

特集「将来木星圏・土星圏探査計画へのサイエンス：その1」

タイタン大気のスーパーローテーション

戸叶 哲也¹

2011年9月14日受領, 2011年10月14日受理.

(要旨) 土星の衛星タイタンの成層圏には、秒速200メートルにも達するスーパーローテーションが存在する。一方、対流圏には地衡風平衡の領域が存在し、顕著な季節変動と合わせて、地球大気と似た側面もある。本稿では観測データと複数の数値モデルの結果を踏まえながら、タイタン大気のスーパーローテーションの特徴および生成メカニズムに関する研究を金星大気と比較しながらレビューする。ハドレー循環・順圧乱流・プラネタリー波によってスーパーローテーションを再現できる大気大循環モデルもある。しかし、弱風しか予報しないモデルもあり、熱潮汐・重力潮汐・重力波などが成層圏の強風とどのように相互作用し、対流圏の力学とどのように共存しているのかが今後の大きな課題である。

1. はじめに

金星大気のスーパーローテーションは日本の惑星学界ではよく知られている現象であるが、土星の衛星タイタンにも似たような現象があることがわかっている。異なった大気構造や天文・地球物理定数のもとでスーパーローテーションがどのように振舞うかを調べることは、比較惑星科学の観点から有意義なことと思われる。タイタン大気のスーパーローテーションは長い間ベールに包まれていて、その存在すら確かなものではなかったが、近年のカッシーニ・ホイヘンス計画によってようやくその全容がわかりつつある。また、気候シミュレーションによってスーパーローテーションを再現する試み、もしくは大気大循環を全般的に理解するための研究も様々な研究グループが行っているが、金星大気の場合と同様に、スーパーローテーションの成因を完全に理解する段階にまでは至っていない。本稿では、これまでの観測結果と数値シミュレーションによる研究などを踏まえて、今までにわかった点と不明な点をレビューする。

2. 観測事実

タイタンの大気が超回転(スーパーローテーション)をしている可能性は、ボイジャー探査機がタイタンに接近した30年ほど前から取り沙汰されていた。しかし、それは風速の直接観測によるものではなく、かなり間接的な情報によるものであった。まず、ボイジャー1号が観測したタイタンの成層圏の気温がヒントになった。気象学では気温の緯度分布から東西風の高度変化(温度風)を見積もることができるが、特定の高度で観測された気温分布を見る限り、成層圏にかなりの強風が吹いていることが想像できた[1]。また、タイタンによる恒星の掩蔽の際に、タイタン成層圏の低緯度の等圧面が球状よりも扁平になっていることが判明し、それは成層圏の強風に伴う遠心力で説明することができた[2]。これで風速のおおよその見当がついたが、問題は風向きであった。惑星大気では一般に、平均東西風は南北方向の気圧傾度力・東西風にかかるコリオリ力・東西風が引き起こす遠心力の平衡で近似できる(傾度風)。ただし、タイタンは自転が遅いのでコリオリ力が遠心力よりはるかに小さく、東西風は気圧傾度力と遠心力が釣り合う旋向風平衡になっている。遠心力は風速の二乗に比例するため、旋向風平衡は西風でも東風でも満たすことができ、旋向風が西風か東

1. ケルン大学地球物理気象学研究所
tokano@geo.uni-koeln.de

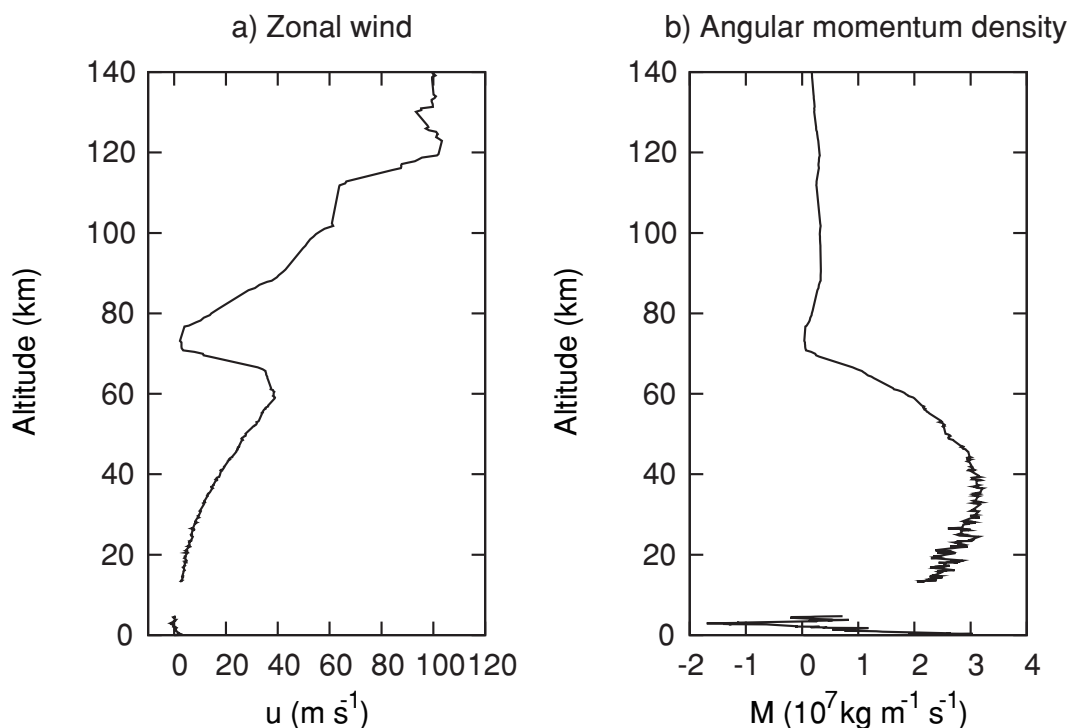


図1: a) ホイヘンス探査機のその場観測で得られた風速の高度分布. 図は[4]に掲載された図に一部加筆. 正の値は西風. 地表付近に弱い東風の領域がある. 高度5-13 kmのデータは送信中に喪失. b) 風速[4]と大気質量密度[5]から計算した角運動量密度の高度分布.

風であるかは特定できなかったのである.

タイタンの強風が西風であることが確認されたのは割合最近のことである. 地球からタイタン大気のエタン輝線のドップラー・シフトを観測し, タイタンの西側と東側の値の差から西風であることが確認され, 風速は200 m/s前後と見積もられた[3]. 他にも似たような観測がいくつかあるが, 観測データにはかなりのばらつきと誤差があった. 強い東風の可能性こそ排除できたものの, 金星のような全球的なスーパーローテーションであるのか, 高度分布はどうなっているのかといったことについては, カッシーニ・ホイヘンス探査機がタイタンに到着する2005年までは不明であった.

スーパーローテーションの決定的な証拠は, 2005年のホイヘンス探査機によるその場観測で得られた. ホイヘンスはパラシュートにぶら下がりながらタイタンの南緯10度付近を降下した. その間に風による水平移動で発生する電波のドップラー・シフトが, 地球の電波望遠鏡で受信された. ホイヘンスのドップラー

風速実験で得られた風速[4]を図1aに示す.

風速は全般的に高度とともに増加するが, 金星の風速分布と比べるとかなり複雑な高度分布となっている. まず, 地表から高度700 mまでは弱い西風(0.3 m/s程度)が吹いている. ただし, ホイヘンス探査機のカメラによる地表観察によると, 地表付近では東西風よりもむしろ南北風のほうが強くなっていることがわかった[6]. 高度700 mから6 kmまでは風向きは逆で, 1-2 m/sの東風となっている. 高度5-13 kmのデータは残念ながら受信することができず, 失われてしまったが, カメラによる観測を見る限りでは, この高度では特異な現象はなく, 風速は直線補間でさそうである. 風速は, 対流圏から下部成層圏にかけて40 m/sまで増加するが, 高度80 km付近にはほぼ無風の特異な領域が存在する. 高度80 km以上では風速は高度とともにゼロからぐんぐん上昇し, 高度120 kmでついに100 m/sを超過する. これによって, タイタンの成層圏の赤道スーパーローテーションの存在が証明された.

高度140 km以上では風速のその場観測データは存在しないが、カッシーニの赤外分光計で観測された大気の輝度温度から計算した温度風で、上部成層圏と中間圏(高度100-500 km)の全球の大まかな風速分布が判明した[7]。それによると、風速は上部成層圏でも高度とともに増加し、成層圏界面(300 km)付近で約200 m/sにまで達することがわかった。ただし、この最大風速は赤道上ではなく、冬半球の中緯度にずれていて、夏半球の大部分では100 m/sを下回っている。中間圏では風速は高度とともに減少しているが、どこまで減少するか、またはそれより上層に東風領域があるのかは定かではない。このデータによって、タイタン大気のスーパーローテーションは、極大化したジェット気流の点在ではなくて、金星同様に全球規模で存在することが証明された。

成層圏の気温分布は、夏半球では水平方向にかなり一様であるが、冬半球の高緯度では緯度勾配が非常に大きくなっていて、地球のオゾンホールに似た極渦の存在が示唆されている。

意外なことにタイタンのスーパーローテーションは完全な軸対称にはなっていない。成層圏の気温の三次元分布を見ると、冬極の最低気温は極そのものではなくて、極から4度ずれて北緯または南緯86度にあり、このパターンは変形せずに太陽と共に西向きに回転していることがわかった[8]。これは、大気角運動量に少なからず赤道成分(非軸対称成分)があることを意味する。

高度100 km以下では、ホイヘンス探査機による一点におけるその場観測以外、確実なデータはないため、緯度分布は残念ながら不明である。対流圏に発生するメタンの雲を追跡することによって風速を見積もることはできるが[9]、雲の分布が特定の季節・高度・緯度に偏っているため、対流圏の風分布の全体像をつかむのは難しい。また、風による雲の輸送と大気波動の位相の移動を区別するのも容易ではない。今までのデータでは、主に風速数m/sの西風が得られたが、ホイヘンスによるその場観測と大まかに一致している。一方、東風が赤道付近にだけ存在するのか、他の領域にも存在するのかは今のところ不明である。

3. タイタン大気のスーパーローテーションの特徴

タイタン大気のスーパーローテーションは金星の大気力学の考察でもよく引き合いに出されるが、実際には観測事実に限っても両者にはかなりの違いがある。タイタン特有の現象として以下の5つの点を挙げることができる。

(a) 角運動量密度の鉛直分布

金星の場合、角運動量密度の最大値は高度20 km付近にあり、これは角運動量の鉛直輸送のスケールと関連しているのではないかなどと論議されてきた[10]。タイタンの場合は、対流圏界面(高度40 km)に似たような最大値があるが、そのほかに地表付近に二つ目の最大値があり、高度3 km付近にはかなり顕著な負の最大値が存在する[図1右]。

(b) 季節変動

金星では季節変動はほぼ無視できるが、タイタンおよび土星には26.7°の自転傾斜角があり、太陽公転周期は29.5年である。したがって、ゆっくりではあるが地球以上の季節変動が予想できる。成層圏の気温分布は太陽入射角に敏感に反応し、夏と冬の温度差は激しい。それと対応して全球にまたがるハドレー循環が夏と冬では逆転し、極域では鉛直流による断熱冷却・加熱が気温をかなり変化させる。温度風から見積もる風速の分布も季節によってかなり変化することが判明した。カッシーニによる探査が始まった2004年以來の7年(つまりタイタンの一季節)の間には、春を迎えた北半球で風速が増加し、逆に秋を迎えた南半球で減少傾向にある[11]。スーパーローテーションのコアは、今までは北半球にあったが、ある季節には赤道を通過して南半球に移動することが予想される。

(c) 無風領域

ホイヘンス探査機による風速観測の最大の驚異は、高度80 km付近に顕著な無風領域が発見されたことであった。この無風領域は、上下の強風域にはさまれている。この高度は、大気の成層安定度がタイタンで最も高い高度と一致している。この無風領域の存在は、地球からの望遠観測で得られた風速のばらつきが大き

くなった原因のひとつと思われる。

(d) 地表付近の東風

タイタンの地表付近の高度1-6 km付近にかけては、上空のスーパーローテーションとは裏腹に、最大で風速2 m/sの東風が吹いている。金星では、地表付近にこれほど顕著な風向の逆転は観測されていない[10]。東風は弱風で地表付近にだけ存在するようであるが、角運動量収支の計算では赤道そして地表付近の比重が高いので、成層圏のスーパーローテーションにもかかわらず、大気全体の相対角運動量は小さい可能性も否定できない。

(e) 旋向風平衡と地衡風平衡の共存

地球の自由大気で吹く東西風は、気圧傾度力とコリオリ力が釣り合うことによってできる地衡風で近似でき、金星大気の東西風は前述の旋向風で近似できる。タイタンは、金星と同様に自転が遅い天体なので、東西風は旋向風平衡になっているだろうと想定されていた。しかし、ホイヘンスの風のデータを解析すると、一概にそうだとは言えないことがわかってきた。タイタンの場合は金星ほどコリオリ力が小さくないので、旋向風平衡か地衡風平衡になるかは、風速に依存している[12]。タイタンの自転速度では、風速約10 m/s以上では遠心力の方がコリオリ力より大きくなり、風が強くなるほど旋向風平衡に近づいていく。ところが、風速が10 m/sを下回ると逆に遠心力がコリオリ力より弱くなり、旋向風平衡は崩れ、地衡風平衡に近い状態になる。旋向風・地衡風平衡の境界は対流圏上部の高度30 km近くにあり、対流圏下部は地衡風平衡、それより上では旋向風平衡、というように二つの異なった力学の領域がひとつの大気の中に共存している。これは、明らかに地球、火星、金星と異なる。もしタイタンの地表付近でも旋向風平衡が成り立つとしたら、たとえ気温の緯度分布(つまり気圧傾度力の向き)が季節変動によって逆転したとしても、東西風の風向きがわざわざ逆転しなくても遠心力の向きに変わりはない。しかし地衡風平衡ならば、地球の成層圏と同じように、気温の緯度分布が逆転すればコリオリ力との関係で東西風の向きも逆転せざるを得ない。ホイヘンス探査機の着陸地がある夏半球低緯度の対流圏下部で観測された東風は、赤道から夏半球低緯度に向かって気温が増

加することに対応しており、地衡風平衡の証とも言える。

4. タイタン大気のスーパーローテーションの発生メカニズム

タイタン大気のスーパーローテーションの存在は疑う余地がなくなったが、どのようなメカニズムで発生または維持されているかについては、金星の場合と同様に確証された理論はない。前セクションで述べた金星との数々の違いを考慮すると、双方のスーパーローテーションのメカニズムが同じであるという保証は全くない。タイタン大気大循環モデルもいくつか発表されているが、子午面循環に比べて東西風の予報は非常にまちまちである。

驚くことに、1995年に発表された初めてのタイタン大気大循環モデル[13]は、いとも簡単にスーパーローテーションを再現した。このモデルはゼロの相対角運動量(無風状態)からスタートし、20タイタン年(600地球年)かけて成層圏の風速が徐々に増加し、最終的には120 m/sに達した。この論文ではスーパーローテーションの発生をGierasch[14]のメカニズムで説明している。それによると、地表からくみ上げられた角運動量は赤道付近でハドレー循環によって大気上層に運ばれ、そのまま高緯度に集積されて高緯度ジェットを形成する。高緯度ジェットの赤道側に発生する順圧乱流によって、高緯度の角運動量の一部が赤道に逆輸送され、全球にまたがるスーパーローテーションが維持されるというものである。タイタンの対流圏では日射が非常に弱いので、ハドレー循環そのものの存在が長い間あやふやであったが、ホイヘンスが観測した放射加熱率の高度分布[15]からすると、ハドレー循環は確かに存在しているように思われる。

しかし、Hourdin et al.[13]のモデルの結果は、他のいくつかのモデルで再現できないという問題があった[16,17]。その理由はいまだに判明していない。後者のモデルでは、Gieraschが提唱した高緯度ジェットの脇の順圧乱流が発生する以前に、そもそも角運動量をハドレー循環によって成層圏に十分にくみ上げることができないため、赤道上の強風はおろか、成層圏の高緯度ジェットさえ形成されなかった。スーパーローテーションを再現できないモデルでは、ハドレー循環がはっきり存在するかわり、気温の緯度分布は対流圏と成

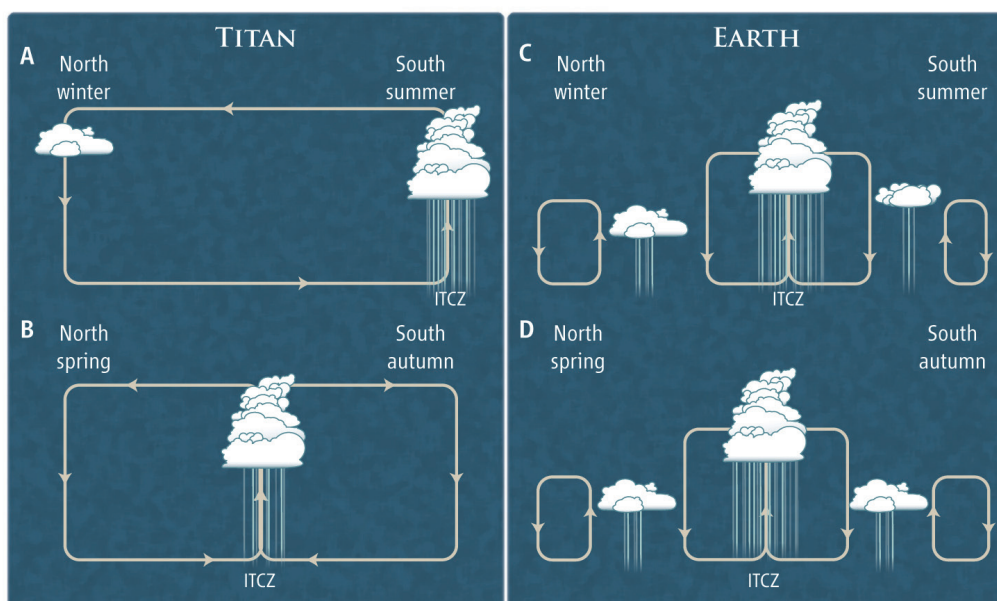


図2：タイタンと地球の平均子午面循環の比較。タイタンの熱帯収束帯は一年の大半は夏極にあり、春分と秋分にハドレー循環が逆転するときだけに、両極間を移動中に赤道を通過する。その季節に角運動量が地表から大気にくみ上げられる。図は[20]からの転載。

層圏にかかわらずどこでも均一になり、せいぜい数 m/s の西風または東風が吹くだけである。

タイタンで Gierasch メカニズムが作動しにくい理由のひとつに、自転軸傾斜がある。ハドレー循環の上昇気流によって角運動量を上層に輸送させるためには、上昇気流が、惑星・衛星のモーメントアームが長い低緯度に存在する必要がある。タイタンの自転軸傾斜角 (26.7°) は地球のそれより少し大きい程度なので、本来ならば熱帯収束帯は南北の回帰線である緯度 26.7° の間だけを行き来していてもよさそうなものだが、自転軸傾斜角があり、かつ回転の遅い天体では、ハドレー循環が回帰線よりも大分極側にまで達する。その理由は、角運動量は流体の内部で極大値を取ることはできないという Hide の定理と関係する。ハドレー循環が赤道に対して非対称になると、冬半球の低緯度で角運動量が大きくなりすぎるので、ハドレー循環がもっと夏半球の極側に達することによって夏半球の低緯度を冷やして冬半球の低緯度を温めて角運動量に課せられた制約を満たすのである。この際、自転が遅いタイタンでは、ハドレー循環はコリオリ力にあまり邪魔をされずに一気に極にまで達することができる。

タイタンの場合は、一年の大半は“熱帯”収束帯は

熱帯ではなくて夏半球の極に居座っている (図2)。これは理論だけでなく、過去数年間におけるタイタンのメタンの積乱雲の分布から立証されている。このように上昇気流が極地方にあると、必然的にタイタンのモーメントアームが短くなるので、いくら地表の東風や上昇気流が強くても、角運動量を地面から大気に伝送することはできない。自転軸傾斜角が大きくなると、ハドレー循環によって角運動量を大气上層に輸送する効率が下がることは、他の数値実験でも示唆されている [18]。タイタンの場合、ハドレー循環の上昇気流が赤道付近に滞在するのは、春分と秋分の頃のごく限られた時期で、それ以外の季節では角運動量は地面に輸送される。春分と秋分の短期間にどれだけ効率的に角運動量を地表からくみ上げて、さらに上層に輸送できるかが問題で、これについてのモデル結果はまちまちである [13,16,17,19]。

赤道スーパーローテーションの鍵を握るとされる順圧乱流は、必ずしも高緯度のジェットの脇に発生するとは限らない。Newman et al. [19] のタイタン大気大循環モデルでは、順圧乱流は時々低緯度の秋半球側で発生し、赤道を越えて春半球側に伝播してその西風を加速している。このモデルでは、以前のバージョ

ンでは水平拡散によって順圧乱流がかき消されてスーパーローテーションが再現できなかったが、水平拡散をゼロにしたところ成層圏の西風が加速され始め、69タイタン年(2000地球年)ほどかかって観測結果に似たスーパーローテーションが再現された。ただし、予報される風速はモデル解像度に強く依存するという結果も出ていて、地球や火星の大気大循環モデルに比べてタイタンの大気大循環モデルでは、シミュレーション結果が数値的な詳細に非常に敏感に反応することが判明している。

Gierasch メカニズムのほかにも、最近では赤道付近の傾圧プラネタリー波の関与も指摘されている[21]。タイタンのように衛星の半径と回転率が小さいとロスビー数が大きくなり、中緯度のロスビー波は減衰し、東西波数1の傾圧プラネタリー波が発生する。このプラネタリー波によって角運動量が赤道付近に集積され、スーパーローテーションを形成する。一度この状態が確立されると、その後はごく弱い順圧乱流さえあればスーパーローテーションを維持することができ、あまり大気を他の波動で揺さぶらないことが肝心である。しかし、実際のタイタン大気には熱潮汐[22]や重力潮汐[23]が存在することが指摘されていて、それらが鉛直伝播する可能性は大いにある。タイタンには高い山脈はないようだが、地形重力波の作用も研究する必要もあろう。さらに、メタンの対流雲が大気を揺さぶる可能性もある。これらの擾乱が成層圏力学にどのように作用するのかは、まだ十分に研究されていない。モデルの諸パラメータに左右されるほど不安定なメカニズムで長期的にスーパーローテーションを維持できるのかという疑問も残る。

スーパーローテーションの角運動量そのものは、地表からくみ上げられたものと思われている。一度平衡状態が確立されると、その後は地表における角運動量の正味の交換がなくてもスーパーローテーションを維持できることを、いくつかのモデルは示唆している[13,19]。しかし、そのためには、金星のように角運動量の交換がほとんどないほど地表風が非常に弱い[10]、もしくは角運動量の正味の交換がゼロになる必要がある。

ところが、そのどちらにも矛盾するかのような観測がある。それは、カッシーニ探査機が発見したタイタンの低緯度に広範囲に存在する砂丘である。タイタ

ンの砂丘は赤道と平行して、約3キロ間隔で東西方向に数千キロにわたって伸びている。レーダー画像をよく見ると、どの砂丘にも西から東に向かう流線形が見て取れ、地表で西風が吹いている証拠と解釈された[24]。砂丘は高緯度には存在しないが、東から西に向かう流線形になっている砂丘はひとつも報告されていない。しかし、これは気象学的には理解しがたい現象である。地球の場合は、赤道付近に吹く東風によって角運動量が地表からくみ上げられ、中緯度の西風で逆に角運動量が地表に失われ、これによって大気全体の角運動量の収支が合っている。ところが、どこでも西風が吹けば、角運動量は地面に失われっぱなしで、スーパーローテーションの維持はおろか、大気角運動量の収支を合わせることも自体が困難になるはずである。実際に、どのタイタン大気大循環モデルを見ても、赤道の地表風は東風になっている。

最近の研究[25]でようやく糸口が見つかった可能性がある。タイタンの赤道の場合、地表風は東風というよりも南北風のほうが強く、南南東もしくは北北東の風が吹いている。これは、前述の通りハドレー循環が両極間にまたがっているためであるが、春分と秋分のときにハドレー循環が逆転するときに熱帯収束帯が赤道を横切る[図2]。この際、南北方向の気圧傾度力の逆転に伴って一時的に東風がバランスを失い、西風が発生し、熱帯収束帯の通過に伴う擾乱でその西風の最大瞬間風速が強くなることが大気大循環モデルで判明した[25]。砂丘の砂の輸送は風速の三乗に比例するため、定常的な風よりも、突風の方が効果が高い。そのため、まれに起こる西風の突風によって砂丘の東向きの流線型ができたものと思われる。そうすれば、普段吹いている東よりの地表風で大気角運動量の収支を合わせることができる。

近年のタイタン大気力学の研究は、金星の場合と同様に大分混乱してきていることがわかる。理論的にスーパーローテーションを説明するだけでなく、実際の大气に存在すると思われる熱潮汐・重力潮汐・重力波などとの相互作用、対流圏下部の地衡風との関係、地表の影響など、課題は多く残る。ことに対流圏に関しては観測データが極端に少ないため、角運動量の地表における交換など、スーパーローテーションの角運動量の原因を解明することが困難である。

成層圏の風速分布は大まかに判明しているが、プラ

ネタリー波、順圧乱流、重力波、赤道波、潮汐などの存在が不確定なので、将来のタイタン探査では、風速の三次元データで大気波動を把握することが肝心である。また、大気全体の角運動量の収支を見積もるためには対流圏の風の間が不可欠で、そのためには雲の追跡だけでは不十分で、熱気球をはじめとするその場観測も必要と思われる。

5. まとめ

タイタンの成層圏上部には、金星の大気に似たスーパーローテーションと呼ばれる強風が全球に存在し、最大風速は200 m/sにも達する。ただし、風速の高度分布は金星に比べるとかなり複雑で、季節変動も激しい。成層圏の下部には、上下に強風域に挟まれた無風領域が存在する。成層圏の大気力学は、地衡風平衡が卓越する対流圏下部のそれと基本的に違う。

現存するタイタン大気大循環モデルが予報する東西風と気温の分布にはモデル間にかなりのばらつきがある。中には、成層圏の観測データと似たスーパーローテーションを再現するものもいくつかあるが、強風を維持するメカニズムについての統一した見解は今のところない。ハドレー循環と順圧乱流に着眼したGieraschメカニズムのほか、傾圧プラネタリー波の関与が提案されているが、モデルの各種のパラメータの選択次第ではスーパーローテーションは再現されていない。また、熱潮汐・土星による重力潮汐・地形波・メタンの対流雲など、大気を揺さぶるメカニズムが多々存在することが判明しているので、それらの効果がスーパーローテーションを加速または減速する可能性がある。

謝 辞

本稿はDFG(ドイツ学術振興会)の研究費によった。

参考文献

- [1] Flasar, F. M. et al., 1981, *Nature* 292, 693.
- [2] Hubbard, W. B. et al., 1993, *Astron. Astrophys.* 269, 541.
- [3] Kostiuk, T. et al., 2001, *Geophys. Res. Lett.* 28, 2361.
- [4] Bird, M. K. et al., 2005, *Nature* 438, 800.
- [5] Fulchignoni, M. et al., 2005, *Nature* 438, 785.
- [6] Karkoschka, E. et al., 2007, *Planet. Space Sci.* 55, 1896.
- [7] Achterberg, R. K. et al., 2008, *Icarus* 194, 263.
- [8] Achterberg, R. K. et al., 2008, *Icarus* 197, 549.
- [9] Turtle, E. P. et al., 2011, *Geophys. Res. Lett.* 38, L03203.
- [10] Schubert, G. et al., 1980, *J. Geophys. Res.* 85, 8007.
- [11] Achterberg, R. K. et al., 2011, *Icarus* 211, 636.
- [12] Tokano, T., 2007, *Planet. Space Sci.* 55, 1990.
- [13] Hourdin, F. et al., 1995, *Icarus* 117, 358.
- [14] Gierasch, P., 1975, *J. Atmos. Sci.* 32, 1038.
- [15] Tomasko, M. G. et al., 2008, *Planet. Space Sci.* 56, 648.
- [16] Tokano, T. et al., 1999, *Planet. Space Sci.* 47, 493.
- [17] Friedson, A. J. et al., 2009, *Planet. Space Sci.* 57, 1931.
- [18] Yamamoto, M. and Takahashi, M., 2007, *Geophys. Res. Lett.* 34, L16202.
- [19] Newman, C. E. et al., 2011, *Icarus* 213, 636.
- [20] Tokano, T., 2011, *Science* 331, 1393.
- [21] Mitchell, J. L. and Vallis, G. K., 2010, *J. Geophys. Res.* 115, E12008.
- [22] Tokano, T., 2010, *Planet. Space Sci.* 58, 814.
- [23] Tokano, T. and Neubauer, F. M., 2002, *Icarus* 158, 499.
- [24] Lorenz, R. D. and Radebaugh, J., 2009, *Geophys. Res. Lett.* 36, L03202.
- [25] Tokano, T., 2010, *Aeolian Res.* 2, 113.