

令和 6 年 5 月 18 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02944

研究課題名(和文)食品の水分活性を決める水の物理化学とミクロ構造

研究課題名(英文) Physical chemistry of water and micro-structure to determine the water activity of food

研究代表者

中川 洋(Hiroshi, Nakagawa)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・研究主幹

研究者番号：20379598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：澱粉の糊化を中性子準弾性散乱測定によって解析を行った結果、DSCの吸熱ピークに対応する澱粉の分子運動性の変化を検出し、分子運動性が糊化により活発になることが示唆された。また老化に伴って澱粉の分子運動性が抑制されることを見出した。赤外分光の減衰全反射サンプリング法を採用した新しい同時測定システムを開発し、食品素材の解析に適用した。その結果、澱粉の老化等に伴う構造変化を中性子小角散乱と赤外分光でとらえることができた。中性子散乱法を基軸とした各種分光測定、熱分析等の実験手法を融合した手法による食品の構造物性相関の解析は、食品のミクロ構造の解析や、食品中の水とミクロ構造の関係性の解析に有効である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水分活性は食品の保存性や品質を評価する実用的な指標であり、その有効性は広く認められており、食品加工などの現場で既に利用されている。一方、水分活性は食品の分子構造にも影響を受けるが、ナノスケール動的挙動で特徴付けられる食品構造物性(分子構造とその運動性)が食品の水和状態にどのように影響を与えるかは未解明な点が多い。本研究で解明した食品のミクロ構造と水和状態の関係性などは、食品の物性や品質をミクロな視点から理解するために重要な情報となる。

研究成果の概要(英文)：Gelatinization of starch was analyzed by quasi-elastic neutron scattering, and changes in starch molecular motility corresponding to the DSC endothermic peak were detected, suggesting that molecular motility increases by gelatinization. We also found that starch molecular motility is suppressed with retrogradation. A new simultaneous measurement system employing attenuated total reflection sampling method of infrared spectroscopy was developed and applied to the analysis of food materials. As a result, structural changes associated with retrogradation of starch were captured by small-angle neutron scattering and FT-IR. The analysis of the structure-property relationship of food products by combining various spectroscopic measurements, thermal analysis, and other experimental techniques based on neutron scattering is effective for analyzing the microstructure of food products and the relationship between water and microstructure in food products.

研究分野：食品科学

キーワード：構造食品科学 水分活性 中性子散乱 熱分析 水和 ナノ構造 澱粉の糊化・老化 蛋白質ゲル

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

水分活性は、食品と純水の水蒸気圧の比として厳密に定義された、食品の保存性や品質を評価する熱力学量である。しかし、水分活性が意味する食品中の水の状態は、水分収着等温特性で分類された結合水や自由水などによる定性的な説明にとどまっている。これまでの研究から、水の分子運動性と水分活性に一定の相関関係があることを見出している一方で、食品のミクロ構造が水の存在状態に与える影響を見積もることが水分活性の理解に重要であることが分かってきた。水の分子運動性の解析や食品のミクロ構造解析に有効な様々な計測手法を組み合わせることで、食品中の水の物理化学的状態・水和構造を可視化し、食品と水との相互作用を構造科学的に調べることが重要になってきた。食品のミクロ構造が水の存在状態に与える影響を解析することで、食品の水和状態をミクロの視点から解明し、保存性や食感といった食品機能物性を予測するための分子論的基礎を確立することが必要とされていた。

### 2. 研究の目的

食品の物性挙動を複雑にしている大きな原因の1つは水である。水は他の食品成分と様々な相互作用をし、高分子などの成分のミクロ構造と相互に影響し合う。食品の品質を特徴付けるマクロな物性(保存性や食感)をミクロ構造から理解するためには、食品中の水を基軸としてミクロとマクロの観測の関係性を解明することが重要である。また、食品中の水の物理化学特性が食品のミクロ構造によってどのように変化するかを調べることが必要である。一般に食品の構造物性評価の分析手法は、分光学的手法や電子顕微鏡観察などによるミクロ構造解析と、熱物性や粘弾性特性などのマクロ物性解析に大きく分類できる。両者は密接に関連していると考えられているものの、両者の計測手法が対象とする空間スケールには大きなギャップがある。本研究では、食品の水分状態や分子構造が物性発現(保存性や食感)にどのようにつながっているかを解明するため、そのギャップを埋めるメソスコピック領域の空間スケールの構造・ダイナミクスについて解析を行うことにした。

### 3. 研究の方法

中性子散乱等による食品中の水の分子運動、食品の分子構造、水和構造、水素結合状態の解析により、食品の水分状態を解析する。蛋白質や澱粉等について、分子構造・形態の異なる試料を用いて研究を行う。食品分析のオーソドックスな手法(水分収着等温線測定、水分活性測定、動的粘弾性測定、熱分析、赤外分光)を組み合わせることで研究を推進する。具体的な研究内容としては、食品のミクロ構造が水の分子運動性に与える影響や、水和が食品のミクロ構造や物性に与える影響などに着目して研究を進める。

### 4. 研究成果

様々な水分量の澱粉-水系の糊化を、示差走査熱量計(DSC)、フーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR)、中性子準弾性散乱測定によって解析を行った。DSCでは、水分量に依存して異なる温度域に2つの吸熱ピークが観測された。また、FT-IRでは澱粉骨格や水の振動ピークを解析し、2つの吸熱ピークとの関係性を解析した。概ね、DSCとFT-IRの相関は見られるものの、2つのピークの帰属には更なる詳細な解析が必要である。澱粉の糊化を中性子準弾性散乱測定によって解析を行った結果、DSCの吸熱ピークに対応する澱粉の分子運動性の変化を検出した。中性子準弾性散乱解析で得られる非干渉性弾性散乱強度が糊化により小さくなることから、分子運動性が糊化により活発になることが示唆される。さらに、非干渉性弾性散乱強度のQ依存性の解析では、糊化前の状態ではブロードなピークが見られたが、このピークは糊化によりなくなった(図1)。そのため、中性子準弾性散乱解析から澱粉の結晶性に由来する特徴的な分子運動性の解析ができ、またそれを指標に澱粉の糊化の分子メカニズムを調べることができるようになってきた。現在までの解析では、吸熱ピークとの相関性が示唆されるが、動的転移の原因、澱粉の構造にあるのか水分子にあるのかは、これからの詳細な解析によって明らかにする予定である。

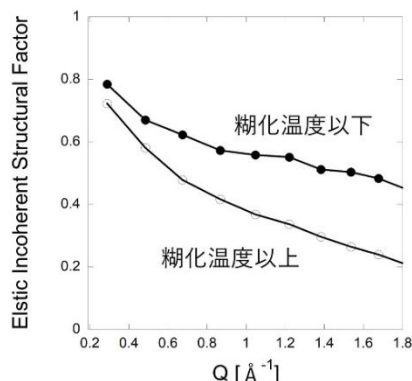


図1. 澱粉の糊化温度以下と以上における弾性非干渉性構造因子(EISF) 糊化していない澱粉では、 $Q=1.2 \text{ \AA}^{-1}$ あたりにブロードなピークが観測されるが、糊化するとこのピークが消失する。

小角散乱解析では、 $D_2O/H_2O$  のコントラストを変えることで観測される澱粉のラメラピークが糊化によって失われることを確認し(図2)、さらに中性子準弾性散乱による分子運動性の解析結果と相関があることが分かった。FT-IR や中性子準弾性散乱で得られた分子の動的情報との関係性を解析中である。また、サツマイモを用いた解析では、DSC、水分活性、破断強度などの測定を行った。この解析では、澱粉中の液体状態の水がサツマイモのマクロ物性と密接に関係することが見えてきており、今後、中性子散乱等を組み合わせることで、より詳細な解析を進める計画である。このように、澱粉の糊化について、様々な実験データを総合してミクロ構造と水和状態の関係性を解析していくための手掛かりを得ることができており、マルチメソッドによるデータの相関性に着目した解析の重要性が見えてきた。今後は水分活性の視点から、澱粉等の水分状態についてミクロ構造の観点からのさらなる解明を目指す。

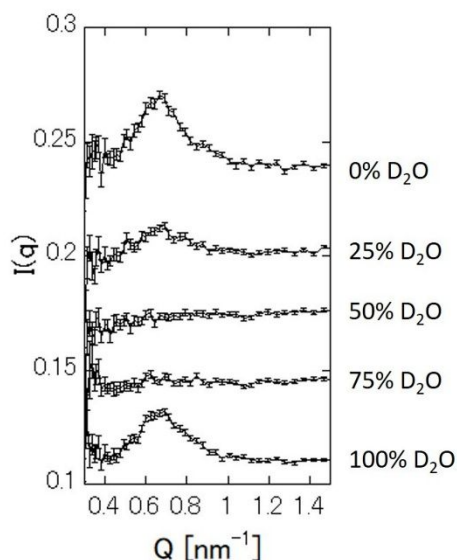


図2. 様々な $D_2O$ 濃度で水和させた澱粉の中性子小角散乱プロファイル  
澱粉のラメラ構造に対応すると考えられる散乱ピークが観測され、ラメラ構造間に水和層が存在することが示唆される。

澱粉の結晶化度はそのマクロな物性に反映されるため、結晶化度と構造ダイナミクスとの関係性は興味深い。中性子準弾性散乱を用いて、糊化した澱粉の老化に伴う分子ダイナミクスの変化を調べた。測定された中性子準弾性散乱の幅は老化に伴い狭くなり、分子運動が遅くなることが分かった。また、非干渉性弾性散乱強度は増加し、老化現象に伴い分子ダイナミクスが空間的にも抑制されることが示された。澱粉の老化に伴う分子運動性の変化と、X線回折による結晶化度の変化との相関関係を見出し、中性子準弾性散乱解析から澱粉の結晶性に由来する特徴的な分子運動性を解析するための手掛かりを得ることができた。また、結晶相と非晶質相に対応した2値分布のモデルを用いて解析したところ、老化により分子運動性の低い非晶質相の割合が増加することが示された。これら成果は、中性子準弾性散乱によって老化に伴う分子ダイナミクスの変化を捉えた初めての成果であり、食品の構造物性研究の基礎研究のみならず、食品加工や保存などの応用研究としても重要な視点を与える成果である。老化は澱粉の水和状態とも関係するため、現在、水和状態の違いと老化速度との関係性などを調べている。

力学強度・保水性・透明度が異なる卵白ゲルのナノ構造を光散乱や中性子小角散乱で調べた。光散乱ではゲル化に伴う濁度を400nmの波長の光で測定した結果、透明度が高くなるほどゲル化に伴う濁度変化は小さいことを確認した。さらに、中性子小角散乱でナノ構造を調べたところ、透明度が低いゲルは小角領域の散乱強度が強く凝集構造を取っていることが示された。一方、透明度が高いゲルは小角領域の強度が比較的抑えられ、さらに構造因子に由来すると思われるブロードなピークが観測された。これにより、透明度の高いゲルでは、ゲル内部においてそれを構成する蛋白質が比較的規則的な配置を取っていることが示唆された。このようなナノ構造の違いは卵白ゲルの保水状態とも関係すると考えられ、今後、より詳細な解析を進める計画である。このように、澱粉の糊化や卵白ゲルについて、ミクロ構造と水和状態の関係性を解析していくための手掛かりを得ることができた。今後は、澱粉や卵白ゲルの水分状態についてミクロ構造の観点からの解明を目指す。

分子間相互作用がタンパク質の物性に及ぼす影響について調べるため、リン酸ナトリウム、尿素、ドデシル硫酸ナトリウム、 $\beta$ -メルカプトエタノールのいずれかを含むタンパク質と、これら4つの物質をすべて含むタンパク質を準備し、それらの力学特性や保水性を測定した。力学強度は4つの物質をすべて含むタンパク質が最も低く、無添加のタンパク質が最も高かった。また、保水性は、 $\beta$ -メルカプトエタノールを含むタンパク質が最も低いことが分かった。これら結果から、タンパク質の力学強度に対するジスルフィド結合の重要性が確認され、疎水性および静電的相互作用が、タンパク質の物性を制御する重要な役割を果たしていることが示された。これらの研究結果は、近年重要性が増している蛋白質素材について、その構造と物性の関係性の一

端を示すものであり、今後、さらに研究を進めることが重要である。

タンパク質などの生体分子の水和状態と水分活性との関係性を調べるため、様々な水分活性条件下における凍結乾燥細菌の動力学転移に及ぼすグリセロールおよびグルコースの影響を中性子準弾性散乱で調べた。水分収着等温線から、各水分活性における含水率は、グリセロール、グルコース、無添加試料の順に高くなることがわかった。試料中の原子の平均二乗変位に対する温度の影響を調べたところ、平均二乗変位は温度の上昇に伴い徐々に増加し、データフィッティングから、3つの動力学転移温度が決定され、モデル解析により添加された溶質とバクテリアは完全には混和しないことが示唆された。

中性子小角散乱は、ソフトマターの高次構造を研究するための強力な手法として広く利用されているが、ナノメートルスケールの食品のミクロ構造を調べるのにも有効な計測手法である。また、同位体コントラスト法を活用することで、X線では難しい分子選択的な構造解析を可能にする。一方、赤外分光法は分子振動状態を指標に、分子の構造解析や水分の状態を調べることができる。中性子小角散乱と赤外分光法は互いに相補的な構造情報を与えるため、同じ試料の測定結果を組み合わせることで、より詳細な構造解析が可能になる。赤外分光法で用いられる透過法では、多くの食品素材は光が透過せずに測定が難しい場合が多い。そのような場合には、減衰全反射サンプリング法が有効となる。本研究では、赤外分光法の減衰全反射サンプリング法を採用した新しい同時測定システムを開発した(図3)。このような中性子散乱と赤外分光測定との同時測定系のシステムの開発を行い、食品素材への適用に着手した。蛋白質のゲル化や老化に伴う構造変化を中性子小角散乱と FT-IR でとらえることができ、赤外分光と中性子散乱データとの相関性が認められる結果が得られている。このように、中性子同時測定系を計測基盤として食品素材のマクロな物性変化についてミクロ構造の視点から理解するための解析や計測法の開発が進んだ。またゲルのナノ構造や糖溶液の水和状態を中性子小角散乱で解析した。このような、中性子散乱法を基軸とした各種分光測定、熱分析等の実験手法を融合した手法による食品の構造物性相関の解析は、食品のミクロ構造の解析や、食品中の水とミクロ構造の関係性の解析に有効である。そのほか、中性子非弾性散乱手法の高度化に関わる装置の試料環境の高度化や機器開発を行った。これらの測定装置の高度化を通じて、中性子準弾性散乱により食品蛋白質の水分活性に対する塩の影響を解明や、同位体コントラスト法による食品中の水の動態を解明し、水分活性と水の物理化学的特性の関係性を解明した。また、中性子非弾性散乱とテラヘルツ分光の相補性や共通性に着目した総説を出版した。



図3. 中性子小角散乱とATR-FTIRの同時測定系の試料位置の様子

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 K. Kawai, T. Sogabe, H. Nakagawa, T. Yamada, S. Koseki	4. 巻 375
2. 論文標題 Effect of water activity on the mechanical glass transition and dynamical transition of bacteria-solute systems	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Food Engineering	6. 最初と最後の頁 112066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jfoodeng.2024.112066	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 A. Murriliuk, H. Iwase, J. Kang, S. Mohanakumar, M.-S Appavou, K. Wood, L. Almasly, A. Len, K. Schwarzer, J. Allgaier, M. Dulle, T. Gensch, B. Forster, K. Ito, H. Nakagawa, S. Wiegand, S. Forster, A. Radulescu	4. 巻 665
2. 論文標題 Polyelectrolyte-protein synergism: pH-responsive polyelectrolyte/insulin complexes as versatile carriers for targeted protein and drug delivery	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Colloid and Interface Science	6. 最初と最後の頁 801-813
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcis.2024.03.156	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 該当する

1. 著者名 B. J. Muhalidin, C. F. Sanchez, H. Nakagawa, J. Ubbink	4. 巻 19
2. 論文標題 Modulating Molecular Interactions in Extruded Pea Protein Isolate	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Food Biophysics	6. 最初と最後の頁 172-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11483-023-09813-7	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Kumada, R. Motokawa, Y. Oba, H. Nakagawa, Y. Sekine, C. Micheau, Y. Ueda, T. Sugita, A. Brumachi, M. Sasaki, K. Hiroi, H. Iwase	4. 巻 56
2. 論文標題 Upgrade of the small-angle neutron scattering diffractometer SANS-J at JRR-3	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Appl. Cryst.	6. 最初と最後の頁 1776-1783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/life12050675	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 F. Kaneko, A. Radulescu, H. Nakagawa	4. 巻 56
2. 論文標題 Simultaneous SANS/FTIR measurement system incorporating ATR sampling method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Appl. Cryst.	6. 最初と最後の頁 1522-1527
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600576723007744	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Kumada, H. Nakagawa, D. Miura, Y. Sekine, R. Motokawa, K. Hiroi, Y. Inamura, T. Oku, K. Oishi, T. Morikawa, Y. Kawamura, K. Kawai	4. 巻 10
2. 論文標題 Polarized Neutrons Observed Nanometer-Thick Crystalline Ice Plates in Frozen Glucose Solution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. Lett.	6. 最初と最後の頁 7638
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.3c01448	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 Y. Hirata, H. Nakagawa, H. Yamauchi, K. Kaneko, M. Hagihara, H. Yamaguchi, C. Ohmoto, N. Katsuno, T. Imaizumi, T. Nishizu	4. 巻 141
2. 論文標題 Effect of starch retrogradation on molecular dynamics of cooked rice by quasi-elastic neutron scattering	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Food Hydrocolloids	6. 最初と最後の頁 108728
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.foodhyd.2023.108728	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 H. Nakagawa	4. 巻 408
2. 論文標題 Effect of NaCl on water activity and dynamics of protein hydration water dynamics in proteins by quasi-elastic neutron scattering	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Macromol. Symp.	6. 最初と最後の頁 2200071
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/masy.202200071	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 H. Nakagawa and N. Yamamoto	4. 巻 14
2. 論文標題 Incoherent Neutron Scattering and Terahertz Time-Domain Spectroscopy on Protein and Hydration Water	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Life	6. 最初と最後の頁 318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/life13020318	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kawakita, M. Matsuura, T. Tominaga, T. Yamada, H. Tamatsukuri, H. Nakagawa, and K. Ohuchi	4. 巻 272
2. 論文標題 Recent Progress on DNA ToF Backscattering Spectrometer in MLF, J-PARC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 2002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202227202002	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 T. Tominaga, H. Nakagawa, M. Sahara, T. Oda, R. Inoue, M. Sugiyama	4. 巻 12
2. 論文標題 Data Collection for Dilute Protein Solutions via a Neutron Backscattering Spectrometer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Life	6. 最初と最後の頁 675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/life12050675	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Sogabe, H. Nakagawa, T. Yamada, S. Koseki, K. Kawai	4. 巻 121
2. 論文標題 Effect of water activity on the mechanical glass transition and dynamical transition of bacteria	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biophysical journal	6. 最初と最後の頁 3874-3882
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bpj.2022.09.001	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 N. Yamamoto, M. Nakanishi, R. Rajan, H. Nakagawa	4. 巻 18
2. 論文標題 Protein hydration and its freezing phenomena -toward the application for cell freezing and frozen food storage-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biophysics and Physicobiology	6. 最初と最後の頁 284-288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2142/biophysico.bppb-v18.034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. Nakagawa, M.-S. Appavou, J. Wuttke, M. Zamponi, O. Holderer, T. E. Schrader, D. Richter, W. Doster	4. 巻 120
2. 論文標題 Nanosecond structural dynamics of intrinsically disordered -casein micelles by neutron spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biophysical Journal	6. 最初と最後の頁 5408-5420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bpj.2021.10.032	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Tominaga, M. Sahara, Y. Kawakita, H. Nakagawa, T. Yamada	4. 巻 54
2. 論文標題 Evaluation of materials of sample cells for aqueous solutions used in quasi-elastic neutron scattering measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Crystallography	6. 最初と最後の頁 1631-1640
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600576721009687	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. Nakagawa, T. Tamada	4. 巻 9
2. 論文標題 Hydration and its hydrogen bonding state on a protein surface in the crystalline state as revealed by molecular dynamics simulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Chemistry	6. 最初と最後の頁 738077
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fchem.2021.738077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 H. Nakagawa, T. Saio, M. Nagao, R. Inoue, M. Sugiyama, S. Ajito, T. Tominaga, Y. Kawakita	4. 巻 120
2. 論文標題 Conformational dynamics of a multi-domain protein by neutron scattering and computational analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biophysical journal	6. 最初と最後の頁 3341-3354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bpj.2021.07.001	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Saio, S. Hiramatsu, M. Asada, H. Nakagawa, K. Shimizu, H. Kumeta, T. Nakamura, K. Ishimori	4. 巻 120
2. 論文標題 Conformational ensemble of a multidomain protein explored by Gd3+ electron paramagnetic resonance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biophysical journal	6. 最初と最後の頁 2943-2951
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bpj.2021.06.033	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 中川洋	4. 巻 6
2. 論文標題 中性子散乱・回折による食品のナノ構造と水和状態の解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 44-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 松尾龍人、中川洋	4. 巻 32
2. 論文標題 非干渉性中性子散乱で観測する生体物質の揺らぎ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 波紋	6. 最初と最後の頁 8-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 中川洋、松尾龍人	4. 巻 32
2. 論文標題 生体分子の小角散乱と中性子スピンエコー法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 波紋	6. 最初と最後の頁 12-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 中川洋	4. 巻 67
2. 論文標題 グリセロール水溶液中の水の分子運動と水分活性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 低温生物工学会誌	6. 最初と最後の頁 129-133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20585/cryobolcryotechnol.67.2_129	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 中川洋	4. 巻 5
2. 論文標題 中性子散乱による食品中の水の分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 アグリバイオ	6. 最初と最後の頁 39-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 中川洋、松尾龍人	4. 巻 39
2. 論文標題 X線散乱・中性子散乱	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 実験医学	6. 最初と最後の頁 211-217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 熊田高之、元川竜平、中川洋、大場洋次郎、関根由莉奈	4. 巻 31
2. 論文標題 SANS-JとPN0の紹介	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 波紋	6. 最初と最後の頁 5-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Yamamoto, Maiko Kofu, Kenji Nakajima, Hiroshi Nakagawa, Naoya Shibayama	4. 巻 12
2. 論文標題 Freezable and Unfreezable Hydration Water: Distinct Contributions to Protein Dynamics Revealed by Neutron Scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 2172-2176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c03786	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 Daisuke Miura, Takayuki Kumada, Yurina Sekine, Ryuhei Motokawa, Hiroshi Nakagawa, Yojiro Oba, Takashi Ohhara, Shin-ichi Takata, Kosuke Hiroi, Toshiaki Morikawa, Yukihiko Kawamura, Kazuki Ohishi, Jun-ichi Suzuki, Yoshiyuki Miyachi and Takahiro Iwata	4. 巻 54
2. 論文標題 Development of spin-contrast-variation neutron powder diffractometry for extracting the structure factor of hydrogen atoms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Crystallography	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1107/S1600576721000303	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 Rintaro Inoue, Takashi Oda, Hiroshi Nakagawa, Taiki Tominaga, Tomohide Saio, Yukinobu Kawakita, Masahiro Shimizu, Aya Okuda, Ken Morishima, Nobuhiro Sato, Reiko Urade, Mamoru Sato, Masaaki Sugiyama	4. 巻 10
2. 論文標題 Dynamics of proteins with different molecular structures under physiological condition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 21678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-78311-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yurina Sekine, Takuya Nankawa, Shunji Yunoki, Tsuyoshi Sugita, Hiroshi Nakagawa, Teppei Yamada	4. 巻 2
2. 論文標題 Eco-friendly carboxymethyl cellulose nanofiber hydrogels prepared via freeze crosslinking and their applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Polymer Materials	6. 最初と最後の頁 5482-5491
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acscapm.0c00831	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Nakagawa, Satoshi Ajito	4. 巻 66
2. 論文標題 Protein Hydration studied by Neutron Scattering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cryobiology and Cryotechnology	6. 最初と最後の頁 83-92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20585/cryobolcryotechnol.66.2_83	査読の有無 有
オープンアクセス 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	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 中性子非弾性散乱による生体物質と食品中の水の構造とダイナミクスの研究
3. 学会等名 第68回低温生物工学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Nakagawa
2. 発表標題 Dynamics of protein hydration water at cryogenic temperature revealed by neutron scattering
3. 学会等名 60th ANNUAL MEETING OF THE SOCIETY FOR CRYOBIOLOGY (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平田芳信、中川洋、山内宏樹、金子耕土、萩原雅人、山口秀幸、大元智絵、勝野那嘉子、今泉鉄平、西津貴久
2. 発表標題 炊飯米の老化における澱粉の結晶構造と分子ダイナミクスの関係解明
3. 学会等名 日本食品科学工学会第70回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平田芳信、金子文俊、Aurel Radulescu、西津貴久、勝野那嘉子、今泉鉄平、中川洋
2. 発表標題 SANS/FTIR-ATR同時測定法による澱粉老化の解析
3. 学会等名 日本応用糖質科学会年会2023年度大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 マルチドメイン蛋白質のドメイン運動と過渡的状态
3. 学会等名 蛋白研セミナー、タンパク質のダイナミクスと機能(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 AGNESによる生体系および食品科学の中性子非弾性・準弾性散乱
3. 学会等名 物性研短期研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 Correlation between water activity and water dynamics in aqueous glycerol solutions
3. 学会等名 Neutrons and Food6 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 中性子非干渉性散乱による生体系および食品中の水のダイナミクスの研究
3. 学会等名 水素科学技術連携研究会物理学分科会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Nakagawa
2. 発表標題 Hydration water structure, water activity, and glass transition of food protein studied by quasi-elastic neutron scattering and molecular dynamics simulation
3. 学会等名 5th Food Structure and Functionality Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 蛋白質の階層構造ダイナミクスの解明
3. 学会等名 2022年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 大強度パルス中性子源J-PARC を利用した生命科学研究
3. 学会等名 2021年生化学会中部支部例会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 グリセロール水溶液中の水の分子運動と水分活性
3. 学会等名 第66回低温生物工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 中性子準弾性散乱と分子シミュレーションによる蛋白質のドメイン運動の解析
3. 学会等名 CBI学会2021年大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Nakagawa
2. 発表標題 Hydration structure and dynamics of biomolecule by quasi-elastic neutron scattering
3. 学会等名 POLYSOLVAT-13 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 Freezing, Thawing and Glass Transition of Biomolecules and Water
3. 学会等名 第59回日本生物物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川洋、齋尾智英、長尾道弘、井上倫太郎、杉山正明、富永大輝、川北至信
2. 発表標題 中性子散乱と分子シミュレーションによる蛋白質の構造とダイナミクスの研究
3. 学会等名 日本中性子科学会第21回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川洋、齋尾智英、長尾道弘、井上倫太郎、杉山正明、富永大輝、川北至信
2. 発表標題 マルチドメイン蛋白質の構造とダイナミクスの階層性の解析
3. 学会等名 量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 中性子散乱と分子シミュレーションによる生体分子の構造とダイナミクスの研究
3. 学会等名 よこはまNMR研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 中川洋、井上倫太郎、小田隆、矢木-内海真穂、斉尾智英、苮口友隆、長田裕也、杉山正明、佐藤衛、川北至信、岩瀬裕希、富永大輝、高田慎一
2. 発表標題 蛋白質の階層構造ダイナミクスの解明
3. 学会等名 量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平井光博、新井栄揮、中川洋、味戸聡志、岩瀬裕希
2. 発表標題 糖ガラスに包埋されたタンパク質の構造安定性
3. 学会等名 量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 量子ビーム散乱法と分子シミュレーションによるマルチドメイン蛋白質の溶液動態解析
3. 学会等名 日本中性子科学会第20回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川洋
2. 発表標題 中性子準弾性散乱による生体物質の低エネルギーダイナミクス研究と今後の展望
3. 学会等名 物性研短期研究会「中性子散乱研究の現状とJRR-3再稼働後の展望」
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 中川洋、玉田太郎、平野優	4. 発行年 2024年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 530
3. 書名 タンパク質の構造解析手法とIn silicoスクリーニングへの応用事例	

1. 著者名 中川洋、松尾龍人	4. 発行年 2022年
2. 出版社 羊土社	5. 総ページ数 6
3. 書名 実験医学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	ミネソタ大学		