

令和 6 年 9 月 19 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03878

研究課題名(和文)糖ガラスに包埋されたタンパク質の構造物性から解き明かす極限環境耐性の分子機構

研究課題名(英文)Molecular mechanism of extreme environmental resistance revealed from structural properties of proteins embedded in sugar glass

研究代表者

平井 光博(Hirai, Mitsuhiro)

群馬大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：00189820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：生物の極限環境耐性や細胞やリポソーム製剤の低温保存、食品の品質管理や長期保存には、水に代わって生体成分や細胞膜などを保護する「適合溶質」として糖の役割の理解が重要である。本研究は、放射光X線と中性子線の相補利用により、濃厚糖溶液や糖ガラス・ラバーに包埋されたタンパク質の特性(立体構造、内部構造、水和状態)を世界で初めて直接観測・解析した。その結果、5～65%w/wの糖溶液中ではタンパク質の構造と水和シェルはほぼ保存される一方、含水率15%w/w以下の非流動状態(ラバー&ガラス状態)の糖中では、水和シェルが糖に置換し、よりコンパクトな構造が安定化することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

得られた成果は、乾燥や低温などの極端環境に対する動物の糖の含蓄による耐性機構の理解に留まらず、細胞やリポソーム製剤の新たな保存法の開発や、糖のガラス/ラバー状態を利用した食品の品質管理や長期保存法の創生へ繋がる。

研究成果の概要(英文)：Understanding the role of sugars as compatible solutes that protect biological components and cell membranes, instead of water, is crucial for the extreme environmental resistance of organisms, low-temperature preservation of cells and liposome formulations, and quality control and long-term preservation of food. In this study, we used synchrotron X-rays and neutron beams complementarily to directly observe and analyze, for the first time in the world, the properties (tertiary structure, internal structure, hydration state) of proteins embedded in concentrated sugar solutions, sugar glass, and rubber. As a result, it was found that in sugar solutions with a concentration of 5-65% w/w, the structure and hydration shell of the protein are mostly preserved. However, in non-flowing states (rubber and glass states) of sugars with a water content below 15% w/w, the hydration shell is replaced by sugars, and a more compact structure is stabilized.

研究分野：生物物理

キーワード：極限環境耐性 クリプトピオシス 糖 ガラス転移 蛋白質 食品科学 放射光X線散乱 中性子散乱

1. 研究開始当初の背景

乾燥や低温などの極端な環境に対して耐性(クリプトビオシス「無代謝状態」)を示す動物として、クマムシ、ワムシ、ネムリユスリカなどの昆虫がよく知られており、いずれも乾燥状態や低温状態などの極端環境に於いて、水に代わって生体成分や細胞膜などを保護する「適合溶質」として糖(主にトレハロース)を蓄積して代謝活動を停止して冬眠や乾眠の状態を実現することで生き延びている。また、両生類に於いても、低温や乾燥(酷暑)など生活条件が悪化した際、長期にわたって体内の代謝活動を低下させるなど驚異的な体内機能の変化を起こす。例えば、北アメリカのウッドフロッグは、皮下の氷結が始まると数分以内に肝臓のグリコーゲンを分解し、通常の血糖値の45倍の高血糖状態を作り出し、糖による体液凍結温度を下げる機能のおかげで、体内の水分の5~6割は凍結するにもかかわらず臓器細胞の内部自体は凍らないようにして生存できることが知られている。このような昆虫や両生類の環境耐性機構として、適合溶質として糖を利用した「ガラス状態説」(糖によるガラス化に伴う細胞膜やタンパク質などの高次構造の保護)、「水置換説」(結合水の代理をする糖による直接的な水素結合)、それらの複合作用の関与、などの説が有るが、何れも分子構造レベルでの研究例は殆どないためその機構の詳細は未だに不明である。

一方、ES細胞やiPS細胞の医療応用が急速に展開する中で、好適に使用できる細胞ガラス化保存液の開発が重要となっている。現在開発されている保存液は、細胞膜透過性物質と細胞膜非透過性物質を含んでおり、細胞膜透過性物質として、エチレングリコール、プロピレングリコールやジメチルスルホキシドなど、細胞膜非透過性物質として、糖類、糖アルコール、ポリエチレングリコール、ポリビニルピロリドンなどが使用されている。特に、トレハロースおよびスクロースは、ガラス化促進物質として使用されているが、細胞膜やタンパク質そのものに対する保存液の効果に関するナノスケールレベルでの構造学的知見が明らか不足しており、細胞の保存率や生存率の顕微鏡を用いたマクロスケールでの経験的な確認に留まっているため、それらの向上が課題となっている。

さらに、糖質は脂質およびタンパク質と並ぶ食品三大成分の一つであると同時に、食品加工における温度および水分含量の変化によって、糖質は様々な物理的性状変化(結晶化、融解、ガラス転移、包摂複合体形成など)を示し、食品の品質や保存を決定付けている。現在、「食材の凍結、貯蔵、解凍における科学的な視点」として Glass Transition (ガラス転移, Tg)の重要性が認識されつつある。Tgよりも高い保存温度では温度差が大きければ食品の傷みはひどくなるが、通常食品(肉、魚、果実、野菜)ではTgは-30°Cよりも低く、輸送等を考量すると経済的な採算性が低い。そのため、糖添加(スクロースやマルトース)によりTgを上昇させ、比較的容易な貯蔵温度に設定できれば、保存や品質の期間の長期化が可能となる。Tgは糖の種類や濃度によって変化し、スクロース 62°C、グルコース 31°Cなどと比較して、トレハロースは 114°Cと最も高く、また、含水率、他の成分(タンパク質、脂質)の濃度によっても変化する。そのため、長期安定保存のためには、タンパク質や脂質の構造が安定に保持可能な至適な糖ガラス化状態条件の探索を、ナノスケールレベルの構造解析に基づき行うことが重要である。

2. 研究の目的

ガラス化、ガラス転移は、大きな構造変化を伴わず液体が固化する現象であり、実験、理論、計算機シミュレーションにより古くから多くの研究がされてきたが、未だにその機構は解明されていない。また、平井らは 20%以下の濃度において糖がタンパク質の表面から選択的に排除され水和水を保護し、化学変性濃度、熱変性温度を上昇させて構造を安定化させること、アミロイド構造転移中間体を Native 構造へリフォールドすることなどを見出していた[1]。本研究の目的は、強力な構造解析ツールである放射光 X 線・中性子線散乱法を相補的に利用して、糖の種類と濃度に依存した糖溶液の構造物性と水和状態、さらに含水率・温度に依存した溶液状態・ラバー状態・ガラス状態の構造、それらの状態に内包されたタンパク質の構造特性、安定性を直接明らかにすることであった。特に、濃厚糖溶液・糖ガラスの構造、それらに包含されたタンパク質内部の階層構造、分子間相互作用、水和状態に着目して研究を行なった。

[1]M. Hirai, S. Ajito, et al., *Bunsekikagaku* **2019**, 68, 43-49; *J. Phys. Chem. B* **2018**, 122, 11962-11968; *J. Phys. Chem. B* **2018**, 122, 9482-9489; *J. Phys. Chem. B* **2018**, 122, 8685-8697; *Biophys. J.* **2018**, 115, 313-327; *Physica B: Condensed Matter* **2018**, 551, 249-255 他。

3. 研究の方法

研究では、単糖としてグルコース、フルクトース、マンノースを、二糖としてスクロース、トレハロースの水和物を使用した。中性子散乱測定では逆コントラスト変化法を利用するために、重水化グルコース(d12, D 原子数 97%)、重水化トレハロース(d14)を用いた。包埋するタンパク質としては、球状タンパク質である馬骨格筋ミオグロビン、卵白リゾチーム、牛血清アルブミン、馬ヘモグロビンを用いた。タンパク質を包埋した糖ラバーあるいは糖ガラス試料の作成は次の手順で行なった。一定濃度のタンパク質水溶液(0.5 mM HEPES, pD 6.7(pH 7.1))と、30 % w/w の糖溶液を 3/1 の比率で混合した後、円盤状の測定用のセルに積載したのち、数日間乾燥させて作成した。乾燥には恒温乾燥、デシケータ乾燥、真空乾燥のいずれかを行い、散乱測定に用いられる試料の水分含有量(含水率)は電子天秤秤量により決定した。X 線散乱法では、糖濃度(含水率)に依存して、マトリックス(糖溶液)の電子密度が増加するため、タンパク質とマトリックスとの散乱密度の差(コントラスト)が変化して散乱強度が変化する。中性子散乱実験では逆コントラスト変化法を用いた。糖の散乱密度と溶媒(水)とが一致するように調整できるため、糖濃度(含水率)依存的なマトリックスの散乱密度の変動が起きず、タンパク質のコントラストが一定となり、構造

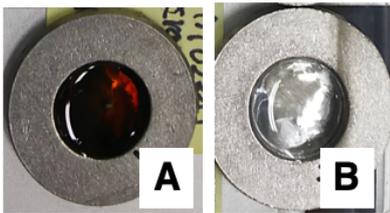


Figure 1: Photos of samples. A, protein-embedded in sugar glass; B, sugar glass without protein.

の変化のみを選択的に観測できる。重水化トレハロースの場合、トレハロースの平均散乱密度が 91% D₂O と一致するため、91% D₂O 溶媒(D₂O/H₂O 混合溶媒)を使用し、グルコースの場合、非重水化グルコースと重水化グルコース(比率 0.29 / 0.71)の混合物の平均散乱密度が 100% D₂O の平均散乱密度と一致するため 100% D₂O 溶媒を使用した。Figure 1 は、タンパク質を含む糖ガラス試料と含まない試料を示している。放射光 X 線散乱測定には、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の放射光実験施設を、中性子散乱測定は、大陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設を利用した。

4. 研究成果

研究期間中、以下要約する 2 つの主要な結果を得た。

研究成果 (1): 高濃度の砂糖溶液の構造特性、砂糖分子間の相互作用、および水和状態 (M. Hirai et al.,

"Short-Distance Intermolecular Correlations of Mono- and Disaccharides in Condensed Solutions: Bulky Character of Trehalose", ACS Omega 2020, 5, 10815–10825; <https://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c00451>)

広角 X 線散乱法を用いて、広範囲な濃度範囲(0.05 ~ 0.65 g/mL)の砂糖溶液(グルコース、フルクトース、マンノース、スクロース、トレハロース)の構造特性を実空間分解能約 3Å から 120Å の範囲で明らかにした(Figure 2)。実験で得られた無限希釈状態に外挿した構造パラメーターを、結晶構造に基づいて理論的に計算した値と比較すると、溶液中の糖モノマーは無水または水和結晶形態のものよりも多く水和されていることが示されていることを見出した。この結果は、過去の NMR および MD シミュレーション研究の結果とよく一致している。また、トレハロースはスクロースと比較して、より広がったかさ高い構造を形成する傾向があり、トレハロースが異方性的な水和構造を形成す

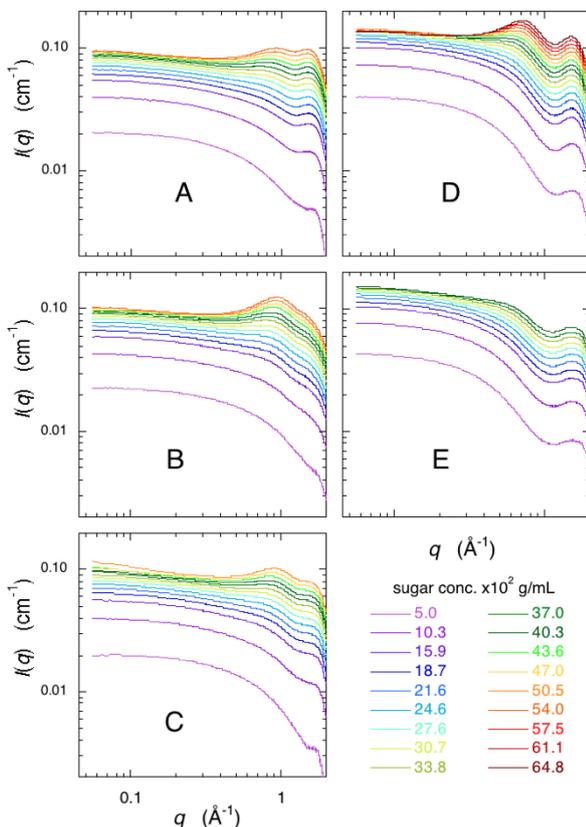


Figure 2. Concentration dependence of the WAXS curves of the sugar solutions at 25 °C. A, B, C, D and E correspond to the monosaccharides (glucose, fructose, and mannose) and disaccharides (sucrose and trehalose), respectively. The concentrations are given in % g/mL.

	R_g (Å)	$I(0)$ (-)	P_{max} (Å)	D_{max} (Å)	M (-)	A_2 (-)	A_3 (-)
By extrapolation to $c=0$ %							
glucose	2.84±0.04	1.00±0.01	2.70±0.05	8.0±0.1 (14.0±0.1)	1	0.10±0.01	0.0025±0.0002
fructose	2.82±0.04	1.10±0.01	2.70±0.05	9.5±0.1 (17.1±0.1)	1.11	0.100±0.005	0.0022±0.0001
mannose	2.62±0.04	0.96±0.01	2.80±0.05	7.5±0.1 (16.6±0.1)	0.98	0.08±0.01	0.0019±0.0003
sucrose	3.63±0.02	2.126±0.008	4.00±0.05	11.7±0.1 (22.3±0.1)	1.97	0.057±0.004	0.0022±0.0001
trehalose	3.94±0.02	2.216±0.006	4.65±0.05	12.7±0.1 (23.1±0.1)	2.17	0.079±0.002	0.0015±0.0001

Table 1. Determined structural parameters and virial coefficient R_g : radius of gyration; $I(0)$: relative zero-angle scattering intensity normalized by the value of glucose; P_{max} : peak position of the distance distribution function; D_{max} : maximum diameter of the molecule (D_{max} values in brackets are the values obtained by considering the tailing region in the $p(r)$ functions). M , A_2 , and A_3 are the molar mass and the second and third virial coefficients using the Zimm plot. $I(0)$ and M values are normalized by those of glucose.

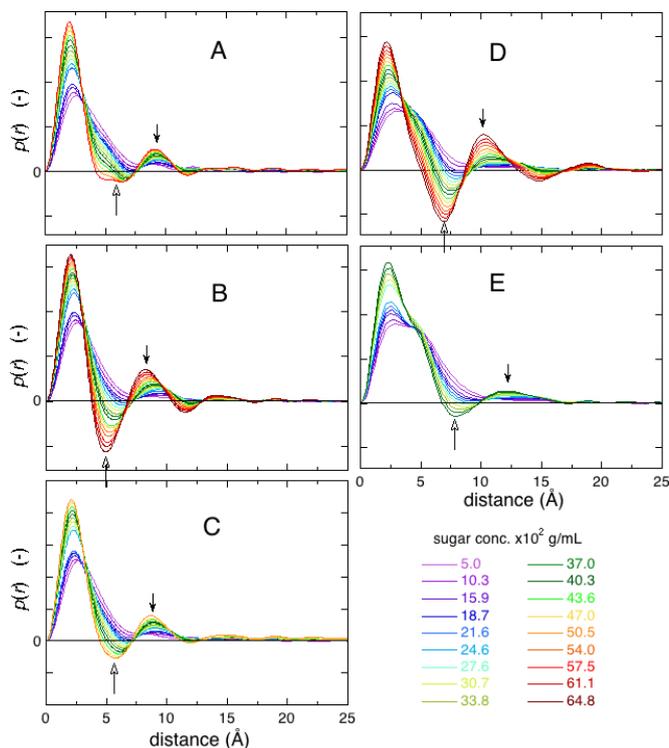


Figure 3. Distance distribution functions for different sugar concentrations. The $p(r)$ functions were obtained by the Fourier transform of the WAXS curves in Figure 1. A, B, C, D, and E are as in Figure 1. The first positive peaks correspond to the self-correlation of the sugar molecules. The second positive peaks, indicated by the full arrows, correspond to the correlation distance of the first layer of nearest-neighbor sugar molecules. The open arrows indicate the correlation holes. At the highest concentration (52.5% w/w in fructose and sucrose), another correlation corresponding to the second layer of nearest-neighbor sugar molecules appears.

によって明らかにされたように、トレハロースの動的なスローダウンがスクロースよりも顕著であるという事実とも一致している。加えて、このトレハロースの溶液特性は、以前の熱量測定および MD シミュレーションに基づいて報告された他の糖と比較した際のガラス転移温度の高さに密接に関連している。さらに、トレハロース分子は他の糖と比較して、溶液中でよりランダムにおよび/または無秩序に分散する傾向があることを示唆する。糖の異方性水和特性が糖の種類およびそのグリコシド結合によって水分子の配向と動態に大きな影響を与えることを考慮すると、これらの結果は合理的である。

ることを示した中性子回折および MD シミュレーションの結果とも一致している。さらに、最近のテラヘルツ分光法の研究で示唆された、二糖類の周りに構造化されていない水素結合ネットワークの存在とも符合する。この構造化されていない水構造は、糖分子を取り囲むバルク水よりも高い電子密度の水和シエルの存在を意味する。さらに、高濃度での糖分子間の最近接相関の存在の直接的な証拠を得ました。この最近接相関に対応する散乱曲線の広いコブまたはピークは、

糖濃度が増加するにつれて顕著になる。二体相互作用に相当する第2ビリアル係数は、低濃度の糖溶液では反発相互作用が支配的であることを示すが、高濃度での糖分子間の最近接相関距離は、糖分子の均一な分散の場合よりも短く、糖分子が水和反発力にもかかわらず、互いにより近接しやすくなっていることを示している (Table 1)。第3ビリアル係数は、すなわち三体相互作用 (引力) に対応する値は、第2ビリアル係数の数パーセント以下であり、同じ状況を示している。つまり、糖濃度が増加すると、多体相互作用の寄与が増強され、これにより、糖分子の不均一な分布が避けられないことも示唆している。フルクトースとスクロースの最大濃度 64.8% g/mL では、第一および第二の近接分子間相関ピークが明確に観察されました。第一および第二の近接相関ピーク間の距離の比率は、同一粒子の密充填配列を示し、水和水分子を含むシステムのエントロピー利得に従う構造であることを示した。その他の砂糖 (グルコース、フルクトース、マンノース、スクロース) と比較して、トレハロースは密充填配列を避け、大きな排除体積を維持する傾向が見られた。トレハロースの 40.3% g/mL における相関距離は、同じ濃度のスクロースの相関距離よりも約 1Å 長かった (Figure 3)。これは、溶液中のトレハロースのかさ高い構造に起因する。この発見は、トレハロースの分子間相関距離がスクロースよりも長いことを示す結果とよく一致している。さらに、この傾向は、テラヘルツ分光法

研究成果 (2): ゴム状態およびガラス状態の糖マトリックスに包埋されたタンパク質の構造

(この成果の一部は, KEK の光子ファクトリー (PF) の実験報告書 (Photon Factory Activity Report 2022 #40 (2023): BL-10C/2019G537) および, J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) の実験報告書 (J-PARC-MLF Experimental-report 2020A0025) として公表。詳細な内容は現在投稿中であり, 後日公開される予定)

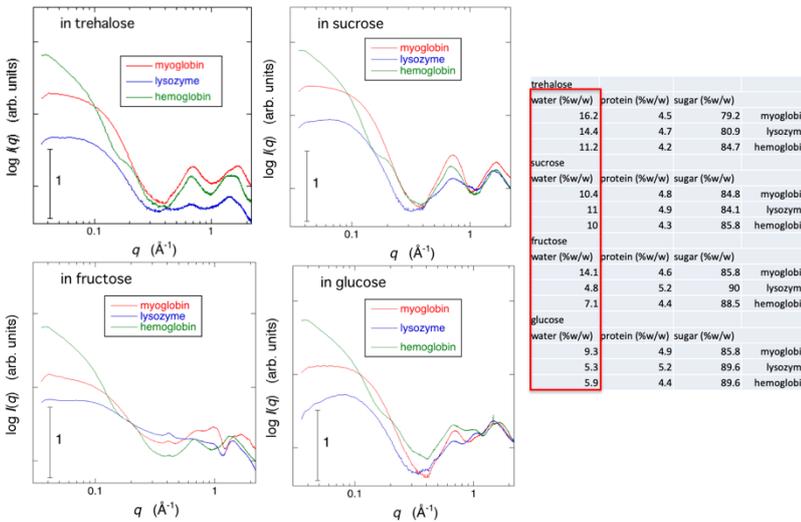


Figure 4: Observed wide-angle X-ray scattering curves of different types of proteins embedded in sugar rubber or glass state at 20 °C. Native-like tertiary and intra-molecular structures can be recognized.

糖溶液の流動性が大幅に低下し, 濃縮溶液状態からゴム状状態, そして最終的に無秩序なガラス状状態へと移行する。水分含量が 15%以下になると, 非流動状態 (ゴム状およびガラス状状態) が観察され, 特にトレハロースで顕著ある。これらの状態に埋め込まれた様々な球状タンパク質の構造の観察と解析の結果 (図 3), 砂糖やタンパク質の種類に関わらず, タンパク質は凝集や変性を起こさず, よりコンパクトでネイティブな球状構造を保っていることが明らかになりました (Figure 5)。これらの発見は生物学的意義を持つだけでなく, 細胞や食品保存のための新しい製剤および方法の開発への道を開くものです。

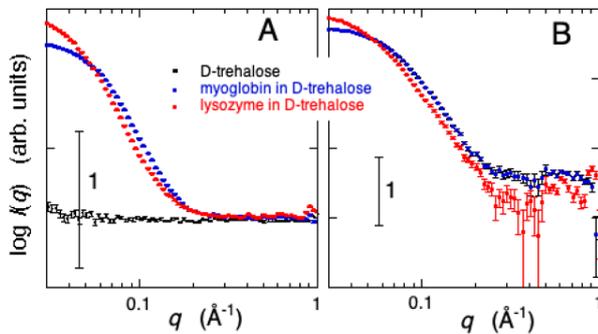


Figure 5. Observed small- and wide-angle neutron curves of myoglobin embedded in deuterated trehalose (d14) trehalose glass samples. A, before the subtraction of the background scattering; B, After the subtraction of the background scattering. Water content was

本研究の特徴は, シンクロトロン X 線散乱と中性子散乱を補完的に利用して, ナノスケールレベルで糖ガラス中に埋め込まれたタンパク質の階層構造, 分子間相互作用, および水和状態を解明する点にある。特に中性子逆コントラストマッチング法を利用し, 高濃度砂糖溶液, ゴム状状態, ガラス状状態, およびこれらの条件下でのタンパク質構造を観察・解析した (Figure 4)。高濃度溶液, ゴム状状態, 極めて低い水分含量のガラス状状態に含まれるタンパク質の構造を対象とした系統的な実験が行われ, その結果, 以下の知見が得られました。

糖の重量濃度が空気乾燥を通じて徐々に増加するにつれ, 水分含量の減少とともに

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Hirai Mitsuhiro, Arai Shigeki, Iwase Hiroki	4. 巻 28
2. 論文標題 Fibrillization Process of Human Amyloid-Beta Protein (1-40) under a Molecular Crowding Environment Mimicking the Interior of Living Cells Using Cell Debris	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Molecules	6. 最初と最後の頁 6555 ~ 6555
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/molecules28186555	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 Mitsuhiro Hirai, Hiroki Iwase, Shigeki Arai, and Hiroshi Nakagawa	4. 巻 2020A
2. 論文標題 Study of protein structures embedded in sugar glass	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MLF実験報告書	6. 最初と最後の頁 1-2
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 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 Mitsuhiro Hirai, Hiroki Iwase, Shigeki Arai, and Hiroshi Nakagawa	4. 巻 2019A
2. 論文標題 Stability of protein structure in sugar and polyol solution at low temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MLF実験報告書	6. 最初と最後の頁 1-2
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 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 Arai Shigeki, Shimizu Rumi, Adachi Motoyasu, Hirai Mitsuhiro	4. 巻 31
2. 論文標題 Magnetic field effects on the structure and molecular behavior of pigeon iron-sulfur protein	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Protein Science	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pro.4313	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 Hirai Mitsuhiro, Ajito Satoshi, Iwasa Tatsuo, Wen Durige, Igarashi Noriyuki, Shimizu Nobutaka	4. 巻 5
2. 論文標題 Short-Distance Intermolecular Correlations of Mono- and Disaccharides in Condensed Solutions: Bulky Character of Trehalose	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 10815 ~ 10825
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.0c00451	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 該当する

1. 著者名 Mitsuhiro Hirai	4. 巻 23
2. 論文標題 Sugars can protect hydration shell of proteins and stabilize their native structures in crowded molecular environment: clarified by complementary use of X-rays and neutrons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPRING-8/SACLA Research Frontiers	6. 最初と最後の頁 13-14
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 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 該当する

1. 著者名 Wen Durige, Li Xing, Geng Xiong, Hirai Mitsuhiro, Ajito Satoshi, Takahashi Kosuke, Ozaki Mamiko, Hojo Masaru K., Uebi Tatsuya, Iwasa Tatsuo	4. 巻 37
2. 論文標題 Characterization of Localization, Ligand Binding, and pH-Dependent Conformational Changes of Two Chemosensory Proteins Expressed in the Antennae of the Japanese Carpenter Ant, Camponotus Japonicus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Zoological Science	6. 最初と最後の頁 371 ~ 371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2108/zs190138	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 該当する

1. 著者名 Matsuura Masato, Yamada Takeshi, Tominaga Taiki, Kobayashi Makoto, Nakagawa Hiroshi, Kawakita Yukinobu	4. 巻 1
2. 論文標題 Position Dependency of the Scattered Intensity in the Time-of-flight Backscattering Spectrometer DNA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 the Proceedings of the 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019)	6. 最初と最後の頁 11068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSCP.33.011068	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 Tomonaga Taiki, Kawakita Yukinobu, Nakagawa Hiroshi, Yamada Takeshi, Shibata Kaoru	4. 巻 1
2. 論文標題 Quartz Cell for a Backscattering Spectrometer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 the Proceedings of the 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019)	6. 最初と最後の頁 11068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.33.011086	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 中川 洋、味戸 聡志	4. 巻 66
2. 論文標題 中性子散乱による蛋白質の水和の研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 低温生物工学会誌	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13件(うち招待講演 4件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 平井光博, 新井栄揮, 岩瀬裕希
2. 発表標題 細胞内環境に酷似した細胞残骸密集環境下でのヒトアミロイドベータタンパク質の凝集体形成
3. 学会等名 第61回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新井栄揮、清水瑠美、安達基泰、平井光博
2. 発表標題 X線小角散乱解析による磁場応答蛋白質の構造学的研究
3. 学会等名 第61回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平井光博
2. 発表標題 濃厚な糖溶液の構造：単糖類と二糖類の特性の比較とトレハロースの特異性
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平井光博, 新井栄揮, 岩瀬裕希, 中川洋, 清水信隆
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 第59回日本生物物理学会年会
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 糖ガラスに包埋タンパク質の構造
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 2020年度 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 新井栄揮、清水瑠美、安達基泰、味戸聡志、平井光博
2. 発表標題 磁気受容蛋白質候補ISCA1のSAXS解析
3. 学会等名 2020年度 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 新井 栄揮 , 清水 瑠美 , 安達 基泰 , 味戸 聡志, 平井 光博
2. 発表標題 磁気受容蛋白質第二候補ISCA1の分子挙動
3. 学会等名 日本生物物理学会第58回年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平井光博
2. 発表標題 溶液中の超分子の配向挙動：磁場強度，濃度，有効電荷に対する依存性
3. 学会等名 日本生物物理学会第58回年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平井光博
2. 発表標題 中性子・放射光 X 線散乱の相補利用の基礎：生命科学への応用
3. 学会等名 日本中性子科学会第20回年会 (招待講演)
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- (招待講演)
4. 発表年 2020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、井上倫太郎、小田隆、矢木-内海真穂、斉尾智英、笠口友隆、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 2020年度 量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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
研究 分担者	中川 洋 (Nakagawa Hiroshi) (20379598)	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 (82110)	

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
---------	---------