

金星超回転の Toy モデル

— ギーラシ・松田メカニズムの実験室模型 —

木村 龍 治*

1. はじめに

2010年5月、金星探査船「あかつき」(PlanetC)が打ち上げられた。同年12月に金星の周回軌道に入る予定であったが、主エンジンの故障で予定の軌道に入ることができず、一時は失敗かと思われた。しかし、5年後の2015年12月、金星に再接近した際、「あかつき」の姿勢制御に使うロケットエンジンを推進力に使うという奇策によって、金星の周回軌道に入ることに成功した。その後、順調に金星の観測を続けている。「あかつき」の成果については、松田・高木(2021)の報告がある。主要なミッションは、「金星大気の超回転」のメカニズムを解明することである。

金星の自転周期は(地球時間の)243日である。地球、火星に比べて極端に長い。しかも、地球、火星と異なり、北極から見て時計回りに回転している。これは宇宙空間に対して、赤道地表面が西向きに 1.8m s^{-1} で移動していることに相当する。

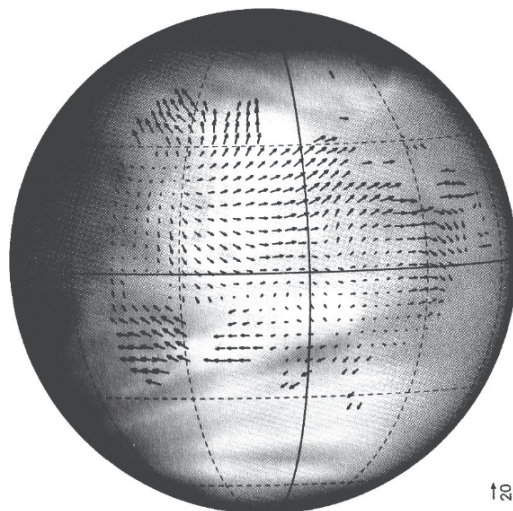
金星大気の高さ70km付近は、全球が(硫酸を成分とする)雲で覆われている。その動きから高さ70km付近は赤道で、約 100m s^{-1} の東風が吹いていることが分かっている。

第1図は、「あかつき」が観測した高さ70km付近の風の分布である。この図は、赤道で風速 100m s^{-1} に相当する西向きの剛体回転からの偏差を示している。

剛体回転とは、自転軸のまわりの回転角速度(=1秒間の回転角)が緯度・経度によらず一定であるような回転である。固体が回転するときには、あらゆる場所での回転軸まわりの角速度が一定なので、剛体回転(solid rotation または rigid rotation)という。当然の

ことながら、惑星の固体(solid)部分は、剛体回転を行う。不思議なことに金星の場合、気体である大気もほとんど剛体回転なのである。第1図は、上層大気の流れに剛体回転から20%程度の偏差があることを示している(赤道面では、やや遅く、中高緯度では、極向き成分が見られる)。大雑把に言えば、金星大気は気体であるにもかかわらず、大気がまるで固体の殻が高さ方向に幾重にも重なっていて、それぞれの殻が異なる速度で回転しているように見える。

回転角速度は、地表面では摩擦の影響で固体部分とほとんど同じである(上でも述べたように宇宙から見ると、赤道で 1.8m s^{-1} 程度)。西向きの風速(東風)は



第1図 「あかつき」が観測した、高さ70km付近の風の分布。赤道(水平軸)で風速 100m s^{-1} の剛体回転(東から西方向への回転)からの偏差を示している。右下に 20m s^{-1} の大きさを示す。堀之内(2020)より引用。

* Ryuji KIMURA, 元放送大学。
mfrk@jcom.home.ne.jp

© 2021 日本気象学会

(金星の地表面から見て)高度が増すに従って単調に増加し、高度70km付近の速度が、赤道で 100m s^{-1} 程度になる。金星大気は、上空に行くほど速い速度で自転している、といえるであろう。このように大気全体が、地表面よりも速く回転する現象を「超回転(super rotation)」という。金星大気の詳しい性質については、松田・高木 (2021)、松田 (2000)、松田・高木 (2005)、松田 (2005) を参照していただきたい。

2. 金星大気グローバルな循環の謎

大気全体が、固体の地表面より定常的に速く回転しているのは不思議である。例えば、コップに入れた水をかき混ぜて渦巻きを作ってみよう。最初は強い渦ができていたが、時間と共に渦巻きは減衰する。しばらく時間が経過した後には、(コップが静止していれば)水は静止する。コップ自身が中心軸の回りに一定の角速度で回転していれば、水も同じ角速度の剛体回転になる。これは、底面摩擦の効果である。渦巻きが減衰するメカニズムを「スピンドダウン」という(木村 1983)。

地球の場合、中緯度の対流圏上部に、強い西風(地球よりも速く自転する空気のリング)が存在する。その原因は、子午面循環にある。金星の場合も南北の温度差に起因する子午面循環が存在すると思われる。子午面循環が、金星の超回転の原因なのであろうか。

子午面循環は、赤道で上昇し、極で下降する循環であるから、北半球の対流圏上空では北向きの風になる。その風に乗って空気のリングが北上する。第2図は、空気のリングが北上する様子を模式的に示したものである。

空気のリングのもっている角運動量 ($v_{\lambda} r_E$ に比例) は保存される。ここで v_{λ} はリングの回転速度、 r_E はリングの半径である。リングが北上すると、 r_E が小さくなるので v_{λ} は大きくなる。

第3図は地球大気の大循環モデル(GCM)で、地球の自転角速度を現実の1/16にしたときの子午面循環と帯状流の分布を示したものである。

現実の地球大気の子午面循環は3細胞構造になるが、自転を十分小さくすると、(傾圧不安定が消えるので)赤道で上昇、極で下降の1細胞構造になる(第3図a)。第3図aは循環を流線関数で示しているが、気流は流線関数の小さい値を左側にみる方向に流れる。対流圏上部では、空気のリングが子午面循環に乗って北上する。それに伴ってリングの回転速度(東西流速)は増加する(第3図b)。その結果、緯度75度、高度

140hPa面付近に、 80m s^{-1} 以上の西風が吹いている。因みに、現実の地球大気でも、亜熱帯ジェット気流の成因は、このような現象と考えられている。特定の緯度帯の空気は、子午面循環によって、超回転になる。しかし、このようなメカニズムでは、惑星全体の空気が超回転にならない。

金星大気の不思議は、惑星全体の空気が、剛体回転を維持している点である。Horinouchi *et al.*(2020)は、金星大気の不思議を以下の2つに分けて考察することを試みた。

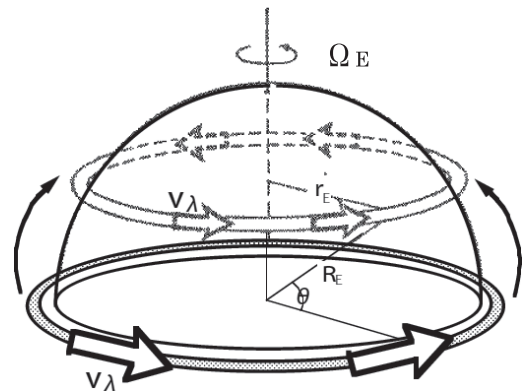
①超回転のメカニズムは何か

②超回転を定常状態で持続するメカニズムは何か

Horinouchi *et al.*(2020)は②の問題を扱った。すなわち、なぜこのような回転が維持されているのか、角運動量保存則の点から考察した。彼らは「あかつき」の観測データから、熱潮汐波に伴う水平の東西流と南北流の相関により運動量が赤道方向に輸送され、子午面循環の上部の極向き流れによる運動量の極向き輸送を打ち消して剛体回転を維持するという仮説を提案した。しかし、最大の不思議は①である。

①に関して、Gierasch (1975)は、金星の上層大気に無限大の拡散がある(=上層大気全体が剛体回転を行う)という仮定のもとに、超回転が生じる仮説を提案した。Matsuda (1980, 1982)は、Gierasch (1975)をより現実に近い条件に緩和して同じ問題を考察した。それ故、ここでは彼らの理論を「ギーラシ・松田メカニズム」と呼ぶ。

ギーラシ・松田メカニズムの核心は、剛体回転に近



第2図 地球を取り巻く空気のリングが、子午面循環によって、北上する様子。 R_E : 地球の半径、 r_E : リングの半径、 θ : 緯度、 Ω_E : 地球の自転角速度、 v_{λ} : 帯状流の速度。

い帯状流と子午面循環である。その2つの条件は、実験室内で模擬することができる。そこで、実験室内に剛体回転と子午面循環を再現して、超回転が生じるかどうか調べた。

3. ギーラシ・松田メカニズムの実験室モデル

地球大気の大気大循環を固体の回転で置き換えることは意味がないが、剛体回転に近い回転をしている金星の上層大気を固体球殻に置き換えることは許されるであろう。そこで、上層の金星大気を固体の球殻で置き換えてみる。金星の地表面と固体球殻の間に子午面循環が存在する。子午面循環の気流が持っている運動量は、固体と接触する部分で固体（地表面または上層大気の球殻）に受け渡されると考える（第4図）。

第4図の概念図と、同じ機能をもつ実験装置の概念図を第5図に示す。一定の回転数で回転する円筒形の水槽を金星と見立てる。円筒容器の上部には半球のフタが固定され、円筒容器と同じ回転運動を行う。半球と円筒容器の間には、円錐形の固体の板が挿入されて

いる。この板は、理想としては空中に浮いているのがよい。

さて、円筒容器の水中に水中ポンプを置き、円筒容器の水を吸い上げて半球の真上に落とす。この水が子午面循環の役割を果たす。半球の中央に落ちた水は、金星の極の地表面に降下した金星の大気に対応する。水は半球の表面（＝金星の地表面）に沿って赤道まで進み、そこから落下して円錐（＝金星の上層大気）の縁（＝金星の赤道に対応）に落ちる。縁に落ちた水は重力の作用で円錐の中心に向かい、円錐の中心（＝極）から落ちて水槽に戻る。

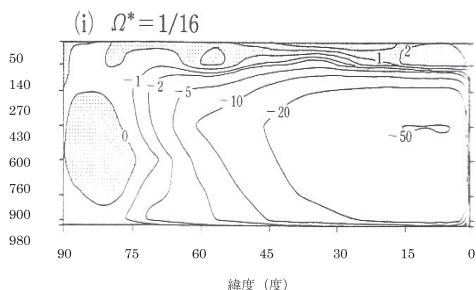
ギーラシ・松田メカニズムが成り立てば、円錐が水槽よりも速く回転するはずである。もしも円錐から角運動量が逃げなければ、いくらでも加速される。

4. 実験装置の実現化

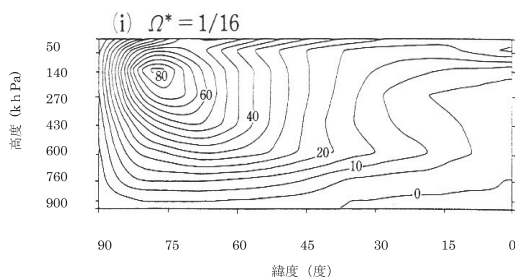
第5図は、単純な構造ではあるが、いざ、実際に作成しようとする、以下のような問題が生じる。

- ①円錐を空中に浮かすことは技術的に不可能である
- ②水中ポンプを動作させるためには、100Vのコンセントに接続する必要があるが、コンセントを回転台に乗せることはできない。すなわち、水中ポンプを回転させることはできない

次善の策として、円錐を水面に浮かべること考えた。円錐の下面に円筒形の側面を付け、水に浮かべる（第6図）。側面と円錐の間に空気が密閉されるため、円錐はほとんど水に接触することなく水に浮かぶ（実は、これだけでは円錐は安定に水が浮かぶことはできない。円錐を水平に保つためには、もう一段、工夫が

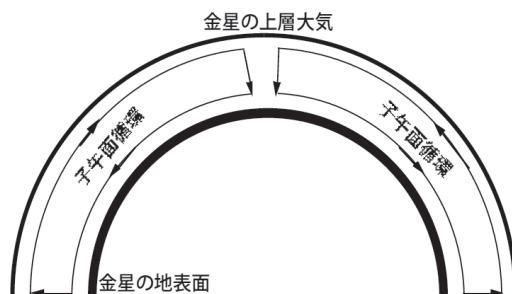


(a) 子午面循環：東西平均の流線関数。単位は $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$ 。



(b) 帯状流：東西平均の東西方法の風速。単位は m s^{-1} 。

第3図 地球大気の大循環モデル (GCM) で、自転速度 Ω^* を現実の $1/16$ にしたときの子午面循環と帯状流。(松田 (2000) の図2.8, 図2.9の一部を引用。原図は Williams (1988))。 (a) 子午面循環：東西平均の流線関数。単位は $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$ 。 (b) 帯状流：東西平均の東西方法の風速。単位は m s^{-1} 。



第4図 金星の子午面循環と地表面、上層大気との関係。地表面は固体、金星の上層大気は、固体の球殻と考える。その間を子午面循環が繋ぐ。子午面循環が固体表面に接触している部分は、固体と同じ剛体回転を行う。

必要であるが、これについては付録を参照していただきたい).

水中ポンプを静止系に固定して第5図と同じ効果を出すために、第5図の構造を変更して第6図のようにする。回転容器の底に穴をあけ、そこからもう一つの円筒容器(回転していない)に水を落とすのである。この場合、回転台は水中に固定することになる。そこで、回転台の駆動を工夫する必要がある。結果として、実現した実験装置の構造と写真を第7図に示す。

第7図の構造図で、ネオジウム磁石が円錐浮きの下面と回転容器の底に固定してあるが、これは円錐浮きを常に回転容器の中心部に固定するための工夫である。従って、水深はネオジウム磁石が磁力を感じる程度の深さにしておく必要がある(水深11cm)。これより浅いと浮力よりも磁力が強くなり、2つの磁石は、引き合っ、て、接触してしまう。これより水深が深ければ、磁力の作用が小さく、円錐浮きを回転容器の中心に固定することはできない。

回転容器の底には穴が開いているので、定常状態の水深は、回転容器に供給される水のフラックス(=単位時間の水の供給量、1分間に2L)と穴の大きさの兼ね合いで決まる。水のフラックスは水中ポンプの仕様で決まるので、穴の大きさを調整して水深が11cmになるように設定した。

この実験装置は回転容器の底に穴があいているため、水の供給なしに一定の深さの水を容器に溜めておくことができない。ポンプを駆動している間のみ、回転容器に水深11cmが維持できる。

第7図の写真で、半球の極にある白い帯はガーゼである。子午面循環のモデルである水を半球の極に供給

する場合、水が跳ねないようにするためである。

5. 超回転の測定

求めたいデータは、回転容器の回転数(又は角速度)と、回転容器に相対的な円錐浮きの回転数(または角速度)である。このために、回転容器に小型のビデオカメラを固定した(第7図の実験装置の写真で、半球の左上にある黒い点のようなもの)。回転容器の回転数の測定のために、回転容器の縁に静止系に固定したレーザーポインターの光を当てた。回転容器に当てた光のスポットは、静止系の位置を表す。回転容器の縁につけた印が光のスポットを通過して、次に通過するまでの時間から回転容器の回転数(±1秒の精度で回転容器の周期を測定することができる)。

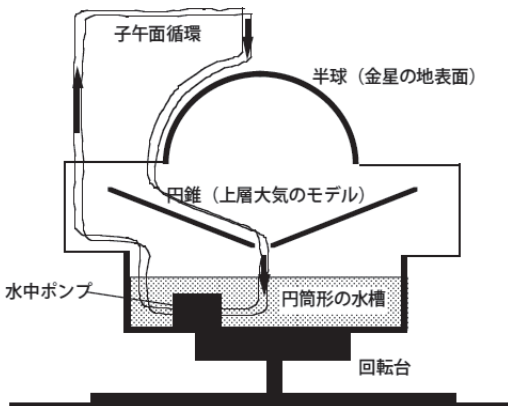
一方、円錐浮きの縁につけた印が回転容器の縁につけた印を通過する時刻から、回転容器に相対的な円錐浮きの回転数を測定することができる。

時刻の測定は、ビデオの画面に記録される時刻データによった。ビデオの画面は1秒間に30枚撮影されるが、残念ながら時刻データは秒の単位で記録されている。そのため、時刻の分解能は1秒である。

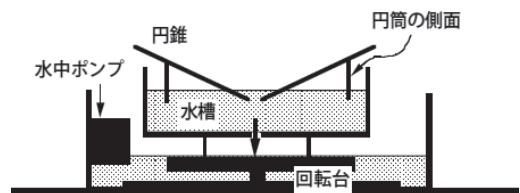
円錐浮きは12分割されているので、ビデオ画面から1周の1/12の角度が移動する時間 Δt が分かる。その時間を12倍すれば1周期になる。角速度は、

$$\omega = 2\pi / (12 \times \Delta t) \quad (1)$$

である。 Δt は1秒の分解能なので、角速度がもっとも速い場合は $\Delta t = 1$ 秒である。ほとんど同じ速度でも、 $\Delta t = 1$ 秒の次は $\Delta t = 2$ 秒になるので、角速度は2倍異なることになる。そのため、測定された角速度は、速度が速い場合にはとびとびの値になってしまう。その傾向は、(角速度の速い)スピナップ時に、顕著にみられる(第8図参照)。しかし、超回転における角速度は遅いので、その誤差はめだたなくなる。



第5図 第4図の概念図を模した実験装置。



第6図 円錐と水中ポンプの配置。

6. スピニアップ過程

実験の手順は以下の通りである。

初めに、回転容器も、回転容器内に浮かんでいる円錐浮きも、静止させておく。子午面循環は駆動させ、水深11cmを維持する。 $t=0$ で突然回転容器を、設定した回転数で反時計回りに回転させる。回転容器が回転を始めると、回転容器内の水も、水に浮かんだ円錐浮きも静止している。回転系から見ると（＝回転容器に相対的にみると）、円錐浮きは突然設定した回転数で、時計まわりに回転を始める。時間と共に、回転容器内の水は回転を始め、それに応じて円錐浮きも回転するので、回転系からみた円錐浮きの角速度は減速する。もしも子午面循環がなければ、（仮に、水深11cmが維持されるとして）円錐浮きは、（スピニアップ完了時に）角速度0で定常状態になるだろう。もしも超回転が実現されるのであれば、角速度は0を過ぎて反時計回りに加速され、超回転の最大値まで加速した後、その状態で定常状態になるはずである。回転系に相対的な円錐浮きの角速度は、回転台に固定したビ

デオカメラの映像から測定できる。

超回転が半球の存在によってもたらされることを確認するために、同じ条件で半球がない場合とある場合の比較を行った。半球がない場合には、子午面循環に相当する水は円錐の中心に落ちるが、半球がある場合は、半球経由で円錐の縁に落ちる。結果を第8図に示す。

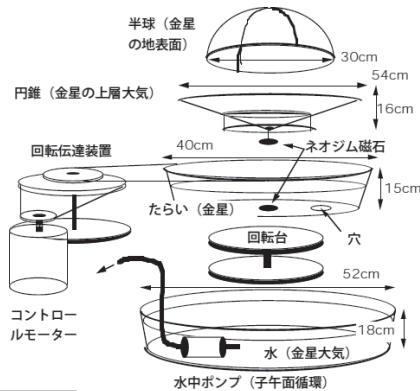
容器の回転角速度 Ω は 0.434 rad s^{-1} である。時計回りの回転角速度は負である。なお、このグラフでは、1/12周期ごとの角速度 (rad s^{-1}) で示した。時間分解能が1秒間なので、角速度が速いときは精度が悪い。

予想した通り、半球がある場合は円錐は回転容器よりも速く回転する。回転容器に相対的な角速度 (ω) と、回転容器の角速度 (Ω) の比 (ω/Ω) を、超回転率と定義する。この実験の場合、定常状態の円錐浮きの角速度は 0.15 rad s^{-1} なので、超回転率は、

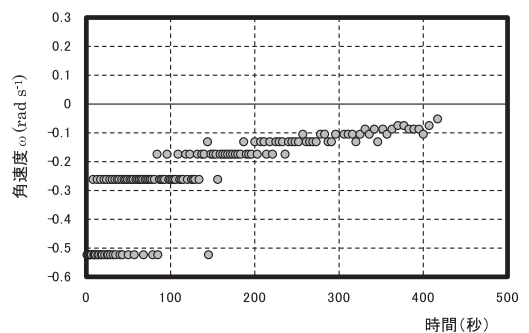
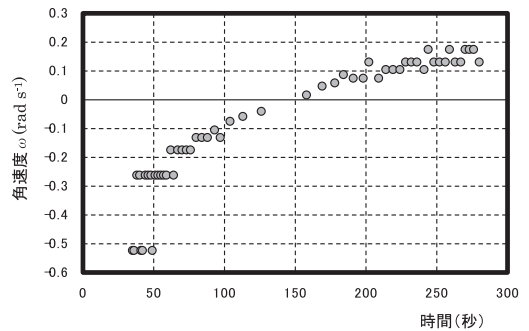
$$\omega/\Omega = 0.15/0.434 = 0.35 \quad (2)$$

である。

なお正確にいうと、半球がない場合、十分時間が経



第7図 実験装置. 上: 構造図. 下: 横からみた実験装置.



第8図 スピニアップ過程の円錐浮きの角速度の時間変化. 上図: 半球がある場合, 下図: 半球がない場合.

過しても角速度は0にならない。回転容器の回転よりも、多少遅い回転を維持する。その理由は、円錐浮きの上面にかかる空気摩擦の効果である。空気は回転していないので、常に、円錐浮きの速度を遅くするような摩擦効果が働く。半球が存在する場合でも、超回転にはこの分の空気摩擦がブレーキをかけているので、真空中で実験を行えば、超回転率は測定した値より大きくなることが予想される。

7. 超回転と回転容器の回転数との関係

超回転率は、回転容器の回転数によって変化する。そこで容器の回転数と、超回転の程度について調べた。結果を第9図に示す。容器に相対的な円錐浮きの回転角速度 (ω) は、容器の回転 (角速度: Ω) と共に増加する。第10図は超回転率と容器の回転との関係を示したものである。超回転率は、容器の回転が遅いほど大きくなる事が分かる。

8. 円錐浮きが回転するメカニズムについての考察

半球の極に与えられた水は、半球の表面に沿って半球の縁まで落ちる。半球の縁には、スポンジの帯が取り巻いているので、水は (半球と共に回転する) スポンジに吸収され、そこから (軒下から滴り落ちる雨粒のように) 円錐浮きの縁に落ちる。回転容器に乗ってみると、水は (半球は回転容器と共に回転しているので) 半球の縁から真下に落下する。それにもかかわらず、円錐浮きは半球よりも速く回転する。それはなぜか。

半球は回転しているので、落下する水は半球から角運動量を与えられる。子午面循環に当たる水の流量を Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) としよう。半球の縁から落下する単位質量の水に与えられる角運動量は、 ΩR^2 である。ここでの

R (m) は半球の半径、 Ω は半球の角速度である。水の密度を ρ (kg m^{-3}) とすれば、単位時間に落下する角運動量は $\rho Q \Omega R^2$ である。

円錐浮きに落下した水は、円錐浮きの中心から落下する。円錐浮きの (静止系に対する) 角速度を ω_0 、穴の半径を r とすれば、円錐浮きから落下する角運動量は、時間当たり $\rho Q \omega_0 r^2$ である。定常状態では、1秒間に円錐浮きに入る角運動量と出る角運動量は等しいから、

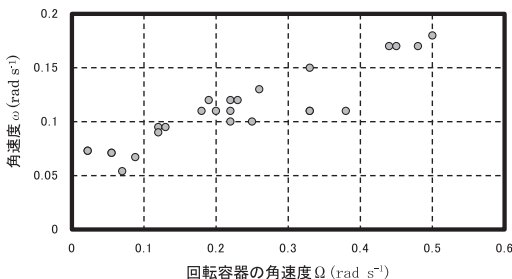
$$\rho Q \Omega R^2 = \rho Q \omega_0 r^2 \tag{3}$$

が成り立つ。故に、

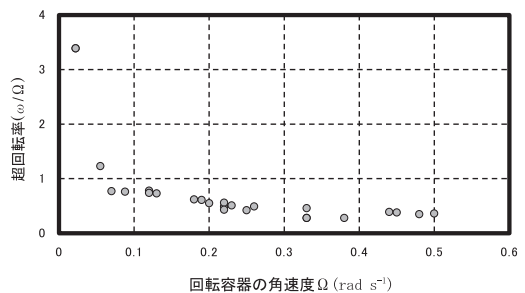
$$\omega_0 / \Omega = (R/r)^2 \tag{4}$$

を得る。この実験の場合、 $R=0.15\text{m}$ 、 $r=0.01\text{m}$ である。その場合、 $\omega_0/\Omega = 225$ を得る。超回転率にすれば、 $\omega = \omega_0 - \Omega$ なので224である。しかし、実際の超回転率は (この実験装置では) 高々2倍である。かなり小さい。その理由は、円錐浮きが空中に浮いていないためである。回転容器内の水に接触するので、角運動量が円錐浮きから下側の水に逃げていくと考えられる。

超回転率を大きくするためには、円錐浮きと水との間の摩擦抵抗をできるだけ小さくすることが必要である。鉛直壁と円錐浮きの間に空気を閉じ込めて、円錐浮きをできるだけ水と接触させないようにするのは、そのための工夫である。しかし、実はこの工夫はあまり成功していない。なぜなら鉛直壁だけでは、円錐浮きは安定に水に浮かぶことができないからである。円錐浮きの重心は水面より高い位置にあるので、円錐浮きは傾いてしまう。これを避けるために、付録に示したような五角形の内壁を鉛直壁に取り付けてある。しかしその結果、内壁と水の接触面積が大きくなり、さ



第9図 回転容器の角速度 Ω (横軸) と、回転容器に相対的な円錐浮きの角速度 ω (縦軸) との関係。

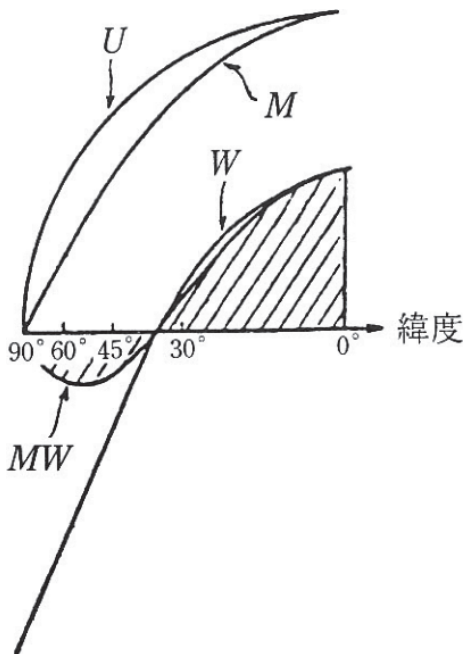


第10図 超回転率 (ω/Ω) (縦軸) と回転容器の角速度 (Ω) (横軸) との関係。

らに外壁と内壁に挟まれた空間内の水が強制的に動かされることになり抵抗が増す。形状が複雑であるために、抵抗の大きさを理論的に見積もることは非常に難しい。理論的に抵抗を見積もるためには、円錐浮きの構造を単純化することが必要である。

第11図は、ギーラシ・松田メカニズムの説明図である。松田(2000)の図3.14を引用した。この図の横軸は、金星の緯度を表している。緯度 30° が中央にくるように描かれている。それは、球の表面積が半分だからである。横軸は、金星の表面積に比例するようにプロットされているのである。 U は、東西流(空気のリングが回転する周速度)の緯度分布である。剛体回転なので、 $R \cos\theta$ に比例する(第2図参照)。 M はリングの角運動量である。 W は子午面に伴う鉛直流(子午面の質量フラックス)で、低緯度で上昇流、高緯度で下降流である。上向きと下向きがバランスする(緯度と W で作られる面積が等しくなる)ように描かれている。

MW は、角運動量フラックス(=角運動量の鉛直方向の輸送量)である。低緯度では上空に運ばれ、高緯度では下方に運ばれる。 M を剛体回転の分布とすると



第11図 ギーラシ・松田メカニズムの図解。横軸は緯度。 U :東西流速, M :空気のリングの角運動量, W :鉛直流, MW :角運動の鉛直フラックス(流束)(松田(2000)の図3.14の引用)。

き、合計すると上空に運ばれる角運動量のほうが大きい。その結果、上空に角運動量が蓄積する。その結果、大気上層が超回転になる。蓄積されるばかりでは、超回転はますます加速するが、一方で超回転が大きくなると、摩擦で固体惑星に返される分(=下向きの角運動量輸送)が増加する。子午面循環による上向きの角運動量輸送と摩擦効果で、下向きに輸送される角運動量輸送の大きさが等しくなったところで定常状態になる。この図には角運動量が摩擦で逃げていく分が描かれていないので、上向き角運動量フラックスは下向き角運動量フラックスとバランスしていない。

この説明は、円錐浮きが超回転する説明と同じである。すなわち、円錐浮きはギーラシ・松田メカニズムのトイモデルになっていることを示している。

9. 容器の回転が非常に遅い場合の超回転

容器が回転しなければ、円錐浮きに角運動量は供給されないから、円錐浮きは回転しないはずである。それを確認するために、容器を回転させずに半球を置いた状態で子午面循環を持続させ、円錐浮きの回転の様子を調べた。その結果を第12図に示す。意外なことに、容器が回転していなくても、円錐浮きは回転する。回転の向きは時計回りである。

第12図を見ると、定常状態の回転は、1回転ごとに微妙に加速・減速を繰り返している。このことから推測すると、この振動は円錐の歪みが原因になっていると思われる。すなわち、円錐の縁から中心に向かう水流が、円錐の底面の歪みのために進行方向を右に曲げられているのである。その反作用で、円錐は中心に向かう水流からトルクを与えられて、時計回りに回転する。一方、水流には、円錐の回転と逆向きの角運動量を与えられる。円錐の歪みが軸対称でないために、1回転(=データ12個)ごとに、加速・減速が生じると考えられる。

もしも、実験で得られた超回転が、すべて円錐浮きの歪みに原因があるとなれば、この実験は、ギーラシ・松田メカニズムのモデルとはいえない。幸いなことに歪みによる影響は、第12図に示された程度である。歪みの影響と考えられる回転の角速度は、定常状態で、 0.06 rad s^{-1} 程度である。一方、実験で得られた超回転は、第9図に示したように、(容器の回転速度が、十分大きければ) 0.1 rad s^{-1} を超える。しかも、超回転率は、回転容器の回転数によって変化する。これらの事実は、実験結果で円錐浮きの歪みの影響が支配的で

ないことを意味する。

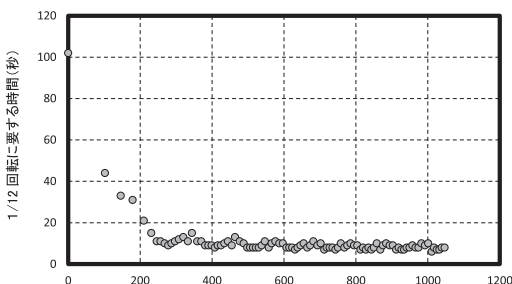
第12図の状態を維持したまま、容器をごく微小に反時計まわりに回転させた。すると、円錐浮きの時計まわりの回転はゆっくりと減衰し、回転容器に対して停止した状態になった。このとき、円錐浮きの歪みによる時計まわりの回転と、超回転による反時計まわりの回転が、バランスしていると考えられる。そのときの容器の回転角速度は、 $\Omega = 0.062 \text{ rad s}^{-1}$ であった。一方、第12図の円錐浮きの（定常状態の）平均角速度は $\omega = 0.059 \text{ rad s}^{-1}$ である。この角速度と超回転による角速度が等しいので、超回転率： $\omega/\Omega = 0.95$ である。もしも円錐浮きの歪みがなく、容器が静止したときに円錐浮きも静止するのであれば、容器の回転が 0.062 rad s^{-1} のとき、容器の回転の0.95倍の角速度で、円錐浮きが回転すると推測される。

すなわち、容器の角速度を Ω 、観測された円錐浮きの角速度を ω 、歪による回転角速度を ω_1 とすると、修正された超回転率は、 $(\omega - \omega_1)/\Omega$ と書けるだろう。実験によれば、 $\Omega = 0.062 \text{ rad s}^{-1}$ における超回転率は、 $\omega (= 0.059 \text{ rad s}^{-1})$ と $\omega_1 (= 0.059 \text{ rad s}^{-1})$ が等しいので0になる。すなわち超回転率は、 $\Omega = 0.062 \text{ rad s}^{-1}$ を起点にして、定義されることになる。それ以下の Ω は、ノイズに埋もれて意味をもたない解釈したい。すなわちこの実験では、 $\Omega = 0.062 \text{ rad s}^{-1}$ が Ω の誤差限界といえる。

10. 結論

室内実験の結果は、以下のようにまとめられる。

- ①子午面循環の作用で回転容器に浮かべた円錐浮きが、回転容器よりも速く回転する現象が観察され



円錐浮きを静止状態でセットした状態からの時間(秒)

第12図 回転容器が回転していない場合の円錐浮きの回転（時計まわり）。縦軸は、1/12回転に要する時間（秒）。横軸は、円錐浮きを静止状態でセットした状態からの時間（秒）。

た。すなわち、循環する水の運動を含めて、回転系のあらゆる部分よりも、水面に浮かべた円錐浮きが速く回転する。その原理は、ギーラシ・松田メカニズムの実験的な再現と考えられる。

- ②回転容器に対する円錐浮きの回転角速度 ω と、回転容器の角速度 Ω の比（ $=\omega/\Omega$ ）は、 Ω が小さくなるほど大きくなる。
- ③回転容器が回転していなくても、水面に浮かべた円錐浮きが、微小に回転する現象が観察された。原因は、円錐浮きの形状が完全に軸対称になっていないためと考えられる。

11. おわりに

回転容器に浮かべた円錐浮きが、容器よりも速く回転する様子は、まるでマジックをみているような印象を与えた。回転の原動力は、半球から雨のようにしたり落ちる水であるが、水は半球の回転（＝容器の回転）と同じでほとんど真下に落ちる。落下する水滴よりも円錐浮きは速く回転する。

このような現象を再現することは、ギーラシ・松田メカニズムの導きがなければ決して思い浮かばなかったであろう。その意味でこの実験は、ギーラシ・松田メカニズムの理解に役立つのではないだろうか。

意外なことに回転容器が回転していなくても、子午面循環を与えると、水面に浮かべた円錐浮きはごくゆっくり回転した。この現象は、円錐浮きの形状によると考えられる。同じようなことは、実際の金星に生じることはないだろうか。実験における円錐浮きは、金星の上昇大気モデルであるが、子午面循環と剛体回転との角運動量の交換は、金星の地表面でも生じている。金星の地表面を極から赤道に向かう気流が、金星の地形によって曲げられる可能性である。気流は地形にトルクを与え、その反作用で気流は角運動量を獲得する。その角運動量が気流上層に蓄積されて、金星上層大気の超回転をもたらす可能性である。この実験は、地球流体力学の問題として扱うことができる。すなわち回転流体に子午面循環を導入して、回転流体上に浮かべた物体の回転速度を求める問題である。本稿で扱った実験系は、円錐浮きの形状が複雑で理論で扱いにくい。それは水との摩擦を少なくすることを優先したためであるが、定量的な議論をするためには、円錐浮きの構造を理想化することが必要である。理論の構築によって、超回転率（ ω/Ω ）の Ω 依存性が解明されることを期待したい。

謝 辞

私が金星超回転に興味をもったのは、松田佳久氏（東京学芸大学名誉教授）の影響である。本稿の草稿に対しても、松田氏から貴重なコメントをいただいた。

森 厚氏（桜美林大学）は、草稿をチェックしていただいたのみならず、読みやすくするためのヒントをいろいろいただいた。また、第9図、第10図は、チェックのために森氏が再計算された図を使用した。

編集委員長の青柳暁典氏と編集担当の萩野谷成徳氏には、細部にわたる原稿のチェックだけでなく、論理的でない表現を指摘していただき、改稿を助けていただいた。

上記の方々のご協力を深く感謝いたします。

参 考 文 献

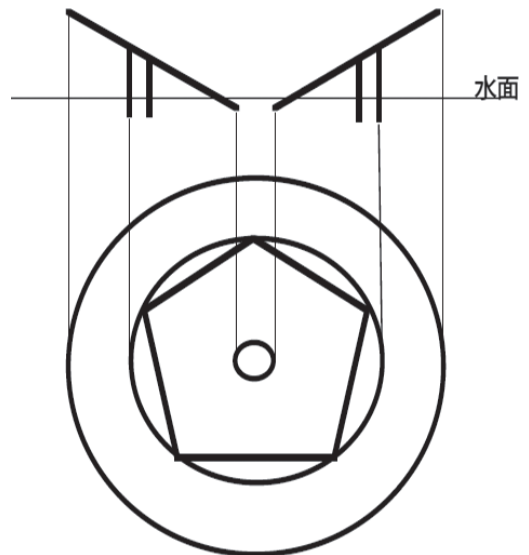
- Gierasch, P. J., 1975: Meridional circulation and maintenance of the Venus atmosphere rotation. *J. Atmos. Sci.*, 32, 1038-1044.
- Horinouchi *et al.*, 2020: How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere. *Science*, 368, 405-409.
- 堀之内 武, 2020: 迫れ, あかつきの星! (1) ~超回転機構の定量~. *ISAS ニュース*, (474), 1-3.
- 木村竜治, 1983: 地球流体力学入門. 東京堂出版, 247pp.
- Matsuda, Y., 1980: Dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 58, 443-470.
- Matsuda, Y., 1982: A further study of dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 245-254.
- 松田佳久, 2000: 惑星気象学. 東京大学出版会, 204pp.
- 松田佳久, 2005: 金星大気のスーパー・ローテーション. *天気*, 52, 337-345.
- 松田佳久, 高木征弘, 2005: 金星のスーパー・ローテーション. *天文月報*, 98, 14-21.
- 松田佳久, 高木征弘, 2021: 金星気象学の回顧と展望. *天気*, 68, 67-83.

Williams, G. P., 1988: The dynamical range of global circulations—I. *Clim. Dyn.*, 2, 205-260.

付録：円錐浮きの構造

円錐浮きは、底面に固定した円筒状の壁と、円錐の間に閉じ込められた空気によって、円錐の底面のほとんどの部分が水に接触しないで、水面に浮かんでいられる。しかし、円筒の壁をつけただけでは、不安定で、水平の姿勢を保つことができない。

円錐の姿勢を安定化させるために、第A図に示したように、円筒形の壁に五角形の内壁を内接させた。それによって、円筒に沿って浮きをつけることになり、姿勢が安定する。



第A図 上：側面図。下：下からみた図。円筒に内接する五角形の壁をつける。円筒と五角形の間に挟まれた空間の空気が浮力源となって、円錐浮きの姿勢を水平に保つことができる。