

21世紀を持続的社會とするために，“環境にやさしいもの作り”を目指した研究が活発に行われている。微生物（細菌、酵母、放線菌、糸状菌）を利用した金属イオンの還元・ナノ粒子化は、生物機能を利用した常温操作であること、有害な薬品の使用量を低減できるという点で、環境考慮型の無機材料合成技術としての可能性を秘めている。

微生物による金属イオンの還元は、異化作用（外部の有機物あるいは無機物を分解してエネルギーを得てATPを合成する代謝）や毒性を持つ金属イオンを無毒化する作用によるものと考えられている。微生物はバイオミネラルゼーション（生物鉱物化）、バイオソープション（生物吸着）、錯体形成、粒子析出などによって金属イオンの無毒化を行っている¹⁾。表1に細菌細胞を用いた金属イオンの還元・粒子化の一覧を示している²⁾。これまでに、微生物による多くの種類の金属ナノ粒子合成が報告されているが、一般的に、生物反応は時間がかかるため、粒子の生成速度は非常に遅く、粒子生成までに24～120時間を必要とするものもある。これに対して、小西らはFe(III)還元細菌を用いて、30分程度の操作時間でAu(III)イオンを還元・析出することに成功している³⁾。Fe(III)還元細菌は、自然界では水圏の底泥などの嫌気的条件下で、乳酸塩など有機酸塩を電子供与体、鉄(III)イオンを最終電子受容体とする鉄呼吸によって生育している。Fe(III)イオンの還元電位 ($\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$; 0.77 V) が貴金属イオンの還元電位（たとえば、 $\text{PtCl}_6^{2-} + 4e^- \rightarrow \text{Pt}^0 + 6\text{Cl}^-$; 0.73 V）と同程度であることに、貴金属ナノ粒子の調製にFe(III)還元細菌が適用できる一因があると考えられる。

ナノ粒子の生成場は、細胞内と細胞外に大別される。図1は塩化パラジウム水溶液にFe(III)還元細菌 *Shewanella oneidensis* を添加して60分後の細胞の電子顕微鏡写真で

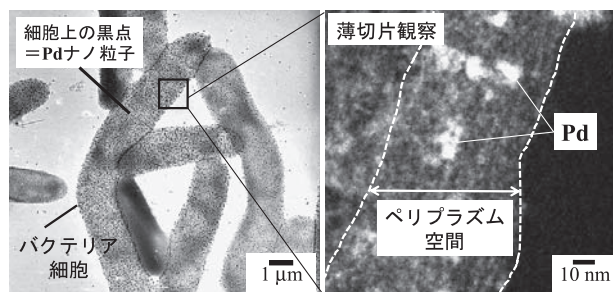


図1. Fe(III)還元細菌によって生成したパラジウムナノ粒子

ある。微生物細胞の表面に5 nm程度のパラジウムナノ粒子が比較的分散した状態で生成していることがわかる。細胞の薄切片分析の結果から、生成粒子が細胞外膜と内膜の間のペリプラズムにあることが確認されている。また金属価数の同定が可能なXAFS（X線吸収微細構造）分析によって微生物調製された金属ナノ粒子が、0価まで還元されていることも明らかとなっている⁴⁾。

最近、ナノ粒子を細胞内に生成させた細胞の応用として、固体触媒（金属ナノ粒子=触媒、細菌細胞=担体）としての利用が盛んに検討されている。これまでに、クロロフェノールやポリ塩化ビフェニルなどの塩素化芳香族化合物の脱ハロゲン化、六価クロムの還元、イタコン酸および2-ペンテンの水素化に対して、微生物表面に生成したパラジウムナノ粒子が触媒として活性を示すことが示されている。特に、ポリ塩化ビフェニルの脱ハロゲン化反応では、担体である細胞へポリ塩化ビフェニルが多く吸着することにより反応性が向上し、化学合成触媒よりも優れた触媒性能が得られる⁵⁾。

現在では、微生物表面での粒子径・粒子形態の制御、生物調製ナノ粒子の連続合成、光照射を併用した微生物還元速度の向上、超音波処理による細胞からのナノ粒子回収などが行われており、今後さらに金属材料分野におけるバイオテクノロジーとして発展していくことに期待したい。

表1. 細菌による金属ナノ粒子合成

| 細菌 | 金属 | 生成場/粒子形状 | サイズ |
|-------------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|
| <i>Bacillus subtilis</i> 168 | Au | 細胞壁内/8面体 | 5-25 nm |
| <i>Pseudomonas stutzeri</i> AG259 | Ag | ペリプラズム空間/板状 | <200 nm |
| <i>Shewanella oneidensis</i> | Pt | ペリプラズム空間/球形 | <5 nm |
| <i>Desulfotribrio desulfuricans</i> | Pd | 細胞表面/球形 | <50 nm |
| <i>Magnetotactic bacterium</i> MV-1 | Fe ₃ O ₄ | 細胞内/板状 | 40×40×60 nm |
| <i>Escherichia coli</i> | CdS | /楕円形 | 2-5 nm |
| <i>Desulfobacteriaceae</i> | ZnS | 細胞外/球形 | 2-5 nm |

- 1) Lloyd, J. R.: *FEMS Microbiol. Rev.*, **27**, 411 (2003).
- 2) Narayanan, K. B. et al.: *Adv. Colloid Interface Sci.*, **156**, 1 (2010).
- 3) Konishi, Y. et al.: *Hydrometallurgy*, **81**, 24 (2006).
- 4) Konishi, Y. et al.: *J. Biosci. Bioeng.*, **103**, 568 (2007).
- 5) Macaskie, L. E. et al.: *Biotechnol. Bioeng.*, **99**, 5 (2008).