

# 果てを越えたか?

Len A. Fisk

2機のボイジャー探査機は太陽系の境界の外側に向かって飛び続けている。そして、今回ボイジャー1号が太陽風の「端」、つまり末端衝撃波面(termination shock)に遭遇した可能性がある。しかしこれには異論がないわけではない。

原文: Over the edge?

Nature Vol.426(21)/6 November 2003; www.naturejpn.com/digest

**論**争を巻き起こしつつ冒険が続いている。2機のボイジャー探査機はNASAによって1977年に打ち上げられ、外惑星を探索し、現在太陽系の外に向かう軌道にのっている。ボイジャー1号は地球から130億km以上、地球と太陽の距離の85倍以上のかなたにいる。Krimigisら<sup>1</sup>はその距離で、探査機は太陽風のいわゆる末端衝撃波面、つまり太陽風が星間物質と混じり合い始めるところに遭遇したと主張している。しかし、McDonaldら<sup>2</sup>は末端衝撃波面はまだ先にあると、同じくらい説得力のある主張をしている。いずれにしても、ボイジャー1号は太陽系の未だ探索されていない領域に入った。

太陽の外圏大気は太陽風として知られる超音速荷電粒子のプラズマ流として宇宙空間に絶え間なく広がっている。太陽風の速度はだいたい秒速450kmから750kmである。これに対して、地球近傍の音速は秒速30kmから50kmだ。二つのプラズマは容易には混じり合わないで、太陽風の超音速プラズマは星

間物質のプラズマの内側にヘリオスフィア(太陽圏)という塊を作っている。

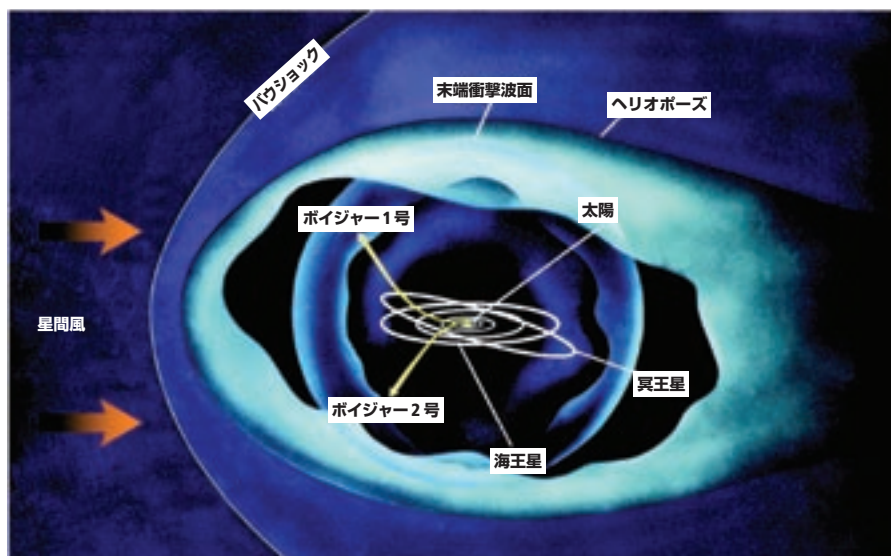
しかし外部太陽圏のどこかで太陽風プラズマは星間物質のプラズマと混じり合い始めるだろう。あらゆる超音速流と同様、この混合は超音速から亜音速へ速度が急激に低下する衝撃波遷移に端を発する。超音速飛行機に先行しソニックブームの原因となる衝撃波遷移と同様である。これが太陽風の末端衝撃波面である(図1)。末端衝撃波面は太陽圏全体を囲んでおり、太陽系における群を抜いて大きな衝撃波面である。太陽から末端衝撃波面までの距離は85AUから120AUと推定されている<sup>3</sup>。(1AUあるいは1天文単位は地球と太陽の平均距離で、約1.5億kmである。)

末端衝撃波面は天体物理学の対象として魅力的で、高エネルギー粒子の巨大な加速機構であると予想されている。太陽圏内に侵入した中性の星間ガスはイオン化され、太陽風に乗せられて外部太陽圏に運ばれる。その後これらの粒子は加速され、そのエネルギーは1

万倍以上も増大し、宇宙線異常成分として知られる高エネルギー粒子の集団を構成する。この加速は末端衝撃波面で起こっているらしい。そして今度は、この加速された粒子は圧力をかけて末端衝撃波面の構造を変えることができる。その意味では、末端衝撃波面は星間物質中の超新星から生まれた衝撃波面と類似しているはずであり、星間物質中の衝撃波面も高エネルギー粒子の強力な加速機構であると予想されている。

ボイジャー1号が末端衝撃波面に遭遇したとすれば、探査機によって収集されたデータに明確な形跡があるはずである。(ボイジャー2号はボイジャー1号の後方約20AUにあり、まだ末端衝撃波面の推定位置に到達していない。)最もはっきりした形跡は太陽風速度の減少とそれともなう密度と磁場強度の増大であろう。また、多量の加速された粒子、特に宇宙線異常成分もあると思われる。

これらの2つの形跡がKrimigisら<sup>1</sup>とMcDonaldら<sup>2</sup>の論争の論拠になっている。ポ



**図1** 途方もない旅。ボイジャー1号と2号は太陽系の外惑星を過ぎ去り、異なる軌道上を飛行している。そして、ボイジャー1号は太陽から85AUの距離にある末端衝撃波面に到達したかもしれない<sup>1</sup>、到達しなかったかもしれない<sup>2</sup>。末端衝撃波面は太陽風の超音速プラズマが太陽系境界で星間物質と遭遇して減速し始めるところで形成される。太陽風と星間ガスは容易には混じり合わず、さらに外側の末端衝撃波面を越えたところに、太陽風と星間ガスの真の境界、ヘリオポーズがある。さらに遠くに、太陽系自身が星間ガスに対して超音速で移動しているなら、巨大なパウショックがあるかもしれない。

イジャー 1号に搭載されているプラズマ検出器は太陽風の速度を直接計測できるが、数年間作動していなかった。Krimigisらは低エネルギー粒子について巧みな解析をおこない、必要に応じてデータを補正した結果、太陽風の速度が低下していると結論を出した。また、末端衝撃波面付近で予想されているように、低エネルギー粒子数と軽イオン粒子の増加も確認された。これとは反対に、McDonaldらによる高エネルギー領域の宇宙線異常成分の計測では、ボイジャー 1号の現在位置から少し遠方で粒子が加速されていることが示唆される。McDonaldらは85Au付近でイオンと電子の強度が大きく増大していることを確認したが、まだ前方に存在する末端衝撃波面の前兆にすぎないと主張する。

実は、末端衝撃波面は静止しているとは予想されていない。末端衝撃波面の位置は太陽の状態の変化に反応して変わる太陽圏の状態によって変化していると思われる。実際、Krimigisらはボイジャー 1号は約200日間末端衝撃波面を越えていただけでなく、衝撃波面が再び外側に移動した後、探査機は超音速の太陽風の中に取り残されたと主張する。太陽系で最大の衝撃波面に遭遇しこれを研究するための追跡が再び始まっている場合、おそらく末端衝撃波面は今後数年間は外側に移動するだろう。

問題はもちろんどちらが正しいかだ。ボイジャー 1号はすでに末端衝撃波面に遭遇したのだろうか。個人的には、末端衝撃波面を横断しているとすればデータをより容易に説明できる Krimigis<sup>1</sup>らに同意したい。したがって、McDonald<sup>2</sup>らのデータは末端衝撃波面の形状が予想よりも複雑であるか、ボイジャー 1号の位置よりも遠いところに高エネルギー粒子を加速する何か別の方法があること示唆しているのではなからうか。どちらの説明も確実ではなく、ボイジャー 1号がさらに遠くへ飛行していく過程で、近いうちにこの興味深い領域に再び遭遇することを期待しよう。いったん末端衝撃波面を通過すれば、冒険は新しい段階にはいる。末端衝撃波面の向こう側にある超音速の太陽風の領域は、乱流と粒子の加速、そして珍しいプラズマ現象を特徴とする魅力的なものだろう。ボイジャー探査機は1年に3AUから4AUの速度で移動してお

り、やがては太陽風プラズマと星間プラズマを隔てる境界であるヘリオポーズ(太陽から約150AUの距離にあると推定されている)に遭遇する(図1)。そして我々は本当に星間物質の中に入り込むことになる。ボイジャーはやがて太陽圏自体が星間物質中を超音速で移動しているために起こる「パウショック」に到達するかもしれない。しかし両探査機ともそのはるか前2020年頃には電源が枯渇する。40年間のミッションの後、ボイジャーは汚

くない恒星間空間のかなたへ静かに漂っていただくだろう。

Len A. Fisk is in the Department of Atmospheric, Oceanic, and Space Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109-2143, USA.  
e-mail: lafisk@umich.edu

1. Krimigis, S. M. *et al. Nature* **426**, 45–48 (2003).
2. McDonald, F. B. *et al. Nature* **426**, 48–50 (2003).
3. Stone, E. C. *Science* **293**, 55–56 (2001).

進化生物学

## あの手この手の卵争奪戦

Matthew J. G. Gage

雄鶏は、交尾の際に射精液の量を複数の要因によって手加減しているようだ。つまり、雄同士の競争の程度、前にも雌と交尾をしたかどうか、そして、雌の生殖的な「価値」が要因となるらしい。

原文: Scramble for the eggs Nature Vo.426(22)/6 November 2003; www.naturejpn.com/digest

**精**子競争(sperm competition)とは、複数の雄に由来する精子が1匹の雌の卵を受精させるために競争することである<sup>1</sup>。雄は自分の遺伝子を後世に残すために長く奮闘するが、その最終戦には往々にしてこの精子競争が待ち受けている。そのため当然のことながら、雄には生殖にかかわる特徴的な形質がいくつか備わることとなった<sup>2</sup>。よく見られる適応の1つが、天文学的な数の微小な精子をつくることで、これは精子競争の基本原則が一種の「富くじ」だからだ。つまり、最も多くの精子を射精した雄ほど受精に成功する見込みが高い<sup>3</sup>。しかし産生できる精子の数が有限なため、雄は数のうえで常に優位に立つことはできない。そこで、他の策をとらねばならない。たとえば2003年11月6日号p. 70のPizzariたちの報告<sup>4</sup>によると、若い雄鶏は精子数で精子競争の優位に立つ必要性をはかりにかけ、限られた供給量の範囲内で精子数をやりくりするという、「前例のない高度な技」をやっている。雄鶏は1回の交尾ごとに、集団内の社会的手がかりや性的手がかりに敏感に反応している。つまり雄は、精子競

争の程度や雌の繁殖価に対して最適で、自身の精子の蓄えとも帳尻が合うような量の射精をする。

雄はおびただしい数の精子をつくるが、その過程は多くの場合、コストがかかる。たとえば1個1個の精子細胞は、進化の過程で特殊化し競争するDNA保持単位となるべく強力な圧力を受けている。こうした特殊化のため、精子完成までの時間が長くなっているのかもしれない。哺乳類では、雄の生殖細胞系列から成熟した精子細胞ができるまでに5~11週間かかる<sup>5</sup>。さらに、精子形成には無視できないほどのエネルギーが必要なことがわかっていて。たとえばヨーロッパサリヘビ(*Vipera berus*)では、精子形成期(雄は身体の動きが鈍くなる)の体重減少は、その後の探索行動や求愛行動、競争や交尾をする活発な時期と同じくらい大きい<sup>6</sup>。

進化生物学者たちは以上のような制限事項を考慮して、雄は射精1回ごとに細心の注意を払っており、1回ごとの交尾の特異的かつ局所的な必要性に応じて射精量を調節しているはずだと推測してきた<sup>7,8</sup>。実際に実験で、雄