A shock for Voyager 2

太陽系

ボイジャー 2 号が乗り越えた衝撃

J. R. Jokipii

ボイジャー 1 号に続いて、ボイジャー 2 号探査機が末端衝撃波面を通過した。超音速の太陽風は、ここで急激に減速し、しだいに星間空間からの影響を受けるようになっていく。ここから、太陽系探査の新時代が始まるのだ。

Nature Vol.454 (38-39) / 3 July 2008

Nature 2008 年 7 月 3 日号に掲載された 5 編の論文¹⁻⁵は、名高いボイジャー計画の歴史上有数の快挙を報告し、記録している。ボイジャー 2 号は、1977 年 8 月 20 日の打ち上げから 30 年後に「末端衝撃波面」に到達した。末端衝撃波面は、太陽系の外縁部で太陽風の流れが乱れる境界線であり、4 年前にはボイジャー 1 号がここを通過してデータ収集を行った⁶⁻⁸。今回の通過でも、新たに重要なデータを得ることができた。

まずは、太陽系の地理を理解してもらう必要がある。太陽は、あらゆる方向に太陽風とよばれる超音速のプラズマを放出しており、星間プラズマの中に巨大な回転楕円体の空洞を作っている。この空洞は太陽圏とよばれ、約 100 ~ 150 天文単位 (AU) にわたって広がっている (1AU は地球から太陽までの平均距離であり、約 1 億 5000 万キロメートルに相当する)。太陽圏の大きさは、主として太陽大気と周囲の星間プラズマの性質、磁場、中性粒子によって決まってくる。太陽から遠く離れたところでは、太陽プラズマは広がりすぎて、星間プラズマを押し戻せなくなる。星間媒質に対する超音速の流れは、回転楕円体の衝撃波 (末端衝撃波面) のところで終わり、太陽風はここで急激に減速する。末端衝撃波面の向こうの太陽風が低速で流れている領域は、「ヘリオシース」とよばれている。ここでは、太陽プラズマと星間ガスとの相互作用が優勢になる。ヘリオシースの終わりが「ヘリオポーズ」であり、ここから先は星間プラズマが広がっている。図 1 に示すように、この系の全体は、台所の流しで再現することができる。

2007 年 8 月 31 日からその翌日にかけて、ボイジャー 2 号は数回にわたり末端衝撃波面を通過した。通過が 1 回ではなかったのは、この境界線がまったく静止して

おらず、内へ外へと振動しているからである。こうして、ボイジャー 2 号はボイジャー 1 号に続いて超音速の太陽風の領域を後にしてヘリオシースに入り、おそらくこれから 10 年程度でヘリオポーズに到達する (ヘリオポーズまでの距離は、まだ確実にはわかっていないが、太陽から 130 ~ 150AU 程度であると考えられている)。ボイジャー 1 号に搭載されたプラズマ分析装置はだいぶ前に作動しなくなっていたが、ボイジャー 2 号のそれはまだ機能している。また、どちらの探査機も、プラズマ波、磁場、高速粒子を測定することができるので、ヘリオポーズに到達したあかつきには、星間プラズマを初めて本来の位置で測定できることになる。

ボイジャー 1 号による末端衝撃波面の最初の通過は、太陽から 94AU の距離で起きた。この通過は、末端衝撃波面が数か月にわたり秒速 100 キロメートル程度の高速で内向きに運動していた時期に起きた。その間にデータ送信が途絶えたため、末端衝撃波面の詳細な構造を決定することはできなかった。それでも、この初回の通過により、太陽から末端衝撃波面までの距離のほか、末端衝撃波面にはかなりの動きがあり、数か月の単位で内向きまたは外向きに動いているという事実や、その全体の形は弾丸形や円形ではなくつぶれた形⁹をしていることなど、いくつかの性質が明らかになった。

5 編の新しい論文¹⁻⁵で詳述されているように、ボイジャー 2 号が太陽から 84AU の距離で末端衝撃波面を横断したことは、いくつかの点で我々の理解を深めさせてくれた。これは、ボイジャー 2 号のプラズマ検出装置が稼動していたため、前回よりもかなり充実した観測ができたことが大きい。ボイジャー 2 号が末端衝撃波面を通過した場所が、ボイジャー 1 号が通過した

場所に比べて太陽に 10AU も近かったことは、末端衝撃波面が左右に非対称な形をしている（一方の側がつぶれている）という以前の示唆¹⁰を裏づけるものである。これはおそらく局所的な星間磁場の傾きのせいである¹¹⁻¹³。ボイジャー 2 号による末端衝撃波面の通過が複数回起きたのは、おそらく、末端衝撃波面の内向きや外向きの高速な運動、末端衝撃波面に沿ったさざ波の伝播、ひょっとすると末端衝撃波面の再形成など、図 1 の水の比喻に見られる現象によく似た、ダイナミックな変化の結果であろう。

ボイジャー 2 号が送信してきたプラズマのデータからは、星間空間の「ピックアップイオン」の重要性も明らかになった。ピックアップイオンとは、星間空間に存在する中性原子が太陽風の中に入って電離したものである。ピックアップイオンは、熱粒子よりも高いエネルギーをもち、末端衝撃波面での過程に強い影響を及ぼす。「標準的」な末端衝撃波面では、下流の太陽風は亜音速になっているはずだが、ボイジャー 2 号が観測した場所では、それは予想よりも低温で、超音速だった。加速されて高エネルギーになった粒子がプラズマや磁場に匹敵するエネルギー密度をもつことは、この発見と整合性がある。これらの事実、ボイジャー 2 号が通過した末端衝撃波面が、前回観測された末端衝撃波面とは大きく異なっていることを裏づけている。その違いを生じさせているのは、おそらくピックアップイオンである。

ボイジャー 1 号と 2 号による観測結果は、末端衝撃波面が非常に複雑であることを示しており、多くの不確かな点が残る。我々がこの場所ですらなるデータを入手できるようになるまでには、長い年月が必要だろう。けれども幸い、太陽圏の内側からの遠隔観測により、ギャップの一部は埋められるはずである。ヘリオシースの太陽風プラズマからの電磁波は、あまりにも微弱で観察することはできない。けれども、これと周囲の中性原子との相互作用によって生成する高速中性原子 (ENA) なら、(光やその他の放射線と同程度に) 地球から観測することができる。2008 年の後半に打ち上げられることになっている IBEX 衛星は、この原理を利用して、ヘリオシースの全体像を解明しようとするものである。最近打ち上げられた STEREO 衛星も、ENA を観測することができる。

Nature 2008 年 7 月 3 日号には Wang らによる論文¹⁴も掲載されており、STEREO 衛星による ENA の最初の観測について報告している。これは、ボイジャーがヘリオシースで行う観測を補完するものである。STEREO 衛星が測定したエネルギースペクトルはボイジャーの測定結果と一致していたが、方向ごとに

図 1：台所の流しで太陽圏を作る。

台所の流しの底に傾斜をつけ、蛇口から水を出したときのように上から見ると、太陽圏の二次元モデルになる。太陽風が太陽から四方八方に流れ出していくように、オレンジ色の蛇口から出た水は、その真下の点から放射状に広がっていく。広がった水はやがて、その周囲の水によって阻止されて大きく跳ねる（跳水）。末端衝撃波面に相当するこの跳水は、円に近い形をしている。星間媒質の流れは、左側の石けん水の一様な遅い流れとして表されている。このモデルの跳水の流れは乱れており、ダイナミックである。これはまさに、観測されている末端衝撃波面の性質によく似ている（モデル製作はアリゾナ大学物理学科の K. C. Hsieh、写真撮影は J. R. Jokipii による）。

強度のばらつきが観測されたのは予想外だった。著者にとって特に興味深く不可解に思われるのは、星間媒質が流れ込んでくる方向の近くで、経度の関数としての流量に 2 つの最大値が観測されたことである。

近年、太陽圏の外側に出た探査機からの観測データや、遠隔観測データがもたらされたことにより、太陽と銀河系との相互作用についての理解は大きく前進した。ボイジャーが旅を続け、STEREO 衛星や今後の IBEX ミッションがもたらす遠隔観測データが入ってくれば、より多くのことが明らかになるだろう。 ■

J. R. Jokipii, アリゾナ大学惑星科学部 (米)

1. Richardson, J. D., Kasper, J. C., Wang, C., Belcher, J. W. & Lazarus, A. J. *Nature* **454**, 63-66 (2008).
2. Decker, R. B. et al. *Nature* **454**, 67-70 (2008).
3. Stone, E. C. et al. *Nature* **454**, 71-74 (2008).
4. Burlaga, L. F. et al. *Nature* **454**, 75-77 (2008).
5. Gurnett, D. A. & Kurth, W. S. *Nature* **454**, 78-80 (2008).
6. Burlaga, L. F. et al. *Science* **309**, 2027-2029 (2005).
7. Decker, R. B. et al. *Science* **309**, 2020-2024 (2005).
8. Stone, E. C. et al. *Science* **309**, 2017-2020 (2005).
9. Jokipii, J. R., Giacalone, J. & Kota, J. *Astrophys. J.* **611**, L141-L144 (2004).
10. Lallement, R. et al. *Science* **307**, 1447-1449 (2005).
11. Ratkiewicz, R. et al. *Astron. Astrophys.* **335**, 363-369 (1998).
12. Pogorelov, N. & Matsuda, T. *J. Geophys. Res.* **103**, 237-245 (1998).
13. Opher, M., Stone, E. C. & Liewer, P. C. *Astrophys. J.* **640**, L71-L74 (2006).
14. Wang, L., Lin, R. P., Larson, D. E. & Luhmann, J. G. *Nature* **454**, 81-83 (2008).

ビデオ (www.nature.com/nature/videoarchive/voyager) も参照されたい。