

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

加熱処理におけるジャガイモの物性変化と反応速度
解析

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-07-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 川口, 毬 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2902

修士学位論文

加熱処理における
ジャガイモの物性変化と反応速度解析

2019 年度
(2020 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
食機能保全科学専攻

川口 毬

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景および目的	1
1.2 ジャガイモについて	2
1.2.1 分類	2
1.2.2 成分	2
1.2.3 横断面組織構造	2
1.2.4 粉質系と粘質系	2
1.3 デンプン	3
1.3.1 構造	3
1.3.2 糊化	5
1.3.3 デンプンの糊化の評価法	6
1.4 ジャガイモのテクスチャー変化	7
1.5 本論文の構成	7
1.6 本章の参考文献	9
第2章 ジャガイモの加熱調理における物性変化	11
2.1 試料および実験方法	11
2.1.1 試料の選定方法および保存方法	11
2.1.2 加熱試料の作製	13
2.1.3 温度測定	13
2.1.4 含水率測定	13
2.1.5 力学物性測定	14
2.2 結果と考察	14
2.2.1 温度測定	14
2.2.2 含水率測定	15
2.2.3 力学物性測定	17
2.3 まとめ	19
2.4 本章の参考文献	20
第3章 デジタルマイクロスコープを用いたホクホク感の解析	21
3.1 試料および実験方法	21
3.1.1 測定領域の決定	21
3.1.2 切断面の3D画像撮影	21
3.2 結果と考察	22
3.2.1 測定領域の決定	22
3.2.2 切断面の粗滑度測定	23

3.3	まとめ	30
3.4	本章の参考文献	31
第4章	糊化反応の解析	32
4.1	方法	32
4.1.1	試料作製および撮影手順	32
4.1.2	色彩値と未糊化デンプン粒子の占める割合の関係式の決定	33
4.1.3	終末糊化度の決定	34
4.1.4	糊化速度式の決定	35
4.1.5	糊化反応の速度論的取り扱い	35
4.2	結果と考察	36
4.2.1	色彩値と未糊化デンプン粒子の占める割合の関係式の決定	36
4.2.2	終末糊化度の決定	38
4.2.3	糊化速度式の決定	42
4.3	まとめ	44
4.4	本章の参考文献	45
第5章	ジャガイモ調理過程の熱移動および反応の速度論的解析と「ホク度」評価	46
5.1	熱移動基礎式	46
5.2	デンプンの糊化・分散反応	47
5.3	ペクチンのB脱離による分解反応	48
5.4	計算に必要な熱物性値	50
5.5	結果と考察	50
5.5.1	温度計算	50
5.5.2	デンプンの糊化・分散	52
5.5.3	ペクチンの分解	54
5.5.4	加熱温度を変更した場合のジャガイモ品質の予測	56
5.6	まとめ	58
5.7	本章の参考文献	59
第6章	総括	60
	謝辞	62

第1章 序論

1.1 研究背景および目的

イモ類の中でも私たち消費者に身近なジャガイモは、世界で多く栽培されており、その栽培面積は約 1675 万 ha にのぼる [1]。日本人 1 人あたりのジャガイモ年間消費量は、1970 年代後半から食生活の洋風化と加工食品の利用とともに伸び、2000 年では 18 kg に達している [2]。ジャガイモは味が淡白であることから、他の食品や多くの調味料・香辛料と調和する事ができ、その用途は幅広い。1960 年にはほとんどなかった加工食品用のジャガイモの消費量は、食生活の変遷に伴って外食・惣菜産業やレトルト食品等の需要が増え続けたことで、現在では家庭内で調理される消費量の 2 倍以上となっている [2]。家計調査によると、1980 年代後半からは、ジャガイモが原料として使用される惣菜（コロッケ、サラダ）の購入金額が増加し、サラダについては青果用の購入金額を上回るようになった [3]。このような背景から、外食・惣菜・加工食品産業においては、美味しく高品位な加熱調理ジャガイモを安定的に製造することが求められている。

しかし、ジャガイモの品質についてその良し悪しを定める具体的な指標はなく、官能評価によって判断されているのが現状である。また、加熱後のジャガイモの美味しさは「ホクホク感」が重要であると言われているが、現在の製造工程において、その「ホクホク感」を測る指標はない。

加工食品等の製造工程で、必ずといってよいほどその目的に応じた加熱処理を施すが、その際の加熱媒体は、熱風・熱湯・蒸気などが一般的である。特に蒸気による調理（蒸煮加熱）は、外食・加工食品業界においてジャガイモを用いた食品の製造に広く利用されている。

以上の背景から、本研究では、蒸煮加熱におけるジャガイモの物性ならびに組織変化を把握し、解析することを目的とした。そして、加熱による変化と食味との関係について調べるとともに加熱処理後の品質を表す定量的な指標について検討し、加熱後のジャガイモの品質を予測可能にすることを目指した。蒸煮過程の現象を予測できる解析モデルを得ることができれば、安定的に高品質な加熱ジャガイモの製造が行えるようになると考えられる。また、品種のバリエーションや収穫時期に対応した適切な蒸煮条件の予測・提案が可能となることも考えられる。

1.2 ジャガイモについて

1.2.1 分類

ナス科ナス属の一年生草本で、地下茎の先端に養分を蓄積して肥大した塊茎を食用にする [4]. 原産地は南米アンデス高地で、日本では 4~6 月に収穫される春作（長崎）と 8~10 月に収穫される夏作がある [1]. 全国的に栽培されている男爵イモは、栽培面積は最も多い品種で、球形でやや平たく、皮の色は淡黄褐色である [5]. メークインは、1917 年ごろからイギリスから導入された品種で、長紡錘形で皮色は淡黄色、肉質は黄色みをおびている. ジャガイモの中ではデンプン含量が少なく、煮崩れしにくい [5].

1.2.2 成分

成分含量は 100g あたり、水分 79.8, 炭水化物 17.6, タンパク質 1.6, 脂質 0.1, 灰分 0.9 である [6]. 主成分はデンプンで、ビタミン C やミネラル(カリウム), 食物繊維が多い [1].

1.2.3 横断面組織構造

ジャガイモの横断面組織構造を Fig.1-1 に示した. 表面には 7~8 個の目といわれる凹陷部があって、ここから芽が群生する. 表層は周皮でその内部に皮層がある. その内部は髓で、維管束環によって皮層と分けられている. 髓の柔細胞はデンプン粒を多く含み、外髓と内髓とに区別される. 外髓はデンプンを多く含み粉質で、内髓はデンプン粒がわずかに少なく粘質である [4].

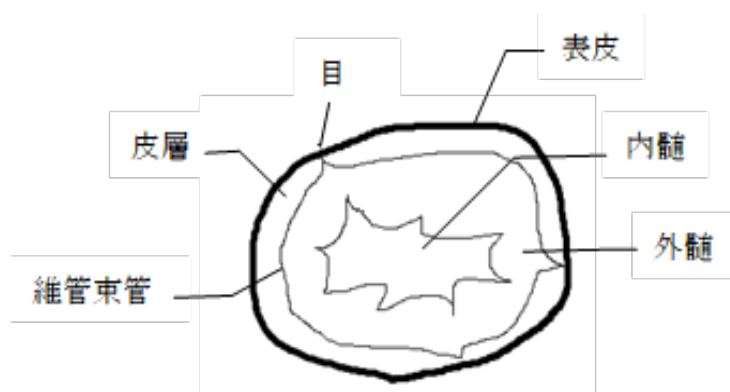


Fig.1-1 ジャガイモの横断面組織構造

1.2.4 粉質系と粘質系

ジャガイモは加熱の挙動から経験的に「粉質系」と「粘質系」に大別され、各々の代表品種として男爵およびメークインが知られている. この加工特性の違いについては様々な観点から研究がなされている (Table 1-1). ジャガイモの比重 (デンプン蓄積量) に関係していると

考えられており、一般的に粉質系のイモの方が粘質系よりもホクホク感を強く感じるとされている。しかし、粘質系のイモであっても粉質系と同様の状態になる場合もあり、比重が大きくなるほど柔らかく崩れやすいテクスチャーを示す [7].

この加熱特性の違いには、細胞骨格を成す細胞壁多糖類の組成と熱的挙動が大きく関与していると考えられている。佐藤ら [7]や中村ら [8]の研究によれば、加熱によるジャガイモのテクスチャー変化は細胞の分離性に起因すると考えられ、比重が高いほど細胞同士の結着力が弱まって分離しやすい粉質系となると報告されている。

Table 1-1 ジャガイモの加工特性に関する既往の研究

着目点	論文
	比重の異なるバレイショより調製したマッシュ試料の物理的性状について [9]
比重	ジャガイモのデンプン含量が調理特性に及ぼす影響 [10] 水煮バレイショの硬さの測定法 [11]
細胞 分離性	ジャガイモの加工特性に及ぼす細胞分離性に関する研究 [7]
酵素	ジャガイモ煮崩れに対する内在ポリガラクトナーゼの影響 [12]
化学	ジャガイモの品種および比重による加工特性の差異に関する酵素化学的研究 [8]

1.3 デンプン

1.3.1 構造

デンプンは植物の種子や根、茎、球根などに含まれる貯蔵物質で、植物体内では小さな粒状のデンプン顆粒として存在し、緑色植物の光合成によって生産される分子式 $(C_6H_{10}O_5)_n$ の炭水化物である [13].

デンプンはアミロース(amylose)とアミロペクチン(amylopectin)と呼ばれる 2 つの高分子により構成される(Fig.1-2) [14]. アミロースは D-グルコース分子(Fig.1-3)が $\alpha(1\rightarrow4)$ 結合により直鎖状に重合した高分子で、グルコース 6 残基ごとに 1 回転するというらせん構造をなしている。一方、アミロペクチンは D-グルコース分子が $\alpha(1\rightarrow6)$ 結合し、平均でグルコース残基 25 個に 1 個の割合で $\alpha(1\rightarrow6)$ 結合による枝分かれのある分岐構造をなしている。 [14]デンプン顆粒中において、一般にアミロースは 20~30%、アミロペクチンは 70~80%の含量を示す [15].

このように、アミロースとアミロペクチンはデンプン顆粒内において高次構造を形成し、ア

ミロースは非晶領域（アモルファス領域）を作り，アミロペクチンは結晶構造を作ることで規則正しい構造をなしている [14]. そのため，偏光下で観察すると特徴ある偏光十字(maltese cross)が見られ，デンプン粒子が複屈折性を有していることが確認できる [15].

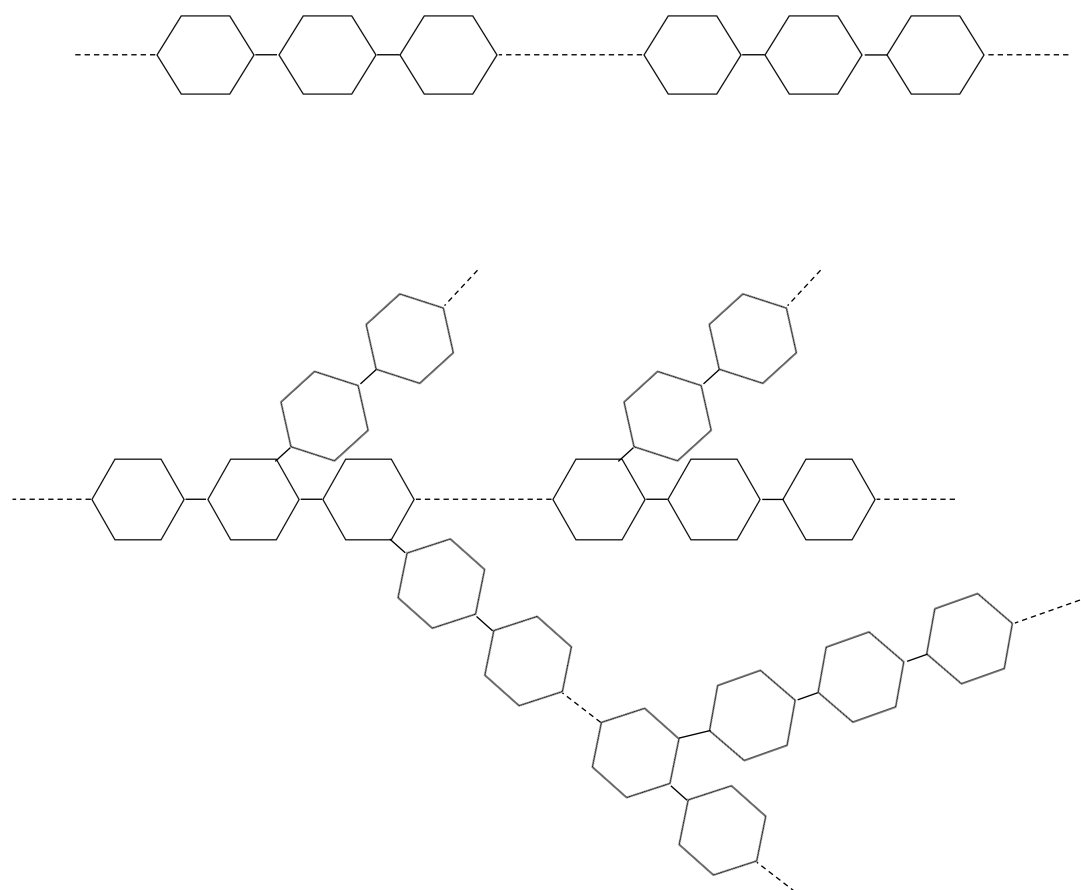


Fig.1-2 アミロース（上部）およびアミロペクチン（下部）の構造

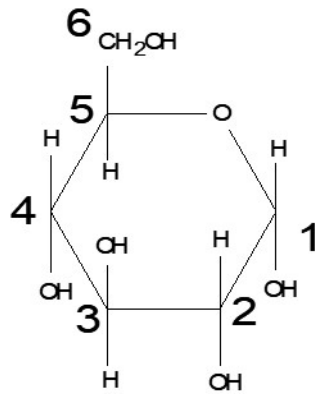


Fig.1-3 D-グルコースの構造

1.3.2 糊化

デンプンを水とともに加熱すると、デンプン内部の規則正しい構造は不規則な構造へと相変化する。これをデンプンの糊化(Gelatinization)と定義する場合もあるが、一般的に糊化とは、デンプンを水の存在下で加熱すると起こる様々なイベントの複合過程と理解されている [15].

デンプン顆粒に対して水分が十分にある系において、初期段階では、デンプン粒が水を吸収して徐々に膨潤し、ある温度で最大にして複屈折生が消失する(アミロース/アミロペクチンの相変化)。その後、デンプン顆粒は崩壊してアミロース/アミロペクチン鎖が溶出し、分散していく過程を経る(後期過程) [15]。このとき、デンプン懸濁液は白濁した状態から次第に透明になる [15]。これはジャガイモでも同様である (Fig.1-4)。



Fig.1-4 加熱による外観変化

また、糊化が生じる条件として水以外に温度が大いに関係している。ジャガイモデンプンは、おおよそ Table1-2 に示した糊化温度帯であるという報告がされている。

Table 1-2 ジャガイモデンプン（単離デンプン）の糊化温度

糊化開始温度[°C]	糊化ピーク温度[°C]	糊化終了温度[°C]	測定方法	参考文献
58.4	62.6	68.3	DSC	[16]
58.3±0.2	61.7±0.0	71.7±2.1	DSC	[17]
58.9	65.2	79.2	DTA	[18]
57.7	61.9	82.4	DSC	[19]

1.3.3 デンプンの糊化の評価法

前述の通り、デンプンの糊化は様々なイベントの複合過程からなることから、個々の過程を検出する手法も様々ある。

酵素法 [20]は最も一般的な糊化の評価法で、これは糊化デンプンがアミラーゼ（消化酵素）により消化されやすく、生デンプンが消化されにくいことを利用し、種々のアミラーゼを用いて被消化性を検定する方法である。一方、濁度法 [21]は、デンプン・水懸濁液中のデンプン粒子が糊化することで溶液の濁度が低下するのを光学的に検出する方法である。両者は測定対象が粒子群レベルであり、酵素による被消化性の増加や濁度の低下は試料中に含まれるデンプン粒子のうち糊化した粒子数に比例すると考えられる。また、すべての粒子が糊化した場合の値を糊化度 100%の基準とし、この値と比較することで糊化度を決めている。糊化の初期段階を検出する DSC (*Differential scanning calorimetry*)法も同様であり、DSC 法 [22]ではデンプン粒子の結晶構造およびアモルファス領域の溶解に要する熱量変化が、試料中の糊化デンプン粒子の量に比例すると解釈して糊化度を決めている。これに対し複屈折性を指標とする方法は、粒子群に含まれる糊化粒子および未糊化粒子の個数を直接数える方法である。糊化した粒子が複屈折性を消失させると偏光十字を消失させることから、試料を加熱しながら顕微鏡で観察し、視野の中にある全粒子数を数え、偏光十字が消失した粒子の数を数えて糊化度を定める [23]。

ジャガイモデンプンの糊化反応について、その反応メカニズムだけでなく速度論的な観点から検討した研究もこれまで多く報告されている [24] [25]。速度論的解析には DSC を利用した研究が多く、それら既往の研究では試料として単離・精製されたジャガイモデンプンを用いており、組織そのものを使用している研究例は少ない [26]。

1.4 ジャガイモのテクスチャー変化

野菜の細胞壁は、ヘミセルロース、セルロース、ペクチンが複雑に絡み合った糖鎖マトリクス構造で、ペクチンはヘミセルロースとセルロースを抱合して細胞間を結着している (Fig.1-5) [27]. 加熱による野菜の軟化については多くの報告があり、一般的にペクチンの β 解離により起こると考えられている [28]. 90°C以上の高温域で顕著に見られる現象で、これはジャガイモの軟化も同様である.

また、ジャガイモのテクスチャー変化にはペクチンの水溶化が大きく影響すると考えられている [7]. 高比重ジャガイモのペクチン量は低比重ジャガイモに比べて1.4倍多く、また、加熱により不溶性ペクチンが減少し水溶性ペクチンが増加する傾向は、高比重ジャガイモで顕著であるという報告がある. 水溶性ペクチンの増加と細胞間結着力の減少には相関が存在することがわかっている [7]ことから、ジャガイモの食味 (粉質や粘質) には、細胞間の結着力が影響することが考えられる.

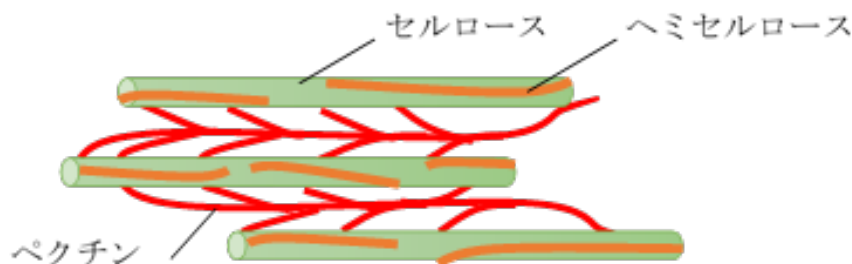


Fig.1-5 植物細胞壁の構造模式図 [27]

1.5 本論文の構成

本章は以下の章より構成される.

第1章では、本研究を行う背景および目的を述べ、ジャガイモについて、ジャガイモ内成分の変化や組織変化について記した.

第2章では、蒸煮加熱による物性変化を把握することを目的とし、硬さおよび含水率に着目した実験を行った. 加えて、品質と物性の関係について検討した.

第3章では、デジタルマイクロスコープを用いて切断面の画像解析を行い、ジャガイモの品質を定量的に分析することを試みた.

第4章では、ジャガイモの主要成分であるデンプンに着目した実験を行った. 複屈折性を利

用し，偏光顕微鏡画像の明るさの変化からその反応解析を行うことを試みた．

第 5 章では，加熱過程において品質に大きな影響を及ぼすと考えられるジャガイモ組織内のデンプンならびに細胞壁を構成するペクチンの挙動について反応速度解析を行い，物性変化を定量化することを行った．

第 6 章では，総括として，本研究の要約ならびに本研究により得られた成果を示した．

1.6 本章の参考文献

- [1] 社団法人農山漁村文化協会, “地域食材大百科 第1巻 穀類,いも,豆類,種実”, 343-345, 2010.
- [2] 長谷川美典, “カット野菜実務ハンドブック”, 株式会社サイエンスフォーラム, 2002, 101, 2002.
- [3] 田宮誠司, “ばれいしょの需要変化と品種の動向”, 野菜情報, 40-47, 2016.
- [4] 星野忠彦, 松本エミ子, 高野敬子, “食品組織学”, 光生館, 232, 1998.
- [5] 河野友美, “新・食品事典 5 野菜・藻類”, 真珠書院, 187-191, 1992.
- [6] 文部科学省, 五訂増補日本食品標準成分表, 文部科学省, 2005.
- [7] 佐藤広顕, “ジャガイモの加工特性に及ぼす細胞分離性に関する研究”, 日本食品保蔵科学会誌, 31, 6, 325-332, 2005.
- [8] 中村優, “ジャガイモの品質および比重による加工特性の差異に関する酵素化学的研究”, 日本食品保蔵科学会誌, 41, 1, 2015.
- [9] 佐藤広謙, 高野克己, 光浦暢洋, 谷村和八郎, 鴨居郁三, “比重の異なるバレイショより調製したマッシュ試料の物理的性状について”, 38, 12, 1071-1075, 1991.
- [10] 小宮山誠一, 目黒孝司, 加藤淳, 山本愛子, 山口敦子, 吉田真弓, “ジャガイモのデンプン含量が調理特性に及ぼす影響”, 35, 4, 336-342, 2002.
- [11] 古舘明洋, 目黒孝司, “水煮バレイショの硬さの測定法”, 北海道立農試集報, 73, 35-40, 1997.
- [12] 中村優, 内野昌孝, 佐藤広顕, 高野克己, “ジャガイモの煮崩れに対する内在ポリガラクトチュロナーゼの影響”, 日本食品化学工学会誌, 56, 5, 286-290, 2009.
- [13] 島原健三, “概説 生物化学”, 三共出版, 1991.
- [14] Anne-Marie Hermansson and Karin Svegmak, “Developments in the understanding of starch functionality”, Trends in Food Science & Technology, 7, 345-353, 1996.
- [15] 福岡美香, “澱粉質食品の加工技術/基礎技術/デンプンの糊化と老化”, 冷凍, 78, 907, 56-61, 2003.
- [16] 長尾慶子, 藤井彩香, “デンプン粒～水系の糊化にともなう状態変化の微視的および巨視的観察”, 日本調理科学会誌, 38, 1, 45-50, 2005.
- [17] 釘宮正往, 伊藤(藤村)知子, “ジャガイモから分離した細胞中に存在するデンプンの糊化”, 日本食品化学工学会誌, 43, 8, 951-955, 2005.
- [18] 高橋幸資, “澱粉の示差熱分析”, 澱粉科学, 29, 1, 56-67, 1982.
- [19] 三浦芳助, “熱分析によるデンプンの糊化・老化特性の解析”, 広島女子学院大学論集, 53, 79-87, 2003.

- [20] Toshiko Shiotsubo, “Gelatinization temprature of potato starch at the equilibrium state” , Agricultural Biological Chemistry, 48, 1, 1-7, 1984.
- [21] Lund, D. B., Wirakartakusumah, M., “A model for starch gelatinization phenomena. *ln* Mckenna BM editor” , Engineering and Food, 1, 425-432, 1984.
- [22] 福岡美香, 望月由和, 薛長風 崎山高明, 酒井昇, 渡辺尚彦, “マイクロ波によって中心部位を選択的に加熱処理したデンプン食品の製造法” , 日本食品化学工学会誌, 52, 11, 512-516, 2005.
- [23] 中村道徳, 貝沼圭二, “生物化学実験法 19 澱粉・関連糖質実験法” , 学研出版, 1986.
- [24] Katsutada Takahashi and Toshiko Shiotsubo, “Differential thermal analysis of potato starch Gelatinization” , Agricultural Biological Chemistry., 48, 1, 9-17, 1984.
- [25] Krzystof Pielichowski, Piotr Tomasik, Marek Sikora, “Kinetics of gelatinization of potato starch studied by non-isothermal DSC” , *Carbohydrate Polymers*, 35, 49-54, 1998.
- [26] C.I.PRAVISANI, A.N.CALIFANO, and A.CALVELO, “Kinetics of starch Gelatinization in Potato” , *Journal of Food Science*, 50, 3, 657-660, 1985.
- [27] 横山隆亮, 鳴川秀樹, 工藤光子, 西谷和彦, “植物細胞壁/高次構造の構築と再編” , 化学と生物, 53, 2, 107-114, 2015.
- [28] 香西みどり, “野菜の食味と加熱” , 日本食生活会誌, 17, 2, 100-104, 2006.

第2章 ジャガイモの加熱調理における物性変化

ジャガイモはそのほとんどの場合において加熱調理を施したのちに喫食される。加熱によりジャガイモは、柔らかくなるだけではなく、一般的に「ホクホク感」と表現されるような食感に変化する。「ホクホク」というテクスチャーは広く認知されており [1]、力学的特性や幾何学的特性を表現する用語として使用されている [2]。日本語テクスチャー用語について検討した既往の研究では、茹でたジャガイモから想起される用語として「ホクホク」が挙げられており、「ホクホク」は加熱したジャガイモの食感を表現する用語であることがわかる [3]。この特徴的な食感・品質は美味しさに関与すると考えられているが、これまで外観や食べたときの官能を主体として評価されているのが現状である。また、加熱後の品質は重要な要素である [4]とされ、これまで多くのテクスチャー変化等 [5] [6] [7]の研究は行われているが、品質と物性との関係は未だ明らかでない。

そこで、本章では、ジャガイモの加熱による物性変化を把握することを目的とし、硬さおよび含水率に着目して実験を行った。加えて、品質に影響を与える「ホクホク感」と物性の関係を検討し、加熱したジャガイモの品質の定量的な分析を模索した。

2.1 試料および実験方法

2.1.1 試料の選定方法および保存方法

試料には、「十勝清水産 男爵イモ」および「北海道産 メーカーイン」を使用した。試料サイズは野菜標準全道統一規格 [a] (Table 2-1)において、男爵イモでは L サイズを、メーカーインでは M サイズのものをを用いた。

ジャガイモは 5°C で保存した場合、水分量やデンプン量の増減はわずかであるという報告がある [b]。試料の条件を統一する目的から、5°C で冷蔵保存（ホシザキ株式会社製 ホシザキ業務用テーブル型冷蔵庫 RT-150MTF-ML）し、実験前に室温に戻してから用いた。また、ジャガイモの個体差を把握すべく、ライマン価および Brix 値を測定した。Table 2-2 には月ごとのジャガイモ試料全体の測定結果を示している。実験には、ライマン価 $18.0 \pm 2.0\%$ 、Brix 値 $6.0 \pm 1.0^\circ\text{Bx}$ のジャガイモを使用した。

Table 2-1 バレイショの出荷規格 [a]

量目基準	区分	1個の重量
10kg・20kg	3L	260g 以上
	2L	190g 以上 260g 未満
	L	120g 以上 190g 未満
	M	70g 以上 120g 未満
	S	30g 以上 70g 未満
	2S	30g 未満

・ライマン価測定

ジャガイモの空中重量 W_0 [kg]と水中重量 W_1 [kg]を測定し、式(2-1)および式(2-2)より比重 d [kg/m³] を算出してライマン価（デンプン価）を求めた。

$$d[-] = W_0 / (W_0 - W_1) \quad (2-1)$$

$$\text{Lyman value}[\%] = (d - 1.05) \times 214.5 + 7.5 \quad (2-2)$$

・Brix 値測定

ジャガイモをおろし金ですりおろし、ポケット糖度・温度計（ATAGO 製 PAL-J）を用いて Brix 値を測定した。

Table 2-2 ジャガイモ試料のライマン価および Brix 値 (n=7~15)

	ライマン価[%]	Brix 値[°Bx]
5月	13.79	6.22
6月	19.28	6.13
7月	18.89	5.90
平均	17.2±2.6	6.1±0.1
9月 (新ジャガ)	13.27	5.07

2.1.2 加熱試料の作製

包丁を用いてジャガイモを 20mm 角に切り出し、すみやかにレトルトパウチに入れて真空包装した。桃印 18-0 角型蒸器 29cm の 2 段目に水を約 5L 入れて沸騰させ、沸騰後、試料を入れて内火で加熱し、蒸し後 2min 間水冷した。このとき、立方体試料の中心温度と庫内の雰囲気温度を測定し、中心温度が 90°C に到達してから 0min, 8.5min, 15min, 22min, 37min の 5 つの蒸煮条件において加熱試料を作製した（以下、0min 試料, 8.5min 試料, 15min 試料, 22min 試料, 37min 試料とする）。温度測定にはシーエス熱電対（株式会社ツールハウス製 TCS-10150K, 1.0mm φ）を使用した。

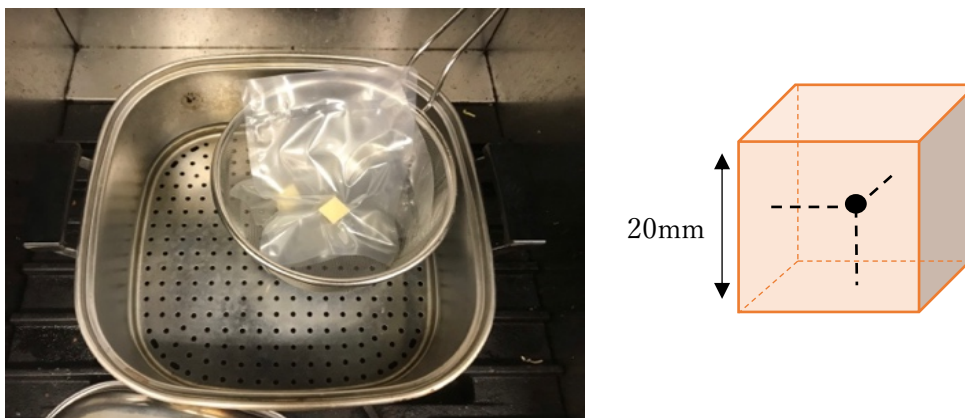


Fig.2-1 加熱の様子（左）と温度測定位置（右）

2.1.3 温度測定

先述した加熱試料の作製と同様の手順で加熱を行い、その時の中心温度および蒸し器内温度を測定した。ただし、加熱時間は 40 分とした。

2.1.4 含水率測定

未加熱および各加熱試料から 5×20×20mm を切り出し、これを 105°C の送風恒温槽で 5 時間乾燥させた。乾燥前 W_b [kg] および乾燥後 W_a [kg] の重量を測定し、式(2-3)から湿量基準での含水率を算出した。

$$\text{Moisture content [\%]} = \frac{W_b - W_a}{W_b} \times 100 \quad (2-3)$$

2.1.5 力学物性測定

未加熱のジャガイモから 20mm 角に切り出した試料および 5 つの加熱試料（0min 試料，8.5min 試料，15min 試料，22min 試料，37min 試料）について，試料の中心部をレオメータ（山電製 RE-3305）により破断応力を測定した．田村ら [8]の方法を参考にし，下記に示した測定条件で行った．

Table 2-3 破断試験の測定条件

項目	条件
歪み率	80%
アンプ倍率	1 倍
圧縮速度	1mm/s
格納ピッチ	0.08s
ロードセル	200N
プランジャー	シリコン製円形 (Φ8mm)

2.2 結果と考察

2.2.1 温度測定

蒸煮過程の庫内および試料中心部の温度履歴を Fig.2-2 に示す．初期に蒸し器内の温度が低下しているのは，蓋を開けて試料を入れたためである．加熱初期は 80℃付近まで速い昇温速度で加熱されていき，その後昇温は緩やかになった．加熱試料作製時の指標となる中心温度が 90℃になるにはおよそ 19min かかることがわかった．

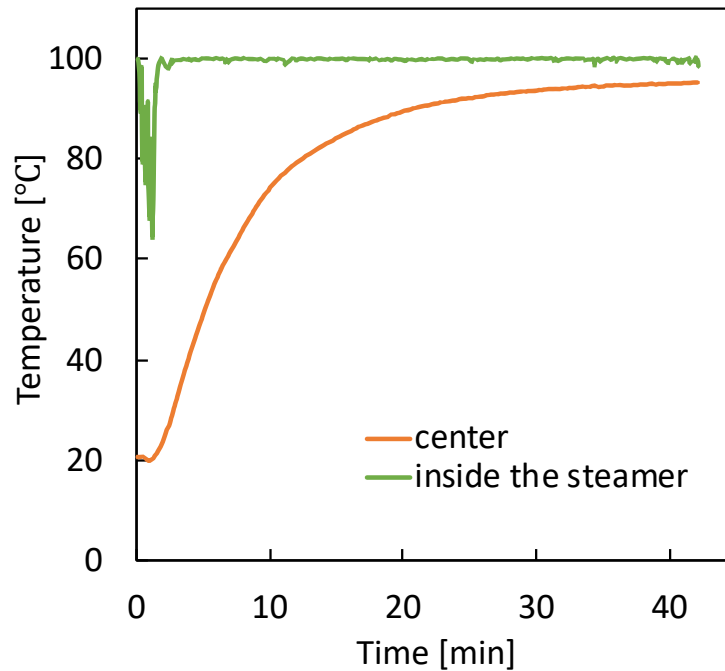


Fig.2-2 庫内および試料中心部の温度履歴

2.2.2 含水率測定

1時間ごとに試料重量の変化を Fig.2-3 に示す。加熱試料に比べて未加熱試料が早く恒量に達し、その他の試料も4時間の乾燥で恒量に達した。重量変化の最終値から式(2-3)を用いて含水率を算出した結果も Fig.2-3 に示す。未加熱試料の含水率が最も高くなり、およそ79%という結果であった。この値は日本食品標準成分表 [37]とおおむね一致していることから、本実験結果は妥当と考える。各加熱試料は未加熱試料よりもわずかに低い値であったが、おおむね近い含水率であった。試料をレトルトパウチから取り出す際、パウチ内部に水分の付着が観察できたことから、この含水率のわずかな違いは、加熱による試料からのドリップが原因であると考えられる。また、本実験では加熱試料ごとに使用したジャガイモが異なる。ジャガイモの個体差により、加熱試料における含水率にわずかに差が生じたと考えられる。

未加熱試料と各加熱試料を暗室において撮影したものを Fig.2-4 に示した。どの試料においても色調の変化は目視ではほとんど確認できず、ジャガイモの外観は加熱によってあまり変化しないことがわかった。

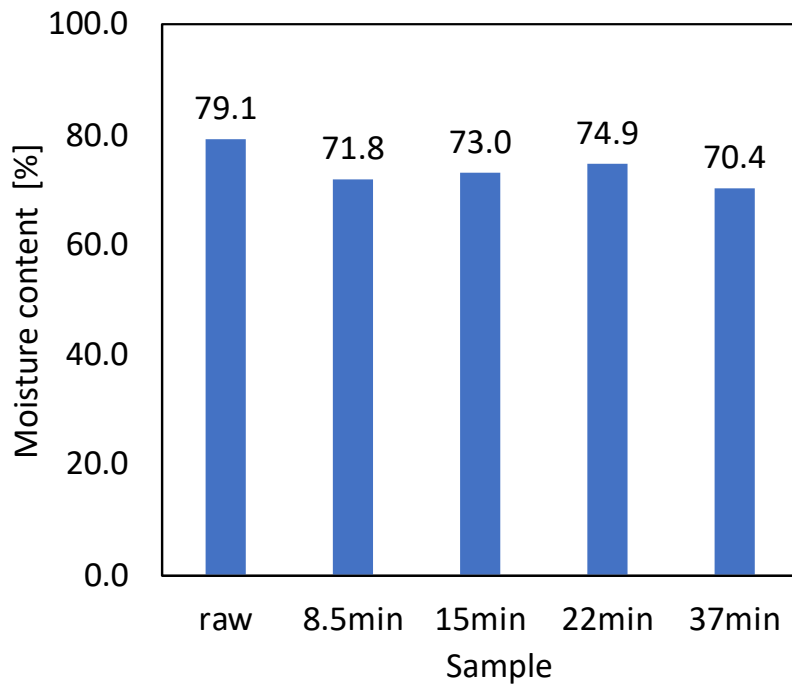
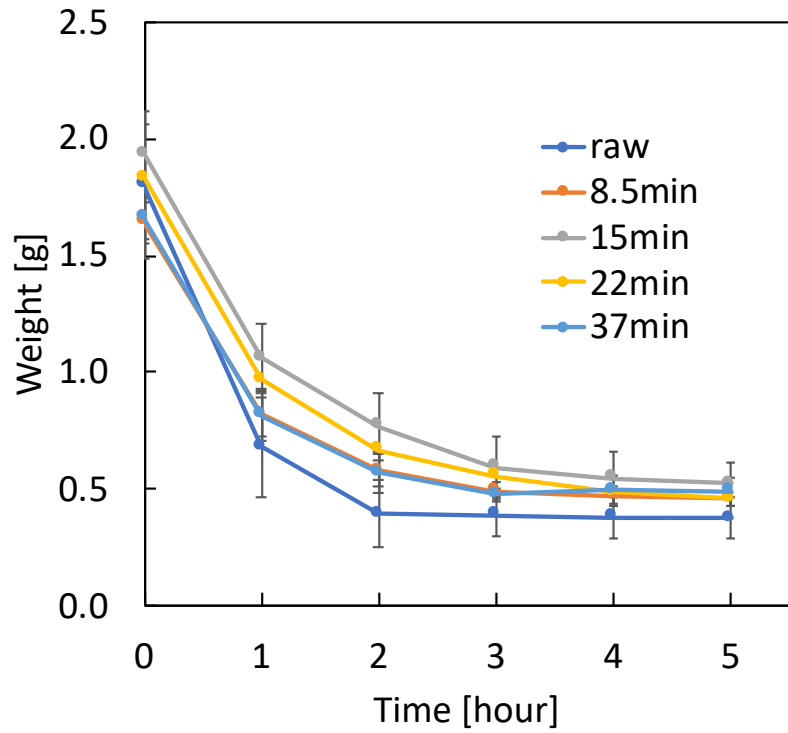


Fig.2-3 乾燥による試料重量の変化（左側）と恒量から算出した各試料の含水率（右側）

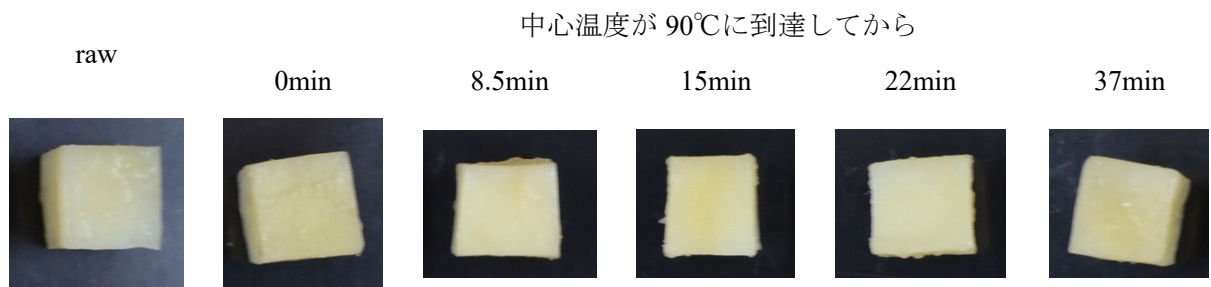


Fig.2-4 未加熱および加熱試料の様子

2.2.3 力学物性測定

既存のジャガイモの研究において硬さを測定する際、応力-歪み曲線における最大荷重での破断点について、その荷重値や応力値を硬さの値とすることが多い [6] [7] [10]. したがって、本研究においても、破断点の最大荷重における破断応力値をその試料の硬さを表す値とした。

未加熱試料および 5 つの蒸煮条件における破断応力値の結果は Fig.2-5 のようになった。各加熱試料の破断応力値は未加熱試料と比べて大幅に小さくなったものの、蒸煮時間の違いによる差はほとんど見られなかった。加熱後の試料のみの測定結果も同時に示している (Fig.2-5)。ここで、測定結果について有意差検定を行ったところ、どの加熱試料においても有意差はなかった。したがって、中心が 90°C に到達した時点で軟化はほとんど終了していることが考えられた。そして、ジャガイモの破断応力値は、一定時間の加熱後ではほとんど変化しないことがわかった。しかし、それぞれ官能評価をしたところ、中心温度が 90°C に到達してから 0min 試料および 8.5min の試料では固形感を感じたが、他の試料では固形感の無いなめらかな舌触りであった。また、中心温度が 90°C に到達してから 22min および 37min の試料では、なめらかさに加えて水っぽさを感じた。15min 試料はこれらのちょうど間の食感で、固形感がわずかに感じられ、ホクホクとしつつもなめらかな舌触りで高品位に感じられた。以上より、加熱したジャガイモにおいてでは、破断測定では捉えられない品質の差が生じていることが示唆された。よって、ホクホク感といった品質を分析する方法として破断測定は相応しくないことがわかり、他の指標を検討する必要があると考えた。

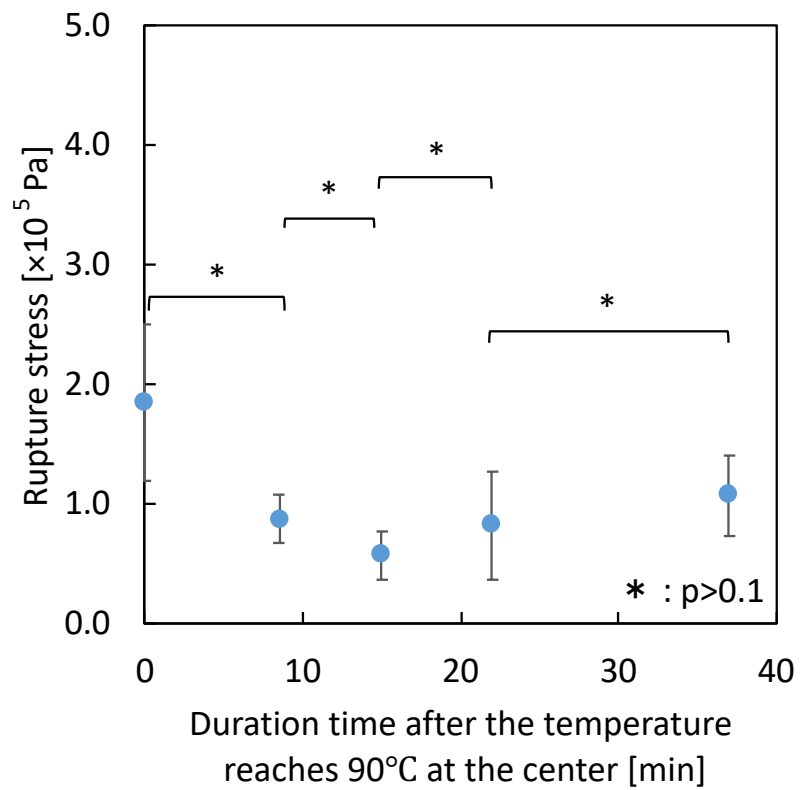
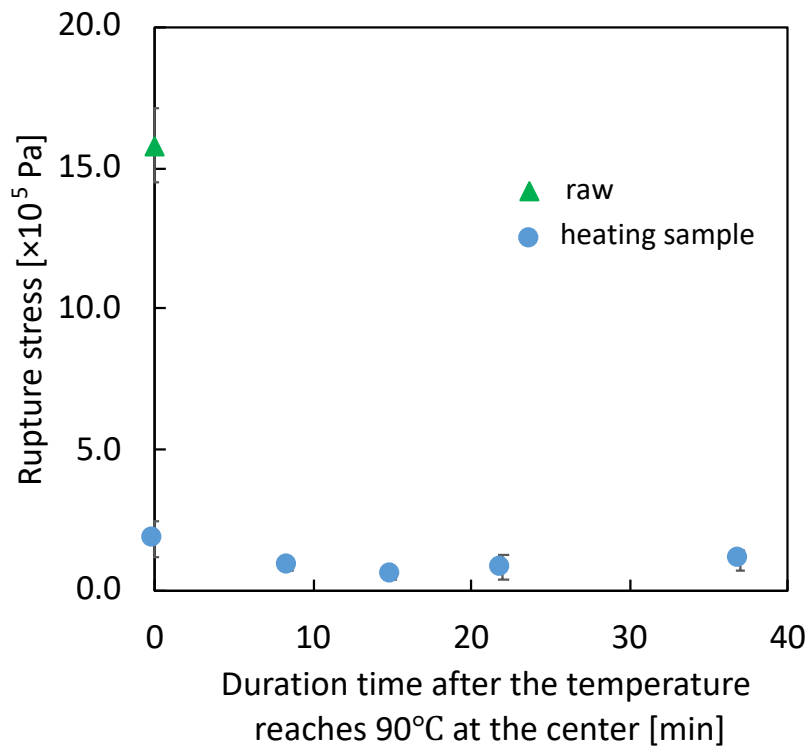


Fig.2-5 未加熱および蒸煮試料の破断応力測定
 (上部：未加熱試料含む，下部：未加熱試料含まない)

2.3 まとめ

本章では、含水率と硬さに着目した測定を行い、加熱によるジャガイモの物性変化とホクホク感といった品質との関係について検討した。含水率では、加熱の有無による差異はあったものの、加熱時間による差はほとんどないことがわかった。よって、本実験の試料においては、水分量は蒸煮加熱後のジャガイモ特有の品質に直接的な影響は及ぼさないと考えられた。

破断測定では、加熱試料は未加熱試料と比べて大幅に破断応力値が小さくなったが、蒸煮時間の違いによって破断応力値に差は見られなかった。しかし一方で、官能評価では蒸煮条件・加熱時間によって違いが感じられ、食感・品質に差が生じることが示唆された。よって、ジャガイモには、破断測定で捉えることが難しい、加熱による物性・品質変化が起こることがわかった。加熱ジャガイモの品質を定量的に分析するためには、他の指標を模索する必要があると考えられた。

2.4 本章の参考文献

- [1] 早川文代, 井奥加奈, 阿久澤さゆり, 米田千恵, 風見由香利, 西成勝好, 馬場康維, 神山かおる, “質問紙法による消費者のテクスチャー語彙調査”, 日本食品化学工学会誌, 53, 6, 327-336, 2006.
- [2] 早川文代, “日本語テクスチャー用語の体系化と官能評価への利用”, 日本食品化学工学会誌, 60, 7, 311-322, 2013.
- [3] 早川文代, 風見由香利, 阿久澤さゆり, 井奥加奈, 西成勝好, 神山かおる, “種々の食物名からみた日本語テクスチャー用語の特徴づけ”, 日本化学工学会誌, 65, 7, 363-374, 2018.
- [4] 吉田稔, “バレイショの品質評価”, ポテトサイエンス, 11, 69-75, 1992.
- [5] María Dolores Alvarez, Wenceslao Canet, María Estrella Tortosa, “Kinetics of thermal softening of potato tissue (cv. Monalisa) by water heating”, Eur Food Res Technol, 212, 588-596, 2001.
- [6] 岡崎尚, 鈴木寛一, 前重静彦, 久保田清, “蒸煮によるジャガイモの軟化現象に関する速度論的解析”, 日本食品工業科学会誌, 38, 9, 784-788, 1991.
- [7] 遠藤瑤子ら, “シミュレーションによるジャガイモの最適加熱時間におよぼす水温上昇速度の影響の解析”, 日本調理科学会誌 Vol.45, No.6, 403-412, 2012.
- [8] 田村朝子, 佐々木舞, 木下伊規子, 鈴木一憲, “真空包装がジャガイモの煮くずれに及ぼす影響”, 日本調理科学会誌, 39, 5, 296-301, 2006.
- [9] 文部科学省, 五訂増補日本食品標準成分表, 文部科学省, 2005.
- [10] 久保田清, 黒川眞行, 鈴木寛一, 江坂宗春, “円柱状ジャガイモのマイクロ波加熱におけるクッキング速度式の設定に関する研究”, 日本食品化学工学会誌, 35, 2, 78-82, 1988.

〈参考 URL〉

- [a] http://www.hokurenseika.co.jp/yoko3_5_bareisho.htm (Dec. 16, 2019)
- [b] <http://www.food-tokachi.jp/research/h09result/bareisho7-9.pdf> (Dec. 16, 2019)

第3章 デジタルマイクロスコープを用いたホクホク感の解析

ジャガイモの加熱による軟化や煮崩れなど、その加工特性に関わるテクスチャー変化は、品種や比重および細胞壁成分の熱的挙動が大きく影響することが報告されている [1][2][3]。そして、そのテクスチャー変化の要因の一つとして、細胞同士の結着力・分離性が関わっていると考えられている [4]。粘質系・粉質系といったジャガイモ特有の食味にも関与していることから、本研究において細胞分離性は「ホクホク感」にも影響すると考えた。

前章でも述べたように、官能評価において、15min 試料のように高品位とされる品質のジャガイモとそうでないジャガイモには、その破断応力値による明確な差異を明らかにできなかった。そこで本研究では、細胞分離性に着目し、これを定量的に分析することで、ジャガイモの品質評価を可能にすることを試みた。

細胞分離の挙動から、ジャガイモを切断したとき、その切断面では加熱によるペクチンの分解に関連した構造変化が生じ、細胞間の結着が一部低下して細胞の分離が生じる。これに伴い、試料を切断すると「細胞が結着した小塊が生じて凹凸が作られる」さらに加熱による構造変化が進むと“いくつかの細胞集合体はさらに細分され、ついには小塊が消滅して流動性が生まれ凹凸がなくなる”と変化すると考えた。この推論をもとに、デジタルマイクロスコープにより撮影した 3D 画像を解析することで切断面の凹凸を測定することを試みた。切断面の凹凸の程度を粗滑度と定義し、加熱したジャガイモの品質との相関性を検討するとともに、高品位なジャガイモの指標を模索した。

3.1 試料および実験方法

試料の選定・保存および加熱試料の作製方法は前章と同様にして行なった。

3.1.1 測定領域の決定

表面が平滑であると思われるプレパラート (MATSUNAMI 製 MAS-GP typeA) の表面を、マイクロスコープ顕微鏡 (KEYENCE 製 VH-Z100W) によって観察し、3D 画像を取得した。

3.1.2 切断面の 3D 画像撮影

20mm 角に成形した未加熱試料および 3 つの加熱試料 (中心が 90°C に到達してから 0min, 15min, 37min) の 4 つについて、レオメータのナイフカッタープランジャー (Fig.3-1) を用いて半分に切断した。その断面の中心部を、マイクロスコープ顕微鏡 (KEYENCE 製 VH-Z100W) によって観察し、本機器の機能である深度 UP の簡易モードを使用して 3D 画像を取

得した。顕微鏡視野においてその中心部に焦点を合わせ、そこから対物レンズを遠ざけて試料との距離を変更しながら撮影し、それらの画像を組み合わせることで3D画像を取得した。

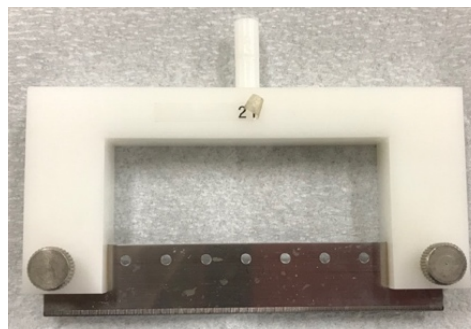


Fig.3-1 切断に使用したプランジャー（刃の厚さ:1mm）

3.2 結果と考察

3.2.1 測定領域の決定

取得した画像の一例を Fig.3-2 に示す。プレパラート面は水平であると考えられるが、画像では四隅に向かって高くなっていることがわかる。この測定機器では、顕微鏡レンズが試料から少しずつ遠ざかるように撮影することで3D画像を取得している。このとき、試料中心部に焦点を合わせているために、遠ざかりながらの撮影では撮影範囲の四隅の焦点がずれ、このような画像となると考えられる。複数の試料においてこのような傾向が見て取れたことから、この影響を考慮して Fig.3-3 に示した6つの部分①～⑥を測定箇所決定した。

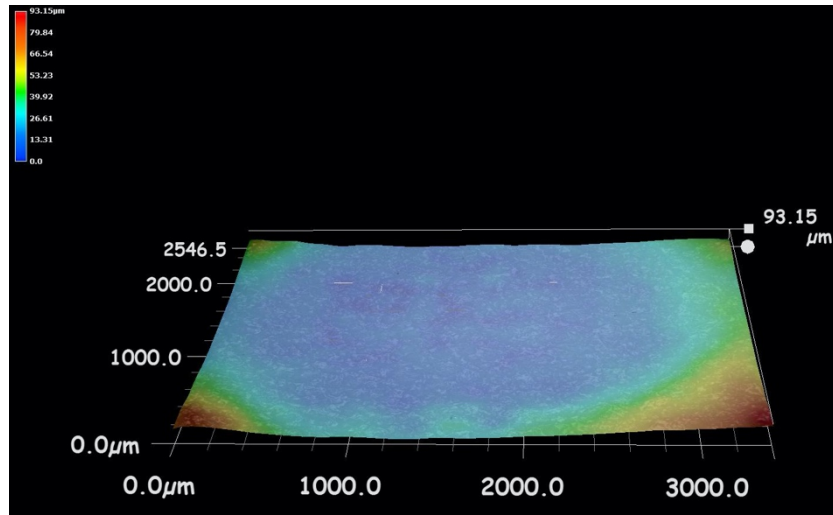


Fig.3-2 プレパラートの3D画像

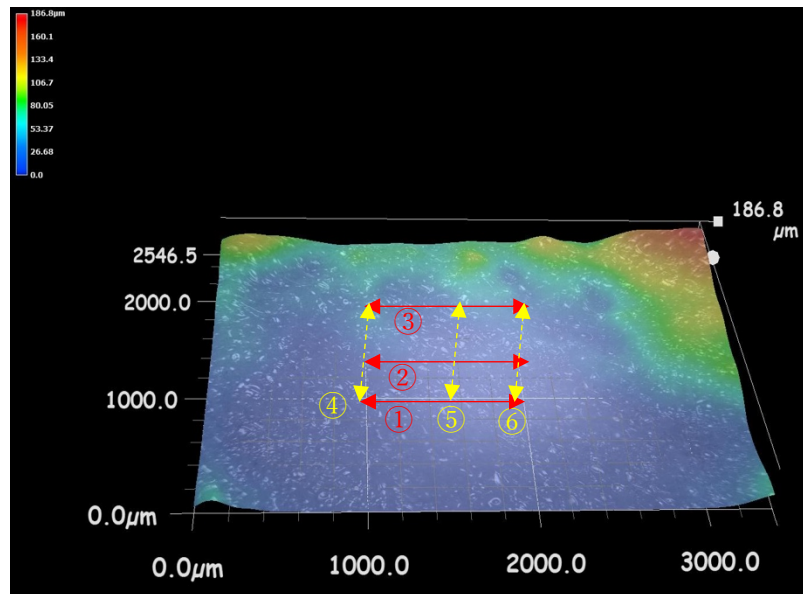


Fig.3-3 測定箇所

3.2.2 切断面の粗滑度測定

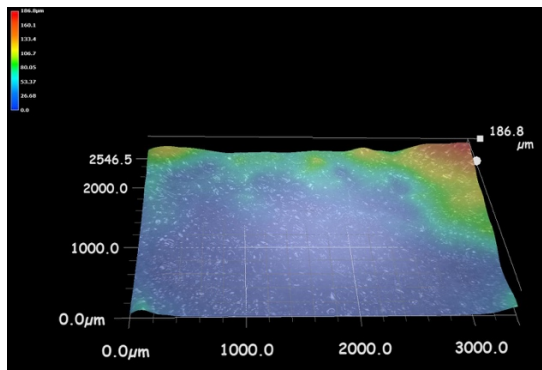
取得した画像の一例を Fig.3-4 に、測定箇所①～⑥におけるそれぞれの高低波形の一例を Fig.3-5 に示した。各高低波形についてその線形近似線を求め、その近似線を基準とした各点の凹凸の偏差を算出し、切断面の粗滑度 (Roughness) とした。試料の切断の際に生じてしまう切断面の傾きを考慮するためにこの操作を行った。算出した偏差の値について測定箇所①～⑥の6つ

の平均値を求め、これをその試料切断面の粗滑度を表す値として求めた。4つのジャガイモ試料の結果を Fig.3-6 に示す。未加熱試料の値が最も小さく、切断面の凹凸が少ないことがわかった。加熱試料においては、15min 試料までは値が大きくなっていくものの、37min 試料になると値が小さくなることが観察できた。Fig.3-6 の各測定箇所の波形においても同様の傾向が見て取れる。以上の結果から、ジャガイモを加熱することで切断面の状態は変化していくことが考えられ、細胞分離の進行により、「(細胞が結着した塊が生じて凹凸が作られる) さらに (塊が消滅して流動性が生まれ凹凸がなくなる)」という現象が起きていることが示唆された。

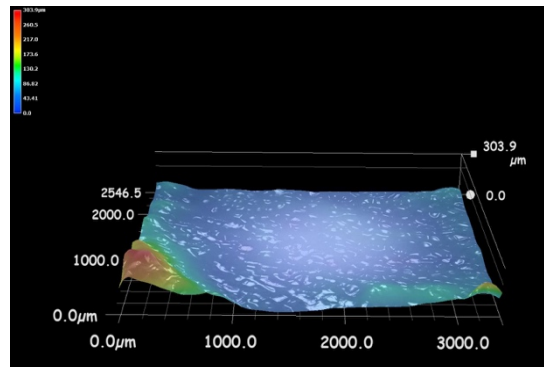
ここで、ばらつきが大きいことから各加熱試料について、未加熱試料との有意差検定を行なった。15min 試料のみ“有意差傾向”で、0min 試料と 37min 試料はどちらも有意差なしという結果であった。試料ごとに標準偏差を求めたところ、結果は Fig.3-7 のようになり、試料ごとにもばらつきがあることがわかった。ジャガイモの細胞分離度にはジャガイモ内成分のペクチンおよびデンプンが大きく関わっている [4]。また、ジャガイモは成熟すると水溶性ペクチンやデンプン含量が増加し、これによって細胞は分離しやすくなる [1][4][5]。よって、試料ごとのばらつきにはジャガイモ試料自体の成熟度などの個体差が影響していると考えられる。

有意差傾向という結果ではあるが、15min 試料においてのみ違いを明らかにすることができたことから、この違いがジャガイモの品質に影響を及ぼすと考えられる。前章で述べたように、官能評価において 15min 試料が最も高品位という結果であり、「ホクホク感」というジャガイモ特有の食味を最も感じることができた。したがって、完全に分離せずにある程度細胞同士が結着した状態のとき、ホクホク感のある美味しい高品位な加熱ジャガイモとなることが考えられる。

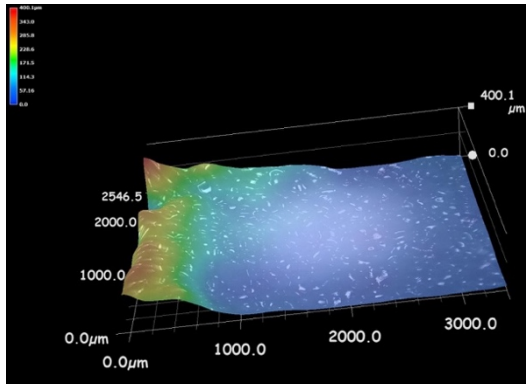
raw



0min



15min



37min

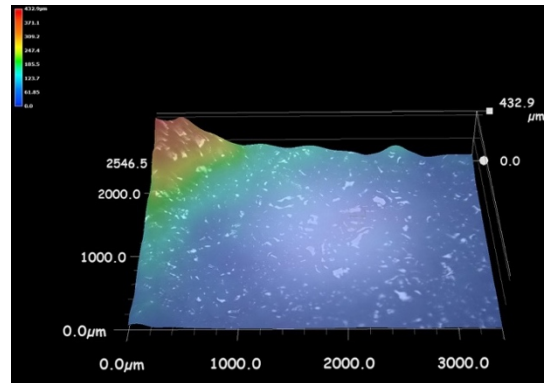


Fig.3-4 切断面画像

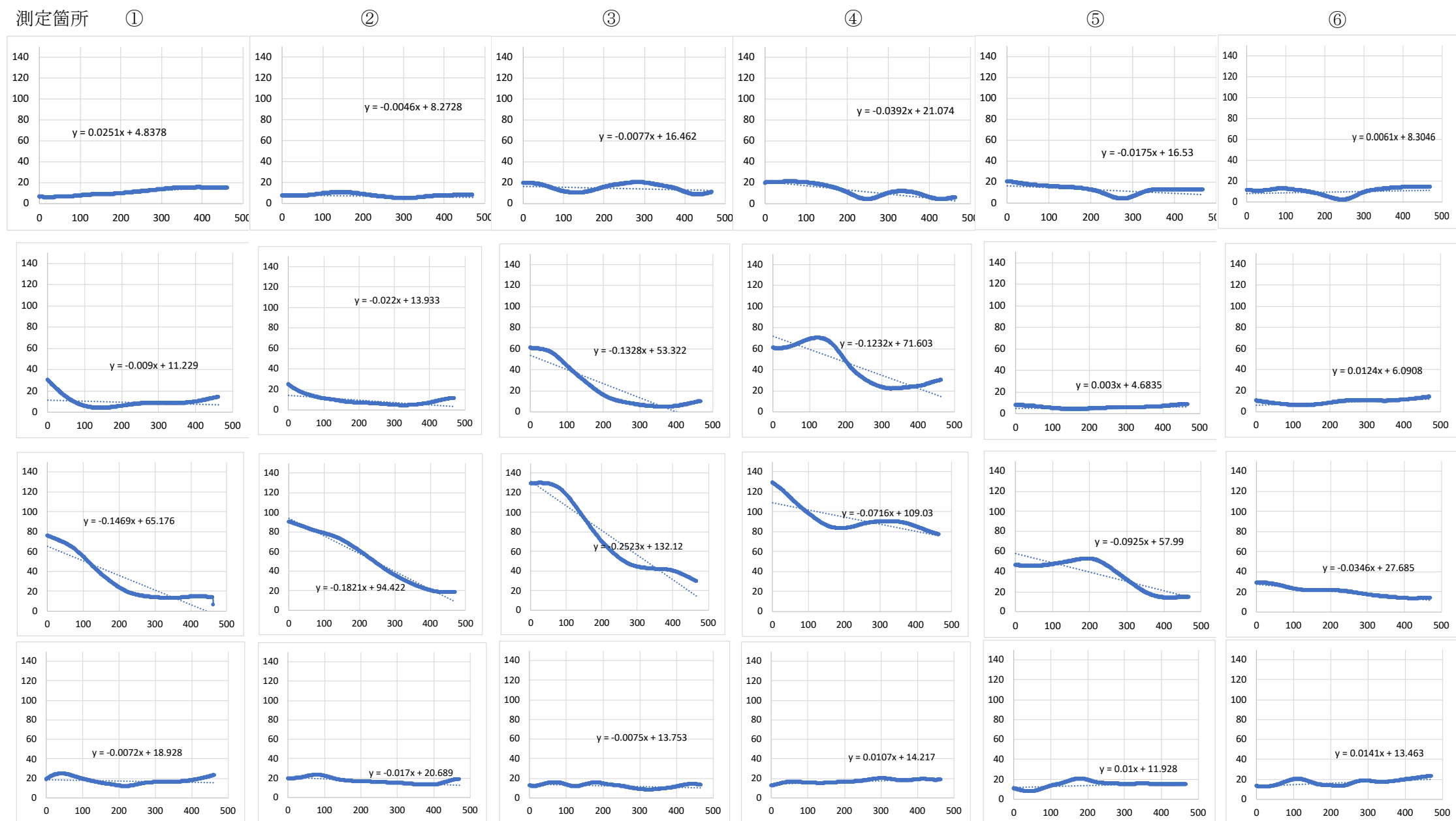


Fig.3-5 切断面における凹凸の高低差の波形（横軸：測定箇所的位置番号 縦軸：凹凸の高さ）

（1 段目：未加熱試料 2 段目：0min 試料 3 段目：15min 試料 4 段目：37min 試料）

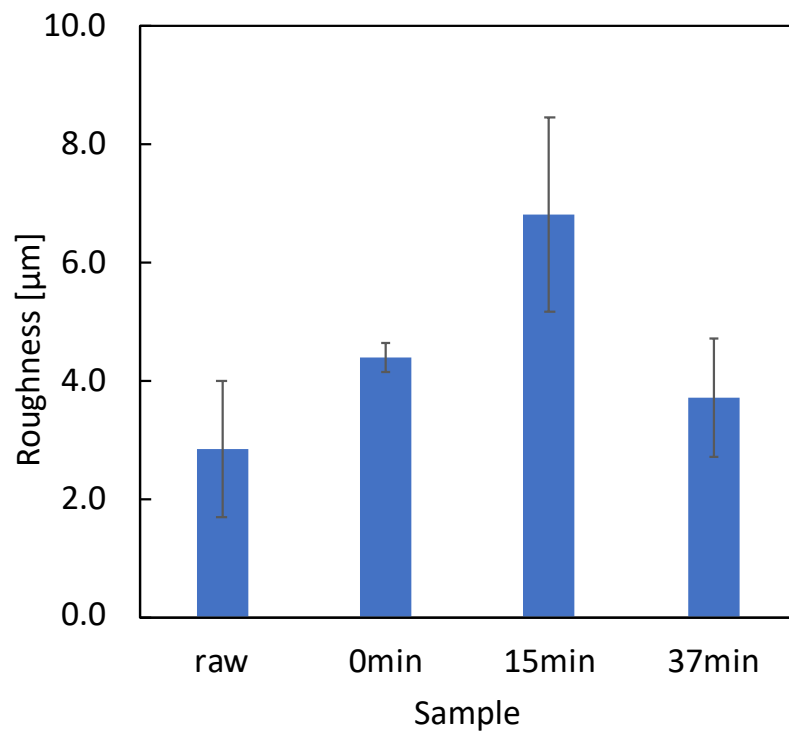


Fig.3-6 高低差の偏差 (粗滑度)

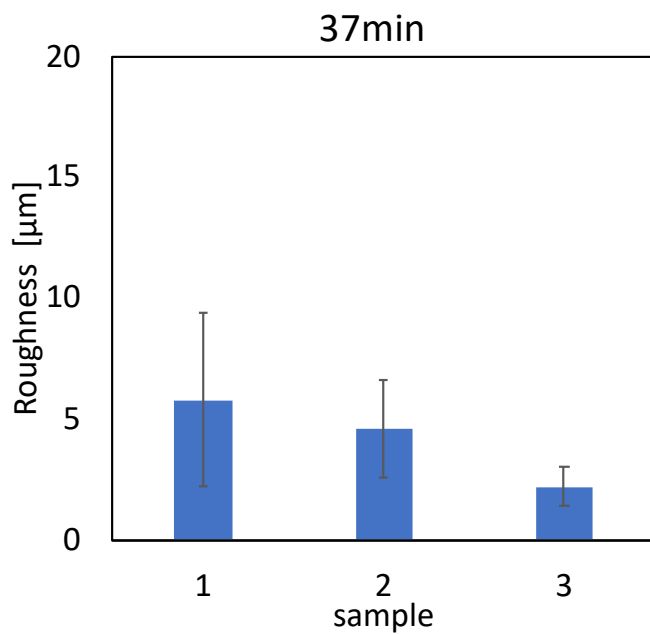
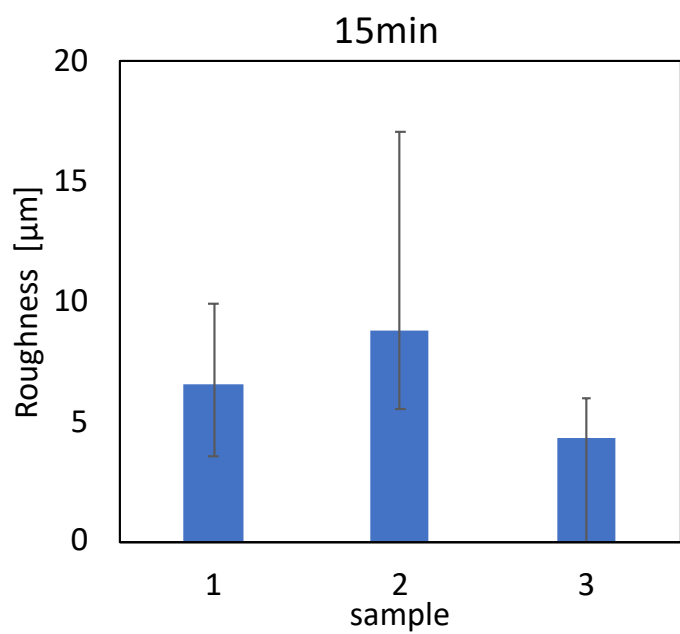
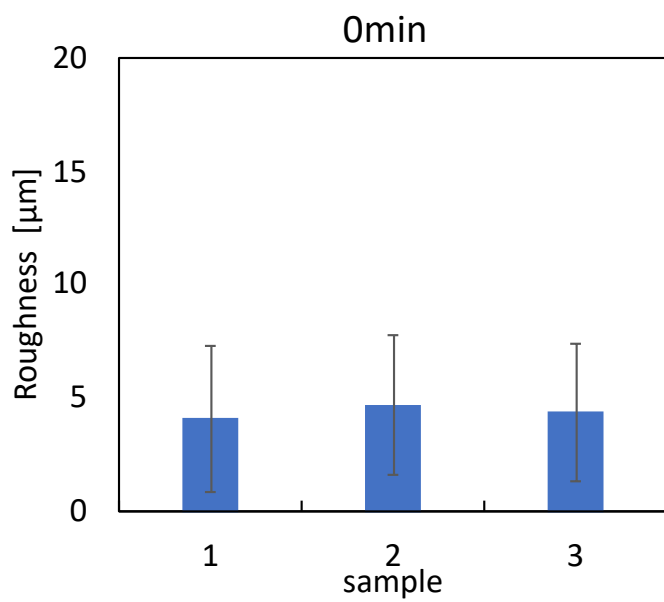
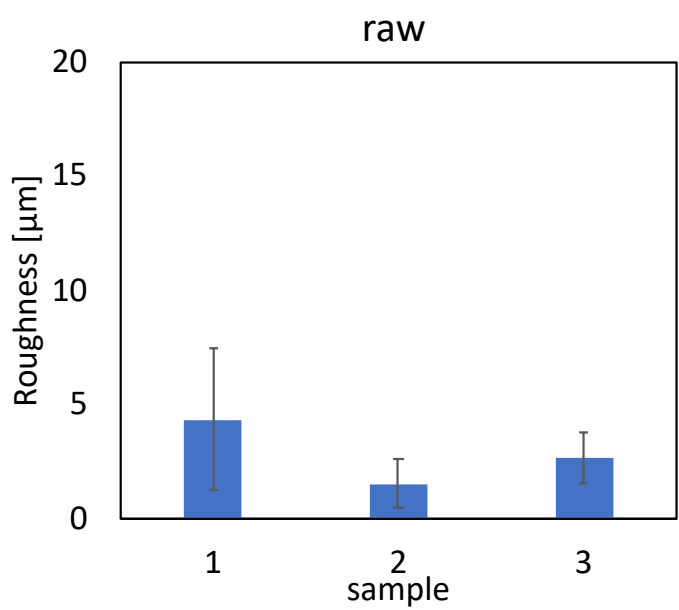


Fig.3-7 加熱試料ごとの加熱粗滑度

ここで、これまでの実験で用いた試料は貯蔵したジャガイモのみであったため、新ジャガの試料で同様の測定を行なった。その結果を Fig.3-8 に示す。上記の貯蔵ジャガイモで行なった結果と異なり、加熱条件による粗滑度に差異はほとんど見られなかった。新ジャガは貯蔵ジャガイモと比べてライマン価が低く、デンプン含量が小さい [6]。また、加熱による細胞分離に関わる水溶性ペクチンは、貯蔵とともに酵素反応により増加する [4][5]。新ジャガにおける切断面の粗滑度の変化がほとんどなかったのは、このようなジャガイモ内成分の含量の違いが要因であると考えられる。このことから、本実験で検討した切断面の粗滑度を指標としたジャガイモの品質評価は、デンプン価およびペクチンの性状によっては測定が困難な品種や収穫時期のジャガイモがあるということが示唆された。

しかし一方で、貯蔵ジャガイモにおける測定に関しては、高品位な状態について把握することができ、粗滑度と品質の相関性についても明らかにすることができた。よって、デジタルマイクロスコープを用いた切断面の粗滑度測定は、加熱ジャガイモの品質評価方法として利用可能であると考えられる。

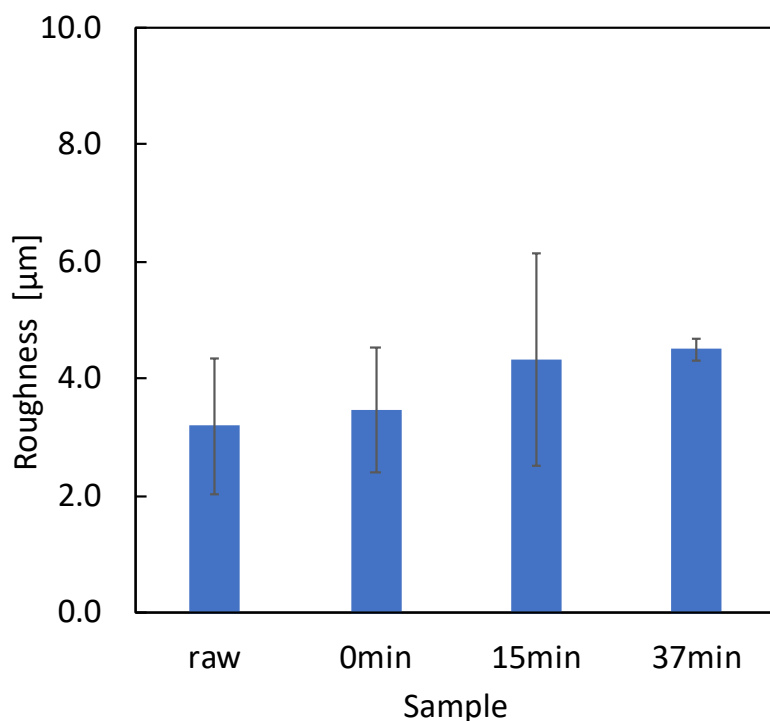


Fig.3-8 新ジャガにおける高低差の偏差（粗滑度）

3.3 まとめ

本章では、加熱による細胞間の結着力の低下に着目し、デジタルマイクروسコープより撮影した 3D 画像からジャガイモ切断面の粗滑度を算出することで、細胞の分離度を定量的に分析することを試みた。加熱したジャガイモは未加熱のものよりも粗滑度は大きく、加熱試料では 15min 試料が最も粗滑度が大きい結果であった。また、加熱時間が長くなるにつれて、細胞分離が徐々に進んで粗滑度は大きくなっていくものの、一定の細胞分離が進行すると反対に粗滑度が小さくなることがわかった。したがって、ジャガイモの切断面は加熱による細胞分離の進行により、「細胞が結着した小塊が生じて凹凸が作られる」さらに加熱による構造変化が進むと“いくつかの細胞集合体はさらに細分され、ついには小塊が消滅して流動性が生まれ凹凸がなくなる”という現象が起きていることが考えられた。

以上より、収穫時期やジャガイモ内成分の量により測定が困難な場合があるものの、細胞の分離性と加熱ジャガイモの品質には相関があり、粗滑度の測定によって品質評価が可能であることがわかった。そして、「ホクホク感」のある美味しい高品位な加熱ジャガイモとは、完全に細胞が分離せずある程度結着した状態であることが示唆された。

3.4 本章の参考文献

- [1] 佐藤広頭, 高野克己, 光浦暢洋, 谷村和八郎, 鴨居郁三, “比重の異なるバレイショより調製したマッシュ試料の物理的性状について”, 日本食品工業学会誌, 38, 2, 1071-1075, 1991.
- [2] 中村優, “ジャガイモの品質および比重による加工特性の差異に関する酵素化学的研究”, 日本食品保蔵科学会誌, 41, 1, 25-28, 2015.
- [3] 佐藤広頭, 山崎雅夫, 高野克己, “低比重および高比重バレイショにおける細胞壁多糖の組成および熱挙動の比較解析”, 日本食品保蔵科学会誌, 31, 4, 151-154, 2005.
- [4] 佐藤広頭, “ジャガイモの加工特性に及ぼす細胞分離性に関する研究”, 日本食品保蔵科学会誌, 31, 6, 325-332, 2005.
- [5] 中村優, 内野昌孝, 佐藤広頭, 高野克己, “ジャガイモの煮崩れに対する内在ポリガラクトキナーゼの影響”, 日本食品化学工学会誌, 56, 5, 286-290, 2009.
- [6] 木下枝穂, 小池恵, 堂園寛子, 津田淑江, “収穫時期の異なるジャガイモ中のデンプンの煮熟による変化”, 共立女子短期大学生生活科学科紀要, 53, 41-47, 2010.

第4章 糊化反応の解析

ジャガイモの主要成分であるデンプンは加熱によって糊化するが、蒸煮途上もジャガイモの各部位でこの反応は進行し、品質に及ぼす影響も大きい。よって糊化反応を分析することは、品質を評価する上で重要であると考えた。そこで、加熱によるジャガイモの糊化進行度の変化を予測可能にすることを目指し、さらに糊化進行度と加熱後の品質の関係について検討した。

デンプン粒は偏光下で特有の複屈折（偏光十字）が観察されるという特徴を持つ。すなわち、偏光下では、糊化していないデンプン粒は明るく観察されるが、加熱されて糊化するとデンプン粒は暗く観察される。この複屈折性を指標とした糊化測定は、視覚的にわかりやすく、操作が容易であるという利点がある。既存の研究では、試料を加熱しながら顕微鏡で観察し、視野の中にある全粒子数を数え、偏光十字が消失した粒子の数を数えて糊化進行度を決めるという方法が用いられている [1]。この方法は、先に述べた利点に加え、ジャガイモ組織内にあるデンプンについて測定可能であることから、本実験でもこの測定方法を取り入れることとした。しかし、本実験試料では顕微鏡視野内のデンプン数が多く、また、細胞組織内にあることから数えることが困難であったため、偏光顕微鏡により取得した画像の RGB データから $L^*a^*b^*$ 色調へ変換し、得られた色彩値から糊化デンプン粒子の相当量を算出、その変化から糊化進行度を求めるという新たな測定方法を考案した。

4.1 方法

4.1.1 試料作製および撮影手順

剃刀を用いてジャガイモ（メークイン）から切片を作製し、これを硬質硝子製試料載置板（Linkam 製 $16\phi \times 0.12\text{mm}$ ）にはさみ、ホットステージ（Linkam 製 THMS600）に設置した。これを、偏光レンズを取り付けたシステム顕微鏡（Canon 製 BX53）（対物レンズ $\times 10$ 、接眼レンズ $\times 10$ 、しぼり：全開、明るさ：最大）で観察し、DS カメラコントロールユニット（Nikon 製 DS-L3）（カメラゲイン：100、露光時間：80ms）により画像を取得した。取得した画像の一例を Fig.4-1 に示す。

ここで、ジャガイモの水分量はおよそ 80%であることは、第 2 章の含水率測定の結果より検証済みである。したがって、試料には糊化するのに十分な水分量があるとみなして測定を行った。

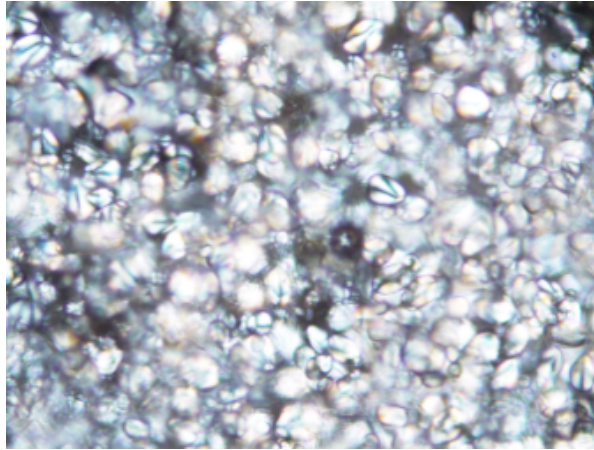


Fig.4-1 カメラコントロールユニットにより取得した画像例

4.1.2 色彩値と未糊化デンプン粒子の占める割合の関係式の決定

加熱前に撮影した後，ホットステージにより試料を 90°C で 1min 間加熱して撮影した．昇温速度はこのホットステージの最大である 90°C/min とした．

加熱前に取得した画像において，未糊化だと考えられるデンプン粒を 1 つ切り取り，その場所と同様の場所を加熱後に取得した画像からも切り取った．画像は，画像解析ソフト POP-Imaging を用いて RGB 値を抽出，それらを Fortran プログラムより L*a*b*値に変換し，画像のそれぞれのピクセルに対応する L*値がわかるように照らし合わせた．RGB 値から L*a*b*値の変換は以下の変換式を用いて行なった．

$$R = \left(\frac{R_s}{225}\right)^{2.2}, G = \left(\frac{G_s}{225}\right)^{2.2}, B = \left(\frac{B_s}{225}\right)^{2.2} \quad (4-1)$$

$$X_{D65} = 0.4125R + 0.3576G + 0.1804B$$

$$Y_{D65} = 0.2127R + 0.7152G + 0.0722B \quad (4-2)$$

$$Z_{D65} = 0.0193R + 0.1192G + 0.9503B$$

$$X_C = 1.0098X_{D65} + 0.007Y_{D65} + 0.0128Z_{D65}$$

$$Y_C = 0.0123X_{D65} + 0.9847Y_{D65} + 0.0033Z_{D65} \quad (4-3)$$

$$Z_C = 0.0038X_{D65} - 0.0072Y_{D65} + 1.0892Z_{D65}$$

$$L^* = 116 \times (Y_C/Y_n)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$a^* = 500 \times \left\{ (X_C/X_n)^{\frac{1}{3}} - (Y_C/Y_n)^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (4-4)$$

$$b^* = 200 \times \left\{ (Y_C/Y_n)^{\frac{1}{3}} - (Z_C/Z_n)^{\frac{1}{3}} \right\}$$

ただし、 $X_c/X_n, Y_c/Y_n, Z_c/Z_n$ が $(24/116)^3$ の場合は平方根項を以下の通りに置き換えて計算する。

$$\begin{aligned} (X_c/X_n)^{\frac{1}{3}} &\rightarrow \frac{841}{108}(X_c/X_n) + \frac{16}{116} \\ (Y_c/Y_n)^{\frac{1}{3}} &\rightarrow \frac{841}{108}(Y_c/Y_n) + \frac{16}{116} \\ (Z_c/Z_n)^{\frac{1}{3}} &\rightarrow \frac{841}{108}(Z_c/Z_n) + \frac{16}{116} \end{aligned} \quad (4-5)$$

4.1.3 終末糊化度の決定

デンプンの糊化は、加熱温度と含水率に依存し、ある温度、ある含水率において、デンプン・水系が到達する糊化度には一定の平衡値が存在することかが示されている。この一定値は、終末糊化度（Terminal Extent of Gelatinization ; TEG）と定義される [2] [3]。

そこで、ジャガイモ細胞内のデンプンにおける TEG を把握するため、以下の等温実験を行なった。すなわち、ホットステージにより試料を一定温度（60, 63, 65, 67, 70℃）まで昇温させ、その温度に達したときを 0s とし、そこから 60℃では 4min ごとに 32min まで、63℃では 3min ごと 21min まで、65℃では 1min ごとに 7min まで、67℃では 30s ごと 2min まで、70℃では 15s ごとに 1min まで加熱して撮影した。各温度での加熱時間は糊化反応がこれ以上進行しないと判断した時間である。一定温度までの昇温速度はこのホットステージの最大である 90℃/min とした。

画像は画像処理ソフト Ralpha Image Resizer（Nilposoft）を用いて 30%に縮小し、画像解析ソフト POP-Imaging を用いて RGB 値を抽出、Fortran プログラムを用いて式(4-1)から式(4-5)より $L^*a^*b^*$ 値に変換して L^* 値を求めた。4.1.2 より決定した関係式に従って、30%に縮小した画像の各ピクセルの未糊化デンプン粒子相当数を算出し、その合計値から全体の 768×576 ピクセル中何ピクセル分が未糊化デンプン粒子に占められているかを、式(4-6)より算出した。求めた割合から式(4-7)を用いて未糊化率を算出し、これをその温度での TEG とした。

未糊化デンプン粒子の占める割合 $N_t[-]$

$$= \frac{\text{4.1.2 で決定した関係式から求めた未糊化デンプン粒子数の合計}}{\text{全ピクセル数}} \quad (4-6)$$

$$\text{未糊化率} = 1 - \frac{N_0 - N_t}{N_0} \quad (4-7)$$

4.1.4 糊化速度式の決定

加熱前温度を 25°C に設定し、ホットステージの昇温速度を蒸煮加熱の昇温条件に近い 3°C/min として 80°C まで加熱した。加熱前および既定の時間ごとにカメラコントロールユニットにより撮影した。画像から式(4-6)および式(4-7)よりそれぞれの未糊化率を算出した。

糊化反応は一次反応であると見なし、式(4-8)ならびに反応速度定数 k_G の温度依存性は式(4-10)のアレニウス式に従うとして、Fortran プログラムによりフィッティングを行い、試料の糊化反応速度式を検討した。すなわち、活性化エネルギーを仮定し、実測温度データから計算した反応率と実測反応率の誤差が最小になるように頻度因子を決定した。そのときの誤差が最小のときの活性化エネルギーを採用し、黄金分割法により糊化速度定数を推算した。

4.1.5 糊化反応の速度論的取り扱い

(1) 温度一定の糊化反応

五味ら [4]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。

$$\frac{dX}{dt} = -k_G T X \quad (4-8)$$

ここで、 X はその温度と水分における終末糊化度 (TEG) に対する糊化していない割合で、ここでは相対未糊化率と呼ぶ。糊化率 F_g との関係は次式で表され、未糊化率 $F_g M$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned} F &= T_{eg} \times (1.0 - X) \\ F_g M &= 1.0 - F \end{aligned} \quad (4-9)$$

また、 k_G は糊化速度定数で、次式で表される。

$$k_G = k_{G0} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4-10)$$

(2) 非等温の糊化反応

ここで、極短い時間での速度定数および TEG は一定と仮定し、式(4-8)の糊化反応速度式が使えるとする。 dt 時間後の X は RKG 法を用いて数値計算により求める。

dt 時間後に T_1 であった温度が T_2 に変化したと考える。 dt 時間後 T_1 のままであったと仮定したときの相対未糊化率を X_1 (RKG 法で求めた相対未糊化率) とすると、糊化率 F_{g1} は

$$F_{g1} = Teg_1 \times (1.0 - X_1) \quad (4-11)$$

T_2 に温度が変化しているのです、そのときの糊化率 F_{g2} は

$$F_{g2} = Teg_2 \times (1.0 - X_2) \quad (4-12)$$

$F_{g1}=F_{g2}$ と考えると、相対未糊化率 X_2 は次式で表される。

$$X_2 = 1 - \frac{Teg_1}{Teg_2} (1.0 - X_1) \quad (4-13)$$

4.2 結果と考察

4.2.1 色彩値と未糊化デンプン粒子の占める割合の関係式の決定

デンプン粒子分を切り取った画像にそれぞれのピクセルに対応する L^* 値を示した(Fig.4-2)。 Fig.4-2 の左の未糊化画像から、目視で完全に 1 マス全体がデンプン粒子で占められている部分を決定し、その L^* 値の平均値を算出した(Fig.4-2 左側画像の青色部分)。これを、未糊化デンプン粒子が占める割合、1 とした。また、Fig.4-2 の右の糊化画像は、90°C で 1min 加熱して暗視野となったことから完全に糊化したものと考え、全体の L^* 値の平均値を算出した。これを、未糊化デンプン粒子が占める割合、0 とした。それぞれの値を Table 4-1 に示した。画像中の未糊化デンプン粒子の割合と L^* 値は直線関係で表されると仮定し、 L^* 値と未糊化デンプン粒子の占める割合の関係式を求めた(Fig.4-3 と式(4-14))。ここで、 y は未糊化デンプン粒子数、 x は L^* 値を表す。

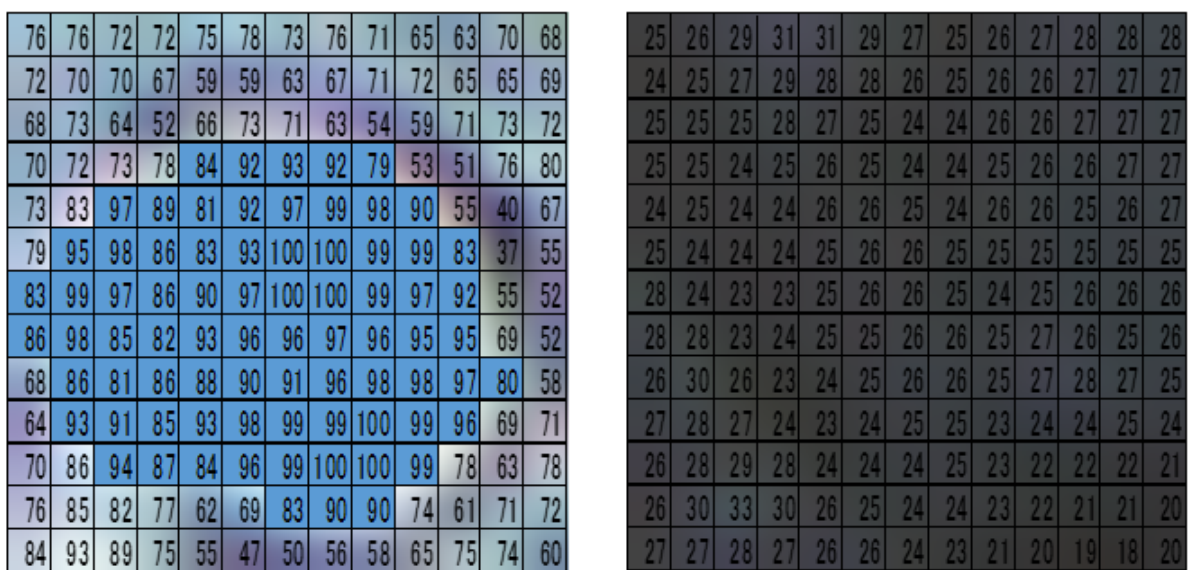


Fig.4-2 照らし合わせた画像(左：未糊化，右：糊化)

Table 4-1 未糊化デンプン粒子の割合に対する L*値

1マスあたりに占める未糊化デンプン粒子の割合	L*値
1	92.78
0	25.40

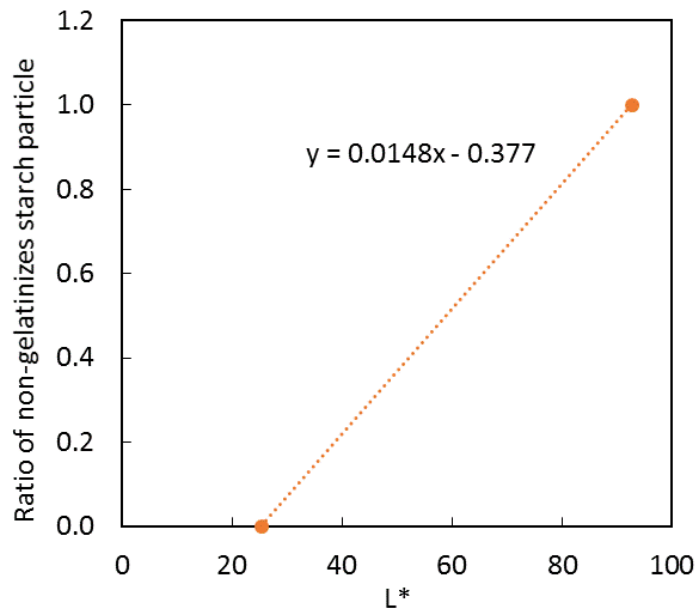


Fig.4-3 L*値と1マスに占める未糊化デンプン粒子の割合の関係

$$y = 0.0148x - 0.377 \quad (4-14)$$

4.2.2 終末糊化度の決定

Fig.4-4 に取得した画像の一例を示した。どの温度帯でも加熱が進むにつれて偏光十字が消失していくことが見て取れ、温度が高くなると糊化反応が大きく進行することがわかった。各温度における未糊化率の経時的変化は Fig.4-5 のようになった。加熱温度 60°Cにおいて、加熱後すぐわずかに糊化が進行したが、加熱後 4min から 23min ごろまではほとんど変化せず、糊化進行度の経時的変化は S 字曲線のようなになった。ジャガイモの単離デンプンと細胞内デンプンの糊化を比較した既存の研究において、デンプンは細胞壁の物理的強靭さや細胞内の空間的余地の不足により膨潤が抑制されるという報告がある [5]。加熱温度 60°Cにおいて一定時間糊化の進行が見られないのは、このような細胞内余地および細胞壁の存在による抑制的な影響を受けるためであると考えられる。また、Fig.4-6 のように細胞内のデンプン粒は細胞によってその数や大きさが異なっており [6]、そのためデンプン粒の膨潤に必要な空間的余地は細胞によってさまざまであると推測できる。すなわち、細胞それぞれの糊化の進行速度には差があると考えられるため、熱エネルギーの小さい低い温度帯においてでは、加熱初期に空間的余地の大きい箇所がすぐに糊化することでわずかに糊化進行度が大きくなると考える。長時間の加熱では、単離デンプンに比べて細胞内デンプンの膨潤力は小さいものの、溶解度にあまり差はないという報告がある [5]。このことから、加熱を続けると一定時間熱エネルギーが加わり続けるために、

細胞壁の抑制的な影響が少なくなり，再び糊化が進行すると考えられる．よって，S字曲線のような糊化進行度の経時的変化が見られるのではないかと考える．

各温度の最後の画像をもとに算出した未糊化率より，ジャガイモ細胞内デンプンの終末糊化度 TEG と加熱温度の関係を表した (Fig.4-7)．線形近似により温度と TEG の関係式を導いた (式(4-15))．

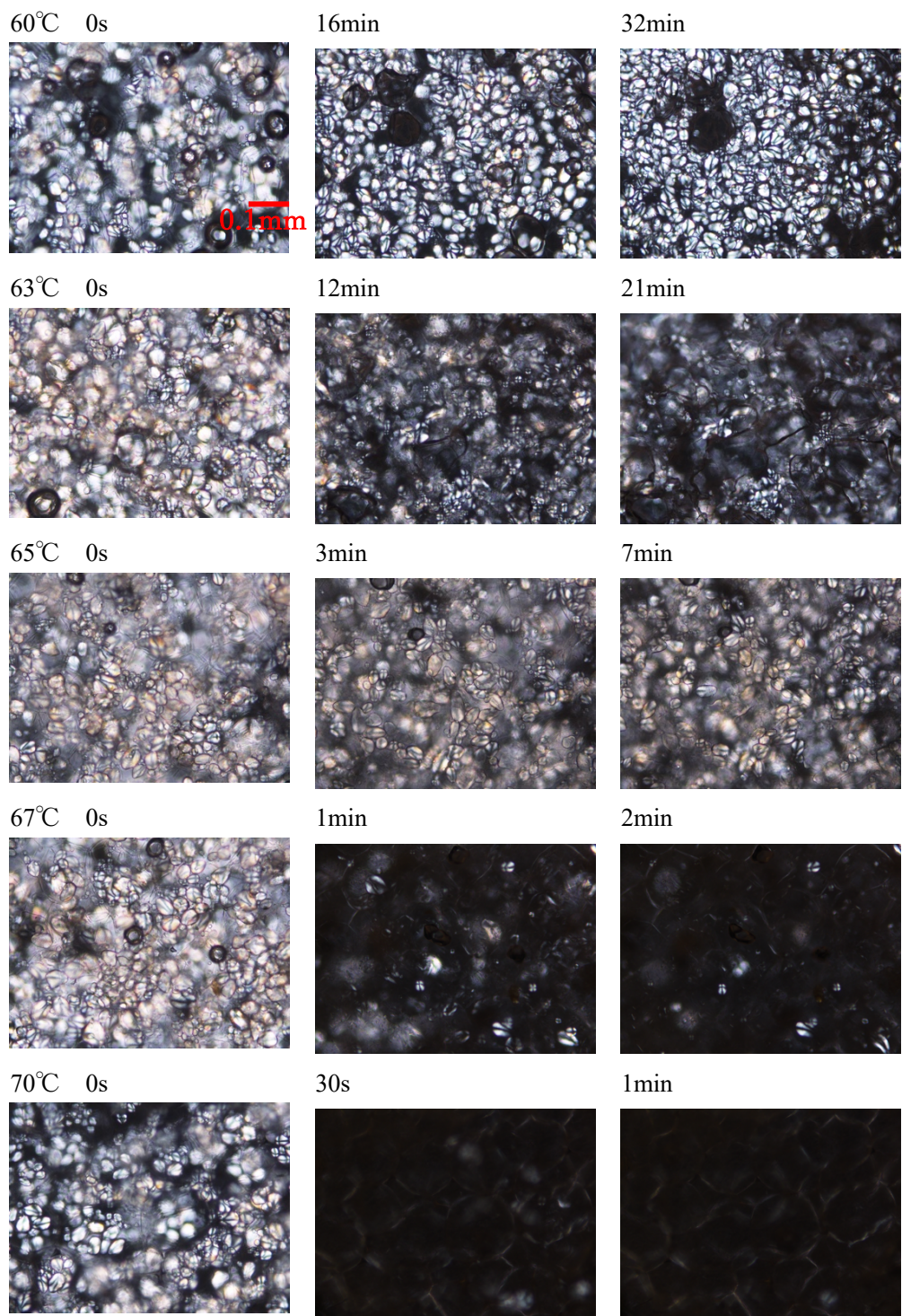


Fig.4-4 偏光顯微鏡圖像

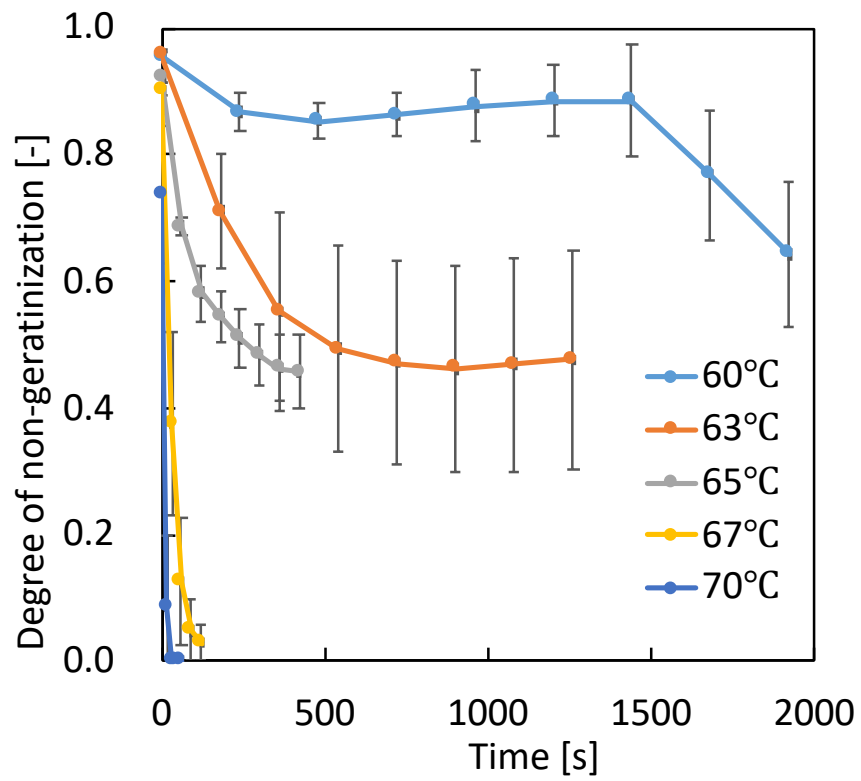


Fig.4-5 未糊化率の経時的変化

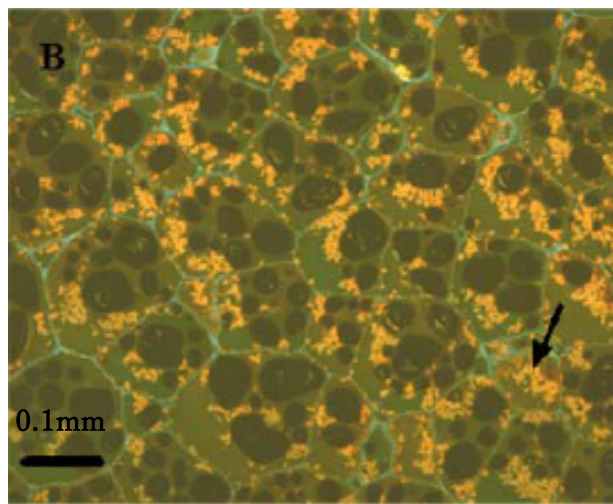


Fig.4-6 蛍光顕微鏡法によるジャガイモ細胞の観察 [6]
 (暗粒子：デンプン粒 黄色粒子：タンパク質)

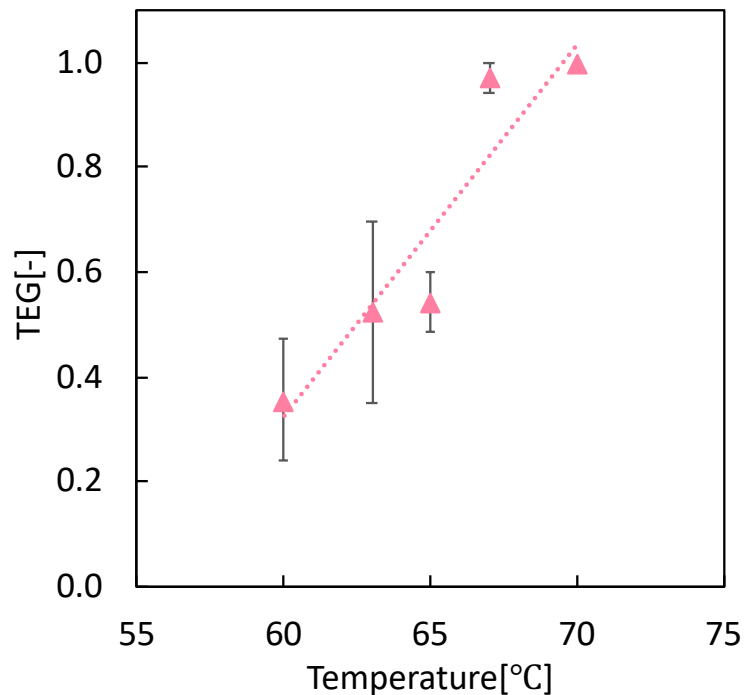


Fig.4-7 TEG の温度依存性

$$TEG [-] = 0.0708T - 3.9223$$

(4-15)

4.2.3 糊化速度式の決定

非等温条件での加熱による糊化反応の進行は Fig.4-8 のようになり、加熱開始から 720s (12min) 後から糊化反応は開始し、そのおよそ 2min 後に終了することがわかった。

この測定結果をもとに Fortran プログラムにより算出した昇温速度 3°C/min のときの活性化エネルギーと頻度因子は、 $E = 163\text{kJ/mol}$ 、 $k_0 = 5.53 \times 10^{23} \text{s}^{-1}$ と求められた。これらをもとに予測した非等温実験における未糊化率の経時的変化を Fig.4-8 に示した。実測結果と良好に一致している。この結果より、第 2 章の 40 分加熱における温度測定結果 (Fig.2-2) をもとに、蒸煮加熱における糊化進行を予測したところ Fig.4-9 のようになった。デンプンの糊化は加熱開始 5 分で始まり、その 4 分後にはほとんど終了していることが考えられた。本研究で作製している加熱試料は、中心が 90°C に到達してから 0, 8.5, 15, 22, 37min の 5 つである。糊化反応の予測結果から、これら全ての加熱試料はどれも糊化反応が終了していることがわかり、デンプンの糊化はジャガイモの蒸煮加熱における 90°C 到達後の品質変化には大きく影響しない

ことが示唆された。したがって、ジャガイモの品質には糊化反応後の組織変化等が関わっていると考えられる。

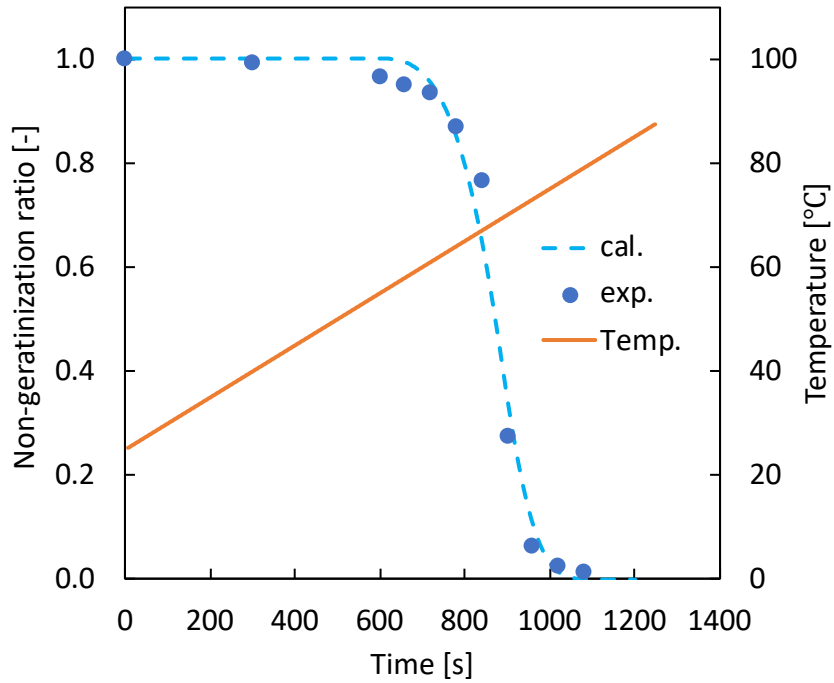


Fig.4-8 ジャガイモ切片の未糊化率の経時的変化

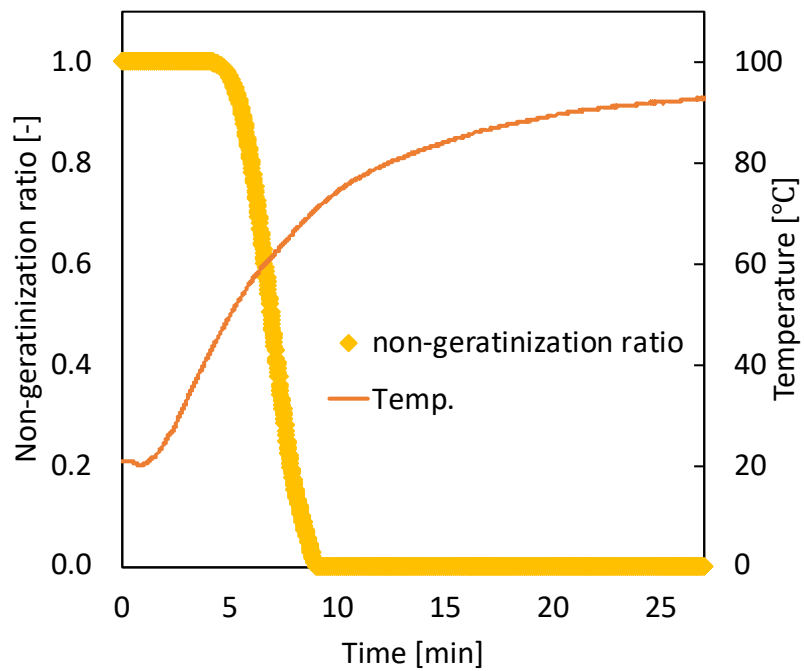


Fig.4-9 ジャガイモ試料（20mm 角）の中心部における未糊化率の予測

4.3 まとめ

本章では、偏光下で複屈折性を持つという特徴に着目し、ジャガイモの主要成分であるデンプンの糊化度についての新たな測定方法を提案した。偏光顕微鏡画像における未糊化デンプン粒子の割合を算出することで、加熱に伴う色彩値（明るさ）の変化から糊化反応の進行を定量的に分析することができた。視覚的にわかりやすく、簡便な糊化進行の測定方法を見出すことに成功した。

終末糊化度の温度依存性および非等温実験の結果をもとに求めた糊化反応速式は、概ね実測と一致し、デンプンの糊化進行度を予測することができた。蒸煮加熱における実測の温度履歴から計算したジャガイモの糊化進行度の変化によると、糊化反応は加熱開始の約5分ごろから開始し、その4分後には終了することが考えられた。このことから、デンプンの糊化はジャガイモの蒸煮加熱における90°C到達後の品質変化には大きく影響しないことが示唆された。また、精製され単離したデンプンとは異なり、細胞内に存在するデンプンでは、細胞壁の強靭さおよび細胞内の空間的余地により糊化が一時抑制されることが示唆された。糊化温度帯のうち低い温度で加熱される場合、糊化の進行は2段階で進行することが明らかとなった。

4.4 本章の参考文献

- [1] 呉佳艶, “通電加熱を利用したデンプン食品の特殊加工に関する研究,” 東京海洋大学修士論文, 2012.
- [2] Hisahiko Watanabe, Mika Fukuoka, Atsushi Tomiya, Tomowo Mihori, “New non-Fickian diffusion model for water migration in starchy food during cooking” , Journal of Food Engineering, 49, 1, 1-6, 2001.
- [3] Yu-ichiro Gomi, Mika Fukuoka, Tomowo Mihori, Hisahiko Watanabe, “The rate of starch gelatinization as observed by PFG-NMR measurement of water diffusivity in rice starch/water mixtures” , Journal of Food Engineering, 36, 4, 359-369, 1998.
- [4] Mika Fukuoka, Ken-ichi Ohta, Hisahiko Watanabe, “Determination of terminal extent of starch gelatinization in a limited water system by DSC” , Journal of Food Engineering, 53, 1, 39-42, 2002.
- [5] 釘宮正往, 伊藤 (藤村) 知子, “ジャガイモから分離した細胞中に存在するデンプンの糊化” , 日本食品化学工学会誌, 43, 8, 951-955, 1996.
- [6] Malin E. Sjö, Ann-Charlotte Eliasson, Karin Autio, “Comparison of different microscopic methods for the study of starch and other components within potato cells” , Global Science Books, 3, 1, 39-44, 2009.

第5章 ジャガイモ調理過程の熱移動および反応の速度論的解析と「ホク度」評価

前述のように、デンプンの糊化反応は加熱調理ジャガイモの品質には大きく影響しないことが示唆され、デンプン反応後に起こる組織変化について検討する必要があると考えられた。しかし、デンプンは温度上昇とともに膨潤して糊化するだけでなく、デンプン粒子からアミロースの溶出が起これ、デンプン粒子が崩壊して「分散」と言われる挙動を示す [1]。

また、第1章において述べたように、細胞壁のペクチンのβ脱離が起これ細胞壁の分解が進行すると考えられている [2]。この組織変化は90℃以上の高温域で生じ、分解による細胞同士の結着力の低下は、加熱調理ジャガイモの品質に大きく影響を及ぼすことが第3章で示唆された。

そこで本章では、ジャガイモの調理過程として、「①ジャガイモ内熱移動 ②デンプンの糊化・分散 ③ペクチンのβ脱離による分解」の3つの過程を考え、定量化を試みた。そして、「ホクホク感」を定量的に示す指標との関係について検討し、加熱によるジャガイモの品質変化の予測を可能にすることを目指した。

ここで、デンプンの糊化・分散には水分が大きく影響するが、ジャガイモ自体に十分な水が存在するため、糊化・分散は完全に進行するとし、水分移動は考慮しないこととした。また、野菜は低温域(60~70℃)において加熱されると、ペクチンの脱エステル化と架橋構造の形成が起これ硬化する [3]。しかし、ジャガイモの蒸煮を考えた場合、ペクチンの脱エステル化が起これる温度帯は速やかに通過すると考えられるため、ペクチンの脱エステル化反応は考慮しないこととした。

5.1 熱移動基礎式

ジャガイモの熱移動が熱伝導によって生じるとすると、基礎式はフーリエの熱伝導方程式により表される。

$$\rho_b C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5-1)$$

ただし、 k は熱伝導 [(J/(s·cm·℃))], ρ_b は密度 [g/cm³], C_p は比熱 [(J/(g·℃))]である。
ここで、初期条件を

$$T = T_0 \quad (5-2)$$

とした。ジャガイモは蒸煮されるため、試料表面において凝縮伝熱と熱伝達が起こるが、両者を合わせた熱伝達と考える。

また、境界条件を

$$k \text{ grad}(T) \cdot n = h_t(T_a - T) \quad (5-3)$$

(ただし、 h_t は熱伝達係数 [J/(s·cm²·°C)], T_a は蒸器庫内温度 [°C]である。)とした。

上記の基礎式と初期条件および境界条件を無次元化した後、ガラーキン有限要素法を用いてジャガイモ内温度分布の経時変化を計算した。

5.2 デンプンの糊化・分散反応

温度上昇とともにジャガイモ細胞内のデンプン粒子は糊化・分散する (Fig.5-1) [1]。ここで、デンプンは未糊化デンプン→糊化デンプン→分散デンプンと逐次的に変化し、糊化デンプンは糊化によって増加、分散によって減少すると仮定してモデル化を行った。温度一定および非等温の糊化反応においては第4章 4.1.5 において述べたものを取り入れ、デンプンの分散に関しては以下のモデルを採用した。

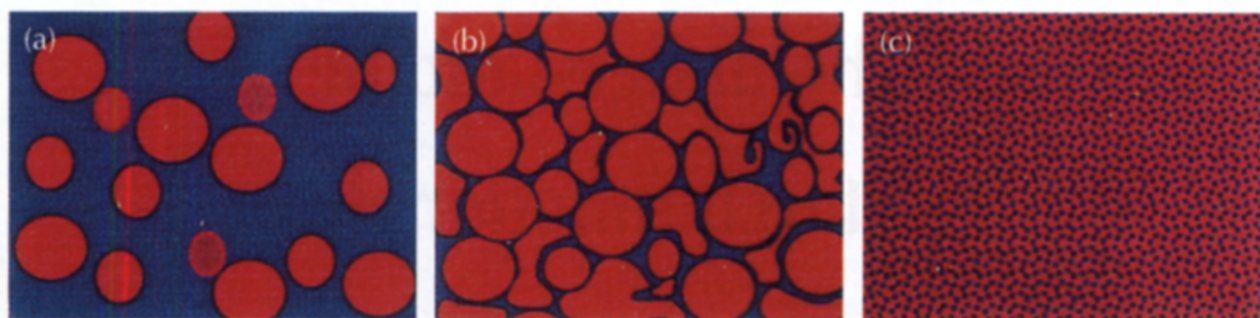


Fig.5-1 デンプン粒子の模式図 [1]

(a)および(b) : 赤はアミロペクチンが豊富な膨潤顆粒, 青はアミロース

(c) : アミロペクチンとアミロースの高分子分散液

デンプンは、未糊化デンプン (S) →糊化デンプン (G) →分散デンプン (D) と逐次的に変化し、全デンプン個体量は変わらないとした。このとき、デンプン濃度を C [g-solid/cm³]で表すと、

$$C_S + C_G + C_D = C_0 \quad (5-4)$$

無次元量 Y で表すと

$$Y_S + Y_G + Y_D = 1 \quad (5-5)$$

分散デンプンの生成速度は糊化デンプン濃度比例すると仮定すると，生成速度は次式で表される．

$$dY_D/dt = k_D Y_G \quad (5-6)$$

糊化速度および分散速度から，糊化デンプンの生成速度は次式で表される．

$$dY_G/dt = dY_S/dt - dY_D/dt \quad (5-7)$$

糊化率 F_g との関係 ($F_g=1-Y_S$) を代入すると，

$$dY_G/dt = dF_g/dt - dY_D/dt \quad (5-8)$$

となる．式 (5-6) (5-8) を数値積分することにより，糊化デンプン割合 Y_G と分散デンプン割合 Y_D を求めた．

5.3 ペクチンの β 脱離による分解反応

ジャガイモの軟化には，細胞間隙および細胞壁にあるペクチンが加熱により β 脱離することで生じると考えられている (Fig.5-2) [a]．この反応においては，まず細胞間隙のペクチンが分解することで細胞間の結着力が失われ，細胞集合体が小さくなっていくと考えた．さらに，細胞壁のペクチンが分解し，中から分散したデンプンが放出され，粘性が高くなると考えた (Fig.5-3)．細胞間隙(A)および細胞壁(B)にあるペクチンの分解はそれぞれ独立して起こり，その分解速度はその濃度に比例すると仮定すると，

$$dC_{PA}/dt = -k_{PA} C_{PA} \quad (5-9)$$

$$dC_{PB}/dt = -k_{PB}C_{PB} \quad (5-10)$$

となる. この式(5-9), (5-10)を数値積分することにより, ペクチンの残存率 $Y_{PA} (=C_{PA}/C_{PA0})$, $Y_{PB} (=C_{PB}/C_{PB0})$ を求めた.

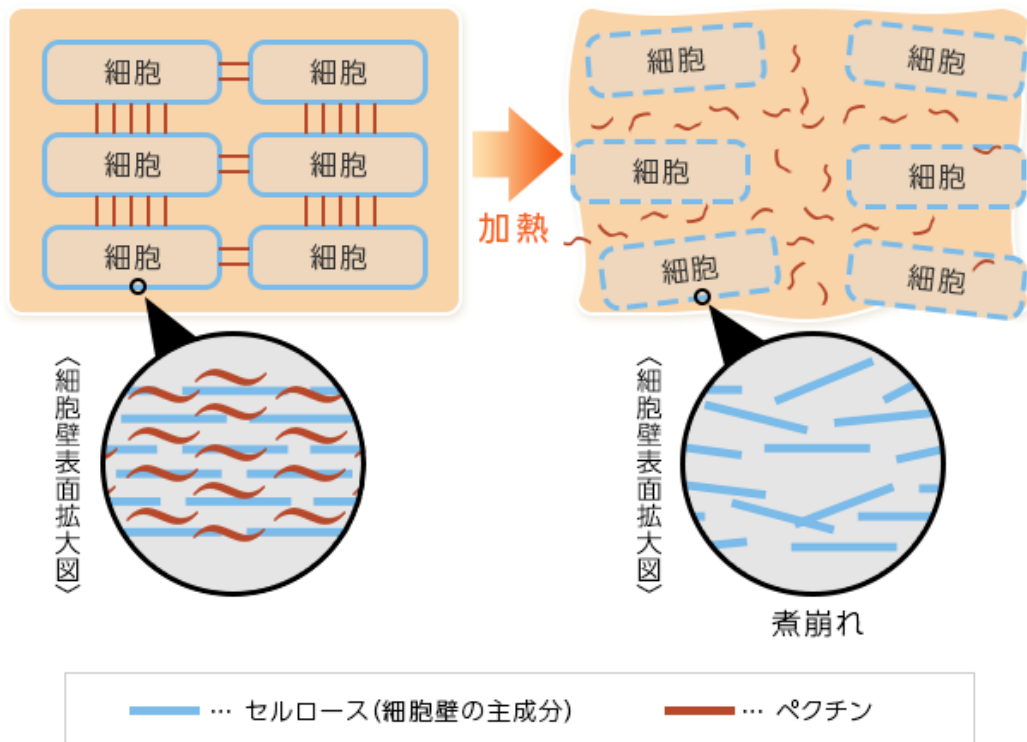


Fig.5-2 軟化のイメージ図 [a]

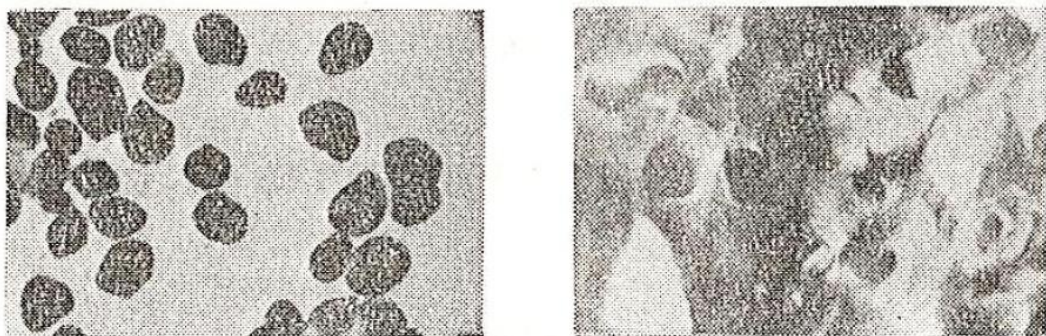


Fig.5-3 マッシュジャガイモの顕微鏡写真
(右側: 細胞分離したマッシュジャガイモ 左側: 細胞破壊したマッシュジャガイモ) [4]

5.4 計算に必要な熱物性値

熱移動解析を行うにあたり，以下の物性値を使用した．熱伝導度および比熱はジャガイモの含水率 w は 0.8 [-]として，これをもとに以下の式より算出した．密度は本研究で用いたジャガイモ試料の平均値を用いた．

$$\text{熱伝導度 : } k = 5.3 \times 10^{-3} (W/cm \cdot ^\circ C) \quad (k = 0.26 + 0.34w \text{ } W/(m \cdot K)) \quad [5]$$

$$\text{比熱 : } C_p = 3.65 (J/g \cdot ^\circ C) \quad (C_p = 1.55 + 2.63w \text{ } kJ/(kg \cdot K))$$

$$\text{密度 : } \rho_b = 1.05 (g/cm^3)$$

5.5 結果と考察

予測計算にかかる時間を短縮するため，本章での温度およびデンプン・ペクチンの加熱による変化の予測計算は全て実際の試料の大きさの半分 ($10 \times 20 \times 20 \text{mm}$) のモデルを作成して行なった．

5.5.1 温度計算

試料表面の熱伝達係数 h_t は未知であるため，計算中心温度が実測値と一致するように h_t を推定した．レトルトパウチのフィルムが試料表面に存在するため，このフィルムの熱抵抗も含めて h_t の値とした．加熱実験の結果において，蒸し器内温度がおおよそ $100^\circ C$ を保った状態であるにもかかわらず，試料中心温度は 30 分以上加熱を続けても蒸し器内の温度まで到達しないという傾向を捉えた．レトルパウチの有無に関係はなく，加熱後半で中心温度は停滞することがわかった (Fig.5-4)．本章での温度変化を予測する際，蒸し器内の温度を $100^\circ C$ とすると，試料中心の到達温度が $100^\circ C$ となるために実測と異なる予測値となった．また，ペクチンの分解を考えた場合， $90^\circ C$ 以上であることが重要となる．よってここでは，蒸し器内の温度を $95^\circ C$ として実験を再現することとした．その結果を Fig.5-5 に示す．中心温度の計算結果は実測と良好に一致しており，また，中心が $90^\circ C$ に到達する加熱開始 20 分以降では，試料内においてほとんど温度分布がないことがわかった．試料温度分布の計算結果を Fig.5-6 に示した．試料表面から加熱が進み，加熱開始からおおよそ 10min まで急上昇し，15min 以降から温度変化は緩やかになることが見て取れた．

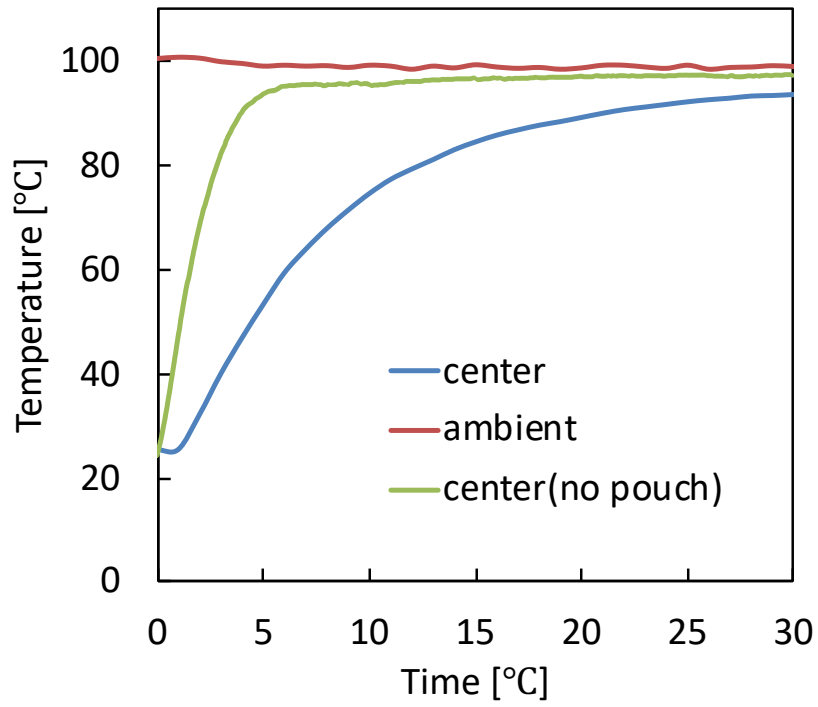


Fig.5-4 試料中心の温度変化実測値

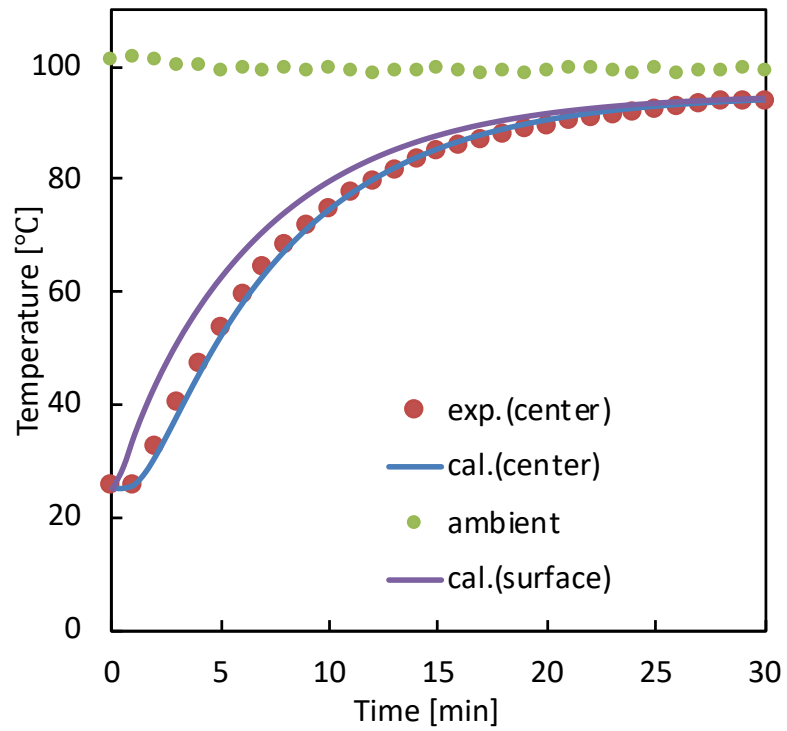


Fig.5-5 試料内温度分布の計算結果

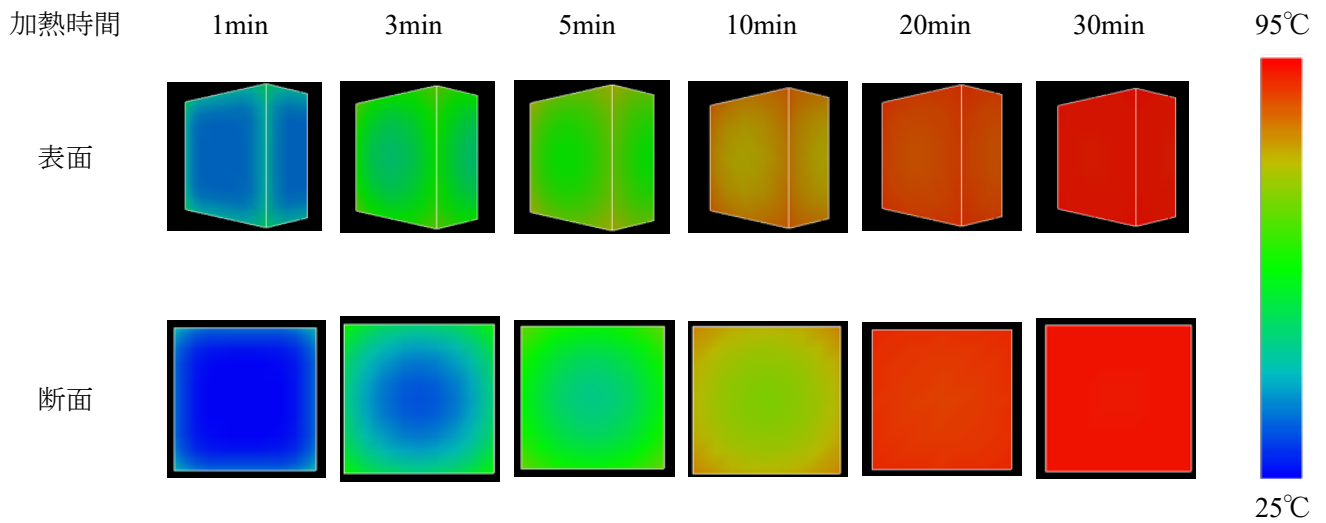


Fig.5-6 蒸煮中の試料内温度分布の変化（実測および計算値）

5.5.2 デンプンの糊化・分散

デンプンの終末糊化度は、第4章より求めた温度の関数とした（ x は温度 T , y は終末糊化度 TEG を表す）。

$$TEG [-] = 0.0708T - 3.9223 \quad (60 \leq T \leq 70) \quad (5-11)$$

また、糊化速度定数 k_G はアレニウスの式で表され、頻度因子 k_{G0} および活性化エネルギー E_G には実験結果より求めた次の値を用いた。ここで、 T_K は絶対温度[K]である。

$$k_G = k_{G0} \exp\left(-\frac{E}{RT_K}\right) \quad (5-12)$$

$$k_{G0} = 5.53 \times 10^{23} \quad [s^{-1}]$$

$$E_G = 168 \quad [kJ/mol]$$

デンプンの分散速度定数 k_D は、糊化同様にアレニウスの式で表されると仮定し、

$$k_D = k_{D0} \exp\left(-\frac{E_D}{RT_K}\right) \quad (5-13)$$

とした。分散は糊化終了近辺で開始し、95℃程度でほぼ終了するとして速度パラメータを推算した。

$$k_{G0} = 2.0 \times 10^{13} \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$E_G = 100 \text{ [kJ/mol]}$$

デンプンの糊化および分散速度定数を上記の値としたときの計算結果を Fig.5-7 および Fig.5-8 に示した。Fig.5-7 は試料中心におけるデンプン変化を示しており、中心温度が 90℃に到達する 20 分において、分散はほぼ終了することがわかった。食味において、試料中心 90℃到達後 15min 加熱したジャガイモがホクホク感のある良い品質であるとされている。したがって、ジャガイモの品質にはデンプンの糊化および分散のどちらも影響しないことが示唆された。Fig.5-8 には未糊化デンプン、糊化デンプン、分散デンプンの 3 つそれぞれの割合変化の試料内分布を示した。試料表面から糊化が進行し、未糊化デンプンの割合が低下していき、それと反対に糊化デンプン割合が増加していくことが見て取れた。また、加熱開始 10min において未糊化デンプンはほとんどなくなり、糊化デンプンが分散デンプンへと状態変化することがわかった。

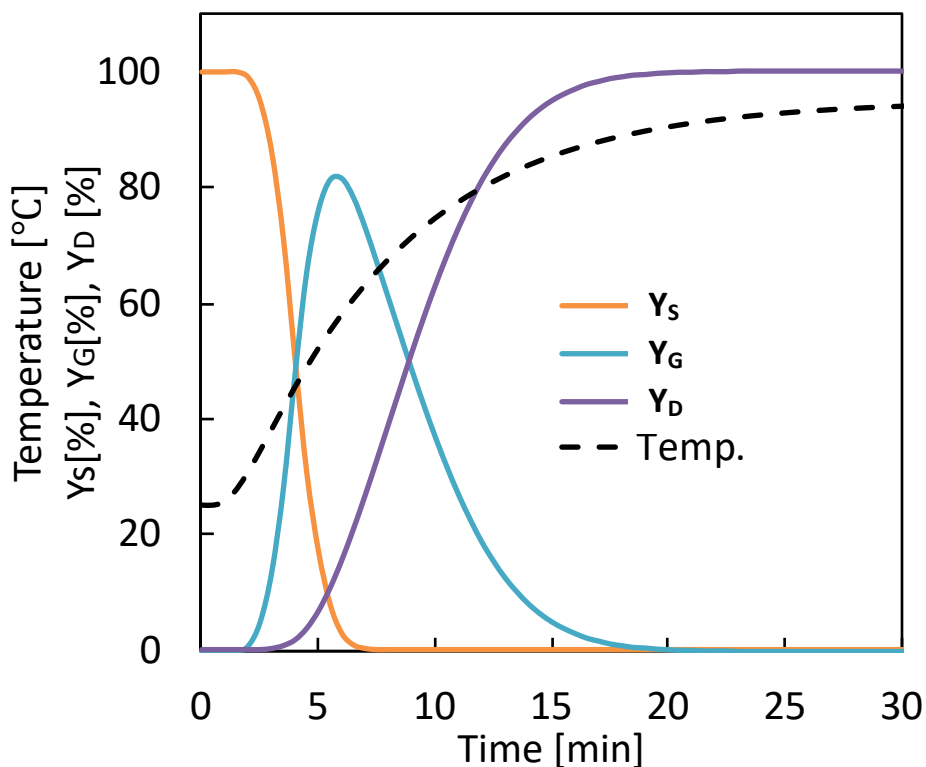


Fig.5-7 デンプンの糊化と分散の経時的変化（計算結果）

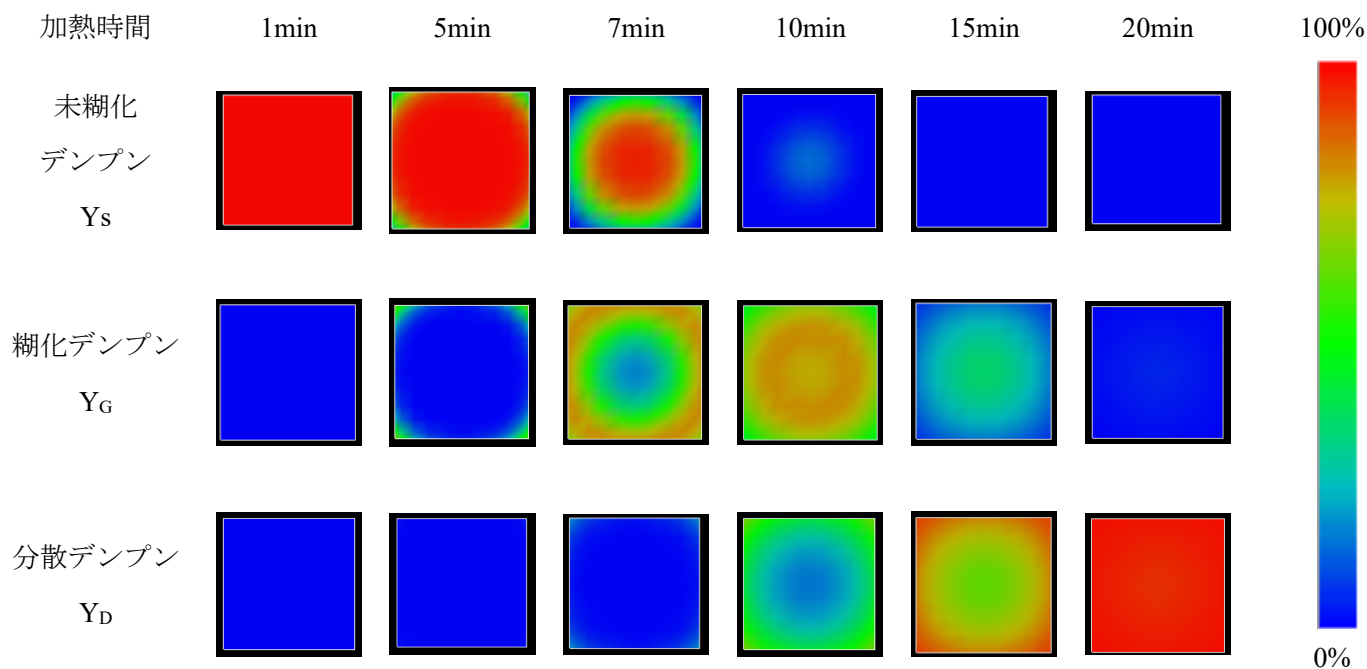


Fig.5-8 試料内デンプンの状態変化計算結果

5.5.3 ペクチンの分解

90°C到達後に試料断面の粗滑度は生のジャガイモと比較して大きくなることから、第3章より明らかとなった。このことから、細胞間隙のペクチンは90°C到達時にはある程度分解していると考えられる。また、試料中心が90°Cに到達してから15min経過した試料において粗滑度が増大することから、この15min間にペクチンの分解が進行すると考えられる。ここからさらに22min(90°C到達後37min)加熱すると粗滑度は減少することから、この間に細胞壁の崩壊が進行すると考えた。以上の第3章の結果より推察したことを考慮し、次の速度パラメータを推算した。

$$\text{細胞壁間 } k_{PA0} = 1.74 \times 10^{18} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad E_{PA} = 150 \text{ [kJ/mol]}$$

$$\text{細胞壁 } k_{PB0} = 1.85 \times 10^{38} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad E_{PB} = 250 \text{ [kJ/mol]}$$

これらの速度パラメータを用いて計算した結果をFig.5-9に示した。Fig.5-9ではペクチンの分解率 D_{PA} ($= (1 - Y_{PA}) \times 100$)、 D_{PB} ($= (1 - Y_{PB}) \times 100$)で表している。図中には加熱試料の粗滑度の実測値をプロットした。この粗滑度とペクチンの分解率を関連づけるために、以下の式を「ホク度 H_d 」と定義し、加熱調理ジャガイモのホクホク感の程度を数値化した。

$$H_d = C_1 D_{PA} + C_2 D_{PB} \quad (5-14)$$

ここで、 C_1, C_2 はそれぞれ細胞間隙および細胞壁ペクチンの寄与係数である。 $C_1 = 0.5$, $C_2 = -2.5$ としたときの H_d をFig.5-9に示した。 H_d は加熱開始から35~40分付近でピークを迎え、その後減少することが見て取れる。試料中心90℃到達後15minがホクホク感のある良い品質であるとされていることから、 H_d が大きいとき加熱調理ジャガイモは高品質であると評価することができる。よってホク度を使うことにより、ジャガイモの加熱調理状態を評価することが可能であると示された。ただし、本研究で用いたペクチン分解の速度パラメータは実測しておらず、また、粗滑度のデータについて十分でないことから、これら両者についての実測値の取得および評価が必要であると考えられる。

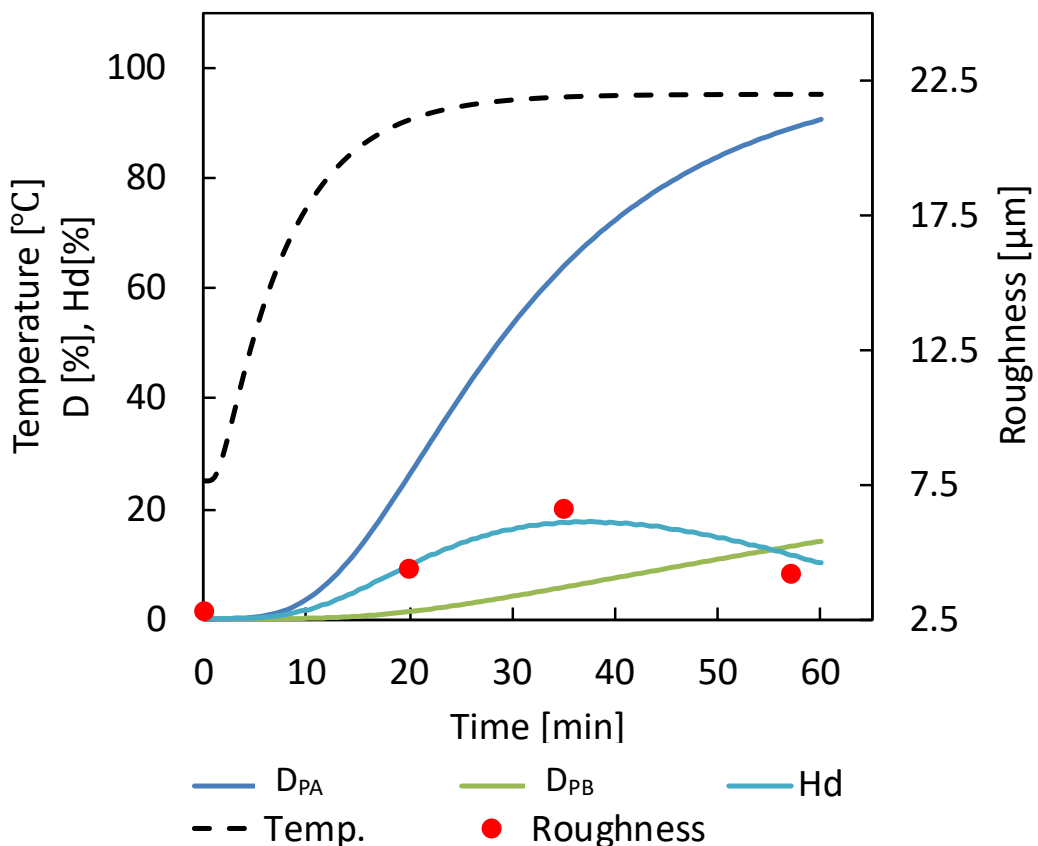


Fig.5-9 ペクチン分解の経時的変化 (計算結果)

5.5.4 加熱温度を変更した場合のジャガイモ品質の予測

上記と同様にして、環境温度 90°C で 120min 間加熱したときの計算結果を Fig.5-10 に示した。加熱温度が 95°C の場合と比べて、デンプンの糊化・分散の速度はわずかに遅く、加熱開始からおよそ 23min 後にデンプンの変化は終了していることが見て取れる。細胞間隙および細胞壁におけるペクチンの分解反応も加熱温度 95°C よりも進行が遅いことが示され、およそ加熱開始から 75min でホク度 H_d が最大となることが見て取れる。 H_d の経時的変化を表す曲線は緩やかなカーブを描き、比較的大きいホク度を維持している時間が加熱温度 95°C の計算結果よりも長い。したがって、ペクチンが分解する温度帯のうち低い温度で加熱すると、ジャガイモは高品質な状態を長く推移することが考えられた。よって、ペクチン分解の起きる最も低い温度で加熱することにより、美味しく高品質な加熱ジャガイモを安定的に製造することができると考えられる。

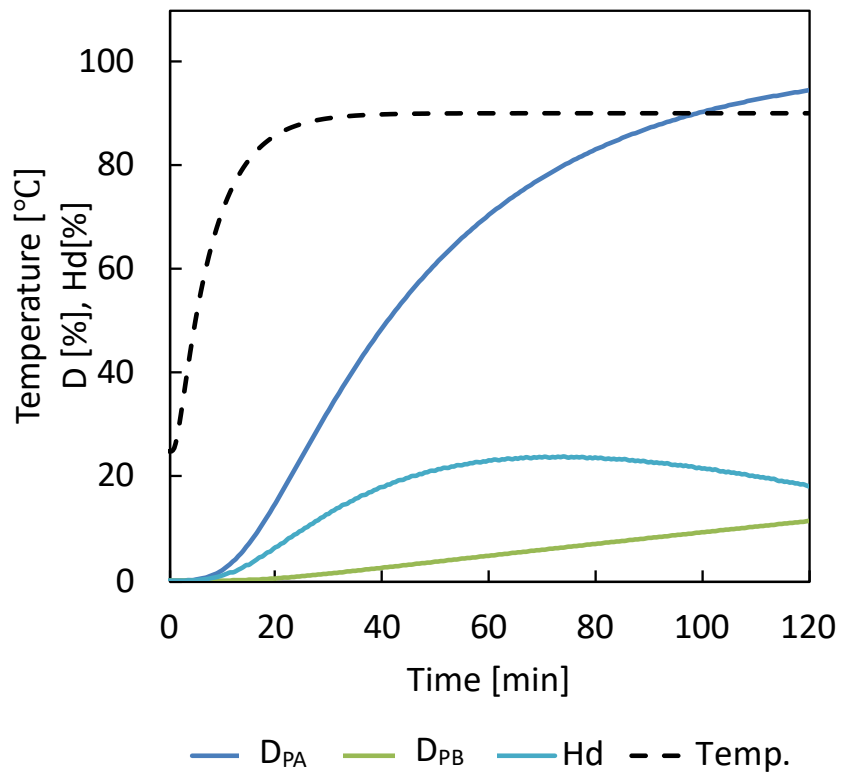
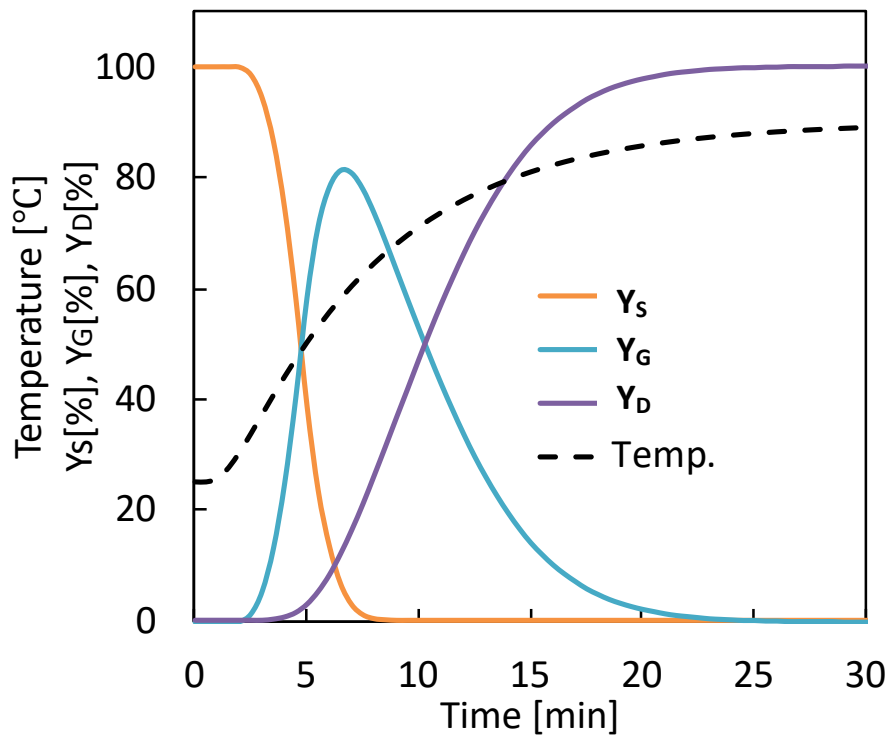


Fig.5-10 90°C加熱における計算結果

(上部：デンプンの糊化と分散の経時的変化，下部：ペクチン分解の経時的変化)

5.6 まとめ

前章より、デンプンの糊化反応は直接的に加熱調理後のジャガイモの品質（ホクホク感）には影響しないことが示唆され、本章では糊化に加えてデンプンの分散およびペクチンの分解の過程に着目して定量化を試みた。

デンプンの分散は加熱開始 20min 後にはほとんど終了しており、高品質とされる試料中心温度が 90℃に到達してから 15min（加熱開始およそ 37min）の試料の品質にはデンプンの糊化および分散は影響しないことがわかった。

ペクチンの分解においては、まず細胞間隙のペクチンが分解して細胞間の結合力が失われ、細胞集合体が小さくなっていくと考え、この過程がホクホク感に大きく寄与するとした。そしてさらに反応が進むと、細胞壁のペクチンが分解して崩壊することで中から糊化・分散したデンプンが放出され、粘性が高くなりホクホク感が低下すると考えた。以上の考えをもとに、細胞間隙と細胞壁の2つに関してペクチン分解の速度パラメータを推算し、加熱に伴う経時的変化を計算した。これらの反応速度解析によって導入したホク度の変化は、マイクロスコープにより測定した粗滑度の挙動と一致した。このことから、ホク度によってジャガイモの加熱調理状態を評価することが可能であると示唆された。

ただし、正確な評価を行うためには、今後より詳細な粗滑度の測定およびペクチン分解に関わる反応速度パラメータの実験的取得と検証が必要である。

また、加熱温度を 90℃とした場合の計算結果は、加熱温度 95℃と比べて大きいホク度である時間が長く、高品質なジャガイモの状態が長く維持されることが予測された。このことから、ペクチンが分解する温度帯のうち低い温度で加熱することは、美味しく高品質な加熱ジャガイモを安定的に製造することにつながると考えられた。

5.7 本章の参考文献

- [1] Anne-Marie Hermansson and Karin Svegmarm, “Developments in the understanding of starch functionality” , Trends in Food Science & Technology, 7, 345-353, 1996.
- [2] 香西みどり, “野菜の食味と加熱” ,日本食生活会誌, 17, 2, 100-104, 2006.
- [3] 香西みどり, “野菜の硬化とその機構” ,日本調理科学会誌, 35, 4, 387-392, 2002.
- [4] 平野雅子, 橋谷淳子, “じゃがいもの調理” , 調理科学, 5, 1, 26-31, 1972.

<参考 URL>

- [a] https://www.takarashuzo.co.jp/products/seasoning/basicinfo/003.htm#sec_4 (Jan. 8, 2020)

第6章 総括

本研究では、加熱途上のイモ組織で生じる種々の反応、すなわちデンプンの糊化や細胞壁を構成するペクチンの分解をモデル化し、反応速度解析を行うことで、加熱ジャガイモの品質を予測可能にすることを目的とした。そこで、加熱の進行に伴うジャガイモの物性ならびに組織変化を調べ、食感との関係について把握するとともに、品質を表わす定量的な指標を作ることを目指し実験を行なった。

第1章では、研究背景および目的、ジャガイモについて、加熱によるデンプンおよびペクチンの変化について述べた。

第2章では、ジャガイモの加熱による物性変化を把握すること、ならびに、「ホクホク感」と物性の関係を検討することを目的とし、硬さおよび含水率に着目して実験を行った。含水率の蒸煮条件による差はなく、品質には影響しないことがわかった。破断測定においても蒸煮条件による差は見られなかった。しかし一方で、官能評価の結果では蒸煮条件によって違いが感じられ、食感・品質に差が生じることが示唆された。よって、ジャガイモには、破断測定で捉えることは難しい加熱による品質変化が起こることがわかった。

第3章では、第2章において破断応力値では明らかにできなかったジャガイモの品質の差異について、定量的分析を可能とすることを目指して実験を行なった。テクスチャー変化の要因の一つとして、細胞同士の結着力・分離性が関わりと考えられていることから、細胞分離性に着目し、マイクロスコプを用いた試料断面の粗滑度より評価することを試みた。加熱したジャガイモは未加熱のものよりも粗滑度は大きく、加熱試料では15min 試料が最も粗滑度が大きい結果であった。また、加熱時間が長くなるにつれて、細胞分離が徐々に進んで粗滑度は大きくなっていくものの、一定の細胞分離が進行すると反対に粗滑度が小さくなることがわかった。したがって、ジャガイモの切断面は加熱による細胞分離の進行により、「(細胞が結着した塊が生じて凹凸が作られる) さらに(塊が消滅して流動性が生まれ凹凸がなくなる)」という現象が起きていることが考えられた。以上より、細胞の分離性と加熱ジャガイモの品質には相関があり、粗滑度の測定によって品質評価が可能であることがわかった。そして、ホクホク感のある美味しい高品位な加熱ジャガイモとは、完全に細胞が分離せずある程度結着した状態であることが示唆された。

第4章では、ジャガイモの主要成分であるデンプンについて分析することは、品質を評価する上で重要であると考え、加熱によるジャガイモの糊化進行度の変化を予測可能にすることを目指して実験を行なった。また、糊化進行度と加熱後の品質の関係について検討した。本研究では、「デンプン粒は偏光下で特有の複屈折が観察される」という特徴を利用し、偏光顕微鏡画像の色彩値の変化から糊化速度式を算出し、糊化反応について解析した。終末糊化度の温度依存

性および非等温実験の結果をもとに求めた糊化反応速式は、概ね実測と一致し、デンプンの糊化進行度を予測することができた。蒸煮加熱における実測の温度履歴から計算したジャガイモの糊化進行度の変化によると、糊化反応は加熱開始の約5分ごろから開始し、その4分後には終了することが考えられた。このことから、加熱によるジャガイモの品質には、デンプンの糊化は大きく影響しないことが示唆され、その後の組織変化等が関与していることが考えられた。また、視覚的にわかりやすく簡便な糊化反応についての測定方法を見出すことに成功した。

第5章では、ジャガイモの調理過程として、「①ジャガイモ内熱移動 ②デンプンの糊化・分散 ③ペクチンの β 脱離による分解」の3つの過程について定量化を試みた。デンプンの分散においても加熱開始20min後にはほとんど終了しており、ジャガイモの品質には直接的に影響を及ぼさないことがわかった。ペクチンの分解は、細胞間隙と細胞壁の2つにおいて生じる考え、それぞれの分解速度パラメータを推算して加熱に伴う経時的変化を計算した。これらの反応速度解析によって導入したホクホク感を数値化した「ホク度」の変化は、マイクロスコープにより測定した粗滑度の挙動と一致した。このことから、「ホク度」によってジャガイモの加熱調理状態を評価することが可能であると示唆された。また、加熱温度を低く設定した場合の計算結果より、ペクチンが分解する温度帯のうち低い温度で加熱することで、長く高品質なジャガイモの状態が維持されることが予測された。

以上述べた通り、各実験によって加熱に伴うジャガイモの物性変化・デンプン糊化反応・細胞分離の現象について把握し、それらと品質との関係を明らかにした。また、切断面の粗滑度およびペクチン分解反応の定量的な予測計算をもとに、ホクホク感を数値化する「ホク度」を算出し、高品質なジャガイモの指標を確立することができた。今後の展望として、正確な評価を行うためのより詳細な粗滑度の測定およびペクチン分解に関わる反応速度パラメータの実験的取得と検証を行う必要がある。品質な加熱ジャガイモを安定的に製造することが求められている外食・惣菜・加工食品産業において、ホク度をもとに最適な蒸煮条件を提案することを可能にしたい。

謝辞

本研究におきまして，多大なご協力と親身なご指導をしてくださいました，東京海洋大学大学院の酒井昇教授ならびに福岡美香准教授に，厚く御礼申し上げます。

また，研究についてご指導とご助言を賜った東京海洋大学大学院の萩原知明教授，ならびに，キューピー株式会社の大橋重夫氏，梅津徹氏，溝上晃弘氏，吉村由祐子氏，デリア食品株式会社の藤澤正則氏，池袋節夫氏，株式会社旬菜デリの佐藤洋二氏に深く御礼申し上げます。

最後に，研究室生活を共にした食品熱操作工学研究室の同期をはじめ，同研究室の先輩ならびに後輩の皆様から貴重なご意見およびご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。