

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450377

研究課題名(和文) 高品質化と高効率化を実現する革新的粉末食品製造法の開発：誘導帯電バインダの利用

研究課題名(英文) Development of an effective processing method for quality powdered food: an application of charged binder by electrostatic induction

研究代表者

五月女 格 (Sotome, Itaru)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・食品研究部門食品加工流通研究領域・上級研究員

研究者番号：90469833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：粉末食品はダマの発生を防止するために顆粒状に造粒されているものが多い。食品の造粒ではバインダとして多糖類水溶液等を粉末に添加することが多いが、バインダ使用量を削減できれば加工所要時間が短縮され、プロセスの効率化と製品の高品質化が期待できる。本研究では流動層造粒におけるバインダ液滴を帯電させることにより、粉末粒子とバインダ液滴間に静電気が働き、プロセスが効率化されるか検討した。バインダ液滴を粉末と異極に帯電させた場合に、少ないバインダ添加量で顆粒が形成される傾向がみられた。しかしながら粉末が持つ電荷が不安定であったことから、造粒時の粉末の電荷を別途制御する技術が必要であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Variety of powdered food products are agglomerated to granule form to prevent lumping. Aqueous solutions of polysaccharides are usually added to the powder as binder for the granulation of food materials. Reducing the amount of binder expectedly shortens the processing time for the granulation and successive drying, which leads the improvement of process efficiency and product quality. In this study, the effect of electrostatic charge of binder droplets on the granule forming process in fluidized bed was investigated by applying electrostatic induction to a spraying nozzle for binder solution. The necessary amount of binder solution tended to decrease when the binder droplets were charged in opposite polar to the powder materials. However it was clarified that the electrostatic charge of the powder materials were unstable during the granulation process, hence controlling of powder charge is necessary for the further improvement of the granulation process using electrostatic force.

研究分野：食品工学

キーワード：粉体加工 造粒 流動層 誘導帯電

1. 研究開始当初の背景

インスタントスープおよび飲料などの粉末食品ならびに医薬品等は、微粉末の状態では使用時に水や湯に溶解する際にランピング(ママコ、ダマ)を起こしやすく、また流動性が低く飛散性が高いため、輸送、計量および充填が難しいという問題がある。この問題を解決するために多くの粉末食品や医薬品、さらには農薬、肥料および飼料に対して、粒子を結着させ顆粒状にする造粒操作が行われている。造粒方法には攪拌造粒、押し造粒など様々な方法があるが、現在では下方から気体を流し流動状態になった粉体に対して、バインダ(水、多糖類水溶液等)を噴霧し粒子を結着させた後、乾燥させる流動層造粒が、造粒物の溶解性の高さから食品、医薬品等に対して広く用いられている。

流動層造粒ではバインダの時間当たり噴霧量を増加させると造粒に要する時間が短縮されるが、粒度分布が広くなり粗大粒が形成されやすくなるため、バインダ噴霧量を小さく設定し、造粒品の粒度が設計値に達するまで造粒を続ける手法が一般的である。また造粒後は顆粒含水率が高くなるため引き続き流動層により乾燥が行われるが、乾燥時における食品の変質を抑制するため、如何にバインダ添加量を減少させ乾燥時間を短縮するかが課題となっていた。

流動層造粒等のプロセスではバインダ液滴によって粉末粒子を濡らして、粒子同士を液体架橋させるが、バインダ液滴と粉末粒子の衝突頻度にプロセスが律速されることから、これまでにバインダの噴霧条件や粉末の流動条件等、バインダ液滴と粉末粒子の衝突頻度に影響を与えると考えられる因子がプロセスに与える影響について、多くの研究者によって検討されてきている。一方、研究代表者等は流動層造粒時において、粉末が流動等により強く帯電しているとみられる現象が起きていることに着目し、粉末の粒子に働く静電気力を造粒プロセスに応用できる可能性があると考えた。バインダ液滴を粉末粒子とは異極に帯電させることによりこれらの間に静電引力(クーロン力)が働き、バインダ液滴と粉末粒子の衝突頻度が向上することにより造粒プロセスの効率化が期待された。

2. 研究の目的

本研究では、流動層造粒におけるバインダ液滴の帯電が、顆粒の成長におよぼす影響について明らかにし、流動層造粒プロセスの効率化に資する基礎的知見を得ることを目的とした。まず流動層造粒におけるバインダ液滴の電荷を制御する手法として、バインダ噴霧ノズル近傍に電極を設置して高電圧を印加することによりバインダ液を帯電させる誘電分極について検討し、流動層内で安定的に使用可能な電極の開発および使用条件の導出を行った。さらに前述の電極を設置した

流動層造粒機を用いて食品粉末の造粒を行い、高電圧の印加が顆粒の生成過程に及ぼす影響について調べた。

3. 研究の方法

(1) 実験材料

造粒の原料にはトウモロコシデンプン(ホワイト、日本コーンスターチ株式会社) 800.0 g およびデキストリン(サンデック#70 (DE: 6~8)、三和澱粉工業株式会社) 200.0 g を混合した試料を用いた。トウモロコシ澱粉は含水率を 10.0%w.b. に、デキストリンは含水率を 5.0%w.b. に調整して用いた。

(2) 流動層造粒機

実験に用いた造粒装置の概略図を図1に示す。造粒容器はアクリル樹脂製であり、上部は内径 250 mm の円筒形、下部は円錐台形で底部の内径は 100 mm となっている。容器の底部には整流板およびステンレス鋼網(120 メッシュ)が設置されている。粉体試料を流動させる空気は、装置外部から空気圧縮機により供給される。空気圧縮機から送風された空気は、除湿された後、流量制御器を通して一定流量にて造粒装置に供給される。造粒装置に供給された空気は、ヒータにより加熱されて造粒容器に送風される。造粒容器内で粉体試料の流動に使用された空気は、造粒容器上部に設置された4本のバッグフィルタを通して装置外部に排出される。それぞれのバッグフィルタに付着した粉体は、一定時間毎に圧縮空気により順次払い落とされる。

造粒容器には底部より高さ 200 mm の位置にサンプリングノズルが取り付けられている。サンプリングノズルは長さ約 150 mm、直径 10mm のステンレス鋼製であり、先端から 60 mm の位置に幅 6 mm、長さ 30 mm、深さ 6 mm の溝を有している。造粒中にサンプリングノズルを造粒容器側面の挿入孔より容器内に挿入すると、流動している試料の一部がサンプリングノズルの溝に入る。サンプリングノズルを造粒容器から引き出すと、溝に入った試料を造粒容器から取り出すことが可能である。造粒容器への試料の投入および取り出

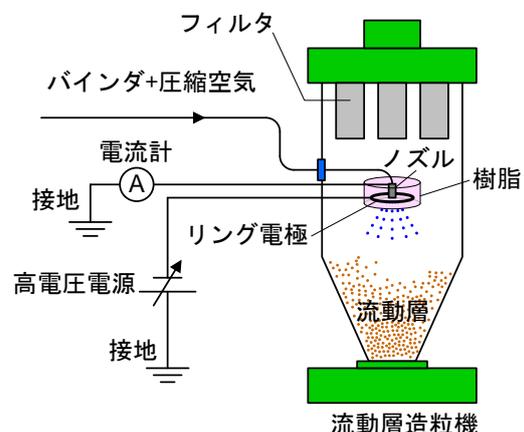


図1. 試験装置の概略図

しは、バッグフィルタを取り外して容器上部を通して行う。

(3) ノズル電極

バインダ噴霧ノズル近傍に設置する電極（ノズル電極）は、当初は外部に露出し絶縁されていないものを用いたが、ノズルと電極間が含水率の高い粉末試料によって短絡されると、電極からノズルに電流が流れ、バインダが正常に帯電しないことが判明した。このことから本研究では合成樹脂に包埋され絶縁されたノズル電極を試作して用いた（図2～5）。電極は内径が 10、12 または 16 mm、厚さが 2.0 mm の真鍮製環状電極を用いた。電極を合成樹脂 6 ナイロン (PA6) またはポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 製の部品で挟み込み絶縁した（図2）。ノズルはステンレス鋼製であり導体であることから、電極周囲は、もともと樹脂が薄い部分においても 2.0 mm 以上の厚さとなるようにして、印加電圧 30 kV において絶縁が保たれるようにした。上記樹脂製部品に、ノズルに固定するためのアルミニウム合金製の部品を取り付けた（図3）。造粒容器内のバインダ噴霧ノズルに電極を取り付け、電極上部には流動している試料粉末が堆積しないよう、円錐形の樹脂部品



図2. ノズル電極の主要部品



図3. 組み立てられたノズル電極



図4. 造粒容器内に設置されたノズル電極

を取り付けた（図4）。

電極は高電圧ケーブルを介して高電圧電源に接続した。またノズルの金属部分を接地した（図1）。

(4) バインダ噴霧条件

流動層造粒時において、バインダ液滴を効率的に帯電させるため、バインダ噴霧時における各種条件（時間当たりバインダ供給量、微粒化用空気の圧力、電極へ印加電圧、電極径等）がバインダ液滴の帯電に及ぼす影響について調べた。バインダ液滴の帯電を測定するため、図5に示す装置を構築した。バインダ噴霧ノズル近傍の電極に高電圧を印加すると、印加した電圧と同極の電荷はノズルの導体部分を通りアースへ逃げる。この時に移動する電荷をノズル電流と呼び、ノズルとアース間に設置した電流計にて測定した。バインダ液滴にはノズル電流にて流れた電荷と対極の電荷が残されており、この電荷をバインダ質量で除してバインダ液滴の比電荷を求めた。またバインダ液滴を接地されたメッシュ電極で捕捉するとバインダ液滴が持つ電荷がアースへ逃げるが、この時の電流（液滴電流）についても測定した。

バインダにはイオン交換水を用いた。バインダ流量は 10 ~ 30 g/min、噴霧圧は 0.14 ~ 0.24 MPaG、印加電圧は -5.0 ~ +5.0 kV とした。またバインダ液滴の帯電がバインダ液滴径に及ぼす影響について確認するため、バインダ粒度分布を液浸法にて調べた。液滴の受け止め液にはシリコンオイル（エレメント 14 PDMS-100J、モーメンティヴ、粘度：100 mm²/s）を用いた。

(5) 造粒条件

造粒試験は、装置予熱、原料予備攪拌、造粒および乾燥の手順で行った。造粒容器に送られる空気の温度は、全工程において 80.0°C で一定とし、流量を 0.500 m³/min（大気圧、0°C換算）とした。予熱は、造粒容器に供給される空気温度が 80.0°C に達し、さらに造粒容器の温度がほぼ安定するまで行った。装置の予熱後、温度を 30.0°C に調整した原料を造粒容器に投入し、3 分間の予備攪拌を行った。予備攪拌の後、バインダを原料に対して所定の時間噴霧し造粒を行った。造粒工程の後、引き続き試料の流動層乾燥を所定の時間行

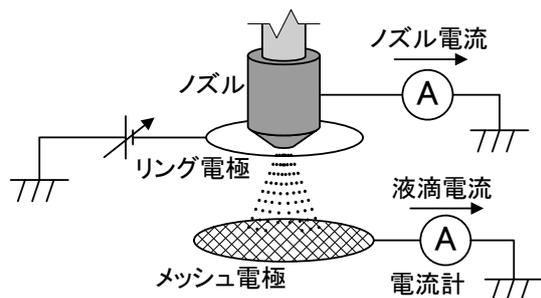


図5. ノズル電流および液滴電流測定装置

った。

造粒中は電極に-5.0、0.0 または+5.0 kV の電圧を印加した。0.0 kV の条件は対照試験であるが、電圧を印加しない場合、徐々に電極の帯電が起こり、電位が変化していくことから、対照試験においては高電圧電源の出力電圧を 0.0 kV に調整した。造粒および乾燥後の顆粒の粒度分布を、レーザー回折散乱粒度分布径 (LS 13 320、ベックマンコールター) にて測定した。試料の屈折率は 1.6 とした。

造粒中は装置に取り付けられたサンプリングノズルを用いて 1~5 分毎に 0.3~0.6 g の試料を採取し、ファラデーケージ (KQ-1400、春日電機) およびクーロンメータ (NK-1001A、春日電機) により、粉末が持つ電荷を測定した。

4. 研究成果

(1) バインダ噴霧条件と液滴の帯電

バインダ噴霧においては二流体ノズルを使用した。このときの微粒化用空気圧とバインダ液滴が持つ電荷である液滴比電荷の関係について図 6 に示す。図 6 における各種条件は、時間当たりバインダ供給量が 10 g/min、使用電極の内径が 12 mm、絶縁用樹脂が PA6 である。微粒化用空気圧が高くなる程、液滴が持つ電荷量が増加したが、これは微粒化用空気圧が高くなると液滴径が小さくなり、比表面積が増えることによって帯電しやすくなったためと考えられる。

また電極への印加電圧が高くなるほど、液滴が持つ電荷が増加した。電極に正電圧を印加した場合、液滴は負に帯電する。図 6 には印加電圧が正の場合のデータを示したが、負電圧を印加した条件においては、液滴電荷は正となり、電荷の絶対値は正電圧を印加した場合とほぼ等しかった。

液滴電流はノズル電流とは逆符号となり、絶対値はノズル電流の約 90%であった。ノズルから噴霧された液滴の全量はメッシュ電極に捕捉されないため、液滴電流はノズル電

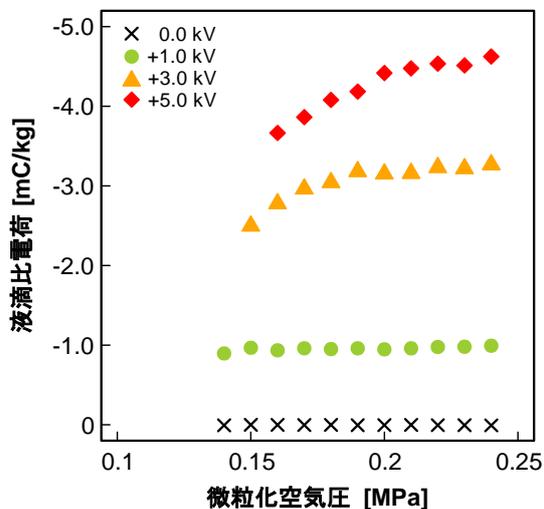


図 6. バインダ噴霧条件と液滴の帯電

流と比較して小さくなるとされている。

印加電圧が+3.0および+5.0 kV の条件では、微粒化用空気圧を低下させると、0.15~0.19 MPa の間で急激に液滴比電荷が低下したが、これは噴霧された液滴の初速度が空気圧の低下とともに遅くなり、電極の電界に捕捉されやすくなり、ノズル電極樹脂部品の表面に付着したためであると考えられる。帯電した液滴が樹脂部品表面に付着すると、樹脂部品は電極の電界を打ち消す形で強く帯電し、バインダ液滴の誘電分極が起こりにくくなったと考えられる。電極の絶縁に PTFE を使用した場合、この効果がさらに強くなり、液滴比電荷は PA6 を使用した場合と比較して 1/10 程度となった。

時間当たりバインダ供給量を増加させると、ノズル電流は増加したが、液滴比電荷は低下した。電極内径は小さい程、液滴比電荷は大きくなった。また内径が 10 mm の電極では、絶縁樹脂部品がバインダ噴流と干渉し、正常なバインダ噴霧が行えなかった。

また、バインダ液滴径の測定結果を図 7 に示す。バインダ液滴径は 20 μm 付近に中央値を持ちほぼ対数正規分布となった。時間当たりバインダ供給量が多い程、液滴径は大きくなった。ノズル電極への高電圧印加によるバインダ液滴径への影響はみられなかった。静電噴霧においては静電気力により液滴が分裂する現象が知られているが、本研究で使用した電圧の範囲では、液滴の分裂等は起こらなかったものと考えられた。

(2) 電圧印加が顆粒形成に及ぼす影響

粉末原料に対して加えたバインダ(水)の質量比に対する顆粒の成長を図 8 に示す。図 8 よりバインダ添加によって平均粒子径(体積中位径 d_{50})が増加しており、顆粒が形成されている様子がわかる。電極に-5.0 kV を印加した場合、印加電圧 0.0 kV の場合と比較して顆粒平均粒子径が造粒初期から大きくなる傾向がみられ、造粒が促進されていると考えられた。一方、電極に+5.0 kV の電圧

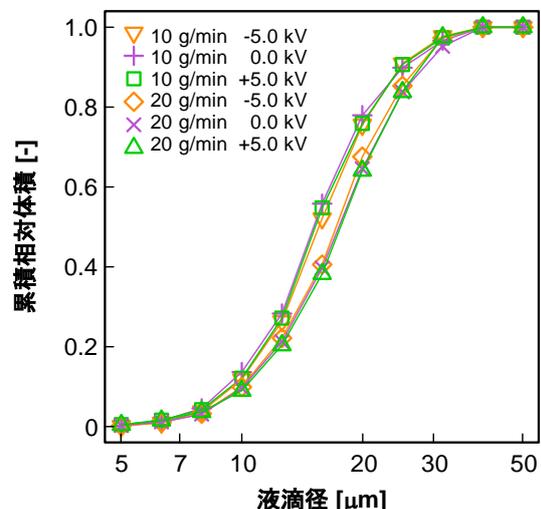


図 7. バインダ液滴の粒度分布

を印加した場合は、造粒初期には顆粒平均粒子径が小さくなる傾向がみられ、造粒が阻害されたと考えられた。

造粒が進行すると、電極に-5.0あるいは+5.0 kVの電圧を印加した場合に、印加電圧0.0 kVの場合と比較して、顆粒平均粒子径が大きくなった。造粒された顆粒中の粗粒(1.0 mm 篩上)の発生割合を調べると、図9に示すように、印加電圧0.0 kVの条件ではほぼ発生しなかったのに対して、-5.0 kV印加の条件では最終的に約4%、+5.0 kV印加の条件では約10%の粗粒が発生した。±5.0 kVの電圧を印加した条件では、造粒後期になると粉末がノズルに付着する様子が見られたが、これらの条件では粉末がノズル付近に誘引され、造粒が進行したが、粗粒も発生した可能性が考えられた。

造粒中の試料を流動層からサンプリングして、比電荷を測定した結果を図10に示す。ノズル電極に0.0 kVの電圧を印加した状態で造粒を行った場合は、粉末が持つ電荷は負となったが、これは粉末と流動層造粒機の造

粒容器との摩擦によるものと考えられた。

粉末が負に帯電していたことから、バイнда液滴が正に帯電、則ちノズル電極に負電圧を印加した場合は、バイнда液滴と粉末間に静電気が引力として働き、造粒が促進された可能性が考えられた。一方、逆の条件においては静電気力が斥力として働いた可能性が考えられた。

±5.0 kVの電圧を印加して造粒を行った条件では、液滴からの電荷の供給を受けて、粉末の電荷が変化したと考えられた。負電圧を印加した場合は、すなわちバイнда液滴が正電荷をもつ場合は、造粒中の粉末の電荷はやや正方向に変化した。一方、正電圧を印加した場合は、すなわちバイнда液滴が負電荷をもつ場合には、粉末の電荷はさらに負に変化した。

バイнда液滴からの電荷供給により、印加電圧と異極に帯電した粉末は、電極からの静電気力によってノズル付近に誘引されたと考えられた。このことによって、バイнда液滴と粉末の衝突確率が上昇し顆粒の形成は促進されたものの、一部の粉末に不均一に集中してバイнда液滴が噴霧される結果となり、粗粒が大量に発生したものと推測された。また電極に±5.0 kVの電圧を印加した条件で、ノズル電極に粉末の付着がみられたのもこのためと考えられた。

造粒初期から中期にかけては、±5.0 kVの電圧を印加した条件においては、試行毎に形成される顆粒径のばらつきが大きくなった。これは造粒初期においては粉末の帯電が主に造粒容器との摩擦によっていたため、試験室内の湿度等の環境に影響を受けていたものと推察された。造粒後期においては試行毎に形成される顆粒径のばらつきは小さかったが、造粒後期には顆粒が持つ電荷量はバイнда液滴から供給された電荷によってほぼ決定づけられていたと考えられ、環境等の影響を受けづらかったためと考えられた。静電気力により効率化された造粒プロセスを安定的に使用するためには、粉末の電荷を別途制御する必要があると考えられた。

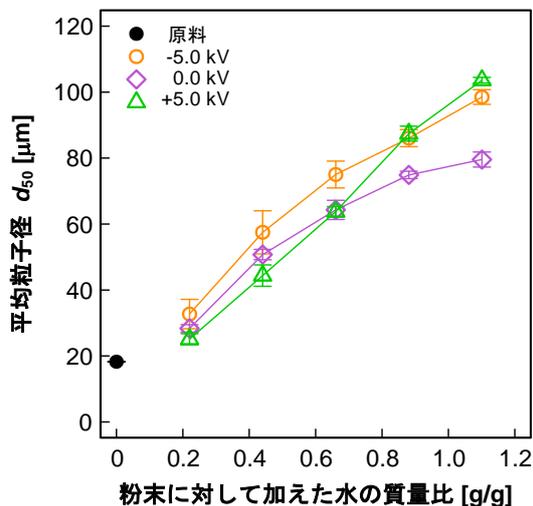


図8. バインダ添加量に対する顆粒の成長 (バーは標準誤差、n = 3)

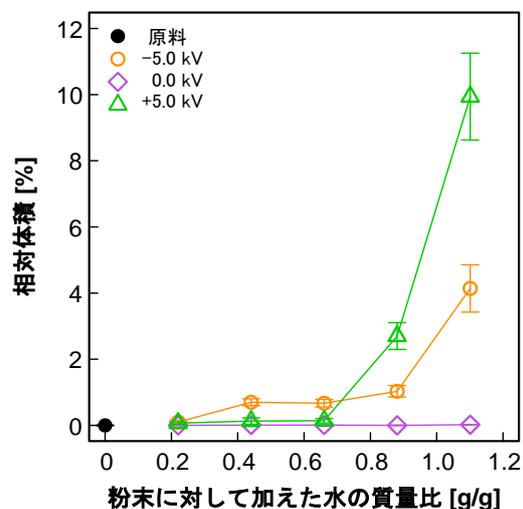


図9. 顆粒中の粗粒発生割合 (バーは標準誤差、n = 3)

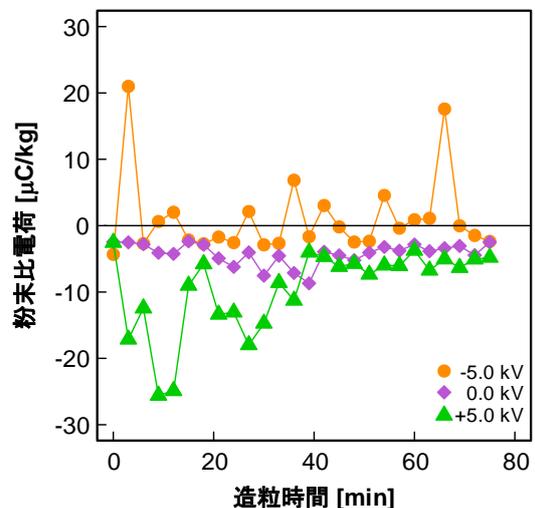


図10. 造粒中の粉末が持つ電荷の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① 五月女格、井上孝司、片桐孝夫、竹内博一、津田升子、岡留博司、五十部誠一郎、水蒸気-水二相バインダによる流動層造粒における加水量削減技術の開発、日本食品工学会誌、査読有、15巻1号、2014、25-35

〔学会発表〕（計4件）

- ① 五月女格、流動層造粒におけるバインダ液滴帯電の影響、農業環境工学関連学会2015年合同大会、2015年9月17日、岩手大学（岩手県・盛岡市）
- ② 五月女格、誘電分極バインダを用いた澱粉の流動層造粒、農業食料工学会第73回年次大会、2014年5月17日、琉球大学（沖縄県・中頭郡西原町）
- ③ 五月女格、アクアガスを利用した澱粉造粒工程におけるバインダ添加量削減技術の開発、農業食料工学会第72回年次大会、2013年9月12日、帯広畜産大学（北海道・帯広市）
- ④ 五月女格、アクアガスバインダによる流動層造粒工程の効率化、日本食品工学会第14回年次大会、2013年8月10日、京都テルサ（京都府・京都市）

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：造粒方法及び造粒装置

発明者：五月女格

権利者：国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構

種類：特許

番号：特願2013-245919

出願年月日：2013年11月28日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

五月女格 (SOTOME ITARU)

国立研究開発法人農業・食料産業技術総合研究機構・食品研究部門食品加工流通研究領域・上級研究員

研究者番号：90469833