

放射線耐性微生物の多様性

なるみいっせい
鳴海一成

日本原子力研究所・イオンビーム生物応用・バイオ技術

Diversity of ionizing-radiation-resistant microorganisms

Issay Narumi

Res. Gr. Biotechnol. Dev., Dept. Ion-beam-applied Biol., JAERI

Key words: radioresistant eubacteria and archaea, evolution, desiccation tolerance, ecology

1. はじめに

生物は、紫外線や変異原物質といった外的要因のみならず、細胞の呼吸や代謝の過程で生じる活性酸素やDNA複製時の誤りなどの内的要因によって、常にDNA損傷を被る環境に曝されている。生物はこれに対抗するために、進化の過程でDNA修復機構を獲得してきたが、生物のDNA修復能力は生物種によって大きく異なっている。生物の中でも原核微生物が最も放射線に強く、原核微生物の中でも極めて放射線に強い微生物群を総称して、放射線耐性微生物と呼んでいる。電離放射線による生物効果で最も重篤な障害はDNA 2本鎖切断であり、放射線耐性微生物はDNA 2本鎖切断に対する修復能力が優れているのである。

2. 放射線耐性微生物の発見

1950年代、コバルト60やセシウム137といったガンマ線源が比較的容易に整備できるようになると、その特性を利用して、食品の放射線滅菌への応用が検討されるようになった。1956年、米国オレゴン州の牛肉缶詰工場で、ガンマ線滅菌したはずの缶詰の中で増殖している細菌が見つかり、これが放射線耐性微生物の最初の発見となった¹⁾。 *Deinococcus radiodurans* と名付けられたこの菌は、最も早く分離された極限環境微生物と言える。 *D. radiodurans* は、「世界で最もタフな微生物」として、ギネスブックで紹介されていたこともある。1956年以来、様々な自然環境中から放射線耐性を有する *Deinococcus* 属細菌が分離されており、分離源は、動物の糞²⁾、淡水魚³⁾、海水魚⁴⁾、温泉⁵⁾、砒素鉱山帯水層⁶⁾、岩石空隙⁷⁾、砂岩⁷⁾ など多種多様である。これらの分離源はすべて自然放射線レベルの場所であるので、 *Deinococcus* 属細菌は、特に放射線レベルが高いところに生息しているものではない。現在、食品を滅菌するために、10キログレイ (= 約10キロシーベルト; ヒトが被爆している自然放射線量は1年間でおよそ2.4ミリシーベルト) までの放射線照射が国際勧告で認められている。そもそも、このような高線量の放射線を放出している自然環境は現在の地球環境に存在しないのであるが、このよう

な多量の放射線を浴びても、*D. radiodurans*は100%生き残るのである。*Deinococcus*属細菌以外では、1970年代にグラム陰性細菌の中では最も放射線に強い*Methylobacterium radiotolerans*が古米から⁸⁾、*Rubrobacter radiotolerans*がラドン温泉から⁹⁾、どちらも日本で分離された。1988年に*Acinetobacter radioresistens*が綿と土壌から¹⁰⁾、1996年に*Rubrobacter xylanophilus*が工場温排水から分離され¹¹⁾、2000年には、*Hymenobacter actinosclerus*が照射豚肉から¹²⁾、*Chroococcidiopsis* spp.が岩石空隙から分離された¹³⁾。2002年に分離された*Kineococcus radiotolerans*の分離源は、米国サウスカロライナ州の高レベル放射性廃棄物処理施設の作業エリアであった¹⁴⁾。2004年には、*Rubrobacter taiwanensis*が台湾の温泉から分離された。2005年には、アゾレス諸島サンミゲル島の温泉から、*Deinococcus* / *Thermus*のPhylumに属する新属新種*Truepera radiovictrix*が分離されている¹⁵⁾。*Bacillus*属や*Chlostridium*属の芽胞は放射線に強いことが知られているが、上述した放射線耐性微生物は無芽胞栄養型細菌の状態で放射線に耐性を示す。*Rubrobacter radiotolerans*が分離された三朝ラドン温泉の放射線量は自然放射線量と同レベルであるが、*Kineococcus radiotolerans*が分離された高レベル放射性廃棄物施設作業エリアの放射線量は、場所にもよるが数桁高い可能性がある。これを考えると、生物の放射線耐性が環境に応じて獲得できる形質である可能性を否定できない。

3. 超好熱古細菌も実は放射線耐性微生物

最近になって、海底の熱水鉱床近傍から分離された*Thermococcus*属や*Pyrococcus*属の中に、放射線に強いものがあることが分かってきた (*Pyrococcus furiosus*¹⁶⁾, *Pyrococcus abyssi*¹⁷⁾, *Thermococcus stetteri*¹⁸⁾, *Thermococcus gammatolerans*¹⁸⁾, *Thermococcus marinus*¹⁹⁾, *Thermococcus radiotolerans*¹⁹⁾)。これらの放射線耐性古細菌の放射線耐性は、放射線耐性真正細菌に匹敵し、放射線耐性の原因は熱からのDNA防御機構によるものではなく、優れたDNA 2本鎖修復能力に起因することが実験的に証明されている。これらの深海熱水鉱床の近傍から分離された嫌気性古細菌が耐熱性だけでなく、放射線耐性でもあるということは、地球上にまだ酸素が存在しない嫌気的環境下で、かつ高熱・高放射線環境下で誕生した原始生命の一群の存在を示唆するものである。

4. 放射線耐性獲得の起源

放射線耐性微生物は、いつどのようにして耐性形質を獲得し、それを現在まで維持し続けてきたのであろうか？米国レイジアナ州立大学のJohn R. Battista教授の研究グループは、*D. radiodurans*の放射線感受性変異株のほとんどが乾燥にも弱いことを示し、*D. radiodurans*の放射線耐性は進化の過程で乾燥耐性を得た際の副次的なものであるという説を提唱した¹⁹⁾。しかし、放射線耐性が環境に応じて獲得できる形質であれば、別の可能性が考えられる²⁰⁾。ウラン鉱床は、約20億年前のCyanobacterialによる地球環境の酸素増大後に海底地下で形成された。ウランは4価と6価の原子価を取りやすく、酸化雰囲気では6価になり、水に溶けやすい。

水に溶解した6価のウランは、海底地下生物圏の微生物により4価に還元されて不溶性になる。このような循環を繰り返すことで、堆積型のウラン鉱床が形成されたと考えられている。*D. radiodurans*及びその近縁種である*Thermus*属細菌にはウランを還元する能力があることが報告されている^{21, 22)}。このことは、両者の祖先型細菌が堆積型ウラン鉱床の形成に係わっていた可能性を示唆している。海底地下生物圏から、90°Cで嫌氣的増殖をする*Deinococcus*属細菌が分離されたという報告もあるが、残念なことにこのisolateは継代できずに死滅したとのことである²³⁾。高濃度のウランは自然核分裂反応を起こす。ウランの同位体半減期を考えると、燃えるウラン（核分裂反応に寄与するウラン）と言われるウラン235の20億年前の同位体存在比は、現在の原子力発電所の軽水炉燃料として使用されている低濃縮ウラン中のウラン235の同位体存在比よりも高い。したがって、20億年前のウラン鉱床では、核分裂連鎖反応が自然に起こる条件が整っていたのである²⁴⁾。実際に、アフリカのガボン共和国で、約20億年前に自然核分裂連鎖反応を起こしたウラン鉱床（オクロ天然原子炉）が見つかっており、また、地球上の様々の沈殿物で測定されたウラン238に対するウラン235の存在比が一定の値で変動していることから試算して、過去の地球において約1億個のオクロ型の天然原子炉が稼働していたとも見積もられている。典型的な天然原子炉から放出される放射線の線量率は、毎時47.4グレイと計算されている。一方、*D. radiodurans*は毎時60グレイのガンマ線の連続照射下でも正常に増殖することが報告されている²⁵⁾。天然原子炉の稼働推定期間である100万年という時間は、生物の新種が生まれるのに十分な時間である。以上のことから、このような20億年前の海底地下で起こったイベントによって、*D. radiodurans*のような放射性耐性微生物が誕生した可能性が十分に考えられる²⁰⁾。

5. おわりに

放射線耐性微生物の多様性がいったいどのような広がりを持っているのか、まったく興味の尽きないことである。これからも、放射線耐性を指標にして、放射線耐性微生物の新属新種が分離されることが想像に難くない。しかしながら、*Deinococcus*属以外の放射線耐性微生物に目を向けると、ほとんどのものが分離同定後、放射線に対する生存率などの性質の解析にとどまっている。放射線耐性微生物のDNA修復機構を解明することは、DNA損傷が原因で起こるガンや老化を予防するための方策に新たな方向性をもたらすことにも繋がる²⁶⁾。また、放射線耐性微生物は有用遺伝子資源の宝庫でもある。例えば、高活性あるいは新規活性を有するDNA修復酵素は遺伝子工学用試薬として有望である²⁷⁾。さらに、放射線耐性微生物は乾燥や非電離放射線である紫外線にも強いので、バイオレメディエーションやバクテリオリーチングのための宿主としても有望である。特殊な例としては、高レベル放射性廃棄物から有用元素を回収するためにも有望である。原子力発電所から搬出される使用済燃料の再処理工程では、燃料として利用できない放射性物質のセシウムやストロンチウムを含む廃液が残り、利用されないままガラス固化体として処理されている。高レベル放射性廃棄物の

初期の高い放射能と発熱の原因となる核種は、主として短寿命核種であるセシウム 137 とストロンチウム 90 である。これらの短寿命核種を放射性廃棄物から分離することができれば、残った廃棄物の中間貯蔵期間を短縮できる。このような技術が開発されると、核燃料サイクル技術における人的及び環境負荷リスクの軽減にも貢献できるであろう。放射線耐性微生物研究の進展を期待して止まない。

- 1) Anderson, A. W. *et al.* 1956. *Food Technol.* 10: 575-578.
- 2) Kobatake, M. *et al.* 1973. *C. R. Soc. Biol. (Paris)* 167: 1506-1510.
- 3) Oyaizu, H. *et al.* 1987. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 37: 62-67.
- 4) Davis, N. S. *et al.* 1963. *J. Bacteriol.* 86: 294-298.
- 5) Ferreira, A. C. *et al.* 1997. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 47: 939-947.
- 6) Suresh, K. *et al.* 2004. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 54: 457-461.
- 7) Hirsch, P. *et al.* 2004. *Syst. Appl. Microbiol.* 27: 636-645.
- 8) Ito, H. and Iizuka, H. 1971. *Agric. Biol. Chem.* 35: 1566-1571.
- 9) Yoshinaka, T. *et al.* 1973. *Agric. Biol. Chem.* 37: 2269-2275.
- 10) Nishimura, Y. *et al.* 1988. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 38: 209-211.
- 11) Carreto, L. *et al.* 1996. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 46: 460-465.
- 12) Collins, M. D. *et al.* 2000. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 50: 731-734.
- 13) Billi, D. *et al.* 2000. *Appl. Environ. Microbiol.* 66: 1489-1492.
- 14) Phillips, R. W. *et al.* 2002. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 52: 933-938.
- 15) Albuquerque, L. *et al.* 2005. *FEMS Microbiol Lett.* 247: 161-169.
- 16) DiRuggiero, J. *et al.* 1997. *J. Bacteriol.* 179: 4643-4645.
- 17) Gerard, E. *et al.* 2001. *Mol. Gen. Genomics* 266: 72-78.
- 18) Jolivet, E. *et al.* 2003. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 53: 847-851.
- 19) Mattimore, V. and Battista, J. R. 1996. *J. Bacteriol.* 178: 633-637.
- 20) 鳴海一成, 2003. *遺伝* 57: 57-62.
- 21) Fredrickson, J. K. *et al.* 2000. *Appl. Environ. Microbiol.* 66: 2006-2011.
- 22) Kieft, T. L. *et al.* 1999. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 1214-1221.
- 23) Kimura, H. *et al.* 2003. *Appl. Environ. Microbiol.* 69: 644-648.
- 24) 黒田和夫, 1988. 「17 億年前の原子炉-核宇宙化学の最前線」講談社ブルーバックス
- 25) Lange, C. C. *et al.* 1998. *Nature Biotechnol.* 16: 929-933.
- 26) Narumi, I. 2003. *Trends Microbiol.* 11: 422-425.
- 27) Narumi, I. *et al.* 2004. *Mol. Microbiol.* 54: 278-285.

鳴海一成 Issay Narumi : narumi@taka.jaeri.go.jp