

となりの恒星をめざせ

太陽系を飛び出し、50年で恒星間を航行できる探査機を実現できるか？

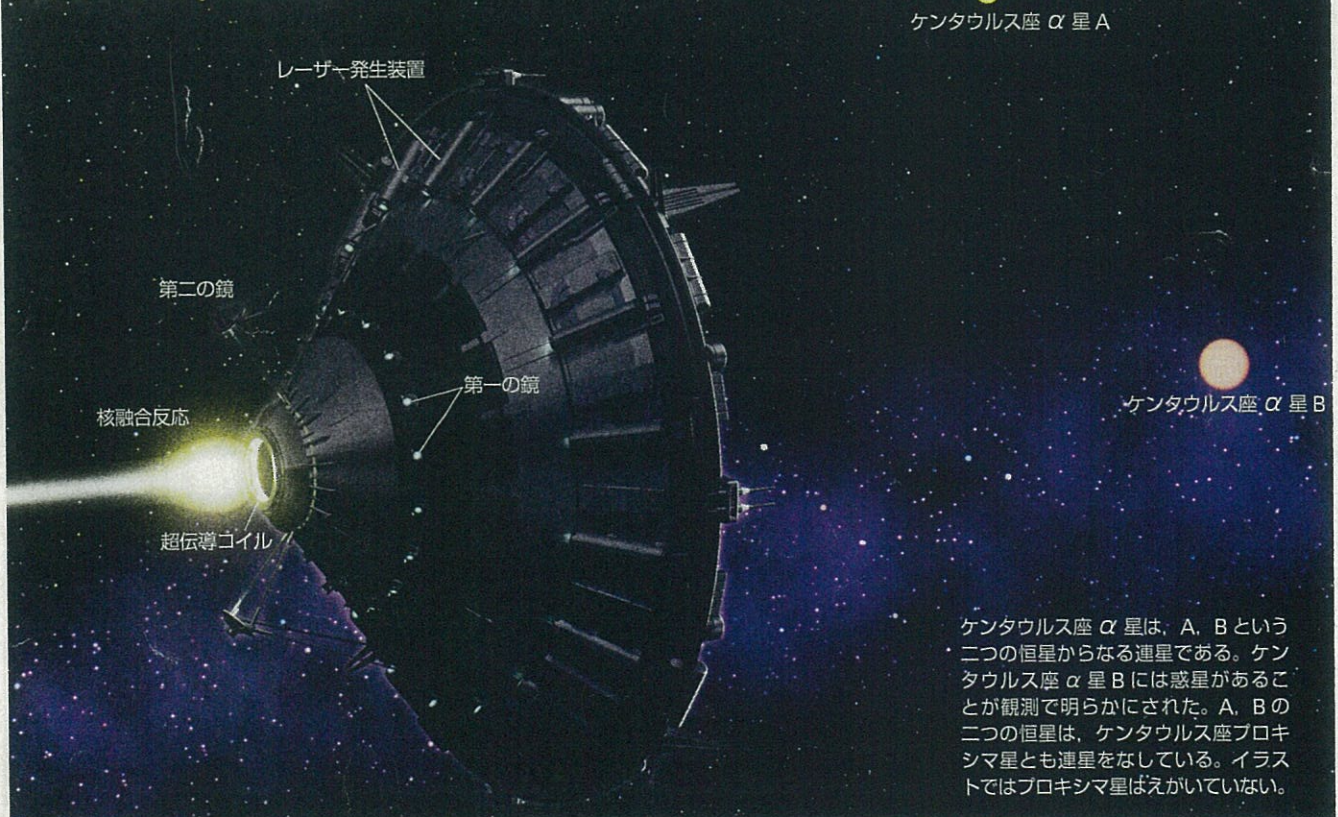
となりの恒星はどんなようすなのだろう？ そこに惑星があるのなら、その惑星は地球と似ているだろうか？ となりの恒星に、無人でもよいから探査機を送りこんで観測をしてみたい。これは、ある意味では人類共通の夢である。夢はあくまでも夢なのだろうか。それとも現実味のある話なのだろうか。必要とされる新たな推進技術の内容や、その開発の可能性を探った。

協力 **中島秀紀**
九州大学大学院総合理工学府
先端エネルギー理工学専攻教授

野田篤司
宇宙航空研究開発機構システムズエンジニアリング推進室
ミッションデザイン支援グループ グループ長

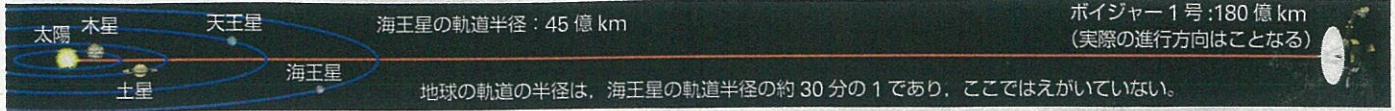
船木一幸
宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
宇宙飛行工学研究系准教授

恒星間を航行をする探査機



となりの恒星ケンタウルス座 α 星をめざす探査機の想像イラスト。アメリカ、ローレンス・リバモア国立研究所が構想を発表した、レーザー核融合によって推進する探査機「VISTA」を参考にした。VISTAは高出力レーザーを第一の鏡から第二の鏡へと集めて燃料ペレットに照射し、核融合反応をおこさせる。推進のしくみは、くわしくは本文で紹介する。

— 最遠の人工物の到達距離 (下はこの部分を拡大)



上の黄色の帯は 99 ページまでつづいている。この帯の長さをケンタウルス座 α 星までの距離だとすると、最遠の人工物である「ボイジャー 1 号」の到達距離は、帯の左端の赤い部分に相当する。人類にとってケンタウルス座 α 星までの 4.37 光年がいかに遠いのか、実感してほしい。

太陽系から最も近い恒星は、ケンタウルス座 α 星である。厳密には、その小さな連星であるケンタウルス座プロキシマ星が最も近い恒星なのだが、ともかく、その距離はたったの 4 光年あまり。私たちの太陽も属する「銀河系(天の川銀河)」の直径がおおよそ 10 万光年であることを考えれば、ごくごく近所といってもよいだろう。

2012 年 10 月、この恒星に、はじめて惑星が発見された(くわしくは 11 ページ)。たったの 4.37 光年しかはなれていないご近所に惑星が見つかったのである。その惑星をぜひとも間近から見てみたいと願うのは当然、というのはいいすぎだろうか。せめて無人の探査機でもよいから送りこんでみたいものだ。

果てしない 4.37 光年

ところが、これは簡単なことではない。「たったの 4.37 光年」などと説明したが、実は人類にとっては、とんでもなく果てしない距離なのである。4.37 光年とは、光が 4.37 年(4 年と 4 か月半)かけて進む距離のことである。光は宇宙で最速の存在である。そのスピードは秒速約 30 万キロメートルだ。4.37 光年は、約 41 兆キロメートルということになる。

41 兆キロメートルといわれても、その遠さは実感できない。そこで、これまでに人類が生みだした人工物のうち、地球から最も遠くまで到達したもののまでの距離と比較してみよう。

最遠の人工物とは、NASA(アメリカ航空宇宙局)が 1977 年に打ち上げた「ボイジャー 1 号」である。ボイジャー 1 号は、現在も地球から遠ざかりつづけており、その距離は約 180 億キロメートルである。太陽系で最も外側の惑星である海王星までの距離が約 45 億キロメートルであるから、ボイジャー 1 号はその 4 倍の距離を進んだことになる。まさに偉業だ。

しかしながら、ボイジャー 1 号の進んだ距離は、となりの恒星までの距離の 0.044% にすぎない。上の黄色い帯を見ていただきたい。この帯の長さは、と

なりの恒星までの距離(41 兆キロメートル = 4.37 光年)をあらわしている。ページを 2 回めくれば、帯の端が見えるだろう。これに対し、ボイジャー 1 号の進んだ距離は、このページの左端の赤い部分にすぎない。帯の全体の長さと同くらべれば、ほとんどゼロみたいなものだ。となりの恒星までの、想像をはるかにこえる遠さを実感していただけたらどうか。

ボイジャー 1 号の速度は、太陽に対して秒速約 17 キロメートルである。ボイジャー 1 号はケンタウルス座 α 星の方向に進んでいるわけではないが、仮にそうであるなら、到着するのは約 8 万年後である。これではあまりにも時間がかかりすぎる。一方、SF で登場するいわゆる「ワープ航法」のような方法は、現実的にはまず不可能だろう。もっと短い時間で到着するには、探査機の速度を大幅に上げるしかない。

この記事では、50 年でケンタウルス座 α 星に到着できる無人探査機をつくることを目標として設定しよう。すると探査機に求められる速度は光の速度の 10% (秒速 3 万キロメートル) というとてもないスピードになる。ボイジャー 1 号の 1000 倍以上だ。

探査機の速度を上げるためには、エネルギーを投入する必要がある。計算によると、探査機の速度を 1000 倍に上げるには、100 万倍のエネルギーが必要になる。つまり、燃料の種類をかえずに速度を 1000 倍に上げるには、燃料の量が 100 万倍必要になるということだ。そのうえ、たくさんの燃料を積みこめば当然、探査機の質量も大幅にふえる。質量がふえれば、加速に必要なエネルギーはさらにはね上がっていく。そのような巨大な探査機の建築は、事実上、不可能だという。この問題を解決するには、より効率のよい推進方法を採用するしかない。

燃料の噴出速度を上げることが重要

効率のよい推進方法とは、どういうものなのだろうか。その前に、まずはロケットや探査機がなぜ加速できるのか、確認しておこう。

加速の原理は、実は非常に単純である。「作用・反作用の法則」とよばれるものだ。たとえば、氷の上でスケート靴をはいた人がボールを投げたとしよう。するとその人は、ボールの飛んだ方向とは反対の方向に、反動で進むだろう。

これと同じことが、ロケットでもおきている。ロケットが持っている質量（たとえば燃料）をロケットの外に排出すれば、その反動でロケットが進むわけだ。なお、この反動は、空気を押すことで得ているわけではなく、あくまでもロケット本体と、燃料との「作用・反作用」であることに注意が必要である。そうでなければ、空気のない宇宙空間でロケットが進むことは不可能だ。

スケートの話にもどろう。ボールをゆっくりと投げられる場合にくらべて、剛速球を投げた場合の方が反動は大きい。これと同じように、ロケットから排出される質量（燃料）の速度が高速になればなるほど、そのロケットの加速は大きくなる。ロケットが燃料を燃焼させるのは、燃焼によってエネルギーを発生させ、より速い速度で燃料を排出したい（噴出させたい）からである。また、スケート靴をはいた人が投げるボールの質量が大きい場合も、やはり反動が大きくなる。つまり、ロケットや探査機を速く上げるためには、より多くの質量を、より高速で排出（噴射）させればよいのである。

ロケットや探査機が進む原理



氷の上で、スケート靴をはいた人がボールを投げると、反動により、その人はボールの進行方向と反対の方向に動く（上段）。ロケットの推進原理はこれと同じである。燃料などを排出する反動により、ロケットは進む（下段）。なお、排出する燃料などの質量が大きいほど、またロケットから噴き出す速度が速いほど、ロケットの速度は上がる。

ただし、より多くの燃料を排出するには、当然、より多くの燃料が必要となる。しかし膨大な量の燃料をもっていくことには限界がある。このため、効率のよい推進方法の実現の成否は、いかに質量（燃料）を高速で噴射できるか、ということにかかっているといえる。そして質量（燃料）の噴出速度は、燃料の燃焼などによって生じるエネルギーの量によって決まってくる。結局、50年でもとりの恒星まで到達できる探査機を実現するためのカギは、「質量あたりのエネルギーの発生量（エネルギー密度）をいかに大きくできるか」ということになる。

化学エンジン、イオンエンジン、スイングバイの限界

現時点ですでに開発済みの推進方法で恒星間航行を実現できないのだろうか。

現在主流となっているのは、「化学エンジン」だ。これは、燃料を燃焼させるという化学反応によって得られるエネルギーを推進に利用する。一度に大量の燃料を燃焼させられるので、短時間に急激な加速が必要な場合、つまり地球からの打ち上げの際に利用されている。しかし化学反応によって得られるエネルギーは、燃料の質量が膨大になる割には、大きくはない。化学エンジンによるロケットでもとりの恒星をめざすのは、不可能である。

では、「イオンエンジン」ならどうだろうか。イオンエンジンとは、日本の小惑星探査機「はやぶさ」で採用された推進方法である。電力エネルギーによって「推進剤」をイオン（電気をおびた原子）へと変化させ、そのイオンを、電力エネルギーによって加速させて噴出するというしくみである。

イオンエンジンのすぐれている点は、推進に必要なエネルギーを電力にたよっており、その電力は太陽光発電によって外部から得られるという点である。このため非常に燃費がよい。加速の割合は小さいが、長期間にわたって加速しつづけられる。

ただし、イオンエンジンに必要な電力を太陽光発電によって得られるのは、火星の軌道程度までだという。それよりも外側では、太陽光が弱くなり、発電量が不足してしまうのだ。イオンエンジンで太陽系を飛びだすとしたら、たとえば「原子力電池」などによって電力を得る方法も考えられるだろう。

しかし、イオンエンジンによる加速の割合は非常に小さい。仮に、「はやぶさ」と同じ加速を無制限につづけられるとしても、となりの恒星に到着するのは約1600年後ということになり、現実的ではない。

ほかには「スイングバイ」という加速方法もある。探査機が惑星のそばを通りすぎると、惑星の重力によって探査機の運動方向が変わる。このとき探査機の軌道をうまく調整すると、太陽に対する探査機の速度を加速させたり減速させたりできるのだ。燃料をほとんど使わずに加速ができ、非常に効率が良い。

ただし、加速できる量には上限がある。理想的な条件がととのったとしても、スイングバイに利用する惑星の公転速度の2倍までしか加速ができないのだ。たとえば、地球の公転速度はおよそ秒速30キロメートルである。太陽系の外側に行くにつれて、惑星の公転速度は下がっていき、木星の公転速度は秒速13キロメートル程度、海王星の公転速度は秒速5.5キロメートル程度である。理想的なスイングバイによってこれらの速度の2倍の速度を得たとしても、50年でとなりの恒星に到着するために必要な秒速3万キロメートルには、残念ながら遠くおよばない。

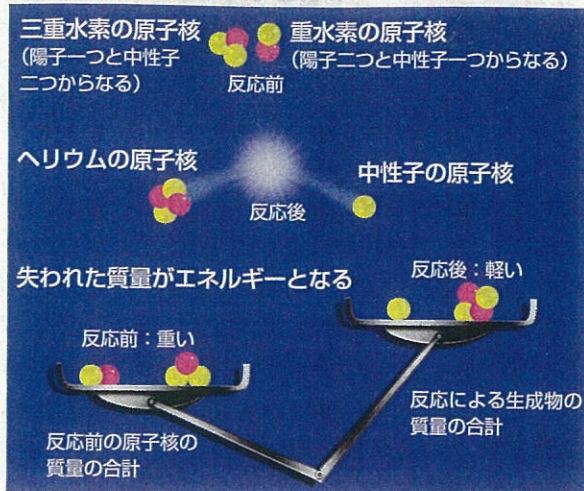
けたちがいのエネルギー、「レーザー核融合推進」

恒星間航行には、新たな推進方法が必要となる。その最有力候補は「レーザー核融合推進」だという。

核融合とは、膨大なエネルギーを生みだしている太陽の中で、実際におきている現象である。たとえば「重水素」や「三重水素」といった特殊な水素の原子核どうしを無理矢理近づけてやると、二つの原子核が融合してヘリウムの原子核となる場合がある。つまり、元素の種類が変化するわけだ。このとき、一般相対性理論の「 $E=mc^2$ 」の公式のとおり、原子核の質量の一部が莫大なエネルギーに変換される。この点が通常の化学反応との最も大きな違いであり、核融合反応は化学反応にくらべてはるかに大きなエネルギーを発生させることができる。同じ質量で比較した場合、水素と酸素の化学反応（燃焼）にくらべて1000万倍以上のエネルギーが発生する。

膨大なエネルギーを生みだすこの反応を連続的に引きおこし、推進力に変換できれば、となりの恒星へ50年で到着できる探査機も、現実味をおびてくる。

核融合反応は膨大なエネルギーを生みだす



たとえば重水素の原子核と三重水素の原子核が衝突すると、原子核どうしが融合し、ヘリウムの原子核と中性子へと変化する場合があります。そして反応による生成物の質量の合計と、反応前の原子核の質量の合計を比較すると、反応前の質量の方が大きい。核融合反応で失われた質量は、エネルギーへと変換される。発生するエネルギーの量 (E) は、失われた質量 (m) と、光の速度の2乗 (c^2) をかけ合わせたものとなる ($E = mc^2$)。

現在のところ、核融合反応を連続的に引きおこす技術は、未完成である。核融合反応を引きおこすには、たとえば太陽の中心部のような高温・高密度の状態をつくらなければならない。そのような状態をつくりだす方法の一つとして、高エネルギーのレーザー光を燃料となる水素に照射するという方法がある。現在のところ、レーザー光のエネルギーが十分ではなかったり、短時間にくり返しの照射ができなかったりといった技術的な課題はあるが、大阪大学のグループなどが、精力的に研究を進めている。

プラズマの流れを推進力にかえる実験に成功

九州大学の中島秀紀教授は、レーザー核融合が実現した場合に、それをロケットや探査機の推進力として利用する方法を研究している。中島教授らの構想は、次のようなものである。

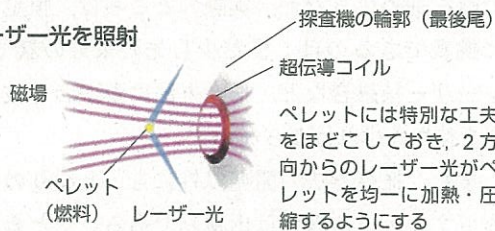
まず、燃料となる水素などのつまった「ベレット」を、探査機から宇宙空間へと放出する。次にそのベレットにレーザー光を照射し、その場で核融合反応をおこさせる。すると、核融合反応で発生したエネルギーにより、ベレットにつめられていた水素がプラズマ化する。プラズマとは、電子が飛びだした（電離した）分子か

らなる気体のことである。発生したプラズマは、四方八方に広がろうとする。一方、探査機には「超伝導コイル」を取りつけておき、このコイルに電流を流して強力な磁場を発生させておく。プラズマは正の電気をおびている。このため探査機がつくりだした磁場と、たがいに力をおよぼしあう。いわば、四方八方へと広がろうとするプラズマの流れを、磁場の“壁”で受け止めてやるようなものだ。この結果、探査機は推進力を得ることができる。

中島教授は大阪大学と協力して、レーザー光で発生させたプラズマの流れを、コイルに電流を流してつくった磁場で受け止め推進力に変換する実験に、すでに成功している。中島教授は、「この実験では核融合反応は発生していませんが、発生させたプラズマの流れを推進力として利用できることを世界ではじめて実験的に示すことができたという点で、非常に大きな意味があります」と語る。

レーザー核融合による推進の例

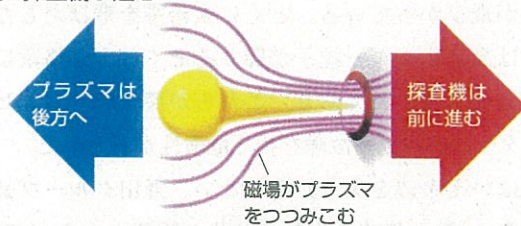
1. レーザー光を照射



2. 核融合反応とプラズマの生成



3. 探査機が進む



レーザー核融合を利用した推進方法をえがいた。探査機の後最後尾の超伝導コイルに電流を流すと、磁場（イラストでは紫色の線であらわした）が発生する。そしてまず、燃料ペレットを探査機から放出し、これに強力なレーザー光を当てる（1）。すると高温・高密度の状態となった燃料物質が核融合反応をおこし、プラズマを生みだす（2）。プラズマの流れは四方八方に広がるうとするが、磁場はこれを押しもどそうとする。結果、プラズマの多くは探査機の後方に向かって流れる。その反動で、探査機は前に進む（3）。この工程を1秒間あたり数十回くりかえす。

なお、レーザー光や超伝導コイルの電流を生みだす電力は、核融合反応で発生したエネルギーの一部を回収することによってまかなう構想だという。磁場を発生させるための超伝導コイルとは別のコイルを設置しておけば、核融合反応がおきるたびにコイルに電流が流れる。この電流を高性能のバッテリーに送りこんで蓄電するのである。

このような推進方法は、レーザー核融合の研究を進めているアメリカのローレンス・リバモア国立研究所が2003年に提案した、レーザー核融合で推進する火星有人探査船「VISTA」でも構想に組み込まれている。中島教授が語る。「VISTAは火星の有人探査をめざしていますが、このほかにも、イギリス惑星協会では現在、イカロスとよばれる無人の恒星間探査機の計画をねっているようです。イカロスは、1970年代に無人の恒星間航行をめざして構想されたダイダロス計画の改良版といえる計画で、やはりレーザー核融合推進の採用を検討しているようです」。

レーザー核融合推進がいつ実現するか、現段階では不明だが、もはやまったくの夢物語というわけではないといえそうである。

ほかにも魅力的な推進方法はある

核融合以外の方法としては、たとえば原子力発電で利用されている「核分裂」によって推進エネルギーを生みだす方法もある。しかし核分裂は核融合にくらべるとエネルギー密度がやや小さく、恒星間航行には十分ではない。そして放射性物質の危険性の問題も抱えている。

また、「反物質エンジン」は、原理的には非常に魅力的な推進方法だ。「電子」に対する「反電子」など、この世には、性質はよく似ているが電気的な性質などが正反対の粒子が存在しており、そのような粒子を総称して、「物質」に対して「反物質」とよんでいる。物質と反物質は、たがいに衝突すると、粒子としては消滅し、その質量がすべてエネルギーに変換されるという性質がある。このため核融合のさらに数百倍のエネルギーを生みだすことも可能なのだ。反物質は現時点の技術でも「加速器」でつくりだせるが、通常物質とふれるとエネルギーに変化してしまうため、大量に貯蔵する技術は確立されていない。

あるいは、巨大な帆^はを広げた探査機に、宇宙空間などから強力なレーザー光を照射し加速させるという方法も、原理的にはあり得る。普段の生活では気づかないが、光には物質を押しやる力があるのだ。ただし、探査機を加速させられるほど強力なレーザー光を発生させるのは、将来においても非常に困難だと考えられているという。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) ミッションデザイン支援グループの野田篤司^{のだあつし}グループ長は、「現在の状況から考えると、将来、最も実現の可能性が高いのは、レーザー核融合推進なのではないでしょうか」と語っている。なお、宇宙航空研究開発機構などの研究機関において、恒星間飛行を目的とした正式なプロジェクトは、現時点では存在しない。

ブレーキはどうやってかける？

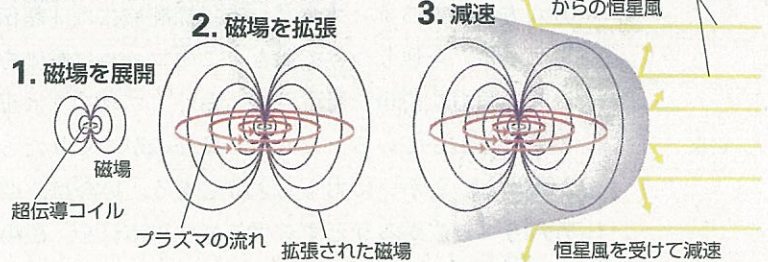
ところで、仮に推進方法が順調に開発されたとしたら、減速の方法も考えなければならない。探査機を送りこんだとしても、光速の 10% の速度で目的地を通りすぎるだけでは、あまりにももったいない話だ。やはり恒星の周囲軌道に探査機を投入し、そこに長くとどまらせて観測をつづけたい。

最も単純なのは、目的地に近づくと、探査機の向きを反転させて逆噴射するという方法だ。しかし逆噴射で減速するために必要なエネルギーは、加速するために必要なエネルギーと同量である。これでは大量の燃料が必要となってしまう。

そこで考えられるのが、「磁気プラズマセイル」をブレーキとして利用する方法である。磁気プラズマセイルは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の船木幸^{ふなき}博士らが研究を進めている。簡単にいえば、宇宙空間に半径 10 キロメートルにもおよぶ“磁場の風船”を広げ、これで恒星から吹き寄せる「恒星風」とよばれるプラズマを受け止め、減速しようというものである (上のイラスト)。

本来、船木博士は、太陽からの恒星風 (太陽風) を背後からの追い風として磁気プラズマセイルで受け止めて加速し、太陽系の外縁部^{がいえんぶ}まで到達できる探査機を開発することをめざしている。恒星間航行の場合には、進行方向にある恒星からの恒星風を向かい風として受け止め、減速に利用しようというわけ

磁気プラズマセイルとは？



磁気プラズマセイルは、まず、超伝導コイルに電流を流すことで磁場を発生させる (1)。この状態で探査機からプラズマを放出すると、プラズマは磁場のはたつきにより、コイルの外側を同心円状に流れる。プラズマの流れは新たな磁場をつくり、結果的に磁場が拡張する (2)。そしてケンタウルス座 α 星からの恒星風を受け止め、減速する (3)。なお、理想的な状態なら、同心円状のプラズマの流れはほとんど弱まらずに維持されるため、投入するプラズマの量を節約できる。

だ。船木博士は、磁気プラズマセイルによってプラズマの流れを受け止めることが可能なことを、地上での実験ですでに確かめている。

帆船からスペースシャトルへの変化を思えば、希望はある

ここまで、今にも恒星間航行が実現しそうな勢いで話を進めてきたが、実際のところは、恒星間航行に挑戦できるのは、まだ少し先の未来の話である。レーザー核融合など、推進方法にかかわる技術の進展を待たなければならない。

また、推進方法の開発以外にも、となりの恒星をめざすうえでの課題は山積みである。たとえば通信の問題だ。4.37 光年の距離で通信するには、現在の技術レベルをこえるほどの通信機器を探査機につまこまなければならない。また、探査機の寿命^{じゆみう}の問題も深刻である。50 年間もメンテナンスなしで動きつづける機械をつくるのはかなり困難だと予想できる。ましてや宇宙空間には、さまざまな高エネルギーの粒子が飛びかっている。とくに太陽系を飛びだしたあとは高エネルギー粒子が降りそそぐ確率が格段に上がると予想されており、これらが探査機のコンピューターの誤作動や故障を招く危険性が高いのだ。

とはいえ希望を失う必要はない。野田グループ長が語る。「数百年前の大航海時代の帆船とくらべて、人類が宇宙に送りこんだスペースシャトルの運動エネルギーは 680 億倍にも達しています。これだけのことが達成できたのです。恒星間航行も不可能ではない気がしてくるのですが、いかがでしょうか」。

(担当：編集部 赤谷拓和)