



プラズマの世界と、惑星の内部構造

—— 藤本研究室 ~ 地球惑星科学科 ——



(左)藤本 正樹 助教授 (右)小林 直樹 助手

宇宙はむしろ活動的である。宇宙空間には無衝突プラズマと呼ばれるガスが広く存在していて、地上では見られない爆発的な現象がごく日常的に起こっている。藤本先生が研究の対象としているのはこの無衝突プラズマ、特に地球周辺の無衝突プラズマである。

助手の小林先生の研究テーマは、それとは対照的に惑星の内部構造である。地球の内部構造は、地震波を用いる手法によりかなり詳しく分かっている。その手法を火星や木星といった他の惑星にも応用し、内部構造を調べようというのだ。



変幻の世界、無衝突プラズマ

宇宙空間のほとんど全てを満たしているのは、星と星の間にあるガスである。そのガスが地表付近の空気と異なる点は、大きく二つある。

ひとつは、気体のほとんどが電離状態、すなわちプラズマとなっていることである。プラズマはイオンや電子のガスであるから、その運動は電流を発生させ、磁場を作る。一方で磁場の中で動くイオンや電子はローレンツ力を受けて運動を変える。このため宇宙空間においては、プラズマと磁場の間でエネルギーの変換が活発に行われている。

もうひとつは、空間に存在する粒子の数が非常に少ないことである。地表付近の空気には 1cm^3 あたり約 10^{20} 個の粒子が存在するが、宇宙空間では同体積に約 1 個しかない。このため、個々の粒子間の衝突の頻度は無視できるほど小さくなる。いま気体があって、その一部の粒子が加速（あるいは加熱）された場合を考えよう。地表付近の空気では、粒子同士の衝突が無数に繰り返されて、エネルギーはあっという間に全体に分配される。つまり一部の粒子だけが突出した高いエネルギーを持つという状態はあり得ない。ところが宇宙ではその衝突がほとんど起こらないので、一部の粒子

だけが低いエネルギーを持つことが可能になる。

プラズマであることと、希薄であること。この二つの特徴を持つガスを無衝突プラズマと呼ぶ。無衝突プラズマ中ではイオンや電子の加速が頻繁に行われるので、多彩で爆発的な現象が起きる。例えば、太陽のフレア現象や、地球のオーロラはその典型だろう。宇宙線（宇宙空間に存在する高エネルギーの放射線）の発生や、超新星爆発のときに発生する X 線リングなども無衝突プラズマの現象として興味深い。

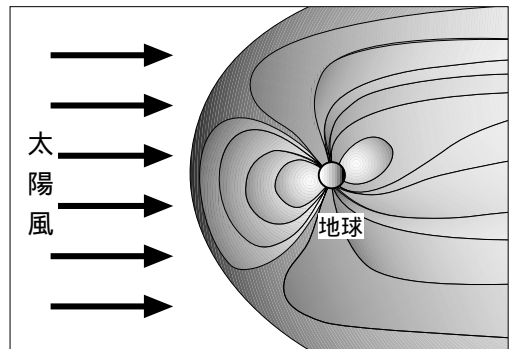


図1 地球磁気圏

では、無衝突プラズマの性質を調べるにはどうするだろうか。地球周辺であれば、人工衛星を打ち上げて粒子の速度分布などを直接測定することができる。だが超新星のような遠い天体の場合、その近くに測定機械を持って行くことは不可能だ。しかし宇宙線やX線の発生もオーロラと同じく、

無衝突プラズマにおいて粒子が加速された結果起こる現象である。したがって太陽系空間や惑星周辺におけるプラズマ加速機構を解明すれば、宇宙のさまざまなプラズマ現象を理解することが可能になるのである。



磁力の爆発、磁気リコネクション

プラズマを加速するメカニズムにはいくつか種類があるが、いずれも磁場のエネルギーが解放されることでプラズマの加速がなされている。ここではそのうちの磁気リコネクション（磁力線のつなぎ変え）を紹介しよう。

加速に先立つ準備段階は、まずプラズマ粒子の運動エネルギーが磁場に与えられることである。例として地球の磁場について見てみよう。地球の磁場は図1のような磁気圏を形成している。太陽は太陽風と呼ばれる高温のプラズマを吹き出しており、地球はそのプラズマの流れの中にある。そのため地球磁気圏の昼側は太陽風によって押し込められ、逆に夜側の磁力線は長く引き伸ばされている。この尻尾のような部分（磁気圏尾部）に、太陽風から得られたエネルギーが磁場エネルギーとして蓄積されているのである。

磁気圏尾部に磁場エネルギーが蓄えられているのは、磁力線がひねられたり引き伸ばされたりしているためである。だからそのひねりや伸びが何らかの形で減少すれば、蓄えられていた磁場エネルギーは解放される。磁気リコネクションの場合、それは磁力線のつなぎ変えによって起こる。図2は磁気圏尾部における磁気リコネクションの様子を示したものである。(A)から(B)への磁力線のつなぎ変えによってその長さは短くなり、伸び方が減っている。Nのあたりでは磁場が弱くなっており、その分だけ磁場エネルギーが解放される。太い矢印は、このエネルギーによって加速される粒子の運動の向きを示す。

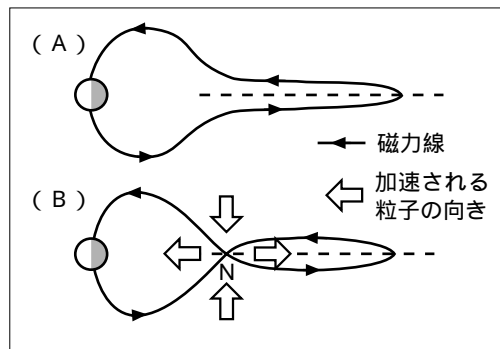
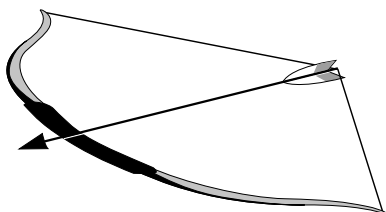


図2 磁気リコネクション

この流れを弓に例えると、弓にあたるのが磁場であり、弓は太陽風という力によって引き絞られている。そして手を離れた（磁力線をつなぎ変えた）瞬間にエネルギーが解放され、矢＝プラズマ粒子を加速するのである。地球のオーロラ現象は、このようにして加速されたプラズマ粒子が、大気圏に落ちて分子に衝突したときに起こるのだと考えられている。

無衝突プラズマを支配している物理は何だろうか。地上の空気において、気体の運動を記述する物理は流体力学である。しかし流体力学は、粒子の数が非常に多く、分子の運動が平均化していることが仮定されている。だから無衝突プラズマ相手には使えない。また、プラズマであるから電磁場と粒子の運動が相互作用をしており、それも記述できていなければならない。この二つの点において修正を加えたのが電磁流体方程式である。無衝突プラズマの現象の多くはこの方程式を解くことで説明でき、シミュレーションもこの方程式をもとに行われている。

しかし電磁流体方程式は、導かれる過程で多くの近似を施されている。そのため実際の観測データ

を説明するには多少不満が残る。藤本先生の研究課題は、電磁流体方程式をより近似を使わない方程式に書き換えることだそうである。全く近似をしないということは無理でも、一部の近似をなくせば、もっと観測データをよく説明できるように

なるかもしれない。どの近似が有用でどの近似が必要ないかを、データ解析や数値シミュレーションによって見極める。それによって、我々は宇宙のプラズマ現象についてより深く理解できた、といえるようになるだろう。



地震波でわかる、地球の内部構造

さて次に、小林先生が行っている研究を紹介しよう。地球はどのようにして生まれたのか。それは人類の積年の研究課題である。それにはまず、地球がどのような構造をしているのかが分かなければならない。地球内部の構造を調べるのに有効な手段は、弾性波を用いることである。

弾性波とは弾性体中を伝わる波動で、具体的には地震波や音波などがそれにあたる。波には、光がそうであるように最短時間で進める道筋を選ぶという性質がある。例えば地震波は地質の硬いところでは速く、軟らかいところでは遅く伝わるから、遠く離れた地点へはより硬い地球内部をえぐるよう

にして伝わる(図3)。だから震源地から観測点まで地震波がどのくらいの時間や強さで伝わったかを測定すれば、内部の硬さ分布が推定できるのである。地質の硬さと温度には密接な関係があることからマンツルの温度分布が分かり、したがってその対流の様子などもこれによって分かる。実際、プレートが湧き出しているハワイの地下のマンツルは、他の部分に比べ温度が高くなっていることが地震波の測定によって分かっている。

弾性波で内部構造を調べる手法の利点は、なんといっても地下深くまで高い解像度が得られることにある。もし浅い地下の構造を推定するのならば、他の手法としては例えば重力加速度を用いる方法がある。重力加速度は質量分布によって決定するから、逆に地表面での重力加速度を測定することで地中の密度分布を推定することができる。しかしこの方法では解像度が地表面からの距離に依存するので、地下深くの密度分布を求めるには向いていない。一方、弾性波による手法では、解像度は原理的には弾性波の波長とそれを観測する時間間隔によって決定し、深さには依存しない。だから地球の深部まで細かな硬さ分布の推定が可能なのである。

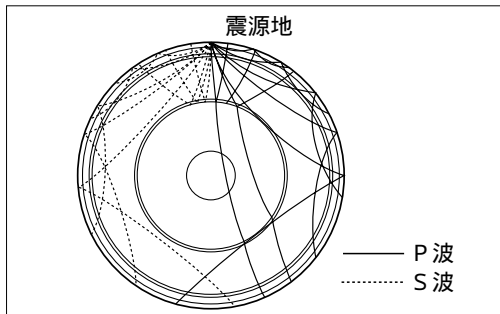


図3 地球内部の地震波の伝わり方



風は貴重な弾性波発生源

地球誕生のプロセスは、太陽系生成のモデルをもとに推定されている。だから、火星や木星など他の惑星の内部構造を調べることも、地球誕生のプロセスを検証するためには必要になる。

まず火星の内部構造を調べることを考えよう。火星くらいの距離であれば直接地震計を持っていくことができるから、火星においても弾性波を利用する手法が有効だろう。が、ここで大きな壁にぶちあたる。地震がないのだ。火星にも火山はあって、10億年前までは活動していたと思われるが、

今は活動していない。火山活動がないということはプレート運動もきつないだろうから、地震もあるまい。

そこで小林先生が考えたのは、風である。火星にも地球と同じように大気があって、風がある。風が吹けば、地面は揺れる。地震でなくとも弾性波を生じさせるものがあればよいわけだから、風によって起こる地面の揺れから内部構造を推定できるだろう。ただし、どこからどのように風が吹くか、などということとは分からない。だから震源

地から観測点まで、弾性波がどのように伝わったかを測定することはできない。観測できるのは、火星の固有振動だけである。

地球や火星といった惑星には、それぞれ固有振動数が存在している。ここで弦の振動について思い出してみよう。弦を弾くと、その弾く場所や強さがどうであれ、その弦の固有振動だけが強く残る。だから惑星においても、結果的にはその惑星の固有振動数と合致した振動だけが強く観測されるはずである。固有振動数は内部構造によって決定するから、現在提唱されている火星のモデルが正しいかどうかは、この固有振動をみることで確かめられるはずだ。試しに地球が風の力によってどのように揺れているか見るために、大きな地震の起きていない期間の地球の固有振動を観測した結果が図4である。横軸が振動数、縦軸が振動の強さで、縦の点線は計算によって予想された振動数である。実線のギザギザは約80日の観測結果の平均値であり、計算で予想される振動数と振幅で揺れていることが分かる。火星での観測はまだ行われていないが、2003年に地震計を積んだ探査機が火星に到着する予定である。

金星も地球や火星と同じく堅い地表面を持つ星（地球型惑星）なので、同様な手法で内部構造を推定できると期待される。しかし金星の表面温度は約200度と高いため、高温下でも正しく作動する地震計を開発することが課題となっている。

では、木星の内部構造はどうなっているだろう。今までの方法は、地表面の堅い地球型惑星にしか用いることができない。木星のような、ガスに覆われた惑星に弾性波の技術を応用するためには、もう一工夫が必要である。

木星の構造のモデルは、現在大きく分けて二つ提唱されている。中心から表面に向かって重い原子から順に分布しているモデルと、核の部分において、重い原子が比較的の外側に散らばっているモデルである。モデルによって固有振動数は異なるから、

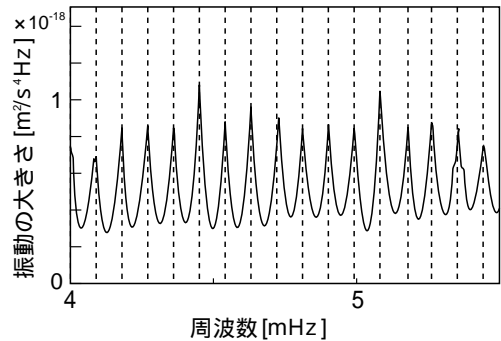


図4 地球の固有振動数

固有振動を見ることは、モデルを決定するための重要な証拠となる。

いずれのモデルにせよ、もし表面付近のガスが振動すると、断熱的に収縮（または膨張）し、温度が上昇（下降）する。光度は温度の4乗に比例するので、その部分は周りよりやや明るく見えるはずである。逆に膨張すれば、そこから出る光はやや暗くなる。つまり、表面の振動を光度の変化として捉えることができる。その振動を解析すれば、やはり固有振動が強く現れているはずである。

表面の固有振動を見るのには、もう一つ方法がある。光のドップラー効果である。収縮すれば、表面は地球（観測者）に対して遠ざかっていくので地球から見える木星からの光の波長はやや長くなる。逆に膨張すれば波長は短くなる。光の波長の変化から表面がどのくらい振動しているかが分かるわけである。木星表面での振動速度は1m/s程度と予想されており、これを光速と比較するのだから、ドップラー効果は微々たるものである。しかしデータが十分に集まれば、SN比（信号と雑音の比）が上がり、波長変化を見ることができてしまうという。もっとも現在の望遠鏡では、どちらの方法でもまだ十分なデータにならないようで、木星の構造モデルにはまだ決着がつかない。それは、ハワイにもうすぐ完成する予定の、直径8メートルの望遠鏡に期待するところである。

藤本先生と小林先生、お二人の研究対象はまるで正反対のように見えて実は互いに密接に関連している。惑星が磁場を持つ成因がマントル対流にあると考えられているためである。それぞれのお話は

もちろん、そのようなつながりの部分も非常に興味深く感じた。藤本先生と小林先生には、お忙しい中取材にご協力いただき、本当にありがとうございました。（尾島 邦明）