



過熱蒸気炊飯装置を用いて炊飯した米飯の物性と香气特性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-03-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 竹満, 初穂 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00005697

大阪府立大学大学院

総合リハビリテーション学研究科

博士論文

過熱蒸気炊飯装置を用いて炊飯した
米飯の物性と香り特性

Physicochemical and flavor analyses of cooked rice prepared with
a superheated steam rice cooking machine

2017年3月

竹満 初穂

目次

要約	1
諸言	3
第1章 過熱蒸気炊飯米の食味と物性	23
I. 序論	
II. 研究方法	
III. 結果および考察	
IV. 小括	
第2章 過熱蒸気炊飯米の香气特性と古米臭の低減	45
I. 序論	
II. 研究方法	
III. 結果および考察	
IV. 小括	
まとめ	65
文献	67
謝辞	75

要約

連続式の過熱蒸気炊飯装置を用いて調製した炊飯米（以下、蒸気炊飯米）は、時間が経ってもあまり硬くならない。このことは経験的に知られていたが、その理由は不明であった。そこで本研究では、蒸気炊飯米を物理化学的手法と官能評価により定量的に検討し、このような特徴が生じるメカニズムについて解明を試みた。また、蒸気炊飯米の香気特性についても詳細な検討を行った。その結果、蒸気炊飯米では液体の水を介さず、水蒸気により加熱が行われるため、胚乳細胞組織が比較的保たれたまま炊飯されていることが明らかとなった。そのため、老化の原因となるアミロースが胚乳細胞組織内部のデンプン粒から溶出しにくく、蒸気炊飯米は時間が経っても硬くなりにくい、すなわち老化しにくいと考えられる。同時に、内部からの溶出物が少ないため、表層にいわゆる「おねば」の層が形成されにくく、香気成分のリリースが少なくなり、古米臭を抑制できると考えられる。

キーワード：過熱蒸気炊飯装置，蒸気炊飯米，糊化と老化，香気成分，古米臭

Key words : Superheated steam rice cooking machine, Steamed rice, Gelatinization and retrogradation, Volatile odor compounds, Stale rice flavor

緒言

イネ科植物に属するイネは、コムギ、トウモロコシとともに世界の三大穀物のうちのひとつであり、特に、水が豊富な条件下での生育・収量が良く、モンスーン気候に適した作物である。東南アジアやアフリカ、南アメリカなどの水資源が豊富な地域では水稻が多く栽培され、畑では陸稲が栽培されている。日本は温帯モンスーン気候で水が豊富であるため、水稻は栽培に適した作物である。

世界的に多くの人達が食べているのはイネ科イネ (*Oryza*) 属のサティバ種で、サティバ種は、インディカ型 (長粒)、ジャワニカ型 (大粒)、ジャポニカ型 (短粒) という3つの亜種に分化している¹。イネから収穫されるコメは、コムギと異なり粒のまま食べることができるのが特徴であり、世界の約6割の人が主食としている。その調理法は世界の各地域や文化圏によって多様であるが、食物としての消化性を高めるため、水とともに加熱してコメを糊化させる点は共通している。日本の栽培稲はジャポニカ型であり、日本では一般に、コメを飯として炊き上げる、いわゆる「炊飯」操作により、「飯 (ごはん)」として食している^{1,2}。

1. コメの組織

コメは、イネ科植物の種子であり、主要穀物として改良が重ねられてきた。精白したコメ (水稻穀粒, うるち米) には日本食品標準成分表によると77.6%の炭水化物が含まれるが、その主体はデンプンである^{3,4}。残りは水分 (15%程度)、タンパク質 (6%程度)、脂質 (1%程度) となっている。

米粒は、ひとつの植物組織であり、デンプンは植物組織を構成する胚乳細胞 (endosperm cells) 内にデンプン粒として貯蔵されている^{2,5}。Fig. 1-Aは、玄米の組織概念図である。我々が通常、食べている白米は、脱穀したあとの玄米を搗精してぬか層 (pericarp, seed coat, aleurone layer), 胚芽 (germ) を取り除いた胚乳 (endosperm) 部である⁶。胚乳は、横断面でみると米粒中心部から同心円状に並んだ胚乳細胞で構成されている^{2,7}。胚乳細胞には

セルロース，ヘミセルロース，ペクチンから成る細胞壁があり，その厚さは約 $0.25 \mu\text{m}$ といわれている。細胞壁の内側には隣接してタンパク質が分布している。Fig. 1-B はコメ胚乳細胞の細胞壁を構成するグルクロノアラビノキシランを，特異的に認識する抗体で免疫染色し，蛍光顕微鏡を用いて検出した画像である⁸。グルクロノアラビノキシランが網の目状に検出されており，この画像から玄米を構成する細胞ひとつひとつの形状・大きさや，それらが外側の果皮，種皮から内部の胚乳部分にかけてどのように分布しているかが明確にわかる。すなわち外側の曲線状部分が果皮および種皮であり，その内側の網の目状の部分が胚乳細胞の細胞壁である。我々の食する胚乳には胚乳細胞が整然とすき間なく詰まっていることが確認できる。胚乳細胞の断面積は小さいもので $40 \times 50 \mu\text{m}^2$ ，大きいものだと $80 \times 105 \mu\text{m}^2$ 程度と報告されている^{2,9}。

種子（コメ）の登熟の過程で胚乳細胞の中にはアミロプラストと呼ばれる顆粒体が形成される¹⁰。このアミロプラストはデンプン分子の生合成の場であり，そのなかでデンプン粒が形成され，次第に大きくなる⁶。完熟した種子である玄米では，アミロプラストの内部はデンプン粒がすき間なく配置しており，デンプン粒の直径は $3\sim 9 \mu\text{m}$ 程度といわれている^{10,11}。コメに含まれるデンプン粒は氷を砕いたときにできるような角があり，一部のみに丸みがあるものが多い。このような角のあるデンプン粒が2個から数十個，すき間なく集まって，全体として球状の塊（集合体）となり，ロゼット構造をとっている。玄米の胚乳部分の断面を走査型電子顕微鏡で観察した写真が Fig. 1-C である（久保ら¹²より著者の許可を得て掲載）。矢印で示した部分において，アミロプラスト内部のデンプン粒のロゼット構造が確認できる。ロゼット構造を形成するひとつひとつのデンプン粒では，アミロペクチン・アミロースがひとかたまりになって粒を形成しているといわれている¹³。

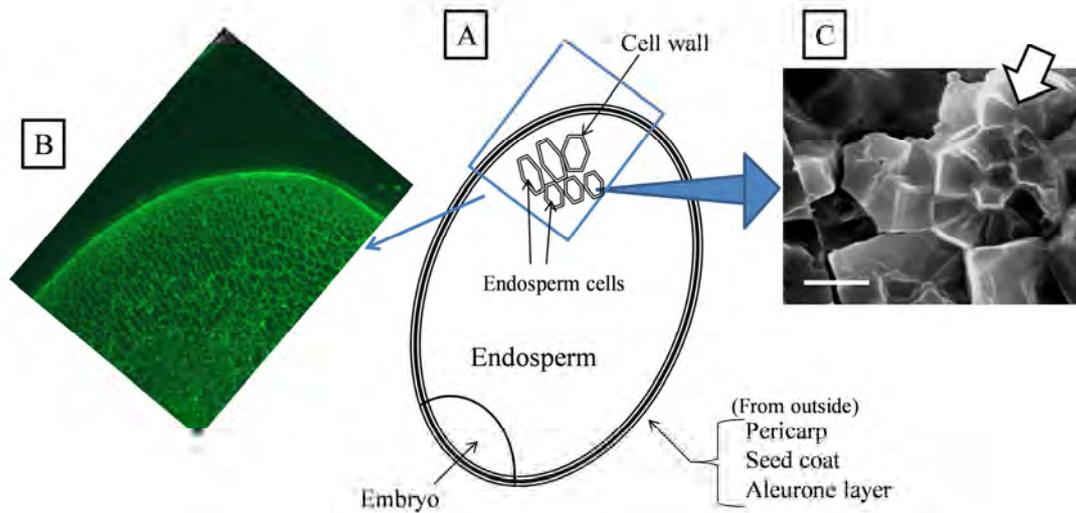


Fig. 1 Rice grain

A Schematic view (Champagne (2004)¹¹ with some modifications.)

B Immunofluorescence micrograph of rice grain with antibodies against glucuronoarabinoxylan in the cell wall ($\times 20$)

C Morphology of starch granules in the endosperm cell observed by scanning electron microscopy (The scale bar is 5 μm .)

2. デンプンと加熱糊化

コメの主成分であるデンプンは Fig. 2 の模式図に示すように、グルコースが α -1,4 結合によって直鎖状に連なったアミロース（ただし、天然のもののごくわずかに α -1,6 結合の分岐を含む）と、 α -1,4 結合による直鎖部分が途中から α -1,6 結合で分岐したクラスター構造をもつアミロペクチンの 2 種類から構成される。アミロースの重合度（DP）は数十～数千であるのに対し、アミロペクチンの重合度は数千から数百万とけた違いに大きく、幅があり、アミロースに比べ巨大な分子であることがわかる¹⁴。またアミロースとアミロペクチンはその特性が大きく異なる。たとえば、アミロースは非常に老化しやすく、硬いゲルを形成するが、アミロペクチンは老化しにくく柔らかいゲルを形成する¹³。

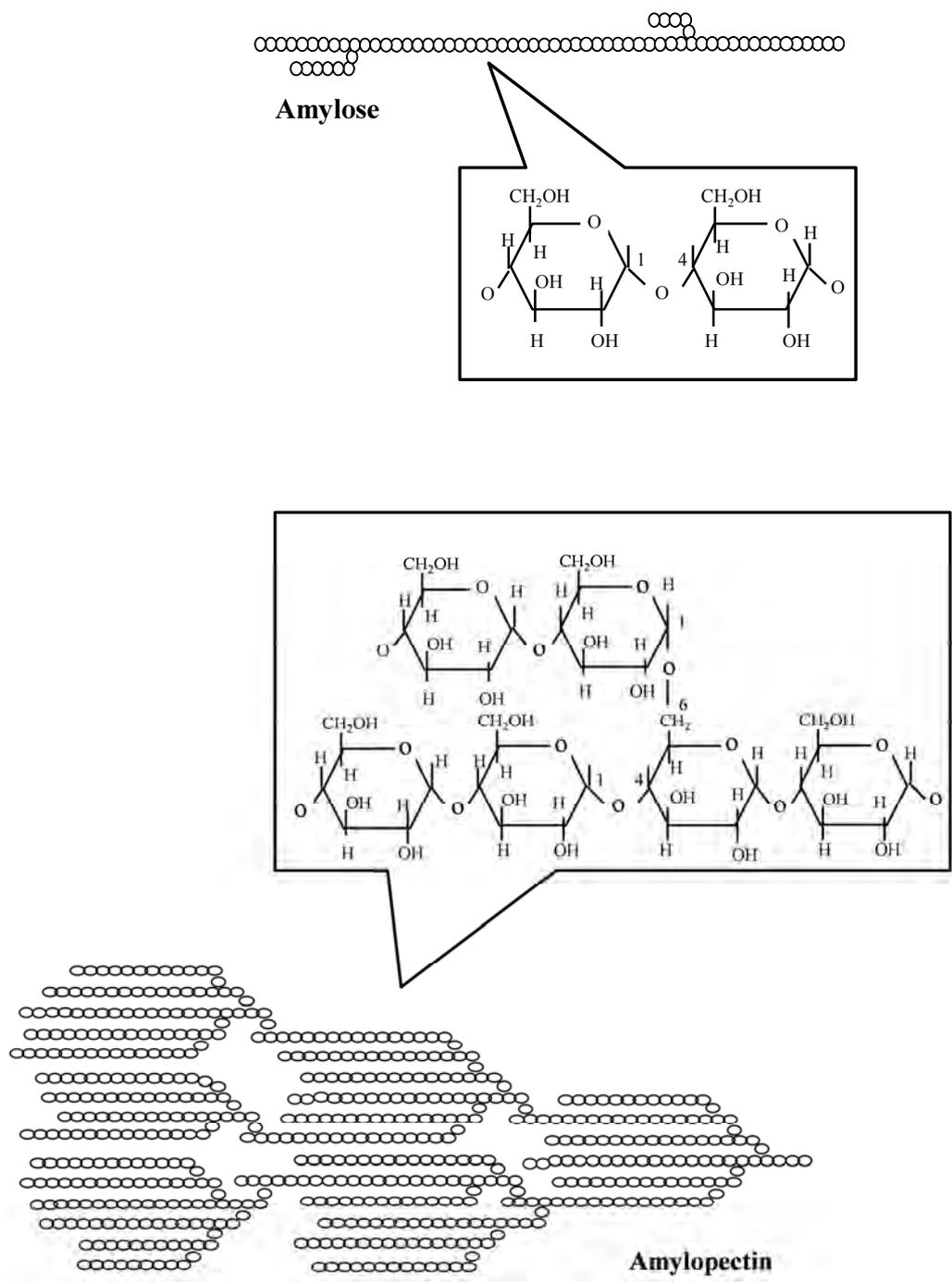


Fig. 2 Structure of amylose and amylopectin

デンプンは、一般に植物の主要な貯蔵エネルギーであり、植物体内では貯蔵物質として、不溶性のデンプン粒の形で主に種子や根茎に存在している¹⁵。デンプン粒は微結晶および非晶部分を含み、結晶化度は20~40%である¹⁴。微結晶はアミロペクチンの直鎖部分によって形成され、非晶部分はアミロースが埋めていると考えられている。デンプン粒は偏光顕微鏡で観察すると明瞭な偏光十字を示す。またデンプン粒には粗密構造の繰り返しによる層状構造が存在する¹³。これらの事実に基づきデンプン粒の粒構造について様々なモデルが提唱されているが、いまだ決定的なものはなく、またデンプンの種類によってもかなり異なるといわれている。

このような結晶性をもったデンプン（一般に「生デンプン」という）は、アミラーゼをはじめとする分解酵素の作用を受けにくいため、食した際に体内での消化性が悪い。そこで、生デンプンの結晶化したタイトな構造をゆるめ、効率のよい消化のため、水を加えて加熱する。生デンプンに水を加えて加熱するとデンプン粒は膨潤する。加熱によって水およびデンプン分子の振動運動が盛んになり、整然とつまったタイトなデンプンの結晶構造にすき間ができ、このすき間に水分子が侵入することで、すき間が少しずつ広げられていく。このように次第にデンプンのクラスター構造が外側から崩れていくことをデンプンの糊化（gelatinization）という⁵。デンプンを均一に糊化させるには、デンプン重量に対して30%程度の水が必要といわれている¹⁶。さらにデンプンの加熱を続けると、クラスター構造は完全に崩壊し、アミロースとアミロペクチンはそれぞれ単分子となり、多くの水（自由水）に囲まれた状態になる。このときにはデンプン粒構造を維持するのに関与するデンプン分子間の水素結合が破壊され、非可逆的な膨潤による粒構造の崩壊が起きている¹⁴。この状態のデンプンを「糊化デンプン」とよび、分子配列の規則性は失われている。糊化デンプンでは、クラスター構造がほどけているので、消化酵素の作用を受けやすく消化がよくなり、さらに食味もよくなる。

このように、糊化にともないデンプンの性質はさまざまな面で変化する。これまでに、糊化にともなう各性質の変化をとらえることで、各種デンプ

ンの糊化温度や糊化の程度が測定・評価されてきた。糊化温度は測定法によって値に違いがあるが、たとえば示差熱分析法で単離したデンプンを水に懸濁して測定した場合、一般的には 60°C 前後から糊化が開始し、80°C を超えて終了するとの報告がある⁵。その際、穀類デンプンはイモ類デンプンと比較して糊化温度が高い。なかでもコメデンプンは糊化開始温度が 70°C 程度であり、コムギ (56°C) やトウモロコシ (63°C) といった他の穀類と比べても高めである¹⁷。また温度だけでなく、デンプンを糊化するのに要する時間や膨潤度もデンプンの種類によって異なる。

3. コメの調理特性と炊飯操作

コメは含まれるデンプンの特性によって、うるち米ともち米に分かれる。もち米デンプンはアミロペクチンのみから構成され、うるち米デンプンはアミロースとアミロペクチンから構成されている²。

もち米は吸水率がうるち米に比べ 30~40%と高く、また粘りや焦げが生じやすいため、もち米の調理は蒸すことが多い^{5, 18}。タイ東北部やラオス山岳地帯などでもち米を常食とする地域があるが、これらの地域では蒸して食べている¹。日本でも、もち米とアズキをつかった赤飯やおこわとしてもち米を食べる際は蒸す調理が行われる。

一方、うるち米の場合、多くの品種があるが、アミロース含量や含まれるタンパク質の性質などにより、米飯の粘りや硬さが大きく異なる¹。そのため、うるち米の調理特性は一樣ではなく、それぞれの地域のコメの品種特性を生かし、人々の好みに合うように、世界各地で様々なコメの調理法やコメ料理が発展してきた。

日本をはじめ、中国東北部や台湾、韓国などで栽培されている短粒のジャポニカ種のうるち米は、デンプン中のアミロース含量が比較的 low、アミロペクチンのもつ適度な粘りと柔らかさを生かし、適量の水を加えて加熱して炊き上げる「炊き干し法」により食される^{1, 18}。日本では、消化がよく「おいしい」炊飯方法について、これまでにさまざまな研究が行われており、コメの吸水や加水量、火加減などについて論じられ、炊飯理論が

構築されてきたが¹⁹⁻²²，これらはいずれも，「炊き干し法」に基づくものである。一方，中国南部や東南アジアで広く栽培されているのはインディカ種であり，世界的にみるとインディカ種の方が生産量は多い。インディカ種は，デンプンのアミロース含量が高く，タンパク質の含量も高いので，粘りが少ない。またこれらの地域ではパラパラとした食感が好まれることもあり，大量の水とともにゆでて，途中で湯を捨てる「湯炊き法」が主流となっている¹。また特に西洋では，油脂を加えて炒めるピラフ式の調理法もある。このように，コメは粒食に限っても様々な調理方法があるが，日本での炊飯理論はもっぱら釜を用いて水とともに「炊く」方法に基づいたものであった。

日本でのコメの生産量のうち，約95%をしめるジャポニカ種のうるち米の「炊飯」方法について，竹生²は以下の通り述べている。炊飯とは，コメに水を加えて加熱することにより，消化のよい米飯に仕上げる調理操作である。炊飯の際の水と熱は，コメデンプンを糊化させるのに必要なものである。デンプンを糊化すること自体はそれほど難しいことではないが，炊飯の難しさは，「米粒組織内で他の成分と一緒に存在しているデンプンを完全に糊化し，炊き上がったとき余分な水分を残さず，適度なハリのある粒形を保つ」という点にある。「炊飯」では米粒のなかのデンプンを糊化させるため，単離したデンプンのみを加熱糊化させる調理（たとえば「くず練り」）や小麦粉のように粉に挽いた場合の調理とは取扱いが異なる。コメを炊く際には，デンプンの周りにある細胞壁，そこに分布しているタンパク質がデンプン粒の膨潤を制限し，米粒の膨張，崩壊の程度を決める大きな役割を果たす。デンプン粒だけを単独で膨潤・糊化させると体積は60倍になるが，米粒内ではきわめて小さく，2～3倍程度である。また組織を構成している米粒を中心まで糊化させるためには，100°C付近で一定時間保つ必要がある。

すなわち，ミクロな目で「コメ組織のなかのデンプンの糊化」をみると，単離したデンプンの糊化と同様ではなく，膨潤が制限されたなかで水分子がデンプンのクラスター構造の中に入り，ある程度ほどけている状態であ

ることが推察される。その度合いは酵素的に分解されるかどうかにより「糊化度」として測定されてきた²³。しかし、コメの胚乳細胞のなかでのデンプン粒の形態、および「糊化」の度合いといった詳細な状態については明らかにされていない。

また、あまり研究はされていないが、デンプン粒の周りに存在する細胞壁の性質も炊飯操作や米飯の食味に影響している⁷。通常の炊飯では、米飯粒の中心部よりも周辺部において細胞壁の崩壊が起こる。一般に硬く、粘りの少ない米飯では細胞壁の崩壊の程度が小さく、一方、柔らかく粘る米飯では細胞壁の崩壊程度が大きいといわれている²。

4. デンプンの老化

糊化したデンプンをそのまま放置すると、ばらけた分子の配列が再び規則的に配列し「老化 (retrogradation)」する。冷ご飯やパンが硬くなるのは、この現象によるものであり、口ざわりが悪くなると同時に消化も悪くなる。老化現象の進行は、水分含量、温度、同時に存在する物質によって異なる。温度は 0~4°C 付近で最も起こりやすいとされている¹⁶。水分は 30~60% の範囲が最大で、米飯 (60%強) やパン (35%程度) は老化の起こりやすい水分範囲であるので、冷蔵庫に保存することは老化を早めることとなる⁵。

北村によると²⁴、デンプンあるいはデンプン質食品の老化には、アミロースの会合挙動が大きく関わる。デンプンの 20%水懸濁液を加熱して調製した糊液を冷却するとゲル化する。このデンプンゲルは、糊化・膨潤したデンプン粒 (filler) が、デンプン粒から溶出した成分 (matrix, おもにアミロース) に補足された複合体 (filler in a matrix 構造) であるといわれている²⁵。これを低温で保存すると、ゲル強度が時間と共に増大する。すなわち、デンプン粒から溶出したアミロース分子の会合が起こり、ネットワークが形成されるのである²⁴。

デンプンが主成分であるコメの炊飯においても、このような現象が起こっていることが予想される (Fig. 3)。すなわち、生の状態でデンプン粒内にあるアミロースが、加熱により膨潤・糊化することでデンプン粒から一

部溶出する。溶出したアミロースは冷却時にネットワークを形成する。炊飯後、一定時間内ならばそれはほどよい噛み応えとなるが、長期間保存すると、より強固なネットワークとなり、米飯の食感の悪化、すなわち老化につながる。このアミロースのネットワークは再加熱しても糊化しにくいことが知られている¹⁶。

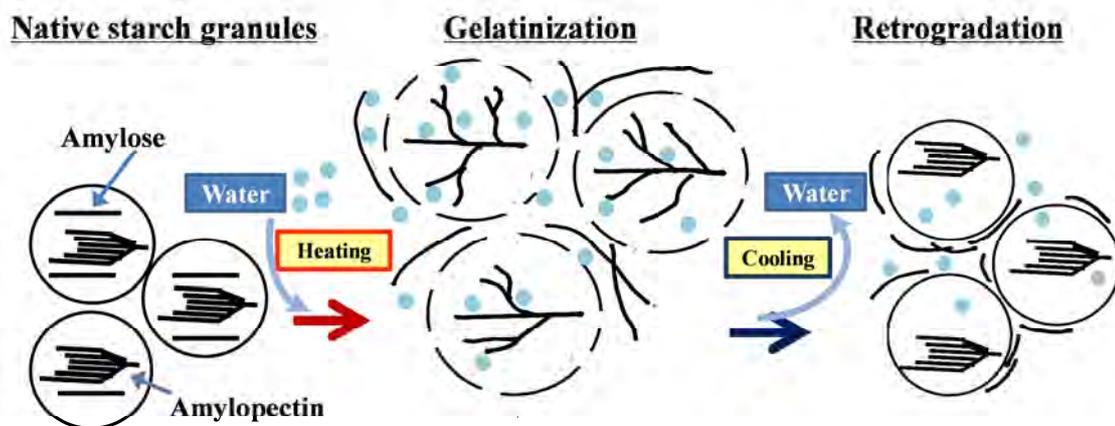


Fig. 3 Schematic representation of changes that occur in a starch-water mixture during heating, cooling and storage (Goesaert *et al.* (2005)²⁶ with some modifications.)

5. 米飯のおいしさ：物性、アミロース含量、おねば

米飯のおいしさは、視覚、嗅覚、味覚、触覚、聴覚の五感によって判断される。五感のなかで最も重要なのは触覚、すなわち口に入れて噛んだ時の食感であり、これは米飯の硬さ・粘りなどの物理的要素によって支配されている^{27,28}。日本において、米飯と食感に関する研究が多く行われていることから（たとえば²⁹⁻³²）、日本人の「食感（テクスチャー）」へのこだわりはとくに強いように思われる。コメのほかにムギ、イモといったデンプンを主成分とする主食は、甘味や酸味といった化学成分に起因する味よりも、物理的な性質（食感）によって判断される²⁷。その理由としては、加熱時のデンプンの糊化の状態とその老化現象が、物理的性質である食感に大きく影響するためであろうと考えられる。「おいしい」と判断されるものは十分に糊化しており消化性のよいもの、あるいは老化していないものであり、その判断を人は物理的性質により行っているものと考えられる²⁷。

デンプン中のアミロースは量的にアミロペクチンより少ないが、熱糊化性、老化性に対し支配的に働くことが明らかにされている²⁷。したがって、アミロース含量は食味を示す指標としてよく用いられている。日本におけるコメのアミロース含量は、良食味米品種の作付けが増えたことにより低アミロース化が進み、17~23%程度であり、食味のよいものは17~19%の範囲に入る²⁷。アミロースが多いと、その米飯は硬く、粘りが少なくなり¹⁶、逆にアミロース含量が少ないと柔らかくて粘りのある米飯となる²。アミロース含量が高いと、デンプン粒から溶出して硬いゲルをつくるアミロースも当然多くなるため、冷却・保存時に老化の原因となる。一方、アミロペクチンは複雑に枝分かれした多糖であり、老化しやすいアミロースとは異なり老化性が低い³³。

またデンプンはその粒内に内部脂質を約1%含んでおり、その脂質とアミロースの相互作用も糊化、老化に作用している³⁴。アミロースは6個のグルコースが一巻きになった形をしており、一部のアミロースはそのなかに脂肪酸を取り込んだアミロース脂質複合体となって存在している¹⁴。アミロース脂質複合体はアミロペクチンよりも熱に対して安定であり、炊飯

時に熱糊化しにくいことが認められている²⁷。

炊飯時の加水加熱により米粒から湯に溶け出したものは一般に「おねば」と呼ばれている。「おねば」は、途中で湯を捨てる湯炊き法であれば、湯とともに捨てられるが、日本で一般的に行われている炊き干し法では、湯を途中で捨てる工程がないため、「おねば」成分の一部は米飯粒に再吸収され、残りは炊飯過程で濃縮されて米飯粒の表層に付着して「おねばの層」となる。このおねばの層は、飯粒表面の粘りやつやなどに影響を与えていると考えられている³⁵。雑賀はこの層を「保水膜」と名付け、保水膜が厚いほどおいしい米飯となることを述べている³⁶。雑賀によると、「保水膜」とは飯粒の表面を覆っている粘液状の物質で、飯粒の主要部を構成している固形状かつ弾性的な飯粒本体とは異なり、透明に近い半濁色のねばねばした、ちょうど水飴状の粘性を有し、水分を多量に含み、かつ保水性に富んだ物質である。その成分はコメから溶出した水溶性の成分（主に遊離糖や遊離アミノ酸、水溶性デンプン）であるといわれている。遊離糖や遊離アミノ酸は呈味性を持つことから、日本の炊飯器メーカーは各社、おねばが多いことやおねば層の厚さを宣伝文句にしている（たとえば^{37,38}）。

炊飯中に溶出する「おねば」およびおねばの層に含まれるデンプンの構造や分子量分布については、炊飯過程でのコメからの溶出固形物や炊飯米からおねばの層を回収して、分析が行われている。貝沼³⁹や松永⁴⁰は、その中にはアミロースの割合が多いこと、溶出したアミロースは炊き上がりの段階で米飯に付着し、最終的な米飯の光沢、口ざわりなどのテクスチャーに影響を与えると報告している。一方、花城ら⁴¹や池田³⁵は、炊飯中の溶出固形物にはアミロース画分よりもアミロペクチン画分の割合が多いと報告している。

6. 食品の香りとは

「香り・におい」は食品の品質、特に化学的なおいしさの決定要因として非常に重要である。香りやにおいについての研究は近年「脳科学」との関連で盛んに進められている。これまでの通説として「ヒトは視覚に頼っ

た生き物である。一方ヒトの嗅覚は鈍くて役に立たない」といわれてきた。しかし近年の認知神経科学により、実はヒトの嗅覚は優れており、食物の「味」と呼んでいるものは、味覚による感覚だけでなく嗅覚による「におい」も含めた「風味」であり、におい感覚が非常に重要であることが改めて認識されるようになった³⁴。Gordon⁴²はそのような統合的な味わいの脳神経科学を「ニューロ・ガストロノミー」と名付け、研究を進めている。また Dunkel ら⁴³は、個々の「におい化合物」は単に物質でしかないが、それらが混ざり合い、ヒトにおいて特定のにおい受容タンパクに結合し、脳で感知されることで「そのモノ特有のにおい」となること、我々が感知する「におい」を理解したり再合成するにはその「におい記号」を分子レベル（“Sensomics”）で解明する必要があることを述べている。

7. コメの香気成分

米飯においては、物理的な味、すなわち食感が非常に大きな要素であるが、化学的な味としての「香り」も重要である。日本人が主食としているジャポニカ精白米の香りは非常に淡いため、普段はあまり意識されないが、新米の香りは好ましく、一方、長期間の保管や保管状況が悪い場合に古米臭が発生すると、米飯の品質は著しく低下する。一方で海外に目を向けると、芳ばしい香気のあるインディカ種の「香り米」が非常に好まれる地域があり、最も高価なコメとして流通している。

これまでのコメの香気成分に関する研究により、機器分析では 200 以上の揮発性物質が確認されており、また官能評価により、そのうち 100 程度が香気成分として同定されている⁴⁴。しかし、総合的な「ご飯の香り」に個々の香気成分がどのように関与しているか、いまだに明らかにされていない。その理由として、コメ中の香気成分は ppb のオーダーと非常に微量しか含まれていないこと、米飯の香りは、少数の特徴的な成分により生じるのではなく、複数の成分が複雑に関与していることがあげられる。また微量しか含まれない香気成分は揮発性であり、損失なく、コメ中の比率を保ったまま捕集するのは困難である。さらに、「香り」はコメそのものに

あるのではなく、ヒトが感知することにより、ヒトの脳内で「生まれる」ものである⁴²ため、ヒトによる評価が不可欠となる。また個々の香気成分により、ヒトが感知可能な閾値には大きな差があり、単純に含量が多い香気成分が香りにも影響するわけではないため、いまだ明確に「ご飯の香り」の正体はわかっていない。

コメの香気には、遺伝的要因、栽培方法とその後の処理、保管、また搗精具合や炊飯手順といった、イネの栽培から炊飯方法までのすべてが要因となり影響を及ぼすため、各段階、要因について様々な研究が行われてきた⁴⁴。特に、海外では人気があり、高値で流通している香り米に関する研究が多くみられ、品種や産地による香気成分の違いや品質について報告されている⁴⁵⁻⁴⁷。香り米の香気成分としては 2-acetyl-1-pyrroline が主要な化合物であることが明らかとなっている。また hexanal, (*E*)-2-nonenal や (*E,E*)-2,4-decadienal といったいくつかのアルデヒド化合物は、コメの香りに関与していると報告されている^{44, 48}。

日本ではこれまでに、コメの香気成分に関する研究として、コメの保管による古米臭の発生についての研究がみられる⁴⁹⁻⁵¹。また海外ではビールの副原料としてコメが用いられているが、その保管状態によっては不快臭が発生し、ビールの品質が低下する原因になる。その対策の指標とするためコメの保管による香気成分の変化に着目した研究がなされている⁵²。いずれの研究においても古米臭は、不飽和脂肪酸の酸化によって生成するカルボニル化合物（たとえば hexanal や octanal）、および 2-pentylfuran の増加が主要な原因であると考えられている⁴⁹⁻⁵²。小林ら⁵³は、風味の劣化を予防する保管方法について研究を行っている。また安信ら⁵⁴は、そういった古米臭を取り除くような電気炊飯器の開発を実施している。しかし、コメの保管技術が向上したことやそもそもコメの供給・流通量が充分であり長期間保管する必要がなくなったことから「古米臭」が問題になるケースが減ってきているため、コメの香気や古米臭に焦点を絞った研究は日本では近年ほとんどみられない。また、炊飯方法の違いにより米飯の香気成分がどのように変化するかに着目した研究もほとんど行われていない。

8. コメの大量炊飯

コメの大量炊飯へのニーズは高く、学校や病院における給食に加え、外食・中食産業における利用拡大もあり、安全で安定供給が可能な大量炊飯技術が求められている。

業務用炊飯では、これまで主に大型の釜を用いた炊飯方法が用いられてきた。大型の釜を用いる場合、釜の下部と上部で熱のかかり具合が異なり釜の場所によって炊飯にムラが生じる問題点があった。そのため、炊飯工場によっては炊飯後に炊きムラを均一にほぐすためのほぐし機、もしくは専門の人員を配置するなど、「ほぐす」工程が必要となっている。さらに、熱が直接あたる炊飯釜下部の米飯がメイラード反応により着色してしまったり、ひどければ焦げが生じてしまい、その釜の米飯すべてを廃棄しなければならないという問題点もあった。

1970年頃には、大型の炊飯釜をコンベアに載せ、ドーム型の庫内で下からガス火で加熱し連続的に製造する方法が開発され^{55,56}、日本の大量炊飯の主流となった。しかし釜を用いるという原理は変わらないため、炊飯ムラが生じる問題は依然としてあった。さらにこの炊飯方法は微妙な火加減が難しく、特にガスを熱源として用いる場合は技術者による調節が必要となる。また少しのタイミングや時間のずれにより、ひと釜ごとに炊きムラが生じてしまう問題点もあった。しかし、装置が大がかりであることから、大量炊飯時の米飯の品質やよりよい大量炊飯方法についての学術的な研究は、ガス釜を用いたもの⁵⁷以外ほとんどみられない。

米飯のおいしさには、前述した通り食感や香りが重要なファクターとなっているが、業務用炊飯であっても、当然「おいしさ」が求められる。業務用の大量炊飯では、たとえばコンビニエンスストア向けならば炊飯後に成型されて商品となり配送・店舗に陳列後に消費されるため、炊飯から実際に食されるまでに保存時間が生じる。その間に起こる米飯が硬くパサパサとした食感になる、いわゆる「老化」を抑制し、いかに炊飯してから消

費されるまで「おいしさを保てるか」は炊飯業界における大きな課題である。

9. 過熱蒸気炊飯装置

過熱水蒸気は 100°C で蒸発した飽和水蒸気を、さらに高温に加熱した完全に気体状態の水である。過熱水蒸気はその特性を生かして食品の加工・調理やバイオマス資源の処理などに利用されており、さらなる活用が期待されている。また過熱水蒸気を用いた家庭用オーブンが開発されたことにより⁵⁸、一般的にも身近な技術となった。

宮武⁵⁹によると、過熱水蒸気を用いた加熱では、被加熱物に対して凝縮熱および顕熱を与えることが可能であり、加熱と乾燥ができる。飽和水蒸気（通常の水蒸気）との違いは 100°C 以上の顕熱による加熱を行える点にある。水蒸気では被加熱物との接触により、水蒸気が凝縮し表面に水が付着する凝縮伝熱により加熱される。その総量は、被加熱物の表面温度が 100°C 以下の場合、顕熱 (1 kcal/kg/°C) +凝縮熱 (539.1 kcal/kg) となる。通常の水蒸気は 100°C であるため、被加熱物は 100°C 以上にはならない。そのため被加熱物は常に凝縮した水分子が表面にある状態で温度が上昇する。これが一般的な「蒸し」調理であり、湿熱状態での加熱と表現される。一方、過熱水蒸気加熱では、その初期段階において過熱水蒸気の凝縮により急激に表面温度が上昇し、100°C に表面温度が達すると、次に顕熱 (0.48 kcal/kg/°C) による加熱が行われる。このような過熱水蒸気による加熱初期の急激な温度上昇は 100°C になるまで持続される。100°C になると過熱水蒸気の顕熱でさらに加熱しながら、被加熱物の表面の水分を蒸発・乾燥させることができる。

本研究では、新たに設計された大量炊飯が可能な連続式の過熱蒸気炊飯装置 (Fig. 4, エースシステム) を用い、その炊飯米 (以下、蒸気炊飯米) の食味特性を明らかにした。本連続式の過熱蒸気炊飯装置は、エースシステムにて独自に開発されたものであり、釜を用いない点が最大の特徴であ

る⁶⁰。Fig. 4 に示した装置は実験用に小型化したパイロットプラントであるため一段式であるが、実用機としては省スペース化が可能な三段式が主流となっている。コメは投入口から出口までコンベア上を流れる。コンベアはネット状になっているため、コンベア下部から供給される蒸気がコメを直接加熱する構造になっている。さらに炊飯工程で炊飯、すなわちデンプンの糊化に必要な水は適宜上からシャワーリングされる。この蒸気の熱と加水により約 20 分で炊きあがる。コンベア式であるため、釜式で生じる炊きムラの問題がなく、また蒸気が熱源であるため焦げの心配もない。炊飯に用いる蒸気は、前半は 100°C の飽和水蒸気、後半は 125°C の過熱水蒸気である。開放系であるため過熱水蒸気は庫内で瞬時に 100°C 以下になるが、気体の蒸気で満たされた空間にコメが導入されるので、この過熱水蒸気の大きな凝縮熱がコメに伝わる。一定間隔で適度な加水を行うことで、顕熱によるコメの乾燥が起こらないように調整しており、コメの中心まで均一に糊化し、かつ表面に余計なべたつきのない米飯を実現している。

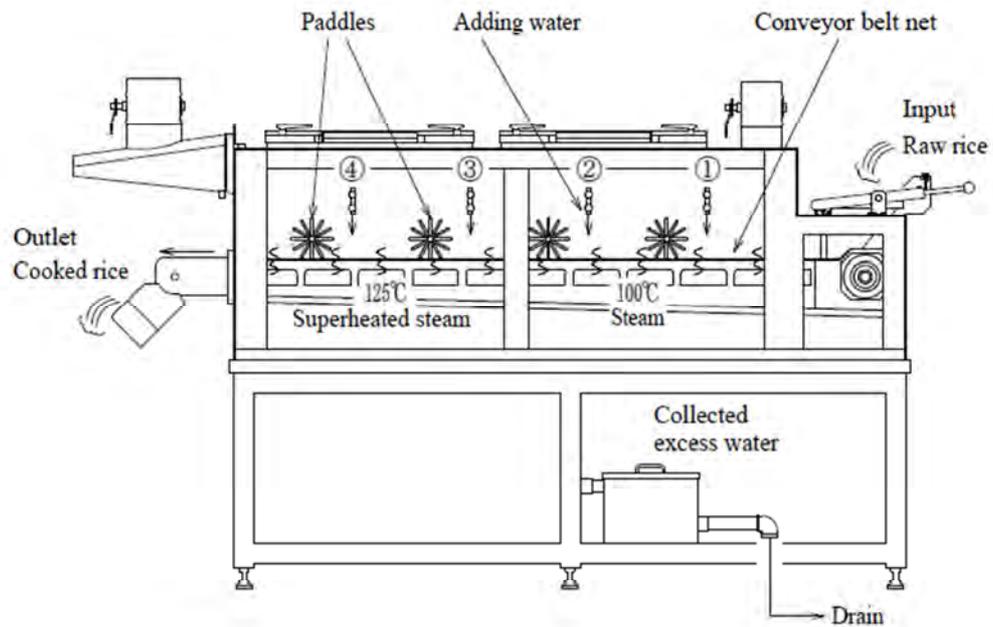


Fig. 4 Schematic views of the superheated steam rice cooking machine

The size of the whole machine: W 2500 × H 1650 × D 1100 (mm)

The size of steaming chamber: W 2100 × H 415 × D 544 (mm)

これまでも、似た形式の蒸気炊飯装置はあるものの、工程の途中で浸漬槽にコメを通すことで加水する浸漬槽式¹など、加水の方法に違いがあった。浸漬槽式では、一定時間ごとに浸漬槽の水の入れ替え・洗浄が必要であり、またその浸漬槽にコメからの流出物が溜まり、安定した炊飯ができないう問題点があった。

エースシステムの過熱蒸気炊飯装置は20年ほど前から開発が始まり、少しずつ改良が加えられてきた。その米飯の特徴として、ムラがないという利点に加え、時間が経ってもおいしさが保たれるということが経験的にわかっていたが、科学的な説明は行われていなかった。

そこで本研究では、コンベア式で、液体の水を介さず直接過熱水蒸気でコメを加熱するという画期的な「炊飯」方法である過熱蒸気炊飯装置を用いて炊飯した炊飯米を、科学的に評価し、その特徴を明らかにした。第1章では米飯の老化に伴う食味の変化に着目し、蒸気炊飯装置を用いた米飯の保存特性を明らかにし、老化の抑制が可能となるメカニズムを説明することを目的とした。さらに第2章では、蒸気炊飯米の香気特性に着目し、詳細を明らかにした。

第 1 章

過熱蒸気炊飯米の食味と物性

I. 序論

過熱蒸気炊飯装置を用いて炊飯した炊飯米（以下、蒸気炊飯米）は、白く、時間が経っても硬くなりやすく、保存性がよいことが経験的にわかっていた。しかし、科学的な解明は行われていなかった。そこで第 1 章では蒸気炊飯米の特徴を物理化学的手法と官能評価を用いて定量的に評価した。さらに、保存性がよく安定した米飯が提供できるような蒸気炊飯工程を確立するため、炊飯過程でのコメからの流出成分を分析することにより、蒸気炊飯米はなぜ老化しにくいのか、そのメカニズムの解明を試みた。

II. 研究方法

1. 連続式過熱蒸気炊飯装置による炊飯方法および試料の調製

炊飯にはパイロットスケールでの連続蒸気炊飯が可能となるよう開発した炊飯装置 (Fig. 4) を用いた。過熱蒸気炊飯装置全体の大きさは、W 2500 × H 1650 × D 1100 (mm) であり、そのうち蒸気が充満し、コメを炊き上げる炊飯庫内は W 2100 × H 415 × D 544 (mm)、容積は約 0.47 m³ である。炊飯操作としてまず、試料白米を計量後 (最低量 2.5 kg)、1.5 倍の水道水に 1 時間浸漬した。浸漬後、ざるにあげて 5 分静置して水を切り、過熱蒸気炊飯装置に投入した。投入したコメはネット状になったコンベアによって庫内に入り、Fig. 4 では右から左に流れることになる。炊飯時間はコンベアのスピードによって制御した。炊飯時間を 17 分から 25 分の間で検討した結果、22～23 分が最適であることが判明した。そこで以後の炊飯実験では 22 分とした。蒸気は、前半は 100°C の飽和水蒸気、後半は 125°C の過熱水蒸気を装置下部から庫内に供給した。また炊飯工程では 4 カ所の地点で加水を行った。加水温度は 85°C に設定し、加水量は予備実験より 1.05 L/min とし炊き上げた (以下、蒸気炊飯米)。庫内温度は炊飯中 99～100°C に保たれていた。

比較の炊飯には、家庭用 IH 炊飯器 (パナソニック、SR-SU105) を用いた。試料白米を水道水に 1 時間浸漬し、浸漬水とともに標準的な炊飯モードで炊飯した (炊飯所要時間約 43 分)。また加水比は、炊飯試験では米重量の 1.5 倍で実施されることが多いが、ここでは米飯の水分含量が、大量炊飯で一般的に用いられる 62～63% となるよう加水比は 1.6 倍とした (以下、通常炊飯米)。

それぞれの方法で炊飯した米飯はプラスチック製密閉容器に入れ、水滴が落ちないようにキッチンペーパーをはさんで軽くふたをして室温で 30 分放置してから、試料とした。また経時変化をみるために、炊飯米 100 g ずつをラップに包み、冷蔵 (5 ± 2°C) 保存した。

なお、実験には平成 22 年滋賀県産コシヒカリ (無洗米、歩留 90% に搗

精)を用いた。試料白米は、水分 14.6%、タンパク質 6.5%であった。またデンプン中のアミロース含量は 18%であった(近赤外分光法, ケット科学研究所, KettAN800)。

2. 水分含量の測定

各試料の水分含量は、105°C で 24 時間乾燥させ、その重量減少から算出し、5 回の平均値を求めた。

3. 表面色の測定

各試料 100 g をラップで包み、できるだけ米粒同士の隙間がなくなるように成形し、ラップの上から分光測色計(コニカミノルタ, CM-700d)により測定を行った。測定は、正反射光を除去する SCE 方式を用い、測定径 8 mm で行った。結果は黄色みを示す b 値、および白色度(WI, ASTM E 3113-73, 計算式 $WI=4(0.847Z-3Y)$)で比較した。測定は各条件 3 個ずつ試料をつくり、それぞれ 10 回ずつ測定し、平均値で示した。

4. 糊化度

糊化度の測定は β アミラーゼ - プルラナーゼ法²³に従い、以下の通り行った。酵素は、ダイズ β アミラーゼ(長瀬産業, 粗酵素標品 5 IU/mg)およびプルラナーゼ(林原, crude 2 IU/mg)を用いた。試料飯約 0.3 g(飯粒を崩さないよう全粒のまま, 7~8 粒程度)を量りとり、蒸留水 8 mL を加えてガラスホモジナイザーにより 10 回程度分散を行った。分散液 2 mL を 0.8 mol/L の酢酸バッファー(pH 6.0)で 25 mL にメスアップした。そのうち 4 mL に酵素液(β アミラーゼ 0.8 IU, プルラナーゼ 3.4 IU) 1 mL を加えて 40°C で 30 分間反応させた。冷蔵 0 日(炊飯直後)の試料溶液(分散液)は、10 mol/L の NaOH 0.2 mL を加えて 50°C で 5 分間アルカリ糊化させてから 2 mol/L の酢酸で pH を 6.0 に調整し、上記と同様に酵素反応を行った。

糊化度は以下の式より算出した。なお、冷蔵 0 日(炊飯直後)の試料をアルカリ糊化した場合の分解率を糊化度 100%とした。また還元糖量はソ

モギ・ネルソン法^{61, 62}，全糖量はフェノール硫酸法⁶³により求めた。

分解率 (%) = 酵素反応で生成した還元糖量/全糖量 (いずれも maltose 当量) × 100

糊化度 (%) = 試料の分解率/完全糊化試料の分解率 × 100

試料の水分含量を別に測定し，糊化度は水分含量を補正して求めた。測定は3回行った。

5. 物性

物性の測定には硬さ粘り計 (サタケ, RHS1A, ロードセル A&D 社, LC-205-K020) を用いた。操作手順に従い，試料飯を専用金属製シャーレ (直径 32 mm) に 8 g 量りとり，181 N で裏表 10 秒ずつプレスを行い飯をディスク状の塊にした。塊になった飯を測定台に置き，プランジャー円柱 (直径 24 mm) を用い，スピード 13.3 mm/sec, 圧縮率 30% でテクスチャー測定を行った。飯の圧縮時にプランジャーにかかる荷重のピーク値を硬さ，圧縮から戻るときにプランジャーが引っ張られる力のピーク値を粘りとした。測定は各試料 6~7 回ずつ行った。

6. 飯粒断面の顕微鏡観察

試料炊飯米は 3% (w/v) カルボキシメチルセルロースに浸漬後に凍結包埋し，飯粒の長軸に平行に 10 μm の切片を作成した。切片にヨウ素溶液 (0.1%ヨウ素，1%ヨウ化カリウム) を，染色直前に蒸留水で 8 倍に希釈) を滴下し，3 分放置後に封入し観察した。観察にはキーエンス，BZ-9000 を用い，明視野，カラーモードで行った。

7. 流出成分の分析

流出液の回収は，コメ 1 kg を仕込み，コンベア上に全量のコメが仕込ま

れたタイミング（炊飯開始 4 分後）から、毎分ごとに行った。回収した流出液の全糖量，還元糖量を測定した。

また炊飯開始から 8 分後，12 分後，16 分後，20 分後の流出液は，濃縮後に凍結乾燥を行い，固形物重量を測定した。さらに，流出液中の固形物についてゲル濾過クロマト分析を行い，流出液中の糖の鎖長分布を確認した。カラムは Sepharose CL-2B (Pharmacia, $\Phi 1 \times 40$ cm) を用い，溶離液 0.05 mol/L 水酸化ナトリウム，流速 15 mL/hr，サンプル溶液は流出液中の固形物 10 mg/2 mL 0.5 mol/L 水酸化ナトリウムとし，検出方法はフェノール硫酸法⁶³ を用いた。また各画分 150 μ L を 0.05 mol/L 塩酸で中和後にヨウ素溶液（0.1%ヨウ素，1%ヨウ化カリウム）20 μ L を加えて発色させ，分光光度計（島津製作所，UV-1600）を用いて吸収スペクトルを測定し，最大吸収波長を求めた。またアミロースの標準品として，コメ（日本晴）を粉砕し，塩酸に浸漬，沈殿させてデンプンを得，その精製デンプンを 3 mol/L 水酸化ナトリウムでアルカリ糊化させた後，飽和ブタノールで沈殿させたものを用いた。

吸水されずに残った浸漬水の重量，全糖量，還元糖量も同様に測定した。

8. 官能評価

炊飯方法の違う飯がどのように評価されるかを比較するために，炊飯直後および保存（5°C 1 日）後に官能評価を行った。

炊飯直後の試料は蒸らし後に小分けし，常温（約 25°C）に冷まして実施した。また保存後の試料はそれぞれの試料をプラスチック製密閉容器に入れて蒸らした後に，冷蔵保存した。官能評価の 2 時間前に取り出し，常温に戻して保存後の試料とした。炊飯直後同士，もしくは保存後同士の 2 点比較で行った。パネルは大阪府立大学生命環境科学部学生および職員 16～20 人（20 代～60 代，直後：男性 9 人，女性 11 人，保存後：男性 8 人，女性 8 人）であった。2 点比較法を用いて外観，香り（識別および嗜好），老化感⁶⁴（識別）を確認し，有意差の検定は 2 点比較の検定表⁶⁵ より実施した。また保存（5°C 1 日）後に食感，味，総合評価の比較を行った。評価

は評点法で行い，有意差の検定は Mann-Whitney's *U*-test を用いた。

Ⅲ. 結果および考察

1. 水分含量

今回試料とした飯の水分含量は、蒸気炊飯米 $63.4 \pm 1.7\%$ 、通常炊飯米 $62.2 \pm 2.0\%$ であった。

2. 表面色の測定

黄色みを表す b 値は、蒸気炊飯米で 2.4 ± 0.6 、通常炊飯米で 2.8 ± 0.6 であった。また白色度 WI は、蒸気炊飯米で 41.2 ± 3.2 、通常炊飯米で 39.5 ± 3.3 であった。蒸気炊飯米は b 値が有意に低く ($p < 0.05$)、官能評価の「白さ」と相関があることが示されている白色度⁶⁶は有意に高かった ($p < 0.05$)。

今回、測定には通常炊飯では中心部分から試料をとり、測定を行った。しかし、通常炊飯米では釜に沿った部分が褐変し、黄色くなりやすく、その箇所は b 値は 5.0 と大きかった。このように通常炊飯では炊きあがりの色にムラが生じるが、蒸気炊飯では釜を使用しないため、色ムラが起こらないことを確認した。

3. 物性の経時的変化

各試料の硬さ、粘りの経時変化を Fig. 1-1 に示す。炊飯当日の硬さは蒸気炊飯米 38.2 N、通常炊飯米 35.0 N とほぼ同値であり、同じくらいの硬さに炊けていることが確認された。これらの飯を冷蔵保存した場合、通常炊飯米では1日後に 70.3 N、2日後に 88.6 N、3日後に 107.4 N と急激に硬さが上昇した。蒸気炊飯米の硬さは1日後に 51.6 N、2日後に 67.0 N、3日後に 73.8 N と上昇したが、通常炊飯米に比べるとゆるやかであった。また粘りは、炊飯直後は通常炊飯米の方が蒸気炊飯米よりも大きかった。冷蔵保存により通常炊飯米では急激に粘りの低下がみられた。そのため、1日後には蒸気炊飯米と通常炊飯米の粘りはほぼ同値となった。さらに2日後には蒸気炊飯米の方が通常炊飯米よりも粘りが大きかった。

物性の測定結果から、蒸気炊飯米では冷蔵保存による老化に伴う硬さの

上昇および粘りの減少が，通常炊飯米よりもゆるやかであることが明らかとなった。

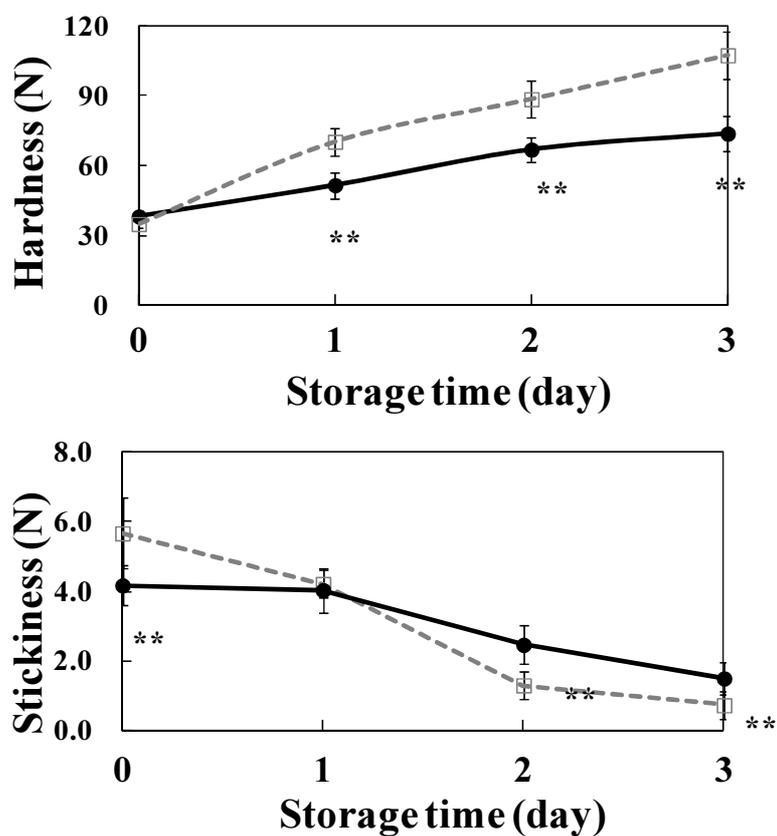


Fig. 1-1 Time courses of hardness and stickiness of cooked rice

Cooked rice in each way was stored at 5°C. The samples were taken out of the refrigerator and left at room temperature 1 hour before measurement.

□, Ordinary cooked rice; ●, Steamed rice.

Each value is the mean ± SD. ($n = 6\sim 7$)

** $p < 0.01$ vs. ordinary cooking at the same storage time (Welch's t -test).

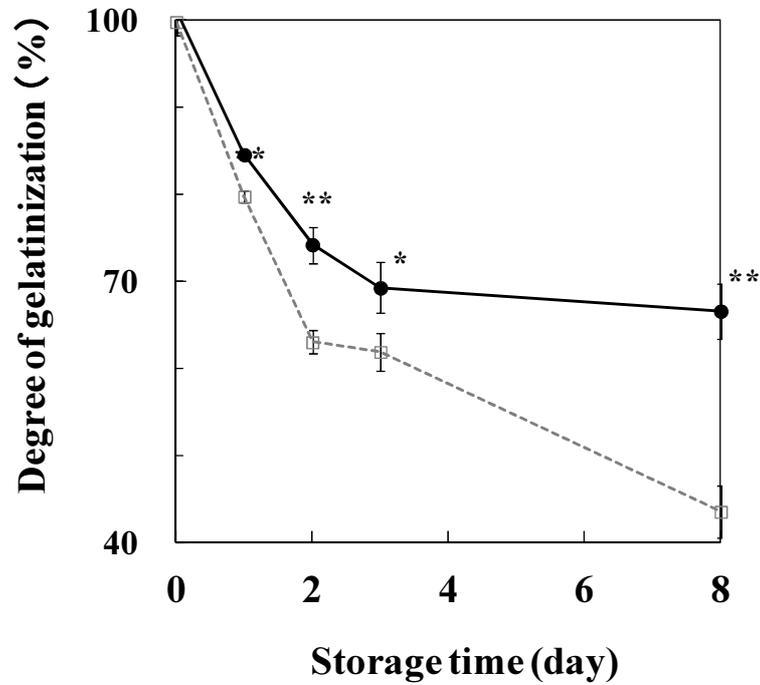


Fig. 1-2 Changes in the degree of gelatinization of cooked rice

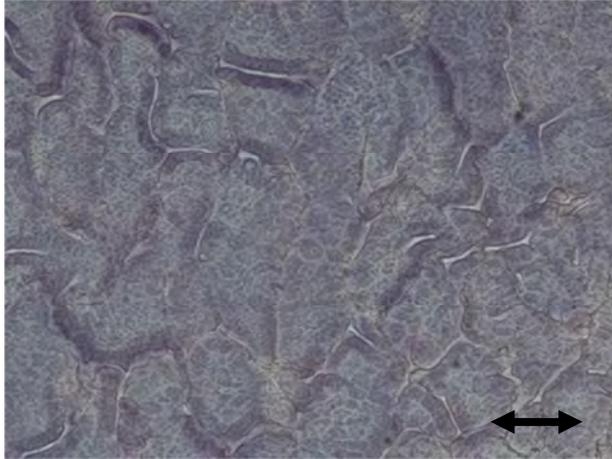
Cooked rice in each way was stored at 5°C and measured the degree of gelatinization by BAP method.

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ vs. ordinary cooking at the same storage time (Welch's t -test).

□, Ordinary cooked rice; ●, Steamed rice.

Each value is the mean \pm SD. ($n = 3$)

A



B

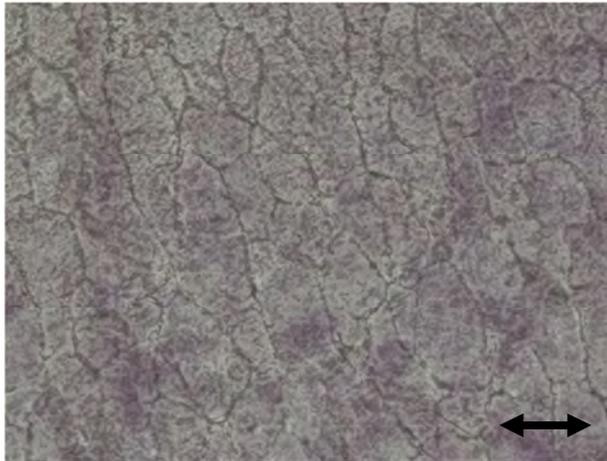


Fig. 1-3 Micrographs of lengthwise cross sections of the cooked rice grains

A, Ordinary cooked rice; B, Steamed rice, after iodide staining ($\times 200$)

The scale bars are 100 μm .

4. 糊化度の経時変化

各試料の糊化度の経時変化を Fig. 1-2 に示す。炊飯直後（冷蔵 0 日）には、いずれの試料もほぼ 100%糊化していた。冷蔵保存により、1 日後に蒸気炊飯米 84.5%、通常炊飯 79.7%と糊化度に差がみられた。さらに 2 日後には蒸気炊飯米で 74.2%、通常炊飯米では 63.0%と差が大きくなり、3 日後、8 日後も同様の傾向であった。これらの結果より、炊飯直後の糊化度には蒸気炊飯米と通常炊飯米で差はないが、冷蔵保存時には蒸気炊飯米で糊化度は高く保たれており、老化が遅いことが示された。

5. 飯粒断面の顕微鏡観察

ヨウ素呈色後の飯粒断面の顕微鏡写真を Fig. 1-3 A, B に示す。全体を見比べると、A の通常炊飯米は、細胞の形が均一でなく、ところどころに細胞の崩れがみられるが、B の蒸気炊飯米は細胞組織が保たれていた。また、切片毎にやや違いがみられたが、蒸気炊飯米は赤紫色、通常炊飯米は青紫色に呈色する傾向がみられた。とくに通常炊飯米には局所的に濃い青で染まった部分が観察された。これは、炊飯過程でアミロースがデンプン粒から溶出し、細胞組織周辺に留まっているものと考えられる。一方、蒸気炊飯米にはこのような濃い青で染まる部分はみられず、広範囲が赤紫色に染まっており、デンプン粒からのアミロースの溶出が少ないと考えられる。

6. コメからの流出成分の分析

通常、炊飯器を用いた炊飯では、浸漬水とともにコメを加熱するため、浸漬水の一部は炊飯過程で蒸発し、残りの水は最終的にすべて吸水されて飯となる⁵。

一方、蒸気炊飯ではコメを浸漬し、吸水後の浸漬米だけを炊飯装置に投入し、吸水されずに残った浸漬水は廃水となる。さらに蒸気炊飯過程では温水が上からシャワーされるが、炊飯米に吸収されなかった温水はコンベアから流れ落ちる。すなわちこの流出液中の成分は炊き上がった蒸気炊飯米から取り除かれている。そこで、この流出液を調べることにした。

経過時間（毎分）ごとに回収した流出液中の固形物重量，全糖量，還元糖量を Fig. 1-4 に示す。浸漬水にはコメ 1 kg から全糖量で約 1.5 g，還元糖が約 0.5 g が流出していた。また流出液には，炊飯経過時間によって推移しながらも糖が流出しつづけており，その合計は約 13.4 g であった。糖流出のピークは炊飯開始から 8 分後，12 分後，16 分後の 3 回あった。加水ポイント 1 が 6 分後，2 が 10 分後，3 が 14 分後，4 が 18 分後であるので，糖流出物のピークは，加水ポイントをちょうど試料が通りすぎたころにあたる。流出液中の還元糖は，いずれのタイミングでも検出限界以下（0.025 mg/mL 以下）であった。また，固形物重量はほぼ全糖量と一致し，流出物のほとんどが糖質であることが示された。浸漬水，および流出液中の全糖量を合計すると，生米 1 kg から，約 15 g，すなわち米重量の 1.5% 程度にあたる糖が流出していることが明らかとなった。

この流出液をゲル濾過クロマトグラフィーにより分画し，各画分の全糖量をフェノール硫酸法により OD 490 nm で検出したところ（Fig. 1-5），大きな糖質のピークがひとつみられ（Excess water, 矢印部分），日本晴米から精製したアミロース標準品（SD amylose）のピークのパターンと類似していた。また，今回用いたアミロース標準品の各画分のヨウ素吸収スペクトルの最大吸収波長（ λ_{\max} ）は 600～640 nm 程度と文献値（600～620 nm）⁶⁷ とほぼ一致していた。さらに，蒸気炊飯中の流出液の各画分の最大吸収波長も 600～640 nm 程度であったことから，流出液のピークはアミロースに該当すると考えられる。この画分（Fr. 15～28）の合計比率は，流出液から検出された全流出糖の約 85% であった。また，流出液にアミロペクチンが含まれていた場合，アミロースより高分子であるためアミロースより前（Fig. 1-5 では Fraction 10 のあたり）にピークが現れ，その最大吸収波長（ λ_{\max} ）は 520～530 nm⁶⁷ となると考えられるが，そのようなピークは見られなかった。これらの結果から，流出液中の糖は主にアミロースであることが示唆された。

先行研究³⁵によると，通常炊飯の場合，加熱中 98°C の時点で 100 g 生米あたり全糖量として約 3 g の溶出があり，そのほとんどはデンプンである，

その一部は炊飯沸騰から蒸らしの間に飯内部に再吸収されるが、残りは米飯表面を覆い、米飯の付着性、透明感、つやの増加に寄与するとされている。また花城ら⁴¹は、炊飯器で水と共に加熱した際に溶出する成分を、モチ種のコシヒカリ、ジャポニカ種のコシヒカリ、インディカ種のホシユタカ3品種を用いて確認している。その結果、コシヒカリからの溶出重量は85℃に達した時点でコメの0.8%程度、溶出物のうち重量で98%以上がデンプンで、数平均重合度(DP)が約6000と約1500の二成分からなっており、溶出物にみられる割合は品種によるが、コシヒカリでは溶出物中にはアミロペクチンが溶出されやすいことを示している。また大石ら⁶⁸は、炊飯過程80℃、98℃で溶出する炊飯液中の固形物重量として100g生米から約0.8~0.9gが溶出することを示している。

今回、蒸気炊飯では全行程を通しての流出量は1.5%程度であった。また流出物は主にアミロースであることが明らかとなった。用いたコメの品種は花城ら⁴¹と同じコシヒカリであったが、水中でコメを加熱する通常炊飯とは流出物の構成が異なることが示唆された。流出液中には、コメの表層に多く存在するタンパク質や脂質も少量ではあるが流出していると考えられ、その定量は今後の課題である。

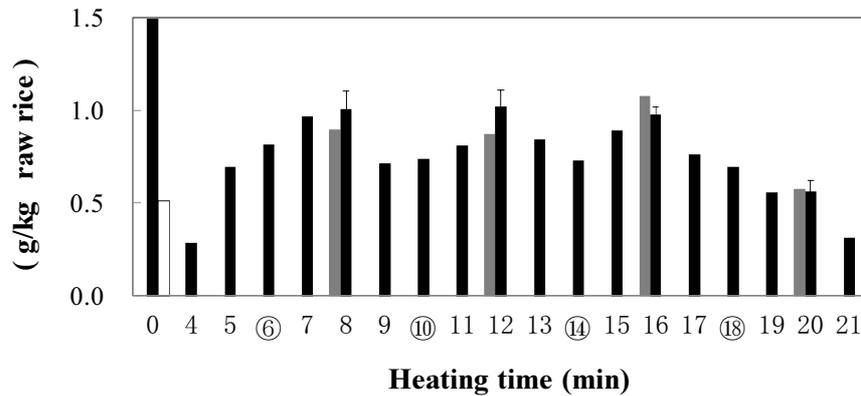


Fig. 1-4 Changes of the total carbohydrate and solid content in the excess water during steam cooking

Heating time = 0: Residual water (Raw rice was soaked in water before cooking, and the residual water was measured.)

1 kg of raw rice was pre-soaked in water, and then cooked in the superheated steam rice cooking machine. The excess water was collected every minute, and the amounts of total carbohydrate were measured. Solid content of the excess water of 8, 12, 16, and 18 minutes were measured.

■, Solid content; ■, Total carbohydrate; □, Reducing sugar

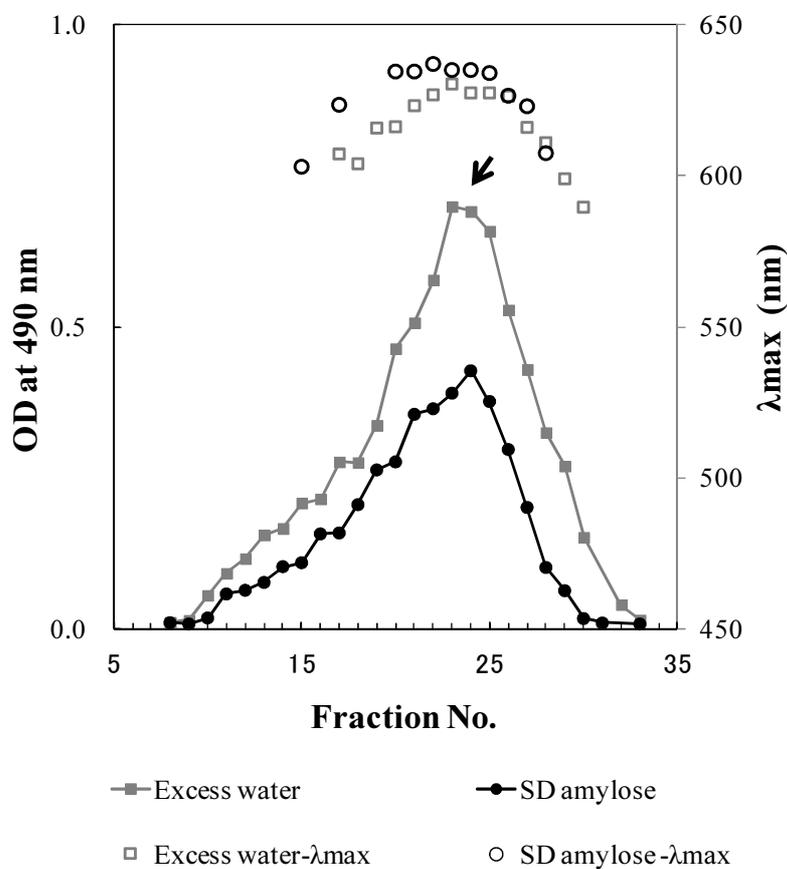


Fig. 1-5 GPC profiles (Sephacrose CL-2B) of the excess water during steam cooking

Samples were separated by GPC on a Sepharose CL-2B column, and the total carbohydrate in each column fraction and λ_{\max} of the polysaccharide-iodine complex were determined.

SD amylose; standard amylose (isolated amylose from rice starch)

7. 官能評価

炊飯方法の違う米飯試料の、外観、香り、老化感についての炊飯直後および保存後の官能評価の結果を Table 1-1 に示す。Table 1-1 より、炊飯直後および保存後、いずれにおいても、蒸気炊飯米は有意に「白い」と評価された。外観について「どちらがおいしそうか」の項目では、炊飯直後では蒸気炊飯米の方が「見た目においしそう」と評価した人が 11 人、通常炊飯米が 6 人であった。一方、香りについては、炊飯直後に蒸気炊飯米は有意に「弱い」と評価された。しかし香りの好みは分かれた。保存後に「老化感がある」と答えた人は、蒸気炊飯米で有意に少なかった。

また、Fig. 1-1 に示した飯の物性測定結果において、炊飯 1 日後の蒸気炊飯米と通常炊飯米では硬さに差がみられたため、保存 1 日後の食感について官能評価を行った。さらに味、総合評価についても評価を行った。その結果を Fig. 1-6 に示す。硬さに関して蒸気炊飯米は通常炊飯米に比べて有意に柔らかいと評価され ($p<0.01$)、物性測定の結果と一致がみられた。一方、物性測定 (1 日後) では差のみられなかった粘りに関して、官能評価では蒸気炊飯米で「粘りが強い」($p<0.05$) と評価された。さらに食感の総合評価 (どちらが好ましいか) で蒸気炊飯米は有意に好まれた ($p<0.01$)。味に関しては、甘み、総合的な嗜好いずれも差はみられなかった。外観、食感、風味をあわせた総合評価では蒸気炊飯米が有意に好まれた ($p<0.05$)。すなわち、保存 (5°C 1 日) 後の蒸気炊飯米の食感は通常炊飯米より好まれ、総合評価でもおいしいと評価された。

Table 1-1 Paired difference and preference tests
for ordinary cooked rice and steamed rice

	Just after cooking (<i>n</i> =20)			Stored for a day (<i>n</i> =16)		
	Ordinary	Steamed	Could not tell	Ordinary	Steamed	Could not tell
Appearance						
Which is whiter?	3	15*	2	2	13*	1
Which has gloss?	7	9	4	4	11	1
Which looks delicious?	6	11	3	4	11	1
Preference						
Aromas						
Which have more aromas?	15	2*	2	10	5	1
Which smells good?	9	6	4	7	6	3
Preference						
Staling score						
Which is more staled?	8	2	9	12	3*	1

Ordinary cooked rice and steamed rice were evaluated just after cooking or stored at 5°C for a day. Numbers indicate the number of panelists who gave that answer.

**p*<0.05 vs. Ordinary cooked rice

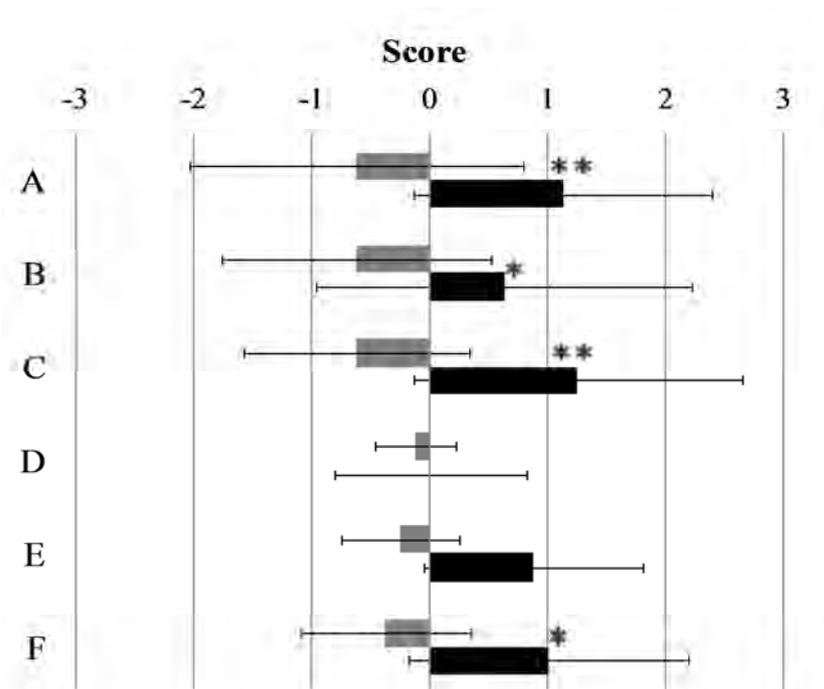


Fig. 1-6 Sensory evaluations of cooked rice after being stored for a day

Each rice sample was stored at 5°C for a day and samples were evaluated using a 7 point scale anchored from +3 to -3. ($n = 16$)

The samples were taken out of the refrigerator and left at room temperature 2 hours before sensory evaluation.

■, Ordinary cooked rice;

■, Steamed rice

A : softness (+3=softer, -3=harder)

B : stickiness (+3= greater, -3=lesser)

C : overall preference of texture (+3= like extremely, -3=dislike extremely)

D : taste-sweetness (+3= greater, -3=lesser)

E : overall preference of taste (+3= like extremely, -3=dislike extremely)

F : overall acceptability (+3= like extremely, -3=dislike extremely)

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ (Mann-Whitney's U -test)

今回、断面の観察から、蒸気炊飯米では細胞が規則正しく保たれたまま、炊飯されていることが確認された。また通常炊飯米にみられた、細胞周辺に偏在したアミロースの流出物は、蒸気炊飯米にはみられなかった。これは、炊飯過程でデンプン粒から一部溶出したアミロースは、蒸気炊飯過程では上からの加水により洗い流されており、炊き上がった炊飯米からは取り除かれているためと考えられる。すなわち、蒸気炊飯では炊飯中にコメが湯の中を「踊る」ことがなく、物理的損傷が少ないため細胞組織が保たれている。そのため米粒内でのアミロースの溶出が少なく、アミロース分子の会合によるネットワークの形成²⁶がされにくい。その結果、蒸気炊飯米は老化しにくく、冷蔵保存後の官能評価でも、有意においしいと評価されたと考えられる。

IV. 小括

連続式の過熱蒸気炊飯装置を開発し、この装置を用いて炊飯した米飯の物理化学的な測定、および官能評価を実施し、蒸気炊飯米の特徴を明らかにした。その結果、

- 1) 白色度は蒸気炊飯米で有意に高かった。
- 2) 物性測定では、蒸気炊飯米は老化に伴う経時的な硬さの上昇、粘りの低下が少なかった。
- 3) 糊化度は、蒸気炊飯米では冷蔵保存後も、通常炊飯米に比べ高く保たれていた。
- 4) ヨウ素呈色させた炊飯米断面の顕微鏡観察により、通常炊飯米では濃い青紫色に染まる部分がみられ、デンプン粒から溶出したアミロースが偏在している様子が確認された。一方、蒸気炊飯米は均一に赤紫色に呈色し、デンプン粒からのアミロースの溶出が少ないことが示唆された。また蒸気炊飯米では細胞の形状が比較的規則正しく保たれていたが、通常炊飯米では細胞の形状がところどころ崩れていた。
- 5) 蒸気炊飯過程でコメから流出する成分をゲル濾過分析により調べたところ、その流出物は主にアミロースであることが確認された。
- 6) 官能評価において、冷蔵保存後の蒸気炊飯米は評価が高く、老化せずおいしい状態が保持されていた。

これらの結果から、蒸気炊飯米は、胚乳細胞組織が比較的保たれたまま炊飯されているため、老化の原因となるアミロースが胚乳細胞内部のデン

ブン粒から溶出しにくいことが明らかとなった。また、たとえ内部からアミロースが溶出しても、炊飯過程で上からのシャワーリングにより洗い流されることも示された。その結果、アミロースを主成分とするいわゆる「おねば」層が蒸気炊飯米では形成されにくく、また老化しにくくなるため、冷蔵保存してもおいしさが保たれると考えられる。

第 2 章

過熱蒸気炊飯米の香気特性と古米臭の低減

I. 序論

コメは通常、炊飯後に調味せず食されるため、炊飯米そのものの食味特性が非常に重要である。食感と並び炊飯米の主要な特性のひとつが「香気」であり、ちょっとした香りの違いによって、炊飯米は非常に好まれたり、受け入れがたくなったりする。炊飯米の香気と風味には、多くの化合物が関与しているが、どの化合物が最も強く寄与しているかを明らかにするのは容易ではない。香り米において知られている 2-acetyl-1-pyrroline 以外には、コメの香気を決定づけているといえる化合物は明らかになっていないが、(E)-2-nonenal や (E,E)-2,4-decadienal といったいくつかのアルデヒド化合物は、コメの香りに関与していると報告されている^{44, 48}。またこれまでに、コメの保管による古米臭の発生についての研究が行われている。古米臭は、不飽和脂肪酸の酸化によって生成するカルボニル化合物（たとえば hexanal や octanal）、および 2-pentylfuran の増加が主要な原因であるといわれている⁴⁹⁻⁵²。小林らは、風味の劣化を予防する保管方法について研究を行っている⁵³。また安信らは、そういった古米臭を取り除くような電気炊飯器の開発を実施している⁵⁴。しかし、炊飯方法の違いによって炊飯米の香気成分がどのように変化するかに着目した研究はほとんどみられない。

第 1 章では、過熱蒸気炊飯装置を用いて炊飯した炊飯米の物理化学的な特性と食味についての研究をまとめた。その中で官能評価の結果から、蒸気炊飯米は、通常炊飯米に比べて香りが弱いことが明らかとなったが、どちらの香りが好ましいかはパネラーによって意見が分かれた。

そこで第 2 章では、蒸気炊飯に伴い、コメから生成する香気成分に着目した。試料には、においが問題となる古米を用い、まずは蒸気炊飯過程

で生じる香気成分を網羅的に確認するため、炊飯装置出口に蒸留塔を設計・設置し、蒸気と共に抜け出てくる揮発性成分を回収した。回収液を試料とし、ガスクロマトグラフィーにおいかけ/質量分析計（GC-O/MS）を用いて含まれる香気成分の分析を行った。さらに蒸気炊飯米に含まれる香気成分を分析し、通常炊飯米とその量・質について比較を行った。

II. 研究方法

1. 試料と炊飯方法

2013年福井産コシヒカリ（精白米）を10°Cで1年間保管し、試料とした。炊飯は2通りの方法で行った。

蒸気炊飯米 Fig. 4に示した過熱蒸気炊飯装置（エースシステム, SRM-20）を用い、第1章の方法と同様に炊き上げた。

通常炊飯米 第1章と同じく家庭用IH炊飯器（パナソニック, SR-SU105）を用い、一般的な炊飯方法で炊き上げた。加水比は、米重量の1.5倍（生米200gに水375mL）とした。

2. 使用試薬

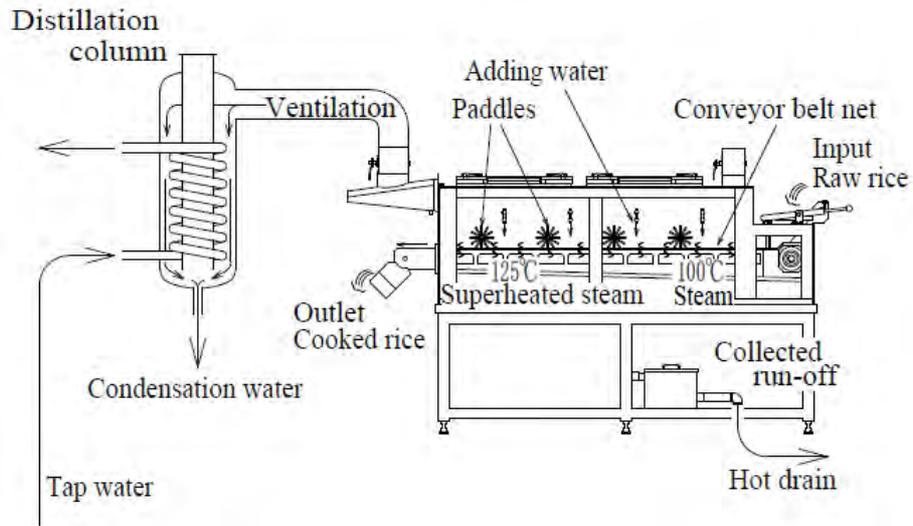
標準試薬は pentanal, hexanal, octanal, 1-hexanol, nonanal, 1-octanol, acetic acid, benzaldehyde, (*E*)-2-nonenal, γ -caprolactone, hexanoic acid, benzyl alcohol は Sigma-Aldrich より, heptanal, 2-pentylfuran, (*E,E*)-2,4-nonadienal, (*E,E*)-2,4-decadienal, γ -octalactone, γ -nonalactone は東京化成より, (*E*)-2-octenal は Santa Cruz Biotechnology, pentanoic acid はワコー, isovaleric acid, 2-methoxyphenol はナラカイテスク, longifolene は Extrasynthese より購入した。抽出溶媒には methyl *tert*-butyl ether (MTBE) (ナカライテスク) を用いた。内部標準には 2-acetyl pyrrole (Sigma-Aldrich) を用いた。

3. 過熱蒸気炊飯中の蒸気の回収

過熱蒸気炊飯過程でこういった香気成分が生じているかを確認するため、蒸留塔を設計し、炊飯装置出口に設置した。Fig. 2-1-A が全体図、B が蒸留塔の詳細である。蒸留塔は高さ 1450 mm, 外径 ϕ 320 mm, 蒸留塔の上から下までらせん状になった配管に冷却水を流した。炊飯中にもれ出てくる蒸気は、装置出口上部に設けられたダクトから蒸留塔内に導かれ、冷却水によって冷やされて蒸留水として回収した。ガスクロマトグラフィーにお

いかぎ (GC-O) には炊飯開始から最後まですべての蒸気を、定量用には炊飯完了間際の 2 分間の蒸気を回収した。炊飯開始から最後まですべて回収した蒸気量は 9560 mL であった。そのうち 800 mL を試料とし、蒸留水中の香気成分を分液漏斗で 200 mL の MTBE を用いて 2 回抽出した。上層を回収、無水硫酸ナトリウムを加え、ビグロー管 (30 cm x 1.5 cm, 桐山製作所) , 窒素パージにより濃縮して GC-O, GC-MS の試料とした。炊飯終了間際の 2 分間の蒸気回収量は 525 mL であり、100 mL の MTBE を用いて同様に抽出・濃縮し、定量用の試料とした。

A



B

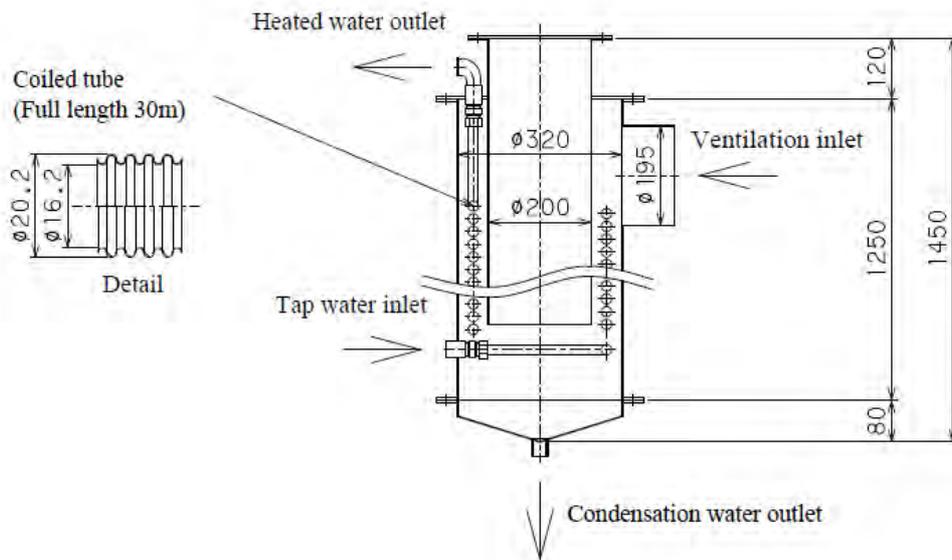


Fig. 2-1 Schematic views of superheated steam rice cooking machine with a distillation column

A Over view

B Distillation column (Material: SUS304 Stainless steel)

4. 炊飯米からの香気成分の回収

炊飯米はプラスチック容器に入れて1時間室温に置いた。炊飯米 20 g に蒸留水 60 mL を加えてミキシングした。そこに 60 mL の MTBE を加えて攪拌，遠心分離（ $1610 \times g$, 5 min）して上清を回収した。この操作を3回繰り返した。回収した上清から揮発性成分以外を取り除くため，溶媒-高真空蒸留法（SAFE法）を用いて 6.7×10^{-2} Pa, 30°C で蒸留を行った⁶⁹。

5. 生米からの香気成分の回収

生米（10 g）は Wonder Crusher WC-3（Hsiangtai Machinery Industry）を用いて粉碎した。その米粉を MTBE（60 mL）を用いて2回抽出し，揮発性成分を SAFE を用いて回収した。

6. 水分含量

生米および炊飯米は常圧下 105°C で 48 時間加熱し，加熱前後の重量から水分含量を算出した。

7. 蒸気炊飯中の流出液

蒸気炊飯中に生じる流出液は装置下部から，炊飯完了間際の2分間回収した。流出液量は 2400 mL であり，そのうち 400 mL を抽出に用いた。揮発性成分は MTBE で抽出し，SAFE で揮発性成分のみを回収した。

8. ガスクロマトグラフィーにおいかぎ/質量分析（GC-O/MS）

回収蒸気から抽出して得られた試料をガスクロマトグラフィーにおいかぎ/質量分析により分析した。ガスクロマトグラフィーにおいかぎ/質量分析計は，気化させた試料をガスクロマトグラフィーにより各成分に分離し，そのにおいをパネラーが鼻で嗅いでにおいの質と強度を検出すると同時に，検出器として質量分析計により化合物を同定することのできるシステムである。本研究では質量分析計（島津製作所，2010 plus）の接続されたにおいかぎガスクロマトグラフィー（GL Science，スニッフィング

ポート OP275) を用いた。キャリアガスとしてヘリウムを用い (流速 3.1 mL/min), 注入器温度は 230°C, キャピラリーカラム DB-WAX (長さ 60 m, 内径 0.25 mm, フィルム厚 0.25 µm, Agilent J&W) を用いスプリットレスモードで試料抽出液を 2 µL 注入し分析した。カラム温度は 40°C で 2 分保持, その後 5°C/min で 250°C まで上昇させ, 20 分間保持した。3 名の訓練を受けたパネリストがにおいを確認し, 検知された化合物のにおいと強度を記録した。質量分析計はイオン化電圧 70 eV (EI), イオン源温度 240°C で行った。

9. 吸着管を用いた揮発性成分の捕集

Yang らの方法⁷⁰ をもとに, 炊飯米のヘッドスペースにおける揮発性成分を回収した。各炊飯米 1 kg を 5 L の Smart Bag PA (GL Sciences) に入れ, 70°C の恒温槽内で高純度窒素ガスを 100 mL/min で 30 分間通気させ, 吸着管 (60/80 mesh Tenax TA, GL Sciences) に揮発性成分を捕集した。

10. 加熱脱着/GC-MS による分析

Tenax TA に回収された揮発性成分は加熱脱着装置 (ATAS GL International BV, OPTIC-4) を用い, 280°C で 3 分加熱したのちに -90°C で 3 分間冷やして濃縮し, その後 240°C にしてガスクロマトグラフィーに導入した。ヘリウムガス流量は 4 mL/min とした。カラムは InertCap Pure Wax (長さ 60 m, 内径 0.25 mm, フィルム厚 0.25 µm, GL Sciences) を用い, スプリットモード (1:1) で分析した。カラム温度は 40°C で 1 分保持したのち, 12.5°C/min で 240°C まで昇温した。質量分析条件は上記と同様に行った。

11. 化合物の同定

揮発性化合物の同定は Marayal らの方法⁴⁵ に従った。質量分析ライブラリは NIST 08 を用いた。主な化合物は標準試薬のマススペクトルおよび保持係数 (RI) と照合して確認した。保持係数は, *n*-アルカン標準混合液を試料と同条件で分析し, 算出した。

12. 揮発性化合物の定量

それぞれの試料抽出前に適量の内部標準 (2-acetyl pyrrole)を加え、個々の揮発性化合物の定量は内部標準法⁵²で行った。濃度は個々の化合物の既知濃度の標準液で特定 m/z の面積から検量線を作成し、算出した。内部標準の面積測定には m/z 94 を用いた。

Ⅲ. 結果および考察

1. 蒸気炊飯過程で生じる蒸気中の香気成分

精白ジャポニカ米を過熱蒸気炊飯装置で炊飯し、その過程で生じる蒸気を回収し、GC-においかぎ/質量分析装置で分析した。そのクロマトグラムを Fig. 2-2 に示した。また Table 2-1 に検出された化合物名、そのにおい、においの強度と保持係数 (RI) を示した。少なくとも 22 の香気化合物がにおいかぎにより確認され、そのうち 13 を GC-MS により同定した (アルデヒド類 6 種, フェノール類 2 種, ラクトン類 2 種, アルコール, フラン, テルペン各 1 種)。hexanal や 2-pentylfuran といった、コメの香気として知られている成分が確認された。さらに、炊飯米の特徴的な香気成分として認識されている (*E,E*)-2,4-nonadienal , (*E,Z*)-2,4-decadienal , (*E,E*)-2,4-decadienal も検出された。これらに加えて、4 種の香気成分 (longifolene, 2-methoxyphenol, γ -octalactone, γ -nonalactone) を確認した。これらは、黒米のぬか⁷¹ やインディカ香り米^{45, 72} , 玄米⁷² からは検出が確認されているが、精白ジャポニカ米からは初めての検出例である。また、これまでにはコメを原料とする中国酒⁷³ からしか検出されていない γ -caprolactone を検出した。同定できた 13 種に加え、これまでにコメから香気化合物として報告されている化合物^{45, 70, 74, 75} 15 種を GC-MS により確認した。これらにはアルコール類 (1-pentanol, 1-hexanol) や短鎖脂肪酸 (pentanoic acid, hexanoic acid) などが含まれていた。今回、過熱蒸気炊飯過程での蒸気を蒸留塔を用いて回収し、本方法で抽出することにより、コメ由来の香気化合物を網羅的に確認することができた。今回の炊飯過程では 100°C を超える過熱水蒸気を用いているため、上記のようにこれまであまり知られていない香気化合物が蒸気と共にコメから蒸留されて出てきたのかもしれない。また、今回同定できなかったにおい化合物が 9 種あり、二次元 GC を用いた同定を進めている。

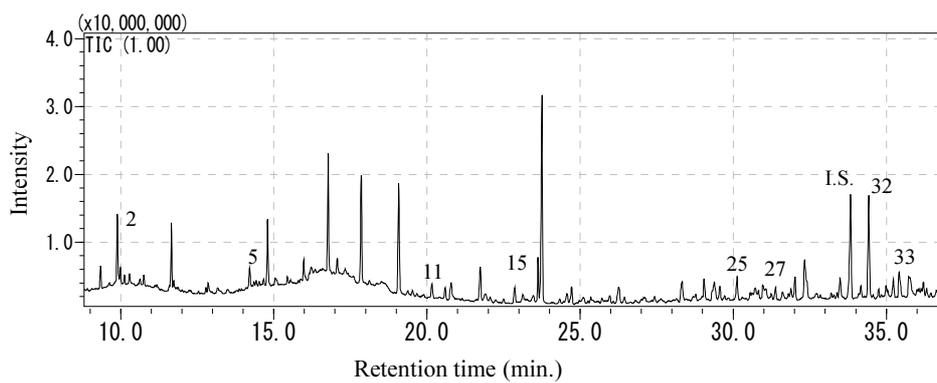


Fig. 2-2 Gas chromatogram of odor compounds in steam collected during steaming process

Numbers correspond to compounds numbers in Table 2-1.

I.S. : Internal Standard (2-Acetylpyrrole)

Table 2-1 Odor components in steam collected during rice steaming process
detected in GC-O analysis

		GC-MS		GC-O	
No.	RI ^(a)	Compound	Identification ^(b)	Odor description ^(c)	Odor Intensity ^(d)
1	985	Pentanal	A	(Aldehyde, pungent)	-
2	1084	Hexanal	A	Green	++
3	1126	Unknown		Aldehyde	+++
4	1164	Unknown		Ink, pungent	++
5	1234	2-Pentylfuran	A	Green bean	+
6	1254	1-Pentanol	A	(Grassy, fruit)	-
7	1293	Octanal	A	(Citrus-like, fat, soap)	-
8	1310	Unknown		Aldehyde	+++
9	1357	1-Hexanol	A	(Vegetal, green)	-
10	1400	Nonanal	A	(Fat, citrus, green)	-
11	1438	(<i>E</i>)-2-Octenal	A	Grass, soil	++
12	1451	Acetic acid	A	(Sour)	-
13	1453	1-Octen-3-ol	B	Stale, mushroom	++
14	1536	Benzaldehyde	A	(Nutty, bitter)	-
15	1546	(<i>E</i>)-2-Nonenal	A	Resin, dust, fat	+++
16	1562	1-Octanol	A	(Fruity, floral)	-
17	1592	Longifolene	A	Flower	+++
18	1666	1-Nonanol	B	(Fat, green, stale)	-
19	1682	Isovaleric acid	A	(Sweat, acid, rancid)	-
20	1713	(<i>E,E</i>)-2,4-Nonadienal	A	Rice bran, peanut	+++
21	1721	γ -Caprolactone	A	(Flower, sweet)	-
22	1749	Pentanoic acid	A	(Sweat, acid, fatty)	-

23	1773	Unknown		Rice bran	++
24	1777	(<i>E,Z</i>)-2,4-Decadienal	B	Rice bran	+++
25	1825	(<i>E,E</i>)-2,4-Decadienal	A	Rice bran, deep-fried	+++
26	1851	Hexanoic acid	A	(Sweat, acid)	-
27	1873	2-Methoxyphenol	A	Phenol, medical	+++
28	1890	Benzyl alcohol	A	(Sweet, flower)	-
29	1892	Unknown		Oriental	++
30	1939	γ -Octalactone	A	Flower, coconut	++
31	2000	Unknown		Seaweed	+++
32	2016	Phenol	A	Phenol	+++
33	2054	γ -Nonalactone	A	Popcorn, sweet, cinnamon	+++
34	2133	Unknown		Bitter	+++
35	2157	Unknown		Oriental, phenol	++
36	2174	Unknown		Sweet, cake	+++
37	2179	Nonanoic acid	B	(Animal, cheese)	-

(a) Experimental retention indices calculated on a DB-WAX column

(b) Reliability of the identification: A: mass spectrum and retention time identified with those of an authentic compound; B: mass spectrum agreed with mass libraries (NIST08) and the retention index (RI) agreed with the data in the literature^{73,74}

(c) Odor description by panelist during olfactometry.

In parentheses: from literature^{45,73} and data base (Flavor net⁷⁶)

(d) The odor intensities were evaluated according to the six grade odor intensity measurement method by three trained panelists.

-: undetectable, +: barely detectable, ++: weak but recognizable, +++: easily detectable, ++++: strong, +++++: intense

2. 生米および炊飯米に含まれる香気成分の定量（溶媒抽出法）

GC-MS を用いて、これまでに香気成分として検討されている 14 種の香気成分^{45, 72, 75} について、蒸気炊飯米中の含量の定量を行い、生米および通常炊飯米と比較した（Table 2-2）。

ほとんどの化合物（特に hexanal, 1-hexanol, acetic acid, 1-octanol, isovaleric acid, pentanoic acid, hexanoic acid）は炊飯後に減少していた。炊飯米同士の比較のため、Table 2-2 には蒸気炊飯米/通常炊飯米中の含量の比率を示した。比率が 0.5 以下は、すなわち蒸気炊飯米ではその香気成分が通常炊飯米中と比べ半分以下になっているということであり、1-hexanol, isovaleric acid, γ -caprolactone, pentanoic acid, hexanoic acid, benzyl alcohol が該当した。一方、hexanal, 2-pentylfuran, nonanal の含量はあまり変わらなかった。これらの化合物は古米臭となるカギ化合物であり、また閾値が低いことが報告されている^{48, 52}。さらに、(E,E)-2,4-decadienal は典型的なコメのおいをもち、閾値が非常に低いですが、蒸気炊飯米と通常炊飯米に含まれる量はほとんど同量であった。

Table 2-2 Quantification of volatile odor compounds extracted with MTBE from raw and cooked rice

Compound	RI ^(a)	<i>m/z</i> ^(b)	Quantification ($\mu\text{g}/100\text{ g dry weight}$)			Ratio Steamed/Ordinary	Odor threshold ($\mu\text{g}/\text{L}$)
			Raw rice	Ordinary cooked rice	Steamed rice		
Hexanal	1077	44	36.0 \pm 0.9	14.5 \pm 3.1	11.4 \pm 1.9	0.8	9.1 ^(c)
2-Pentylfuran	1230	81	0.4 \pm 0.0	0.4 \pm 0.2	0.3 \pm 0.0	0.7	0.4 ^(d)
1-Hexanol	1356	56	23.7 \pm 1.0	10.3 \pm 4.2	1.2 \pm 0.1	0.1	8000 ^(c)
Nonanal	1393	70	4.5 \pm 1.2	6.6 \pm 3.1	4.6 \pm 1.4	0.7	0.8 ^(d)
Acetic acid	1451	60	198.2 \pm 23.4	102.4 \pm 7.4	78.6 \pm 14.2	0.8	200000 ^(c)
Benzaldehyde	1523	106	2.1 \pm 0.1	1.8 \pm 0.2	1.0 \pm 0.1	0.5	900 ^(c)
1-Octanol	1562	56	1.4 \pm 0.0	0.7 \pm 0.3	0.7 \pm 0.2	0.9	91 ^(d)
Isovaleric acid	1682	60	18.4 \pm 1.3	5.0 \pm 1.2	1.6 \pm 0.2	0.3	33.4 ^(c)
γ -Caprolactone	1705	85	3.7 \pm 0.2	2.6 \pm 0.8	0.5 \pm 0.1	0.2	13000 ^(c)
Pentanoic acid	1749	60	52.4 \pm 2.4	15.0 \pm 3.8	5.3 \pm 1.7	0.4	3000 ^(c)
(<i>E,E</i>)-2,4-Decadienal	1814	81	0.5 \pm 0.3	0.6 \pm 0.1	0.5 \pm 0.2	0.9	0.06 ^(d)
Hexanoic acid	1851	60	279.9 \pm 39.3	118.1 \pm 32.5	42.2 \pm 10.1	0.4	420 ^(c)
Benzyl alcohol	1880	79	10.5 \pm 1.2	11.0 \pm 8.7	1.3 \pm 0.7	0.1	900 ^(c)
Phenol	2049	94	3.1 \pm 0.1	3.5 \pm 0.5	2.3 \pm 0.1	0.7	30 ^(c)

All compounds were identified by mass spectrum and retention time with those of authentic compounds.

Mass spectrum was also agreed with mass libraries (NIST08) and the retention indexes (RI) was agreed with the data in the literatures^{73, 74}. Quantification data are mean \pm SD ($n=3$).

Water content raw rice: 15.0%, ordinary cooked rice: 61.2%, steamed rice: 63.4%

^(a) Experimental retention indices calculated on a DB-WAX column

^(b) *m/z* used for area measurement

m/z 94 was used for internal standard (2-Acetylpyrrole) area measurement.

Odor thresholds from (c)⁷³, (d)⁴⁸.

3. 回収蒸気および流出液中の香気成分の比較

蒸気炊飯過程では、温水が一定間隔でコメに噴霧されるが、コメには炊飯に必要な分だけが吸水され、残りは流出液として流れ落ちる。余分な水が流れ落ちる際に、コメから水溶性の化合物、たとえば酸類も同時に流出していると考えられる。そこで蒸気炊飯過程で生じる流出液を回収し、コメからの流出物を確認した。回収は炊飯終了間際の2分間行い、同時に蒸気の回収も行い、その内容物を比較した。Table 2-3 に示した通り、流出液からは acetic acid が多く検出された。蒸気炊飯米では acetic acid が流出しているが、通常炊飯ではそのように流出物を取り除く工程がない。この違いが両者の味の差に影響しているかもしれない。また、酸類 (hexanoic acid など) およびアルデヒド類 (hexanal など) は蒸気、流出液どちらからも検出された。一方、1-hexanol, 1-octanol, γ -caprolactone, (*E,E*)-2,4-decadienal は蒸気のみにもみられた。LogP 値をみると、これらの化合物は難水溶性であり (γ -caprolactone を除く)、水蒸気蒸留の原理でコメから蒸気中に抜け出たと考えられる。

4. 炊飯米からのヘッドスペースへの香気化合物のリリース量の比較

炊飯米から香気がどの程度リリースしてくるかを確認するため、各炊飯米のヘッドスペースにおける香気化合物量を比較した (Table 2-4)。蒸気炊飯米からの香気のリリース量はいずれの化合物も通常炊飯米と比べ大幅に少なかった。hexanal, heptanal, 2-pentylfuran, 1-hexanol は蒸気炊飯米では通常炊飯米の 10%以下であった。また蒸気炊飯米において pentanal, 1-pentanol, benzyl alcohol は検出限界以下であった。コメの特徴的な香りである (*E,E*)-2,4-decadienal はいずれの炊飯米でも検出されなかった。hexanal, octanal といったアルデヒド化合物および 2-pentylfuran は、長期間保管したコメからの検出が報告されており⁵³、古米臭に寄与していると考えられる。これらの化合物は通常炊飯米と比べて蒸気炊飯米からのリリース量が非常に少なく、蒸気炊飯米は古米臭が少ないと考えられる。この結果は、第1章 Table1-1 に示した官能評価の結果、すなわち蒸気炊飯米は通常炊飯米よりも香りが弱いという評価を確証するものである。

蒸気炊飯米と通常炊飯米では、抽出法によって確認された香気成分の定量結果の差よりも、ヘッドスペースにリリースされた香気分量の差の方がずっと大きかった。これはすなわち、蒸気炊飯米と通常炊飯米に含まれる香気分量はそれほど変わらないが、蒸気炊飯米からはその香気成分がリリースされにくく、結果として通常炊飯米よりも「においが弱く感じられる」ということである。通常、炊飯過程においては「おねば」と呼ばれる白く粘り気のある成分がコメから溶出してくることが知られている。おねばにはコメ中の水溶性物質、おもにデンプンが含まれており、炊き上がった炊飯米の表面はそのおねばによって覆われている⁷⁷。本研究で用いた通常炊飯米の表層も、このおねば層に覆われていた。炊飯米においてこの層に含まれる香気成分は容易にリリースされ、その香気に影響するものと考えられる。一方、蒸気炊飯米は炊飯後も内部の細胞壁構造を保っており、内部から水溶性の成分が溶出しにくい（第1章 Fig. 1-3 参照）。また一部溶出した成分は、蒸気炊飯過程で行われる上からの加水により大部分が洗い流されていることが推測される。結果として、蒸気炊飯米には表層におねばが少なく、おねば層からの香気成分のリリースも少なくなったと考えられる。炊飯米においては、そこに含まれる香気成分の量や質だけでなく、炊飯米表面から香気成分がリリースされやすいかどうか、官能評価に大きく影響するといえよう。本研究の結果から、過熱蒸気炊飯装置を用いれば古米であっても古米臭の少ない炊飯米を炊くことができると考えられる。

Table 2-3 Quantification of odor compounds in collected steam and run-off

Compound	Quantification (μg)		Boiling Point	LogP
	in steam	in run-off		
Hexanal	0.9	2.4	130	1.8
2-Pentylfuran	0.1	0.1	170	3.7
1-Hexanol	0.7	N.D. ^(a)	157	2.0
Nonanal	0.3	1.0	195	3.3
Acetic acid	5.4	39.6	118	-0.2
Benzaldehyde	0.2	0.3	180	1.5
1-Octanol	0.1	N.D.	194	3.0
γ -Caprolactone	0.1	N.D.	216	0.7
Pentanoic acid	1.0	1.2	186	1.4
(<i>E,E</i>)-2,4-Decadienal	0.1	N.D.	245	3.4
Hexanoic acid	2.6	6.4	205	1.9
Benzyl alcohol	0.3	0.8	206	1.1
Phenol	2.2	5.4	182	1.5

The steam and run-of were collected during the last 2 min of the cooking.

Data presented are a total amount of each compound that was contained in the collected steam (525 mL) or run-off (2400 mL).

Specific m/z was used same as Table 2-2.

Boiling points and logP values of the compounds are cited from SciFinder⁷⁸ or Pub Chem⁷⁹.

Column: DB-WAX

^(a) Not detected.

Table 2-4 Total ion peak area of major volatile compounds
in the headspace vapor of cooked rice

Compound	RI ^(a)	Total ion peak area ($\times 10^3$)						Ratio Steamed/ Ordinary
		Ordinary cooked rice			Steamed rice			
Pentanal	971	53	\pm	15	N.D. ^(b)			-
Hexanal	1071	2215	\pm	508	71	\pm	40	0.03
Heptanal	1173	82	\pm	29	3	\pm	6	0.04
2-Pentylfuran	1221	354	\pm	138	29	\pm	25	0.08
1-Pentanol	1237	76	\pm	10	N.D.			-
Octanal	1277	61	\pm	16	13	\pm	4	0.22
1-Hexanol	1340	281	\pm	48	N.D.			-
Nonanal	1381	114	\pm	50	53	\pm	17	0.47
Benzaldehyde	1495	93	\pm	33	32	\pm	10	0.35
Benzyl alcohol	1799	18	\pm	8	N.D.			-

Values are mean \pm SD ($n=3$).

All compounds were identified same as Table 2-2.

^(a) Experimental linear retention indices calculated on an InertCap® Pure-WAX column.

^(b) Not detected.

IV. 小括

過熱蒸気炊飯装置を用いた炊飯による香気成分を確認するため、ジャポニカ精白米を試料とし、炊飯中の蒸気およびこの装置で炊飯した飯（蒸気炊飯米）の香気成分を分析した。回収蒸気を GC - においかぎ分析 (GC-O) したところ、22 以上のにおいが感知され、そのうち 13 の香気成分を GC-MS により同定した。hexanal や (E,E)-2,4-decadienal といったコメの特徴的な香気成分に加え、longifolene や 2-methoxyphenol など、ジャポニカ精白米からは報告されていない 4 成分を見出した。蒸気炊飯米中の香気成分を定量したところ、通常炊飯米と比べいずれも少なかったが、hexanal や (E,E)-2,4-decadienal といったコメの特徴的な香気成分に大差はなかった。一方、各炊飯米のヘッドスペース中にリリースしてくる香気成分を比較したところ、蒸気炊飯米は通常炊飯米に比べ非常に少なかった。特に古米臭の原因といわれる hexanal は 1/10 以下であった。蒸気炊飯米では、通常炊飯米と異なり、構造的に表層から香気成分がリリースされにくいと考えられる。

まとめ

本研究では、近年開発された過熱蒸気炊飯装置を用いて炊飯した炊飯米の食味と物理化学的特性について、通常炊飯米と比較し明らかにした。第1章では炊飯米のおいしさに大きく関わる「食感」に着目した。その結果、冷蔵保存した場合でも蒸気炊飯米では柔らかく粘りが保たれており、蒸気炊飯米は老化しにくいことを確認した。そのメカニズムとして、蒸気炊飯米ではコメに直接蒸気をあてて加熱炊飯するのでコメの組織構造が崩れにくいこと、またコメから溶出した成分、主に老化の原因となるアミロースが、上からの加水により一部取り除かれていることがわかった。官能評価を行ったところ、冷蔵1日後の蒸気炊飯米と通常炊飯米の比較では、有意に蒸気炊飯米が好まれた。また「香り」に関しては、好ましさの評価に優劣はなかったが、強度では蒸気炊飯米の方が通常炊飯米よりも弱い、という評価であった。そこで第2章では、米飯の食味においても一つの大きな要因である「香り」に着目した。試料はにおいが問題となる古米を用い、蒸気炊飯過程で生じる蒸気を回収して分析したところ、多様な香気成分が検出され、蒸気炊飯過程ではコメから一部香気成分が取り除かれていることが明らかとなった。さらに炊飯過程で行われる上からの加水により水溶性の有機酸類が一部洗い流されていた。また、蒸気炊飯米ではコメの組織構造が保たれているため、香気成分がリリースしにくく、結果としてにおいを感じにくいということを確認した。

すなわち、蒸気炊飯では蒸気を直接コメにあてるため、コメの胚乳細胞組織を比較的保ったまま炊飯することができ、さらに、一部溶出した成分は上からの加水により洗い流されているため、蒸気炊飯米にはいわゆる「おねば」の層が少ない。その結果、「保存しても老化しにくい」「においが弱い」という蒸気炊飯米の特徴が生じることが明らかとなった。

「蒸気炊飯米はにおいが弱い」という特徴を生かせば、たとえば古米のようなにおいの気になるコメや、健康素材として注目されているが特有のにおいのある大麦であっても、蒸気炊飯するとおいしく食べられる可能性が示された。また蒸気炊飯過程では上からの加水により特に水溶性の有機

酸類が一部取り除かれていることから，酸味や苦味が低減し，風味の面でも改善が期待される。

文献

- 1 石谷孝佑 (2002) “米の事典—稲作からゲノムまで—”, 幸書房, 東京.
- 2 竹生新治郎 (1995) “米の科学” (竹生新治郎, 石谷孝佑, 大坪研一編), 朝倉書店, 東京.
- 3 文部科学省 (2015) “日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂)”, 文部科学省, <http://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/1365297.htm>. [accessed 3 February 2017]
- 4 松元文子, 福場博保 (1979) “調理と米”, 学建書院, 東京.
- 5 山崎清子, 島田キミエ, 渋谷祥子, ほか (2011) “NEW 調理と理論” 1 st., 同文書院, 東京, pp 72-81.
- 6 星川清親 (1975) “イネの生長 : 解剖図説”, 農山漁村文化協会, 東京.
- 7 渋谷直人 (1900) 米の細胞壁の化学構造と品質. 日本食品科学工学会誌, 37:740-748.
- 8 Suzuki K, Kitamura S, Kato Y, et al. (2000) Highly substituted glucuronoarabinoxylans (hsGAXs) and low-branched xylans show a distinct localization pattern in the tissues of *Zea mays* L. *Plant Cell Physiol*, 41:948-959.
- 9 丸山悦子 (2000) 米飯のおいしさへのアプローチ. *人間環境科学*, 9:159-166.
- 10 川越靖 (2013) 米の澱粉粒のライブ観察. *化学と生物*, 51:478-482.
- 11 Champagne ET (2004) “Rice : chemistry and technology”, American Association of Cereal Chemists, Minnesota.
- 12 Kubo A, Akdogan G, Nakaya M, et al. (2010) Structure, physical, and digestive properties of starch from *wx ae* double-mutant rice. *J Agric Food Chem*, 58:4463-4469.
- 13 Perez S, Bertoft E (2010) The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules : A comprehensive review. *Starch/starke*, 62:389-420.
- 14 久下喬 (1990) “食品ハイドロコロイドの科学” (西成勝好, 矢野俊正

編), 朝倉書店, 東京, pp 139-152.

15 中村道徳, 貝沼圭二(1986)“澱粉・関連糖質実験法(生物化学実験法)”, 学会出版センター, 東京.

16 檜作進(1970)炊飯とでんぷんの老化. 調理科学, 3:225-229.

17 不破英次, 桧作進, 小巻利章, ほか.(2003)“澱粉科学の事典”, 朝倉書店, 東京.

18 南出隆久, 大谷貴美子(2006)“調理学”, 講談社, 東京.

19 貝沼やす子(1994)米の調理. 調理科学, 27:287-293.

20 貝沼やす子(2003)米飯の食味に関する研究. 日本調理科学会誌, 36:88-94.

21 安松克治, 飯田敦(1985)炊飯について その1. 水洗から加熱・むらし操作まで. 調理科学, 18:186-193.

22 松元文子(1970)炊飯要領と飯の食味. 調理科学, 3:68-72.

23 貝沼圭二, 松永暁子, 板川正秀, ほか.(1981) β -アミラーゼ・プルラーナーゼ(BAP)系を用いた澱粉の糊化度, 老化度の新測定法. 澱粉科学, 28:235-240.

24 北村進一(2016)澱粉および澱粉質食品の糊化・老化と加工. Cellul Commun, 23:60-64.

25 Carnali J, Zhou Y(1996) An examination of the composite model for starch gels. J Rheol, 40:221-234.

26 Goesaert H, Brijs K, Veraverbeke WS, et al. (2005) Wheat flour constituents : how they impact bread quality, and how to impact their functionality. Trends Food Sci Technol, 16:12-30.

27 稲津脩(2005)“おいしいコメはどこがちがうか”(農文協), 農山漁村文化協会, 東京, pp 44-55.

28 松本伸, 松元文(1977)食べ物の味:その評価に関わる要因. 調理科学, 10:97-101.

29 高橋節子, 久野三智子, 西澤光輝, ほか.(2000)米飯の食感を評価する新測定法と食味特性. J Appl Glycosci, 47:343-353.

- 30 辻昭二郎 (1985) 米飯粒のテクスチャーとその老化にともなう変化の検討 多重バイト試験による米飯粒の物性の検討と食感との関連(第1報). 日本食品工業学会誌, 32:386-390.
- 31 丸山悦子, 東紀代香, 梶田武俊 (1983) 飯の物理化学的特性と食味評価の関係. 家政学雑誌, 34:819-825.
- 32 Ayabe S, Kasai M, Ohishi K, et al. (2009) Textural properties and structures of starches from Indica and Japonica rice with similar amylose content. Food Sci Technol Res, 15:299-306.
- 33 鈴木綾子 (1999) 澱粉質食品の調理科学的研究:澱粉の構造と糊化・老化性. J Appl Glycosci, 46:65-74.
- 34 Hibi Y, Kitamura S, Kuge T (1990) Effect of lipids on the retrogradation of cooked rice. Cereal Chem, 67:7-10.
- 35 池田ひろ (2001) 炊飯過程中に溶出する糖成分の動向と米飯の食味について. 日本家政学会誌, 52:401-409.
- 36 雑賀慶二 (2005) “おいしいコメはどこがちがうか” (農文協), 農山漁村文化協会, 東京, pp 28-43.
- 37 Panasonic (2013) “プレスリリース スチーム&可変圧力 IH ジャー炊飯器「SR-SPX3 シリーズ」を発売”, Panasonic, <<http://news.panasonic.com/jp/press/data/2013/03/jn130326-1/jn130326-1.html>>. [accessed 24 February 2017]
- 38 宮尾学 (2013) シャープ株式会社「ヘルシオ炊飯器」の開発. 神戸大学大学院経営学研究科 Discussion paper.
- 39 貝沼やす子, 関千恵子 (1983) 米の調理に関する研究 (第3報) 炊飯条件として (沸騰に至るまで) の加熱速度. 家政学雑誌, 34:690-697.
- 40 松永暁子 (1989) 加熱過程における米粒澱粉の変化について. 茨城女子短大紀要, 16:113-126.
- 41 Hanashiro I, Ohta K, Takeda C, et al. (2004) Leaching of amylose and amylopectin during cooking of rice grains and their effect on adhesiveness of cooked rice. J Appl Glycosci, 51:349-354.
- 42 Shepherd GM (2014) “美味しさの脳科学: においが味わいを決めてい

る”，[小松淳子訳]合同出版，東京。

- 43 Dunkel A, Steinhaus M, Kotthoff M, et al. (2014) Nature's chemical signatures in human olfaction : A foodborne perspective for future biotechnology. *Angew Chem, Int Ed Engl*, 53:7124-7143.
- 44 Champagne EI (2008) Rice aroma and flavor : A literature review. *Cereal Chem*, 85:447-456.
- 45 Maraval I, Mestres C, Pernin K, et al. (2008) Odor-active compounds in cooked rice cultivars from Camargue (France) analyzed by GC-O and GC-MS. *J Agric Food Chem*, 56:5291-8.
- 46 Yang DS, Shewfelt RL, Lee K-S, et al. (2008) Comparison of odor-active compounds from six distinctly different rice flavor types. *J Agric Food Chem*, 56:2780-2787.
- 47 Bryant R, McClung A (2011) Volatile profiles of aromatic and non-aromatic rice cultivars using SPME/GC-MS. *Food Chem*, 124:501-513.
- 48 Buttery RG, Turnbaugh JG, Ling LC (1988) Contribution of volatiles to rice aroma. *J Agric Food Chem*, 36:1006-1009.
- 49 Fujita A, Kawakami K, Mikami T, et al. (2005) Difference in aroma compounds and quality variation in milled rice from 1996 to 2001. *J Oleo Sci*, 54:311-316.
- 50 Fujio Y, Wada K, Furuta H, et al. (1991) Changes in the aroma of fresh and stored cooked rice during warm keeping. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 38:1137-1142.
- 51 Yasumatsu K, Moritaka S, Wada S (1966) Studies on cereals Part V : Stale flavor of stored rice. *Agric Biol Chem*, 30:483-486.
- 52 Monsoor MA, Proctor A (2004) Volatile component analysis of commercially milled head and broken rice. *J Food Sci*, 69:C632-C636.
- 53 Kobayashi F, Narahara Y, Ohmori K, et al. (2010) Effects of storage with a deoxygenating agent and a nitrogen-atmosphere package on the quality, especially flavor, of cooked stored rice. *Food Sci Technol Res*, 16:175-178.

- 54 安信淑子, 大藪一, 堀内美和, ほか. (1995) 米飯の臭いの研究--炊飯時の追い炊き条件の違いによる古米臭抑制効果. *Natl Tech Rep*, 41:98-104.
- 55 平田孝一(1998)“ライスフレンド物語—米飯職人を育てた連続炊飯機”, 幸書房, 東京.
- 56 平田孝一 (2011) 米の話 (第 11 回) 米の加工利用 (1) 業務用炊飯 (2) 米飯商品開発繁栄の時代・米飯商品作りは炊飯システムから生まれた. *食品と容器*, 52:392-397.
- 57 今中鏡子, 加藤集子, 川野純子, ほか. (2006) 炊飯米の形態学的研究 : 加熱過程の差, 品種による差, 炊飯量の差における炊飯米粒組織の観察. *広島文化短期大学紀要*, 39:7-25.
- 58 伊與田浩志 (2008) 過熱水蒸気オープンってどうなってる?. *日本機械学会誌*, 111:956-957.
- 59 宮武和考 (2011) 過熱水蒸気特性を利用した食品加工, 環境浄化への応用について. *混相流*, 25:117-124.
- 60 佐古圭弘, 谷口元昭 (2001) 穀類を連続的に蒸煮炊飯するための装置. 特許第 3172519 号.
- 61 Nelson N (1944) A photometric adaptation of the somogyi method for the determination of glucose. *J Biol Chem*, 153:375-380.
- 62 Somogyi M (1945) A new reagent for the determination of sugars. *J Biol Chem*, 160:61-68.
- 63 DuBois M, Gilles KA, Hamilton JK, et al. (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal Chem*, 28:350-356.
- 64 大田原美保, 畑江敬子, 島田淳子 (1995) 米飯の老化感の客観的評価. *日本家政学会誌*, 46 (9) :841-848.
- 65 玉城武 (1999) “新食品学実験法” (高橋幸資, 和田敬三編), 朝倉書店, 東京.
- 66 朝野目謙之, 後藤元, 森谷真紀子, ほか. (2011) 水稻新品種「つや姫」の食味特性評価:第 4 報 分光測色計を使用した炊飯米の白色度評価法. 第 231 回日本作物学会紀事別号 第 231 回日本作物学会講演会要旨・資料集,

232-233.

- 67 白石真貴夫 (1994) イネ胚乳澱粉のアミロース含有率に関する育種学的研究. 大分県農業技術センター研究報告, 24:91-134.
- 68 大石恭子, 香西みどり, 島田淳子, ほか. (2006) 炊飯過程の成分溶出に及ぼす酢酸添加の影響. 日本調理科学会誌, 39:2.
- 69 Engel W, Bahr W, Schieberle P (1999) Solvent assisted flavour evaporation - a new and versatile technique for the careful and direct isolation of aroma compounds from complex food matrices. *Eur Food Res Technol*, 209:237-241.
- 70 Yang DS, Lee KS, Jeong OY, et al. (2008) Characterization of volatile aroma compounds in cooked black rice. *J Agric Food Chem*, 56:235-240.
- 71 Sukhonthara S, Theerakulkait C, Miyazawa M (2009) Characterization of volatile aroma compounds from red and black rice bran. *J Oleo Sci*, 58:155-161.
- 72 Jezussek M, Juliano BO, Schieberle P (2002) Comparison of key aroma compounds in cooked brown rice varieties based on aroma extract dilution analyses. *J Agric Food Chem*, 50:1101-1105.
- 73 Chen S, Xu Y, Qian MC (2013) Aroma characterization of Chinese rice wine by gas chromatography-olfactometry, chemical quantitative analysis, and aroma reconstitution. *J Agric Food Chem*, 61:11295-11302.
- 74 Zeng Z, Zhang H, Zhang T, et al. (2009) Analysis of flavor volatiles of glutinous rice during cooking by combined gas chromatography-mass spectrometry with modified headspace solid-phase microextraction method. *J Food Compos Anal*, 22:347-353.
- 75 Zeng MM, Zhang LX, He ZY, et al. (2012) Determination of flavor components of rice bran by GC-MS and chemometrics. *Anal Methods*, 4:539-545.
- 76 “Flavornet and human odor space” (2016) <<http://www.flavornet.org/flavornet.html>>. [accessed 22 February 2016]
- 77 丸山悦子, 佐藤真実 (2002) 米飯の新食味評価法確立の指標. 日本食品科学工学会誌, 49:566-572.
- 78 American Chemical Society (2016) “SciFinder”, American Chemical

Society, <<https://scifinder.cas.org/scifinder/view/scifinder/scifinderExplore.jsf>>.

[accessed 6 January 2016]

79 U. S. National Library of Medicine (2016) “PubChem”, National Center for Biotechnology Information, <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>>. [accessed 6 January 2016]

謝辞

本研究に際し、終始懇切丁寧なご指導を賜りました大阪府立大学大学院 総合リハビリテーション学研究科 乾博教授に、謹んで深謝の意を表します。また副査の本学大学院 総合リハビリテーション学研究科 大関知子教授、岩城俊雄准教授からは貴重なご指摘やご助言を賜りました。深く感謝いたします。

大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科 北村進一教授には、本研究のスタート時から一貫して厳しくも温かいご指導を賜りました。心より感謝いたします。

蒸気炊飯装置の製造メーカーであります、エースシステム株式会社 代表取締役社長 佐古圭弘氏には、研究の端緒を開いていただき、研究を成し遂げるにあたり、多大なるご支援・ご尽力を賜りました。厚く御礼申し上げます。またエースシステム社員の皆様からも、終始ご協力・ご助言を賜りました。本当にありがとうございました。

エースシステム社との共同研究にあたり、ご尽力いただいた大阪府立大学産学官研究連携推進センター リエゾンオフィス 元総括コーディネーター 井上隆氏、大阪信用金庫 小阪真二氏に感謝の意を表します。

蒸気炊飯試験の実施にあたり、ご協力・ご助言いただきました大醬株式会社 代表取締役社長 河盛幹雄博士、開発部 舟橋隆明氏、黒住奈加氏に深く感謝いたします。

香気分析において、専門的な立場から貴重なご助言を賜りました長岡香料株式会社の宮里博成博士、杉本圭一郎博士に厚く御礼申し上げます。また、蒸気炊飯装置の実用化や蒸気炊飯米の香気特性につきまして、貴重なご意見を賜りましたフジフーズ株式会社 矢辺啓司氏、柴草圭氏に心より感謝申し上げます。ヘッドスペース法の実験にあたり、ご協力いただきました地方独立行政法人 大阪府立産業技術総合研究所の喜多幸司博士に深謝いたします。また、共同研究として二次元 GC を用いた香気成分の分析を引き受けてくださり、いろいろとご助言いただきました LECO ジャパン 合同会社 櫻井昌文氏、西村泰央氏に厚く御礼申し上げます。においかぎ分析

におきまして、実験から解析の仕方まで懇切丁寧にご指導・ご協力いただきました、株式会社島津テクノロジー 松田恵介氏に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、共に蒸気炊飯の実験をしてくださった大阪府立大学 大学院生命環境科学研究科 生物物理化学研究室の明瀬陽子氏、困ったときにはいつも相談に乗ってくださり、ご助言をくださった小谷口美也子氏、尼子みどり氏、鈴木志保博士、中屋慎博士、高橋良輔氏、英語の論文執筆にあたり何度もディスカッションをしてご助言をくださった Dr. Joseph Rodrigue, また香気成分の分析の基礎を共に作りあげてくれた安井沙耶氏をはじめ、生物物理化学研究室内の皆様には終始非常にお世話になりました。心より感謝いたします。

大学時代の同級生である、東海学院大学人間関係学部心理学科講師 安達悠子博士からは、終始温かい励ましと貴重なご助言をいただきました。ありがとうございました。

さらに、社員という立場のまま、学位取得をサポートしてくださった有限会社 IPE の犬飼忠彦元社長、林武社長に感謝いたします。

最後に、温かく見守ってくれた家族、とりわけ終始応援し、率直な意見をくれた父、母、弟、そして理解ある夫、麗しの愛犬たちに愛と感謝の意を表します。本当にありがとうございます。

本研究の一部は平成 22~24 年度新事業活動促進支援補助金(新連携支援事業)および中小企業庁によるものづくり補助金により実施されました。厚く御礼申し上げます。