

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04710

研究課題名（和文）微生物はなぜ乾燥に耐えられるのか？微生物細胞のガラス転移による乾燥適応機序の解明

研究課題名（英文）Why can microorganisms withstand drying? Elucidation of drying adaptation mechanism by glass transition of microbial cells

研究代表者

小関 成樹 (Koseki, Shigenobu)

北海道大学・農学研究院・教授

研究者番号：70414498

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,900,000円

研究成果の概要（和文）：細菌細胞のガラス転移温度は、乾燥方法や保存時の水分活性、乾燥温度の影響があった。さらにガラス転移温度と菌体の保存時の温度との差を指標とすることで、乾燥条件や乾燥後の保存条件の違いによらず、乾燥環境下におかれた細菌細胞の生存状態を予測判断できることを明らかにした。また、中性子弾性散乱測定を用いた細胞内部の水分子挙動の解析結果から、細菌が乾燥によってガラス転移した静菌状態から活動を再開するに際して、ガラス転移はクリティカルな要件ではなく、トリガーであ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

これまで乾燥環境下で細菌が長期間にわたり生存し続ける現象は捉えられてきたが、そのメカニズムは不明であった。本研究では細菌が乾燥状態においても長期間にわたり生存し続けることができる要因を、細胞の物理的な変化であるガラス転移現象の観点から明らかにした。乾燥食品の保存温度や湿度を適切に制御することで、仮に有害な食中毒細菌が付着していたとしても、その生存数が予測可能とする技術へと本研究成果は活用される。さらに、本研究成果は有用細菌の長期間保存といった面でもガラス転移現象と影響を及ぼす環境因子の制御によって、より長期間にわたり有用細菌を保存可能とするものである。

研究成果の概要（英文）：The glass transition temperature of bacterial cells was affected by the drying method, water activity during storage and drying temperature. Furthermore, by using the difference between the glass transition temperature and the temperature at the time of storage of the bacteria as an indicator, it was clarified that the survival state of bacterial cells placed in a drying environment could be predicted and judged regardless of differences in drying conditions and storage conditions after drying. The analysis of the behaviour of water molecules inside the cell using neutron elastic scattering measurements also revealed that glass transition is not a critical requirement but a trigger when bacteria resume activity from the static state of glass transition due to desiccation.

研究分野：食品微生物学

キーワード：ガラス転移 乾燥 水分活性 凍結乾燥

1. 研究開始当初の背景

微生物にとって重大なストレスとして「乾燥」がある。乾燥環境下において、微生物は増殖を停止してしまうことから、生物学的な観点からすると、見かけ上は死んでいるように思われがちである。しかし、その実、乾燥環境下において2~3年以上もの長期間にわたり生残し続ける(増殖はしない)細菌が数多く報告されている。このような性質を有する食中毒細菌を原因とする食中毒事故が世界各地で頻発している。世界的な統計では、2007年~2012年の間に、世界中で7,315件の乾燥食品を原因食材とする食中毒事故が報告されており、63人が死亡している。主な原因細菌としてはサルモネラ属菌が最も高い割合を示し、米国内の食中毒事故原因の94%を、世界全体での事故の53%を占めている(Santillana Farakos et al., 2014)。主な原因食材は、ナッツ類、チョコレート、シリアル等の一般的には食中毒とは無縁に思える乾燥した食材である。また、直接的な乾燥食品を原因としない事例も報告されている。すなわち、食品工場内や厨房、台所といった食品を扱う環境において、作業台や設備、装置表面に付着した食中毒細菌が長期間にわたり生残して、そこに偶然にも付着した食材を二次的に汚染して、その汚染された食材の喫食が原因となり、食中毒を引き起こした例が多数報告されている。しかし、これまで「なぜ乾燥環境下で芽胞を形成しない食中毒細菌細胞が長期間にわたり生存できるのか?」といった根本的な問いに対する明確な答えは出されておらず、長期間にわたり生存可能であるといった現象面だけが注目されてきた。

このような状況において、我々は新しい着想として、細菌細胞を一つの物質粒子として捉え、乾燥状態における細菌細胞の物理状態に目を向けることが重要と着想し、細菌細胞が乾燥に伴い、ガラス化するのではないかと考えた。細菌の細胞内部を、様々な成分から構成される混合溶液として物理化学的に捉えると、水分含量の低下によって細胞内部の粘性は上昇し、やがてガラス状態になると考えられる。ガラス状態とは液体の様に分子配列が無秩序(アモルファス)な状態で、分子運動性(主に並進運動)が凍結し、見かけ上固体になった状態である。細胞がガラス状態に陥ることで、細胞内は活動時と同じ物理状態(溶液状態)のまま、固化(不動化)する。言い換えると、細胞は生きた状態のまま、時間だけが停止する。このため、細菌は静菌状態として長きに渡り生きながらえることが可能になると考えられる。生物のガラス化による死滅回避は特定の極限環境生物(クマムシ、ネムリユスリカなど)も利用している(Horikawa et al., 2009)。これらの生物は大気が乾燥し始めると体内に高濃度の適合溶質(トレハロースなど)を蓄積させ、率先してガラス状態に陥る。また、生体細胞(精子、卵子など)の凍結保存では、細胞内に凍結保護物質を導入し、細胞内での氷結晶生成を防ぎつつ温度を低下させ、最終的にガラス化させる操作が行われている。このように、細胞が生きた状態で長期間安定化するための必須条件がガラス状態と考えられる。

乾燥による親水性成分のガラス化は、ガラス転移温度(T_g)の水分活性(a_w)依存性によって特徴付けられる。すなわち、 a_w の低下によって T_g が上昇し、やがて環境温度(T)よりも高くなったとき($T - T_g < 0$)、物質はその環境でガラス化する。このことを実証するには、細菌の T_g を決定する必要があったが、細菌は組成が複雑であり測定結果が不明瞭になる、測定に必要な試料量を確保できないなどの理由により、これまで実現されてこなかった。一方、食品工学を専門とする川井(分担者)は、市販のレオメータに温度制御装置を取り付けた昇温レオロジー測定法を構築し、従来は捉えることが困難であった組成が複雑な乾燥食品の T_g を決定することに成功した(Kawai et al., 2014)。申請者はこれを細菌に適用することを考案し、細菌(サルモネラ属菌)の大量培養を成し得た上で、細菌細胞の T_g と a_w との関係性を世界で初めて明らかにした(図1: Lee et al., 2020)。また、 a_w 低下に伴う T_g の上昇が、乾燥状態での細菌の耐熱性の増大に寄与する可能性も示された。従来の微生物学では細菌の生育挙動を温度と a_w との二つの環境因子によって現象論的に理解してきた。しかし、本研究結果は温度や a_w が直接的な因子ではなく、 a_w の関数として扱われる T_g と環境温度(T)との関係、すなわち $T - T_g$ 値が正(液体的)か負(固体的)かによって表される分子ダイナミクスによって支配されることを示唆している。このことは、細菌の巧みな生存戦略の本質的解明に貢献し得る。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、微生物のガラス転移挙動を解明した上で、ガラス転移温度(T_g)を基軸とした新たな微生物生態の包括的な理解を可能とする基盤理論を構築することである。具体的には以下の

(1) 微生物ガラス化の普遍性の解明

乾燥耐性を有するとの報告のある、グラム陰性菌の *Cronobacter sakazakii* とグラム陽性細菌の *Bacillus cereus* を対象として、ガラス転移現象と乾燥耐性との関係性の普遍性を検討するとともに、乾燥過程の違いが細菌細胞の T_g や生育挙動に与える影響を明らかにすることを目的とした。

(2) ガラス化のメカニズム解明

細菌の等温機械的ガラス転移挙動と動的転移挙動に及ぼす水分活性の影響を理解するために、ガラス化が検討されている乾燥耐性を有するグラム陰性菌の *Cronobacter sakazakii* をサンプルとして、水分活性変化による細菌の活動停止-再開現象との関係について考察した。

(3) 添加剤の影響がガラス化に及ぼす影響の解明

添加剤の細胞膜透過性は分子サイズに依存するため、添加剤の分子サイズによって機械的ガラス転移および動的転移挙動が異なる影響を受けることが予想される。グリセロールは細胞間領域だけでなく、細胞内部領域にも存在すると仮定されている。逆にグルコースは、系の細胞間領域にのみ存在する。そこで、*C. sakazakii* の機械的ガラス転移および動的転移挙動に及ぼすグリセロールおよびグルコースの影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 微生物ガラス化の普遍性の解明

C. sakazakii と *B. cereus* の乾燥菌体サンプルを異なる乾燥方法（通風乾燥と凍結乾燥）で調製した。ガラス転移温度 (T_g) 測定のために、乾燥菌体を粉末化し、4段階の相対湿度（43%RH、62%RH、75%RH、87%RH）に調整した密閉容器に入れ、4 で 48 時間保存し a_w を安定させた。 a_w を調整した菌体の T_g は、昇温レオロジー分析（Thermal rheological analysis, TRA）を用いて測定した（Kawai et al., 2014）。並行して、粉末化した乾燥菌体を 2段階の相対湿度（43%RH、87%RH）に調整した密閉容器に入れ、4、25、42 で保存し、一定期間（1週間、2週間、3週間）経過後の生存細菌数を測定した。

(2) ガラス化のメカニズム解明

凍結乾燥した *C. sakazakii* 細胞粉末を飽和塩法によって様々な水分活性に調製した。一定量をレオメーターにセットして圧縮し、25 での応力緩和挙動を調べた。凍結乾燥した細菌を、重水を用いた飽和塩法によって様々な水分活性に調製した。中性子弾性散乱から原子（主に水素）の平均二乗変位（Mean Squared Difference, MSD）を温度（-173 ~ 80）の関数として評価した。

(3) 添加剤の影響がガラス化に及ぼす影響の解明

凍結乾燥した *C. sakazakii* 細胞粉末を約 5%（w/w）のグリセロールおよびグルコース溶液と混合し、*C. sakazakii* と溶質の混合物（0.25g-溶質/g-乾燥菌体、DB）を調製した。この調製混合物の一定量をレオメーターにセットして圧縮し、25 での応力緩和挙動を調べた。調製混合物を、重水を用いた飽和塩法によって様々な水分活性に調製した。中性子弾性散乱から原子（主に水素）の平均二乗変位（Mean Squared Difference, MSD）を温度（-173 ~ 80）の関数として評価した。

4. 研究成果

(1) 微生物ガラス化の普遍性の解明

各条件における *B. cereus* 細胞のガラス転移温度を検討した結果、乾燥 *B. cereus* の T_g と a_w の関係は乾燥方法によって異なり、 a_w の低下に伴い通風乾燥菌体の T_g は上昇したが、凍結乾燥菌体の T_g には a_w との明確な関係は認められず、ほぼ一定であった（図 1）。また、全ての a_w において通風乾燥菌体の T_g が、凍結乾燥菌体の T_g と比較して高かった。同様の傾向は先行研究でも認められており、菌種に関わらず乾燥方法が T_g と a_w の関係に影響していることが示唆された。さらに、通風乾燥菌体の T_g と a_w の関係は乾燥温度に影響され、乾燥温度の上昇に伴い低 a_w （0.43、0.62）条件と高 a_w （0.75、0.87）条件での T_g に有意差が認められた。

次に、*B. cereus* 細胞の生存挙動とガラス転移温度の関係を検討した結果、 T_g と保存温度の差と 3 週間保存後の *B. cereus* 細胞の生存率との関係性を評価すると、k-means 法を用いたクラスタ分析によって、 T_g と保存温度の差が 20°C 付近で 2 つのクラスタに分けることができた（図 2）。塗りつぶされたクラスタでは、乾燥条件や保存条件に依らず生存率は -8 log から -4 log 程度の減少であった。一方で塗りつぶされていないクラスタでは、乾燥条件や保存条件に依らず生存率は -3 log から -1 log 程度の減少であった。これらの結果から、乾

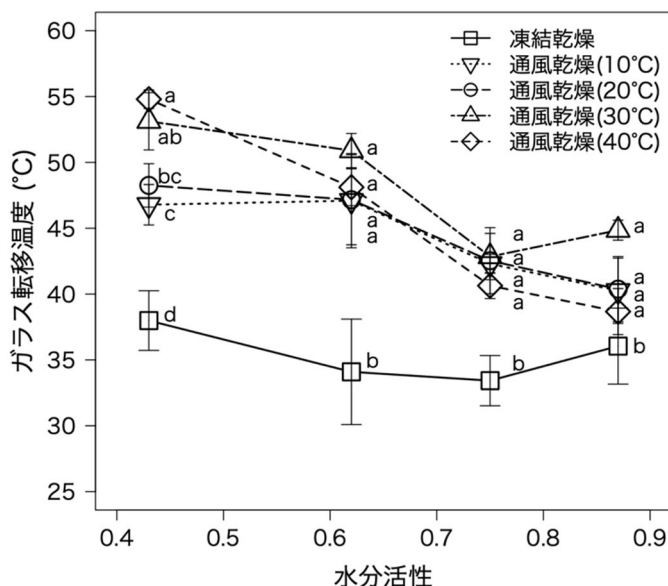


図 1. 各乾燥条件における *B. cereus* 細胞のガラス転移温度 (T_g) と水分活性 (a_w) との関係。同じ a_w での T_g の比較では、同じアルファベットを含まない T_g は有意に異なる ($P < 0.05$)。

燥方法や乾燥温度、保存温度、保存 a_w の違いによらず、一定期間保存した乾燥 *B. cereus* 細胞の生存挙動を、 T_g と保存温度の差で記述できることを明らかにした。

以上のように、*B. cereus* 細胞のガラス転移温度は、乾燥方法や保存 a_w 、乾燥温度の影響があった。さらに T_g と菌体を保存した温度の差を用いることで、乾燥条件や乾燥後の保存条件の違いによらず、乾燥環境下におかれた *B. cereus* 細胞の生存挙動を予測判断できることを明らかにした。

これらの結果は、乾燥環境下での細菌の生存特性を予測可能とする新たな指標として有用であり、乾燥食品の保存状態の情報（保存温度と a_w ）と、対象となる食中毒細菌の T_g との情報から食中毒リスクを推定可能とする指標となり得る。今後、世界中で問題となっている乾燥食品での食中毒の予防対策の一つの指標として活用されることが期待される。

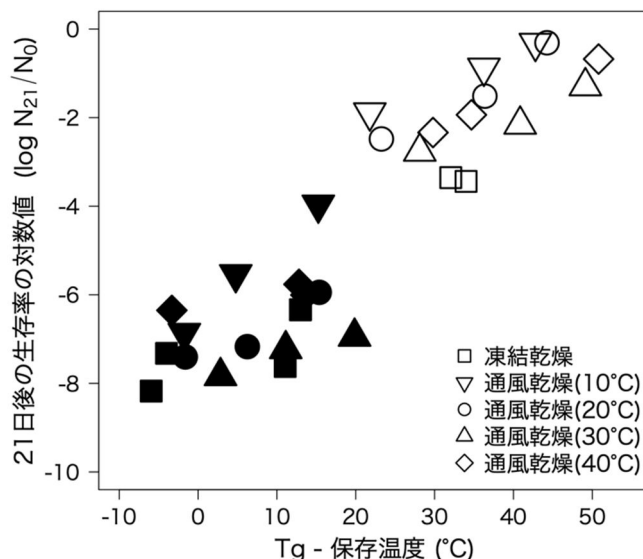


図 2. 乾燥条件と保存条件の異なる乾燥 *B. cereus* 細胞の 21 日後の生存率とガラス転移温度 (T_g) と保存温度との差の関係。 N_0 と N_{21} は初期菌数と 21 日後の生菌数をそれぞれ表す。シンボルの塗りつぶしの有無はクラスターが異なることを示す。

(2) ガラス化のメカニズム解明

C. sakazakii の等温機械的緩和挙動の典型的な結果を図 3 a に示した。 $a_w = 0.328$ の試料は機械的応力緩和が小さく、高弾性（低分子移動度）であることを示す。一方、 $a_w = 0.843$ の試料は大きな機械的緩和を示し、低弾性（高分子移動度）を示した。等温機械的緩和挙動から、初期力と 3 分後の力の差 ΔF を等温機械的緩和の代表的なパラメータとして評価した（図 2 b）。

298K における *C. sakazakii* の ΔF に及ぼす a_w の影響を図 2 b に示した。 a_w が高い領域では、 ΔF 値は a_w の増加とともに徐々に増加した。これは、ガラス転移がターニングポイントで起こったことを示唆している。 ΔF の a_w 依存性は 2 つの一次関数で記述され、クロスオーバー点 (a_{wc}) は 0.667 と決定された。

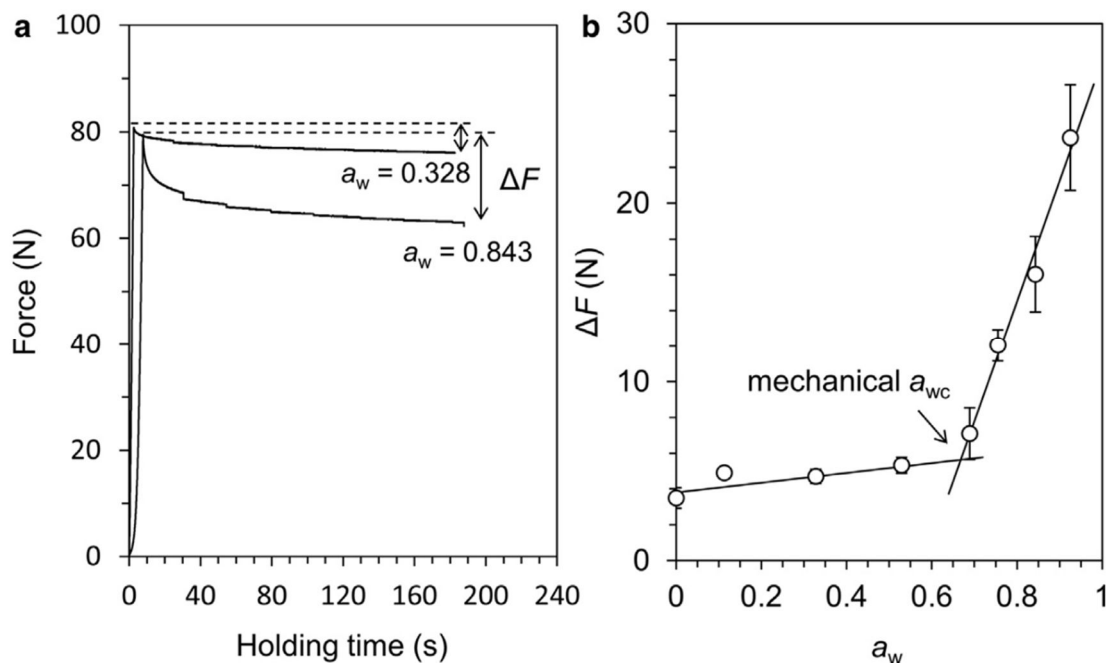


図 3 298 K (25°C) における *C. sakazakii* サンプルの典型的な等温機械的緩和挙動 (a) および 298K における *C. sakazakii* サンプルの ΔF に対する a_w の影響 (b)。数値は平均値 \pm SD ($n=3$) で表した。

次に、中性子弾性散乱から原子（主に水素）の平均二乗変位（Mean Squared Difference, MSD）を温度（-173 ~ 80）の関数として評価し、MSD の温度依存性を直線近似、交点から動力学転移（dynamical transition）を捉える a_w に依存した複数の T_d （dynamical transition temperature）を決定し、 a_w と T_d との関係性を明らかにした（図 4）。その結果、low- T_d は a_w に依存せず（メチル基など疎水的な側鎖）middle- T_d は a_w に若干依存（親水的な側鎖）し、high- T_d は a_w に大きく依存し力学的ガラス転移（ T_g ）と一致（主鎖、全体）することを明らかにした。

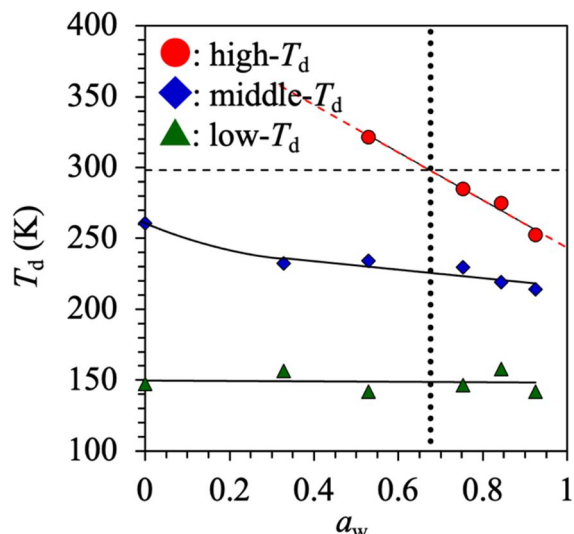


図 4 *C. sakazakii* の T_d s に及ぼす a_w の影響。縦破線は単層 a_w 、点線はメカニカル a_{wc} である。水平破線は基準温度（298K）

(3) 添加剤の影響がガラス化に及ぼす影響の解明

溶質（グリセロール、グルコース）が微生物（細菌）のガラス転移挙動に及ぼす影響を調べた結果を図 5 に示した。

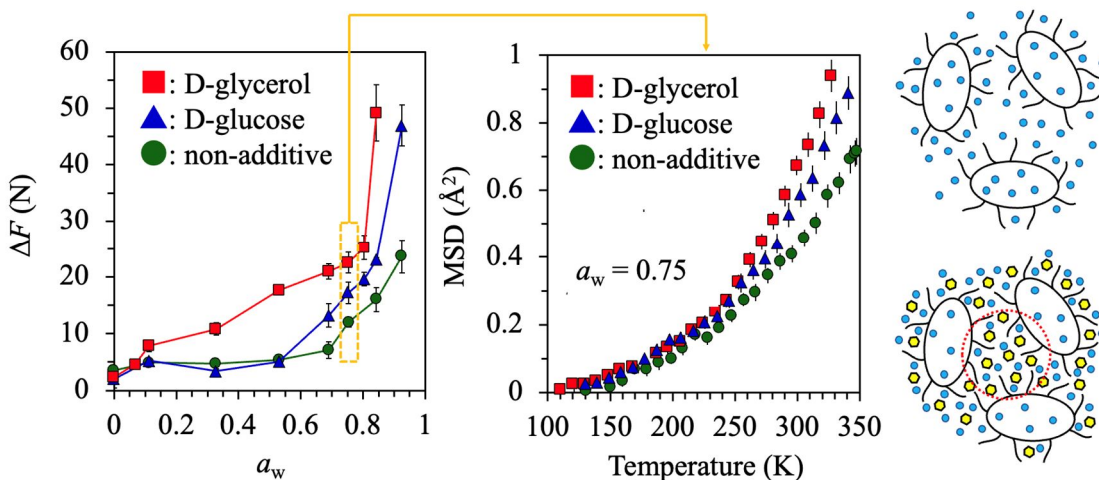


図 5 . 25 におけるグリセリン、グルコース、無添加試料の ΔF に及ぼす a_w の影響（左）および保存温度と MSD との関係に及ぼす溶質添加の影響（ $a_w = 0.75$ ）（右）

タンパク質とは逆の傾向を示し、溶質は細胞膜を（殆ど）透過しないため、細胞間に局在する事が推測される。一定の a_w では低分子の方が水分子は多い（特に高 a_w 領域では）ため、細胞間でより柔軟に移動することができる事が示唆された。

研究開始当初は、微生物の活動停止と活動再開は溶液のガラス-ラバー転移と同じ物理現象と推察していたが、ガラス-ラバー転移はクリティカルな現象ではなく、トリガーといえることが示唆された。また、細胞内と細胞外（細胞-細胞間）でダイナミクスが異なること、そして細胞内の溶質は水を介して細胞内を動きやすくする（低 a_w での活動に有利）ことが示唆された。

以上、本研究は細菌が乾燥に伴いガラス化し、生存期間を延長することを生存・死滅といったマクロな現象面と細胞内での水分子の移動といったミクロな面から明らかにし、今後の乾燥食品での病原菌の生残挙動の予測、制御のみならず、有用細菌の長期間の保存を可能とする基盤となる知見を蓄積することができた。

< 引用文献 >

- Farakos, S. M. S., Schaffner, D. W. & Frank, J. F. Predicting survival of Salmonella in low-water activity foods: An analysis of literature data. J Food Protect 77, 1448–1461 (2014).
- Horikawa, D. D. et al. High Hydrostatic Pressure Tolerance of Four Different Anhydrobiotic Animal Species. Zoological science 26, 238–242 (2009).
- Kawai, K., Toh, M. & Hagura, Y. Effect of sugar composition on the water sorption and softening properties of cookie. Food Chem 145, 772–776 (2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tomochika Sogabe, Hiroshi Nakagawa, Takeshi Yamada, Shigenobu Koseki, Kiyoshi 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 小関 成樹, 川井 清司	4. 巻 22
2. 論文標題 乾燥環境下において生存し続ける微生物の特性とその生存メカニズム	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 環境バイオテクノロジー学会誌	6. 最初と最後の頁 33-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.50963/jenvbio.22.1_33	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	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 2022年
3. 雑誌名 Macromolecular Symposia	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 Hiroshi Nakagawa, Naoki Yamamoto	4. 巻 13
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 Lee Kyeongmin, Koyama Kento, Kawai Kiyoshi, Koseki Shigenobu	4. 巻 9
2. 論文標題 Why Does Cronobacter sakazakii Survive for a Long Time in Dry Environments? Contribution of the Glass Transition of Dried Bacterial Cells	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microbiology Spectrum	6. 最初と最後の頁 e01384-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1128/spectrum.01384-21	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 Kaneko Fumitoshi, Radulescu Aurel, Nakagawa Hiroshi	4. 巻 56
2. 論文標題 Simultaneous SANS/FTIR measurement system incorporating the ATR sampling method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Crystallography	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 -

1. 著者名 Kumada Takayuki, Nakagawa Hiroshi, Miura Daisuke, Sekine Yurina, Motokawa Ryuhei, Hiroi Kosuke, Inamura Yasuhiro, Oku Takayuki, Ohishi Kazuki, Morikawa Toshiaki, Kawamura Yukihiko, Kawai Kiyoshi	4. 巻 14
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 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 7638 ~ 7643
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 Kawai Kiyoshi, Sogabe Tomochika, Nakagawa Hiroshi, Yamada Takeshi, Koseki Shigenobu	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 ~ 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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kyeongmin Lee, Saki Tanaka, Tatsuya Inomata, Kiyoshi Kawai, Kento Koyama, Shige Koseki
2. 発表標題 Effect of the glass transition of dried bacterial cells on the survival under desiccation environment
3. 学会等名 FOODMICRO 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川井 清司, 曾我部 知史, 中川 洋, 山田 武, 小関 成樹
2. 発表標題 吸湿による乾燥微生物の再活性メカニズム
3. 学会等名 2022年度量子ビームサイエンスフェスタ 第14回 MLFシンポジウム, 第40回PFシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023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 川井清司, 曾我部知史, 中川洋, 山田武, 小関成樹
2. 発表標題 水分活性変化による細菌の活動停止-再開とガラス-ラバー転移
3. 学会等名 日本食品工学会第24回(2023年度)年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsuya INOMATA, Kiyoshi KAWAI, Kento KOYAMA, Shige KOSEKI
2. 発表標題 Desiccation tolerance of Bacillus cereus: Contribution of glass transition phenomena of the bacterial cells
3. 学会等名 37th EFFoST International Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

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

〔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	川井 清司 (Kawai Kiyoshi) (00454140)	広島大学・統合生命科学研究科(生)・教授 (15401)	

6. 研究組織（つづき）

	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