

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H01807

研究課題名(和文) 微細化及び新しい加熱技術を基盤とした調理加工法による農産物の高度利用化

研究課題名(英文) Utilization of agricultural products by food processing and cooking methods based on atomizing and controlled-heating technologies

研究代表者

松村 康生 (MATSUMURA, YASUKI)

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：50181756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、微細化技術と新しい加熱技術を適用することにより、野菜、穀類、豆類、果実の加工特性、嗜好性、生理機能の改善が可能であるのか、明らかにすることを目的とした。様々な農産物より得られた微粒子は、良好な起泡性、乳化性を示したほか、「とろみ」剤としても優れた特性を示すことを明らかにした。また、調理工程における加熱条件を制御することにより、トマトを中心とする野菜素材から、呈味性や生理機能性に優れた食品を作り出すことが可能であることを示した。さらには、微細化処理で得られたナノファイバーの摂取により、肥満や耐糖能異常の予防・改善等の効果が得られることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究においては、様々な農産物から調製した微粒子素材を用いることにより多様な形態の食品、例えば卵黄を含まない「植物性素材のみからなるマヨネーズ」等を創出できる可能性を示した。また、微細化処理で得られたナノファイバーを摂取することにより、糖尿病等の生活習慣病の予防・改善につながることを明らかにした。さらに、調理における加熱条件の制御により、美味しく、しかも体によい成分を含む食品を創出できる可能性を示し、家電メーカーにおける高機能な調理機器開発の指針を提供した。これらの成果は、現在消費の低迷が続いている、野菜や果実の消費拡大を推進する基盤的技術の開発につながると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The aim of this project is to evaluate the possibility that atomizing or grinding technologies and controlled-heating technologies improve applicability to processed foods, palatability and bio-functions of vegetables, cereals, beans and fruits. Fine particles from various agricultural products exhibited high foaming and emulsifying ability, and proved to function well as thickening agents. Controlled-heating in cooked process could produce foods with high palatability and bio-functions from tomato and other vegetables. Intake of nano-fibers obtained by grinding from dietary fibers was shown to reduce the risk of obesity and diabetic.

研究分野：食品科学、コロイド科学、界面科学

キーワード：調理と加工 農産物の微細化 食物繊維ナノファイバー 加熱調理 風味や嗜好性の向上 とろみづけ
起泡性と乳化性 腸内環境改善

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

我が国における野菜、穀類、果実の消費は、20~40代を中心に低い水準にあり、食生活を通して生活習慣病を予防し、かつ我が国の農業振興を推進する観点から、非常に大きな問題となっている。この問題を解決するために、これらの食材の加工・調理を通して、バラエティに溢れた魅力的な食品を創出することが求められている。近年、微細化技術及び新しい加熱技術の開発にともない、これら技術を基盤とした調理加工法の確立が望まれていたが、それを実現するための態勢、すなわち、それら技術に関する知識と経験をもつ専門家、調理科学分野・食品科学分野の専門家、そして調理器具を生産する家電メーカーの技術者の協力態勢が整っていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、微細化技術と新しい加熱技術を適用することにより、野菜、穀類、豆類、果実の加工特性、嗜好性、生理機能の改善が可能であるのか、明らかにすることを目的とした。また、調理器具製造を業務とする家電メーカーの協力を得て、対象とする新しい技術を調理現場において利用可能なレベルにまで発展させることを試みた。

3. 研究の方法

(1) 乾式・湿式微粒子化装置による農産物の微細化

市販の乾式・湿式微粒子化装置を用いて、様々な農産物の微粒子化、微細化を行った。これらは比較的大型な装置を使用する方法であるため、安全かつ安価な手法による食品（主に食品製造副産物）の微細化手法の確立も目指した。

(2) 微粒子化・微細化素材の食品素材としての有効性の検討

微粒子試料の基本特性として乳化性、起泡性、粒度分布、顕微鏡観察を行った。また、微粒子素材及び微細化素材のサスペンションの粘度その他の物性を検討した。さらに調理への応用としてメレンゲにおける砂糖代替、マヨネーズ様ドレッシングにおける乳化剤代替、とろみづけを行うデンプンの代替についてそれぞれの調理品を調製して、分離状態の観察や粘度の測定を行った。

(3) 加熱技術による調理

トマトを中心とする野菜素材を様々な加熱技術により調理し、その官能評価を行うとともに、美味しさを向上させる成分について解析を行った。

トマトをミキサーで破碎後、直ちに、または湯浴中で40℃に10分または30分保持した後、IHヒーター、または電子レンジで加熱調理した。そこに香味野菜等の副材料を加え、重量で約60%まで加熱濃縮後、ブレンダーで均質化し調製したものをトマトソース試料とした。40℃保持有無による風味の変化について、通常で調製したトマトソースを含んだパネルの口に、異なる調理法で調製したトマトソースのヘッドスペースガス香気を送り、ソースの味を評価する官能評価を行い香氣成分の効果を確認した。香氣成分は、ヘッドスペース-GC-MS法で分析した。

また、家電メーカーの協力により、IHヒータークッキングを用いて、いくつかの野菜を組み合わせて調理した際の生理機能成分 oxo-decanoic-acid (ODA) の生成量を測定した。

(4) 微細化素材であるナノファイバーの生理機能の検証

セルロースナノファイバーの経口摂取による生理作用を検討するために、長期的な効果と短期的な効果を検討した。長期的な摂取による影響を検証するために、典型的な欧米食モデルとして用いられる高脂肪高シヨ糖飼料にカルボキシメチルセルロースナノファイバー(CMCNF)を配合してマウスに8週間摂食させる混餌反復投与試験を行った。粉末状の高脂肪高シヨ糖飼料（脂質および糖質の含有率は、それぞれカロリー換算で45%、35%）に α -セルロースを給餌したC群と、CMCNFを3% (w/w)混合した飼料を給餌したCMC群とした。8週間の給餌後、糖負荷試験を行った。8時間絶食後、2 g/ kg B.W.のD-グルコース溶液を経口投与し、投与15、30、60、120分後の血糖値を測定した。また、グルコース投与30分前と投与10分後に採血を行い、血中インスリン濃度を定量した。絶食後、麻酔下で採血し、絶食時血糖値の測定を行った。屠殺後、臓器を摘出し、皮下脂肪（鼠径部脂肪）、腸間膜脂肪、精巣周囲脂肪、腎臓周囲脂肪、肝臓、胆のう、盲腸内容物の重量、大腸の長さを測定した。肝臓標本は、液体窒素にて急速凍結させた後、-80℃にて保存し、組織中のトリアシルグリセリドの定量を行った。また、total RNAを調製後、リアルタイムPCRにて遺伝子発現を定量した。

短期的効果の検証は、油の強制経口投与に際してCMCNFを共存させたときの吸収総トリアシルグリセリド量を定量し、CMCNFの有無における油の吸収性を比較した。

4. 研究成果

(1) 乾式・湿式微粒子化装置による農産物の微細化

穀類、イモ類、野菜類、豆類、藻類、キノコ類の計17種類の食品素材を、乾物はそのまま、水分が多いものは乾燥させてから粉碎機および乾式微粒子化装置ドライバーストで数十 μ mの微粒子試料を調製した。また、高圧ホモジナイザーや湿式微粒子化装置スターバーストを用

いて、様々な野菜や果実の微細化を行った。

そのほか、新しい手法による微細化技術の開発も行った。食品製造副産物（みかん内果皮、ぶどう果皮、小豆の皮等）を構成する植物細胞壁を、そのまま機械処理（高圧ホモジナイザーや磨砕機）にかけても中々微細化は進行せず、ナノレベルの微細化を達成するためには何度も繰り返し機械処理を行う必要が生じる。その結果、製造コストがかさむだけでなく、得られる微細化物の重合度も徐々に低下し、増粘剤等としての利用も期待できない。

そこで、安全かつ簡便な前処理を行うことで、機械処理による微細化の促進を目指した。

研究の結果、クエン酸処理あるいはペクチナーゼ処理によりペクチンネットワークを切断することで簡便な微細化が達成されることが明らかになった。さらに、従来の大型機械ではなく、市販のブレンダーにより微細化が可能であることも示され、今後の生産性の向上が期待される。

図1にみかんの内果皮をクエン酸処理した後、ブレンダーで微細化することにより得られる微細化物の電子顕微鏡写真を示す。細胞壁構造は完全に消失し、10-20 nmのナノファイバーが均質に分散している様子が見られる。今回の研究により、食品製造副産物から安全かつ簡便な前処理と機械処理により、このような非常に均質なセルロースナノファイバー/ペクチン/ヘミセルロースの混合懸濁液が製造可能であることが示された。

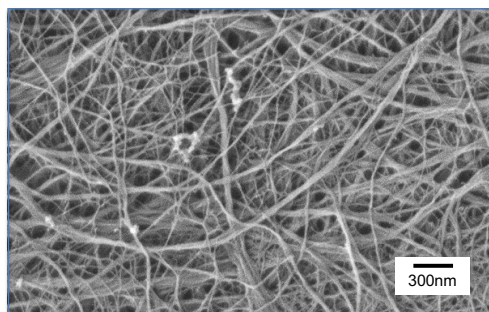


図1 みかん内果皮から製造したナノ粉砕物

本成果により、従来家畜の餌や産業廃棄物として処理されていた大量の食品製造副産物から新たな食品増粘剤が製造可能であることが示された。また、この成果を基に、グラインダー機構の調理器具により野菜や果実を微細化し、濃厚で口当たりがよく、呈味性も増強したジュースやスムージーを調製することに成功した。

(2) 微粒子化・微細化素材の食品素材としての有効性の検討

まず、様々な微粒子化素材について、その「ピッカリング」安定化効果を検証した。その例として、ここでは、果実の微粒子化素材であるウメとアボカドの微粒子の結果について述べる。

両素材の微粒子を水中に懸濁し、油と混合しエマルジョンの調製を試みた。同時に、油に粒子を懸濁し水と混合する方法でも調製を試みた。微粒子の種類、分散させる相の違いによらず、エマルジョンを調製できることが示された。これは、油水界面に微粒子が吸着し、強固な吸着膜によって油滴の合一を防ぐ、ピッカリング安定化効果によって乳化状態が創出されたことを示す。図2にウメとアボカド微粒子より調製後、24時間経過した際のエマルジョンの外観を示す。調製直後は均一に分散した乳化油滴が、ウメ微粒子の場合には上層に集まり、いわゆるク

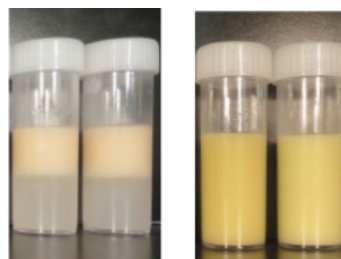


図2 ウメ、アボカド微粒子より調製したエマルジョンの外観

微粒子濃度2%、油分30%。P/W、P/Oは、微粒子をそれぞれ水相、油相に分散させ乳化したエマルジョンを指す。調製後、24時間経過した時の外観を示す。

リーミングを示しているのに対し、アボカドの場合には、そのようなクリーミングは観測されず、良好な分散状態が維持されていた。さらにアボカド微粒子の場合には、2週間以上保存しても油滴の合一がほとんど起こらず、特に微粒子を油の方に分散して調製したエマルジョンにおいて安定性が高かった。この結果は、脂溶性成分を含むアボカド粒子の場合、予め油相に分散させてエマルジョンを調製した方が優れた特性のエマルジョンを調製できることを示しており、産業応用上も意義深い成果である。共焦点レーザー顕微鏡、電子顕微鏡観察の結果、ウメ、アボカド微粒子で調製したエマルジョンで、微粒子中から漏出したと思われる多糖類のファイバーが乳化油滴の周りを取り囲んでいる様子が観察された。

次に、応用的あるいは調理学的観点から、様々な農産物由来の微粒子の加工性を検証した。微粒子を2-10%で水に懸濁した分散液について、起泡性を測定した結果、米は起泡せず、大豆と干し椎茸は起泡性がみられたが濃度依存性が異なった。起泡性に関わる要因として見かけ密度と吸水力を測定した結果、みかけ密度が小さいほど吸水力が高い傾向がみられ、起泡性ももっとも高かった干し椎茸の密度が最も小さかった。乳化性はいずれも試料濃度をあげると向上し、油濃度を高くすることで粘度が高い安定なエマルジョンが得られた。生メレンゲについては干し椎茸が砂糖を1/2にした場合の代替効果が大きく安定だったが、スポンジケーキにすると微粒子添加効果がみられなかった。マヨネーズ様ドレッシングは、油相体積分率65%の場合、干し椎茸、ひじき、モチ米、とうもろこしの試料それぞれの濃度を8~10%にすることで調製可能であり、卵不使用でもマヨネーズ相当の油を安定に分散できた。試料濃度4-12%として加熱したとろみ試料について粘度を測定した結果、一般にとろみ付けに用いられる片栗粉やコー

ンスターチに相当する粘度が得られた。ただし、にんじん、ごぼう、大豆は粘性が得られなかった。片栗粉に比べると干し椎茸やとうもろこしなどの微粒子による増粘効果の濃度依存性は小さく、また温度依存性も小さかった(図3)。加熱調理時と喫食時の粘度差が小さいことは調理上扱いやすい。さらに片栗粉と異なり調味料添加による粘度の低下がほとんどないことが分かった。以上の粘性の特徴は、調理加工上、有用であり、使いやすさという点で、これら微粒子が有望な食品素材であることを示している。

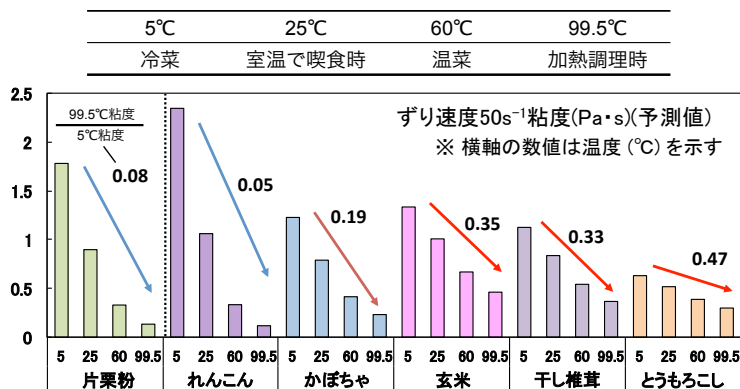


図3 微粒子から調製した「とろみ」試料の各温度における粘度

(3) 加熱調理による呈味性・生理機能性の向上

トマト破碎物に、40°C保持無し、40°C10分または30分保持操作を加えた後、副材料を混合し調製したトマトソースの香气成分を、SPME-GC-MSで分析した。6-methyl-5-hepten-2-one (MHO)は量的に最も多い主要香气成分で、さらにその量は、40°C保持時間が長いほど有意に多く生成されることが示された。また、hexanalや(E)-2-hexenalなどリノール酸やリノレン酸由来の青臭い成分や、カロテノイド由来のgeranylacetone、damascenoneにおいても、含量は少ないが40°C30分の保持操作により、いずれも増加傾向が認められた。すなわち、トマトソースを作る際、40°Cに一定時間保持する操作を加えることにより、酵素の活性が高まり、トマトの主要香气成分が生成されることが示された。これらの香气成分の上昇によって風味が向上するのではないかと推察されたため、それを実証するために40°C10分保持したソースの香りを与えながら、40°C保持なしのソースをパネルに味わってもらい、官能検査によって評価してもらった結果、パネル13人のうち11人が、40°C10分保持したソースの香りがあった方が、甘味やフレッシュさが強く、味のバランスが良いと評価した。以上の結果、味成分でなく香气成分による呈味向上効果が示唆された。そこで最も量の多い香气成分MHOに着目し、官能評価でその効果を調べた。

40°C10分保持操作を加えて調製したトマトソース香气中の含有量に相当する量(67 ppb)のMHOを、40°C保持無しソースに添加したものと、無添加のソース(コントロール)を試料とした。パネル(22から24歳男女9人)には、全口腔法を用いて、甘味、酸味、調和、青臭さについて、6段階尺度採点法で評価してもらった。その結果、MHOを添加したソースの方が、1%の有意水準で、トマト特有の青臭さと酸味が弱く、甘味が強く感じられ、調和のとれた味質であると評価された(図4)。以上の結果より、40°Cに一定時間保持する操作を加えることによりトマトソースの風味が向上する要因の一つとして、MHOの増加が寄与していることが明らかとなった。

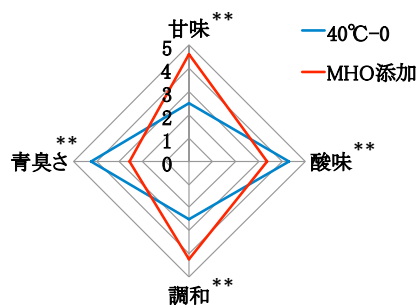


図4 6-methyl-5-hepten-2-one (MHO)添加によるトマトソースの風味向上

[40°C-0]: 40°C保持無しトマトソース(コントロール)
 [MHO添加]: コントロールにMHO添加(67 ppb)
 官能評価: 6段階尺度採点法、統計解析: t検定 **: p<0.01

調理による生理機能成分の増強という点に関しては、家電メーカーの協力により、IHヒーターを用いて、いくつかの野菜を組み合わせることで調理した際の生理機能成分 oxo-decanoic-acid (ODA)の生成量を測定した。その結果、単独では、ODAをほとんど生じない、あるいは少量のみ生成する野菜でも、2種類、あるいは3種類組み合わせることでODAの量が飛躍的に上昇する場合があることを見出した。ODAについては、リポキシゲナーゼなどの酵素がリノール酸を基質として合成すると考えられているが、野菜には、酵素あるいは基質のどちらかが豊富に含まれているものがあり、その両者を併せて調理することで酵素と基質の出会いが生じ、ODAが効率的に生成すると考えられる。複数の食材による、酵素反応の活性化は非常に興味深い現象であり、産業応用上も価値が高い。なお、このODA生成の結果については、知財の関係もあり現在のところ学会や論文発表などは予定していない。

(4) 微細化素材であるナノファイバーの生理機能の検証

動物実験において、摂取量は、カロリー換算した場合に2群において有意な差は観察されなかった。しかし、CMCNF群において、α-セルロース群に対して8週齢以降体重増加が有意に

抑制された。12 週齢になったマウスの皮下脂肪として鼠径部白色脂肪組織、内臓脂肪として腸間膜脂肪、精巣周囲脂肪、腎臓周囲脂肪を測定したところ、いずれの脂肪組織についても、CMCNF 群でその蓄積が有意に抑制された (図 5)。また、肝臓重量は CMCNF 群で有意に減少し、胆のう重量および盲腸内容物重量は有意に増加した。さらに、大腸は、CMCNF 群で有意に伸長していた。肝臓中のトリアシルグリセリド量は、肝臓 1g あたりの量に変化は見られなかったが、肝臓全体における量は、肝臓重量の減少に伴って CMCNF 群で有意に減少した。耐糖能試験の結果、糖負荷前の空腹時血糖値については差が見られなかったものの、糖負荷後の血糖値上昇が CMCNF 群で有意に抑制された (図 6)。糖負荷前後に採血を行い、血中インスリン濃度を定量したところ、糖負荷前、糖負荷後ともに CMCNF 群で血中インスリン濃度が低下していた。絶食後の空腹時血糖値の測定を行ったところ、群間に優位な差は認められなかったものの、CMCNF 群でやや減少傾向が見られた。

肝臓における脂質代謝関連酵素の発現を調べると、脂肪酸合成酵素である FAS、ACC-1 の中で、FAS では群間に有意差は見られなかったが、ACC-1 では CMCNF 群で有意な発現増加が見られた。また、 β 酸化関連酵素である ACOX、Cpt-1a についてはどちらも CMCNF 群で有意に発現が増加していた。一方、糖代謝関連酵素の発現においては、糖新生関連酵素である PCK1、解糖系関連酵素である PFK1 のいずれについても群間に有意な差は認められなかったが、いずれも CMCNF 群でやや発現が増加する傾向が得られた。

マウスに対する CMCNF 強制経口投与試験を行い、血中トリグリセリド濃度を定量した。投与前 (t=0) の血中トリグリセリド濃度を 100 とした時の相対値で示した時、CMCNF 群において脂質の吸収が有意に抑制された。

これらの結果から、CMCNF の長期的な経口摂取は糖質および脂質の代謝調節を介して肥満や耐糖能異常の予防・改善といった機能性を発現すること、さらに、CMCNF の単回摂取は油滴との相互作用を介して脂質の吸収を抑制することが示唆された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 谷澤容子、矢吹実奈子、内海麻衣、松宮健太郎、松村康生、香西みどり、微細化された各種食品素材の起泡性および乳化性の検討、日本調理科学会誌、査読有り、61 巻、2018、26-36。DOI なし。オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難。

[学会発表] (計 18 件)

- ① 谷 史人、Nano-fibrillated cellulose as a soft matter to change the gastrointestinal environment、The 15th Annual Meeting of Chinese Institute of Food Science and Technology (招待講演)、2018 年
 ② 谷澤容子他 4 名、微細化農産食品のフレンチメレンゲ調理への利用検討、日本家政学会年次大会、2018 年
 ③ Ho Hsinhsuan 他 2 名、An avocado powder-stabilized emulsion –Physical property and

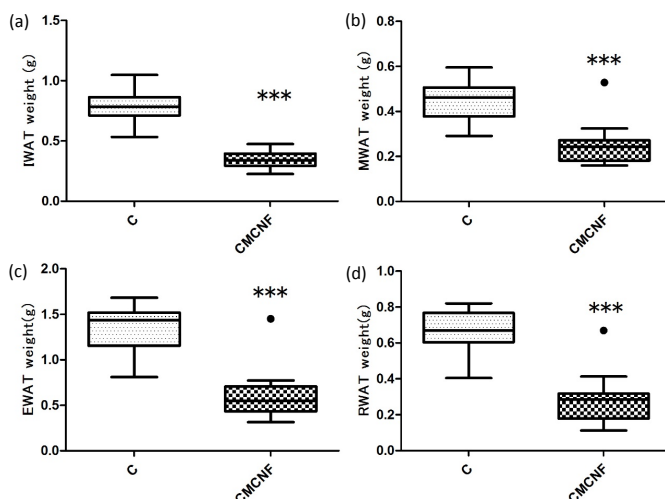


図5 脂肪組織重量の比較: (a)皮下脂肪 (b)腸間膜脂肪 (c)精巣周囲脂肪 (d)腎臓周囲脂肪の重量。whiskers: tukey method, unpaired t test, *** $p < 0.001$ vs. C group

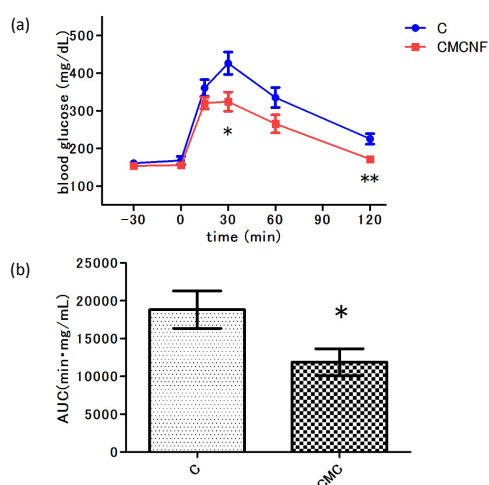


図6 耐糖能の比較: (a)耐糖能試験時の血糖値の経時変化 (b) (a)のグラフにおける曲線以下の面積(AUC)。Mean \pm SEM, Unpaired t test, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ vs. C group

emulsification mechanism、Food Colloids 2018 Conference、2018 年

④ 金島萌恵他 5 名、調理条件がトマトソースの香り成分や風味に与える影響、日本食品科学工学会第 64 回大会、2017 年

⑤ Ho Hsinhsuan 他 4 名、Fruit particles toward food-grade Pickering emulsions、The 2nd Asian Conference on Oleo Science (ACOS2017) The Japan Oil Chemists' Society、2018 年

⑥ 松宮健太郎、ミクログルの乳化性と起泡性 -Mickering 安定化機構による食品加工機能性の向上、第 28 回食品ハイドロコロイドシンポジウム (招待講演)、2017 年

⑦ 谷 史人、消化管におけるセルロースナノファイバーの生理機能と安全性の検証、ナノファイバー学会第 7 回年次大会 (招待講演)、2016 年

⑧ 谷澤容子他 4 名、微細化農産食品の調理加工特性、日本食品科学工学会第 63 回大会、2016 年

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名： 香西みどり

ローマ字氏名： **KASAI Midori**

所属研究機関名： お茶の水女子大学

部局名： 基幹研究院

職名： 教授

研究者番号 (8 桁)： 1 0 2 6 2 3 5 4

研究分担者氏名： 阿部賢太郎

ローマ字氏名： **ABE Kentaro**

所属研究機関名： 京都大学

部局名： 生存圏研究所

職名： 准教授

研究者番号 (8 桁)： 20402935

研究分担者氏名： 松宮健太郎

ローマ字氏名： **MATSUMIYA Kentaro**

所属研究機関名： 京都大学

部局名： 農学研究科

職名： 助教

研究者番号 (8 桁)： 60553013

研究分担者氏名： 谷 文人

ローマ字氏名： **TANI Fumito**

所属研究機関名： 京都大学

部局名： 農学研究科

職名： 教授

研究者番号 (8 桁)： 70212040

研究分担者氏名： 久保田紀久枝

ローマ字氏名： **KUBOTA Kikue**

所属研究機関名： 東京農業大学

部局名： 総合研究所

職名： 教授

研究者番号 (8 桁)： 90008730

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。