

窒素を食べる微生物たち

押木 守

グルコースなどの有機物を食べて増殖する大腸菌のような細菌（従属栄養細菌）から見ると、無機物を代謝することで生きる微生物（独立栄養細菌）は、かなりストイックな生き方をしている。1モルのグルコースを酸素で酸化すれば38モルのATPを得ることができるにも関わらず、たとえ消費しても霞程度のエネルギーしか得られない無機物に自らの一生を託すことを選択した独立栄養細菌に「頑張れー！」と声をかけたくなるのは筆者だけではないだろう。ここではこんな愛着のある独立栄養細菌のなかでも「窒素」の代謝に関わる微生物（窒素代謝微生物）にスポットをあてたい。

窒素代謝によって生きる独立栄養細菌を初めて見いだしたのはロシアの微生物学者Winogradskyであり、彼は酸素を消費しながらアンモニアを亜硝酸へ酸化する「アンモニア酸化細菌」、亜硝酸を硝酸へ酸化する「亜硝酸酸化細菌」の存在を1890年代に微生物史へ初めて記述した人物である（この偉大な功績により、窒素代謝微生物には彼の名前を持つものが多い）。Winogradskyの発見に続き、世界中の微生物学者は土壌、河川、海洋、湖沼などさまざまな環境にこうしたアンモニア酸化細菌、亜硝酸酸化細菌が分布していることを明らかにしてきました……めでたし、めでたし、という状況が長らく続いた後、ここ20年ほど新たな窒素代謝微生物の発見に現場は沸き返っている。

まず最初に紹介する新規の窒素代謝微生物は、1990年代後半に初めて論文で記載された嫌気性アンモニウム酸化（anaerobic ammonium oxidation, anammox）細菌¹⁾である。実は、anammox細菌の存在そのものはそれより以前に理論的に示唆されていた。「理論的」とは、窒素代謝における反応物（たとえば、アンモニアと酸素）を左辺、生成物（亜硝酸）を右辺に置き、量論式の左辺と右辺の生成エネルギーから自由エネルギー変化量を算出する古典的な方法である。嫌気性アンモニウム酸化はこうした古典的方法によって、「この反応でエネルギーを得ることができるので、こうした微生物が存在しても不思議ではない」と考えられていたものの、人類が初めてこの細菌の存在を認めたのは1990年代後半のことである。その後、anammox細菌の生理・生態について急速に研究が進み、実はanammox細菌は我々の身の回りに幅広く存在しており、我々が単に見過ごしていたことが明らかとなった。

また、complete ammonia oxidation (comammox) 細菌の存在も大きなインパクトを放った発見である。Winogradskyの業績に話を戻すと、Winogradskyはアンモニア酸化細菌と亜硝酸酸化細菌という2種類の微生物によってアンモニアが硝酸まで酸化されることを明らかにしている。しかし、ここで考えて欲しい、なぜ1匹の細菌がアンモニアを硝酸まで酸化することができないのだろうか？1匹でアンモニアを硝酸まで酸化できた方が獲得できるエネルギーは多く、生存にとって有利であるはずなのに！こうしたシンプルな疑問は世界中の研究者の心の中にずっとあったものの、研究者はアンモニアが硝酸まで酸化されるためには2種類の微生物が必要と信じ続けてきた。ところが、2015年に1匹の細菌だけでアンモニアから硝酸まで酸化できることが実証された²⁾。これは微生物学者の常識を覆すインパクトのある研究であった。

この他にも窒素代謝微生物の発見については、アンモニア酸化古細菌³⁾やNC10細菌⁴⁾など例をあげれば枚挙にいとまがなく、それらの研究のインパクトをぜひ原著論文から肌で感じていただきたい。また、こうしたエキサイティングな窒素代謝微生物の発見は今後も続くものと予想される。たとえば、先ほどの熱力学的考察に頼れば、アンモニアを硝酸で酸化することは理論的に可能であるにも関わらず、こうした微生物は未だ見つからない。これが「見過ごされている」のか、本当に存在しないのかを明らかにすることは微生物学者の今後の宿題である。

最後に特筆したい点は、上述の発見は日本語で執筆される微生物学の教科書にも「至極当たり前の事実」のように記載されるようになっていくということである。文字通り教科書を塗り替える発見であり、こうした発見を同世代で体験できることは微生物学を志すものとして至極の経験である。窒素代謝微生物はまだ未知の怪物が潜んでいるフィールドであり、ぜひともこのフィールドに一狩り出かけて欲しい。

- 1) Strous, M. *et al.*: *Nature*, **400**, 446 (1999).
- 2) van Kessel, M. A. *et al.*: *Nature*, **528**, 555 (2015).
- 3) Könneke, M. *et al.*: *Nature*, **437**, 543 (2005).
- 4) Ettwig, K. F. *et al.*: *Nature*, **464**, 543 (2010).