starch)

これらに本研究での物質を当てはめると、Eq.(5-17) と表せる。

$$\frac{dX_M}{dt} = k_{Am} \gamma X_{sg} = 1.056 \cdot k_{Am} \cdot k'_E (k_g (T_{EG} - (1 - X_s)) - k'_E X_{Am} X_{Sg}) \dots \dots \text{Eq.(5-17)}$$

$$k_{Am} = 1.14 \times 10^{35} (\leq 86^\circ\text{C}), -4.36 \times 10^{-66} (> 86^\circ\text{C}) (s^{-1})$$

$$E_{Am} = 255 (\leq 86^\circ\text{C}), -436 (> 86^\circ\text{C}) (kJ/mol)$$

K_{Am} および E_{Am} は、理論式ではなく経験式であるため、86°C 前後での速度定数や活性化エネルギーが異なってしまう。よって、本来の生物学的な評価において解析をするべきである。

5-2-2. 生物学的な視点での変更

5-2-1. において、工学的な視点での変更は経験式であるため、よりサツマイモ本来の反応に近づけるためには生物学的な視点での変更をするべきであると考えられる。よって、ここでは酵素反応に最も用いられる Michaelis-Menten の機構を用いる。酵素の反応速度は、本来一次反応式では表わさず、1 基質による 1 段階の反応の場合は、Eq.(5-18)で表す。



E : 酵素 S : 基質 ES : 酵素-基質複合体 P : 生成物

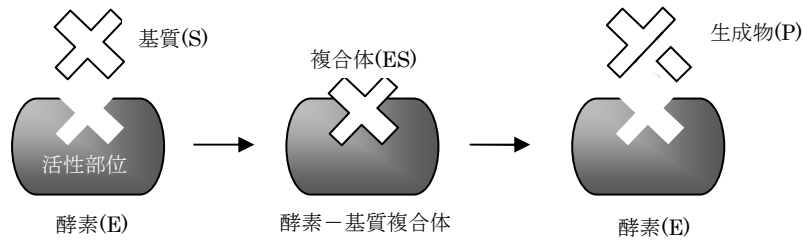


Fig.5-1 酵素反応の概念

酵素と基質の濃度が同程度の場合は、ES の濃度がほぼ一定になる定常状態はないが、基質濃度が酵素濃度に比べて十分に高い場合は、酵素と基質を混合する ES の濃度はゼロから増加して最大値に達し（長く見積もって 4 秒以内）、生成速度と分解速度がつりあって定常状態となる。

$$\begin{aligned} \frac{d[ES]}{dt} &= k_1 E \cdot S - k_{-1} [ES] - k_2 [ES] \approx 0 \quad \dots \dots \text{Eq.(5-19)} \\ v &= \frac{d[P]}{dt} = k_2 [ES] \end{aligned}$$

また、酵素の初濃度を E_0 とすると次式になる。

$$[E_0] = [E] + [ES] \quad \dots \dots \text{Eq.(5-20)}$$

これらの式から、Michaelis-Menten 式が得られる。

$$v = -\frac{dS}{dt} = \frac{k_2 E_0 S}{\frac{k_{-1} + k_2}{k_1} + S} = \frac{V_m S}{K_m + S} \quad \dots \dots \text{Eq.(5-21)}$$

ここで、 $V_m = k_2 E_0$ 、 $K_m = (k_{-1} + k_2) / k_1$ である。 V_m は最大反応速度で、 $S \rightarrow \infty$ と仮定すると、 $[ES] = E_0$ という極限状態になり、 $k_2 E_0$ に等しい速度で反応が進行することとなる。 K_m は Michaelis 定数である。本研究では、 $S =$ 糊化澱粉 X_{sg} 、 $E = \beta$ -アミラーゼ E 、 $P =$ マルトース M となる。

本来の Michaelis 式の用い方は $S \rightarrow \infty$ と仮定するが、本研究では、酵素の失活も考慮した式を用いるべきであるため、Eq.(5-21)において酵素失活を取り入れなければならない。

これらの改善点を踏まえ、糊化反応 Eq.(5-11)、(5-14)は一次反応式として引き続き用い、Eq.(5-12)を Eq.(5-22) に、Eq.(5-13) を Eq.(5-23)とした。

$$\frac{d[X_{sg}]}{dt} = k_s(TEG - (1.0 - [X_s]) - \frac{V_{max}[E][X_{sg}]}{Km + [X_{sg}]} \quad \dots \dots \text{Eq.(5-22)}$$

$$\frac{d[M]}{dt} = \frac{V_{max}[E][X_{sg}]}{Km + [X_{sg}]} \quad \dots \dots \text{Eq.(5-23)}$$

$$Km = 198.2((mg \cdot mL^{-1})^{-1}), V_{max} = 0.378(mg \text{ maltose} \cdot mL^{-1} \cdot sec^{-1}) \quad [28]$$

また、酵素失活は一次反応 Eq.(5-14)では、 $Ea = 4.36 \cdot 10^5 (J/mol)$, $k_{s0} = 1.45 \cdot 10^{66} (s^{-1})$ [9] とした。

5-2-3. 結果

5-2-2. で作成した式を新たにプログラムに代入し、昇温速度は $5^\circ\text{C}/\text{min}$ として $50 \sim 100^\circ\text{C}$ まで加熱した場合の変化を再計算した。

5-2-3-1. 割合の算出方法

以後の計算はサツマイモ乾物量を 1 とし、この乾物量 1 に対する割合とした算出している。その理由として、サツマイモは水以外の主成分はほぼデンプンであるといわれている。よって、生サツマイモの乾物量 1 はすべて澱粉と仮定する。これまでの糊化・糖化反応は全てこの系の中で起きているとし、質量保存の法則を用いた。よって、加熱前の状態は全て未糊化澱粉とし、これが加熱における TEG に伴って減少するため、Eq.(5-13)として算出している。さらに加熱に伴って糊化澱粉が増加し、糊化澱粉を基質としてマルトースが生成されることから、糊化澱粉は Eq.(5-14)で算出することができる。

$$C_s = 1 - TEG \quad \dots \dots \text{Eq.(5-13)}$$

$$\begin{aligned} C_{sg} &= 1 - (C_s - C_M) \\ &= 1 - C_M \end{aligned} \quad \dots \dots \text{Eq.(5-14)}$$

また、酵素に関しては、物質収支の法則を用いるのではなく、 V_m の適応が可能となる活性化状態を 1、失活状態を 0 として評価している。

5-2-3-2. 各物質濃度の計算

各物質濃度を計算させた. 完成したプログラムの計算結果を Table.5-1 および Fig.5-2 に示す。

Table 5-1 よるサツマイモ内部反応の予測結果

Temp.(°C)	Ungelatinization(-)	Gelatinization(-)	Maltose(-)	β-amylase activity(-)
50	1	0	0	1
55	0.99	0.01	0	1
60	0.87	0.13	0	1
65	0.61	0.38	0.02	1
70	0.4	0.55	0.04	1
75	0.23	0.69	0.08	1
80	0.06	0.81	0.12	1
85	0	0.83	0.17	1
90	0	0.83	0.17	0
95	0	0.83	0.17	0
100	0	0.83	0.17	0

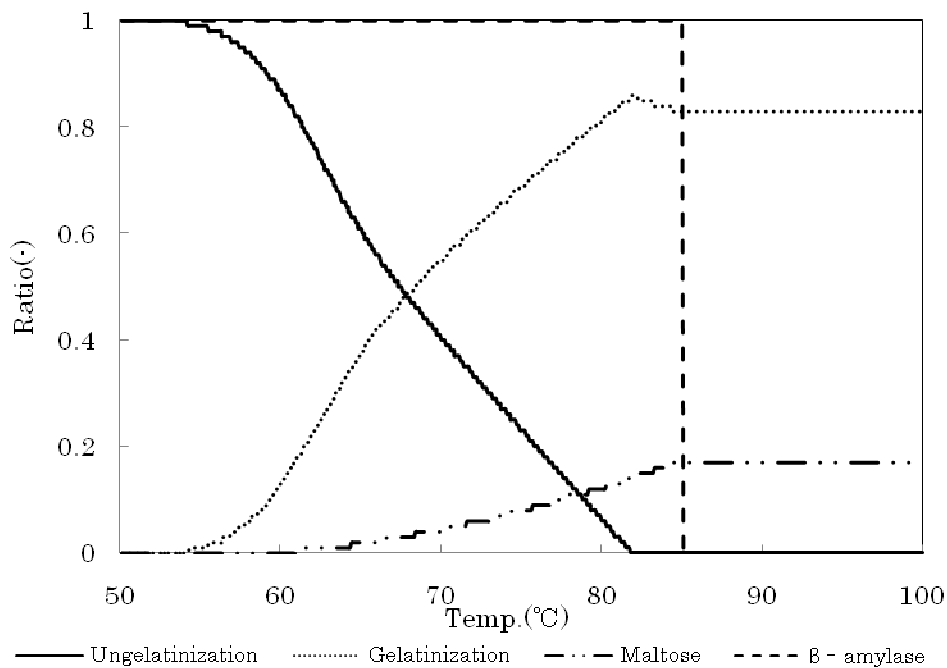


Fig. 5-2 FORTRAN よるサツマイモ内部反応の計算結果

結果より, 未糊化澱粉の糊化が開始することによって, 未糊化率が低下すると同時に糊化率が上昇し, さらには, 糊化澱粉が 80°C 付近で完全に糊化したにも関わらず, マルトースが生成されるため 1 に到達しないという, 質量保存の関係はうまく成り立たせることができた. また, 酵素の活性がある 85°C 付近までマルトースの生成は続き, 失活とともに反応は停止し, 失活温度以降の温度帯では全ての割合は一定値を示していることが分かる.

マルトース生成量 (糖度) は, 最終的に 0.17(-)と比較的低めの値を示した.

5-2-3-3. マルトース生成量（糖度）の妥当性の検証

本シミュレーションは、全反応物質の中でも、特に糖度の予測値の妥当性を得ることを目的としている。よって、ここでは糖度の実測値と予測値との妥当性を検証した。

5-2-3-2. において、糖度の最終到達値は、0.17 (-) 程度に留まってしまう。シミュレーション上では昇温速度 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ であり、所定の温度滞在時間に換算して、酵素失活温度 85°C までの実測値（4-2-3. 参照）と比較すると、Fig.5-3 のようになる。

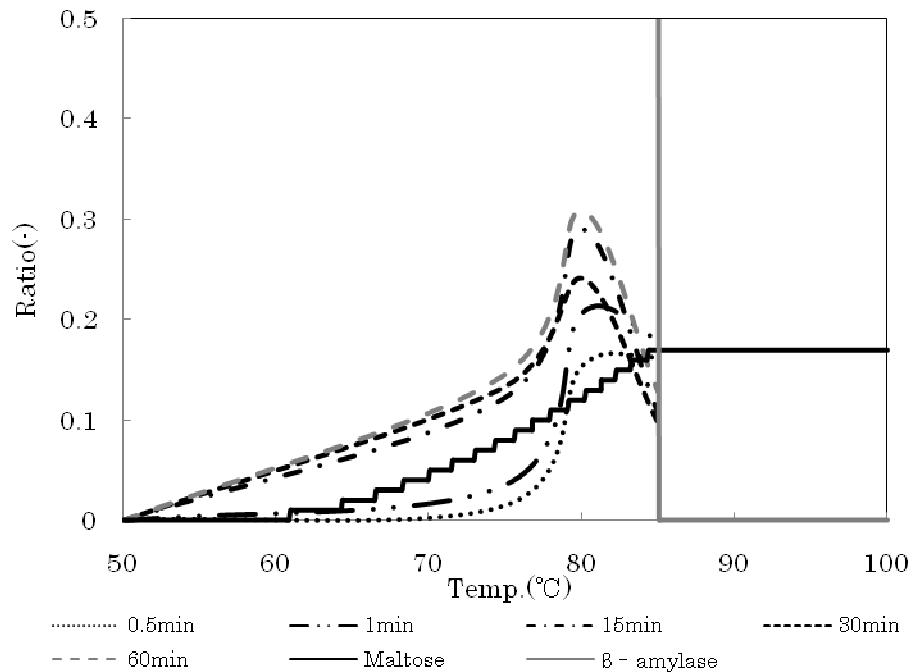


Fig.5-3 計算値と実測値の糖度比較

シミュレーション上での所定温度の滞在時間は、約 $0.2\text{min}/^{\circ}\text{C}$ (12s) であり、この値は、実測値上での最少測定時間である加熱開始 0.5min (30s) 後と近い形状を示している。予測値と実測値の所定温度帯の滞在時間を大差とせずと考察すると、両者はほぼ同等値を示している。よって、大差とした場合の細かな検証は必要とされるが、このシミュレーションの大まかな妥当性は示された。

5-3. マイクロ波加熱下での温度上昇に基づく反応シミュレーション

5-2. で完成した基本プログラムの温度項を, 3-2-2. で得たマイクロ波加熱下での温度履歴に書き換え, マイクロ波加熱下での各反応物質の濃度や上昇傾向等のシミュレーションを行った.

5-3-1. 低出力 100W 加熱

3-2-2. での 100W 加熱の中心部および側面部における温度履歴 (温度の経時変化) の近似曲線を, 中心部は多項式近似とし, 側面部は直線近似として求めた (Table 5-2).

Table 5-2 中心部 実測温度履歴の近似式

測定部位	近似式	相対指数
中心 (r=0 cm)	$y=-0.0013x^2+0.6018x+23$	$r^2=0.996$
側面 (r=1.5 cm)	$y=0.273x+23$	$r^2=0.991$

中心部の多項式近似は, 加熱時間 231s ($x=231$) をピークとして, 温度 (y) が減少していく式となっている. しかし, このような現象は実際には起こらないため, 231s 以降の加熱時間における温度帯は 100°C となるよう設定し, 100°C の到達するのと同時に計算を強制的に停止させた. これは, 実測値において, 100°C 一定となる加熱時間が存在しなかったためである.

以上のことを踏まえて計算をした. 計算結果を Fig.5-3, 5-4 に示す.

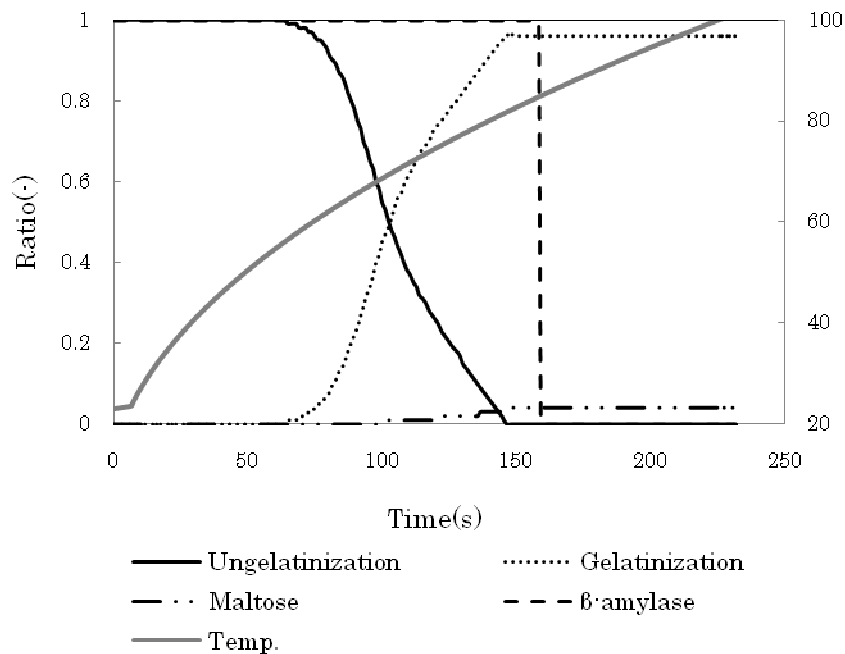


Fig.5-3 100W 中心部計算結果

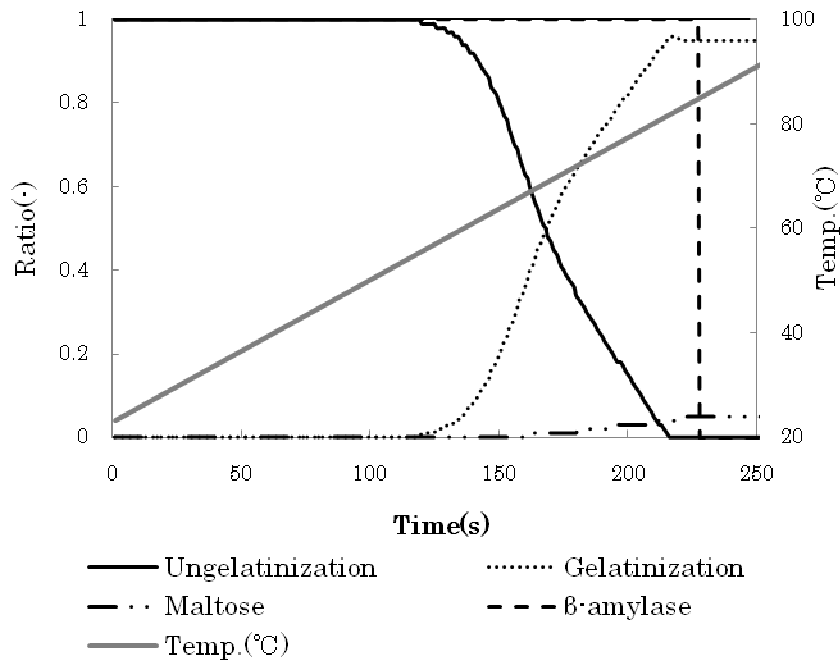


Fig.5-4 100W 側面部計算結果

実測値の温度履歴上、中心部は側面部よりも GT・ST に到達するのが早いため、加熱開始 50s 後から糊化開始し、それに伴って糖度が上昇している。また、150s 後には酵素が失活して糖度は一定値を示す結果となり、この時点での温度は、85°C に到達していない。一方、側面部では中心部よりも 50s 遅れての 100s 後付近で GT・ST に到達し、150s 以降から糖度が上昇している。150s で反応が停止する中心部に対して、側面部は加熱終了 216s まで糖度が上昇し続け、最終的には 220s 付近で酵素失活となった。

次に、糖度の予測値と実測値の比較を行った。この際、y 軸スケールを拡大して、Fig.5-5、5-6 に示した。

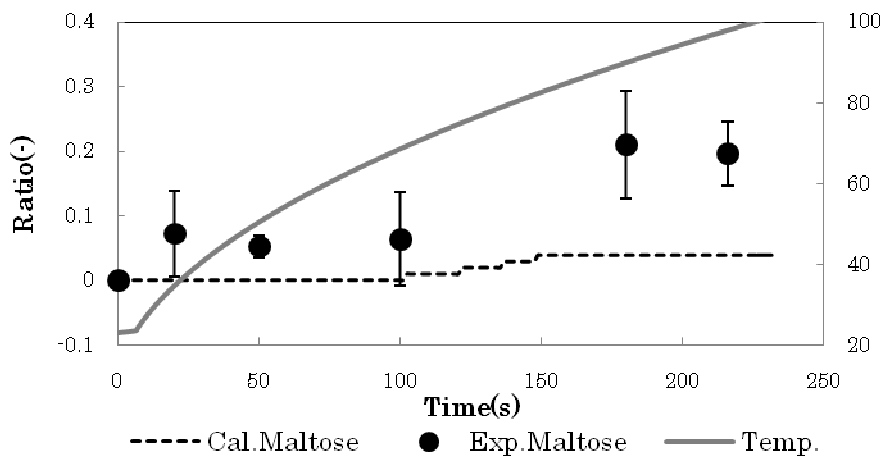


Fig.5-5 100W 中心部計算値および実測値との比較

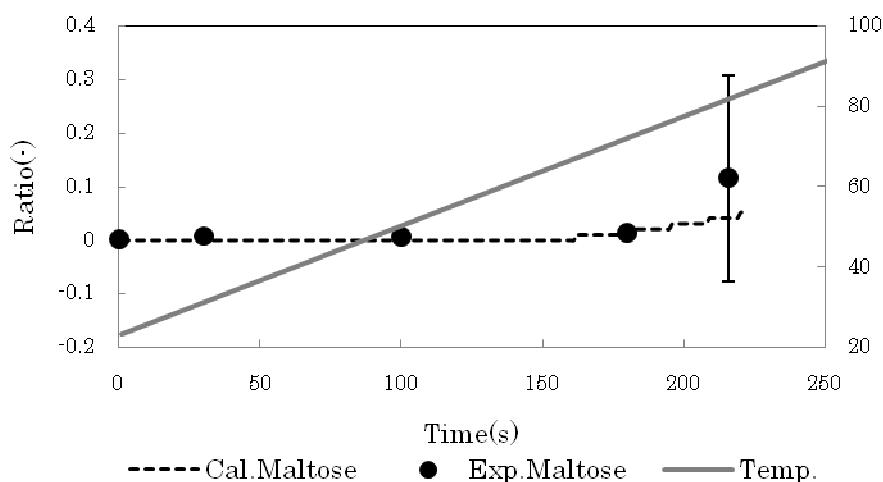


Fig.5-6 100W 側面部計算値および実測値との比較

両測定部分ともに、実測値が計算値よりも大幅に大きいことが分かる。

中心部の場合、計算値では 0.04(-)に留まっており、生サツマイモの糖度とさほど上昇していないことが分かる。糊化温度の滞在時間は十分であると判断すると、糊化澱粉に作用する酵素の作用時間が最も影響していると考えられる。しかし、計算上では糊化澱粉の生成約 70 秒以降から失活する約 160 秒までは 90 秒程度あり、十分酵素は作用できるはずである。100W 加熱中心部の昇温速度は、約 21°C/min である。これは、伝導伝熱での設定 5°C/min よりもお幅に大きいことがわかる。

側面部の場合でも同様に、計算値が 0.04(-)に留まっており、実測値よりも低い結果となった。しかし、加熱終了後の値を除いた加熱過程では、加熱が進行しているにも糖度が上昇せずに 0(-)付近となる様子は良好に一致していることが分かる。加熱終了後の値に関しては、エラーバーの値が大きいため、今後実測値を増やすことで再検討していく。

本シミュレーションでは、伝熱を考慮せず温度項のみの設定で計算を行っている。得られた結果から推測すると、サツマイモの糖度上昇には、かなり遅い昇温速度での伝導伝熱での加熱も重要であると考えられる。

5-3-2. 高出力 600W 加熱

100W 加熱と同様に、高出力 600W 加熱でのシミュレーションを行った。実測値の近似曲線を Table 5-3 に示す。両測定部共に直線近似とした。

Table 5-3 側面部 実測温度履歴の近似式

測定部位	近似式	相対指数
中心 (r=0 cm)	$y=2.2236x+23$	$r^2=0.992$
側面 (r=1.5 cm)	$y=0.9916x+23$	$r^2=0.989$

600W 加熱でも、温度が 100°C に到達したら計算を強制終了させた。

計算結果を Fig.5-7, 5-8 に示す.

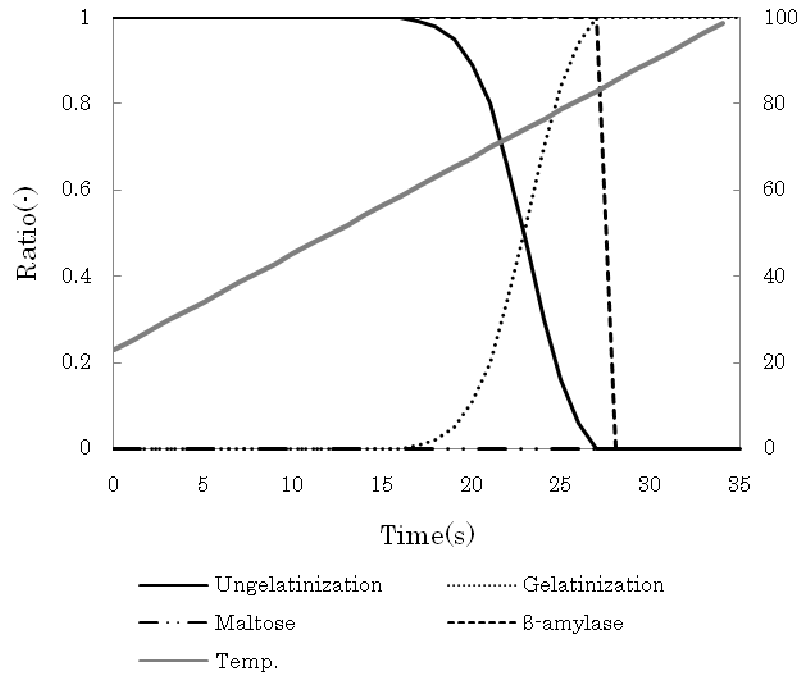


Fig.5-7 600W 側面部計算結果

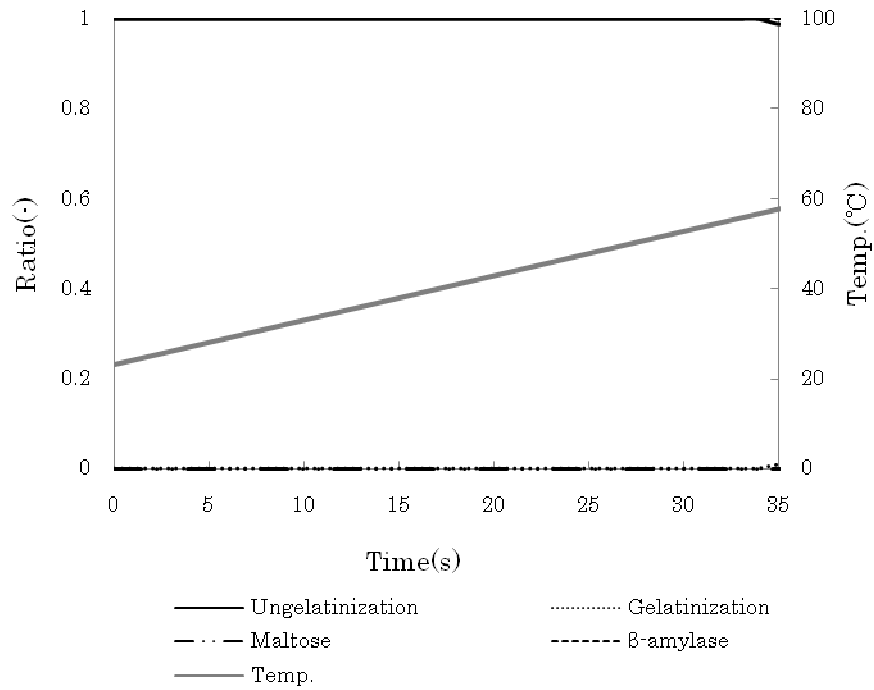


Fig.5-8 600W 側面部計算結果

600W加熱の場合、中心部では加熱開始 15s 後付近から糊化が開始し、30s 後に酵素が失活する。この間、糖度の上昇が期待できる約 15s 間では、糖度は 0 のまま上昇しなかった。つまり、このことから、酵素は基質が十分な状態および至適温度下でも、作用時間が短いと糖化反応の進行が不可能と考えられる。

一方、側面部では、GT・ST に到達しておらず、未糊化および糖度が 0 のまま反応が終了している。

しかし、両測定部分ともに実測値では、100W 加熱時と同等値の糖度を示している (Fig.3-8 参照)。600W 加熱時の結果は、100W 加熱時と比較すると実測値とかなり不一致であった。現時点で、結果がばらつく原因としては、実測値の操作上の問題では加熱終了後氷水で冷却する段階で各測定部分まで冷却されず、伝導伝熱によって加熱が継続し糖度の上昇につながったとも考えられる。さらには、糖度測定で採取した部位には、温度履歴を測定している中心部および側面部 (Fig.3-4) に相当しない温度領域部位が含まれていることも不一致の原因としてあげられる。これらのことを踏まえ、今後再検討が必要である。

5-4. 第5章の結論

サツマイモの糖化反応に関与する反応物質は、全て温度に依存すると考えられ、基本プログラムを作成した後に、温度項をマイクロ波加熱時の温度履歴実測値に置き換えて計算を進めた。しかし、発熱項からの伝熱を考慮していないためか、100W 中心部の計算値は実測値よりも小さい値となった。一方の 100W 側面に関してはほぼ良好に一致した。

このシミュレーションから、高出力 600W 加熱のようなマイクロ波加熱での急速な昇温速度が、サツマイモ内で起きる全反応に影響しているということが明確となった。さらには、この昇温速度の影響により、糖化反応の前段階となる糊化反応は十分に進行しているにも関わらず、糊化後から酵素失活までの酵素作用時間が十分でないうちに酵素が失活するため、糖化反応が進行しないという具体的な点まで明確にすることができた。しかし、600W 加熱の実測値では、糖度はある程度上昇しているため、今後再検討は必要である。

第6章 マイクロ波加熱下における3次元熱伝導解析および反応シミュレーション

前項では、温度分布を考慮せず、ある一点における温度上昇に基づいて反応シミュレーションを行った。ここでは、熱伝導解析および反応モデルから、発熱項を考慮したサツマイモ全体の温度分布ならびに糖度反応分布を算出する。これにより、電子レンジ内における電界強度分布およびサツマイモの発熱量分布からのサツマイモの温度分布が可視化できるようなシミュレーションの成を目指している。

解析にはFORTRANの他にFemapおよびWAVEj ω を用い、以下のような手順で行った。

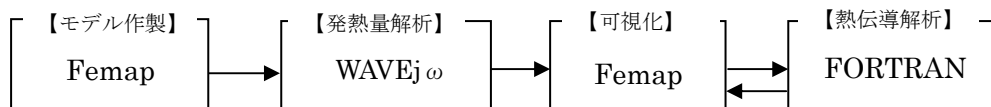


Fig.6-1 シミュレーション作成のステップ

6-1. 要素モデルの作成

本研究のモデル作成は、電子レンジ庫内のみの加熱を想定している。よって、実験で用いているマイクロ波加熱装置形状（マイクロ波照射部位を含む）および寸法（Fig.3-3参照）、さらに試料形状サイズ（物性値）と同様のモデルをFemapで作成した。Femapは有限要素法のためのモデル解析ソフトである。モデルの作成は底面からエレメントを押し出す方法を用いた。

6-1-1. 形状および寸法

モデルに考慮しなければならない物質は、空気・サツマイモ・ターンテーブルのガラス皿である。また、上下面のアルミテープも設定しているが、これに関しては6-1-3-2.で詳細を述べる。Fig.3-2で示した実験での装置形状および寸法を用いてモデルを作成した。この際、実験装置は1/4に区切ってもすべて対称的となるため、1/4サイズとした。完成したモデルをFig.6-2に示す。

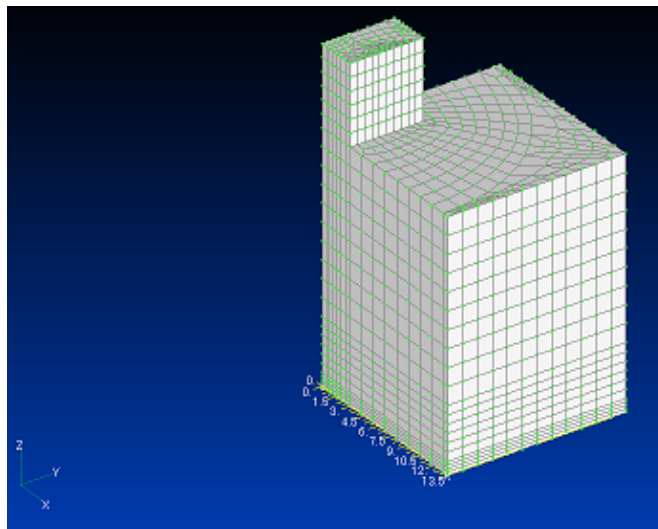


Fig.6-2 Femap 上モデル

6-1-2. メッシュ上の物質の設定

Femap 上では、実験装置のそれぞれの部位に対応した物性値を代入した。高さ方向および平面上での物質の設定を、Fig.6-3 に示す。

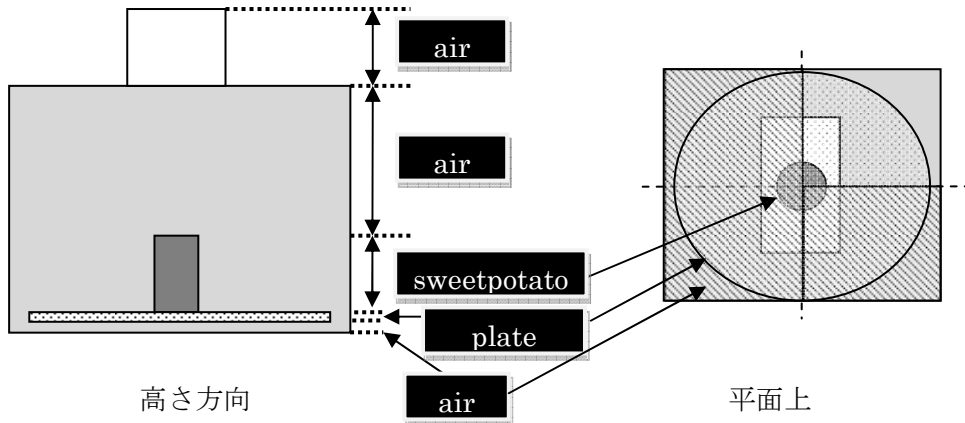


Fig. 6-3 物質の設定

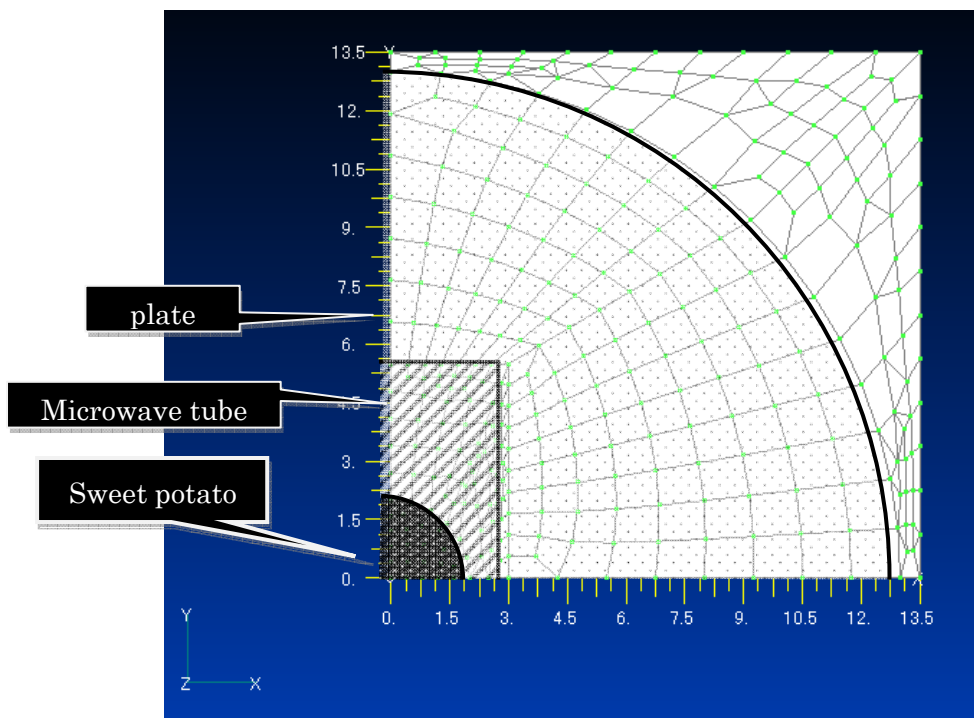


Fig.6-4 Femap 上モデル x-y 面 (1/4 サイズ)

Femap 上では、物性値として誘電率 ϵ' および誘電損率 ϵ'' 、透磁率 μ 、さらに比熱や密度を代入する箇所があるが、WAVEj ω では、前述の 3 項目のみがリンクしており、他の項目に関しては代入しても WAVEj ω 上では読み取ることができない。よって、ここでは、前述の 3 項目のみの物性値を代入した。また、用いた物性値は全て文献値を用い、サツマイモに関しては、固体での誘電特性の文献がなく測定することも困難であった。よって、ピューレの誘電特性の算出式 (Eq.6-1, Eq.6-2) [10] から、常温 23°C 時の誘電特性を算出した。サツマイモの誘電特性は、温度依存性があるためサツマイモ内部の温度上昇に伴った温度を設定しなければならないが、プログラムの都合上 23°C 時の誘電特性のみを用いて全ての計算を行った。

$$\epsilon' = 74.84 - 0.113T - 0.00214f \quad R^2 = 0.99 \quad \dots \dots \text{Eq. (6-1)}$$

$$\epsilon'' = 29.76 + 0.125T - 0.0144f - 8.60 \times 10^{-5}fT + 4.11 \times 10^{-6}f^2 + 7.64 \times 10^{-4}T^2$$

$$R^2 = 0.97 \quad \dots \dots \text{Eq. (6-2)}$$

ϵ' : 誘電率 (-) ϵ'' : 誘電損率 (-) f : 周波数 (10⁶Hz) T : 温度 (°C)

Table 6-1 物性値 [29]

Material	ϵ'	ϵ''	μ
Air	1	0	1
Sweetpotato	66.8	17.5	1
Glass plate	6.5	0.06	1

また、WAVEj ω は、電磁場解析のための有限要素法プログラムであり、入力条件として、形状データ、電磁特性データ、境界条件を与えることにより、誘電体の分極、磁性体の磁化により電磁場分布を計算している。

6-1-3. 境界条件の設定

Femap でモデルを作成した後、WAVEj ω で特定の出力によるマイクロ波照射の発熱量を得る。この際、装置庫内に“対称境界条件 (電気壁)”を設定することにより、装置庫内壁を対称境界面としてとり扱うことが可能となる。

本研究では、以下のような境界面を電気壁と定義している。

「X-Y 面が対称境界となっている時は、X 方向と Y 方向のベクトルポテンシャル成分はなく、Z 方向のベクトルポテンシャルのみが存在する。電場はベクトルポテンシャルと同じ方向をもっているため、この境界条件では電場は境界に対して垂直になる。」

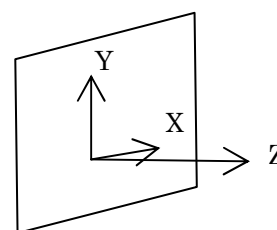


Fig.6-5 電気壁

一方、拘束をかけない境界面には、有限要素法において自動的反对称境界条件が適応される。この境界条件は対称境界条件とは逆の性質を持ち、X-Y 面が反对称面となっている時は、X 方向と Y 方向の磁場成分が存在せず、磁場が Z 方向に向く。このような境界は磁気壁とし

ている。

6-1-3-1. 装置庫内での設定

Fig.6-5 に示したように設定し，壁面を電気壁とした。

6-1-3-2. アルミテープの設定

本研究で用いているサンプルは，上下面をアルミテープで覆った後，ラップフィルムで覆っている。つまり，これによって，前述したようにマイクロ波の照射を側面のみと仮定している。よって，シミュレーションでも同様に側面照射の設定をしなければならない。

本モデルでは，アルミテープを張った上下面を対称境界条件として設定した。アルミテープの主材料である，アルミの物性値を無視した理由として，①Femap および WAVEj ω との関係上，アルミテープのマイクロ波反射率を設定することが不可能である。②実際のアルミテープの厚さのメッシュを作成し，物性値を代入しようと試みたが，Femap および WAVEj ω 上で有効な物性値は誘電特性のみであるため，この方法でもアルミテープの想定は困難である（※金属に誘電特性は存在しないとした）。という2点が挙げられたためである。

6-1-4. 電場の設定

Fig.6-3 で作成したモデルに，境界条件と同様に，導波管部分に電場の設定をしなければならない。

6-1-4-1. 電場の計算方法 [30]

Femap では，直接伝送電力を代入するのではなく，電界強度を代入して電場を設定している。導波管内のマイクロ波は，周囲を導体で取り囲まれた中空パイプの中を伝播していく。つまり，導波管全体部分が均等な電界強度を持っていないことになる。Femap 上では，最高電界強度を基に，それぞれの部位における電界強度を設定する必要がある。電界強度は，Eq.(6-3)~(6-6)において EX_{max} を算出した後，Eq.(6-7)を用いて，平板上におけるメッシュの分割数に基づいた値を算出した。

$$\lambda_c = 2a \text{ (cm)} \quad \dots \text{Eq. (6-3)}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \text{ (cm)} \quad \dots \text{Eq. (6-4)}$$

$$Z_0 = \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \quad \dots \text{Eq. (6-5)}$$

$$EX_{max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{Z_0}{a \cdot b}} \cdot \sqrt{P_t} \text{ (V/m)} \quad \dots \text{Eq. (6-6)}$$

$$Ex = EX_{max} \cdot \sin \frac{\pi}{a} \cdot y \text{ (V/m)} \quad \dots \text{Eq. (6-7)}$$

a, b : 内径寸法(m)= 10.92×10^{-2} , 5.46×10^{-2}

λ_c : 遮断波長(cm)

λ : 自由空間波長(cm)

λ_g : 管内波長(cm)=14.79

Z_0 : 特性インピーダンス

P_t : 伝送電力(W)=100, 600

EX_{max} : 最大電界強度(V/m)

y : メッシュ上での分割部位

メッシュは、導波管と電界強度の関係 (Fig.6-7) に基づいて、Fig.6-8 のように電磁波照射部を 5 分割した。

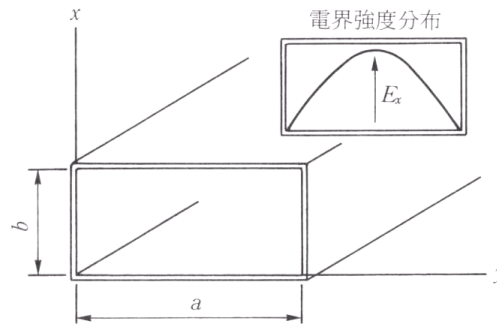
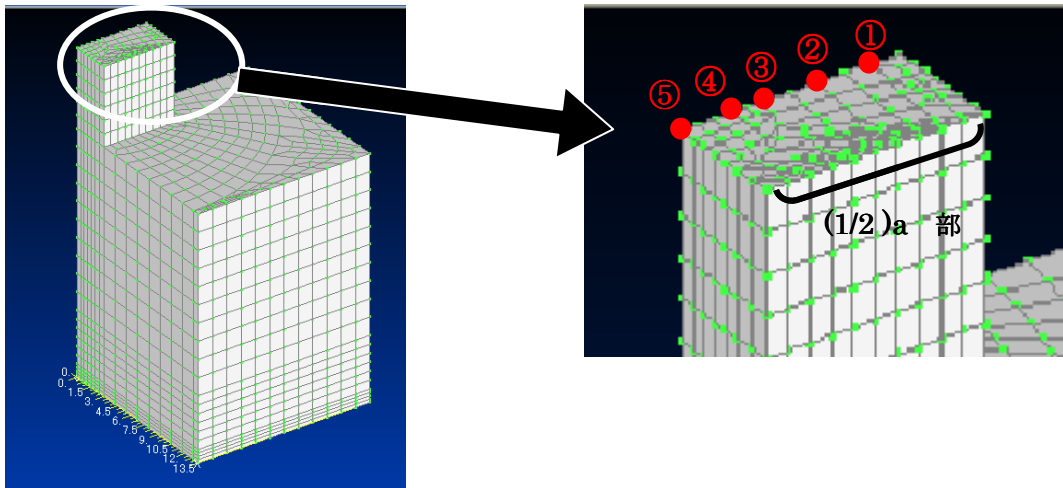


Fig.6-6 方形導波管基本寸法 [30]



(Fig 6-2)

Fig.6-7 電磁波照射部の分割

その後、各部位における電界強度を算出し (Table 6-2)、モデル上で対応した部位に電場を設定した。

Table 6-2 電界強度計算結果 (単位: V/m)

分割部位 (長さ)	①部:(0.7/11)a	②部:(2.1/11)a	③部:(3.5/11)a	④部:(4.3/11)a	⑤部:(5.5/11)a
100W	1097	3119	4648	5204	5525
600W	2688	7639	11385	12746	13533

6-1-5. 完成モデル

これまでの6-1. では、物性値や電場を考慮したモデルの作成手順を示した。それらの過程を経て完成したモデルを Fig.6-8, 6-9 に示す。

結果より、100W, 600W とともに、加熱装置庫内の電場分布は同様であり、発熱も庫内中心部にセットしたサツマイモが発熱していることが分かる。また、出力の高低によって発熱量も異なっているため、マイクロ波加熱時の庫内の様子が顕著に再現できているといえる。

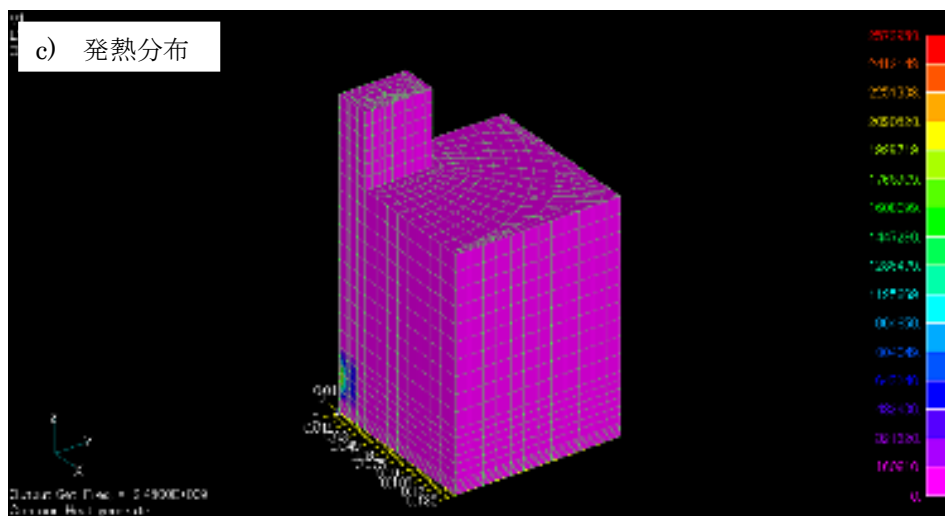
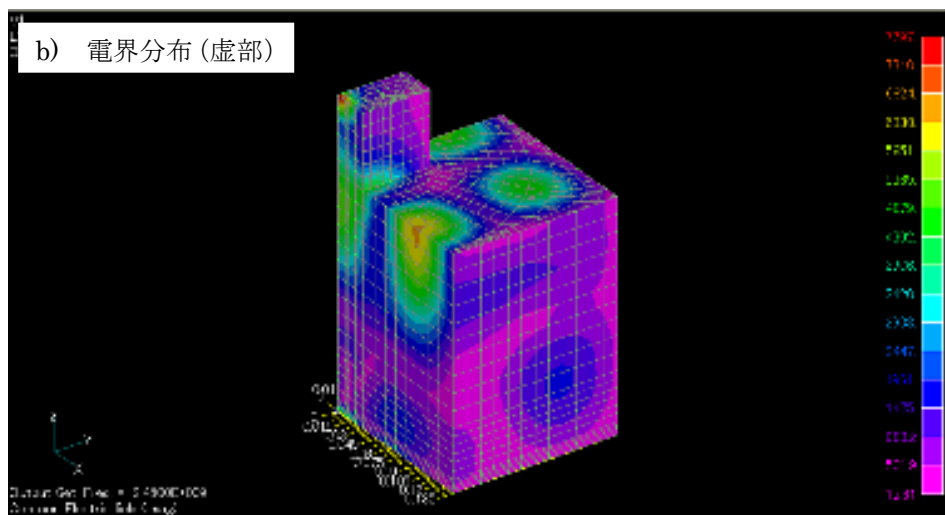
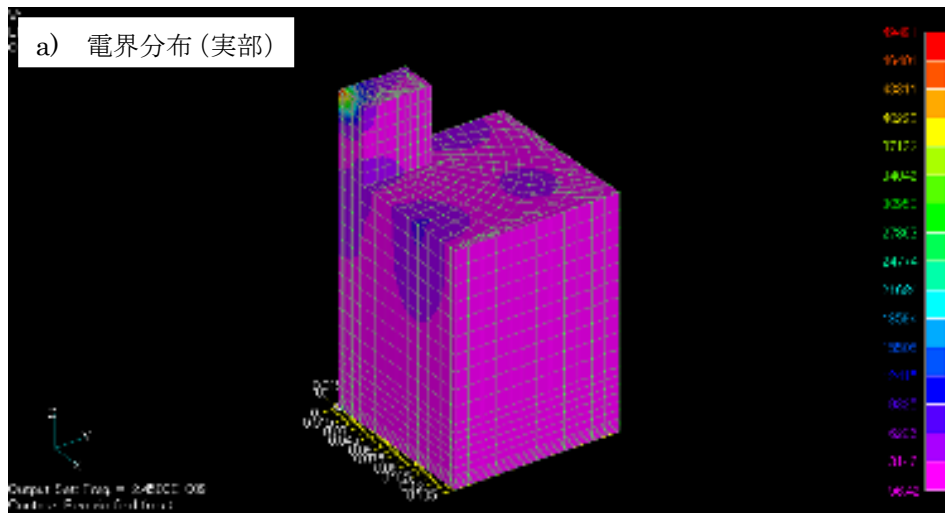


Fig.6-8 100W WAVEj ω による解析

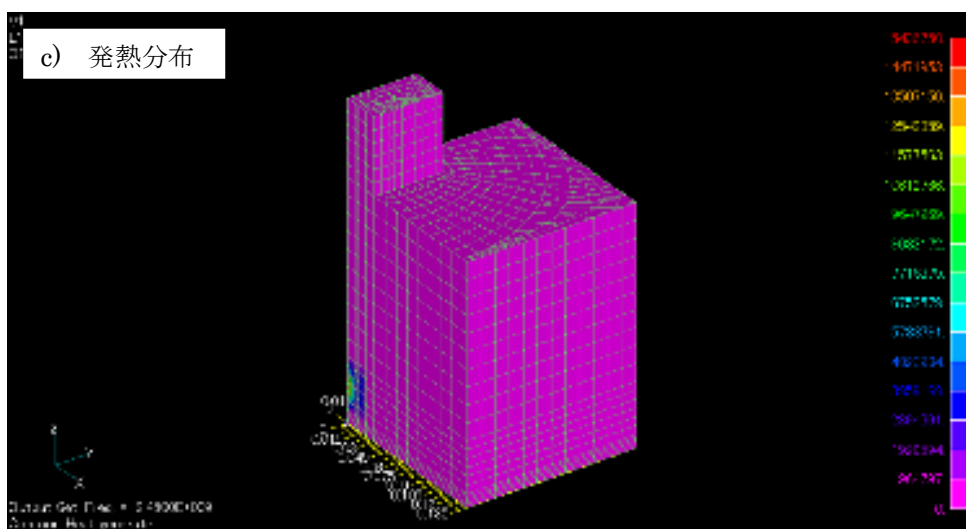
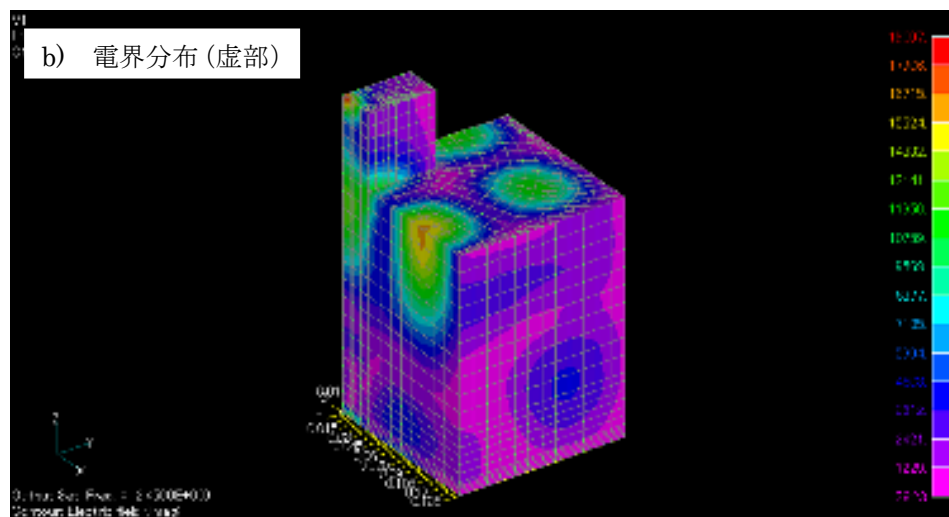
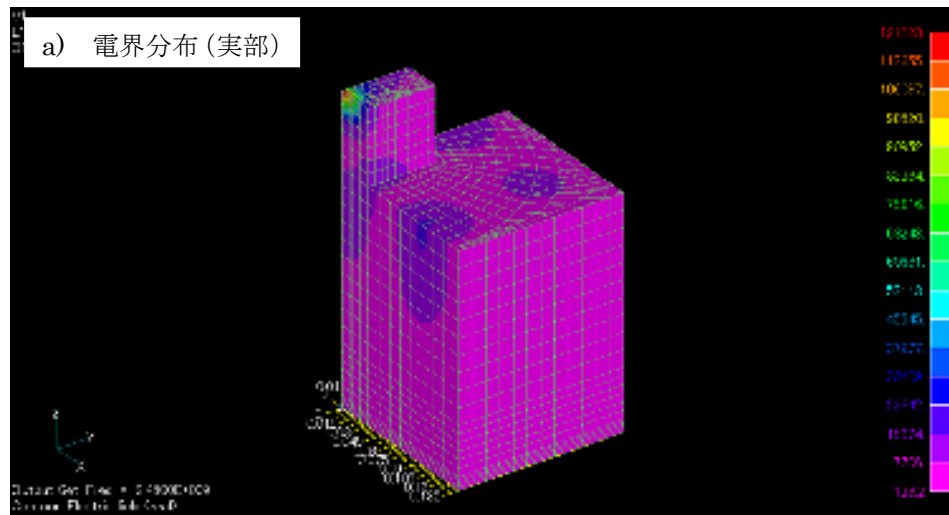


Fig.6-9 600W WAVEj ω による解析

6-2. 計算プログラムでの設定

6-1. において完成したモデルを計算する過程で、WAVEj ω およびFORTRANでの設定条件を述べる。

6-2-1. WAVEj ω

ここでの設定を以下に述べる。

- ①Femap上でセンチメートルスケールとして作成したモデルをメートルスケールに変換した。
- ②周波数を“ $2.45 \times 10^9 \text{Hz}$ ”とした。
- ③解析パラメータにおける反復回数を“1000000”とした。

6-2-2. FORTRAN

FORTRANでの計算は、3つのプログラムを用いて3段階に分けて進めた。

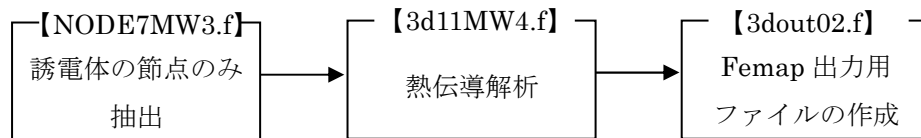


Fig.6-10 解析ステップ

- ①初期温度は、実験と同様 23°C とした。
- ②計算結果が 100°C を超える場合は、すべて 100°C 一定とした。
- ③TEG, 各物質割合は $0 < \text{TEG}, X_s, X_{sg}, X_M, X_{Am} < 1$ の範囲となるようにし、反応速度の関係上、これ以外の範囲を示す場合には、0 または 1 一定となるよう設定した。この設定によって、サツマイモの反応自体に影響を与えることはない。
- ④計算は 0~300 秒とし、0.5 秒ごとに 600 ステップの計算した。

ここでの、熱伝導解析では、非定常熱伝導方程式を用いた。静止している連続体（固体など）における非定常熱伝導方程式は Eq.(6-6)であらわされる。Eq.(6-6)上の発熱量 Q に、WAVEj ω より得られた発熱量が用いられる。また、サツマイモの水分含量は約 70%であることが分かっているため、ここでの熱伝導率 λ 、密度 ρ 、比熱 c は、水の物性値を用いた。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad \dots \dots \text{Eq.(6-6)}$$

T : 温度 (K) t : 時間 (s) λ : 熱伝導率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 ρ : 密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) c : 比熱 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) Q : 内部発熱量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)

6-2-3. Femap

Fig.6-1にも示したように、ここでのシミュレーションは計算結果を可視化するために、用いている。WAVEj ω での解析後、Femapに移して結果を可視化する理由としては、WAVEj ω での表示は1メッシュ当たり1色でのコンター表示となってしまうが、Femapの場合では、1メッシュ中でも値に相当した多色のコンター表示が可能となる。また、FORTRAN解析後では、WAVEj ω での発熱量を基に、第5章で作成したプログラムにより算出された各物質の加熱時間ごとの分布を確認することが可能となる。

6-3. 結果および考察

6-3-1. 温度

ここでは、温度履歴および分布、さらには Femap および赤外線放射温度計の結果に基づいた比較する。

6-3-1-1. 温度履歴の比較

第3章での実測温度履歴 (Fig.3-5) と、今回得た計算結果とを比較し、Fig.6-9 に示した。

a) 100W

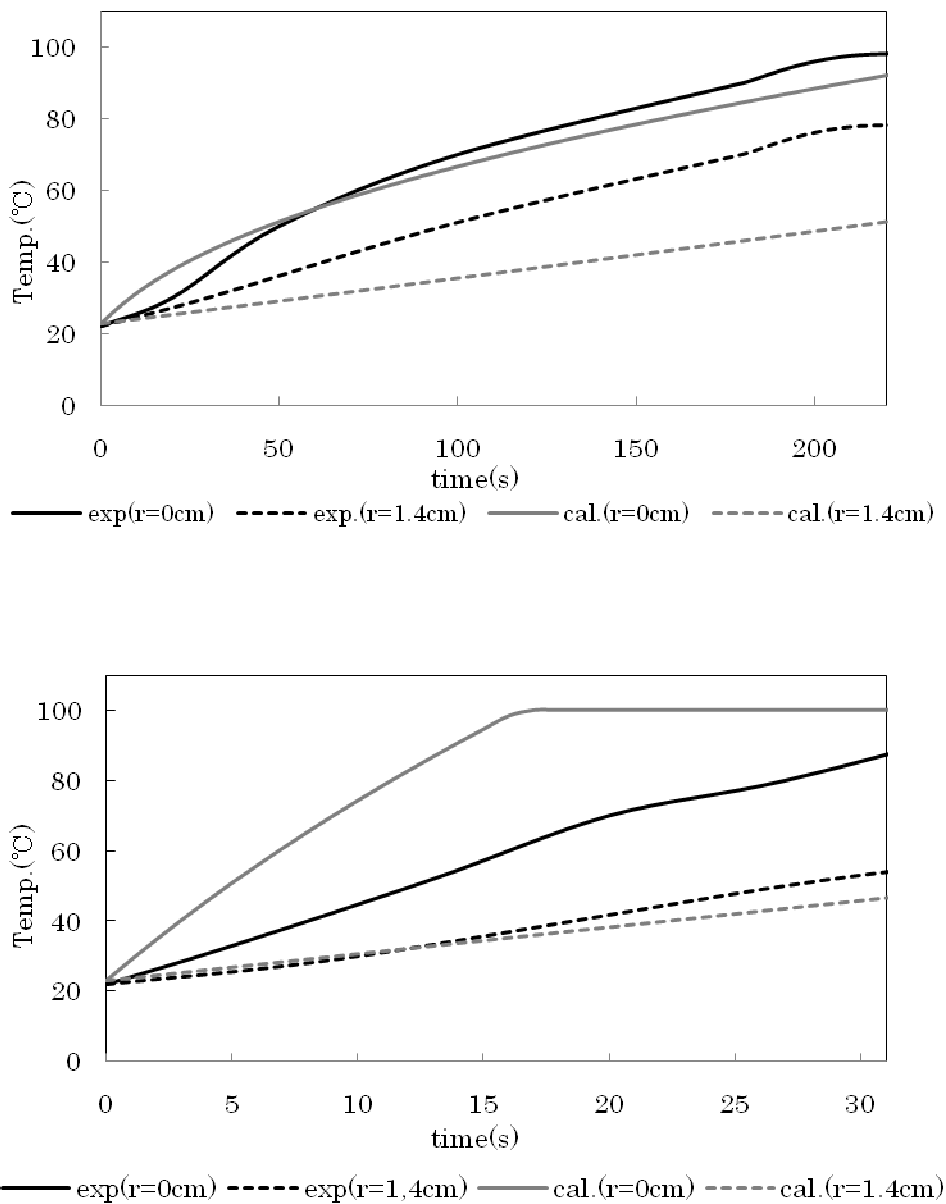


Fig.6-11 実測値と発熱項を考慮したシミュレーション結果の温度履歴の比較

低出力 100W では、中心部(r=0cm)の温度履歴 (上昇形状) はよく近似しているが、側面部

($r=1.4\text{cm}$)に関しては計算値の温度が低く、最大約 20°C の温度差が生じている。一方、高出力 600W では反対の結果となり、側面部は全体を通してよく近似している。また、中心部の温度差はかなり大きく、最大約 40°C の温度差が生じていることが分かる。

各出力の伝熱特性から、両出力ともに側面部よりも中心部の温度上昇が高い。この傾向は高出力 600W で顕著にみられ（半径が浸透深さよりも小さい場合）、中心部がマイクロ波照射による加熱の影響が大きく、側面部は主に中心部からの伝導伝熱によって加熱が進行すると考えられる。また、低出力 100W では、中心部と側面部でさほど温度差はなく、マイクロ波加熱の影響と同程度に伝導伝熱での影響もあると考えられる。

また、フィティングパラメータがない状態で、実測値と計算値がある程度一致しているため、本シミュレーションで得られる温度履歴の妥当性が確認されると共に、電磁場解析ソフト WAVEj ω で得られた発熱量の信憑性は高いことが示唆された。しかし、実測値と計算値をより一致させるためには、用いているサツマイモの誘電特性は文献値であり、ピューレの値を採用しているため、固体の値を用いる必要があると考えられる。しかし、サツマイモの固体状の誘電率等を記載した文献はなく、測定も困難であるため、今後検討が必要である。さらに、Femap で作成するモデルを、実験装置の凹凸などの細部までを考慮して作成するべきなのか検証することも重要であると考えられる。

実測値の糖度と温度履歴との関係では、GT および ST と比較した場合一致しない部分が多いため、温度履歴測定時の操作ミスを考慮し、ここで得た温度履歴を以後用い、他の反応結果を算出する。

6-3-1-2. 温度分布の比較

前項には、中心部および側面部のみの温度履歴を比較した。ここでは、温度分布の比較をする。温度分布は、第3章での加熱時間別糖度測定同様の時間で加熱し（Table 3-3 参照）、糖度測定のサンプリング過程での断面カット時に、赤外線放射温度計（(株) NEC 製, TH7100）で撮影した。赤外線放射温度計からの読み取った温度分布は、Fig.6-12 で示したように直径上の温度を 100 分割して各部位の温度を数値化した。よって、加熱後の温度分布を細部まで示すことが可能となる。

結果を Fig.6-13 に示す。

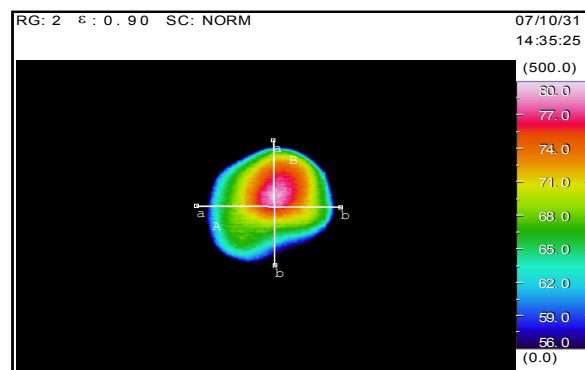


Fig.6-12 実測値温度分布の算出方法

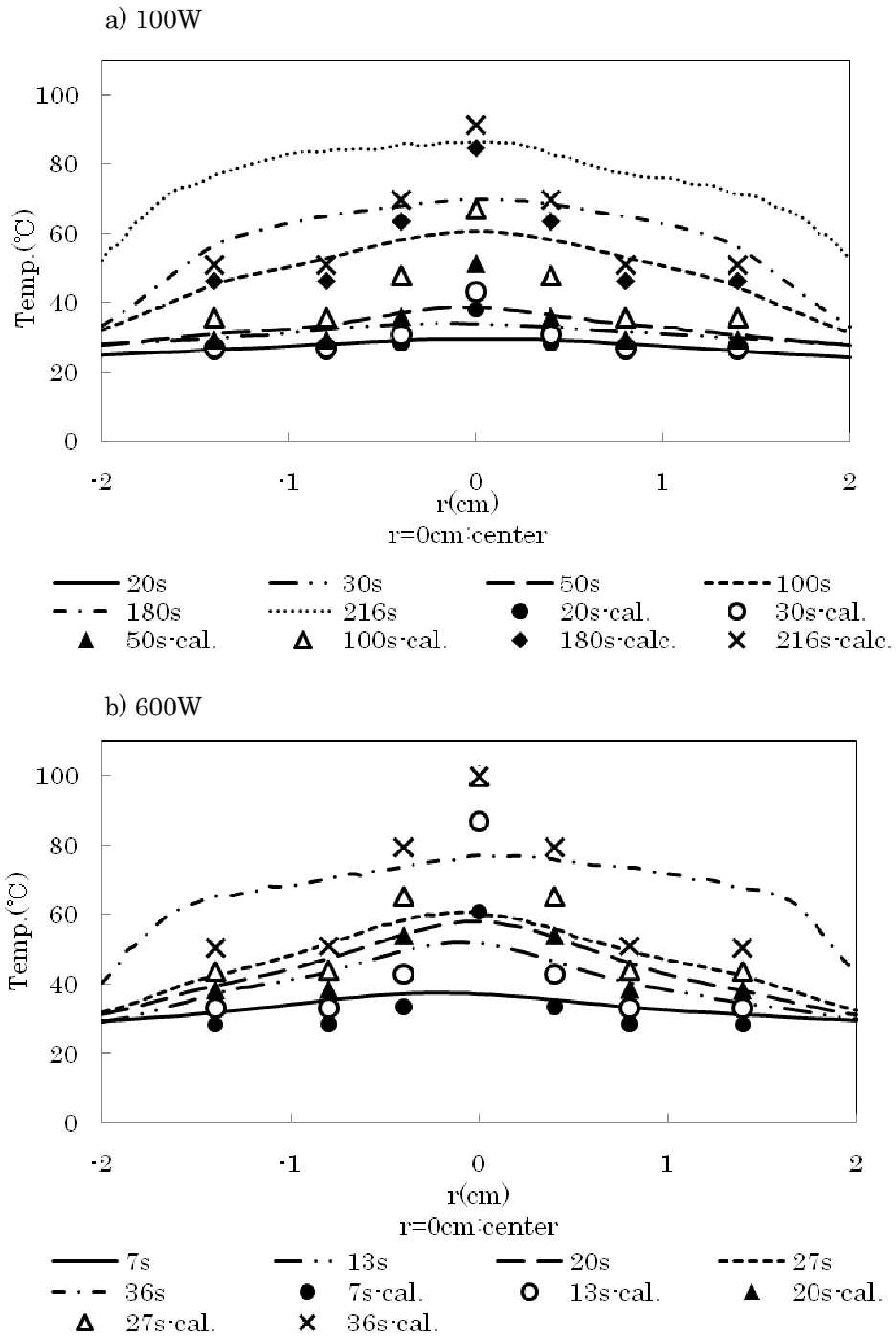


Fig.6-13 実測値と発熱項を考慮したシミュレーション結果の温度分布の比較

2次元での比較もここでは Femap でのシミュレーション結果を示す. また, 伝導伝熱加熱が影響の有無は, 加熱終了時の 216 秒のサンプルが顕著に表れているため, 実測値を合わせて Fig.6-14, 15 に示す. 断面は実測値と同様, 高さ 2cm の部位を示した.

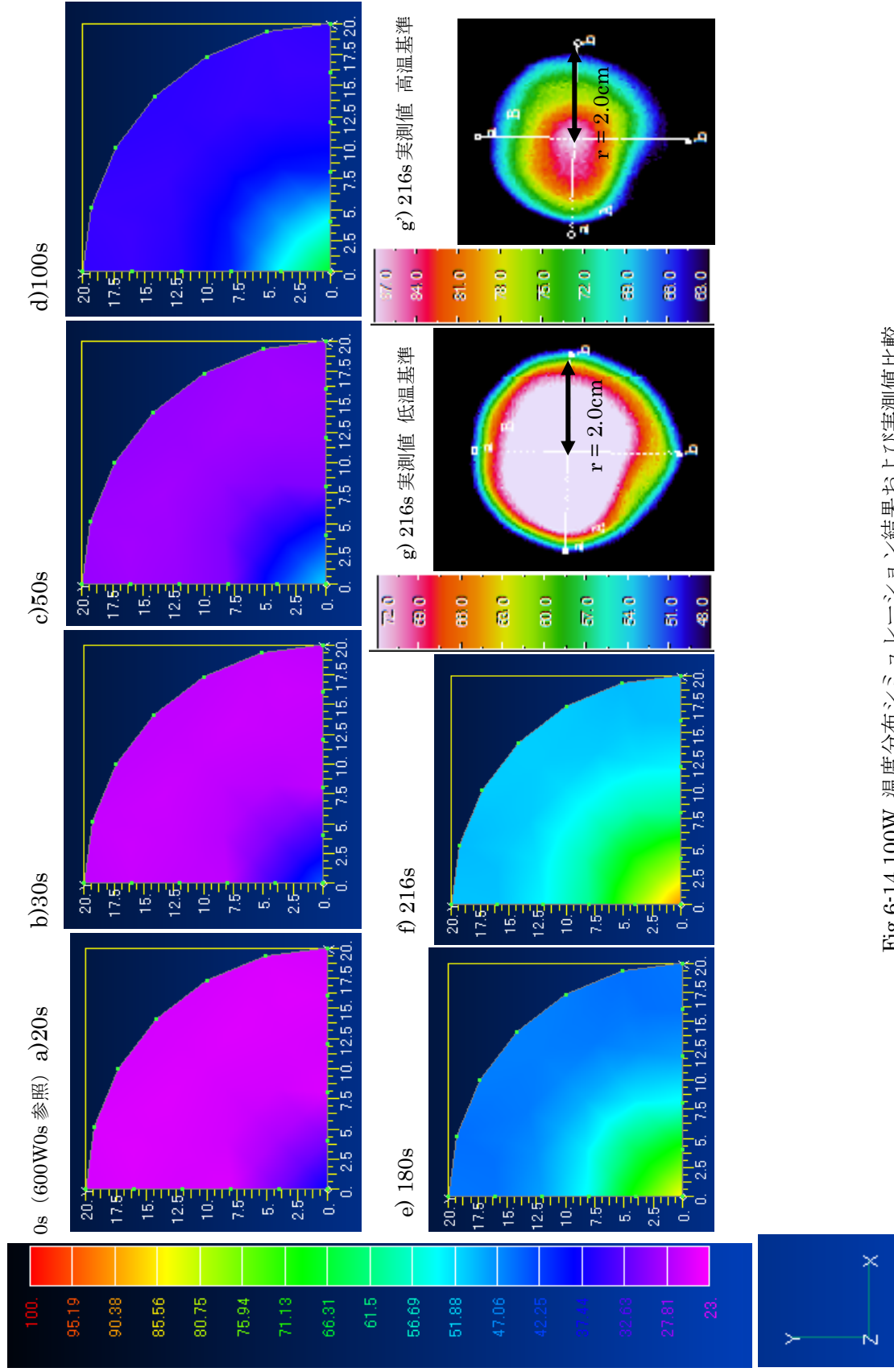


Fig.6-14 100W 温度分布シミュレーション結果および実測値比較

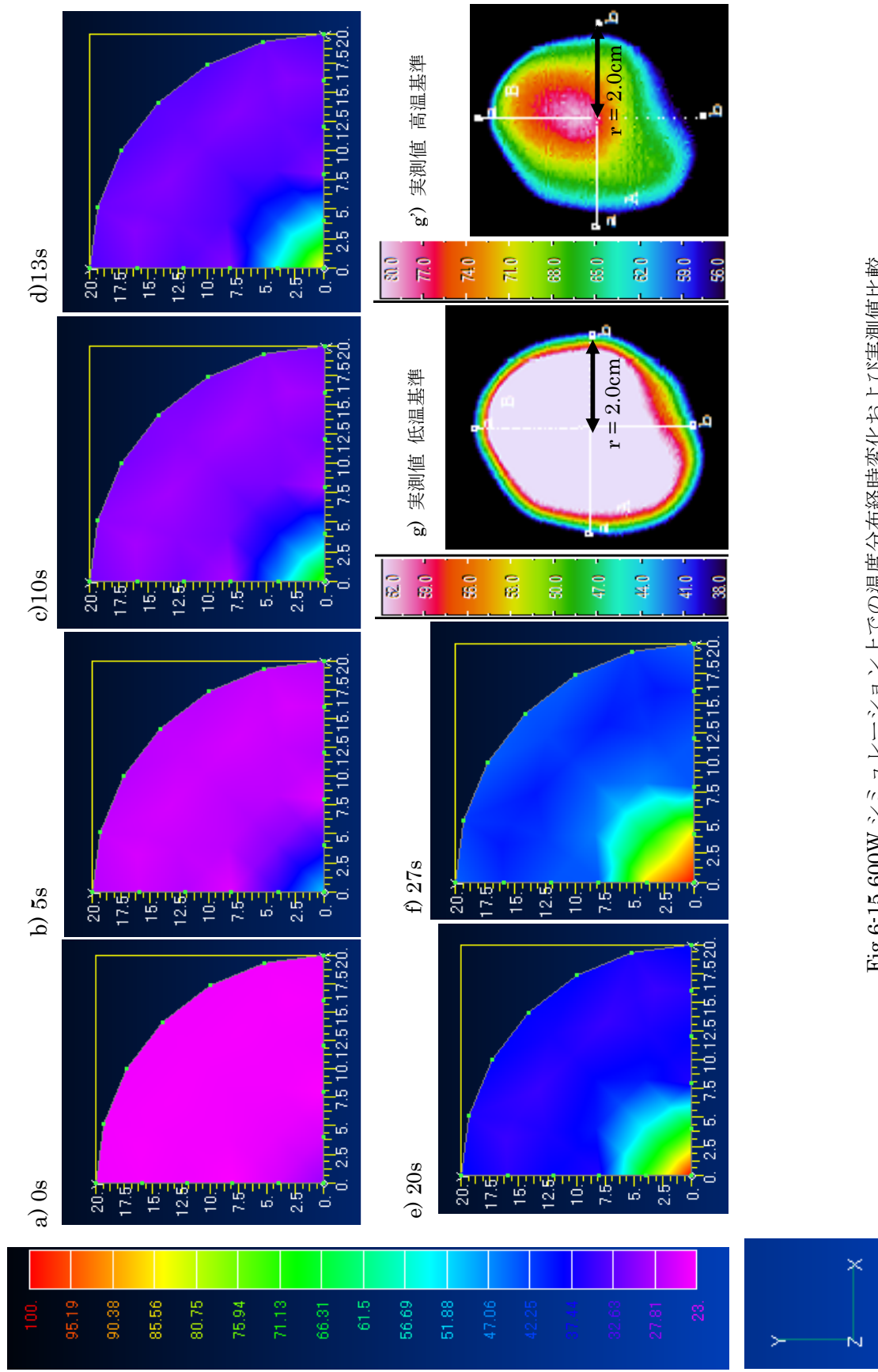


Fig.6-15 600W シミュレーション上での温度分布経時変化および実測値比較

温度分布の実測値は加熱完了→切断→撮影というステップなため、温度履歴とは異なりリアルタイムでの測定ではない。よって、温度履歴との結果と誤差が生じてしまうが、ここでは温度分布の形状に着目する。

温度履歴の結果では、マイクロ波加熱の影響を受けていない部位がよく一致していた。これを一点のみではなく全体の分布として考察すると、低出力および高出力関係なく実測値は加熱時間が長くなるにつれて山状から平板状を描いており、加熱終盤では伝導伝熱による加熱の影響もあることが分かる。一方計算値の場合は、加熱終了まで山状の形状は崩れず、伝導伝熱の影響は考慮されていないことが分かる。これは、倉島 [31]と同様の結果となった。また温度履歴と同様、低出力では中心部、高出力では側面部で実測値と計算値の近似していることが分かった。温度履歴で、実測値と一致しない原因としては、サツマイモの誘電率等の値が原因であることも考えられたが、それよりもシミュレーション上での伝導伝熱による影響を考慮するべきであると考えられる。

6-3-2. 各反応の比較

ここでは、実測値の操作ミス considering、6-3-1. での温度履歴に伴った各反応の進行をシミュレートし、実測値と比較した。反応式は第5章同様の値を用いた。

6-3-2-1. 全体の反応結果

全体の反応結果を Fig.6-16, 17 に示す。

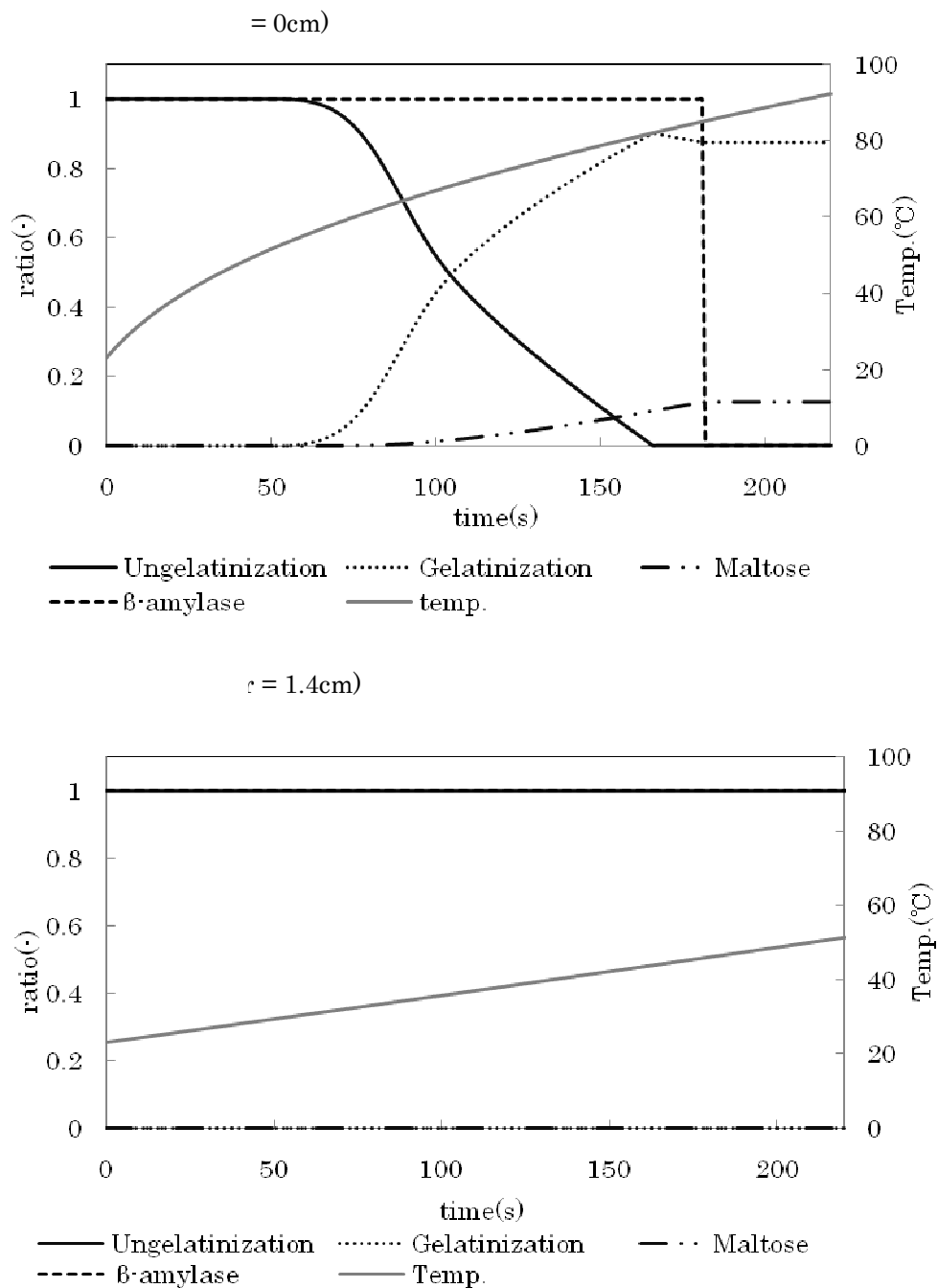


Fig.6-16 100W 測定部位別 各反応の経時変化

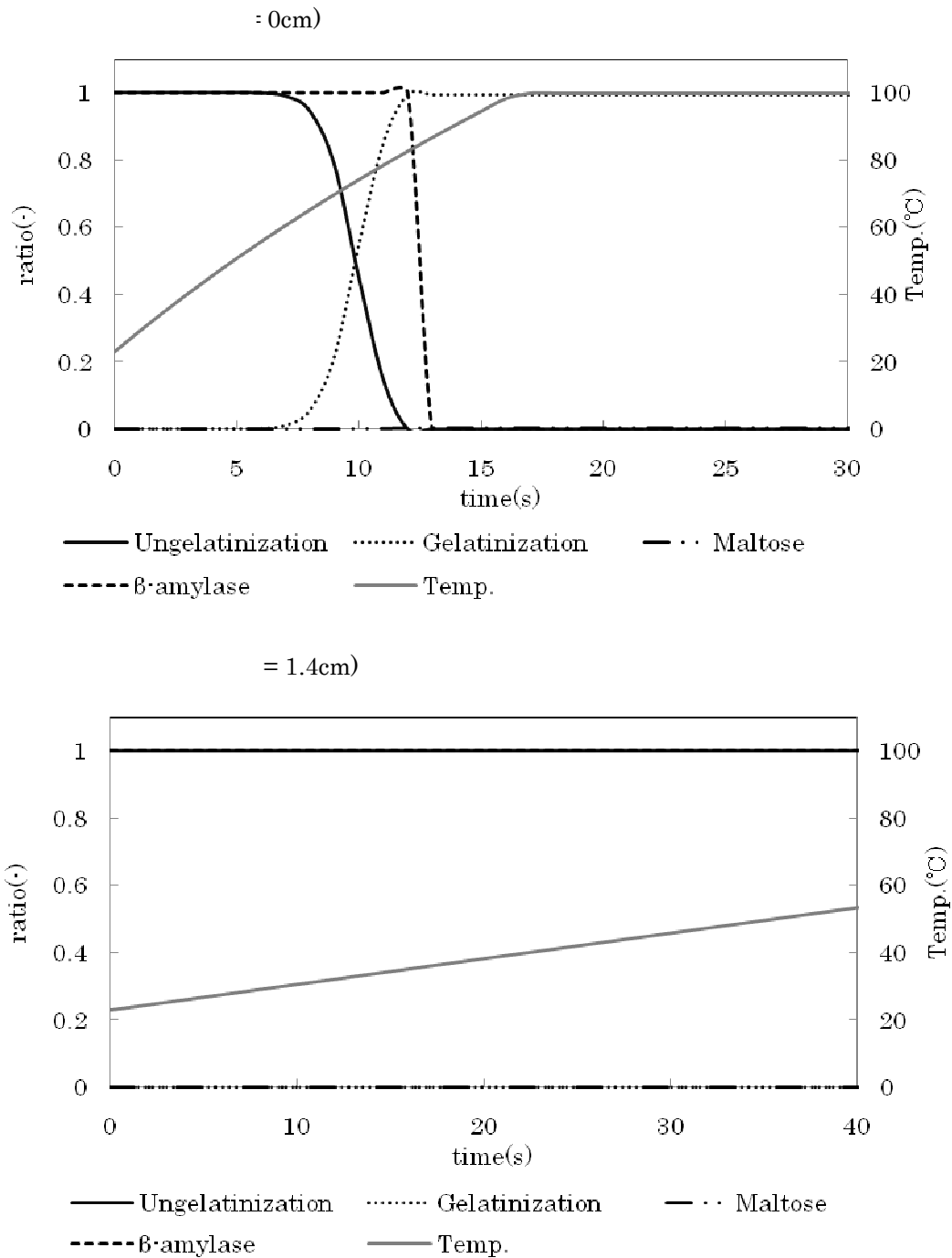


Fig.6-17 600W 測定部位別 各反応の経時変化

温度分布と同様に、各反応の2次元での進行分布についても Fig.6-18~21 に示す。反応分布は、実測不可能なため、シミュレーション結果のみ示す。断面は実測値と同様、高さ 2cm の部位とし、糊化が進行開始する 50 秒以降の画像のみ表示した。

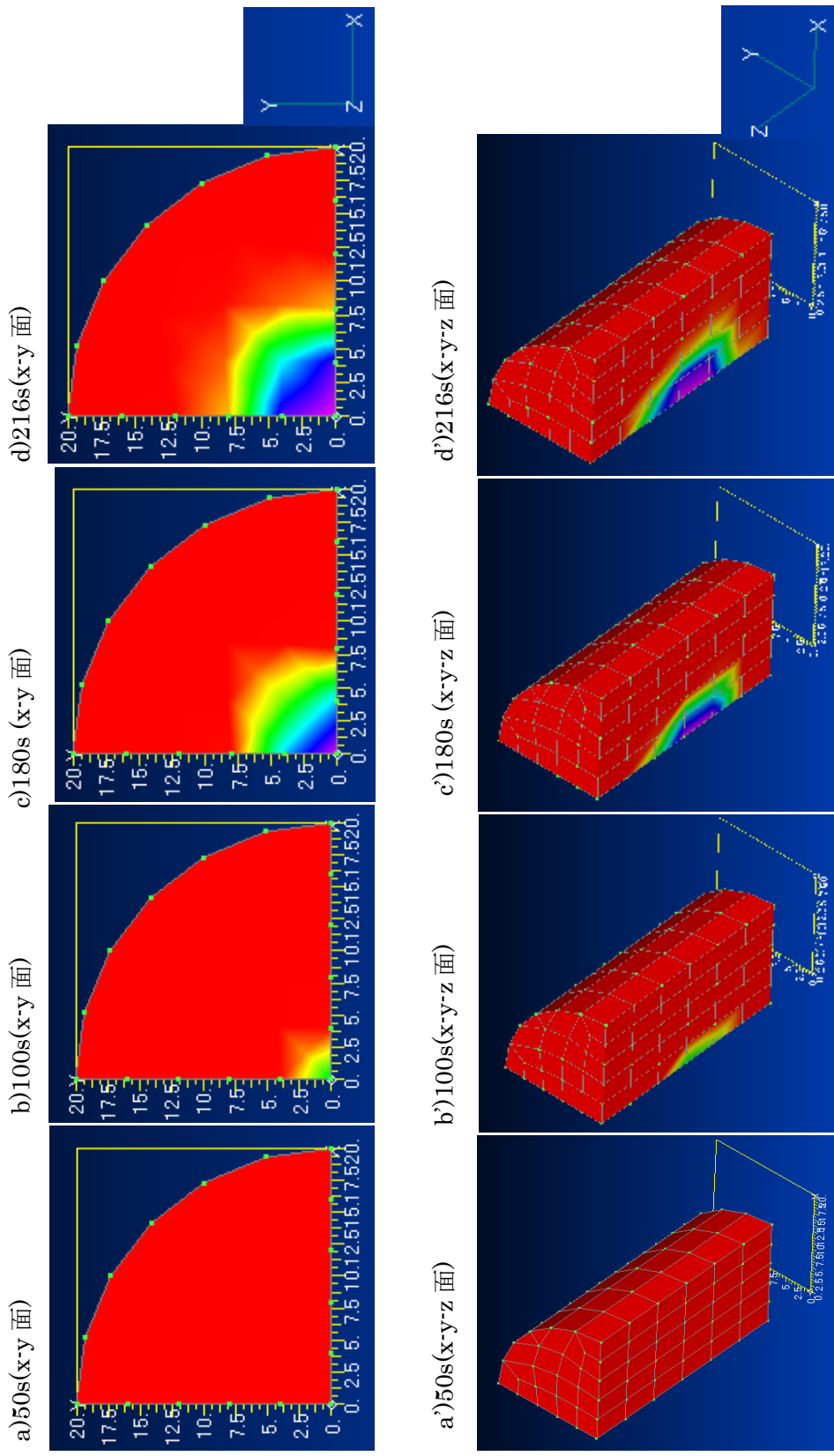
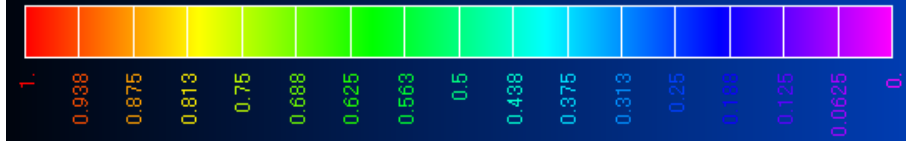


Fig.6-18 100W シミュレーション上での糊化の経時変化

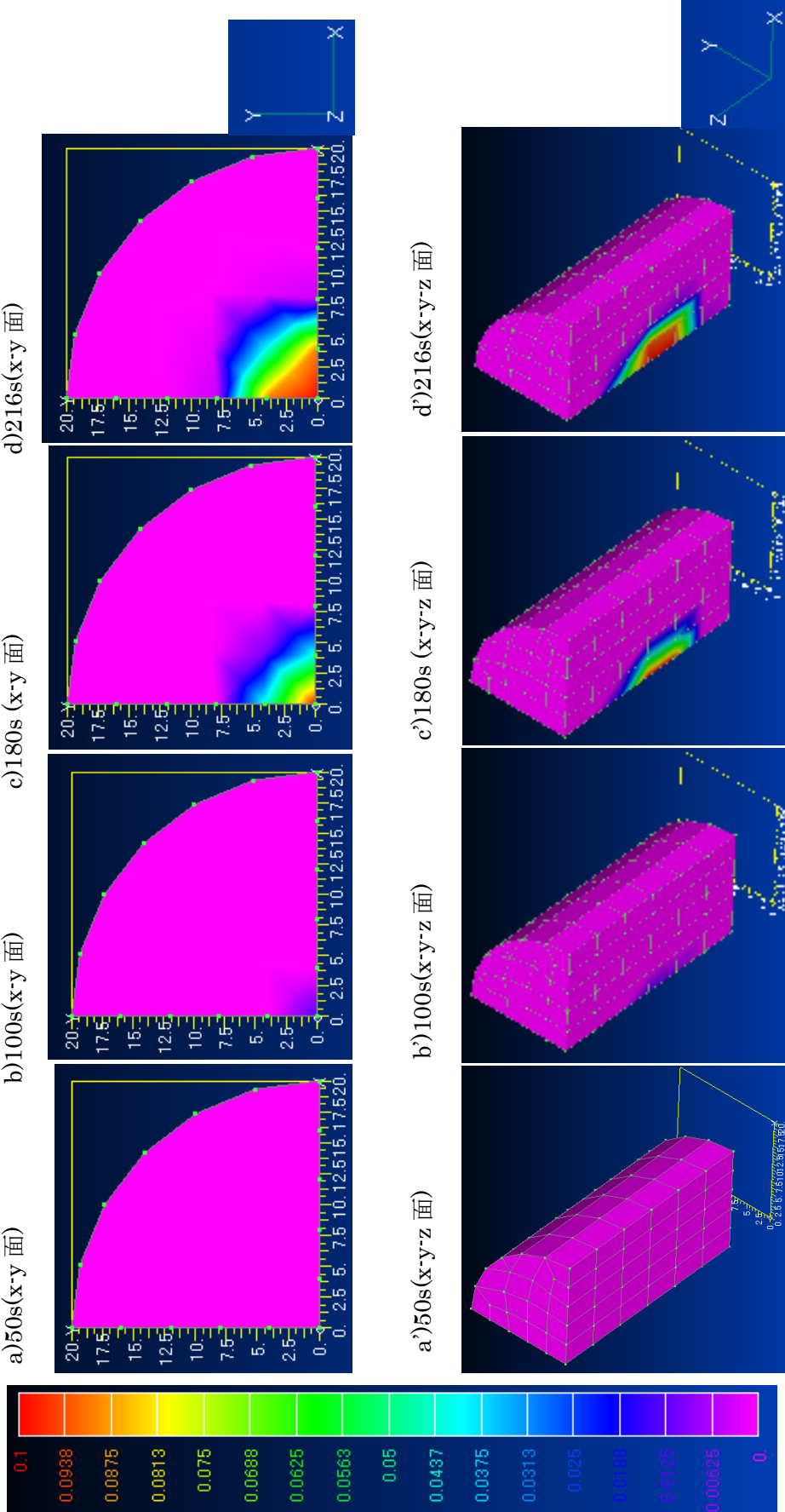


Fig.6-19 100W シミュレーション上での糖度の経時変化

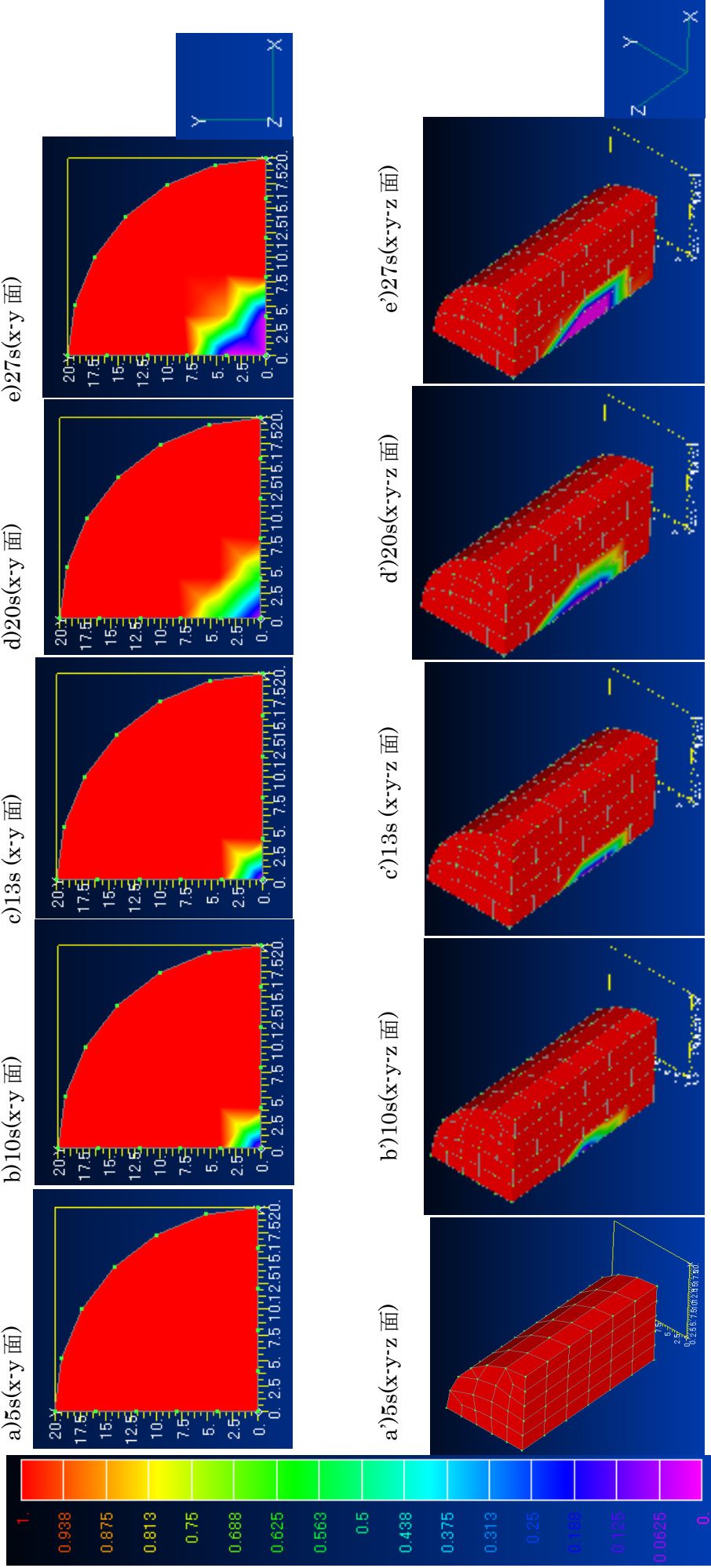


Fig.6-20 600W シミュレーション上での糊化の経時変化

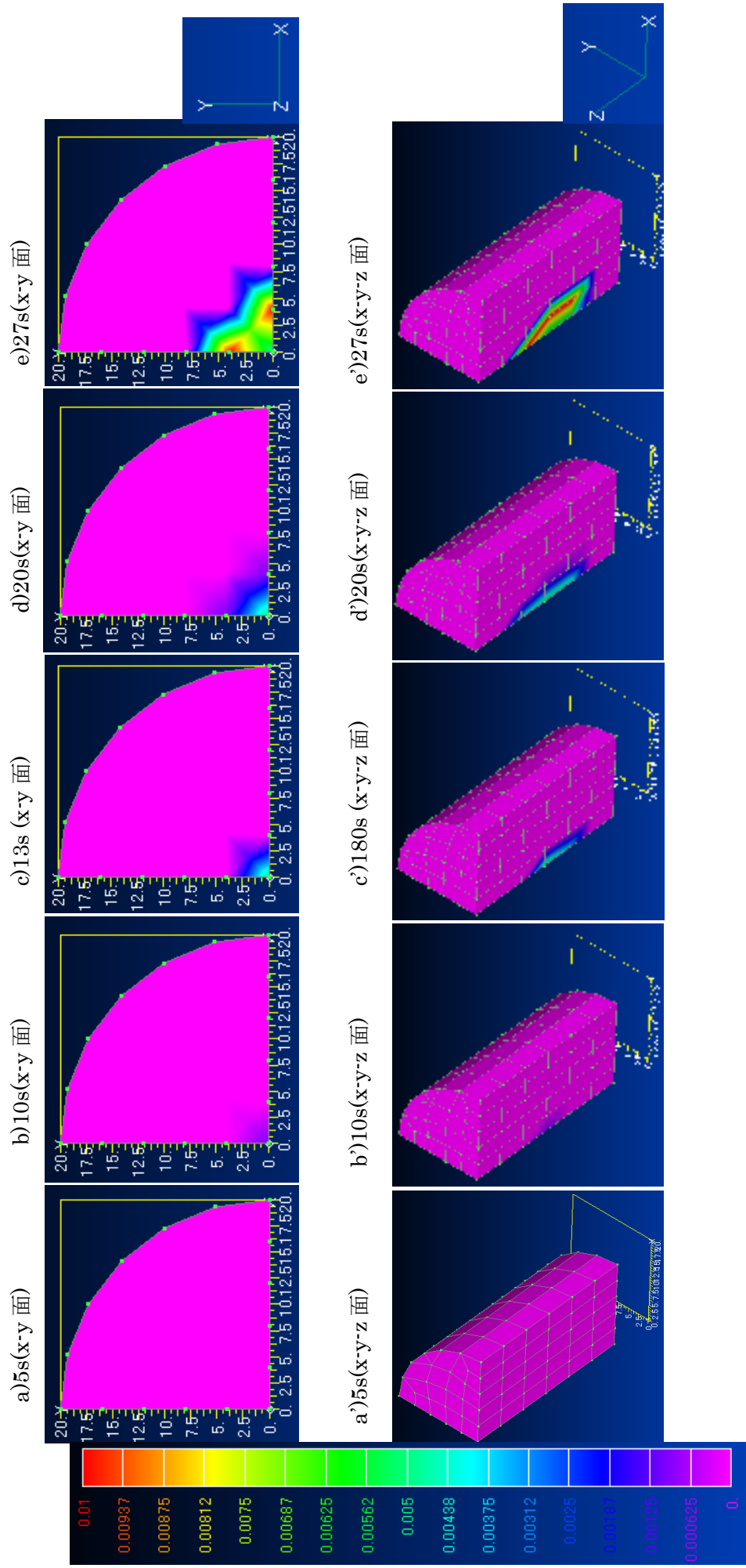


Fig.6-21 600W シミュレーション上での糖度の経時変化

ここで用いている反応式は第5章と同様であるため、GT および ST との関連性は非常に強い。よって、100W の場合 (Fig.6-16,18,19) では、昇温速度がゆっくりなため、酵素が失活温度に到達するまでの時間が長く、中心部では酵素失活まで糖度がゆっくりと上昇していることが分かる。中心部の最終糖度は 0.127(-)と、焼き芋の 0.25(-)には程度の糖度は生成されていないことが分かった。3-3-5. で甘味を感じる糖度はおよそ 0.2(-)程度であると示しており、これを考慮すると、シミュレーション上での 100W 加熱終了時の中心部では甘味がさほど感じられないと推測できる。側面部は、温度が GT (70°C 付近) に到達しておらず糖生成の前段階である糊化が進行していないことが分かり、加熱不足が明確である。また、糖度の上昇には、部分によって分布があることがわかり、シミュレーション上から実測値の糖度を考察すると、測定部位による糖度のバラつきが影響していると考えられる。さらに、100W 加熱ではより加熱時間を長くすることにより、全体を焼き芋以上の糖度にすることが可能であるといえる。

600W の場合(Fig.6-17,20,21) では、昇温速度が速く、中心部が 100W 中心部の加熱開始 55 秒 (100W では最速) に対し、加熱開始 6 秒で糊化が開始している。また、加熱開始 13 秒の段階ではすでに糊化が完了している。さらに、糖は加熱開始 10 秒から生成し始めるが、酵素が加熱開始 13 秒で失活してしまうため、わずか 3 秒の反応時間となっており、最終糖度は 0.005(-)で留まっている。側面部は、100W の側面部と同様、加熱不足であるといえる。

6-3-3. 糖度の比較

前項で示した糖度は、他の未糊化澱粉量および糊化澱粉量とは異なり値が小さいため、ここではスケールを拡大し、実測値と比較する。

結果を Fig.6-22, 23 に示す。

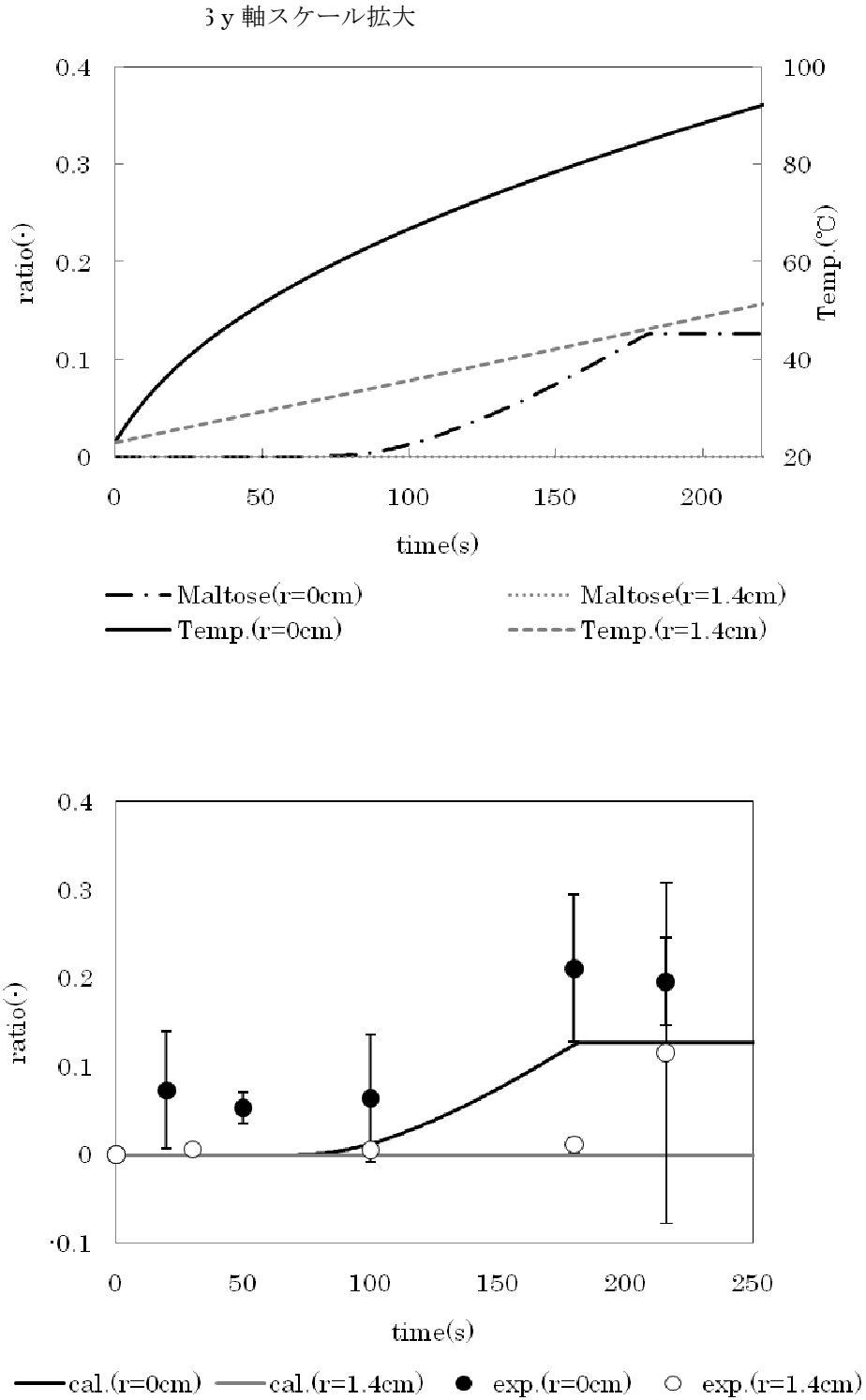


Fig.6-22 100W 実測値と発熱項を考慮したシミュレーション結果の糖度の比較

y 軸スケール拡大

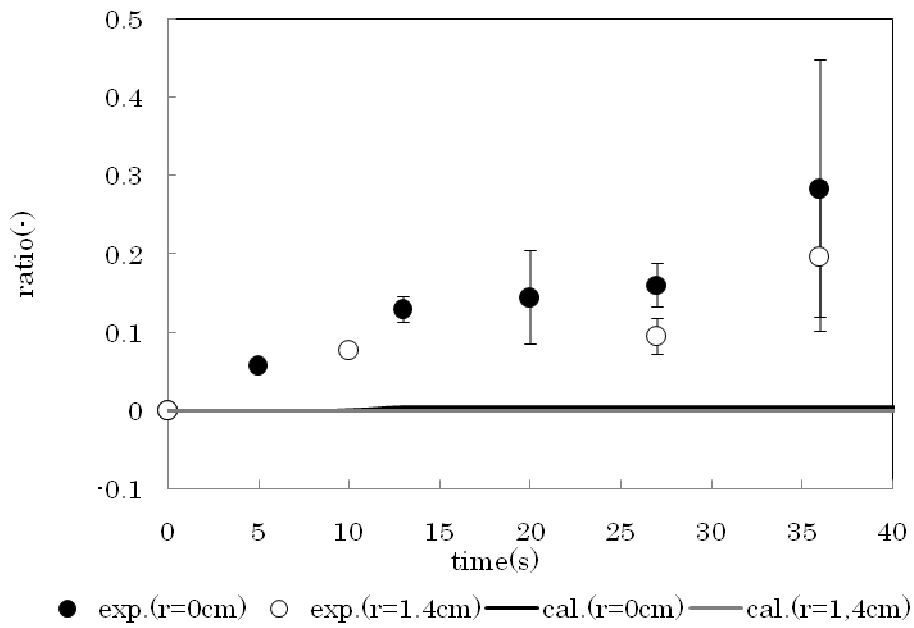
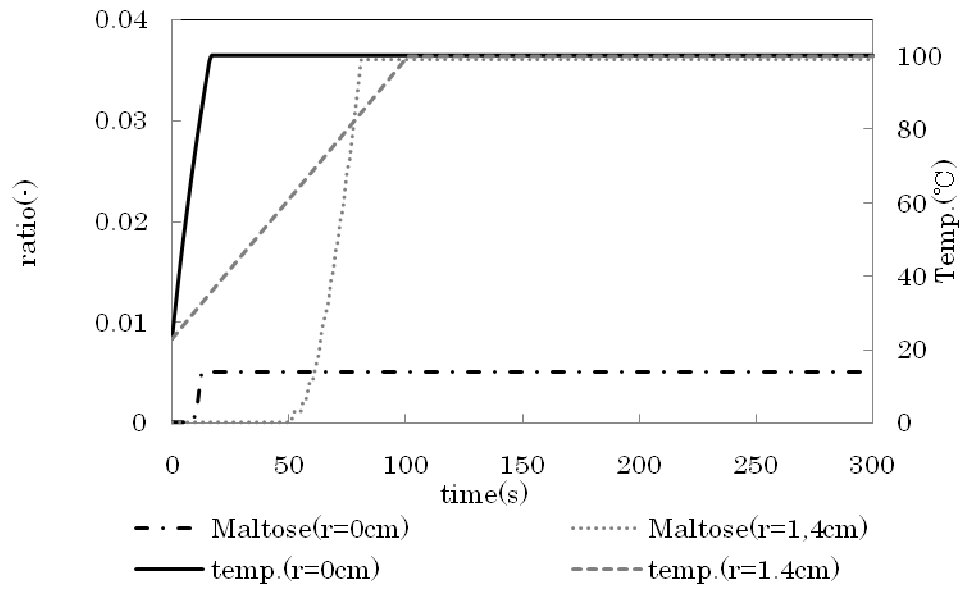


Fig.6-23 600W 実測値と発熱項を考慮したシミュレーション結果の糖度の比較

100W の場合、中心部の糖度は、第 5 章での伝熱を考慮しない計算値とは異なり、値だけでなく上昇傾向を含めても良好に一致した。側面部に関しては、温度が糊化温度に到達しておらず、さらには温度分布においてもさほどの中心部からの伝熱が効いていないことが分かっているため、糖度は 0(-)のままであった。実測値糖度は、エラーバーが大きいいため、今後実測値を再検討する必要がある。

600W の場合では、実測値の糖度が計算値よりも大幅に大きな値を示しており、これは第 5 章でも同様の結果となった。

6-4. 第 6 章の結論

本シミュレーションは、温度履歴の点では、中心部および側面部での計算値と実測値の比較において、100W では中心部、600W では側面部とマイクロ波の影響を受けていないと思われる部位が実測値とよく一致していることが分かった。しかし温度分布では、実測値が加熱開始の中心部の温度が高い山状から、加熱の進行と伴って分布のない平板状となる伝導伝熱の傾向がみられるのに対し、計算値では終始中心部が高い山状の温度分布となった。この結果より、伝導伝熱の考慮が乏しいように見えるが、本プログラムでは Eq.(6-9)では伝導伝熱を考慮した伝熱解析を行っている。また、フィティングパラメータがない状態での実測値と計算値の温度履歴の一致は良好であると判断できるため、本シミュレーションで得た $WAVE_j\omega$ の発熱量は信憑性が高いといえる。しかし、より実験値に近い値を得るためには、サツマイモ内部の温度に対応した誘電特性を用い、解析するべきであるため今後再検討が必要である。

また、各反応生成物の割合に関しては、実測値および文献より抜粋した反応速度等の値の再検討が必要であると考えられる。

しかし、全体的には実測値と計算値がけた違いに異なることはないため、本シミュレーションのある程度の妥当性は確認できた。

第7章 総括

- ①加熱試料は、市販のサツマイモを用い、皮を除去した後、円筒形に成形後プラスチックフィルムで覆ったものとした。
- ②精製澱粉と生サツマイモ澱粉との糊化温度は異なり、精製澱粉は 65.8°Cであるのに生サツマイモ澱粉は 76°C(±2.3°C)となった。
- ③マイクロ波加熱で理想の糖度が得られない原因は、急速加熱の場合で起きるイモ内部の急速な昇温であり、低出力を用いて加熱すれば、時間はかかるものの焼き芋と同程度の糖度を得ることは可能であると予測できた。
- ④サツマイモの糊化には、各温度帯での終末糊化度 TEG が存在することが分かった。さらに、糊化度と同様の条件で糖度の測定を行ったところ、不溶型酵素の作用が最大であると考えられる 80°Cの糖度が最も高かった。
- ⑤サツマイモの糖度を上昇させるには、80°Cを長時間維持することが最も有効であると考えられる。の温度帯を維持すれば、加熱方式に関係なく高い糖度を得ることが可能であると考えられる。
- ⑥サツマイモの各反応生成物のプログラムを作成し、伝導伝熱での昇温速度での解析を行ったところ、実測値と良好に一致したため、用いた反応速度定数等のある程度の妥当性は示されると同時に、基本プログラムが完成した。
- ⑦発熱項からの伝熱を考慮しないシミュレーションでは、さほど一致しなかった。
- ⑧シミュレーションから、高出力 600W 加熱のようなマイクロ波加熱での急速な昇温速度が、サツマイモ内で起きる全反応に影響しているということが明確となった。さらには、この昇温速度の影響により、糖化反応の前段階となる糊化反応は十分に進行しているにも関わらず、糊化後から酵素失活までの酵素作用時間が十分でないうちに酵素が失活するため、糖化反応が進行しないという具体的な点まで明確にすることができた。
- ⑨Femap でモデルを作成し、WAVEj ω 解析により得られた発熱量から、基本プログラムで計算し、より実験系に近いシミュレーションを作成した。
- ⑩シミュレーション上の温度履歴において、計算値と実測値の比較では、100W では中心部、600W では側面部とマイクロ波の影響を受けていないと思われる部位が実測値とよく一致していることが分かった。

- ⑪発熱項を考慮したシミュレーション上の糖度においては、伝熱を考慮しないシミュレーションでは一致しなかった、100W 加熱時の計算値および実測値が良好に一致した。
- ⑫発熱項を考慮したシミュレーションで用いているプログラムや WAVEj^ω から算出された発熱量の信憑性は高いことが分かったが、モデルの妥当性、反応速度および頻度因子、実測値の再検討が必要である。

文献目録

1. 肥後温子. 電子レンジ・マイクロ波食品利用ハンドブック 日刊工業社, Page 3 ~ 20, 25 ~ 32.
2. 時村金愛ら. 品種の異なるサツマイモ澱粉の澱粉ゲルの老化と澱粉特性. 鹿児島県農業試験場研究報告. 2004.03.26, No.32 Page.71-79.
3. **et.alVHAGENIMANA.** Distribution of Amylases within Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Root Tissue. *J Agric Food Chem.* 1997, Vol.40 No.10 Page.1777-1783.
4. **et.alMWilliam.** Effect of lye Peeling Condition on Phenolic Destruction, Starch Hydrolysis, and Carotene Loss in Sweetpotato. *Journal of Food Science.* 2006 08 25, Vol.47 Issue.3 Page.810-812.
5. 小倉長雄ら. 野菜類の β -アミラーゼについて II) サツマイモの加熱調理とマルトースの生成量. 山脇学園短期大学紀要 36号. 1998, Page.23-30.
6. 山口美代子 桶上純子 北村由香里. さつまいもの加熱調理について. 田園学園女子大学論文集 29. 1994, Page.329-337.
7. 桐潤壽子 ・ 久保田紀久枝 . 家政学雑誌 . 1976, Vol.27 No.6 Page. 22 ~ 26 .
8. 田中史彦ら. サツマイモのマイクロ波加熱過程シミュレーションとデンプンの糊化. 農業生産技術管理学会誌 13(2). 2006 , Page.80-85.
9. **et.alSawaiJun.** A comparison of the hydrolysis of sweetpotato starch with β -amylase and infrared radiation allows prediction of reducing sugar production. *International Journal of Food Science and Technology.* 2004, No.39 Page.967-974.
10. **et.alO.O.Fasine.** Thermal and Dielectric Properties of Sweetpotato Puree. *International Journal of Food Properties.* 2003, Vol.6 No.3 Page.461-472.
11. 河野友美 編. 新 食品事典 5 野菜・藻類. 出版地不明 : 真珠書院, 1992 01 30, Page.160162,163.
12. 星野忠彦 松本エミ子 高野敬子. 食品組織学. 出版地不明 : 光生館, 1998 06 15, Page.113,114,233.234.
13. 宮崎文史. サツマイモの成分変化に及ぼすキュアリング処理と貯蔵条件および加熱処理の影響. 園芸学会誌. 1990 12, Vol.59 No.3 Page.649-656 .
14. 吉儀尚浩. アミラーゼの進歩. Page.82-87.
15. 二国二郎. 澱粉化学ハンドブック. 朝倉書店, 1989 11 01, Page.36,37,242.
16. 小柱フミ子. 澱粉の糊化過程における吸熱温度. 鹿児島県立短期大学紀要 . 1987, Vol.38 Page.19~34.
17. 澱粉分解酵素. (オンライン) http://www.hbi-enzymes.com/HBI_Amylaze.htm.
18. 馬場透. サツマイモの高度加工利用に関する研究. 鹿児島県農業試験場研究報告. 1990, 第18号 68-70頁.
19. 江口弘. 北海道における大規模合理型澱粉工場の機構とその排水処理について. Page.17-20.
20. 川崎通夫 松田智明 長男信雄. サツマイモ塊根におけるプラスチックド-アミロプラスチック

系の電子顕微鏡観察. 日本作物学会記事 第6巻, 1996, Page.245-246.

21. 川崎通夫 松田智明 新田洋司 . ジャガイモ塊根におけるプラスチック-アミロプラスト系の微細構造とデンプンの合成・蓄積に関する電子顕微鏡観察. 日本作物学会記事 第68号, 1999, Page.266-274.

22. **et.alJ MAguilera**. Microstructural changes of potato cells and starch granules heated in oil. Food Research International. 2001, Vol.43 No.10 Page.939-947.

23. **Naoyoshi InoueHidetugu Fuwa**. Structure and Functional Properties of Starch. Food Foods Ingredients Japan. 2003, Vol.208 No.11 Page.895-902.

24. 前波清隆ら. 甘藷蒸切干製造における中白の発生防止とマルトース生成背制御. 日本食品科学工学会誌. 2005, Vol.52 No.4 Page.172-177.

25. **et.alFukuokaMika**. Determination of the terminal extent of starch gelatinization in a limited water system by DSC. Journal of Engineering. 2002, Vol.53 Page.39-42.

26. **et.alYGOMI**. The rate of starch gelatinization as observed by PFG-NMR measurement of water diffusivity in rice starch/water mixtures. Journal of food Enginiaring. 1998 06, Vol.36 No.4 Page.359-369.

27. **etal.C.I.PRAVISANI**. Kinetics of starch gelatinization in potato. Journal of food science. 2006 08 25, Vol.50 Issue 3 Page.657-660.

28. **et.alJ.C.KIM**. Amylolytic hydrolysis of native starch granules affected by granule surface area. Journal of food science. 2008 11, Vol.73 No.9 Page.C621-C624.

29. 越島哲夫. 普及版 マイクロ波加熱技術集成. 出版地不明: 株式会社 エヌ・ティー・エス, 2004 11 12, Page.391.

30. 大森豊明. 電磁波と食品. 出版地不明: 株式会社 光琳, 2005 11 30. Page.53-54.

31. 倉島秀夫. 電子レンジ加熱における容器材料の影響. 日本 AME 学会誌 . 2006, Vol.14 No.3 Page.339-345.

謝辞

本研究におきまして、多大なご指導、ご協力いただきました酒井昇教授，福岡美香助教授にとっても深く感謝いたします。

また，3年間あらゆる面で何かと協力してくださった同熱操作工学研究室修士2年の皆さん，先輩，さらには後輩の皆さんに深く感謝申し上げます。