

巨大惑星に吹く風

竹広 真一 (数理解析研究所 准教授)



おはようございます。数理解析研究所の竹広と申します。私のお話は、「巨大惑星に吹く風」ということで、これは木星と土星の風のお話をしたいと思います。

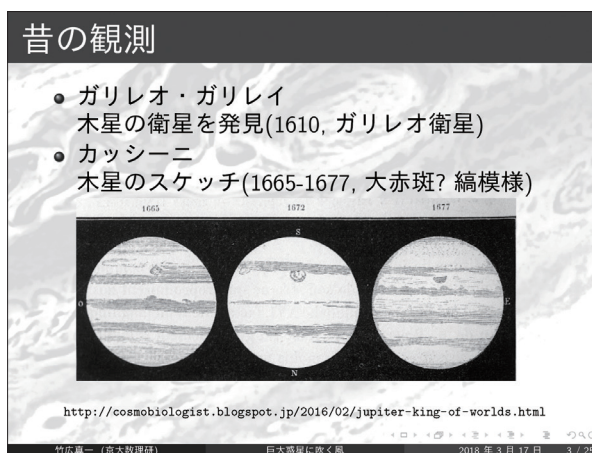
この上の絵は漫画ですけれども、太陽系、一番左側に太陽の絵があって、ずらっと並んだ惑星の漫画です。水・金・地・火・木・土・天・海、冥王星は準惑星ということで惑星から外れたので、これは昔の絵なので冥王星までありますが。

この中で、大きいやつが2つあります。木星と土星です。一番大きいのが木星で、2番目に大きいのが土星。その写真が下側にありますけれども、木星のほうはきれいな縞模様が特徴的なものが見えています。

土星のほうは、どちらかというと輪っかのほうが有名で、そちらに目が引かれるんですけども、やはりよく見ると縞のパターンが見えています。この縞のパターンが、実はこれに沿って風が吹いているということが最近知られているようになっております。

この縞模様は、実は結構昔から知られておりまして、1600年代にまでさかのぼります。木星を観測した有名な人はガリレオなんですけれども、この人は自分の望遠鏡で衛星を見つけたというので有名で、ガリレオ衛星という名前がついているんですけども、この後、何十年かした後にカッシーニという方がスケッチを残しております。こういう、これ望遠鏡で見て、縞模様がもう見えていますよというのと、あとこの辺にぽつんと何か丸いのが見えていて、これが多分大赤斑という大きい渦を見たんじゃないかというふうに言われています。

これが結構昔から、縞模様があるよというのは分かっていたんですけども、最近ほ



ケットで人工衛星を飛ばして近くまで行って詳細な写真を撮ってくるということができるようになっています。もう1970年代から、主にアメリカですけれども、パイオニア、ボイジャー、ガリレオ、カッシーニ、ジュノーといった、もっとたくさん木星とか土星のそばを通っている人工衛星はありますけれども、主にこういった探査機が近くまで行って写真を撮ってきている。今、行っているのはジュノーというやつでして、これが現在木星の軌道を回って観測を続けています。

こっちのカッシーニというやつは、主に土星を観測していた探査機なんですけれども、昨年、ついに土星の大気に突っ込みましてフィナーレを迎えたというので、NASAの人たちが涙を流して喜んでいたというシーンが報道されて、ちょっと有名になりました。

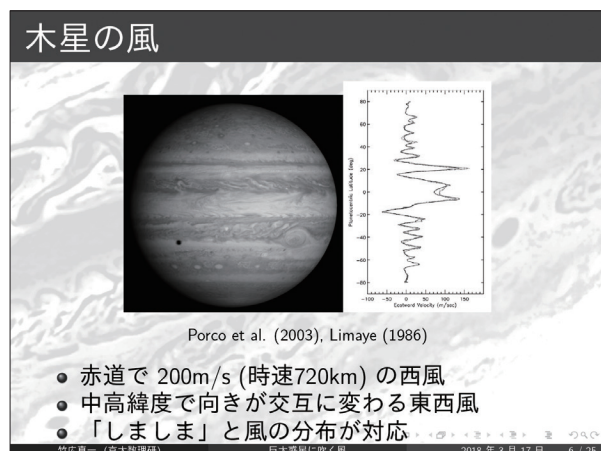
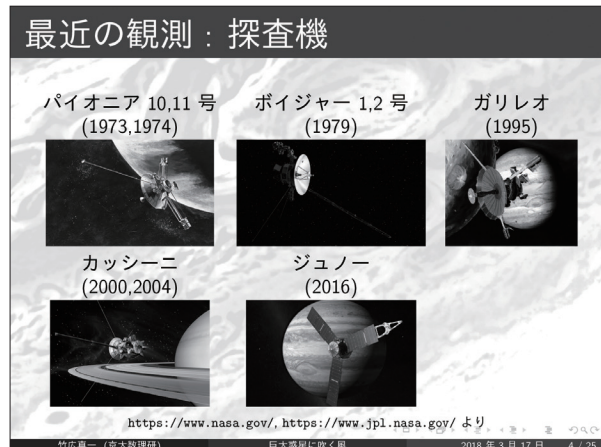
どんな絵になっているのかというのをちょっと見てみましょう。これ、木星の雲の動きを動画にしたものなんですけれども、赤道のあたりに右向きに速い流れが、速く動いている様子が見えていると思います。それとともに、縞々に沿って、この辺が一番速く回っているように見えますけれども、この辺とか、この赤道の大赤斑という大きい渦のあたりは逆向きに流れたりしていますし、この縞々に沿って右へ行ったり左へ行ったりしている様子が見えると思います。

これは、このような雲の動きを追跡して、木星とか土星の風がどういうふうに吹いているのかというのを調べることができます。

そして、グラフにしたのがこちらの絵でして、右側のグラフが風速分布です。縦軸が緯度で横軸が風速になっていて、ここら辺が赤道ですけども、右に飛び出したところが右向きに流れているところで、逆向きが左向きに流れているところ。

右向きになっているところは、木星が回っている向きと、自分自身が回っている自転の向きと同じ向きに風が吹いている。だから、この辺は自分の、木星の平均的に回っているよりも速く回っている部分です、こちら側は。逆向きのところは遅く回っている。

大体どれぐらいの風速が吹いているかというと、この一番速いところで100メートルか



ら200メートル／秒ですね、時速にして数百キロメートルの風が吹いています。赤道で右向き、西風と呼びますがけれども、風が吹いているのが一つの特徴で、あと中高緯度に交互に、右に行ったり左に行ったりするジグザグな構造が見えます。

これがちょうど、こちらの写真の縞状のパターンと対応しておりまして、きれいに縞の構造と風が行ったり来たりの分布が対応しているということが知られています。

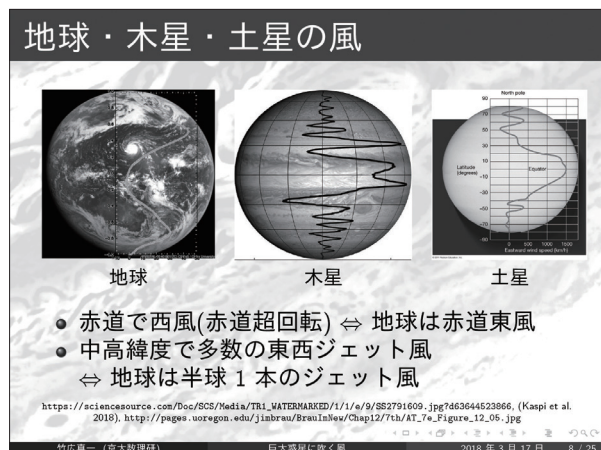
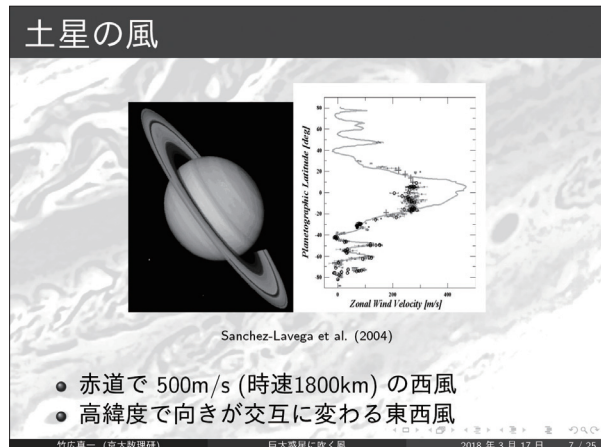
こちら、土星でして、土星のほうはちょっと赤道付近の風が、ジェット風といいますけども、その幅が広がって、もっと強く吹いています。500メートル／秒、時速にして1000キロぐらいの風が吹いていて、もっと強い風が吹いています。そのかわり、中高緯度の縞々が少し分厚くなって数が少なくなっています。こんな風速分布が知られている。

これだけだと、ちょっと木星とか土星だけを見ていると分からないので、地球と並べてみましょうということで、気分を味わってもらいたいと思いまして並べてみました。

地球はどういうふうになっているかというと、この赤い線が大体雲があるところの平均的な東西の流れを描いたものですが、赤道ではほとんど風がないか、ちょっと逆向き、東風になっているんです。この中高緯度の真ん中あたりのところは、偏西風とか皆さんよく聞かれたことがあると思いますけども、1本のジェットが、1本しかジェットがないと。それに対して、木星、土星のほうは赤道で西風になっている。

この西風のことは、超回転、スーパーローテーションという呼び方をすることがあります。これはなぜかという先ほども申し上げたとおり、自分の木星の自転よりも、この部分は速く回っている、速く回っている、超えているという意味で超回転という呼び方をします。地球はそれに対して逆向きになっているので、超回転になっておりません。それが一つの特徴です。

もう一つは、この中高緯度にたくさんのジグザグの縞々の構造がありますけれども、地球に比べてたくさんジェットの風が行ったり来たりしているというのが特徴であります。



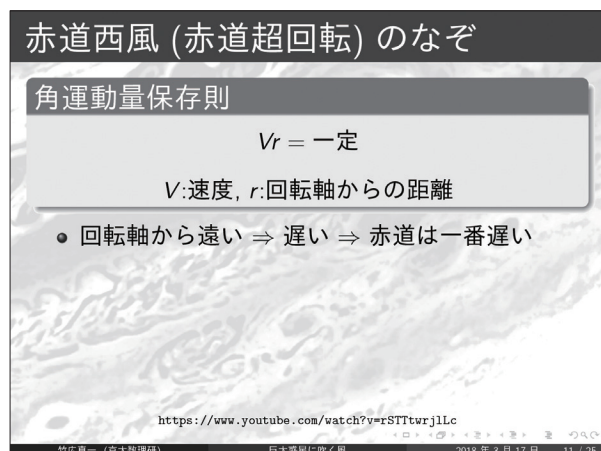
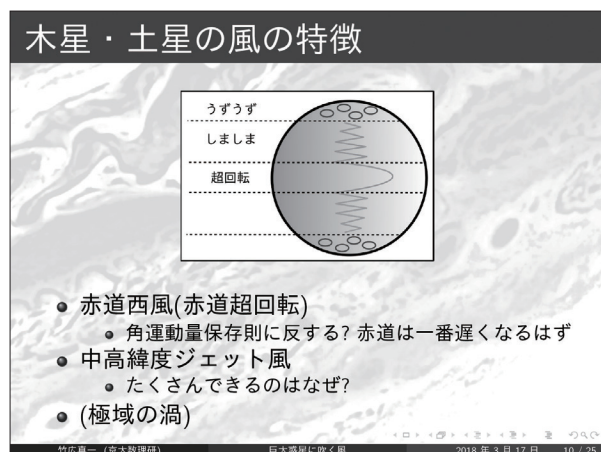
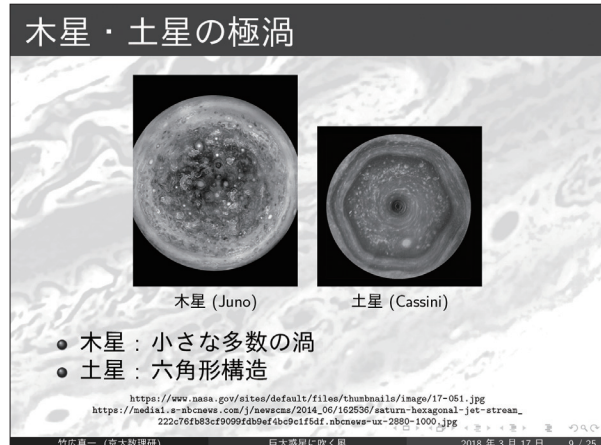
もう一つ、木星、土星で最近注目されているのは極域の流れです。これはジュノーという今観測しているやつと、カッシーニという最近の探査機が極から見た写真を撮ったものです。木星はちょっと小さいですけども、渦がたくさん、ぱらぱらぱらとありますねというのが見えていて、これが結構研究者の間では、何でこんな渦がたくさんあるんだということの研究対象に今なっています。

土星のほうも、そのような構造、小っちゃいのがあるんですけど、むしろこの辺に縁のところ六角形になっているのが面白いねということで注目されていたりします。

今までの話を漫画にしたのが、この絵でして、赤道のところでは西風で超回転で、中高緯度のところでは縞々でジグザグしていると、極のところでは渦々がたくさんありますと、何かこういう特徴があります。

これだけだと面白くないんですけども、実は一つ謎がありまして、赤道では超回転になるというのは、単純な物理法則から考えると実は不思議なことなんです。なぜかといいますと、角運動量保存則というのがあります。これは、回転の軸からの距離掛ける速度が一定という法則なんですけれども、これから考えると、回転軸に近いところからは、この速度のほうが大きくないといけない。軸から離れると r のほうが大きくなるので、 V の速度のほう小さくならないといけない。だから、回転軸から遠いと遅く回って、近づけると速く回るというのが角運動量保存則です。

この現象は実は皆さんよく知っていて、スケートのスピンですね。手を広げているときにはゆっくり回っているのを、縮めていくとぎゅんぎゅん速く回り出すというのはよくご存じで、見たことがあると思いますけど、これは角運動量保存則でして、回転の軸に対して腕の長さを縮めてやると速く回るといのが、よく体験しているという、目にしていることです。



このことを木星とか土星に当てはめてみると、赤道というのは一番回転軸から遠いところなんですね。極のほうに行くと近づいてくる。だから、本当だったら、この法則が成り立っているはずだったら、実は赤道のところは遅く回らいといけない。だけれども、先ほどの絵からいうと、赤道のところでは一番速く回っているんですね、実は。

だから、これは実は謎だといわれていまして、何かしら単純な保存則、物理の法則ではなくて、特別な速く回るメカニズムがないといけないということで昔から研究されています。

もう一つの謎は、地球は1本だった中高緯度の風が、なぜたくさんジグザグにできるかというのが何でかということがあります。きょうはあんまりお話ししませんが、極域の渦、何でできているのかということのも謎です。

こういった風速、風の様子が分かってきたんですけど、これをどう料理してやろうかということなんですけど、今までたくさん風とか木星の絵とかお見せしましたけれども、これは全部インターネットを使って画像を皆さんでもとってこれるようなものでして、私は実はそういう観測を実際にやっている者ではありません。数理解析研究所というのは、数学と数理科学の研究所でありまして、天文学とか宇宙科学を専門にしているところではないんですね。

なので、実は私がこれから話すことは、その風の分布を見ながら、何でこういう風が吹いているのかなということを数学と物理を使って何か説明をしたいと、あるいは上のほうしか、雲の動きしか見えないので、中のほうはどうなっているのかなということを想像してみたいと。例えば、流体の式、1本だけ見せますけれども、こういう微分方程式よりも難しいものを使って、これを手で計算したり、計算機で、コンピューターを使って計算したりということをしています。

ですから、どちらかというと、もっと詳細に知りたい、調べたい、見たいというわけではなくて、見えないところをどうなっているのかというのを考えたいというのが私の研究のスタイルです。

何でこの巨大惑星のほうを研究するんだということなんですけれども、一言で言えば、これしかないんですね、面白いからなんですけれども。これだけじゃお答えにならないので、何で面白いのか、もうちょっと考えてみました。そうすると、まずやっぱり木星と土星だけを見ていても何で面白いかって感じなくて、やっぱり地球のことを知っているから、それに比べて違っている風が吹いているので何か面白そうだと思うんだと、やっぱり地球を意識しているというのは確かにあります。

どう(巨大)惑星大気を研究する?

- 天体観測の専門家ではありません
 - 数理解析研究所：数学/数理科学の研究所
- 数学と物理の理論 + 計算機
 - ⇒ 現象を「語る」、見えないところを予測

ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \alpha g T \mathbf{r} + \nu \nabla^2 \mathbf{u},$$

$\mathbf{u}$: 風速, $\boldsymbol{\Omega}$: 自転角速度, ρ, p, T : 密度, 圧力, 温度

「知りたい」のではなく「考えたい」

竹広真一 (京大数研研) 巨大惑星に吹く風 2018年3月17日 12/25

もう一つ地球と違うところは、地球は地上から観測したり、あるいは、ひまわり衛星の画像がかなり詳細になってきましたので、非常によく見えています。ですから、どうなっているのかなということがすごく詳しく分かります。

それに対して、木星に限らず、ほかの惑星の風を見るとかいうことは、ある意味一部分しか見えていないわけですね。そういう意味で、まだ自分で考えて、どうなっているのかというのを考える余地があって、そういうことをやりやすい対象であると。自分で考えてみるという余地があるというところが、地球の場合でも、いろいろ考えることはもちろんたくさんあります。ちゃんと予報をもっと詳細に当てないといけないということで、工夫しないといけないんですけども、それに対して、ちょっとマスクされている、隠れている部分があるほうが、どうなっているのかなというのを考えるきっかけになりやすいわけですね。そういうところが面白いと思っています。

そういうふうに、ちょっとほかの対象と比べて、もう一回地球に戻ってきたときに、もしかしたら、木星と土星を見たことで、地球をもう一回振り返ってみると、もう少し地球のことが実はよく分かるんじゃないかということも期待しています。

では、そういうことで、もう少しじゃあどういうふうに考えられているかということ、似ているところ、似てないところというのをちょっと並べてみましょう。

まず、似ているところです。これは大気の部分です。風が吹いている部分は、どこかというのを絵にしたところですが、地球は薄っぺらい部分、球面の上に乗っている大気があります。木星は、ちょっと分厚いんですけども、基本的に表面の部分が動いているのが見えています。ですから、球と球の間に挟まれた部分が何か流れているよということで、形が似ています。

それから、ここに回転軸がありますけども、どちらもくるくる自分で回っています。自転しているということです。ある意味、そのスピードとか大きさは違いますが、そういうふうに形とか回っているということが似ているという意味で、こういったことを相似という言い方をします。

似てないところは何かといいますと、一つは地面です。地球ははっきりとした地面があ

なぜ(巨大)惑星大気を研究する?

「おもしろい」から

- 地球と違った風の吹き方
- 地球は観測が多すぎ ⇒ 答えが見えている
- (巨大)惑星は少ししか見えてない
⇒ 「自分で考える」のがおもしろい
- (巨大)惑星と同じ視点で地球を振り返る
⇒ 地球をよく知ることにつながる

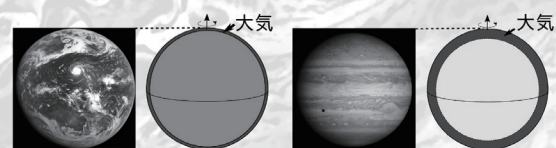
竹広 眞一 (京大数理研)

巨大惑星に吹く風

2018年3月17日

13 / 25

似てるところ：「相似」



- 大気が球殻領域
- 自転している

竹広 眞一 (京大数理研)

巨大惑星に吹く風

2018年3月17日

14 / 25

りますけれども、木星のほうは地面がはっきりしません。ですから、下がどうなっているかというのはよく分かりません。

もう一つ違うところは、地球の風は太陽によって動かされています。ですが、木星の場合は、もちろん太陽から照らされていることもありますけれども、自分が中から光っているというエネルギーもあります。下から、中からもろうように、太陽でもらうよりも多く熱を出してしまっていて、中から熱を出しているということが知られています。この2つの点が違います。

ですが、一応似ているところから、もう少し考えてみることにしますと、先ほど相似という言葉を出しましたが、どれくらい形が似ていて大きさが違うのかというのを、まず大きさですね。地球の絵がここにあって、木星がこれくらいで、ざっくり言って、大きさは木星、土星も地球の10倍です。

あと、回転です。自転ですね。地球は1日で1回転していますけれども、木星、土星は大体その半分で、半日くらいで回っています。10時間とか12時間とか、それくらいの時間です。だから、自転の速度は2倍です。

こうしてみますと、単純に考えると、大きいんだけど、速く回っているという、この効果というのは2倍程度かなというふうに単純に思いがちなんですが、実はちゃんと比較するには半径が大きいということも考慮しなければいけません。

ちゃんとした比較をするには、こういうふうに風の大きさに対して自転速度ですね、どれくらいの自転で、回転で回っているかという、この比にしないといけません。

そうすると、風速は、ちょっと地球のほうが弱くって、木星、土星が少し速いんですが、この半径がかなり大きくて、赤道のところの回転するスピードはすごく速いわ

似てないところ

- 太陽放射 + 内部からのエネルギー
 - 地球は内部(地面)からの熱流がとて小さい
- 地面がない
 - 地面に当たるもの：ガス-金属相変化の密度変化

竹広真一 (京大数理研) 巨大惑星に吹く風 2018年3月17日 15 / 25

「相似」：大きさと自転

実際の大きさの比較

木星 地球 土星

本体直径 142984km 120536km

http://chuplus.jp/blog/article/detail.php?comment_id=6545&comment_sub_id=0&category_id=282

- 大きい：半径が地球の約 10 倍
- 速く回ってる
 - 自転周期約 10 時間, 回転速度が地球の約 2 倍

竹広真一 (京大数理研) 巨大惑星に吹く風 2018年3月17日 16 / 25

自転の効果の比較

ロスビー数 = 風速 / 自転速度

$$Ro = \frac{U}{\Omega R} = \frac{\text{風速}}{\text{自転}}$$

U: 風速, Ω : 自転角速度, R: 惑星半径

	地球	木星・土星
Ro	0.2	0.01

- 自転の効果は地球の 20 倍

竹広真一 (京大数理研) 巨大惑星に吹く風 2018年3月17日 17 / 25

けですね、木星、土星は。なので、実はこの比で見ると20倍になります。2倍どころじゃなく、すごく回転がきいている、自分自身が回っているという効果がきく流れになっているということが一つ分かります。

そして、こういう自転の効果が強いと、どういう流れになるのかなというのには、理論的に大事な定理があります。テイラーとプラウドマンという昔の人の名前がついた定理なんですけれども、自分自身が回っていると流れはどうなるかといいますと、回転軸方向、この縦方向に渦とか流れとかがそろってしまうという定理があります。

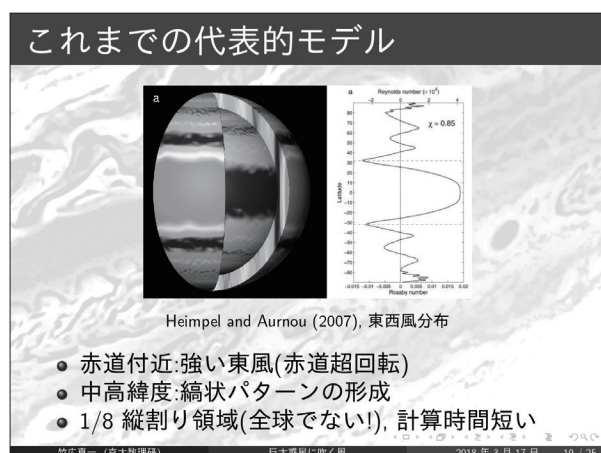
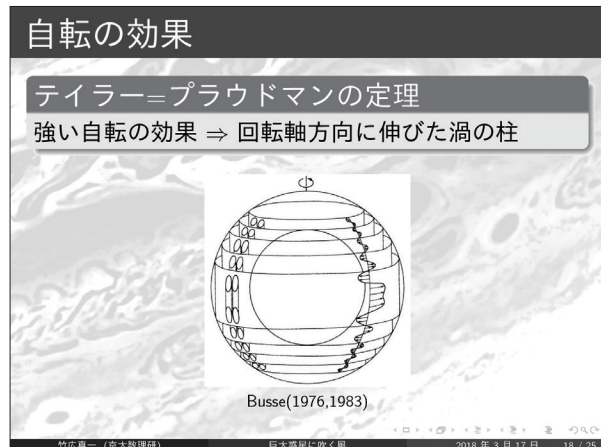
これは、ブッセという人が昔描いた、これは漫画ですけれども、こういう渦が、この縦方向にそろったような、伸びたような渦がたくさんできて、それに伴ってジグザグの渦と赤道の流れができていくんじゃないかという想像図を描きました。

これは理論的なことから想像した図なんですけれども、最近では計算機で、じゃあ、どういう流れができるかというのを計算できるようになってきましたので、そのほかの人がやった計算例を一つ紹介します。

これは2007年の論文ですけれども、これは東西風を、この薄っぺらい、大きい球と、これが上側、これが下側のところの球殻の間の流れを下からの熱流でどういうふうにできますかというのを計算した例です。どちらも風速分布が出ていまして、こちら、縞々模様がこの辺にできていて、強い流れが赤道にできていると。

何か中高緯度の縞々と赤道の雰囲気、最初に見せました土星の流れに似ているでしょうということで、これ一世を風靡した計算結果なんですけれども、ちゃんと赤道で超回転していると、縞々のパターンもできているので、これでめでたいと、出来たというふうな雰囲気ができましたけれども、実はこの計算、いろいろ突っ込みどころがあります。

一つは、実は全部の球で計算していません。ここのところですね、ちょうど全部の球描いてないのがみそで、このスイカみたいところの部分しか実は計算していません。ほかのところは、これをつなぎ合わせて、同じものが8個並んでいるよというふうにして計算したもので、計算機の力がまだ足りなかったんで、球全体で計算することがまだできなかつ



た。それがまあ一つと。

あと、計算している時間がまだ短いので、これ後でもっと長く計算するとどうなるかというのは本当は分からないという状況でした。

そこで我々は、この計算をもとに、この計算結果をフォローして、ちゃんと全球でやってみましょうということをやりました。

これは、地球シミュレータというスーパーコンピュータを使った計算なんですけれども、その途中の経過ですけれども、一応赤道でこういう超回転の流れと、中高緯度で縞々の状態が何かできそうだなという雰囲気のところがあります。この縞々パターンと、何かうまいぐあいにできて、それから、これは縦断面ですけれども、先ほどの漫画みたいに回転軸に、方向にそろったようなパターンになっているというのが見えます。

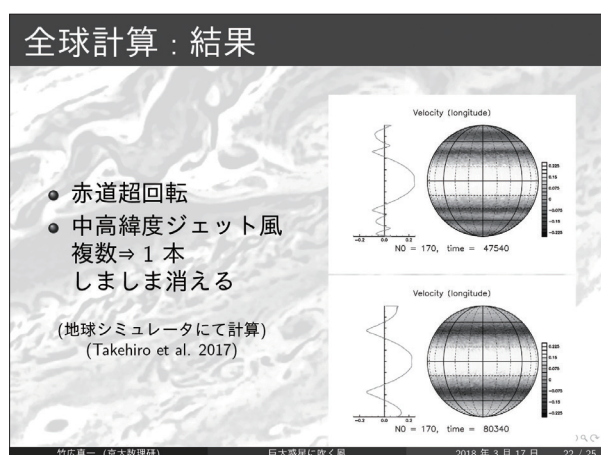
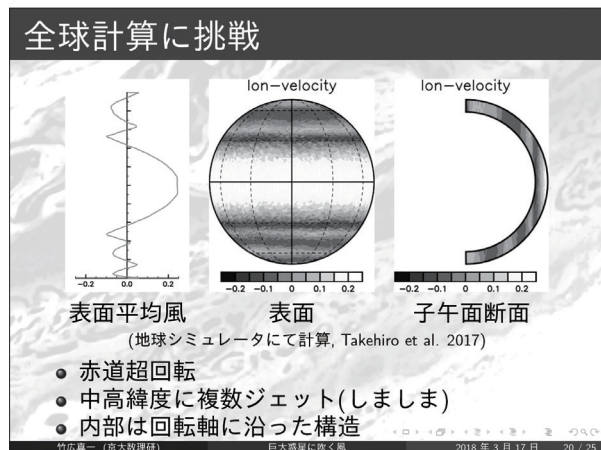
実はこれうまくいったかなと思ったんですが、ちゃんともっと長く初めから計算してみると、ちょっとどういうふうになるかというのをアニメーションでお見せしますけれども。赤道の流れはできていますが、中高緯度の流れはまだできてなくて、中高緯度の流れが縞々に次第になっていきます。

この辺が先ほどお見せした絵で、この辺で土星に似てきたなと思っていると、実はもっと長く計算すると、この辺ですね、縞々が全部消えちゃって1本になってきます。

実は、これは長く計算してみると、全部の球でちゃんとやり直してみると、長く計算すると縞々が実は消えちゃいまして、うまくいかなかったという計算例になってきます。失敗しました。

というわけなので、実はうまくいったように見えた計算例なんですが、もうちょっとちゃんとやり直してみると、まだまだうまくいかないよということが分かってきています。

現状はどうなっているかというと、実はその木星とか土星の風を再現する計算というのは、あまり確立しておりません。観測のほうも、ジュノーという観測機は重力場で観測して、中の流れを診断的に、深いところまであるよということが発表されていますけれども、



まだそれでも決定的ではないと。

ほかにも、地球の大気に似たようなモデルを使ったり、もうちょっと複雑なモデルを使ったりというような研究がなされていますけれども、基本的に、まだまだうまく縞々と超回転を同時に再現するということができているというような状況です。

そろそろお時間になりましたので、話の最後にメッセージとして私の好きな言葉を紹介しておきます。一つは、古きを訪ねて新しきを知るという言葉、これが好きでして、先ほど紹介した例でも、まず、やられていることをちゃんとやり直してみるというのは結構、それで新しいことが実は分かたりするというのが結構あります。意外に発見があります。

ただし、いわゆる結果だけを持ってきちゃだめで、ちゃんと同じことを自分自身でやってみるといところが大事でして、そうしてみても、どこが難しいところなのかとか、どこがみそだったかというのがちゃんと分かると。

もう一つは、こういうことを昔のことをちゃんと知って、やるということは、実は自分自身のオリジナリティー、独自の研究をやるというベースになります。

そもそも科学というものは再現性がないといけないので、誰がやっても、同じことをちゃんとやれば同じ結果にならないといけないという意味で、この再現性というのが大事なんですけども、そういう意味で、ちゃんと昔のことをきちんと押さえながら新しいことをやるというのが、一番大事なところだと自分では思っています。

もう一つは、失敗した計算例を示しましたがけれども、失敗でくじけてはいけなくて、実はこれはチャンスなんですね。次へ、もう一つこれを乗り越えたときに新たな話ができるわけなので、次へのステップアップのチャンスだと思ってチャレンジを続けていかないといけないということで、この2つの言葉をメッセージとして私の話を終わりたいと思います。どうもありがとうございました。

研究現状

- まだ決定的なモデルはない
 - 「ししま」が消えてしまう
 - 極域の渦?
- まだ決定的な観測はない
 - Juno : 重力場観測 ⇒ 深部の流れの存在を示唆
- 最近の研究の動向
 - 地球の大気モデルを流用
 - 上下の密度差を考慮したモデル

竹広真一 (京大数理解) 巨大惑星に吹く風 2018年3月17日 23 / 25

メッセージ

「温故知新」

マネしてみても意外に発見がある(コピペではダメ)

オリジナリティーを生み出す力

「失敗は成功のモト」

うまくいかない : 次へのステップアップのチャンス

竹広真一 (京大数理解) 巨大惑星に吹く風 2018年3月17日 24 / 25