



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	加工による食品テクスチャーの改変と物性評価に関する研究
Author(s)	竹井, 亮
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	乙第7098号
Issue Date	2020-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.r7098
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78082
Type	doctoral thesis
File Information	Ryo_takei.pdf



博 士 論 文

加工による食品テクスチャーの改変と
物性評価に関する研究

令和 2 年 3 月

竹井 亮

目次

略語一覧.....	5
序論.....	6
第1部の概要.....	8
第1部 酵素処理肉のテクスチャー変化.....	10
第1部 序論.....	10
1-1 介護食のテクスチャー.....	10
1-2 料理の外観と食欲.....	13
1-3 外観を損なう介護食.....	14
1-4 外観を保持した介護食.....	15
1-5 本研究の目的.....	16
第1部 本論.....	17
第1節 酵素処理牛肉の咀嚼前後の物性変化.....	17
緒言.....	17
第1項 実験材料および実験方法.....	18
1-1 実験材料.....	18
1-2 酵素導入法.....	18
1-3 栄養成分分析.....	19
1-4 咀嚼試験.....	20
1-5 テクスチャー解析 (Fig. 1-5)	20
1-6 圧縮試験 (Fig. 1-6)	21
1-7 クリープ試験.....	23
1-8 分散性試験.....	23
1-9 統計解析.....	24
第2項 結果.....	25
2-1 外観 (Fig. 1-7) と変形性 (Fig. 1-8)	25
2-2 栄養成分分析 (Table 1-5)	25
2-3 咀嚼試験 (Fig. 1-9)	25

2-4	かたさ (Table 1-6)	25
2-5	クリープ試験 (Table 1-7)	26
2-6	圧縮試験 (Fig. 1-10、Table 1-8)	27
2-7	分散性試験 (Table 1-9)	27
第3項	考察	28
第4項	まとめ	32
第2節	咀嚼困難者用の酵素処理鶏胸肉の食感と微細構造	33
緒言		33
第1項	実験材料および実験方法	34
1-1	実験材料	34
1-2	酵素導入法	34
1-3	栄養成分分析	35
1-4	かたさ	36
1-5	線維感測定試験 (Fig.1-11)	37
1-6	SDS-PAGE	37
1-7	透過型電子顕微鏡 (Transmission electron microscopy、TEM) 観察	38
1-8	走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy、SEM) 観察	39
1-9	統計解析	39
第2項	結果	40
2-1	外観 (Fig. 1-12)	40
2-2	栄養成分分析 (Table 1-10)	40
2-3	かたさ (Fig. 1-13)	40
2-4	線維感測定試験 (Fig. 1-11)	41
2-5	SDS-PAGE (Fig. 1-14)	41
2-6	透過型電子顕微鏡 (Transmission electron microscopy、TEM) 観察 (Fig. 1-15、1-16)	41
2-7	走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy、SEM) 観察 (Fig. 1-17)	42

第3項 考察	43
第4項 まとめ	45
第2部 米菓製造工程中の団子物性が米菓の品質に与える影響	46
第2部 序論	46
2-1 Internet of Things (IoT) とは	46
2-2 Process Automation (PA) とは	46
2-3 米菓製造工程	47
2-4 米菓製造における PA	48
2-5 本研究の目的	48
第2部 本論	50
緒言	50
第1項 実験材料および実験方法	51
1-1 実験材料	51
1-2 団子の調製	52
1-3 米菓サンプルの調製	53
1-4 団子の動的粘弾性 (Fig. 2-2)	54
1-5 米菓サンプルのかたさと圧縮時の総エネルギー	56
1-6 団子と米菓の走査型電子顕微鏡観察	57
1-7 米菓サンプルの比容積	57
1-8 統計解析	57
第2項 結果	59
2-1 団子の貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' (Fig. 2-3) および損失正接 $\tan \delta$ (Fig. 2-4)	59
2-2 各蒸し条件の団子の、練り時間に対する G' 、 G'' (Fig. 2-5) と $\tan \delta$ (Fig. 2-6) およびまとめ (Table 2-1)	59
2-3 各団子の G' に対する G'' (Fig. 2-7)	60
2-4 団子の走査型電子顕微鏡観察 (Fig. 2-8)	60
2-5 米菓外観 (Fig. 2-9)	61

2-6	米菓比容積と団子 $\tan \delta$ (Fig. 2-10)	61
2-7	米菓かたさと団子 $\tan \delta$ (Fig. 2-11)	61
2-8	米菓断面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察 (Fig. 2-12、2-13)	62
2-9	米菓圧縮時の総エネルギー (Fig. 2-14)	62
第3項	考察 (Fig. 2-15)	63
第4項	まとめ	69
総括		70
謝辞		72
引用文献		74
図表		84

略語一覧

本論文で使用した略語の一覧を以下に示す。

TPA : Texture Profile Analysis, 圧縮によるテクスチャー測定方法

HEPM : Homogeneous Enzyme Permeation Method, 酵素均質浸透法

SEM : Scanning Electron Microscopy、走査型電子顕微鏡

TEM : Transmission electron microscopy、透過型電子顕微鏡

HEPB : Homogeneous Enzyme Permeation treated Beef、酵素均質浸透法処理牛肉

HEPB+m : masticated Homogeneous Enzyme Permeation treated Beef、咀嚼後 HEPB

NB : Normally cooked Beef、常食牛肉

NB+m : masticated Normally cooked Beef、咀嚼後常食牛肉

QOL : Quality of Life、生活の質

HEPC : Homogeneous Enzyme Permeation treated Chicken、酵素均質浸透法処理鶏肉

NC : Normally cooked Beef、常食鶏肉

SDS : Sodium Dodecyl Sulfate、ドデシル硫酸ナトリウム

PAGE : Poly-Acrylamide Gel Electrophoresis、ポリアクリルアミドゲル電気泳動

MHC : Myosin Heavy Chain、ミオシン重鎖

G' : ジープライム、貯蔵弾性率

G'' : ジーダブルプライム、損失弾性率

$\tan \delta$: タンジェントデルタ、損失正接

序論

テクスチャー (Texture) はラテン語の織る (texo) を語源とし、織物 (textile) の風合い・質感を意味していたものが転じて、感触や質感、肌理、詩的要素という意味合いを帯びるようになった。Szczeniak¹⁾ (アメリカ)、Sherman²⁾ (イギリス) らによってさらにテクスチャーは食品テクスチャー (Food Texture) として、食品の質感、食感、触感を示すものとして提唱された。国際標準化機構では「力学的・触覚的および適切であれば視覚的・聴覚的な方法で感知できる食物のレオロジー的 (変形と流動) ・構造的 (幾何学的小および表面的) 属性の総体」と食品テクスチャーを定義している³⁾。

近年、日本をはじめとする先進国の人口の少子高齢化は、被介護者の増加と介護者の高齢化を同時に起こし深刻な社会問題となっている。優れたテクスチャーと利便性を持つ介護食製品の開発は、患者の栄養状態を改善し得るだけでなく介護者の調理時間及び提供時間の短縮にもつながるため、より望ましい介護食の開発研究は現代の介護問題の打開策の一つとなりうる。よって、製造された介護食がどのような要因で外観と食感を損なわず軟化を実現したかを明らかにすることは、今後の製品開発に重要な指針を与える。また、テクスチャーの一定した製品の製造は食品製造業において必須であるが、米菓製造など、最終産物の外観やかたさの調整に人的な勘やコツがいまだに必要とされる品目が存在する。相対的な労働力人口の減少の対策として、食品を含む製造業においてもさらなる機械、ロボット、Internet of Things

(IoT) 技術の導入が不可避と言われているが、製品によっては未だに勘・コツと呼ばれる職人的な五感に頼った製造・品質管理が存在し、労働人員の削減への壁は高い。このような職人的繊細な感覚を物性測定で定量化することで、機械、ロボットによる代替が進み、労働力不足を補い、より少ない労働力で高い生産性を確保することが可能となる。

本研究は上述の視点から、食品テクスチャーに関わる問題に焦点をあて、1) 研究開発された介護食品の未解明であった物性の評価およびその特質（第 1 部）と 2) 米菓製造における勘、コツの定量化と品質予測について研究を行った（第 2 部）。

第1部の概要

肉はタンパク質の優れた供給源である。しかしながら義歯や加齢による筋力低下、脳卒中など傷病の後遺症によって咀嚼能力が低下した高齢者は、食肉を肉料理として食べたくても食べられなくなっていく。このことが高齢者のタンパク質不足の一因であり、近年、加齢、活動（廃用）、栄養、疾患による筋肉量減少および筋力低下状態であるサルコペニアやそれに伴うロコモティブシンドローム（筋肉など運動器の衰えが原因で、「立つ」「歩く」といった機能（移動機能）が低下している状態）等、高齢者の低タンパク質による重篤な栄養障害、機能障害が問題視されている⁴⁾。このような患者に対し、タンパク質の摂取量をまかなうため、肉を刻み食やペースト食などに加工して提供されることがある。しかし、刻みやミキサー処理により食材が本来持っている食感、形状や色彩が完全に失われると、喫食者は何を食べているのかわからないだけでなく、味が混ざったり薄まったりして食事を楽しめなくなる。結果として食欲を失いタンパク摂取量が減少し、栄養失調を来たす場合が少なくない⁵⁻⁷⁾。

著者は肉に関して、酵素液注入と長時間低温反応による外観を保持した軟化方法を開発した。酵素均質浸透法（Homogeneous Enzyme Permeation Method : HEPM）⁸⁾と名付けられたこの軟化方法を用いることにより、通常調理と同等の外観、風味を保ったまま、且つ舌で容易に潰せるほどに十分軟らかい肉を作製した。第1部ではその肉のテクスチャーと軟化の機構について調べ、咀嚼困難者への食事としての有用性を検証した。

第2部の概要

米菓はあられ・おかきと煎餅の2種に大別される。あられ・おかきは糯米（もちごめ）原料の米菓であり、小型のものをあられ、大型のものをおかきと呼び、食感がソフトで口どけが良い。粳米（うるちまい）原料の米菓は煎餅と呼ばれ、食感がかたいものからやわらかいものまで様々な食感のものがある。

上述米菓の製造中間物はそれぞれ餅、団子であるが、パンやクッキーなど小麦粉を使用したドウと異なり、ネットワークを作るタンパク質であるグルテンを持たないため、高温により糊化した澱粉ゲルによって生地が作られる。そのために餅や団子はハンドリングがより困難で物性の定量化が難しい。工程が長く複雑な米菓製造において上流の加工時の適正な加工条件の設定は最終品質を左右するが、糊化、練り、乾燥と条件が多岐にわたり相互に影響するためにその解析は容易ではない。それこそが米菓製造技術が勘・コツの職人芸といわれる所以であり品質・工程管理の困難な理由である。以上を鑑み、本部では団子生地の品質・工程管理を目的に、団子生地の動的粘弾性測定によって得られる数値と最終産物の食感に相関がないか解析した。第2部では煎餅の製造中間体である団子生地の物性と最終製品の品質の関連について述べる。

第 1 部 酵素処理肉のテクスチャー変化

第 1 部 序論

1-1 介護食のテクスチャー

日本における 2018 年 10 月時点の 65 歳以上の高齢者人口は総人口の 28.1%で 3558 万人を超え、過去最高であり 1950 年（昭和 25 年）以降一貫して上昇が続いている（総務省統計局、2018）⁹⁾。高齢者は筋力低下、義歯や疾病後遺症等の様々な原因で喫食可能な食品の物性範囲が狭まってくる。しかしながら、一般家庭はもちろん、特養や老健施設、病院においても患者に合った介護食を作製することは多大な負担となる。また、食経験豊かな高齢者は食べやすさだけでなく、美味しさが喫食率に大きくかかわってくる。このような背景より介護食品、高齢者用食品の需要は高まっている。

平成 6（1994）年、厚生労働省が特別用途食品に「高齢者用食品」とその測定方法を定義した¹⁰⁾。厚生労働省はその後、平成 21（2009）年に特別用途食品の基準改定を行い、嚥下困難者のための食事物性と測定方法の基準を、「特別用途食品の表示許可等について」（平成 21 年 2 月 12 日食安発 0212001 号）の発出で通知した¹¹⁾

（Table. 1-1）。これらはゲル状食品やペースト状食品について、等速直線運動による圧縮試験によりかたさ、付着性、凝集性を算出するものである。その後、消費者庁の発足により表示許可の業務は消費者庁に引き継がれた。なお、食品の「かたさ」について特別用途食品の許可基準においては 2 往復の圧縮試験（テクスチャー測

定、Texture Profile Analysis : TPA) のうち 1 度目の圧縮の最大荷重を測定治具の接触面積で除した値、すなわちかたさ応力[Pa]を 1994 年時点では「堅さ」、2009 年資料では「硬さ」と表記される¹²⁾が、一方でベビーフードに関する厚労省資料においては「固さ」の表記がある。また「硬さ」は工業試験上、特に表面近傍の変形や傷つきにくさを示すが、食品の大変形時の最大荷重や圧力を示す際に工業試験的な硬度と必ずしもイメージが合致しない。そのため本論文では後述のユニバーサルデザインフード (UDF) や測定機器などのいわゆる食品業界の表示に倣い、介護食における TPA については一度目の圧縮の最大荷重を治具の接触面積で除した応力を「かたさ」、あるいは「かたさ応力」[Pa]と表記する。また米菓についての 1 圧縮の破断解析試験では米菓のその他の論文に倣い、その最大荷重[N]を「かたさ」と表記するものとした。

しかしながら、「病者向け」食品に対する許可製の表示基準、表示許可制度は加工食品業界が目指す一般用食品としての「介護食品」とはからなずしも合致せず、各社が独自の考え方で開発が行われてきた。この不一致を是正するために、日本缶詰協会と介護食品製造に携わる民間企業による介護食品協議会（仮称）設立ワーキンググループが平成 12（2000）年に発足し、利用者の利便性と提供者の信頼性確保のため介護食品の区分について検討が始まった¹⁰⁾。これが後の日本介護食品協議会（平成 14（2002）年）となり、平成 15（2003）年に「ユニバーサルデザインフード自主規格第 1 版」に示される、区分表を発行した¹³⁾（Table. 1-2）。

さらに平成25年2月から、農林水産省が中心となり、厚生労働省、消費者庁などとも連携して、介護食品市場の拡大を通じて、国民の健康寿命の延伸に貢献することについて検討を進め、新しい「介護食品」の愛称としてスマイルケア食¹⁴⁾を提唱し、乱立する介護食品の分類の包含、統一を目指している。かむこと・飲み込むことに問題はないものの、健康維持上栄養補給を必要とする方向けの食品、かむことに問題がある方向けの食品、飲み込むことに問題がある方向けの食品の3種のカテゴリーが設けられ、それぞれ「青」、「黄」、「赤」のマークによって簡単に見分けられるよう表示が提案され平成28年から運用開始されている。

その運用に関しては、「青」マーク農林水産省の要領に基づいて自己適合宣言を行う仕組みの対象とされ、「黄」マーク5、4、3、2はJAS制度（そしゃく配慮食品の日本農林規格）の対象、「赤」マーク2、1、0は消費者庁の特別用途食品の表示許可制度（えん下困難者用食品）の対象として、農林水産省に対してマークの利用許諾を申請することとなっている（Fig. 1-1）。

上記の他にも、患者の摂食状態や能力を分類した藤島グレード（Table 1-3）¹⁵⁾、食品やその性状を分類した嚥下食ピラミッド（Fig. 1-2）¹⁶⁾、摂食嚥下リハ学会分類2013（Table 1-4）¹⁷⁾など多くの研究者の試みと区分が存在する。各研究者・医療従事者、企業、団体、省庁の試行錯誤ともいえる取り組みそのものが介護食品およびそのテクスチャーの既定の難しさと重要性、必要性を示しているものと言える。2019年5月18日の朝日新聞21面¹⁸⁾には高齢者の食支援について、口腔機能だけでなく高齢者の意欲や呼吸状態、認知状態などを複合的に評価するため

のツールとして「KTバランスチャート」を紹介されている。そこでは「食事を続けることは、栄養状態を保ち、病気からの回復や再発防止に役立つだけでなく、周囲にとっても励みとなる」とある。また、体調などで刻々と変わる食べる機能に対して市販加工食品のメニューも増えてきていることを紹介している。

1-2 料理の外観と食欲

『美味礼讃』¹⁹⁾を著したフランスの政治家であり美食家のブリア=サヴァランは著書内で「食卓の快楽はどんな年齢、身分、生国の者にも毎日ある。他のいろいろな快楽に伴うこともできるし、それらすべてがなくなっても最後まで残ってわれわれを慰めてくれる。」として食の楽しみは人生の最後まで感じることでできる快楽と位置付けている。

食物に対して「おいしい」と感じる感性は、味や風味だけでなく、外観や、テクスチャー、温度あるいは、音（そしゃく音）などの影響を受ける。そのため味覚や嗅覚だけでなく、視覚、触覚（皮膚感覚）、聴覚などもおいしさに関連する。

Sherman らのテクスチャープロファイル (Fig. 1-3) ^{20, 21)}でも食品は外観からはじめの認識を受けることで知覚が開始される。手嶋 ²²⁾によると「食欲は目、耳、鼻から脳神経を介して視覚・聴覚・嗅覚が働き、大脳新皮質の視覚野・聴覚野・嗅覚野で食べ物を認知することから始まり、五感から取り入れた情報は、古い脳と呼ばれる海馬・扁桃核・視床下部で情報処理され、情報伝達路を介して前頭連合野でおいしさを感じる」とされている。つまり食欲とは「美味しそうなもの」という認知が引

き起こすものであり、認知のできないもの、経験と異なるものは十分に食欲をかきたてることが難しい。

こうした外観を含む知覚から誘導される食欲と、それに基づく食品の経口摂取、つまり食事は唾液分泌や口腔内の洗浄、胃の蠕動運動など医学的・生理的価値もさることながら、個人のみならず周囲の人間とのかかわりも含めた生活活動であり QOL の大きな部分を担っているといえる。事実、2014 年のファイザー株式会社のインターネット調査では健康状態が良いと回答した 65 歳から 70 歳の男女 600 人の健康の指標は「美味しく食べられる」が 1 位であり、健康を損なわないコツの第 1 位は「食生活に気を配る」であった²³⁾。また、食事は高齢者施設の利用者が具体的に実感できる「楽しみなこと」の 1 位であるといわれている。²⁴⁾

1-3 外観を損なう介護食

上述のように介護食とは食べられる食品の物性に制限がある者にたいして物性を調整して作られるものである。物性の調整方法にはたとえば包丁で通常調理の具材よりも小さく刻むこと（刻み食）や、ブレンダーミキサーによる物理的破碎（ミキサー食）、増粘多糖類を使用して通常調理では持たないとろみをもたせる（とろみ食）をはじめ、ハンバーグやしんじょのような練り工程のある料理であれば卵黄や豆腐など通常のレシピでは使用しない代替物や繋ぎを練りこむようなもの、逆に散らばってしまう粥などにゲル化剤や増粘多糖類を含ませてまとまりを改善する

もの、など多くの工夫がなされ、少しでも患者が食べやすいよう各病院、施設、家庭が患者のために取り組んでいる。

しかしながら、料理を刻み食やミキサー食にするとその外観は失われ外観から得られる素材の情報や盛り付けによる美しさも損失する。また、そのような食品においては本来は一口目においては感じることもない素材内部の味がし、調味液と具材の咀嚼により口中で徐々に混ざっていくような呈味変化を楽しむことはできなくなってしまう。

1-4 外観を保持した介護食

上記のような患者の食欲との食べる喜び、及びその家族の介護への負担など QOL の観点から、外観を保持した介護食品の作製方法が切望されてきた。

イーエヌ大塚製薬（株）と藤田保健衛生大（当時）の東口は素材ごとに最適化された条件で酵素を均質に内部まで浸透させる軟化方法を用い、個々の食品素材がオリジナルの外観を保ったまま料理として提供可能な保形軟化食品、『あいーと[®]』を開発した（Fig. 1-4）。

肉や魚などの比較的大きな塊のままのタンパク質素材は、主菜料理を成立させる上で外観上も栄養面でも必須の素材である。一方で特に肉は、その元々の素材の最大荷重が大きく、酵素液の注入と長時間の浸透・冷蔵反応の組み合わせにより最終的に軟化が達成された素材である。東口の試験²⁵⁾により一部のメニューの食素材の

崩壊性や消化性は明らかとなったが、タンパク質素材単独の特徴や物性変化の詳細は依然として明らかでなかった。

1-5 本研究の目的

プロテアーゼをもちいた食素材に含まれるペプチドやアミノ酸の分解効果を利用した食素材の軟化技術に関し歴史は長い。具体例として、酒造、製菓製パンをはじめ、肉の軟化を目的とした麴を含む調味液への浸漬などがあり、更にはパイナップルの乗ったハンバーグやメロンと生ハムの組み合わせも、味だけでなく果実のタンパク質分解酵素による肉の軟化を狙った具体例と言える。普段の我々の食生活に使われている経緯から、その物性の研究例も豊富である²⁶⁻²⁸⁾。しかしながら、肉を咀嚼困難者が容易に食べられるようにするために、そのかたさの8割以上を減ずるような強い酵素処理加工を施す一方で、外観を保持するために液化しない範囲の強度を保たせているような半固形の領域内での物性変化に成功した製品は『あいと[®]』以外、他に実施例がなく、本製品の物性等、未検討な点が多い。そのため、本製品の物性変化や特性、実際の咀嚼に対する挙動とそのメカニズムを明らかにすることは、今後の新しい介護食品を開発する上で有益な情報をもたらす。そこで本第1部では第1節において、一般的な肉素材3種である牛肉、豚肉、鶏肉のなかで最も加熱時にかたくなる牛肉（もも肉）の軟化とその咀嚼前後の物性変化について解析を行った。さらに第2節では、3種の肉の中で最もやわらかい鶏肉（胸肉）について軟化時の微細構造と肉特有の食感のひとつである線維感の解析を行い、物性を評

価した。なお、「繊維」と「線維」はどちらも **fiber** を示すが、特に生体由来の素材や医学、解剖学的に線維の表記を用いることが多いことから、本部では、表記を線維に統一した。

第 1 部 本論

第 1 節 酵素処理牛肉の咀嚼前後の物性変化

緒言

著者は酵素均質浸透法 (Homogeneous Enzyme Permeation Method : HEPM)⁸⁾を用いることにより、通常調理と同等の外観、風味を保ったまま、且つ舌で容易に潰せるほどに十分軟らかい食事『あいーと[®]』(イーエヌ大塚製薬、岩手、日本)を作製した。『あいーと[®]』はその主要タンパク質素材の一つとして HEP 処理された牛肉 (HEPB) を使用している。東口は、患者の評価による「外観スコア」、介護従事者の評価する「食事の楽しみスコア」「全体の満足スコア」が著しく増大したと報告した⁷⁾。藤島ら²⁹⁾はいくつかの『あいーと[®]』製品は嚥下困難の患者でもたべることができたと報告している。

本部では、未検定であった HEPB と通常調理された常食牛肉 (Normally cooked Beef, NB) の咀嚼前後の物性変化を調べ咀嚼困難者の食事としての有用性を検証した。

第 1 項 実験材料および実験方法

1-1 実験材料

材料は筋や脂肪層を除去した市販オーストラリア産牛モモ肉を用いた。

1-2 酵素導入法

酵素処理牛肉は原料牛肉に下記に示すプロテアーゼを含有した酵素液を、16 本針を持つラボ用インジェクター（株式会社ニッコー、特注品のため型番なし）で重量が 50%以上増加するまで注入し 16 時間 4℃静置し浸透させた。浸漬温度は腐敗防止のため冷蔵 4℃を選択し、浸漬時間はムラの少ない十分な浸透と保形や苦味を指標に予備検討から 12 時間以上 24 時間以内を規定し、本試験では 16 時間で統一した。その後スチームコンベクションオーブン（SelfCookingCenter、Rational、ドイツ）で Rational 製穴あきホテルパン上に並べ、品温 90℃、10 分までモイストモード（湿度 100%）にて加熱し、酵素反応を停止させた⁸⁾。酵素液の配合は 0.007 % (w/w) *Cariya papaya* 由来パパイン（パパイン W-40、天野エンザイム株式会社）、0.001% (w/w) *Ananas comosus* M 由来ブロメライン（ブロメライン、天野エンザイム株式会社）、0.10 M リン酸水素二ナトリウム、クエン酸三ナトリウム、グリシン、0.01 M トレハロース、ショ糖、炭酸ナトリウムを用いた。酵素均質浸透法（Homogeneous Enzyme Permutation Method）により作製したこの牛肉を HEP-treated Beef（HEPB）とした。

対照区となる常食牛肉（Normally cooked Beef, NB）は公益財団法人日本食肉消費総合センターのホームページ上の牛肉の焼き加減と内部温度の項のウェルダンの品温、70～80℃³⁰⁾を参考に、また冷凍後の解凍条件の 80℃蒸し加熱を踏まえ、一般的な調理加熱の芯温として 80℃、0 分（80℃到達時に加熱終了）まで加熱調理した。サンプルは全てブラストチラーで急速凍結し-20℃で保存し、試験使用時に容器に入れ容器ごと密封し 80℃、30 分蒸し加熱処理を行い解凍後保温して 45℃で使用した。さらに HEPB と 3 種の市販咀嚼困難者用介護食の肉製品と栄養素比較を行った。比較製品は再成型牛肉（マルハニチロ）、ペースト状鶏肉（キューピー）、再成型鶏肉（マルハチムラマツ）を使用した。これらは肉、油脂かつ/または多糖類からなり、ゲル状あるいはペースト状のテクスチャーを持つものである。

1-3 栄養成分分析

水分、タンパク質、脂質、灰分はそれぞれ減圧乾燥法³¹⁾、ケルダール法、ソックスレー法³²⁾、直接灰化法を用いて決定した。測定は全て必要量をミキサーで均質化し、そこから必要重量を採取し 3 回測定を行い平均化した。炭水化物量は下記の式を用いて計算した。

試料 100 g あたりの炭水化物量 (g/100 g) = 100 - (水分 + タンパク質 + 脂質 + 灰分) (単位は全て g/100 g)³³⁾

エネルギー含有量は 1 g あたりタンパク質 4 kcal、脂質 9 kcal 及び炭水化物 4 kcal の換算値を使用した。炭水化物量が計算上 0%未満となる場合は炭水化物由来のエネルギー含有量を 0 kcal として計算した。

1-4 咀嚼試験

本試験の被験者には 25~34 歳の健康な成人男女を用い、各被験者は試験食を自由に通常通り咀嚼し完全に飲み込むよう指示された。咀嚼試験は HEPB と NB に関して各々 3 回、計 6 回行った。NB、HEPB とともに生肉換算で 10 g となるよう、NB は生肉をカットした時点で 10 ± 1 g、HEPB はインジェクション終了後 30 分経過時点で、インジェクションによる増加率分を 10 g に掛けた値分、大きくカットして加熱を行ったものをそれぞれ 1 口サイズとした。インジェクションによる増加率は 1 の位を四捨五入し、計算に用いた。咀嚼サイクル数は食品を口中に入れた後の開口から閉口に至るまでを 1 咀嚼サイクルとして被験者の下顎の上下動回数を観察することで測定した。咀嚼した試料が食塊となり咽頭部へ輸送され、一番初めに主観的に嚥下が誘発されたタイミングを咀嚼の終了とし、被験者に直ちに挙手してもらい、その時点までの累積咀嚼サイクル数を咀嚼サイクル数とした。3 試行の平均化して得られた値をそのサンプルにおける被験者の平均咀嚼サイクル数とした。

1-5 テクスチャー解析 (Fig. 1-5)

被験者に咀嚼してもらう前のサンプルを「咀嚼前サンプル (HEPB、NB)」と定義し、咀嚼試験での被験者各々の平均回数と同じ回数だけ咀嚼したサンプルを「咀嚼後サンプル (HEPB+m, NB+m)」とした。さらに、咀嚼による口腔内での物性変化の限度として比較するため平均回数の 2 倍の回数だけ咀嚼したサンプルを「2 倍咀嚼後サンプル (HEPB+2m, NB+2m)」とした。これらのサンプルをクリープメーター (RE2-33005B, 株式会社山電) でテクスチャー解析を行った。試験方法は厚労省が定める、えん下困難者用食品の試験方法¹¹⁾に従い、サンプルを直径 40 mm、高さ 20 mm の容器に入れ、直径 20 mm、高さ 8 mm の樹脂製プランジャーを用い、圧縮速度 10 mm/s、歪率 66.7%、200 N ロードセルを使用し 2 回圧縮測定を行った (Fig. 1-5)。かたさは最大荷重を接触面積で除した値である「かたさ応力」[Pa]をかたさとした。咀嚼前サンプルは解凍後常温に戻した後 45±2℃で 30 分以上インキュベートしたものを測定した。データ解析は各試料 5 データの解析を行った。咀嚼後サンプルと 2 倍咀嚼後サンプルは 45±2℃の咀嚼前サンプルを規程回数咀嚼し回収後ただちに測定を行った。咀嚼前サンプルは 5 個の測定データの平均を、咀嚼後サンプルに関しては各被験者 2 回のデータの平均を代表値とし、5 名分のデータを使用した。

1-6 圧縮試験 (Fig. 1-6)

テクスチャー解析では得られない、サンプルをより深く噛みしめたときの口腔内の挙動を比較するため、圧縮試験を行った。咀嚼前サンプルは解凍後、底面以外を

超音波カッターでトリミングし、一辺 10 mm の立方体を切り出した。咀嚼後サンプルおよび2倍咀嚼後サンプルに関しては被験者から回収したサンプルのうち 1.5g を圧縮しないよう注意しながら平面プレートで 10 mm 立方体に成型し測定に供した (Fig. 1-6)。各サンプルは上述のクリープメーターを用いて直径 20 mm、高さ 8 mm の樹脂円柱プランジャーで初期高さに対して歪率 80%、1 mm/s の圧縮速度で圧縮を行い、0-80 %の圧縮時の圧力を連続的に測定した。咀嚼前サンプルは成型後周りをラップで包み 45°C インキュベーターで加温後測定した。咀嚼後および 2 倍咀嚼後サンプルは被験者から回収後、直ちに重量測定と成型を行い測定に供した。試験は咀嚼前サンプルは 5 個の測定データの平均を、咀嚼後サンプルに関しては各被験者 2 回のデータの平均を代表値とし、5 名分のデータを使用した。³⁴⁾

1-7 クリープ試験

圧縮試験でのサンプルの挙動の違いの要因をさらに詳しく調べるため、上述のクリープメーターを使用してクリープ試験を行った。サンプルは圧縮試験と同様の試料を用い、各サンプルに予備検討で得られた線形性範囲の中で垂直方向下向きに一定圧力を加え、20 mm プランジャーを用いて 60 秒間の荷重負荷をかけたのち 60 秒間荷重を取り除いた際の歪-時間曲線を調べ、静的粘弾性パラメーターを決定した。計算は下記の数式モデルをもちい、実験に使用したクリープメーターに付随するソフトで計算を行った。

$$\varepsilon = \frac{1}{E_0} \sigma_0 + \frac{1}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} \right) \sigma_0 + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \sigma_0 + \frac{\sigma_0}{\eta_N} t \quad (1)$$

上記の数式においては、 t は試験時間 (秒)、 ε はクリープ試験時の総歪 (無次元)、 σ_0 は加えた圧力 (Pa)、 E_0 はフック弾性体の弾性率 (Pa)、 E_1 と E_2 は Kelvin-Voigt の 6 要素モデルでの第 1、第 2 弾性率 (Pa)、 η_1 と η_2 は第 1、第 2 遅延変形の粘性係数 (Pa·s)、 η_N は粘性要素の粘性係数をそれぞれ表わす。

クリープ試験は各処理から 5 サンプルずつ行い比較を行った。咀嚼後および 2 倍咀嚼後サンプルは、各被験者から 2 回ずつサンプルを採取し平均化した値をその被験者の代表値とし、他処理と比較を行った。³⁴⁻³⁶⁾

1-8 分散性試験

各サンプルの口腔内のほぐれやすさを調べるため、分散性試験で水中での攪拌による一定粒径以上の残差量を調べた。各サンプルは 37 °C インキュベーター内で 500 ml トールビーカー中に入れた 250 ml の水中でマグネティックスターラーを用いて攪拌した。サンプル重量は 1-4 に記載したように原料生肉 10 g に相当する量を計算し、咀嚼後および 2 倍咀嚼後サンプルはその原料 10 g 相当サンプルを咀嚼後回収した全量を分散性試験に供した。攪拌開始から 5、15、30 分後に 4 mm 開きのメッシュに通し、メッシュ上に残った残渣の湿重量を測定した。試験は各処理から 5 サンプルずつ試験に供し、咀嚼後および 2 倍咀嚼後サンプルは各被験者 n=1 で 5 名分のデータを平均化した値を代表値として比較した³⁷⁾。

1-9 統計解析

統計解析は全ての試験群に対して正規性を仮定し行った。咀嚼回数のデータは Welch の *t*-test を、その他のパラメーターに関しては NB を除いて Tukey-Kramer test による多重比較を行った (JMP version 8, SAS Institute Japan Ltd., Tokyo, Japan)。
Welch の *t*-test、Tukey-Kramer test における統計的有意水準は $p<0.05$ に設定した。

第2項 結果

2-1 外観 (Fig. 1-7) と変形性 (Fig. 1-8)

NB と HEPB サンプルの外観比較を Fig. 1-7(a)、1-7(b)に示した。HEPB の外観は NB と同様に保たれており、筋線維束の断面が巨視的に観察可能だった。一方で HEPB サンプルはスプーンで容易に潰すことができるが、NB サンプルはできなかった (Fig. 1-8)。

2-2 栄養成分分析 (Table 1-5)

種々試料の栄養価を比較するため栄養成分分析を行った (Table 1-5)。HEPB のタンパク質含量 (20.9 g/100 g) は NB (27.9 g/100 g) の約 75%であった一方で、今回の比較として調べた市販介護用食品 (7.0~11.7 g/100 g) の 1.7 倍以上高かった。脂質含有量は NB が 3.0 g/100 g であるのに対して HEPB は 1.3 g/100 g だったが、市販介護食は多いもので再成型牛肉が 20.2 g/100 g、少ないもので再成型鶏肉が 1.8 g/100 g とバラツキが大きかった。

2-3 咀嚼試験 (Fig. 1-9)

5名の被験者の第一嚥下誘導が起こるまでの平均咀嚼回数は HEPB が 10.3 ± 3.2 回に対して NB は 33.6 ± 6.8 回で HEPB が有意に少なかった。HEPB サンプルはより少ない咀嚼回数で嚥下を誘導した。

2-4 かたさ (Table 1-6)

かたさを評価する数値の平均は咀嚼なしの試験区において、HEPB が $3.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、NB は $46.6 \times 10^4 \text{ Pa}$ であり、HEPB の数値は NB の $1/14$ 以下であった。さらに咀嚼ありの NB ($4.8 \times 10^4 \text{ Pa}$) の数値は咀嚼なしの HEPB ($3.3 \times 10^4 \text{ Pa}$) の値より大きな値を示した。また、HEPB の咀嚼あり ($1.4 \times 10^4 \text{ Pa}$) の数値は NB の 2 倍咀嚼のサンプル ($2.5 \times 10^4 \text{ Pa}$) よりも小さく、より柔らかいことを示す数値であった。

2-5 クリープ試験 (Table 1-7)

前述のクリープテストにより得られた各サンプルの静的粘弾性を Table 1-7 に示した。咀嚼なしの試料では HEPB の弾性率 ($E_0: 2.8 \times 10^4 \text{ Pa}$) と粘性係数 ($\eta_N: 4.6 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) の数値は咀嚼なし NB ($E_0: 24.0 \times 10^4 \text{ Pa}$, $\eta_N: 94.2 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) のそれぞれ 14 および 5 % と大きく減少した。咀嚼なし NB と咀嚼なし HEPB の粘性係数の減少は弾性率の減少よりも顕著であった。咀嚼なし、ありの HEPB の弾性率、粘性係数の数値は、咀嚼あり、咀嚼 2 倍の NB の弾性率、粘性係数に対して有意差はなかった (有意水準、 $p < 0.05$)。咀嚼前の HEPB の弾性率、粘性率の数値が、咀嚼あり NB のそれぞれの数値とほぼ同様な値を与えたことから、咀嚼なし HEPB は嚙下直前の NB と同等な微小変形挙動を示すことを表している。しかしながら、粘性率において 2 倍咀嚼 NB ($\eta_N: 2.4 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) や咀嚼あり HEPB ($\eta_N: 3.0 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) は咀嚼後 NB ($\eta_N: 4.0 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) や咀嚼なし HEPB ($\eta_N: 4.6 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) よりさらに粘性係数が低下していた。粘弾性解析とはその試料のかたさをさらに固体 (弾性) 的、液体 (粘性) 的性質に分解する作業といえるが、咀嚼処理、HEP 処

理に関わらず肉のかたさ測定値の低下はその弾性の低下よりも粘性の低下が大きく寄与していた。

2-6 圧縮試験 (Fig. 1-10、Table 1-8)

被験試料、10 mm 立方片の 0-80%圧縮試験で得られた代表的な荷重-歪曲線を Fig. 1-10 に示した。歪率 40、60、80 %の時の荷重を Table 1-8 に示した。咀嚼処理、HEP 処理どちらも牛肉の応力を減少させるが、咀嚼後 NB は 40、60、80%圧縮に伴い 11.9 N、42.2 N (40%圧縮と比較し 3.5 倍)、161.2 N (40%圧縮と比較し 13.5 倍) へと急激に応力が上昇するのに対して HEPB は 1.5 N、3.3 N (40%圧縮と比較し 2.2 倍)、8.7 N (40%圧縮と比較し 5.8 倍) と徐々に上昇した。咀嚼回数を 2 倍とした、2 倍咀嚼後 NB でも 2.5N、11.2 N (40%圧縮と比較し 4.5 倍)、76.9 N (40%圧縮と比較し 30.8 倍) と咀嚼後 NB と同様に数値が急上昇を示した。

2-7 分散性試験 (Table 1-9)

口腔内での各サンプルの唾液や肉水分(肉汁)への分散性の良さを比較するため、37℃水中での分散性試験を行った (Table 1-9)。咀嚼なしの条件での常食牛肉は攪拌後も残渣率がほぼ 100%の値を示した。一方、HEPB は攪拌後 5 分で残渣率がほぼ 35%であり、30 分後では約 7%の数値を示した。咀嚼ありの条件での常食牛肉の残渣率の値は攪拌時間に関わらず、ありの条件ではほぼ 60%、2 倍咀嚼ではほぼ 20%の値を示した。一方、HEPB 咀嚼ありの条件では、攪拌後 5, 15, 30 分でそれぞれ、残

渣率 3.5、1.4、2.3%の数値を示した。分散性に大きな違いがあると判断でき、HEPB が常食牛肉と比較し分散性が優れていると数値的に解析できた。

第3項 考察

HEPB は NB と同様な外観を保ちながらも咀嚼後 NB よりも柔らかかった (Fig. 1-7、Table 1-6)。HEPB はまた、構造を保つ強度と押しつぶすことができる柔らかさを兼ね備えていた (Fig. 1-8)。Boles と Shand は生の牛肉に塩、砂糖、リン酸 3 ナトリウムを含む水溶液を 110、125、または 150%相当注入し、調理後のかたさが半減し水分が 5.7%増加したと報告している²⁶⁾。一方、HEP 処理はかたさを NB の $46.6 \times 10^4 \text{ Pa}$ から $3.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ へと 1/14 に下げ、水分含量は NB の 69.1%に対して HEPB が 74.6%と 5.5%高いものとなった。水分含量ももちろん食素材の柔らかさの要因として重要であるが、Boles と Shand らの報告の『調理後のかたさが半減し水分が 5.7%増加』に対して、HEP 処理がほぼ同等の水分含量の上昇 (5.5%) で、かたさを 1/14 としたことから、NB の軟化をもたらした要因の主たるものは酵素反応によるものであると判断できた。

HEPB のタンパク質含量 (20.9%) は NB (27.7%) よりは低かったが、市販介護用食品の含量よりも、少なくとも 1.7 倍以上の含量であった (Table 1-5)。市販介護食のタンパク質含量が低い要因は、軟化や成型のためにタンパク質以外の脂質や増粘剤、ゲル化剤、糖質を用いていることが原因と考えられ、実際に栄養成分分析結果にも表れている (Table 1-5)。しかしながら、前述のように高齢者にとって食

事における肉は重要なタンパク源としての性質がある。脂質や炭水化物でカロリーを充足して作られる市販介護食では摂取カロリーのうちのタンパク質量は下がってしまう。よって、従来の市販介護食では高齢者のタンパク質不足を引き起こし、サルコペニアやロコモティブシンドロームの一因となってしまう可能性がある。

比較のために口腔内で嚥下までの咀嚼でこれ以上の物性変化は起きない、物性変化の限界を示すサンプルとして咀嚼なし NB を通常の嚥下誘発に必要な回数の 2 倍回数咀嚼したサンプル (2 倍咀嚼後 NB) を調整し、かたさを評価した (Table 1-6)。意図的に嚥下を止めて過剰に咀嚼を行っても 2 倍咀嚼後 NB は咀嚼後 HEPB と同じかたさを示す数値には到達しなかった。固体食品の咀嚼時の嚥下は食塊の物性が嚥下可能な物性に到達することで誘発が起きると報告されている³⁸⁾。咀嚼なしの試料において、HEPB の第一嚥下までの NB より少ない咀嚼回数 (Fig. 1-9) も考慮すると、HEPB は咀嚼前 (3.3×10^4 Pa) から嚥下直前の NB である咀嚼後 NB のかたさ (4.8×10^4 Pa) よりもやわらかい状態であり、少なくともかたさにおいて HEPB は咀嚼前から嚥下可能な物性を持っているといえる。

サンプルの静的粘弾性評価では、咀嚼なし NB, HEPB の粘性率を示す数値を比較すると、HEP 処理により数値が顕著に減少していた。また、咀嚼なし NB、咀嚼あり NB の粘性率を示す数値を比較すると、咀嚼処理も肉の粘性係数を大きく減少させた (Table 1-7)。これらの結果から、観察されたかたさの減少は HEP 処理も咀嚼処理も弾性ではなく粘性の減少が主要因であると考えた。粘性係数は食品の変形プロセスの中で主に後半に影響する要因であることを踏まえ、サンプルを 80 %歪ま

での圧縮試験に供した。予想された通り、咀嚼後 NB、2 倍咀嚼後 NB、HEPB、咀嚼後 HEPB は全ての区間で NB よりも低い応力を示した。しかしながら同程度の粘性係数に関わらず、HEPB は咀嚼後 NB よりも応力が上昇しにくいことがわかった (Fig. 1-10、Table 1-8)。微小変形時の粘弾性パラメーターである粘性係数の低さの影響に加えて、HEP 処理は咀嚼処理よりも大変形時においても肉の変形性を高めていることが示された。

食品物性と嚥下機能に関する研究では、均質で変形性の高い食塊は嚥下困難者にとって有用であるとされている³⁹⁾。HEPB は圧縮比率を増加していった場合でも応力は急激には増加しなかった。こうした HEPB が持つ物性は HEP 処理で肉が酵素分解され非常に小さい粒子となることが要因となっている。神山らは、多点圧力センサーを口腔内に設置し咀嚼時の口腔内圧力を測定したが、咀嚼時の顎の開口動作直前の高圧縮率下のときに最も高い圧力を検出している⁴⁰⁾。また、筋肉の仕事量は咀嚼する物質のテクスチャーが強い方が多いとされている⁴¹⁾。柳沢らは、筋電位測定と食物物性測定を行い、咀嚼筋活動量とかたさをはじめとする食品物性は相関することを示した⁴²⁾。それゆえ、かたさ、高圧縮時の抵抗について NB よりも低い値を示す HEPB の咀嚼は、NB と比べると実際の喫食時に口腔周辺の少量の筋活動量で摂食することが可能であると考えられる。

HEPB の口腔内の液体への分散性を観るため、種々の肉サンプルを水中で攪拌する分散性試験に供した。結果は、咀嚼後 HEPB のみならず HEPB も 30 分攪拌後の残渣量が咀嚼後 NB よりも少なかった (Table 1-9)。特に咀嚼後 HEPB は 5 分以内

にほとんどが水に分散し残渣が残らず、口腔内で直ちに変形、軟化することがわかった。酵素処理の結果として肉が小粒子化し軟化が起き、それが食塊の流動性を上げ、残渣を咽頭部へ残留させにくくする。よって HEP 処理は誤嚥や窒息のリスクを減少する可能性がある。今回の崩壊性試験はあくまで実験系であり、口腔内でこれほどの水分に食品が晒されることは起きにくい。しかしながら、口腔内には唾液、他飲食物からの水分が実際に存在するため、この試験は少なくとも圧縮や他の物性試験では観測されないサンプルの一側面を評価し、口腔内での分散性や口どけを捉えているものと考えている。ただし、より実践的な口腔内での分散性には更なる研究が必要である。

総括すると、HEPB は外観を保ったまま咀嚼後 NB よりもやわらかく、より少ない数の咀嚼で嚥下を誘導した。かたさの減少は HEP 処理による粘性係数の低下と粒子サイズの減少による変形性が寄与していた。結果として、HEPB は口腔内の唾液や食品などの水分に直ちに分散するため、高齢者のような咀嚼困難者にとって食べやすいものであった。このことは咀嚼機能の衰えた高齢者の喫食時の負担を低減し、高タンパク質の食事を容易に提供することを可能とする。通常、介護者は咀嚼困難者のために食品を細かく刻むかフードミキサーで粉砕するなど、調理に時間を要した。HEPB は外観を通常のものと同様に保ったまま食素材の軟化をもたらし、上述の調理法ではなしえないテクスチャーを持つため、フードミキサー等による調整の労力は不要であり患者のみならずそれを提供する介護者にとっても負担を軽

減するものである。こうした特性により、HEP 処理は経口栄養の応用可能性を広げ、咀嚼困難者の栄養管理への新しいアプローチを確立することが期待される。

第4項 まとめ

以上の結果より、HEP 処理がもたらす肉の軟化の要因は、本処理による粘性係数の低下と粒子サイズの減少による変形性の増大が寄与していたと判断できた。

HEPB は通常調理の牛肉と同様の外観を保ちながら食べやすい物性、つまり咀嚼困難者が喫食するのに十分なやわらかさ、容易に噛みしめられる変形性、素早い水への分散性と低粒子径化による残差の少なさを兼ね備えていることを示唆している。

第2節 咀嚼困難者用の酵素処理鶏胸肉の食感と微細構造

緒言

肉はその美味しさにおいて食感が決定的に重要な食品の代表の一つであると同時にタンパク質の優れた供給源である。しかしながら義歯や加齢による筋力低下、脳卒中など傷病の後遺症によって咀嚼能力が低下した高齢者は、食肉を肉料理として食べたくても食べられなくなっていく。

最近はそうした患者に向けた食事である特別用途食品（消費者庁）⁴³⁾、ユニバーサルデザインフード（UDF）¹³⁾、嚥下食ピラミッド⁴³⁾など指針が確立してきている⁴⁴⁾。それらメルクマールによると 50,000 Pa 以上のかたさ応力を持つ食事は咀嚼困難者にとってはチャレンジとなりうるとしている。また、若林と佐久間は低栄養が二次性サルコペニアとサルコペニアの摂食嚥下障害の病因となると述べている⁴⁵⁾。嚥下障害に対するリハビリテーションの核心は、口腔の健康ケア、リハビリテーションの手技、そして食品の改質であると彼らはしている。酵素均質浸透法を用いて⁴⁶⁾、咀嚼困難者用食品『あいーと®（イーエヌ大塚製薬）』を開発した。それは、外観は通常調理のものと変わらないが、咀嚼困難者が喫食可能なまでに十分やわらかいものである^{44,47-49)}。これまでに酵素均質浸透（HEP）法で作製した HEP 牛肉（HEPB）について報告し、本部第1節において軟化の要因を明らかとした。HEPB は牛肉に酵素液を注入後、4℃一晩の静置で低濃度の酵素が全体に均質に浸透させることで作製され、通常調理の 1/14 程度である 3.3×10^4 Pa のかたさを示した⁴⁶⁾。

本研究で、未検定であった HEP 処理を用いて作製した鶏胸肉の食感と構造について調査し、咀嚼困難者にとってのタンパク源としての有用性について調べた。

第 1 項 実験材料および実験方法

1-1 実験材料

市販の 22 塊の鶏胸肉（White Cornish × White Plymouth Rock）6 kg を用意し、皮と脂肪、血合いを除去した。

1-2 酵素導入法

酵素処理鶏肉は原料鶏肉にプロテアーゼを含有した酵素液を、16 本針を持つラボ用インジェクター（株式会社ニッコー、特注品のため型番なし）で重量が 20% 以上増加するまで注入し 16 時間 4℃ 静置後、スチームコンベクションオーブン（SelfCookingCenter、Rational 社）で Rational 製穴あきホテルパン上に並べ、品温 90℃、10 分までモイストモード（湿度 100%）にて加熱し、酵素反応を停止させた^{ref(5)}。酵素液の配合は 0.002 %（w/w）*Cariya papaya* 由来パパイン（パパイン W-40、天野エンザイム株式会社）、0.0003%（w/w）*Ananas comosus* M 由来ブロメライン（ブロメライン、天野エンザイム株式会社）0.7% 鶏エキス、7 mM 炭酸ナトリウム、2 mM 炭酸水素ナトリウム、4 mM NaCl、2 mM L-グルタミン酸ナトリウム、2 mM D-ソルビトールを用いた。注入後の鶏胸肉は横 25-30 mm × 縦 25-30 mm × 厚さ 15-20 mm 程度に切り出した。カット肉は 11 塊から 100 個以上を切り出し可能であった。この酵素処理鶏胸肉（HEP treated Chicken）を以後 HEPC と呼ぶ。通常

調理の鶏胸肉（Normally cooked Chicken, NC）として同原料の鶏胸肉を上記のサイズにカットしたものを 100 個以上作製し、同じ加熱を行った。

HEPC および NC は加熱後、横 23–28 mm × 縦 23–28 mm × 厚さ 13–18 mm 程度であった。両サンプルは-20℃で急速凍結し、試験使用時に容器に入れ容器ごと密封し 80℃、30 分蒸し加熱処理を行い解凍し、20℃インキュベーター内で 1 時間以上静置し使用した。どちらも作製後 1 か月以内に解凍し使用した。HEPC は NC と他 2 種類の咀嚼困難者用の加工肉食品に対して栄養成分比較を行った。上述の比較対象である再成型された肉加工品はチキンペースト（キューピー（株））および再成型鶏肉（マルハニチロ）であり、油脂および/または増粘多糖類が添加され、ゲル状またはペースト状になっているものである。これらの市販製品は上述の UDF 基準（Fig. 0-2）での区分 4（かまなくてよい）および区分 3（舌でつぶせる）にそれぞれ該当する。

1-3 栄養成分分析

水分、タンパク質、脂質、灰分はそれぞれ減圧乾燥法³¹⁾、ケルダール法、ソックスレー法³²⁾、直接灰化法を用いて決定した。測定は全て必要量をミキサーで均質化し、そこから必要重量を採取し 3 回測定を行い平均化した。炭水化物量は下記の式を用いて計算した。

試料 100g あたりの炭水化物量 (g/100) = 100 - (水分 + タンパク質 + 脂質 + 灰分)

(単位は全て g/100g) ³³⁾。

エネルギー含有量は 1g あたりタンパク質 4 kcal、脂質 9 kcal 及び炭水化物 4 kcal の換算値を使用した ⁵⁰⁾。炭水化物量が計算上 0%未満となる場合は炭水化物由来のエネルギー含有量を 0 kcal として計算した。日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂) ⁵¹⁾によれば、エネルギーの計算は換算係数の影響を受けるが、国際的には、食品やその成分に適用される換算係数は統一されていない。その上で、日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂) ではエネルギー換算係数について、鶏肉については「日本人における利用エネルギー測定調査」(科学技術庁資源調査所資料)の結果に基づく係数 (タンパク質 4.22, 脂質 9.41, 炭水化物 4.11) を適用している。日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂) においても上記調査による対応表がない牛肉や複数の原料を含む加工品については上述の Atwater の換算係数 (タンパク質 4, 脂質 9, 炭水化物 4) を用いており、本試験における試料のエネルギー評価方法は計算方法を統一するため Atwater の換算係数 (タンパク質 4, 脂質 9, 炭水化物 4) を使用することとした。

1-4 かたさ

HEPC と NC サンプルはクリープメーター (RE2-33005B, 株式会社山電) でテクスチャー解析を行い、1 度目の圧縮中の最大荷重を接触面積で除したかたさ応力を

試料のかたさとした。試験方法は厚労省が定める、えん下困難者用食品の試験方法³⁷⁾に従い、サンプルを直径 40 mm、高さ 20 mm の容器に入れ、直径 20 mm、高さ 8 mm の樹脂製プランジャーを用い、圧縮速度 10 mm/s、歪率 66.7%、200 N ロードセルを使用し 2 回圧縮測定を行った。サンプルは解凍し粗熱を取った後、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ で 1 時間以上インキュベートしたものを測定した。データ解析は各試料 10 データの解析を行った。

1-5 線維感測定試験 (Fig.1-11)

鶏胸肉筋線維の線維感（咀嚼時の崩壊の方向性）を測定するため、HEPC と NC は線維方向が平行に断面に観察されるように切りだし作製した (Fig. 1-11)。板状プランジャーを用いて筋線維方向に対して平行方向と垂直方向の破断応力を測定し平行方向に対する垂直方向の応力の比を線維感とした。

測定条件は上記クリープメーターを用い、破断応力測定モードで 200 N ロードセル、板状プランジャー (1 mm×8 mm)、圧縮速度 1 mm/s、圧縮率 66.67%で測定した。線維感測定の対照として、プロセスチーズとストリングチーズ（雪印、日本）を用いた。プロセスチーズは方向性がないため、Fig. 1-11 の写真 d のように最も広い面を上から見たとき、扇形の半径部分を含む「厚み」あるいは「高さ」にあたる面を基準面としたとき、その基準面に対して平行と垂直方向の測定を行った。

1-6 SDS-PAGE

酵素分解による筋肉タンパク質の分子量の変化を確認するため、アクリルアミド濃度 4-20%グラジエントゲルを用いて、SDS-PAGE による Laemmli 法にて蛋白質の分析を行った。試料 1 g に 6 g の精製水を加え、乳鉢でホモジナイズ後、その 0.52 g に、SDS 化用試料緩衝液（20%グリセリン、4.6%ドデシル硫酸ナトリウムおよび 0.002%プロモフェノールブルーを含む 125 mM Tris-HCl 緩衝液, pH 6.8）を 0.2 g 加え、終濃度が 10%になるように 2-メルカプトエタノールを加えた後、沸騰水浴中で 5 分間加熱した。蛋白質を可溶化後、15000 rpm で 10 分間遠心した後の上清 2 μ l を電気泳動で分析した。

1-7 透過型電子顕微鏡（Transmission electron microscopy、TEM）観察

HEPC と NC の筋線維の内部構造を詳細に観察するため、TEM 観察を行った。試験試料は 0.1 M リン酸バッファー（PB）中に 2.5%グルタルアルデヒドを含む溶液で 2 時間固定後、0.1 M PB で洗浄し 1%四酸化オスミウムを含む 0.1 M PB で 2 時間、後固定した。エチルアルコールにて段階希釈（上昇系列）アルコール脱水処理法、即ち 70%、80%、90%、95%、99.5%、100%エチルアルコールによる段階的な脱水を各々の濃度で 10 分ずつ行った後、エポン 812 に包埋して超薄切片を作製した⁵²⁾。準超薄切片は 1 μ m に切り出し後、トリイジン・ブルー染色した。90 nm の超薄切片は銅メッシュ上で酢酸ウラニル及びクエン酸鉛で二重染色し、即座に透過型電子顕微鏡（H-7100, 日立）で観察した。

1-8 走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscopy、SEM）観察

HEPC と NC の筋線維の立体的構造を詳細に観察するため、SEM 観察を行った。試料は 0.1 M リン酸緩衝生理食塩水（PBS）中に 2.5% グルタルアルデヒドを含む溶液で 2 時間固定後、標本は同緩衝液中で 4°C 一晩洗い、1% 四酸化オスミウムを含む 0.1 M PBS で 2 時間、後固定した⁵²⁾。標本はエチルアルコールにて段階希釈（上昇系列）アルコール脱水処理法、即ち 70%、80%、90%、95%、99.5%、100% エチルアルコールによる段階的な脱水を各々の濃度で 10 分ずつ脱水を行い、臨界点乾燥した（HCP-2, 日立）。標本を白金蒸着し走査型電子顕微鏡（S-4500, 日立）で観察した。

1-9 統計解析

統計解析は全データについて正規性を仮定し行った。かたさデータと線維感測定試験データに関しては Welch の t 検定を行った。統計的有意水準は $p < 0.001$ とした。

第2項 結果

2-1 外観 (Fig. 1-12)

HEPC 及び NC サンプルの外観を Fig. 1-12 に示し、比較した。HEPC サンプルが NC 同様、カット断面で筋繊維の方向性が巨視的に確認可能であった。

2-2 栄養成分分析 (Table 1-10)

各サンプルの栄養成分分析結果は Table 1-10 に示した。HEPC のタンパク質含量は 16.3 g/100 g と NC の 31.0 g/100 g の 50%程度であったものの、それは市販再成型介護食であるチキンペースト (7.0 g/100 g) や再成型鶏肉 (11.4 g/100 g) と比べて 1.4-2 倍高かった。HEPC の水分は 80.7 g/100 g で NC の 67.8 g/100 g より 12.9 g/100 g 高かった。一方で、チキンペーストの脂質含有量は 7.9 g/100 g で NC の 1.2 g/100 g より 6.9 g/100 g 脂質量が多く、再成型鶏肉は炭水化物が 16.4 g/100 g で炭水化物が検出されない NC よりその分炭水化物が多かった。このような結果はペースト化や再成型化、下味等の目的で脂質や増粘多糖類あるいは糖類が添加されるためと考えられ、鶏肉に本来期待される栄養成分の価値を損なうものである。

2-3 かたさ (Fig. 1-13)

直径 20 mm のプランジャーで圧縮した際の最大荷重を接触面積で除した値、つまりかたさ応力は HEPC サンプルが 2.88×10^4 Pa (SD : 4.70×10^3 , Fig. 1-13) であ

り、NC のかたさ応力である $3.35 \times 10^5 \text{ Pa}$ (SD: 4.18×10^4 , Fig. 1-13) の 1/11 以下で、両者の間には有意差が認められた ($p < 0.001$)。

2-4 線維感測定試験 (Fig. 1-11)

板状プランジャーによる鶏肉試料の筋線維方向に対する荷重 (垂直方向) / 荷重 (平行方向) の比を線維感の度合 (線維感値) として計算した。HEPC、NC、プロセスチーズとストリングチーズ (雪印、日本) の各試料の線維感値はそれぞれ、1.74、1.50、2.18、1.00 で、HEPC、NC、ストリングチーズの垂直方向と平行方向の荷重間には有意差があったのに対してプロセスチーズには有意差は無かった ($p < 0.001$) (Fig. 1-11)。

2-5 SDS-PAGE (Fig. 1-14)

HEPC と NC のタンパク質のバンドは Fig. 1-14 に示した。SDS-PAGE の結果、HEPC は 14 kDa 以下の分子量が増大しスミアになっているのに加え、200 kDa (ミオシン重鎖、MHC) と 42 kDa (アクチン) が消失していた。

2-6 透過型電子顕微鏡 (Transmission electron microscopy、TEM) 観察 (Fig. 1-15、1-16)

比較の参考として筋線維とサルコメアの模式的拡大図を Fig. 1-15⁵³⁾に示した。筋線維の元となる筋原線維には、横紋と呼ばれる明暗の繰り返しがみられ、明暗それ

ぞれ I 体、A 体と呼ばれる。I 体の中央に Z 線と呼ばれる高密度の仕切りがあり、Z 線と Z 線の間を筋節（サルコメア）と呼称し、サルコメアは筋収縮の基本単位である⁵⁴⁾。NC 試料ではサルコメア、Z 線および筋原線維等が観察された一方で、HEPC ではそれらは不明瞭で均質だった。HEPC の筋原線維間には隙間も大きかった。観察された NC の Z 線は図中、黒矢印で示した（Fig. 1-16）。

2-7 走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscopy、SEM）観察（Fig. 1-17）

HEPC と NC の SEM 画像を Fig. 1-17 に示した。Fig. 1-17A は筋線維方向に平行な断面からの HEPC と NC の画像を示し、倍率は 100 倍。Fig. 1-17B は筋線維方向に垂直な断面の HEPC と NC の画像を示し、倍率 1000 倍。Fig. 1-17C は 7B で示した垂直方向の断面のさらに倍率を 3000 倍に拡大した画像を示した。SEM 画像では筋線維構造は保持されており、HEPC は NC に似ているものの筋線維周辺のコラーゲン等の結合細胞が消失していた（Fig. 1-17A）。Fig. 1-17A、1-17B で観察された NC の結合細胞を黒矢印で示した。Fig. 1-17B に示した線維断面構造は HEPC も NC も同様な構造を持っているものの、線維断面構造は高倍率（3000 倍）で観察した際は非常に異なるものであった（Fig. 1-17B、1-17C）。具体的には 3000 倍（Fig. 1-17C）では NC の筋線維断面は平坦で緊密であるのに対して HEPC のそれは多孔質でスポンジ状であった。

第3項 考察

Fig. 1-13 で示したように HEPC は NC の 1/11 以下のかたさでありながら、元の鶏胸肉と同様な外観 (Fig. 1-12) を兼ね備えるものであった。タンパク質含量は NC の半量程度だった (Table 1-10)。HEPC のタンパク質含量減少の一つの原因として、酵素液の注入と浸漬による水分含量の増加と考えられる。他の理由としては HEPC の酵素分解の結果、アミノ酸が流出しているのかもしれない。しかしながら、HEPC は比較した市販の咀嚼困難者用の鶏肉製品と比べて 1.4 倍から 2 倍以上高いタンパク質含量であった。HEPC のかたさは 30,000 Pa 以下であったが、線維方向に対して平行と垂直方向での板状プランジャーの貫入時の荷重は NC やストリングチーズのように有意差が観察された (Fig. 1-11)。このことは HEPC が NC 同様、線維感 (咀嚼時に感じる線維の存在) を感じる物性であることを示している。つまり HEPC はかたさの減少にも関わらず、常食鶏胸肉の食感を保っているといえる。HEPC の線維感を伴う軟化の現象を調査するため、SDS-PAGE を行ったところ、14 kDa 付近がスメアになっていた一方で筋線維の主要構成成分である MHC (ミオシン重鎖) とアクチンが消失していた (Fig. 1-14)。HEPC のかたさの減少はそれら高分子量タンパク質の分解によるものと考えられた。Boles と Shand は牛肉への食塩水の注入によって非注入の牛肉の半分のかたさになったと報告している²⁶⁾。しかしながら酵素分解は更なる軟化を達成している。以上から、HEPC の軟化の要因は主として塩類を含む溶液の注入ではなく酵素分解によるものと考えられた。

TEM 観察において、NC では観察されたサルコメア、Z 線、筋原線維が酵素分解による筋線維の低分子化により HEPC では不明瞭で均質な画像となった (Fig. 1-15、1-16)。Yamanoue と Akamatsu は筋原線維の変化機構が肉の軟化に深く関係し、それは骨格筋細胞の内因性プロテアーゼによるタンパク質加水分解によるものだと述べている⁵⁵⁾。HEPC は内因性のプロテアーゼだけでなく、外因性プロテアーゼによっても軟化されている。サルコメア長はしばしば肉のやわらかさと相関する⁵⁶⁾が、HEPC ではインジェクションにより導入された外因性プロテアーゼによりサルコメアは内因性プロテアーゼによる分解以上に分解される。

SEM 画像は HEPC が NC と同様に線維構造を保持していることを示しているが、一方で筋線維周辺の結合組織は減少し筋原線維はむき出しになっていた (Fig. 1-17A)。筋原線維の内部構造は高倍率時、非常に異なっていた。3000 倍での観察時、NC の筋線維断面は平坦で緊密な様子であるのに対して、HEPC の筋線維断面は多孔質でスポンジ状であった (Fig. 1-17B, 1-17C)。このように酵素反応によって起きている肉の強度の減少と、線維構造の保持が外観を保ったままの軟化と線維感や異方性のある構造という HEPC の特性の要因と考えられる。

HEP 処理を用いた酵素分解によるタンパク質の低分子化という肉の化学的変化がサルコメアを含む筋原線維の構造的改変の原因となったが、より大きな集合である筋線維の構造は変わらず残存していた。この変化が鶏肉本来の外観と食感を保ったままの軟化を実現させていたと考えられる。

第4項 まとめ

HEPC は市販介護用食品よりも高いタンパク質含有量を持ちながら、筋線維本来の線維感のある食感と、NC でも観察される肉特有の線維方向のある外観を維持していた。しかしながら、HEPC は肉を容易には喫食できない咀嚼困難者が食べることができるだけ十分なやわらかさを備えていた。HEPC の兼ね備える特性は、筋線維構造そのものは保たれているが、酵素反応による筋原線維内部構造の弱体化と低分子化により付与されたものであると結論付けた。

第2部 米菓製造工程中の団子物性が米菓の品質に与える影響

第2部 序論

2-1 Internet of Things (IoT) とは

IoT とは情報通信機器だけでなく、すべての「モノ」がインターネットにつながることを指す。ここでいう「モノ」とは「世の中のありとあらゆるモノ」を指し、時には IoT が「ありとあらゆるモノがインターネットにつながる社会」という意味でも使われる。⁵⁷⁾ 産業界における IoT は、産業用 IoT (IIoT=Industrial IoT) と呼ばれ、生産効率や品質の向上のために「人・モノ・情報」を融合するシステムであり、自動化・省力化に寄与する。このシステムの技術要素は、センシング・情報伝達・情報処理・アクチュエータなどからなる⁵⁸⁾。種々センサーの低コスト化やそこから得られる大量データ (Big Data) の解析処理と費用が現実的なものになったことで脚光を浴びている。

2-2 Process Automation (PA) とは

PA とは主に原材料に熱や圧力を加えて状態変化や化学反応を行うプロセス産業において温度・圧力・流量などを自動制御することで生産工程を自動化することである。この意味での PA は原油からのナフサ製造、鉄鉱石からの鉄の精製などの工業だけでなく、食品産業においても澱粉の糊化は熱と圧力を加えて原料の状態を著しく変化させるためこの範疇に入ると考えられる。また、温度制御と組成変化とい

う点では醸造や発酵も PA の対象となる。自動車の組み立てを中心に発展してきた Factory Automation (FA) は食品製造においては選別や包装、梱包工程等が対象となっている。

上述の IIoT においてネットワークで情報をつなぎ、解析・制御するためにはそもそも製造現場におけるセンシングがデジタル情報として得られることが前提であり、PA において最終製品の品質に直結した情報のセンシングが不可欠である。センシング技術で得られた膨大なデータの解析によるプロセス条件への連続したフィードバックの自律化が PA における IIoT の最終目標の一つといえる。

2-3 米菓製造工程

最も単純な米菓の原料組成としては米と水、油と塩が挙げられるが、その原料の単純さとは裏腹に米菓製造の工程は長く複雑である。原料米の洗浄、水浸漬、製粉、蒸練によって団子となり、練り、延し、成型剥離、（一次）乾燥、ねかせ（水分の均質化）、（二次乾燥）、焼成を経て素焼きとなり、その後の調味、再乾燥、包装、へと続く。乾燥生地は薄焼きなど早いものは当日に焼成されるが、製品によっては数日間保管後に焼成されることもある（Fig. 2-1）。焼成工程時の米菓生地の膨化は米菓の食感そのものに直結するが、膨化性には原料を含むその時点までの全ての工程の様々な履歴が影響し、焼成条件での調整の範疇を超えることもある。つまりこの時点での生地の品質は遡って団子製造時の団子の出来と関連があるが、短時間で最終製品まで製造される薄焼き型を除けば団子と焼成前生地は製造工程上、同時に

は存在しない。初期工程の中間生成物の品質と最終製品の品質を結びつけるのは製造時の時間、温度、圧力、投入量、水分などの記録と現場の担当者による五感を駆使した職人的な感覚とその記憶に頼ることとなる。日本の高齢化の進行と少子化、さらに若者の製造業離れは製造現場の熟練技能者の高齢化を生み、技能継承が危ぶまれている。これは工業に限らず、食品製造業においても同様であり、半プロセスオートメーション化された工程であっても、その工程産物の出来の良しあし、異常の有無を判断するのは現場担当者である。よって、中間素材の特性をより確かに判断できる熟練技能者なくしては均質で高付加価値の製品の製造はなしえない。

2-4 米菓製造における PA

原料を除けば製造工程初期の熱履歴と練りが最も生地に影響を与えると同時に初期工程は人為的に調整・変更が可能な工程でもある。蒸練は米菓の主原料である米の大部分を占める澱粉質を熱と水分によって糊化させ、練りはその糊化した澱粉ゲルの組織構造形成と均質化及び気泡の練りこみを行う。蒸練工程、練り工程は上述のプロセスオートメーションにおける「プロセス」ととらえられるが、完全な自動化とセンシングによる状態把握には至っていない。よって米菓製造が目指す PA の IIoT 化にはこのプロセスの、つまり中間生成物である団子や餅素材のより本質的な物性の数値化が必要不可欠となる。

2-5 本研究の目的

半オートメーション化された米菓製造プロセスにおいても原料そのものや原料加工のブレ、環境要因による水分、プロセス機器の変更や更新により中間生成物の物性は日々変動している。バッチ連続方式と呼ばれる 2 台の蒸練機の連続稼働により米菓の団子・餅は連続的に生産されるが、現場担当者はその団子・餅を、五感を使って評価し、製造条件を微調整する。しかしながら、団子の良しあしが確認できるのはたいてい数日後の焼成時であり、出荷後も消費者からの評価はさらに数週間後に受けることとなる。その際に団子・餅が問題なく同じ品質で生産されていたかどうか、その期間のなかで異常な物性を示していなかったかどうかを再確認するには数値化による記録が必要不可欠であり、澱粉ゲルの物性を数値化することは現場担当者の感覚の数値化であり、評価・判断の補助に始まり、無人化、遠隔管理の基礎データ、最適化の指標とつながっていく。

そこで本研究では粳米米菓の中間生成物である団子の物性を動的粘弾性測定により数値化し、それが焼成した米菓の品質と相関する指標となりうるかどうかについて検討することを目的とした。本研究の成果は米菓製造の IIoT 化に寄与する期待できる。

第2部 本論

緒言

米菓は日本の伝統的な米加工品である。近年米菓は低カロリーでグルテンフリーのヘルシーな菓子として国際的にも注目されている。米菓製造工程は長く複雑であり、粳米菓の製造工程において、最終製品である米菓の品質は、中間生成物である米澱粉の糊化ゲルつまり団子の性状に大きく影響を受ける。

団子の物性はその微細構造に起因していると考えられるが、構造形成の要因は大別すると1次的要因（原料米の品種、産地）と2次的要因（調製条件-練の程度、熟履歴、水分含量）の2つがあると考えられる⁵⁹⁾。

餅（glutinous rice dough）に関しては多くの研究が物理的、レオロジカルな視点から行われてきた。粳ではなく糯に関して2次的要因と構造の関係については五十野ら⁶⁰⁾は、調製条件（練り時間、搗き回数、水分含量）の異なる餅を調製し、明確に定義づけられた変形様式に基づく線形粘弾性測定を行った。その結果、練り時間の増加が貯蔵弾性率、損失弾性率を下げることを示した。彼らはまた、非線形粘弾性測定（定常ずり流動開始直後のずり粘度成長測定）を検討し、得られる粘度と微妙な餅の食感（「こし」や「伸展性」）は極めてよく対応することを明らかにした⁶¹⁾。杉山ら⁶²⁾は共軸二重円筒粘弾性測定器を使用し白玉餅の動的粘度 η と動的粘弾性 G' の高温における温度依存性を示した。小林ら⁶³⁾は餅の硬さを迅速測定する方法を報告し、糯米原料と糯の硬さの関係を示した。しかしながら上記の全ての研究

は粳米原料ではなく糯米原料であり、また少なくとも一度 6 時間以上の冷却工程を経るもので、即時直接のレオロジカルな測定ではなかった。

クッキーやパンなど他の食品に関しては、最終製品の品質を予測するためドウについて多くの研究がある。Liu ら⁶⁴⁾は蒸しパンの芋粉添加によるドウのレオロジーと最終製品の品質について調べ、ドウの特性の中でも特に水分吸収、ドウ高さ、 n'' ($G''=K''\omega^{n''}$ 、 ω は角周波数、 K'' と n'' は実験定数、の時) が比容積に重要な影響を与える要素であるとした。Giannou と Tzia⁶⁵⁾はパンのドウの冷凍保存による製品への影響について予測するためにテクスチャー測定を行った。Ahmad ら⁶⁶⁾は人参の搾りかす粉をクッキードウに添加しクッキードウとクッキーに与える影響をテクスチャーアナライザーと官能評価によって調べた。その試験でドウの安定性と軟化度合はクッキーのかたさに関連していることを明らかにした。しかし、粳米の団子とその最終製品である米菓（煎餅）に関する研究はない。

今回、米菓の中間体である粳米団子の即時直接のレオロジカルな測定方法が確立され、その結果と最終製品の米菓の品質との関係が調べられた。この結果は米菓製造の品質管理やユニークな新食感を持つ製品開発に有用であり、米菓製造の IIoT 化へ向けた基礎データとなりうると考えられる。

第 1 項 実験材料および実験方法

1-1 実験材料

吉井ら⁶⁷⁾は、米菓の原料米はアミロース含量が 30%以上のものは米菓原料として膨化が不足し適さず、15.8 ～21.3%の範囲では大きな相違はないがそれ以上になると比容積が減少すると報告した。一方で、アミロース含量が 21.3%未満であっても、精米のタンパク質含有率が 7.4%以上になると比容積は減少することも報告した。

それらを踏まえ、米菓製造における実績と松井らの報告⁶⁸⁾でみかけのアミロース含量が 16.8%、玄米でのタンパク質含有率が 6.82（タンパク質含有率は一般に精白米<玄米）である粳米、こしいぶきを実験材料に選択した。

2016 年新潟県産の粳米である、こしいぶき精白米を実験材料に用いた（試験使用時は 2017 年）。米粉はピンミル製法で製造され平均粒径 471 μm 、平均径 443 μm 、水分約 12%を使用した（高井食品）。

1-2 団子の調製

団子は下記の方法に従い作製した。この試験のモデル作製は、工程による団子物性の変化を捉えられるか検証するためのものであって、米菓として最良の条件を探すことは目的としていない。また、団子物性は米菓食感に結びつく重要な要素であるが、米菓は品種ごとの特徴はあっても米菓食感に正解、不正解はない。その上で、米菓は団子や餅の時点で美味しく食べられる団子、餅から作られるものである。一般的に、餅つき機や蒸し器を使用した場合の粳米米菓の作製において、蒸し時間と練り時間はそれぞれ 20 分から 40 分、5 分から 10 分である。⁶⁹⁻⁷¹⁾ また、使用した

餅つき機（PFC-20FK、東芝）の取扱説明書による団子調製例は、蒸し時間が約 25 分程度、練り時間が 5 分であった。以上から、この機器による一般的な団子として遜色ない加熱と練りを達成する条件として 30 分蒸し、10 分練りを基本条件と設定した。予備検討も踏まえ、この条件に対する加熱と練りの過不足をそれぞれ以下のように設定し、工程条件の変化に物性測定が対応するか検証した。

沸騰した水 300 g を数回に分けて米粉 500 g に入れ、へらで均質化し手で一塊にした。約 1 cm 厚に延ばした後、1 cm³ になるようにカットし 30 分蒸した。これを「30 分蒸しサンプル」とした。5 分、60 分蒸しサンプルは水の添加量を 332 g、278 g とした以外は 30 分蒸しサンプルと同様に作製した。左記の水の添加量は予備検討から、それぞれの試験区において団子の水分が最終的に約 50% となる添加量である。蒸し終わったサンプルはそれぞれ 5、10、15 分餅つき機（PFC-20FK、東芝）で練った。団子の実際の水分は $49.57 \pm 1.73\%$ (mean $\pm$ SD, 各蒸し時間に対し n=1) であり、蒸し時間が 3 条件のため合計 n=3) だった。各サンプルは”蒸し時間－練時間”と命名した。たとえば 30-10 サンプルは 30 分蒸し、10 分練りを意味する。

1-3 米菓サンプルの調製

本研究で使用する煎餅は日本の伝統的な『煎餅』のモデルであり、粳米原料で、2 回の α 化工程（蒸練と焼成）があるものである。そのためクッキーやクラッカー、およびそれらの小麦粉を米粉で置換したものとは異なる。一般にクッキーやクラッ

カーは油脂や糖質を多く含むことで脆い食感を持つ一方で、煎餅は硬くバリバリした食感を持つ。

煎餅は以下のように調整した。上記の団子を 55℃で 1 時間以内保管し、約 2 mm 厚にローラーで延ばし、直径 30 mm の円型でくり抜き 70℃約 3 時間通風乾燥機で水分が $12.58 \pm 0.23 \%$ (mean $\pm$ SD, n=各 3) になるまで乾燥した。乾燥した生地は 30℃湿度 70%の環境に 24~72 時間静置した後、ジェットオーブン (LABO M/C SR-BIII、荒川機械) で 190℃、240 秒間焼成し、粗熱を取ったのち密封し常温保管した。

1-4 団子の動的粘弾性 (Fig. 2-2)

まず、粘弾性体とは粘性（液体的な性質）と弾性（固体的な性質）を合わせ持つ物質である。完全弾性体としてはバネやタイヤなどが挙げられ、完全粘性体としてはオイルなどが挙げられるが、食品の多くは粘弾性を示す。

Fig. 2-2⁷²⁾に示したように動的粘弾性測定とは、測定試料に一定周期で歪変形または応力を与え、歪の場合はそれに対する試料からの応力を、応力の場合はそれによる試料の歪の挙動を調べることで、粘弾性体が合わせ持つ粘性（液体的な性質）と弾性（固体的な性質）を分解して調べる測定といえる。

モデルとして弾性体はバネ、粘性体は車などのダンパーとして知られているダッシュポットに例えられる。ダッシュポットとは液体が入った容器にピストンをつけたような機構で、急激に動かそうとすると大きな力が必要であるが、ゆ

っくり動かすのには小さな力でよく、力を除いてもバネのようにもとに戻ったりはしない仕組みの構造体である。バネにおける応力 (σ) と歪 (ϵ) の関係はバネの固有値である弾性率 (E) を用いてフックの法則により

$$\text{応力 } \sigma = \text{弾性率 } E \times \text{歪 } \epsilon$$

であらわされ、ダッシュポットにおける応力 (σ) と歪 (ϵ) の関係は、ニュートンの粘性法則に従い、そのダッシュポット固有の粘性係数 (η) を用いて

$$\text{応力 } \sigma = \text{粘性係数 } \eta \times (\text{歪 } \epsilon \text{ の時間微分})$$

であらわされる。バネとダッシュポットを直列につないだモデルでは応力はその弾性部分と粘性部分の応力の和で示される。

sin 波で一定周期の変形 (歪) を与えると完全弾性体はタイムラグ無しに sin 波の応力を返す。一方で完全粘性体は位相が $\pi/2$ (90 度) ずれた sin 波、つまり cos 波の応力を返すことが知られている。粘弾性体はその粘性と弾性の割合に従い 0~90 度ずれた sin 波の応力を返すこととなる。例として振幅 1 の sin 波を与えたときに返ってくる、0~90 度の位相がずれた応力の波は角速度 ω 、時間 t を用い、A、B を定数として

$$\sigma(t) = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t)$$

とあらわすことができる。このときの $\sin$ 波の係数、 A が固体的性質である貯蔵弾性率 G' （ジープライム、単位は Pa）であり、 $\cos$ 波の係数、 B が液体的性質である損失弾性率 G'' （ジーダブルプライム、単位は同様に Pa）である。この液体的性質 G'' を固体的性質 G' で割った値が損失正接 $\tan \delta$ （同一単位の割り算のため無次元）であり、0~1 の間で 0 に近いほど弾性的であり、1 を超えたものは流動する液体とみなされる。

本試験において動的粘弾性は歪依存にて測定し、レオメーター MCR102（Anton Paar 社）を使用し、25 mm パラレルプレート、5 mm ギャップ、 $50 \pm 0.1^\circ\text{C}$ で測定した。温度調整には測定セル P-PTD200 のペルチェ素子温度調整機を用いた。乾燥による団子の硬化を防ぐため、測定部はカバーを付け、ペルチェ温度調整部に濡れたキムワイプを置くことで 50°C の湿った空気で覆った。 $5 \pm 1 \text{ g}$ の上記団子を測定部に乗せ、0.01% から 1% 歪の範囲で 1 Hz の条件で測定を行い、貯蔵弾性率 G' [Pa]、損失弾性率 G'' [Pa]、損失正接 $\tan \delta$ ($=G''/G'$) について 0.1% 歪時のデータの 3 回測定の平均値を代表値とした。線形性範囲は予備検討から 0.01% から 1% まで確認した。

1-5 米菓サンプルのかたさと圧縮時の総エネルギー

煎餅のかたさはクリープメーターRE2-33005B（山電社）の破断強度解析モードで測定した。破断強度解析は Fig. 1-5 に示したテクスチャー測定の 1 回目の圧縮、 A_1 の領域までの圧縮測定を行い試料からの抵抗力を測定するモードである。直径 80 mm の樹脂台上にサンプルを置き、直径 8 mm 円柱樹脂プランジャーで圧縮速度 1 mm/s、圧縮率 60%、200 N ロードセルを用い、室温で測定し、60%圧縮時の最大荷重[N]をかたさとした。60%圧縮時の総エネルギー[J/m³]は RE2-33005B による計測値を用いた。各条件 40 サンプルの測定を行い、上下 5 データを除外した 30 データの平均値を代表値とした。

1-6 団子と米菓の走査型電子顕微鏡観察

団子の小片は液体窒素で急速凍結し凍結乾燥機 TF20-85ATNNN（宝エーテエム社）で凍結乾燥した。乾燥後の団子と米菓は金-パラジウム蒸着処理（真空デバイス社）し、走査型電子顕微鏡 TM-1000（日立社）で断面を観察した。観察倍率は団子が 5000 倍、煎餅が 60 倍で行った。⁷³⁾

1-7 米菓サンプルの比容積

各米菓サンプルの比容積は 3D スキャナーVL シリーズ（キーエンス社）で測定した。各試験区の 5 サンプルを測定した平均値を代表値とした。

1-8 統計解析

5-5 から 60-15 までの調製条件の各米菓かたさ測定（圧縮試験）時の圧縮・破壊に要する総エネルギー（Fig. 1-5 に示したテクスチャー解析の例での A_1 に相当する単位体積当たりの仕事）の比較について、統計は R version 3.5.1 (<http://www.r-project.org>) を使用し Wilcoxon の順位和検定を行い、Benjamini Hochberg false discovery rate (FDR) の多重比較補正を行い、統計的有意水準は $p < 0.05$ に設定した。

第2項 結果

2-1 団子の貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' (Fig. 2-3) および損失正接 $\tan \delta$ (Fig. 2-4)

予備検討から、団子の動的粘弾性測定は $\tan \delta$ において誤差 5%以内の再現性があることを確認し測定を行った。粘弾性に関して団子の貯蔵弾性率 G' と損失弾性率 G'' の代表的な測定曲線を Fig. 2-3 に示した。 G' と G'' は蒸し時間と練り時間が増えるにつれて、特に G' が減少し、その結果、 $\tan \delta$ は上昇していった (Fig. 2-4)。よって、素材としては液体的性質である粘性が上昇すると判断できる。線形粘弾性範囲は予備検討から 0.01% から 1% 歪率までと決定し、0.1% 歪率の際の値を G' 、 G'' 、 $\tan \delta$ の代表値とした ($n=3$)。

2-2 各蒸し条件の団子の、練り時間に対する G' 、 G'' (Fig. 2-5) と $\tan \delta$ (Fig. 2-6) およびまとめ (Table 2-1)

蒸し時間毎の団子の G' 、 G'' の平均値を練り時間に対して、それぞれを別個にプロットし、Fig. 2-5 に示した。 G' (図中○印表記) は蒸しと練り時間が増えるにつれて徐々に減少し、同じ蒸し時間で比較すると 5-15 サンプルの G' (43,828 Pa) は 5-5 サンプルの G' (77,958 Pa) の 56%、30-15 サンプルの G' (25,222 Pa) は 30-5 サンプルの G' (43,204 Pa) の 53%、60-15 サンプルの G' (15,992 Pa) は 60-5 サンプルの G' (30,297 Pa) の 53% だった。一方で、 G'' (図中△印表記) はそれよりも緩

やかな減少で 5-15 サンプルの G'' (10,682 Pa) は 5-5 サンプルの G'' (15,188 Pa) の 70%、30-15 サンプルの G'' (6,729 Pa) が 30-5 サンプルの G'' (9,644 Pa) の 70%、60-15 サンプルの G'' (4,741 Pa) が 60-5 サンプルの G'' (7,222 Pa) の 66%だった。上述の値に対して、 $\tan \delta$ (Fig. 2-6) は蒸し 5 分の時、練が 5、10、15 分と進行するにつれて 0.195~0.244 (差 0.049) へ、加熱 30 分の時 0.223~0.267 (差 0.044) へ、蒸し 60 分の時 0.239~0.297 (差 0.058) へと増加した。各団子の $\tan \delta$ は $R^2=0.96$ 以上で直線的な増加だった。上記のデータ、SD および近似式を Table 2-1 にまとめて示した。

2-3 各団子の G' に対する G'' (Fig. 2-7)

蒸しと練りの団子物性への効果を俯瞰するため、全条件の G' と G'' の推移を対数グラフ Fig. 2-7 に示した。蒸し工程も練り工程も 2 次元プロット上での団子の G' 、 G'' の減少に関して同一方向 (比率) の影響を与えることがわかり、値はべき関数近似によく一致した ($R^2=0.99$)。

2-4 団子の走査型電子顕微鏡観察 (Fig. 2-8)

団子物性の定量化の妥当性を確認するため、団子の SEM 観察を行った。上記団子サンプルの一部を液体窒素で急速凍結し凍結乾燥したものの断面 SEM 画像を Fig. 2-8 に示した。5 分練ではネットワークが不十分な箇所が多く澱粉粒の残存や

荒く部分的な網目が観察されるが、15分練で緻密なネットワークが多く存在し、中でも60分蒸しの60-15が最もキメ細かな網目を持っていた。

2-5 米菓外観 (Fig. 2-9)

団子のレオロジカルパラメータと米菓物性との関係を調べるため、上記生地を乾燥後、ジェットオーブンで焼成した米菓の物性と微細構造について調べた。焼成後の米菓写真を Fig. 2-9 に示した。焼成した生地は通常の米菓として遜色ない外観を有していたが、60-15は5-5よりも一回り大きかった。

2-6 米菓比容積と団子 $\tan \delta$ (Fig. 2-10)

米菓比容積と団子 $\tan \delta$ との相関を Fig. 2-10 に示した。各条件の米菓の素焼きの比容積は、5分蒸しサンプルは練の進行と共に 2.70 から $3.06 \text{ cm}^3/\text{g}$ へ、30分蒸しサンプルは 2.78 から $3.35 \text{ cm}^3/\text{g}$ まで、60分蒸しサンプルは 2.80 から $3.36 \text{ cm}^3/\text{g}$ まで増加した。各蒸し条件について練りの進行と共に比容積はそれぞれ13、21、20%増加した。比容積と各蒸し条件の $\tan \delta$ に関する指数近似の相関係数は5、30、60分の各加熱に対して $R^2 > 0.99$ 、 0.94 、 0.98 だった一方で全体9データに対する相関は 0.79 とそれらより低くなった。

2-7 米菓かたさと団子 $\tan \delta$ (Fig. 2-11)

米菓かたさと団子 $\tan \delta$ の関係を (Fig. 2-11) に示した。8 mm プランジャーでの圧縮時の最大荷重は5-5の 56 N から30-15の 101 N までは $\tan \delta$ とほぼ同様に増加

傾向を示した。一方、60 分蒸しの 60-5、10、15 では他試験区と異なる減少傾向だった（82 N から 68 N）。

2-8 米菓断面の走査型電子顕微鏡（SEM）観察（Fig. 2-12、2-13）

米菓断面の SEM 画像を Fig. 2-12、13 に示した。解釈を深めるために、Fig. 2-12 では米菓断面の構造的な不均一（ムラ）の例を拡大した。図中の矢印に示すような不均一な構造が 5-5 から 60-15 にかけての蒸しと練りの進行に従って減少していた。

2-9 米菓圧縮時の総エネルギー（Fig. 2-14）

圧縮時の総エネルギーを Fig. 2-14 に示した。圧縮の際の総エネルギーは Fig. 1-5 に示したテクスチャー解析の例での A_1 に相当する単位体積当たりの仕事である。5-15 米菓サンプルと 60-10 米菓サンプルのかたさは同程度だが、圧縮試験の総エネルギー中央値は異なっていた。

第3項 考察 (Fig. 2-15)

団子の物性と米菓品質に関する考察の概要を Fig. 2-15 にまとめた。五十野ら⁶⁰⁾は餅の G' 、 G'' が練り時間に対して指数関数的に減少することを示した。本試験の団子の G' と G'' も蒸しと練りの時間が増えるにつれて、特に G' が減少し、その結果、 G''/G' で計算される損失正接 $\tan \delta$ は上昇していった (Fig. 2-3、2-4)。n 数が小さいためか 5 分加熱サンプルの G'' には統計的有意性はつかなかったものの今回の試験の団子も各団子の G' と G'' は片対数グラフ上で直線的に減少し粘弾性と練り時間には少なくとも $R^2 > 0.94$ の相関があった (Fig. 2-5)。練り時間に対して各団子の $\tan \delta$ は $R^2 = 0.96$ 以上で直線的な増加だった (Fig. 2-6)。蒸練工程において加熱は糊化に必要なエネルギーを米粉に与えるため、米粉は固体から流動性のあるゲルへと変化していく。一方で練りはせん断と攪拌を同時に行う。これによって澱粉ゲル内には気泡が練りこまれていく。気泡の練りこみは体積密度を減少させ、弾性の減少を引き起こす。団子の弾性は G' に関連するものである。また、練りは過剰に進行すると生地が粘着質になり作業性が下がり、焼成後も詰まった食感となる。これらは液体的性質の発現であり、 G'' に関連する。それら G' 、 G'' の全 9 条件の値を、 G' を X 軸、 G'' を Y 軸にとり 2 次元プロットしたところ、蒸し工程も練り工程も 2 次元プロット上での団子の G' 、 G'' の減少に関して同一方向 (比率) の影響を与えることがわかり、値はべき関数近似によく一致した ($R^2 = 0.99$) (Fig. 2-7)。以上から団子の動的粘弾性測定を行うことで澱粉の加熱による糊化・膨潤・崩壊という (熱) 化

学的な変化に対しても、練機による物理的な生地のせん断による物性変化のどちらにも対応して団子の物性を数値化することが可能となった。

団子物性の定量化の妥当性を確認するため、団子の SEM 観察を行った (Fig. 2-8)。液体窒素による急速凍結後、凍結乾燥しているために水蒸気を抱き込んでいた箇所は水蒸気が水となり、さらに氷となる過程で体積が急減する。その氷が凍結乾燥により昇華して抜け落ち、澱粉のネットワークが残存することとなる⁷⁴⁾。SEM は一部分拡大であってムラや偏りは全てのサンプルに存在するが、蒸しと練りの進行によりネットワークが緻密化していく様子が観察された。加熱の進行と共に澱粉の糊化・膨潤・崩壊が進行し主成分であるアミロペクチンとアミロースが流動性を得、緻密に絡まりあってネットワークが発達し水蒸気や気泡を抱き込んでいく様子を表している⁷⁵⁾。練りという機械的せん断によるかたさの減少とネットワークの発達による粘性の発現が G' の低下や $\tan \delta$ の増加と相関していると考えられる。団子の強さの減少は練りや延しの作業性を増し、澱粉ネットワークの発達は延しの延伸性も改善する。そのため少なくとも今回の試験の範囲での団子の物性変化は、延し工程の圧延ローラーに過剰なトルクを必要とせず、伸展性向上によるシートのしわ減少にもなるため製造上良いことである。しかしながら練りの過剰は団子のべたつきを引き起こし、焼成後の米菓も詰まった強靱な食感となっていく。以上のように、糊化が進み団子のドウ（生地）としてのまとまりが向上し、伸展性が増すと $\tan \delta$ の値が上昇するなど、団子のレオロジカルな性質の定量化の妥当性は SEM により視覚的にも、ネットワークの緻密化と糊化不足の澱粉粒部分減少から支持された。

さらに団子のレオロジカルパラメータと米菓物性との関係を調べるため、上記生地を乾燥後、ジェットオーブンで焼成した米菓の物性と微細構造について調べた。この結果、米菓化した試料は後述の比容積測定やかたさ測定に耐えうる、米菓としての形状を持つものであった (Fig. 2-9)。

Fig. 2-10 に示した比容積と各加熱条件の $\tan \delta$ に関する指数近似の相関係数は 5、30、60 分の各蒸し時間に対して $R^2 > 0.99$ 、0.94、0.98 だった一方で全体 9 データに対する相関は 0.79 とそれらより低くなった。X 軸にとった $\tan \delta$ は無次元のパラメーターであるが、各蒸し時間に分けたデータは時間によって分類されたものであり、それによりシフトが起こってしまった可能性がある。あるいは蒸し時間の違いによる団子の強度の違いが、同じ練り時間であっても練りこまれる気泡量とせん断効果に差を生んだのかもしれない。比容積と $\tan \delta$ に関して、練り時間を加味したシフトファクターがあればより高い相関が得られたかもしれないが、依然として相関は高いものだった。

米菓の膨化は乾燥工程後の生地を焼き上げる焼成工程において生地内部に残存する水の気化による体積膨張によって引き起こされ、主成分である米澱粉の構造と物性が直接関係する⁷⁶⁾⁷⁷⁾。今回の場合、延し、型抜き、乾燥、寝かせ、焼成工程という多くの工程と長い時間（少なくとも 24 時間以上）の後に測定可能となる膨化の指標である比容積が団子の時点での $\tan \delta$ と相関した。

Lii らの米澱粉についての試験では加熱時間が長くなると澱粉の糊化の進行で貯蔵弾性率が損失弾性率以上に減少し $\tan \delta$ の値を上げた⁷⁸⁾。練り操作によるせん断と

混和は米や麦の組織破壊、澱粉粒崩壊と気泡の練りこみを起こすため、Mani らによるパン生地（ドウ）の試験でも弾性の低下を引き起こし液体的性質の割合が増加し、 $\tan \delta$ の最終値も高くなっていった⁷⁵⁾。これらの要因で米澱粉の糊化物やパン生地では粘性的性質を増加させ、さらに $\tan \delta$ の値を上げた。本試験においても、蒸しと練りの効果は G' の減少に大きく寄与し、5-5 から 60-15 にかけて約 62,000 Pa 減少し、 $\tan \delta$ が 0.1 以上増加した。硬く、ハンドリングの悪い粳米の団子に関するこのような粘弾性の報告はほとんどない。

団子の動的粘弾性は澱粉の蒸しによる糊化・膨潤・崩壊という（熱）化学的な変化に対しても、練機による物理的な生地のせん断による物性変化のどちらにも対応した。米菓製造業において、ある生地の物性に対して比較や同等性の担保を行う上では生地物性の評価指標は重要である。製造機器自体の変更、製造条件の変更が生地の物性にどのような影響を与えるかは最終製品の物性、すなわちテクスチャーにまで影響を与える。

8 mm プランジャーでの圧縮時の最大荷重は 5-5 の 56 N から 30-15 の 101N までは $\tan \delta$ とほぼ同様に増加傾向を示したが 60 分蒸しの 60-5、10、15 では他試験区と異なる減少傾向だった。一般的に米菓のような多孔質の焼き菓子は比容積とかたさが反比例する^{77,79)}が、今回のサンプルは蒸しや練りが十分でない試験区があるために 2 種類のサンプルが存在した可能性がある。一つは澱粉ネットワークの発達による構造強化が糊化による団子のかたさの減少よりも優勢なもの、もう一つはその逆のものである。つまり、5-5 から 30-15 サンプルは澱粉の 3 次元ネットワークの

成長による気泡壁そのものの強化の方が気泡壁の厚さの低下より米菓のかたさに関して支配的で、60-5、10、15 サンプルは焼成時の膨張による気泡壁の厚さの減少の方がネットワークの発達よりも米菓かたさに関して支配的なものかもしれない。実際、5-5 から 30-15 までは G' と G'' が米菓かたさとよく相関していた。それぞれかたさを Y、G' を X₁、G'' を X₂ としたとき、

$$Y = 131.2 \exp(0.0000112X_1), (R^2 = 0.94, p < 0.01)$$

$$Y = 161.3 \exp(0.0000701X_2), (R^2 = 0.94, p < 0.01)$$

であった。しかし 60-5 から傾向が転じ始めるために今回のレンジでは十分な相関は得られなかった。

団子の動的粘弾性と米菓気泡構造、米菓かたさについてさらに調べるために米菓断面の電子顕微鏡観察を行った (Fig. 2-12、2-13)。矢印に示すような不均一な構造が 5-5 から 60-15 にかけての練と加熱の進行に従って減少している (Fig. 2-13)。

高橋ら⁷⁷⁾は比容積の逆数である密度と壁厚について、米菓密度が高くなるにしたがって気泡の密度が高くなり気泡間壁厚が厚くなる傾向を示した。米菓比容積が今回の 30-15 (比容積 3.35 cm³/g) と 60-15 (比容積 3.36 cm³/g) のように近い値の場合であっても壁厚の違いがかたさの違いとして最大荷重で 101 N と 68 N として現れた。焼成の熱エネルギーは水分の気化と膨化、および澱粉の糊化エネルギーに使われる。そのため、団子の時点での糊化が進んでいればいるほど焼成時に加えられる熱エネ

ルギーは米菓の膨張に使われることになる。さらに練り工程で発達した澱粉ネットワークは団子の延伸性を増す。それ故、加熱と練りの進行は米菓の気泡壁を薄くする。米菓断面の SEM 画像について、複雑さを定量する手段であるボックスカウンティング法によるフラクタル次元解析も行ったが（解析データ未掲載）、結果は 5-5、30-10、60-15 についてそれぞれフラクタル次元が 1.635 ($R^2=0.99$)、1.618 ($R^2=0.99$)、1.628 ($R^2=0.99$) であり傾向は見られなかった。微細構造については、X 線 CT 等によるさらなる可視化と定量化も有用と考えられる。

本試験結果においては加熱と練りの進行による $\tan \delta$ の増加に伴い、きめ細かく均質なネットワークが形成していき、平均の厚みがある程度を超えて薄くなっていくと比容積と反比例してソフトな食感の米菓となっていくものと考えられる。

5-15 米菓サンプルと 60-10 米菓サンプルのかたさは同程度だが、圧縮試験の総エネルギーは異なっていた (Fig. 2-14)。これは 5-15 米菓サンプルがもろく、60-10 サンプルが強靱であることを示している。不十分な加熱が未糊化デンプンの存在を許し、脆弱なネットワークを特に 5-5、5-10、5-15 にもたらしたのかもしれない。かたさは 5-5 から 30-15 まで増加し、総エネルギー中央値もそれに合わせて 30-10 まで増加していくが、総エネルギー中央値の最大値はかたさ平均の最大である 30-15 ではなく、60-10 で最大となり、米菓の強度や壊れ方が複合的に変化しているものと考えられる。

第4項 まとめ

今回の試験で団子のレオロジーの最終製品への影響を評価した。団子の特徴は即時直接の動的粘弾性測定によって定量化された。団子の SEM 画像は製造条件を反映し、団子の粘弾性とも一致した。膨化の指標である比容積は多くの工程と長い時間の後に測定可能となるものだが、米菓製造の初期工程の団子の $\tan \delta$ と関連した ($R^2 > 0.79$)。これらの結果は、実際の工程中の団子サンプルを測定することで米菓最終製品の物性を予測し数値化することを可能とした。今回のサンプルは蒸しや練りが十分でない試験区があるために米菓かたさの傾向が 2 種類のサンプルが存在した。蒸しと練りの進行により、団子にきめ細かいネットワークが発達し $\tan \delta$ の増加と G' の減少が起こり、気泡壁の厚みがある程度を超えると比容積と反比例してソフトな食感の米菓となっていくものと考えられる。今回の試験において体系的な官能評価は実施しておらず、米菓製造知識のある複数名の感想の範疇であるが、実際に 5 分蒸しサンプルや 5 分練りサンプルはソフトな食感というよりも脆くボソボソとした食感であり、30-10 ($\tan \delta = 0.252$) 以上の強度の処理サンプルは、蒸しあるいは練り時間の増加によってサクサクとした食感になっていった。配合や品種毎に異なるとは予想されるものの団子の物性を示すファクターのうち、少なくとも $\tan \delta$ の値が 0.25 以上のものが望ましい最終製品、煎餅を与えるであろうと判断できた。

総括

第1部第1節から、酵素処理によって適切に肉のテクスチャーを変えることで、外観を保ちながら、咀嚼能力が衰えた患者でも容易に咀嚼できる介護食を作製した。また、その特徴は健常者の実際の咀嚼回数の調査だけでなくテクスチャー測定、静的粘弾性測定、圧縮、分散等の種々物性測定によって、多面的に数値化し評価することができた。

第1部第2節より、作製した酵素処理肉に対して、治具の向きを変えてかたさ測定を実施し、肉の特徴的なテクスチャーの一つである繊維感を保った軟化であることが示すことができ、外観のみならず食感の特徴も一部残すことができていることがわかった。この食感の要因を調べた結果、酵素分解によってミオシンやアクチンなど肉の主要な構成成分が低分子化していながら、筋繊維構造は残存していることがわかった。

第2部より、米菓製造中間体である団子のテクスチャーは、蒸し時間、練り時間を変えることで変化した。その変化は動的粘弾性測定で数値化され、最終製品である米菓の膨化を示す比容積と高い相関があった。つまり、製造初期段階のテクスチャーを測定することで、24時間以上先の最終製品のテクスチャーを熟練工でなくとも予測、調整が可能となった。

食品という多成分、複雑系のテクスチャーを人間は五感と経験を駆使して瞬時に識別、評価あるいは喫食し楽しんでいる。介護食は咀嚼能力の衰えた患者に対して、

食べやすさと本来の食の魅力、楽しみという矛盾を両立させるべく開発される点で、そうした人の五感への挑戦ともいえる。介護食は食のバリアフリーと言われることがあるが、人の食事に対するハードルは高齢化による筋力低下や義歯、疾病後遺症等に限ったことではなく、昨今ではアレルギーや宗教、信条によってより多くの人自分が自分に適合する食事を選択する必要も出てきている。介護食を含む、そうした制限された原料や最終的な物性においても分け隔てなく多様な食の喜びを提供するために、食品製造業において加工によるテクスチャーの改変・調整技術は必要不可欠である。

また、食品製造業において安定して高品質な製品を作り続けるために、熟練の感覚を磨き続けることは重要である。一方、国内の労働力人口の減少や外国人労働者の予測される増加の現状を鑑みた場合、これまで培われてきた職人的技術の伝承はますます困難になる。食品製造工程に関して機械化、ロボット化を進めることは現状の問題点を打破する一助となるが、食品の品質に関する複雑な感覚のセンシングがあつてこそ、初めて人を代替する有用なツールとなりうる。食品のテクスチャーを改変し、その物性を分析機器により数値化し最終製品の品質を確保することは、今後より多くの人へ食の喜び・楽しみを届けるために必要かつ重要な手立てになると考えられる。

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、終始、御懇篤なる御指導と御校閲を賜りました北海道大学大学院農学研究院生物有機化学研究室 松浦英幸教授に深く感謝いたします。

論文の御校閲、御助言を賜りました、北海道大学大学院農学研究院食品栄養学研究室 石塚敏教授、北海道大学大学院農学研究院食品加工工学研究室 小関成樹准教授に深く感謝申し上げます。

長岡技術科学大学工学部博士課程（当時）の本間一平氏、杉原幸信氏には実験に当たり御協力を頂き、感謝申し上げます。

介護食品開発時から研究者として、社会人として終始温かい激励と御指導を賜りましたイーエヌ大塚製薬株式会社 升永博明氏、JXTG エネルギー株式会社 林雅浩氏、オルガノフードテック株式会社 梅根伸悟氏に感謝申し上げます。

動的粘弾性測定について有益な御助言を賜り、また、当時の上司として公私にわたり転職後の著者を支えて頂いたフジッコ株式会社 丸山健太郎氏に心から感謝申し上げます。

本論文作成の機会と御理解を頂き終始激励頂きました亀田製菓株式会社お米研究所長 荒生均氏、主任研究員 渡辺紀之氏、課長 鷺尾英明氏に心から感謝申し上げます。

最後に、御支援いただきました亀田製菓株式会社お米研究所の研究員の皆さんを始めとする多くの皆々様に感謝すると共に御礼申し上げます。

2020 年 3 月

竹井 亮

引用文献

- 1) Szczesniak AS. Classification of textural characteristics. J Food Sci. 1963;28(4):385–9.
- 2) Sherman P. A texture profile of foodstuffs based upon well-defined rheological properties. J Food Sci. 1969;34(5):458–62.
- 3) 中村 卓, 日下 舞. ロどけとテクスチャー. 油脂のおいしさと科学. (株)エヌ・ティー・エス. 2016. 33–8 p.
- 4) Paddon-Jones D, Short KR, Campbell WW, Volpi E, Wolfe RR. Role of dietary protein in the sarcopenia of aging. Am J Clin Nutr. 2008;87(5):1562–6.
- 5) Nishinari K. Rheology, food texture and mastication. J Texture Stud. 2004;35(2):113–24.
- 6) Onder G, Liperoi R, Soldato M, Cipriani MC, Bernabei R, Landi F. Chewing problems and mortality in older adults in home care: Results from the aged in home care study. J Am Geriatr Soc. 2007;55(12):1961–6.
- 7) Higashiguchi T. Novel diet for patients with impaired mastication evaluated by consumption rate, nutrition intake, and questionnaire. Nutrition. 2013;29(6):858–64.
- 8) Takei R. Enzymatic treatment solution, softening method and softened animal-based food product. PCT Pub.No.:US2012/0308684 A1., 2012.

- 9) 総務省統計局. 総務省統計局ホームページ 人口推計（平成30年5月確定値, 平成30年10月概算値）.
- 10) 日本介護食品協議会ホームページ UDF区分策定の経緯.
- 11) 厚生労働省. 食安発第0212001号 平成21年2月12日. 2009.
- 12) 秋間彩香, 山形文乃, 谷米（長谷川）温子, 熊谷日登美, 熊谷仁. 食品ハイドロコロイドのかたさ・粘度と咽頭部流速. 日本食品科学工学会誌. 2017;64(3):123–31.
- 13) 藤崎享. ユニバーサルデザインフード. 日本食品科学工学会誌. 2008;55(2):78–9. [Internet].
<http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/nskkk/55.78?from=CrossRef>
- 14) 農林水産省食料産業局食品製造課食品第3班 課長補佐 添野覚. スマイルケア食の現状と展望. 2017.
- 15) 藤島一郎, 藤谷順子. 嚥下リハビリテーションと口腔ケア. メヂカルフレンド社. 2001. 38 p.
- 16) 嚥下食ドットコムホームページ. [Internet].
<http://www.engesyoku.com/kiso/kiso06.html>
- 17) 日本摂食・嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会. 日本摂食・嚥下リハビリテーション学会嚥下調整食分類2013. 日本摂食嚥下リハビリテーション学会誌. 2013;17(3):255–73.
- 18) 田村建二. 老いとともに 食支援. 朝日新聞. 2019年5月1日21面.

- 19) ブリア=サヴァラン(著)、関根秀雄(翻訳)、戸部松美(翻訳)。美味礼賛。
岩波文庫. 1967. 21 p.
- 20) 井筒雅, 野口洋介. チーズの物性と調理. 調理科学. 1984;17(2):55–62.
- 21) 浅沢英夫. 人の味覚と食品物性. 繊維工学. 1992;45(4):207–18.
- 22) 手嶋登志子. 高齢者のQOLを高める食介護論 口から食べるしあわせ. 日本
医療企画. 2006. 96–99 p.
- 23) Matsumoto Y. Diet and support for the elderly at sites for nursing care and welfare.
J Integr Study Diet Habits. 2016;26(4):177–80.
- 24) Kaneko N, Nohara K, Asano M, Sakai T, Mitsuyama M. Risk criteria tag of help
with eating for elderly residents in nursing home. Japanese J Geriatr.
2012;27(1):18–24.
- 25) Higashiguchi T. Development of the shape-maintaining and softened meals
「iEat」, and evaluation of its degradability and digestibility by the analysis of
texture, ingredient and artificial digestion. J Japanese Soc Parenter Enter Nutr.
2011;26(3):95–106.
- 26) Boles JA, Shand PJ. Meat cut and injection level affects the tenderness and cook
yield of processed roast beef. Meat Sci. 2001;59(3):259–65.
- 27) 福本寿一郎. 食品加工と酵素. 化学と生物. 1972;10(3):149–66.
- 28) Atsushi Suzuki, Akihiko Shimakura, Takashi Miki, Masanori Shimizu, Gentaro
Koyama, Makoto Saito et al. Tenderization of culled chicken meat with antemortem

- injection of proteolytic enzyme. Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi. 1990;37(2):104–10.
- 29) Fujishima I, Nagao N, Otsuka J, Shigematsu T, Hojyo K, Kanazawa H. Study of the possibility of using iEat produced according to the enzyme homogeneous permeation method for sensory evaluation. Deglutition. 2014;3(1):110–7.
- 30) 公益財団法人日本食肉消費総合センターホームページ. [Internet]. www.jmi.or.jp/recipe/cooking/yaku_main6.html
- 31) A.O.A.C. Official Methods of Analysis of AOAC. 17th. 2002.
- 32) A.O.A.C. Official Methods of Analysis of AOAC. 13th. 1980.
- 33) 厚生労働省告示第176号. 栄養表示基準. 2003.
- 34) Shibata M, Araki T, Sagara Y. Development of specified protocols and methodology in the application of food kansei model for the optimal design of Danish pastry. Food Sci Technol Res. 2008;14(4):367–76. [Internet]. <http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/fstr/14.367?from=CrossRef>
- 35) Hernández-Estrada ZJ, Rayas-Duarte P, Figueroa JDC, Morales-Sánchez E. Creep recovery tests to measure the effects of wheat glutenins on doughs and the relationships to rheological and breadmaking properties. J Food Eng. 2014;143:62–8.
- 36) Tabilo-Munizaga G, Barbosa-Cánovas G V. Rheology for the food industry. J Food Eng. 2005;67(1–2):147–56.

- 37) 厚生労働省. 第十五改正日本薬局方. 2006. 104–5 p.
- 38) Hiiemae KM, Palmer JB. Food transport and bolus formation during complete feeding sequences on foods of different initial consistency. *Dysphagia*. 1999;14(1):31–42.
- 39) Saitoh E. Dysphagia rehabilitation. *Clin Neurol*. 2008;48(11):875–9.
- 40) Kohyama K, Akai TS, Zuma TA. Patterns observed in the first chew of foods with various textures. *Food Sci Tehcnol Res*. 2001;7(4):290–6.
- 41) Mioche L, Bourdiol P, Monier S, Martin J-FF. The relationship between chewing activity and food bolus properties obtained from different meat textures. *Food Qual Prefer*. 2002;13(7–8):583–8.
- 42) 柳沢幸江, 田村厚子, 寺元芳子, 赤坂守人. 食物の咀嚼筋活動量、及び食物分類に関する研究. *日本小児歯科学雑誌*. 1989;27(1):74–84.
- 43) Sakai M, Egashira F, Kanaya S, Kayashita J. Comparison of food physical properties with reference to clinically effective stepwise swallowing foods. *Japanese J Dysphagia Rehabil*. 2006;10(3):239–48.
- 44) Umene S, Hayashi M, Kato K, Masunaga H. Physical properties of root crops treated with novel softening technology capable of retaining the shape, color, and nutritional value of foods. *Dysphagia*. 2014;30(2):105–13.

- 45) Wakabayashi H, Sakuma K. Rehabilitation nutrition for sarcopenia with disability:a combination of both rehabilitation and nutrition care management. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*. 2014;5(4):269–77.
- 46) Takei R, Hayashi M, Umene S, Narita K, Kobayashi Y, Masunaga H. Changes in physical properties of enzyme-treated beef before and after mastication. *J Texture Stud*. 2015;46(1):3–11.
- 47) Kato K, Hayashi M, Umene S, Masunaga H. A novel method for producing softened edible seaweed kombu. *LWT - Food Sci Technol*. 2016;65:618–23.
- 48) Hayashi M, Kato K, Umene S, Masunaga H. Characterisation of a novel softened rice product. *Food Chem*. 2014;145:372–7.
- 49) Hayashi M, Kato K, Umene S, Masunaga H. A method for softening beans with coats. *Int Food Res J*. 2016;23(6):2534–9.
- 50) World Health Organization, Agriculture and Protection Consumer. Energy and protein requirements:Report of joint FAO/WHO adhoc expert committee. FAO Nutrition Meetings Report Series No.52. WHO Technical Report Series No.522.Rome and Geneva. 1973.
- 51) 文部科学省 科学技術・学術審議会資源調査部会. 日本食品標準成分表2015年版（七訂）. 2015. 6–11, 168–169 p.
- 52) Ichinose S, Tagami M, Muneta T, Mukohyama H, Sekiya I. Comparative sequential morphological analyses during in vitro chondrogenesis and osteogenesis of

- mesenchymal stem cells embedded in collagen gels. *Med Mol Morphol*. 2013;46(1):24–33.
- 53) 山本啓一, 丸山工作. 筋肉. 化学同人. 1986. 45, 48 p.
- 54) 沖谷明紘. 肉の科学. 朝倉書店. 1996. 38–43 p.
- 55) Yamanoue M, Akamatsu Y. Comparison of myofibrillar structure weakening with tenderness of chicken, rabbit and porcine skeletal muscles during postmortem aging. *Anim Sci Technol*. 1994;65(4):320–9.
- 56) Herring HK, Cassens RG, Briskey EJ. Sarcomere length of free and restrained bovine muscles at low temperature as related to tenderness. *J Sci Food Agric*. 1965;16(7):379–84.
- 57) 奥西智哉. IoT (IoT Supporting our Life and Industry) . 日本食品科学工学会誌. 2017;64(5):283.
- 58) 池澤克哉. 産業界から見たシステム技術とIoT. 計測と制御. 2016;55(4):295–9.
- 59) Watanabe T, Hashimoto Y, Joh T, Hayakawa T. Characterization of viscoelastic properties of rice cake. *Food Sci Technol Int Tokyo*. 1997;3(1):6–9.
- 60) Isono Y, Okamura E, Fujimoto T, Hashimoto Y, Watanabe T. Nonlinear viscoelastic properties of mochi cake. *Agric Biol Chem*. 1990;54(11):2949–52.
- 61) Isono Y, Okamura E, Fujimoto T, Watanabe T. Linear viscoelastic properties and tissue structures of mochi cake. *Agric Biol Chem*. 1990;54(11):2941–7.

- 62) Sugiyama J, Horiuchi H. Dynamic viscoelasticity of shiratama mochi cake in a range of high temperature (mechanical properties of waxy rice cake, mochi part VI). Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi. 1986;33(1):38–43.
- 63) Kobayashi K, Ishizaki K, Kawai Y, Matsui T, Kasaneyama H, Hoshi T. Development of rapid measuring method on rice-cake hardness in waxy rice. Breed Sci. 2003;53(2):169–75.
- 64) Liu X, Mu T, Sun H, Zhang M, Chen J. Influence of potato flour on dough rheological properties and quality of steamed bread. J Integr Agric. 2016;15(11):2666–76.
- 65) Giannou V, Tzia C. Frozen dough bread: Quality and textural behavior during prolonged storage - Prediction of final product characteristics. J Food Eng. 2007;79(3):929–34.
- 66) Ahmad M, Wani TA, Wani SM, Masoodi FA, Gani A. Incorporation of carrot pomace powder in wheat flour: effect on flour, dough and cookie characteristics. J Food Sci Technol. 2016;53(10):3715–24.
- 67) 吉井洋一, 有坂將美. うるち米の理化学的性質と米菓の膨化性. 日本食品工業学会誌. 1994;41(11):747–54.
- 68) Matsui T, Ishizaki K, Nakamura S, Ohtsubo K. Differences in physical properties of boiled rice and gelatinization properties of rice flour between pairs of near-isogenic

- lines for low glutelin gene (Lgc1) locus. J Japanese Soc Food Sci Technol. 2013;60(5):204–11.
- 69) Arisaka M, Yoshii Y, Imai S. Gelatinization, retrogradation and disintegration of starch during the process of making glutinous rice cake. J Japanese Soc Food Sci Technol Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi. 1991;38(2):86–93.
- 70) Ang CYW, Liu K, Huang Y-W. Asian Foods. Science and Technology. 1999. 7–8 p.
- 71) Varanyanond W, Hirata T, Ishitani T. Quality evaluation of shrimp cracker at various activities by sensory and mechanical techniques. Food Sci Technol Int Tokyo. 1998;4(3):195–8.
- 72) 上田隆宣. 測定から読み解くレオロジーの基礎知識. 日刊工業新聞社. 2012. 100–106 p.
- 73) Takahashi K, Matsuda T, Nitta Y. Time-course changes of the fine structure of rice starch grains during cooking process by scanning electron microscopy. Japanese J Crop Sci. 2001;70(1):47–53.
- 74) Ogawa K, Kimura T, Wada M, Nishimura M, Itoh S, Yamada M. Comparison of sample preparation methods for observing cooked rice by scanning electron microscopy. J home Econ Japan. 1999;50(12):1281–9.

- 75) Mani K, Eliasson AC, Lindahl L, Tragardh C. Rheological properties and breadmaking quality of wheat flour doughs made with different dough mixers. Cereal Chem. 1992;69(2):222–5.
- 76) Nishitani S, Nunome T, Hisamatsu M. Correlation between swelling of normal rice paste and starch structure. J Appl Glycosci. 2003;50:383–8.
- 77) Takahashi H, Itou A, Yamamura K, Arai E, Yamada Y. Classification of rice crackers based on hardness. J Japanese Soc Masticatory Sci Heal Promot. 2009;19(1):29–38.
- 78) Lii CY, Shao YY, Tseng KH. Gelation mechanism and rheological properties of rice starch. Cereal Chem. 1995;72(4):393–400.
- 79) Brito IL, Souza EL de, Felex SSS, Madruga MS, Yamashita F, Magnani M. Nutritional and sensory characteristics of gluten-free quinoa (*Chenopodium quinoa* WILLD)-based cookies development using an experimental mixture design. J Food Sci Technol. 2015;52(9):5866–73.

図表

第1部

Table 1-1 特別用途食品 えん下困難者用食品の許可基準

Table 1-2 UDF 区分表

Table 1-3 藤島による嚥下障害グレード

Table 1-4 日本摂食嚥下リハビリテーション学会分類 2013

Table 1-5 各サンプルの栄養成分分析結果

Table 1-6 咀嚼前後の常食牛肉と HEP 処理牛肉のかたさ [Pa]

Table 1-7 咀嚼前後の常食牛肉と HEP 処理牛肉の静的粘弾性

Table 1-8 歪率毎の各サンプルの荷重 [N]

Table 1-9 分散性試験における攪拌時間毎の各サンプルの残渣率

Table 1-10 各サンプルの栄養成分分析

Fig. 1-1. スマイルケア食の選び方

Fig. 1-2. 金谷による嚥下食ピラミッド

Fig. 1-3. Sherman のテクスチャプロファイル

Fig. 1-4. あいーとと常食の外観比較

Fig. 1-5. テクスチャー測定の例とクリープメーター

Fig. 1-6. 圧縮試験及びクリープ試験サンプル イメージ

Fig. 1-7. 常食牛肉と酵素均質浸透処理牛肉の外観

Fig. 1-8. 酵素処理牛肉をスプーンで潰した様子

Fig. 1-9. 常食牛肉と HEP 処理牛肉の第一嚥下までの咀嚼サイクル数

Fig. 1-10. 各サンプルの代表的な荷重-歪曲線

Fig. 1-11. 線維感試験

Fig. 1-12. HEP 処理鶏肉と常食鶏肉の外観

Fig. 1-13. 常食鶏肉(NC)と HEP 処理鶏胸肉 (HEPC) のかたさ

Fig. 1-14. HEP 処理鶏肉と常食鶏肉の SDS-PAGE

Fig. 1-15. 筋線維の拡大図

Fig. 1-16. HEP 処理鶏肉(A)と常食鶏肉(B)の透過型電子顕微鏡画像

Fig. 1-17. 常食鶏肉 (NC) と HEP 処理鶏肉(HEPC)の走査型電子顕微鏡画像.

第 2 部

Table 2-1 各サンプルの動的粘弾性パラメータと練り時間(x 分)に対する近似式

Fig. 2-1. 米菓の一般的な製造工程の流れ

Fig. 2-2. 動的粘弾性測定の原理概要と装置

Fig. 2-3. 各団子サンプルの動的粘弾性測定による代表的な貯蔵弾性率 [Pa] (G')
と損失弾性率 [Pa] (G'') の測定値

Fig. 2-4. 各団子サンプルの代表的な損失正接($\tan \delta = G''/G'$)の値

Fig. 2-5. 各蒸し条件の団子サンプルの練り時間に対する貯蔵弾性率 [Pa] (G' , ○)
と損失弾性率 [Pa] (G'' , △)の変化

Fig. 2-6. 各蒸し条件の団子サンプルの練り時間に対する $\tan \delta$ の変化

Fig. 2-7. 各蒸し及び各練り条件の団子サンプルの貯蔵弾性率[Pa](G')に対する損
失弾性率[Pa](G'').

Fig. 2-8. 各条件の団子を急速凍結し凍結乾燥した物の走査型電子顕微鏡画像

Fig. 2-9. 各蒸し及び練り条件の米菓（素焼き）の外観

Fig. 2-10. $\tan \delta$ に対する米菓比容積

Fig. 2-11. 各条件の米菓の $\tan \delta$ に対する米菓かたさ

Fig. 2-12. 走査型電子顕微鏡画像観察した米菓断面構造中の不均質で不十分な
ネットワークの例.

Fig. 2-13. 各米菓の断面の走査型電子顕微鏡画像

Fig. 2-14. かたさ測定試験における各米菓の総エネルギーと中央値

Fig. 2-15. 団子物性と米菓かたさについての考察の概要

Table 1-1

特別用途食品 えん下困難者用食品の許可基準(消費者庁HPを参考に作成).
 圧力の単位 N/m^2 は現在Pa表記であるが出典のまま記載.

規格 ^{※1}	許可基準Ⅰ ^{※2}	許可基準Ⅱ ^{※3}	許可基準Ⅲ ^{※4}
硬さ (一定速度で圧縮した ときの抵抗) (N/m^2)	2.5×10^3 ～ 1×10^4	1×10^3 ～ 1.5×10^4	3×10^2 ～ 2×10^4
付着性(J/m^2)	4×10^2 以下	1×10^3 以下	1.5×10^3 以下
凝集性	0.2～0.6	0.2～0.9	-

※1 常温及び喫食の目安となる温度のいずれの条件であっても規格基準の範囲内であること。

※2 均質なもの（例えば、ゼリー状の食品）。

※3 均質なもの（例えば、ゼリー状又はムース状等の食品）。ただし、許可基準Ⅰを満たすものを除く。

※4 不均質なものも含む（例えば、まとまりのよいおかゆ、やわらかいペースト状又はゼリー寄せ等の食品）。

ただし、許可基準Ⅰ又は許可基準Ⅱを満たすものを除く。

Table 1-2

UDF区分表(日本介護食品協会HPを参考に作成)。

区分		区分 1	区分 2	区分 3	区分 4
区分形状		容易にかめる	歯ぐきでつぶせる	舌でつぶせる	かまなくてよい
かむ力の目安		かたいものや大きいものはやや食べづらい	かたいものや大きいものは食べづらい	細かくやわらかければ食べられる	固形物は小さくても食べづらい
飲みこむ力の目安		普通に飲みこめる	ものによっては飲み込みづらいことがある	水やお茶が飲みこみづらいことがある	水やお茶が飲み込みづらい
かたさの目安	ごはん	ごはん～やわらかごはん	やわらかごはん～全がゆ	全がゆ	ペーストがゆ
	さかな	焼き魚	煮魚	魚のほぐし煮 (とろみあんかけ)	白身魚のうらごし
	たまご	厚焼き卵	だし巻き卵	スクランブルエッグ	やわらかい茶わん蒸し (具なし)
物性規格	かたさ上限値 N/m ²	5×10 ⁵	5×10 ⁴	ゾル：1×10 ⁴ ゲル：2×10 ⁴	ゾル：1×10 ³ ゲル：2×10 ³
	粘度下限値 mPa・s			ゾル：1500	ゾル：1500

Table 1-3

藤島による嚥下障害グレード(『嚥下リハビリテーションと口腔ケア』藤島一郎, 藤谷順子を参考に作成)。

I 重症 経口不可	Gr.1	嚥下困難または不能、嚥下訓練適応なし
	Gr.2	基礎的嚥下訓練のみの適応あり
	Gr.3	条件が整えば誤嚥は減り、摂食訓練が可能
II 中等症 経口と補助栄養	Gr.4	楽しみとしての摂食は可能
	Gr.5	一部(1～2食)経口摂取
	Gr.6	3食経口摂取プラス補助栄養
III 軽症 経口のみ	Gr.7	嚥下食で、3食とも経口摂取
	Gr.8	特別に嚥下しにくい食品を除き、3食経口摂取
	Gr.9	常食の経口摂取可能、臨床的観察と指導要する
IV 正常	Gr.10	正常の摂食・嚥下能力

Table 1-4

日本摂食嚥下リハビリテーション学会分類2013(日摂食嚥下リハ会誌, 17(3):255-267 (2013)を参考に作成).

コード	名称	形態	目的・特色	主食の例	必要な咀嚼能力	他の分類との対応
0	j 嚥下訓練食品0j	均質で、付着性・凝集性・かたさに配慮したゼリー 離水が少なく、スライス状にすることが可能なもの	重症の症例に対する評価・訓練用 少量をすすぐためのまみれ吞み可能 残留した場合にも吸引が容易 たんばく質含有量が少ない		(若干の送り込み能力)	嚥下食ⅡラミッドL0 えん下困難者用食品許可基準Ⅰ
	t 嚥下訓練食品0t	均質で、付着性・凝集性・かたさに配慮したとろみ水 (原則的には、中間のとろみがある) 濃いとろみのどちらかが強い	重症の症例に対する評価・訓練用 少量ずつ飲むことを想定 ゼリー・丸呑みで嚥下したりゼリーが口中で 溶けてしまう場合 たんばく質含有量が少ない		(若干の送り込み能力)	嚥下食ⅡラミッドL3の一部 (とろみ水)
1	j 嚥下調整食1j	均質で、付着性、凝集性、かたさ、離水に配慮した ゼリー・プリン・ムース状のもの	口腔外で既に適切な食塊状となっ ている (少量をすすぐためのまみれ吞み可能) 送りの段階に多少意識して口蓋に舌を 押しつける必要がある	おもゆゼリー、ミキサー 粥のゼリー など	(若干の食塊保持と送り込み能力)	嚥下食ⅡラミッドL1・L2 えん下困難者用食品許可基準Ⅱ UDF区分4 (ゼリー状) (UDF: エンバー・サルデザイン・フード)
2	1 嚥下調整食2-1	ピューレ・ペースト・ミキサー食など、均質でなめらかで、 べたつかず、まとまりやすいもの スプーンですくって食べることが可能なもの	口腔内の簡単な操作で食塊状とな るもの (咽頭では残留、嚥下しにく いように配慮したもの)	粒がなく、付着性の低い ペースト状のおもゆや粥	(下顎と舌の運動による食塊形成 能力および食塊保持能力)	嚥下食ⅡラミッドL3 えん下困難者用食品許可基準Ⅱ・Ⅲ UDF区分4
	2 嚥下調整食2-2	ピューレ・ペースト・ミキサー食などで、 べたつかず、まとまりやすいもので不均質なものを含む スプーンですくって食べることが可能なもの		やや不均質 (粒がある) でもやわらかく、離水も なく付着性も低い粥類	(下顎と舌の運動による食塊形成 能力および食塊保持能力)	嚥下食ⅡラミッドL3 えん下困難者用食品許可基準Ⅱ・Ⅲ UDF区分4
3	嚥下調整食3	形はあるが、押しつぶし易、食塊形成や移送が容 易、 咽頭ではちがはず嚥下しやすいように配慮されたもの 多量の離水がない	舌と口蓋間で押しつぶし易が可能なもの 押しつぶし易、送り込みの口腔操作を要し (ある)それらの機能を駆使し、 かつ嚥下のリスク軽減に配慮がなされてい るもの	粥水に配慮した粥 など	舌と口蓋間の押しつぶし能力以上	嚥下食ⅡラミッドL4 高齢者ソフト食 UDF区分3
4	嚥下調整食4	かたさ・ばらけやすさ・服下しやすさなどのないもの 箸やスプーンで切れるやわらかさ	誤嚥と窒息のリスクを配慮して素材と調理 方法を選んだもの 歯がなくとも対応可能なが、上下の歯槽 骨間で押しつぶさずあるいはすりつぶすことが 必要で舌と口蓋間で押しつぶすことは困 難	軟飯・全粥 など	上下の歯槽骨間の押しつぶし能力以上	嚥下食ⅡラミッドL4 高齢者ソフト食 UDF区分2およびUDF区分1の一部

Table 1-5
各サンプルの栄養成分分析結果.

試料名	タンパク質	脂質	炭水化物	水分	エネルギー
	g/100 g				kcal/100 g
常食牛肉	27.9 ± 0.2	3.0 ± 0.1	-	69.1 ± 0.0	138 ± 0.1
HEP処理牛肉	20.9 ± 0.1	1.3 ± 0.1	1.1 ± 0.1	74.6 ± 0.1	100 ± 0.9
再成型牛肉 (市販介護食)	11.7 ± 0.0	20.2 ± 0.3	3.8 ± 0.3	63.6 ± 0.1	244 ± 1.2
鶏肉ペースト (市販介護食)	7.0 ± 0.0	7.9 ± 0.1	6.4 ± 0.1	77.5 ± 0.1	125 ± 0.9
再成型鶏肉 (市販介護食)	11.4 ± 0.1	1.8 ± 0.1	16.4 ± 0.1	68.5 ± 0.1	127 ± 0.8

n=3, mean±SD.

Table 1-6
咀嚼前後の常食牛肉とHEP処理牛肉のかたさ [Pa].
常食牛肉、咀嚼後の常食牛肉、各被験者の平均の2倍咀嚼した常食牛肉、HEP処理牛肉、咀嚼後のHEP処理牛肉のかたさ測定結果.

サンプル名	咀嚼	かたさ		
		×10 ⁴ Pa		
常食牛肉	なし	46.6 ±	7.9	
	あり	4.8 ±	1.6	a
	2倍	2.5 ±	0.9	b
HEP処理牛肉	なし	3.3 ±	0.8	b
	あり	1.4 ±	0.4	c

abc: 異文字間に有意差あり (p < 0.05).

n=5, mean±SD.

Table 1-7
咀嚼前後の常食牛肉とHEP処理牛肉の静的粘弾性.

サンプル名	咀嚼	弾性率 E_0 [Pa]		粘性率 η_N [Pa · s]	
		$\times 10^4$	比	$\times 10^6$	比
		mean $\pm$ SD		mean $\pm$ SD	
常食牛肉	なし	24.0 $\pm$ 11.2	1	94.2 $\pm$ 14.1	1
	あり	2.5 $\pm$ 0.9	0.10	4.0 $\pm$ 1.0	0.04 ac
	2倍	2.3 $\pm$ 1.2	0.10	2.4 $\pm$ 1.0	0.03 a
HEP処理牛肉	なし	2.8 $\pm$ 0.5	0.12	4.6 $\pm$ 1.1	0.05 bc
	あり	2.3 $\pm$ 1.2	0.10	3.0 $\pm$ 0.9	0.03 ac

abc: 異文字間に有意差あり ($p < 0.05$).
n=5, mean $\pm$ SD.

Table 1-8
 歪率毎の各サンプルの荷重 [N].
 Fig. 1-10に示した圧縮試験の圧縮率40、60、80%の各値をデータとした.

サンプル名	咀嚼	荷重[N]														
		40%				60%				80%						
		mean	±	SD	比	mean	±	SD	比	mean	±	SD	比			
常食牛肉	なし	11.9	±	2.7	1	42.2	±	12.5	1	161.2	±	25.2	1			
	あり	3.2	±	0.6	0.26	a	12.6	±	2.7	0.30	a	78.5	±	12.8	0.49	a
	2倍	2.5	±	0.7	0.21	a	11.2	±	2.3	0.27	a	76.9	±	11.7	0.48	a
HEP処理牛肉	なし	1.5	±	0.2	0.12	b	3.3	±	0.3	0.08	b	8.7	±	0.8	0.05	b
	あり	1.2	±	0.3	0.10	b	2.7	±	0.5	0.06	b	8.2	±	1.2	0.05	b

ab: 異文字間に有意差あり ($p < 0.05$).
 n=5, mean ± SD.

Table 1-9
分散性試験における攪拌時間毎の各サンプルの残渣率.

サンプル名	咀嚼	残渣率 [%]											
		5 min			15 min			30 min					
		mean	±	SD	mean	±	SD	mean	±	SD			
常食牛肉	なし	102	±	2.6		102.8	±	1.8		103.1	±	3.9	
	あり	66.7	±	17.7	a	56.7	±	16.4	a	57.3	±	18.8	a
	2倍	24.7	±	18.6	bc	21.8	±	6.7	bc	23.4	±	4.2	b
HEP処理牛肉	なし	34.9	±	18.3	b	32.2	±	15.7	b	6.6	±	5.5	bc
	あり	3.5	±	3.1	c	1.4	±	1.3	c	2.3	±	4.5	c

abc: 異文字間に有意差あり ($p < 0.05$)

n=5, mean±SD.

Table 1-10
各サンプルの栄養成分分析.

サンプル名	タンパク質	脂質	炭水化物	水分	エネルギー
			g/100 g		kcal/100 g
HEP処理鶏肉	16.3 ± 0.1	1.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	80.7 ± 0.0	77 ± 0.2
常食鶏肉	31.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	-	67.8 ± 0.0	133 ± 0.4
チキンペースト (市販介護食)	7.0 ± 0.0	7.9 ± 0.1	6.4 ± 0.1	77.5 ± 0.1	125 ± 0.9
再成型鶏肉 (市販介護食)	11.4 ± 0.1	1.8 ± 0.1	16.4 ± 0.1	68.5 ± 0.1	127 ± 0.8

n=3, mean ± SD.

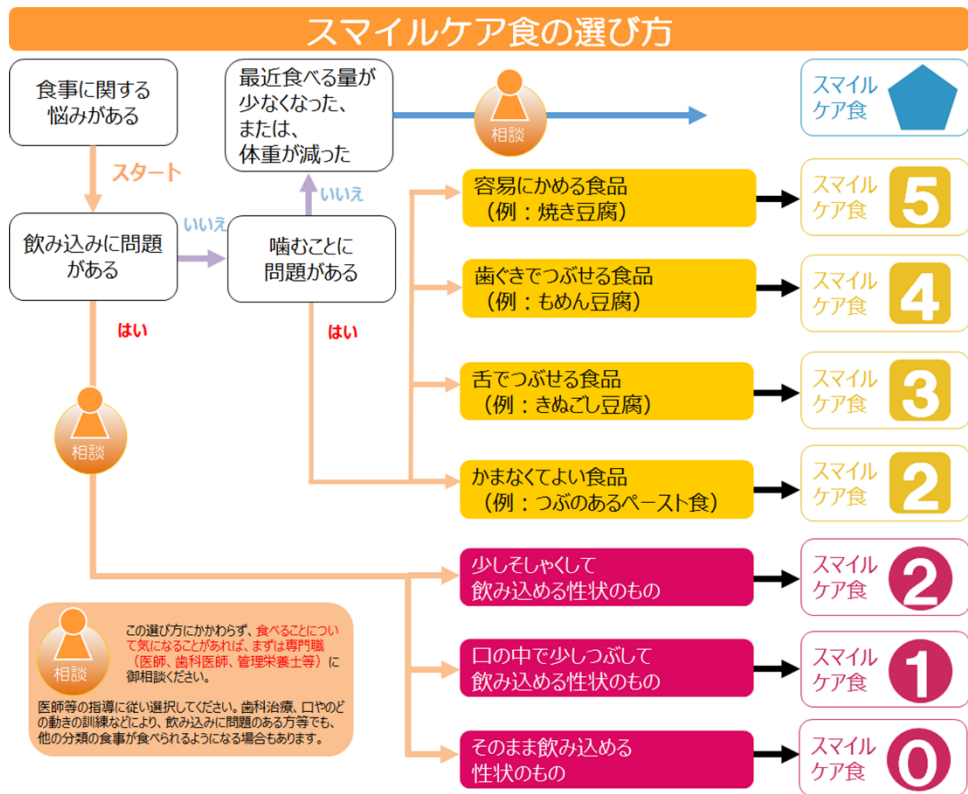


Fig. 1-1. スマイルケア食の選び方(農林水産省HPを参考に作成)。

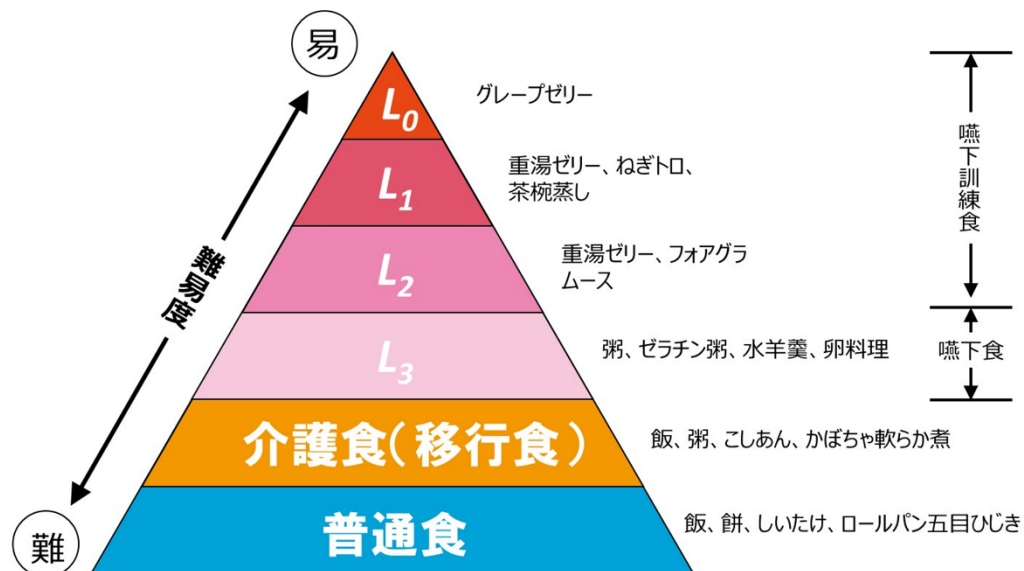


Fig. 1-2. 金谷による嚥下食ピラミッド(嚥下食ドットコムHPを参考に作成)。

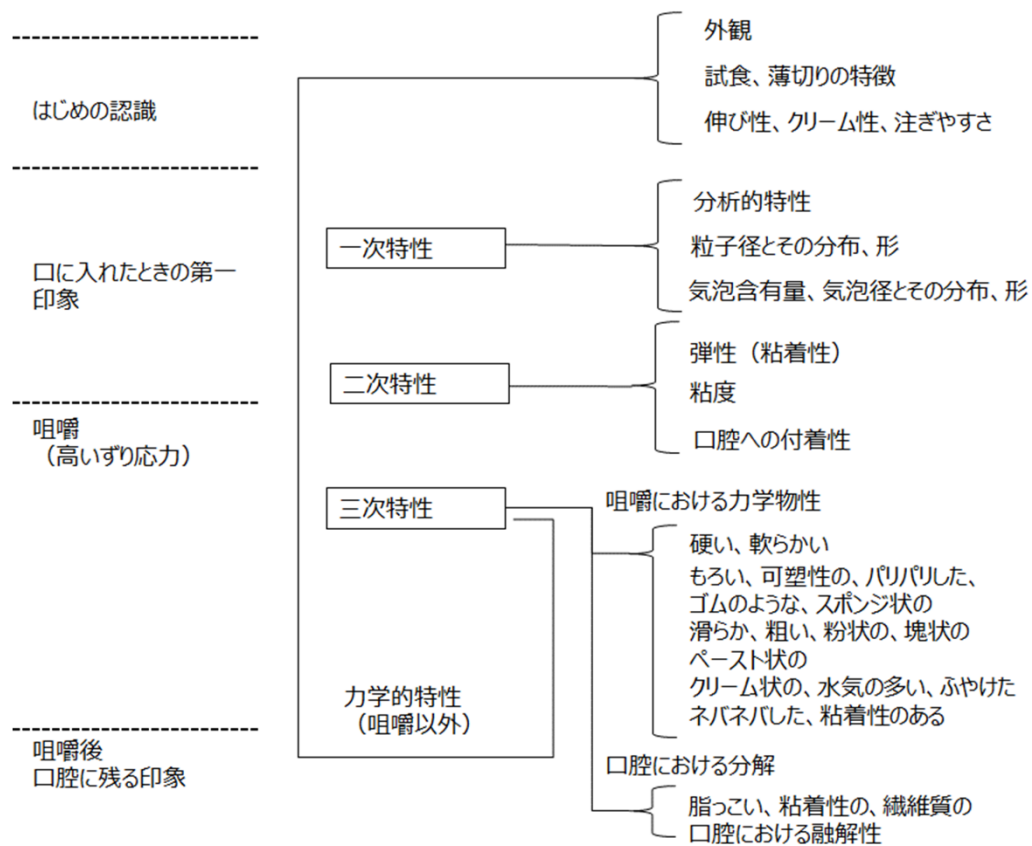
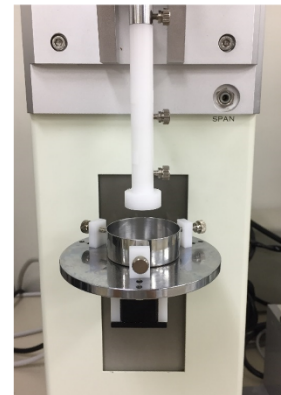
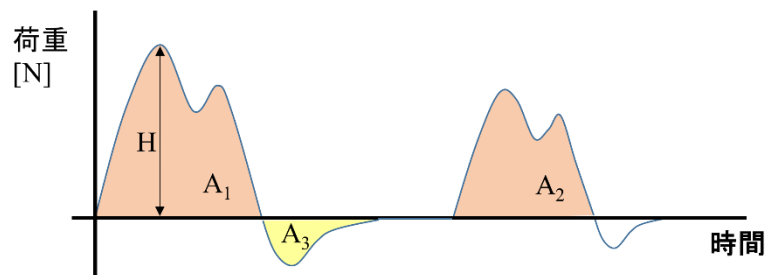


Fig. 1-3. Shermanのテクスチャープロファイル (Sherman P. A texture profile of foodstuffs based upon well - defined rheological properties. J Food Sci. 1969;34(5):458-62.を参考に作成).



Fig. 1-4. あいーとと常食の外観比較.
写真左: 常食の筑前煮, 写真右: あいーと筑前煮.



クリープメーター写真

H: 最大荷重 [N]

A_3 : 付着性 [J/m^3]

A_2/A_3 =凝集性 [無次元]

$H/\text{治具接触面積}$ =かたさ応力 [Pa]

Fig. 1-5. テクスチャー測定の場合とクリープメーター.
試料の乗った台座が上下動する際の荷重を治具上部の測定部で検出.
一度目の圧縮の最大荷重Hをかたさ荷重[N]、Hを治具接触面積で除した値をかたさ応力[Pa]とした.

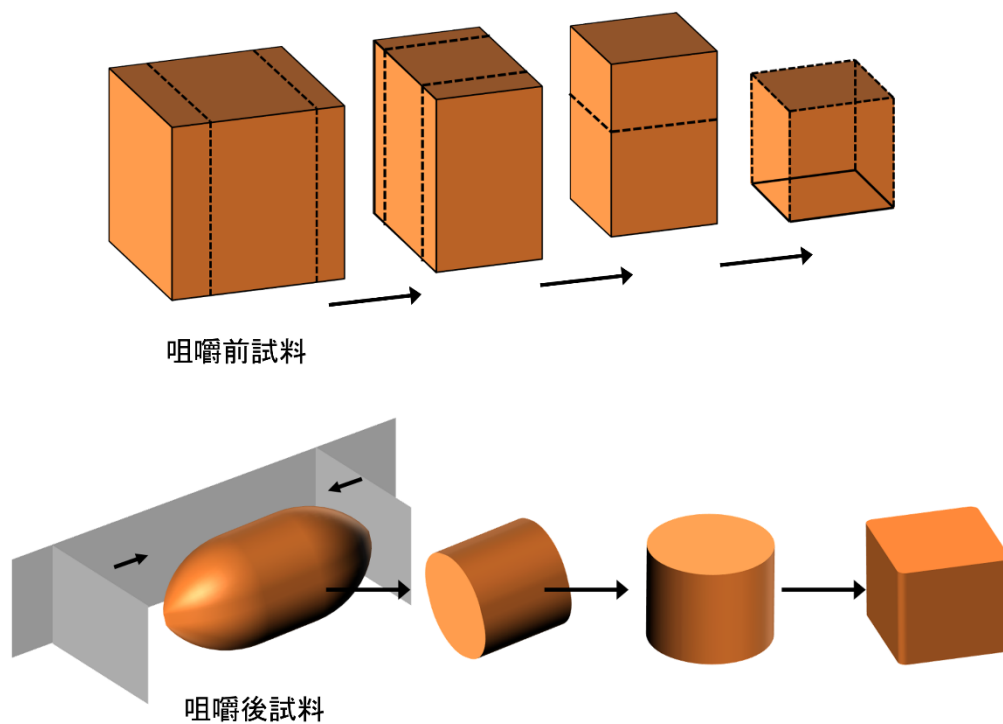


Fig. 1-6. 圧縮試験及びクリープ試験サンプル 概要.
 咀嚼前サンプルは底面以外の5面を切り出し立方体状にした.
 咀嚼後試料は平面型プレートにて2面ずつ挟み込み6面を成型し立方体状にした.

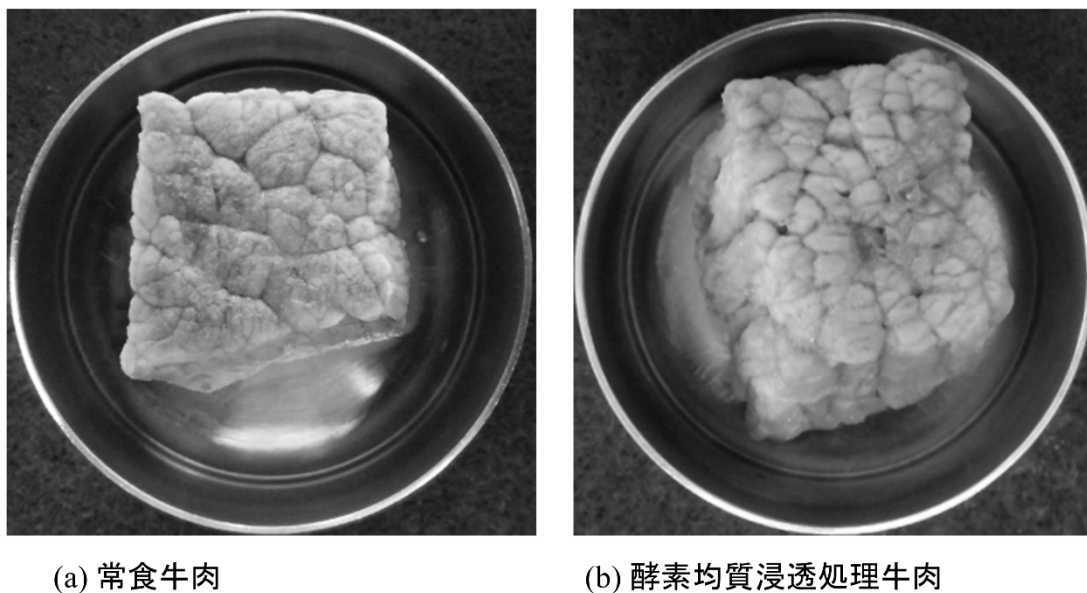


Fig. 1-7. 常食牛肉と酵素均質浸透処理牛肉の外観.
 (a):常食牛肉 Normally cooked beef ; NB.
 (b):酵素均質浸透処理牛肉 HEP-treated beef ; HEPB.
 HEPBは常食同様に自立可能な強度を持ち、筋繊維断面特有のキメが観察された.



Fig. 1-8. 酵素処理牛肉をスプーンで潰した様子.

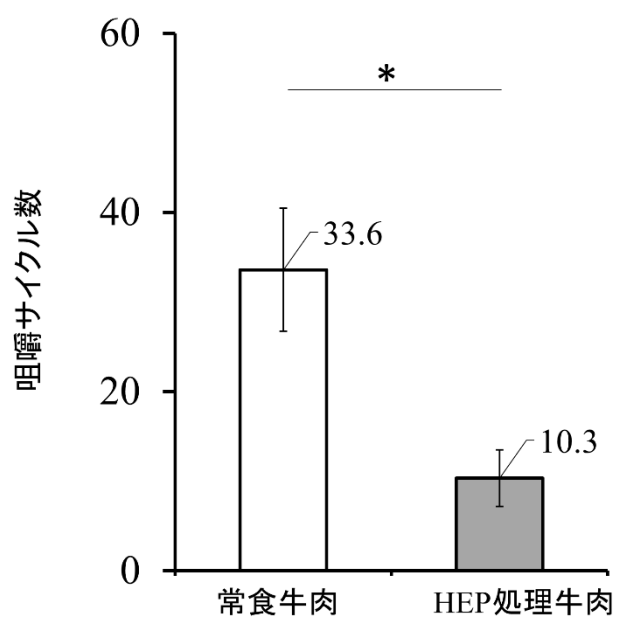


Fig. 1-9. 常食牛肉とHEP処理牛肉の第一嚥下までの咀嚼サイクル数(n=5).

*: 有意差あり ($p < 0.001$)

標準偏差をエラーバーで示した.

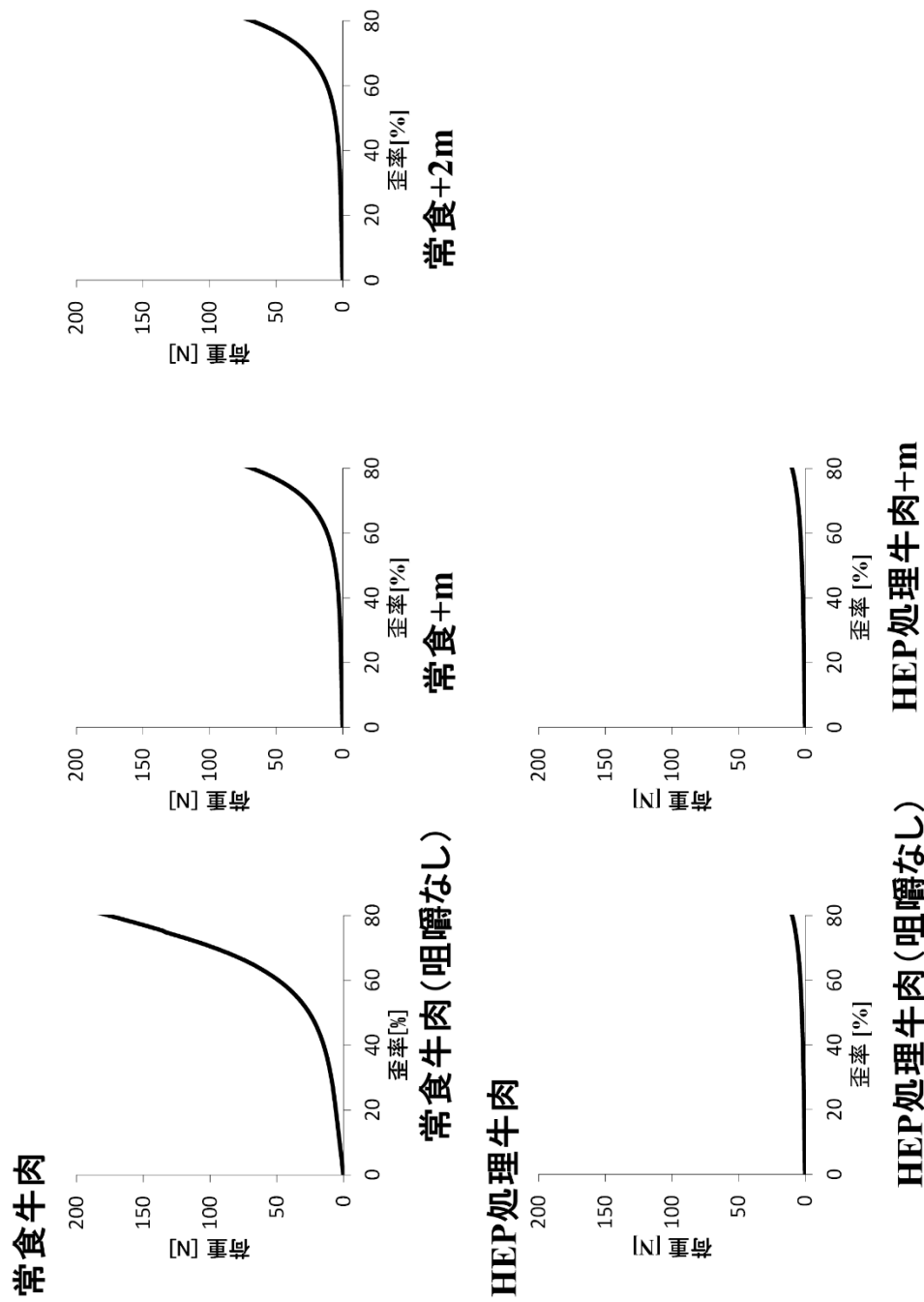


Fig. 1-10. 各サンプルの代表的な荷重-歪曲線.
 +m:咀嚼後, +2m:2倍咀嚼後.
 肉の噛みしめを想定し、平面治具で80%まで圧縮した際の荷重曲線を示した.

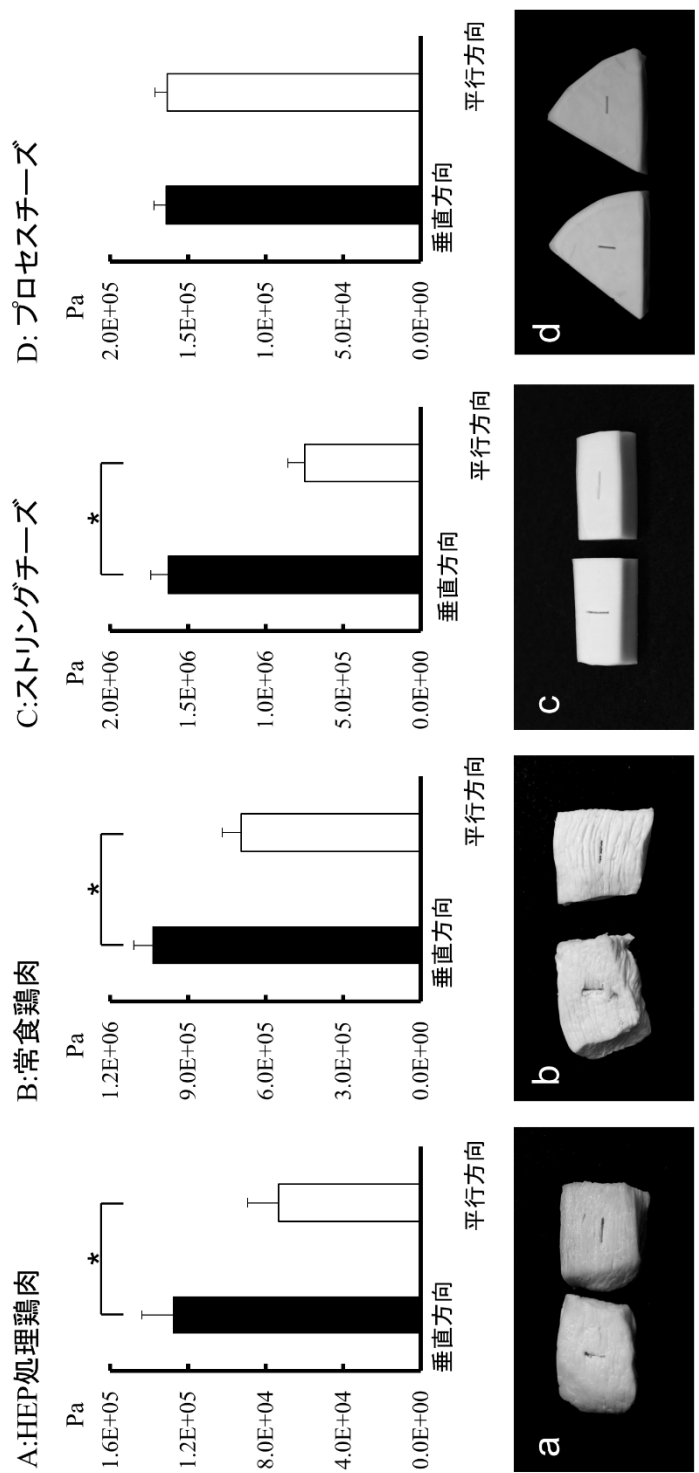


Fig. 1-11. 線維感試験.
 サンプル上部から垂直方向と平行方向に板状プランジヤーで圧縮したときのかたさ応力 [Pa]と測定後試料の外観写真. 標準偏差をエラーバーで示した.
 A: HEP処理鶏肉, B: 常食鶏肉, C: ストリングチーズ, D: プロセスチーズのかたさ.
 a: HEP処理鶏肉, b: 常食鶏肉, c: ストリングチーズ, d: プロセスチーズの外観写真.
 n=10, *: 有意差あり (p<0.001).

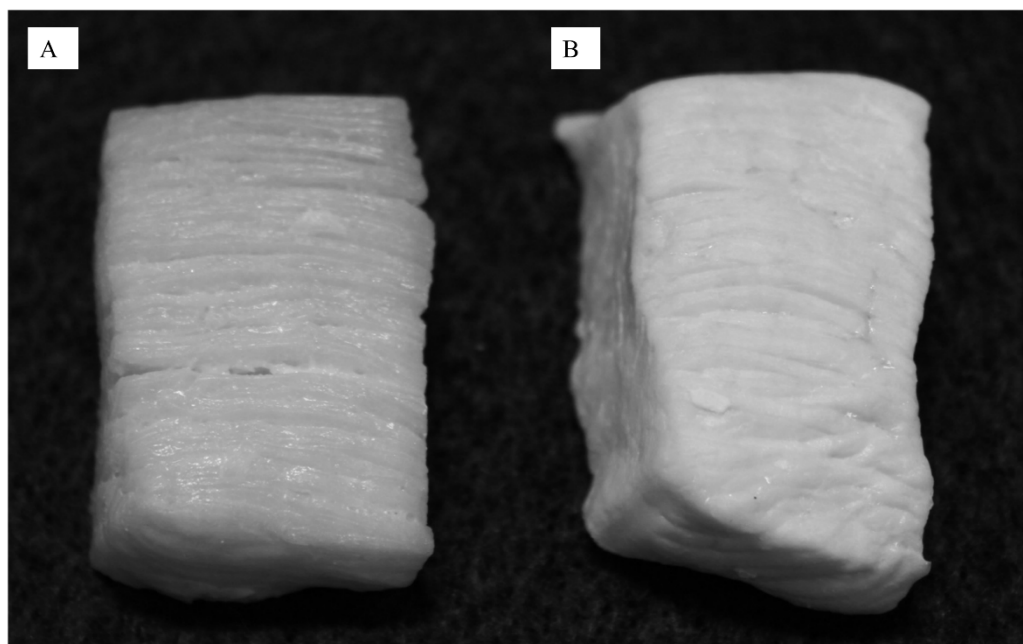


Fig. 1-12. HEP処理鶏肉と常食鶏肉の外観.

A:HEP処理鶏肉.

B:常食鶏肉.

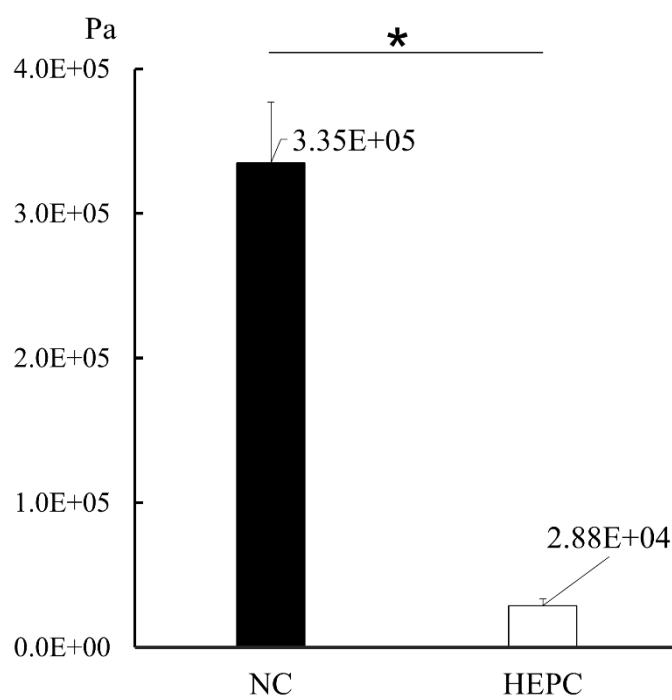


Fig. 1-13. 常食鶏肉(NC)とHEP処理鶏胸肉(HEPC)のかたさ.

n=10, *: 有意差あり(p<0.001).標準偏差をエラーバーで示した.

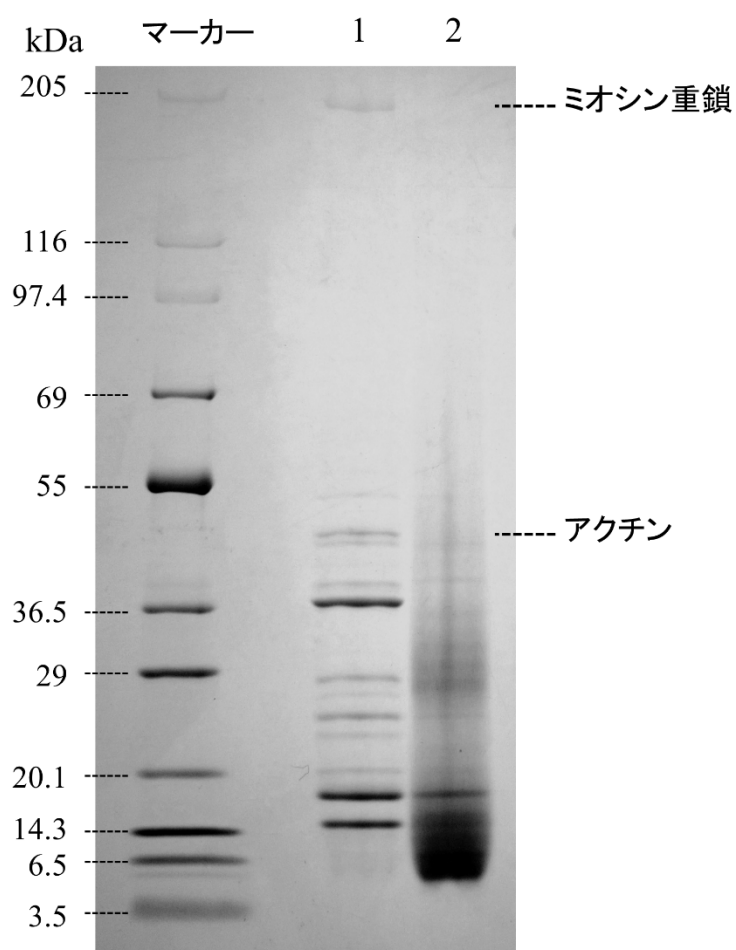


Fig. 1-14. HEP処理鶏肉と常食鶏肉のSDS-PAGE
 左からマーカ―, 1 : 常食鶏肉, 2 : HEP処理鶏肉

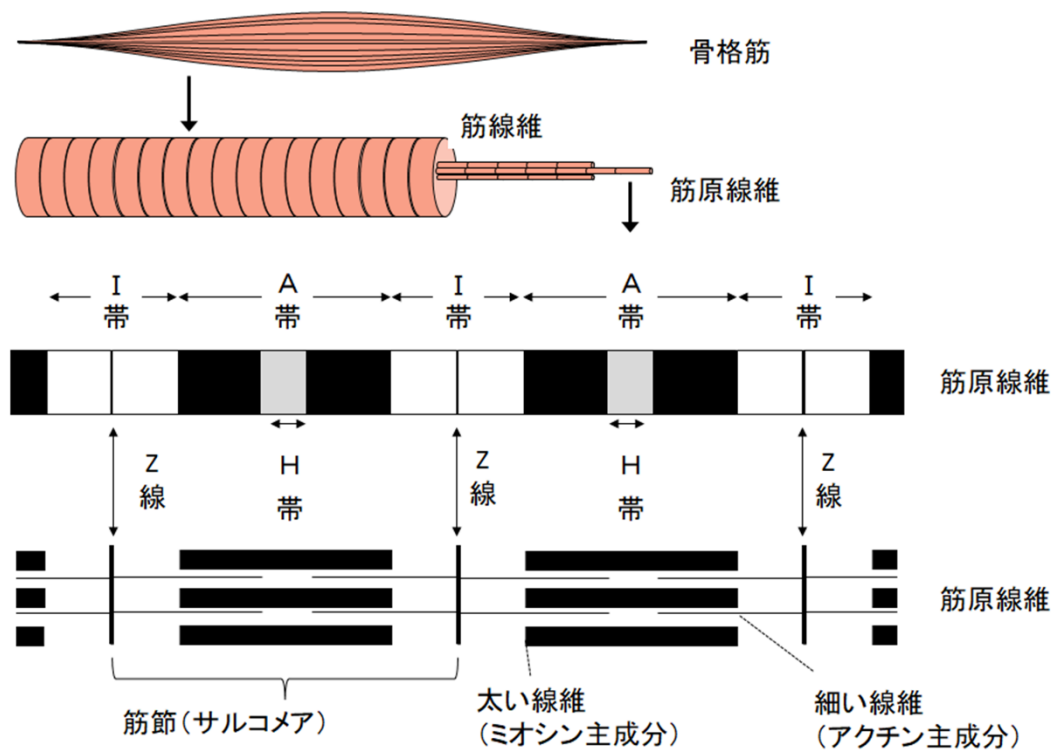


Fig. 1-15. 筋線維の拡大図(『筋肉』山本啓一, 丸山工作 を参考に作成).
 顕微鏡観察時にA帯が暗く、I帯が明るく見え、横紋筋の横紋を形成。
 I帯の中央にZ線と呼ばれるアクチンに接続する部分がある。

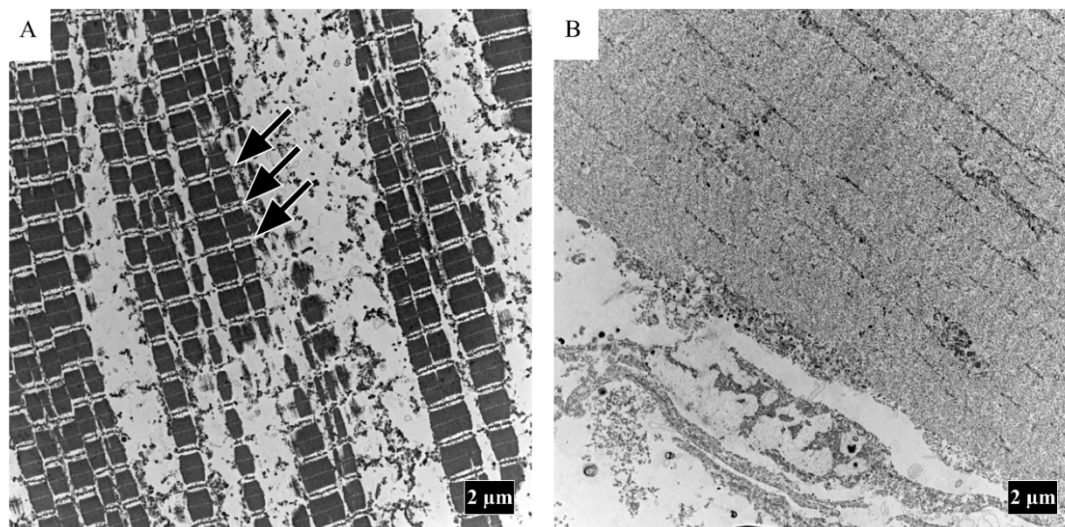


Fig. 1-16. HEP処理鶏肉(A)と常食鶏肉(B)の透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope, TEM)画像.
6000倍で筋原線維に対して平行に観察. 常食鶏肉で観察されたZ線を矢印で示した.

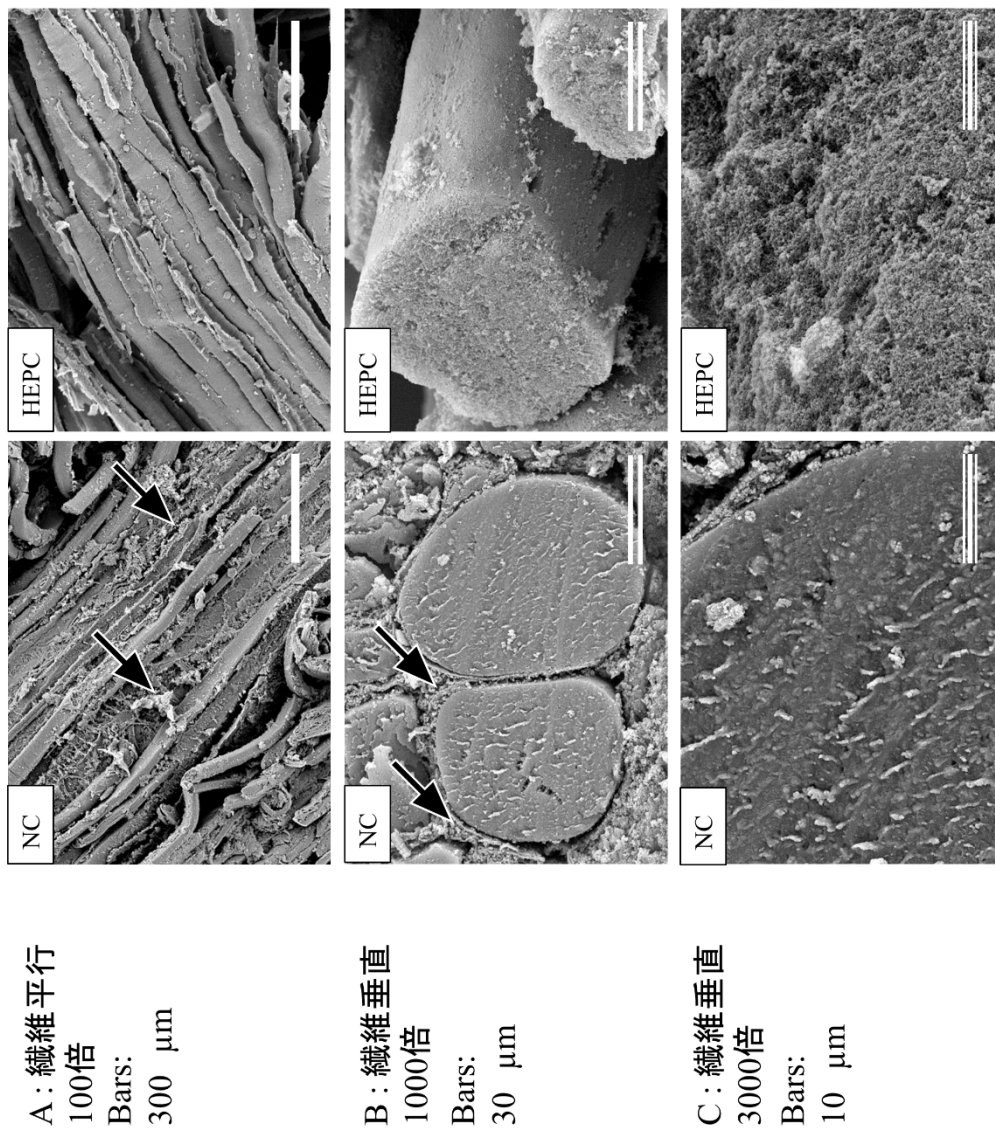


Fig. 1-17. 常食鶏肉(NC)とHEP処理鶏肉(HEPC)の走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)画像. A:繊維に対して平行, 100倍; B:繊維に対して垂直, 1000倍; C:繊維に対して垂直, 3000倍. A, BでNCに観察された結合組織を矢印で示した.

Table 2-1
各サンプルの動的粘弾性パラメータと練り時間(x分)に対する近似式.

試料名	G'			G''			練り時間 (x分)に対する各測定値の近似式		
	G'	[Pa]		G''	[Pa]		G'	G''	tan δ
5-5	77958 ±	11550	15188 ±	1754	0.195 ±	0.006			
5-10	55563 ±	4377	11870 ±	489	0.214 ±	0.009	y=102229exp(-0.058x) (R ² =0.98)	y=17689exp(-0.035x) (R ² =0.94)	y=0.0058x + 0.2126 (R ² =0.97)
5-15	43828 ±	1338	10682 ±	189	0.244 ±	0.005			
30-5	43204 ±	2189	9644 ±	477	0.223 ±	0.001			
30-10	31411 ±	4872	7903 ±	1117	0.252 ±	0.004	y=55617exp(-0.054x) (R ² =0.98)	y=11472exp(-0.036x) (R ² =0.99)	y=0.0044x + 0.2038 (R ² =0.96)
30-15	25222 ±	800	6729 ±	247	0.267 ±	0.001			
60-5	30297 ±	1669	7222 ±	356	0.239 ±	0.002			
60-10	21376 ±	383	5910 ±	121	0.276 ±	0.001	y=41295exp(-0.064x) (R ² =0.99)	y=8942.5exp(-0.042x) (R ² =0.98)	y=0.0048x + 0.1693 (R ² =0.98)
60-15	15992 ±	448	4741 ±	93	0.297 ±	0.003			

yはそれぞれ、各蒸し時間毎の G'、G''、tan δ.



Fig. 2-1. 米菓の一般的な製造工程の流れ. 一般に煎餅には製粉と延し工程、あられ・おかきには冷蔵と切断工程が存在する.

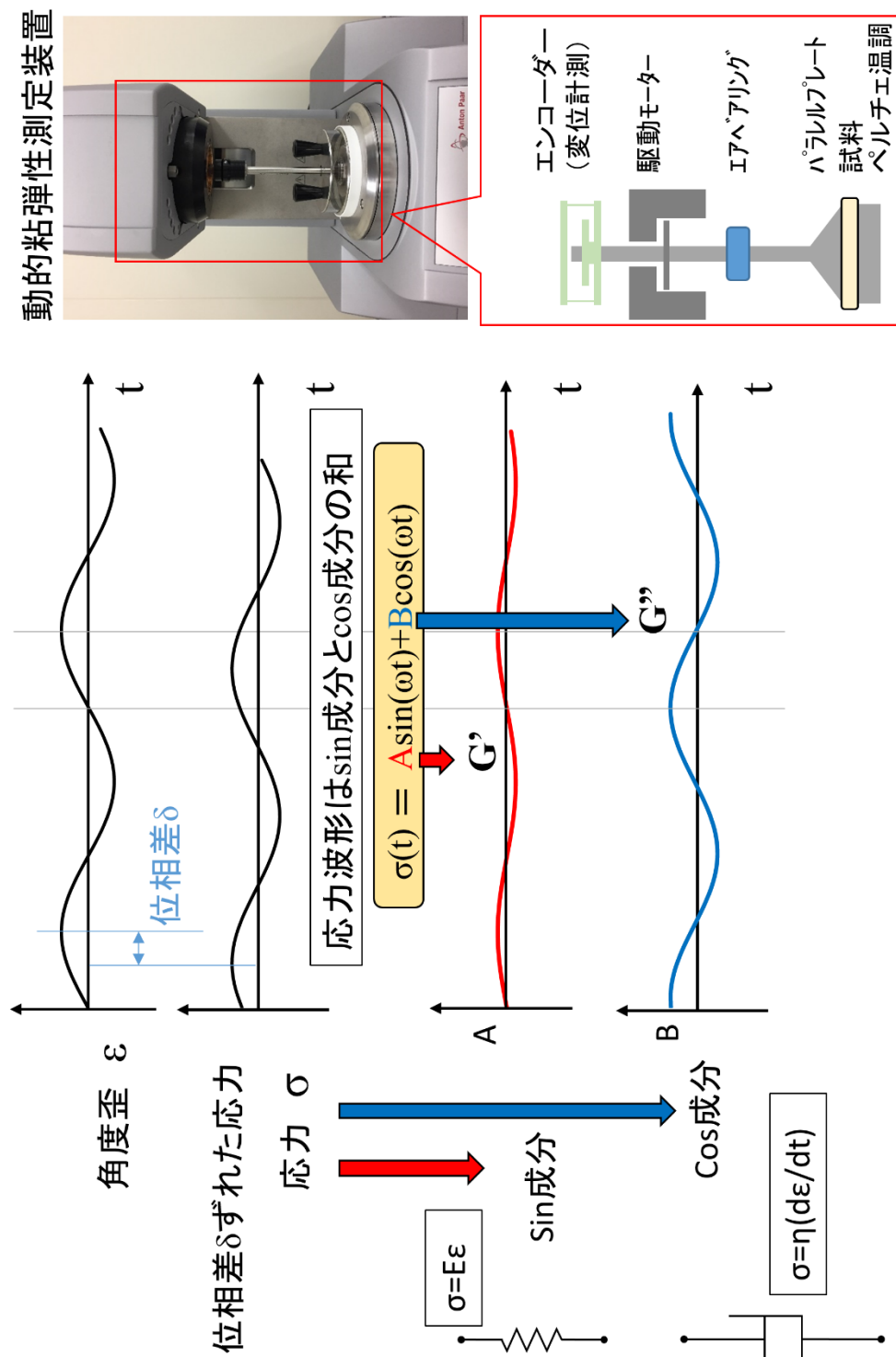


Fig. 2-2. 動的粘弾性測定の原理概要と装置.
 応力を σ 、角度歪(またはモデル内の歪)を ϵ 、弾性率を E 、粘性係数を η 、時間を t 、位相差を δ 、角速度を ω で示した.

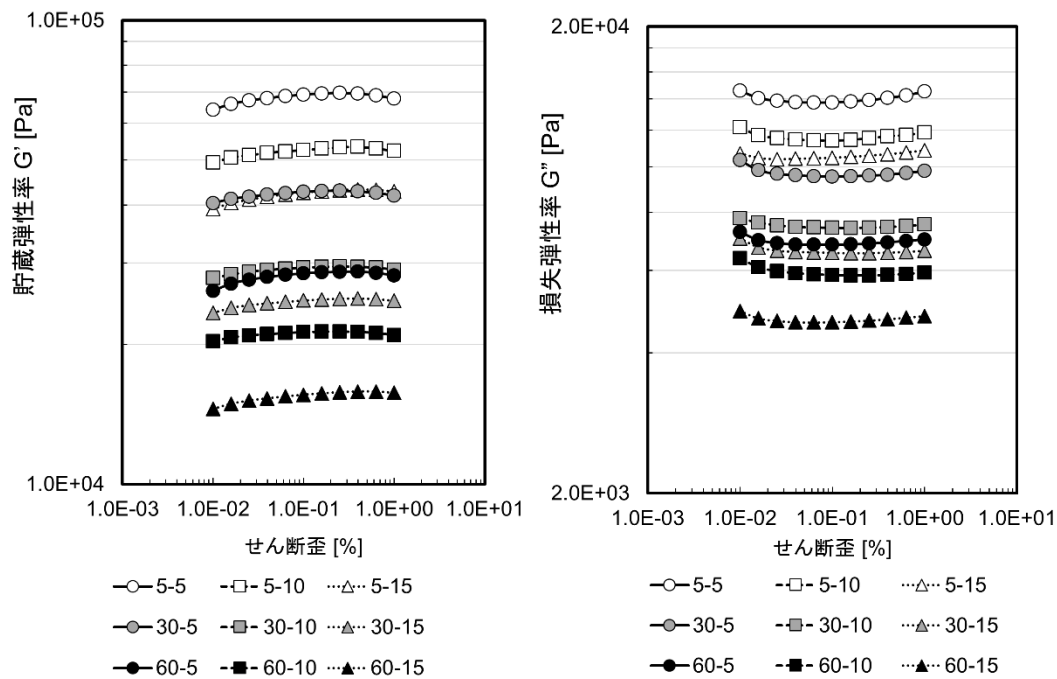


Fig. 2-3. 各調製条件の団子サンプルの動的粘弾性測定による代表的な貯蔵弾性率 [Pa] (G') と損失弾性率 [Pa] (G'') の代表的な測定値. 5分蒸しは白、30分蒸しは灰色、60分蒸しは黒で示し、5分練りは○、10分練りは□、15分練りは△でそれぞれの条件を示した。

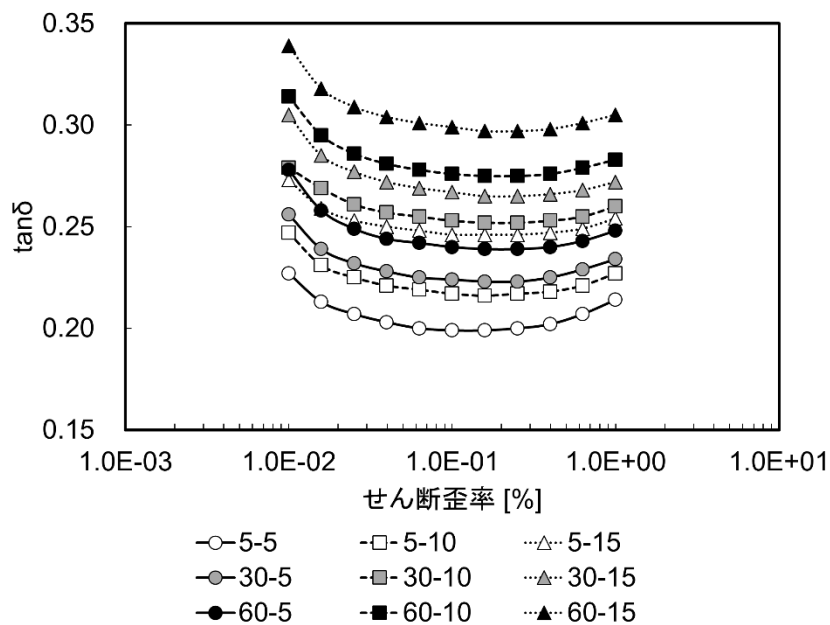


Fig. 2-4. 各調製条件の団子サンプルの代表的な損失正接($\tan \delta = G''/G'$)の値. 5分蒸しは白、30分蒸しは灰色、60分蒸しは黒で示し、5分練りは○、10分練りは□、15分練りは△でそれぞれの条件を示した。

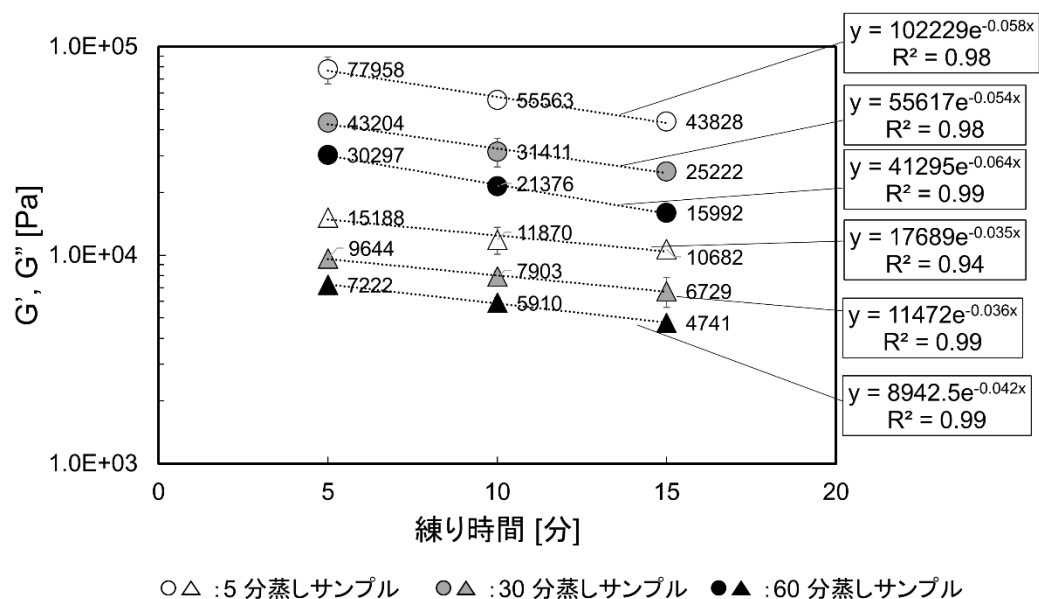


Fig. 2-5. 各蒸し条件の団子サンプルの練り時間に対する貯蔵弾性率 [Pa] (G' , ○) と損失弾性率 [Pa] (G'' , △) の変化 ($n=3$). 5分蒸しは白、30分蒸しは灰色、60分蒸しを黒で示した。標準偏差をエラーバーで示した。

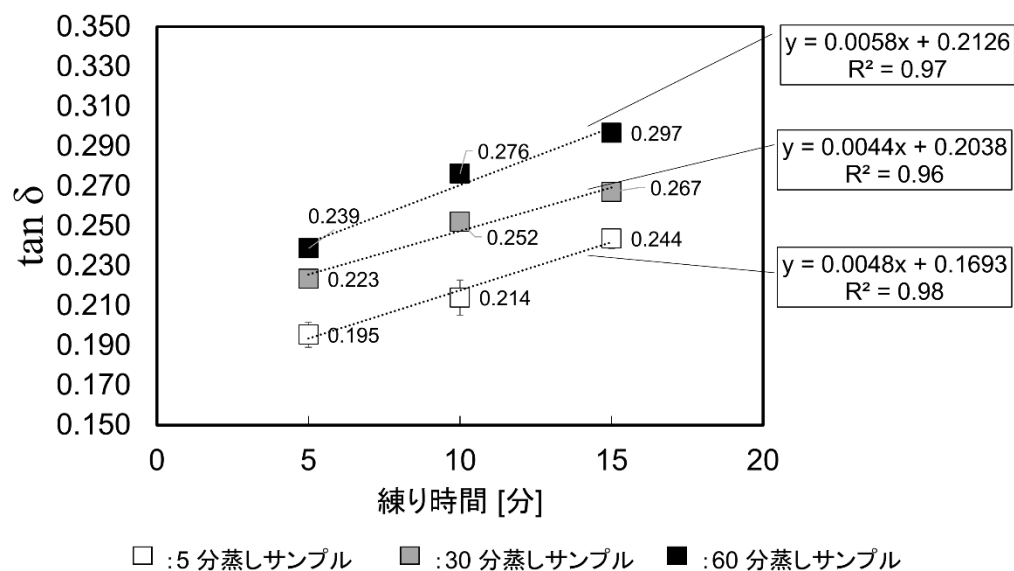


Fig. 2-6. 各蒸し条件の団子サンプルの練り時間に対する $\tan \delta$ の変化 ($n=3$). 5分蒸しは白、30分蒸しは灰色、60分蒸しを黒で示した。標準偏差をエラーバーで示した。

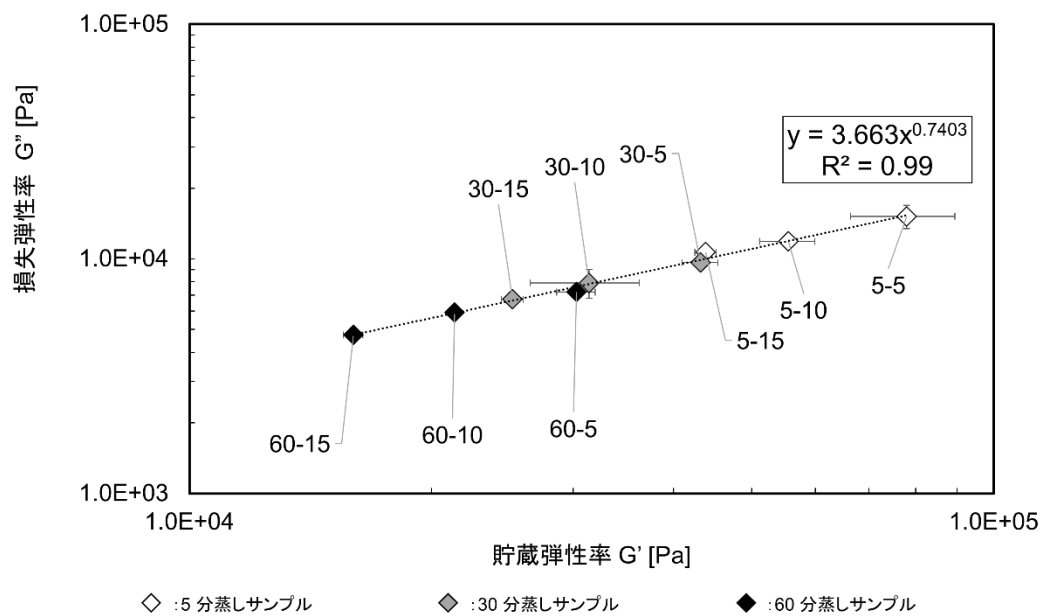


Fig. 2-7. 各蒸し及び各練り条件の団子サンプルの貯蔵弾性率[Pa](G')に対する損失弾性率[Pa](G'')($n=3$). 5分蒸しは白、30分蒸しは灰色、60分蒸しを黒で示した. 標準偏差をエラーバーで示した.

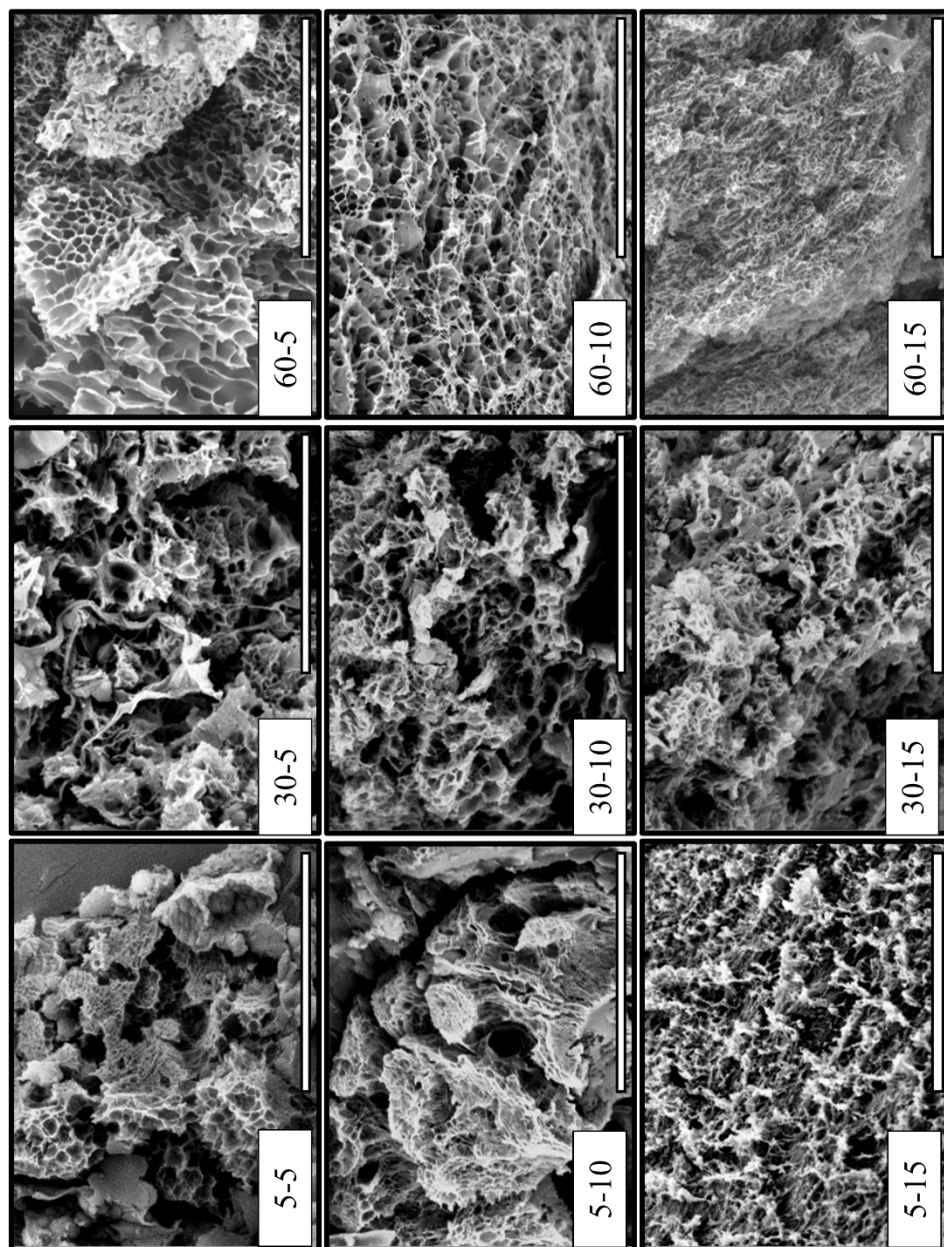


Fig. 2-8. 各条件の団子を急速凍結し凍結乾燥した物の走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 画像, 5000倍. Bars: 20 μ m

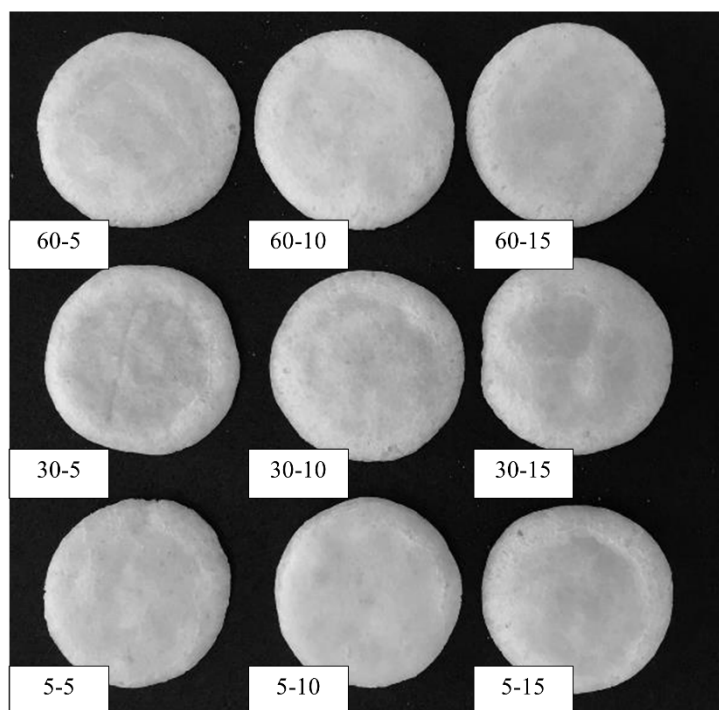


Fig. 2-9. 各蒸し及び練り条件の米菓(素焼き)の外観.
サンプル名: 蒸し時間 - 練り時間.

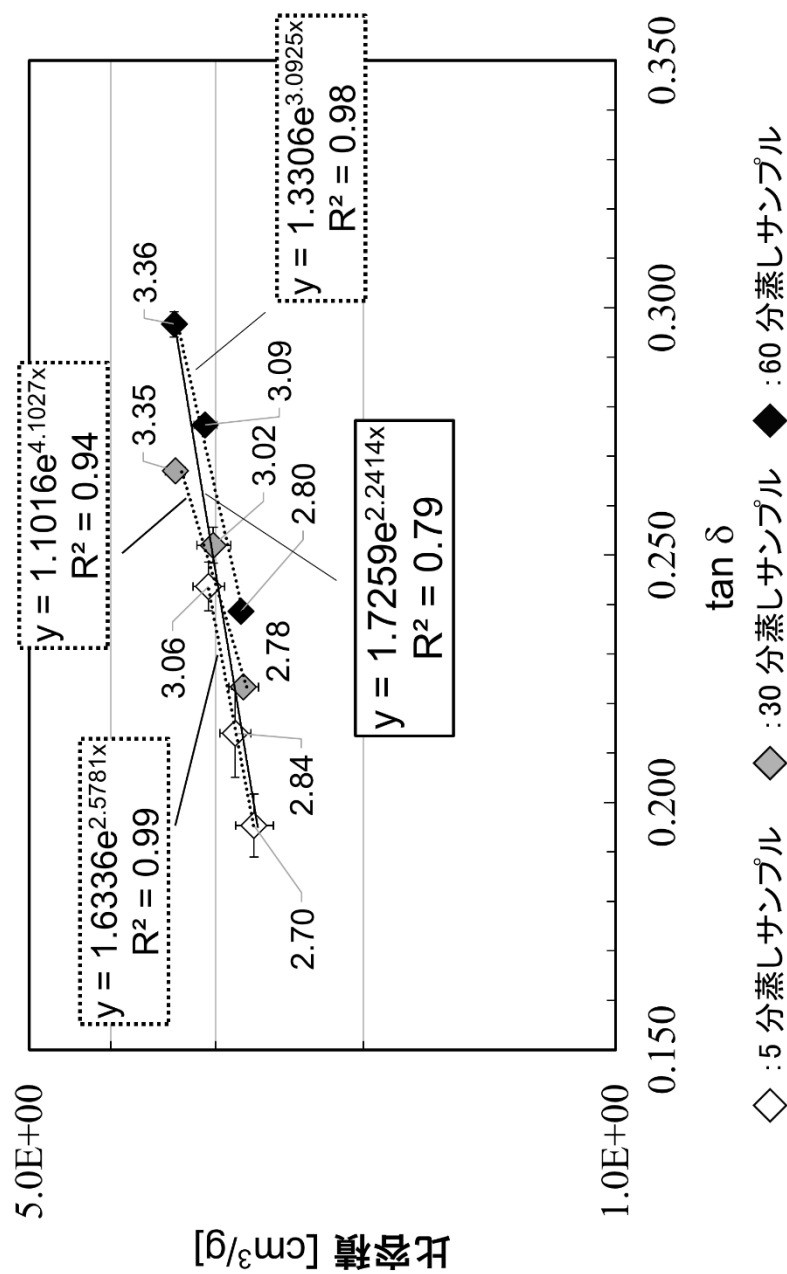


Fig. 2-10. 団子 $\tan \delta$ ($n=3$) に対する米菓比容積 ($n=5$). 5分蒸しは白、30分蒸しは灰色、60分蒸しを黒で示した. 標準偏差をエラーバーで示した.
破線: 各蒸し時間における近似.
実線: 全データにおける近似.

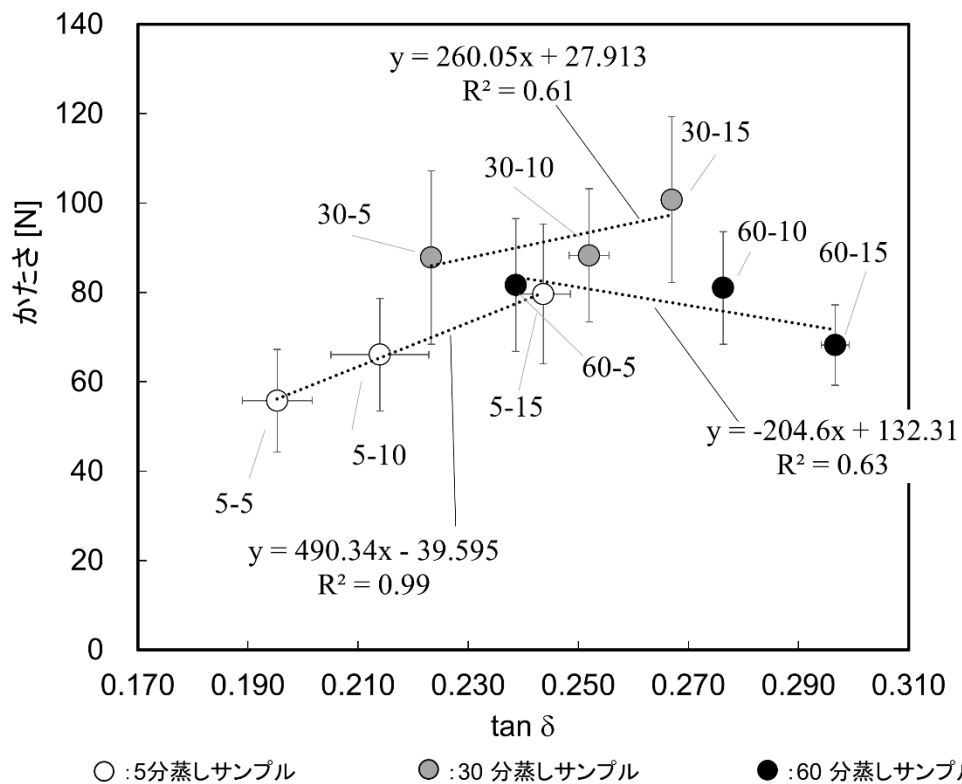


Fig. 2-11. 各条件の団子 $\tan \delta$ ($n=3$)に対する米菓かたさ($n=30$). 5分蒸しは白、30分蒸しは灰色、60分蒸しを黒で示した. 標準偏差をエラーバーで示した.

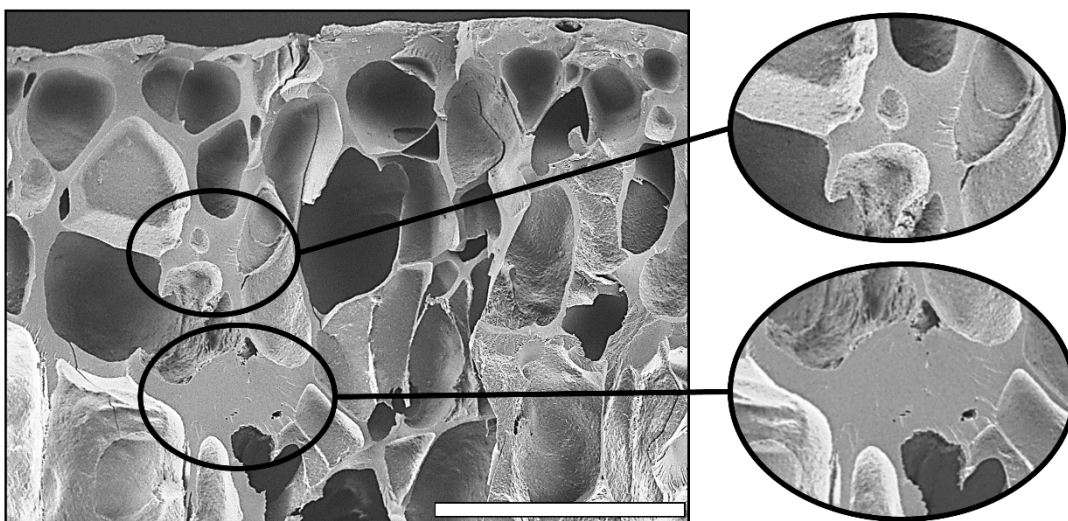


Fig. 2-12. 走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 画像観察した米菓断面構造中の不均質で不十分なネットワークの例. Bars: 1 mm

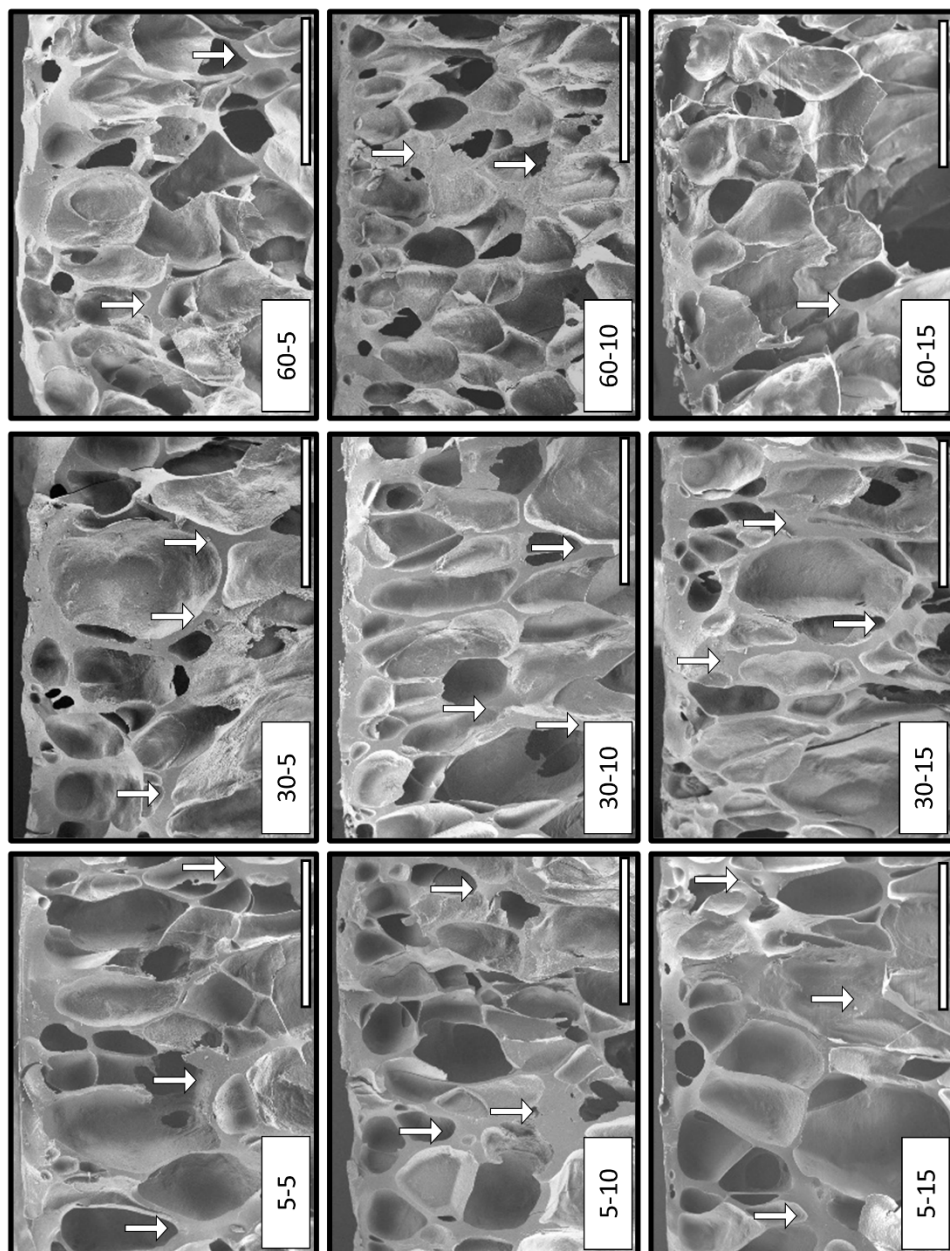


Fig. 2-13. 各米菓の断面の走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 画像.
不均質で不十分なネットワーク部分を白矢印で示した. Bars: 1 mm

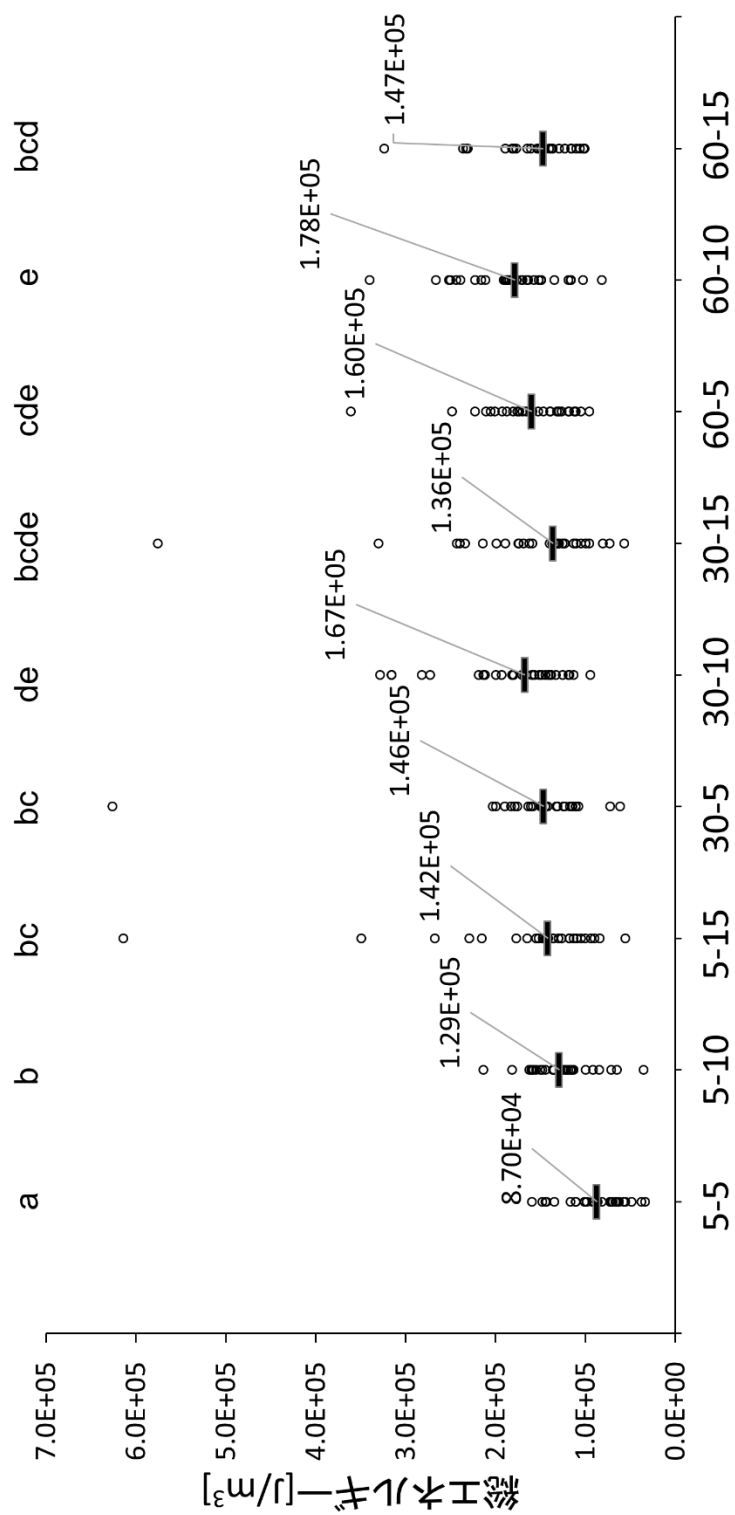


Fig. 2-14. かたさ測定試験における各米菓の総エネルギー(n=30)と中央値(—).
abcde:異文字間に有意差あり (p < 0.05).

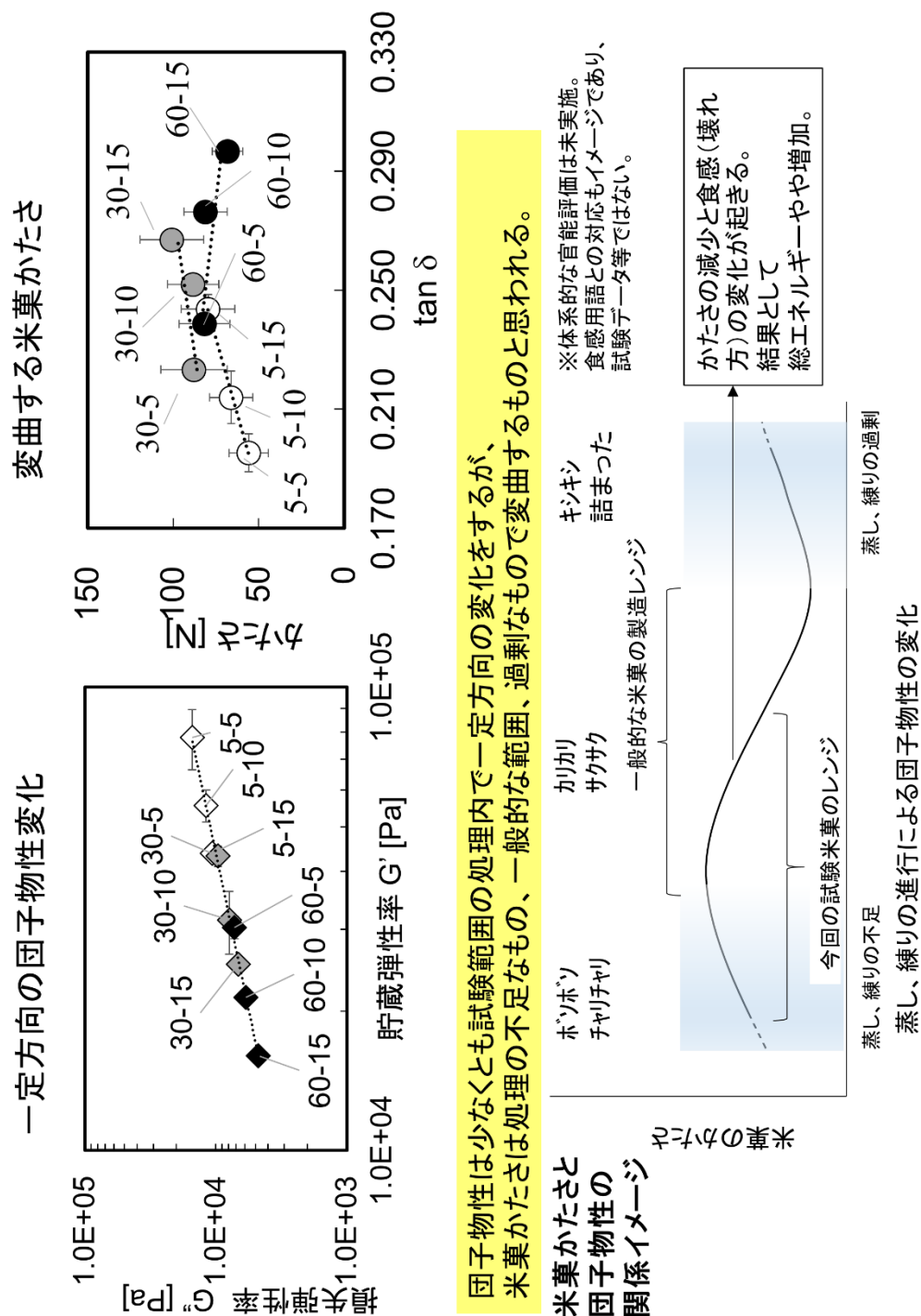


Fig. 2-15. 団子物性と米菓かたさについての考察の概要.