

0°C以下の海でも魚が凍らない秘密

～分子シミュレーションで氷と不凍糖タンパク質の吸着の仕組みを解明～

研究の概要

1.背景

地球には、雪山や極地の海など温度が0°C以下になる環境がたくさんあります。しかし、そのような寒い環境でも、生物は生きています。魚や昆虫は、我々人間と違い、自分で体温が調整できない変温動物です。つまり、体の中と外の温度がほとんど同じになるはずですが、なぜ、彼らは“冷凍”されずに生きているのでしょうか？

北極や南極の海の温度は約-2°Cになりますが、水道から出る水と違い、海水は凍りません。それは、水に塩が溶けることで起こる「凝固点降下※1」という現象で説明できます。しかし、その冷たい海に生きる魚の血液は海水より濃度が薄いため、単純に考えれば-2°Cで凍ってしまうはずですが、彼らは氷に吸着する不凍糖タンパク質※2 と呼ばれる分子を体内に持ち、その分子が氷の成長を止める事で、冷凍されずに生きています（図1）。しかし、不凍糖タンパク質のどの部分が、どうやって氷に吸着することで氷の成長を止めるかという詳細な分子メカニズムは、魚のみぞ知る“秘密”でした。

氷の表面だけを選択的に観察し、数ナノメートル（0.000001 ミリメートル）ほどしかないタンパク質分子の形や動きを調べることは、現在の実験技術では非常に困難です。そこで、我々は分子シミュレーションを用いてこの難問に挑戦しました。

2.研究手法

自然科学研究機構 岡崎共通研究施設 計算科学研究センターにあるスーパーコンピューターを用いて大規模分子シミュレーションを行いました。不凍糖タンパク質には様々な長さがありますが、その化学的構造は同じであり、本質的には同じ働きをすると考えられています。本研究では一番短い Antifreeze glycoprotein 8 (AFGP8) という分子を研究対象にしました。

3.研究成果

まず、不凍糖タンパク質が水中で疎水部分と親水部分がはっきりと分離した分子構造をとることが分かりました（図2）。そして、不凍糖タンパク質を氷面上に置き、氷を成長させるシミュレーションを行なったところ、不凍糖タンパク質の疎水部分が氷に吸着することが分かりました（図3）。さらに、不凍糖タンパク質は平らな氷面との相互作用が強すぎないため“のそのそ”と氷面上を動くことを見つめました（図4）。そして、平らな氷面上を動き、氷の成長部分（氷の段差）を見つ

けると、そこに強く結合することも明らかにしました。これらの特徴は、寒冷地の昆虫などが持つ同類のタンパク質（不凍タンパク質）と大きく異なり、魚が持つ不凍糖タンパク質独自の振る舞いである事が分かりました。

4. 今後への期待

本研究は、分子シミュレーションを用いて、実験では難しい分子レベルの理解：不凍糖タンパク質が氷へ吸着する仕組みを明らかにしました。さらに研究を発展させる事で、「極限環境で生きる生命の不思議」の全体像に迫る事が期待できます。

一度冷凍した肉やお刺身が美味しくなくなるのは、冷凍した時に細胞の中に含まれる水分が凍結して氷が成長し、細胞を破壊してしまうことが原因といわれています。細胞内の氷の成長を抑制できれば、冷凍しても細胞の破壊を最小限に食い止めることができます。我々が得た分子レベルの知見は、より効果的な働きをする新規分子のデザインに役立ちます。そして、冷凍技術・凍結防止技術の発展は食品、医療、材料など幅広い分野への応用が期待できます。

著者情報

国立大学法人信州大学 先鋭領域融合研究群 国際ファイバー工学研究所

国立大学法人信州大学 繊維学部 化学・材料学科（兼任）

助教

望月建爾（もちづき けんじ）

www.shinshu-u.ac.jp/faculty/textiles/guidance/teacher/prof/107481.html

mochizuki@shinshu-u.ac.jp

取材連絡先

国立大学法人 信州大学 繊維学部

神田孝文（かんだ たかふみ）

0268-21-5307

t_kanda@shinshu-u.ac.jp

〒386-0018 長野県上田市常田 3-15-1

参考図

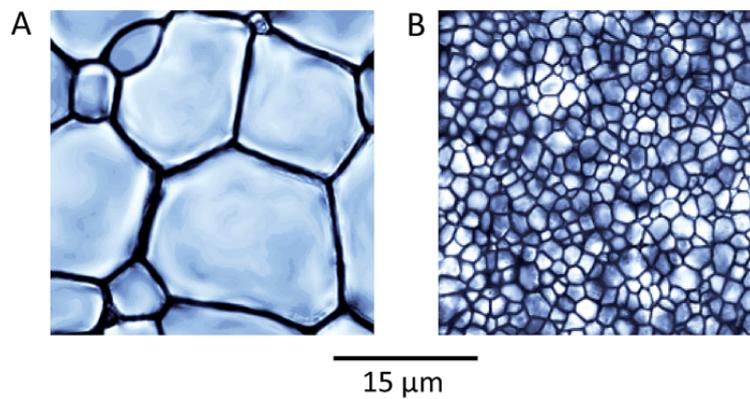


図 1: 不凍糖タンパク質がない場合(A)とある場合(B)による氷の成長の違い。A では大きな氷ができているが、B では小さいままで成長が止まっている。

(引用元 : *RSC Adv.*, 2014, 4, 42682-42696)

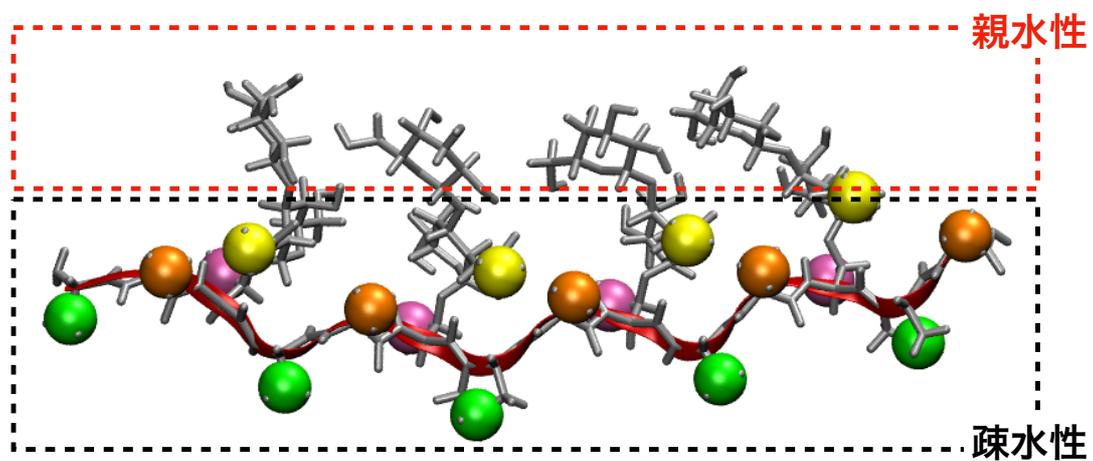


図 2 不凍糖タンパク質の水中での分子構造

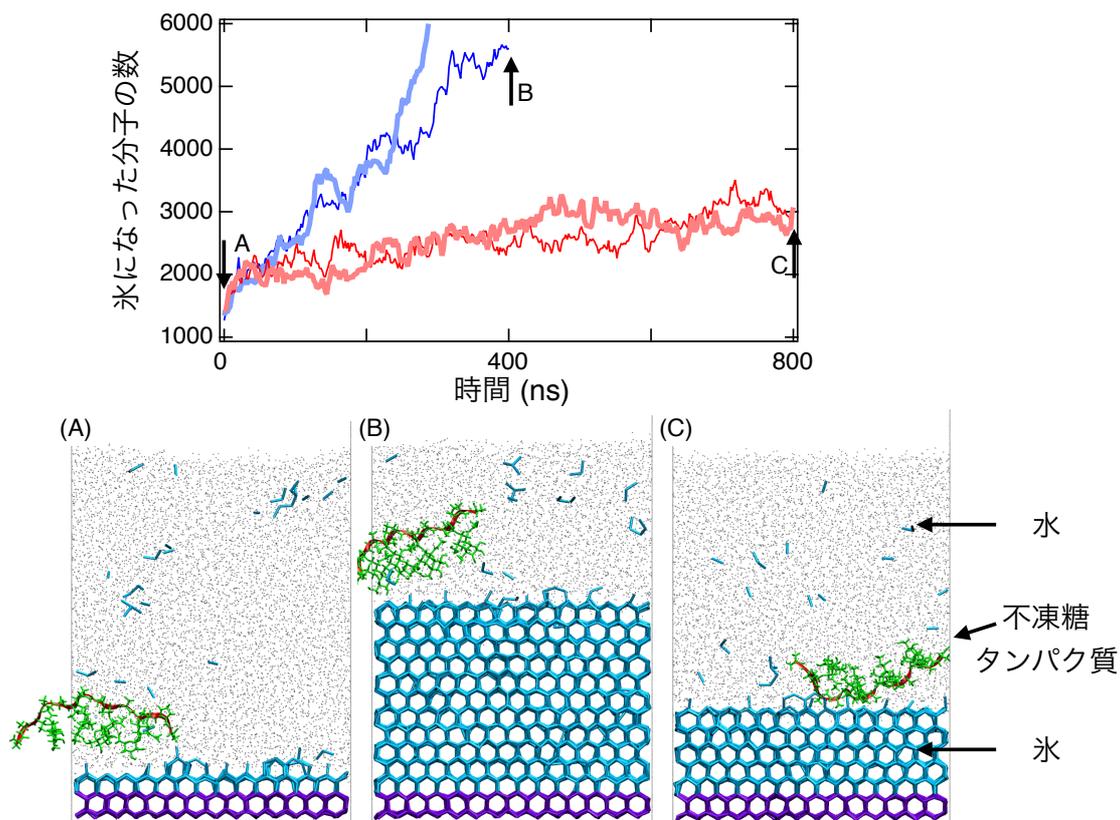


図3 成長する氷表面での不凍糖タンパク質の振る舞いをシミュレーションした図。上のグラフは不凍糖タンパク質の氷表面での向きが変わることで、氷の成長がどのように変化するかを時系列的に示したもの。横軸は時間経過を示しており、赤いラインを見ると氷の成長が止まっていることが分かる。この時、図Cのように、不凍糖タンパク質は疎水部分で吸着している。一方、青いラインのように、氷の成長が止まらない場合は、不凍糖タンパク質の親水部分が氷側を向いており、氷に吸着しない(図A,B)。

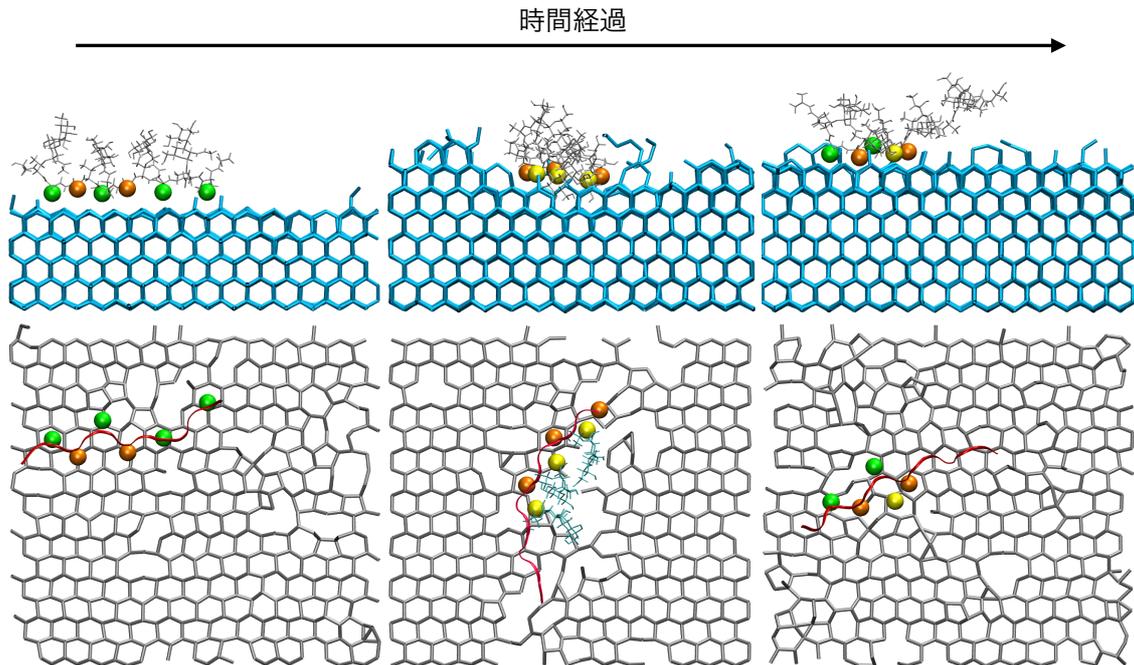


図 4 不凍糖タンパク質が氷の上を動く様子、上段は横から見た図、下段は上から見た様子。氷に吸着している疎水基を球体で表している。

用語の解説

※1 凝固点降下：水溶液の凝固点が、様々な物質（溶質）が溶け込んでいることによって純粋の凝固点（ $=0^{\circ}\text{C}$ ）より下がる熱力学的性質。水溶液中に溶けた溶質の粒子数のみで決まっており、塩水だけでなく砂糖水も同じ性質を示す。普段の生活から、ジュースが水よりも凍りにくい事を知っている人も多いのでは。

※2 不凍糖タンパク質：極海に住む魚の体内にあるタンパク質分子。分子内に糖鎖を持つ事から不凍“糖”タンパク質と呼ばれる。氷に吸着する事で、氷の成長を止めるが、その詳細はハッキリしない。ちなみに、不凍糖タンパク質と同様に不凍機能を持つが、糖鎖を持たないタンパク質（主に昆虫などが持つ）を不凍タンパク質と呼ぶ。