

好冷菌, 好熱菌, 「広温菌」

佐藤 悠¹・本田 孝祐²

「温度」は生物の活動の場を制限する重要な因子の1つである。我々 *Homo sapiens* の成人の通常体温は33°Cから38°Cであり、衣服なしでは生活できる場所は限られる。他の真核生物の生育可能な最高温度も60°C付近であり、熱めの温泉での生育が“やっと”である。対して、原核生物は氷点下でも凍結しない南極の塩湖から100°Cを超える深海の熱水噴出孔まで幅広い温度環境から見つかった。本稿では、その温度適応メカニズムの一端も含め、さまざまな温度条件下で生育可能な原核生物について紹介したい。

NCBI Taxonomy データベースによると、2019年3月までに未記載種を含む約19,000種の原核生物の存在が確認されている。低温環境からはマイナス10°C以下でも生育可能な *Planococcus*, *Psychromonas*, *Psychrobacter* 属のバクテリアが単離されており、中でも *Planococcus faecalis* はマイナス20°C未満でも生育可能である。ゲノムや遺伝子の転写産物の解析から、*Planococcus* 属の仲間には isozyme (アミノ酸配列は異なるが同じ触媒機能を担う酵素) をコードした遺伝子を複数コピー有しており、温度依存的な isozyme の利用を介した低温適応機構の存在が示されている¹⁾。一方、生物界の最高生育温度トップ10はいずれもアーキアである。特に、高圧条件下において122°Cで生育可能なメタン生成菌 *Methanopyrus kandleri* は有名である。好熱菌や超好熱菌の主な高温適応機構として、特定のアミノ酸含有量を高めることによるタンパク質の耐熱性向上やリバースジャイレースによるゲノムの熱安定化、流動性の低下による強固な膜構造の形成などが知られている²⁾。上述の通り、低温、もしくは、高温のみの増殖に特化したスペシャリストとその温度適応戦略は多くの研究者を魅了し、注目されてきた。

表1. 幅広い温度範囲で生育可能な原核生物 (広温菌) の例

菌株	単離場所	生育温度 (°C)		
		最低	最高	差
<i>Kosmotoga olearia</i>	油田	20	80	60
<i>Streptomyces thermoautotrophicus</i>	炭窯	10	70	60
<i>Bacillus beveridgei</i>	塩湖	5	65	60
<i>Bradyrhizobium erythrophlei</i>	根粒	4	60	56
<i>Methanosarcina soligelidi</i>	永久凍土	0	54	54

一方、低温から高温まで幅広い温度範囲において生育可能なジェネラリストも存在する。最低生育温度と最高生育温度の差が50°Cを超える原核生物の例を表1にまとめた。本稿では、これらの幅広い温度環境で生育できる性質 (広温性) を有する原核生物の一群を「広温菌」と呼称する。広温菌の単離された環境は多様であるため、広温性は特定の環境条件に依存しない特徴と言える。代表的な広温菌である *Kosmotoga olearia* の倍加時間に着目すると、65°Cでは2時間、37°Cでも3時間と幅広い温度範囲で速い増殖速度が示されている³⁾。また、*K. olearia* は、好熱菌からなる *Thermotogales* 目や中温菌を含む *Mesoaciditogales* 目などと同じ *Thermotogae* 綱に属しており、温度適応や進化を研究するうえで良いモデルとなる生物である。低温から高温にかけて培養した *K. olearia* の全RNA 網羅解析からは、温度依存的な転写制御機構の存在が示唆されている⁴⁾。最低生育温度に近い30°Cではアミノ酸合成に関わる遺伝子の転写量が増加し、10°C温度上昇させるとペプチダーゼやアミノ酸分解に関わる遺伝子の転写量が増加した。そのため、低温時には細胞機能を維持するために適合溶質としてアミノ酸を蓄え、中温域ではそれらを増殖に利用するといった温度適応戦略が予想される。最高生育温度に近い77°Cでは、炭化水素の代謝に関わる遺伝子の転写量が顕著に増加していたが、その理由はわかっていない。また、高温培養時に転写量が増加した遺伝子の約3割は機能未知であることから、*K. olearia* の広温性を支える機構については続報が待たれる。

低温から高温、広温に至るまで多種多様な原核生物を見てきたが、すべての原核生物に共通した「生育温度を決定する因子」はあるのだろうか。利用可能なゲノム情報の増加に伴い、それに基づいて生育温度に影響する因子を抽出する試みも行われている⁵⁾。もし因子を特定できれば、産業利用されている有用微生物の生育温度を操作する新技術の開発にもつながる。学術面だけでなく産業面でも未だ冷めやらぬ熱いトピックとして今後の研究が期待される。

- 1) Mykytczuk, N. C. et al.: *ISME J.*, **7**, 1211 (2013).
- 2) 佐藤喬章, 跡見晴幸: *生物工学*, **93**, 468 (2015).
- 3) Dipippo, J. L. et al.: *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, **59**, 2991 (2009).
- 4) Pollo, S. M. J. et al.: *Extremophiles*, **21**, 963 (2017).
- 5) Sauer, D. B. and Wang, D. -N.: *Bioinformatics*, btz059 (2019).

著者紹介 ¹大阪大学大学院工学研究科 生命先端工学専攻 合成生物工学領域 (特任研究員) E-mail: sato@bio.eng.osaka-u.ac.jp

²大阪大学大学院工学研究科 生命先端工学専攻 合成生物工学領域 (准教授) E-mail: honda@bio.eng.osaka-u.ac.jp