

4. 地球の気象, 惑星の気象, 実験室の気象

北海道大学地球環境科学研究所 堀之内 武

1. はじめに

ふだん私たちは地球のほんの一部しか、この眼にすることはできません。たとえば、我々のすむ中緯度帯の高気圧、低気圧も、その通過の結果として生ずる局地的な天候や風、気温の変化を体験するのみです。ところで、大気は水と同じ流体です。多くの「気象」現象が、スケールを変え流体の種類を水に変えて、水槽の中で再現することができます。高気圧、低気圧も水槽の中に作れます。こうして室内実験で「気象現象」をみるのは、大変面白いだけでなく、条件が変わるとどう変わるか簡単に実験できたり、どこまで単純化しても現象が再現するかということから、気象現象のエッセンスをみせてくれるものでもあります。

生命の存在が知られている惑星は地球だけですが、大気はほとんどの惑星にあります。従って、惑星にはそれぞれの「気象」があります。地球大気の気象と同じような現象がちょっと違った形で現れたり、まったく違った現象が現れたりします。惑星の気象をすることで、地球の気象がより広い視点で理解できます。(そうでなくても、気象をみる楽しみが増えます。)

本講演では、地球、惑星、そして実験室の水槽にあらわれる「気象」を紹介します。意外に広い気象の普遍性をお楽しみ頂ければ幸いです。あわせて、現在進行中の日本発の金星大気探査計画も簡単に紹介します。室内実験の資料は、「地球流体基礎実験集：実験室の中の空と海」(文献1; URL: http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_j/index0.htm) からとりました。

2. 高低気圧

低気圧には降水がともないます。しかし、中緯度の高低気圧システムの存在には、降水は不可欠ではありません。例えば、降水のない火星にもあります。高低気圧システムが存在するために必要な条件は、地球(や火星など高低気圧システムを持つ惑星)が回転していることと、南北の温度差が存在することです。このことは室内実験で示すことができます。

室内実験では、ドーナツ型の水槽に水を満たし、回転台に載せます。そして、温水で外壁を暖め、冷水で内壁を冷やします(図1)。これで、外側は赤道側、内壁は極側を模すのです。全体を回転させることでコリオリ力が働くようにしますが、水槽を球状にする必要はありません。図2は、その結果です。ドーナツ状の水槽の底に、温度で色が変わる液晶シートをして温度を可視化しています。暖色系が低温、寒色系が高温を表わします(直感と逆です!)

もしも回転がなければ、外壁を暖め内壁を冷やせば、外壁付近で上昇し、内壁付近で下降する対流が発生します。ところが、台が回転している場合、すなわちコリオリ力が働く場合、内側のほうが冷たい状態を保って対流しないという平衡(釣り合い)状態が可能になります(図2の左上)。これはいわば、北半球全体がひとつの低気圧になることに相当し、いつでもどの経度でも一定の「西風」(東向きの風)が吹く状態に相当します。ところが、この平衡状態は、温度差と回転数(回転の速さ)の組み合わせによっては不安定になります。図2より、回転数が上がると、波状のパターンが生じることがわかります。波状のパターンが生じるのは、高低気圧システムができるからです。高低気圧に伴う渦により、「極側」(水槽の内側)から「寒気」(赤で示した部分)が、「赤道側」(水槽の外側)から暖気(青)が伸びています。この不安定を専門用語では「傾圧不安定」と呼びます。そして、高低気圧は、しばしば「傾圧不安定波」と呼ばれます。

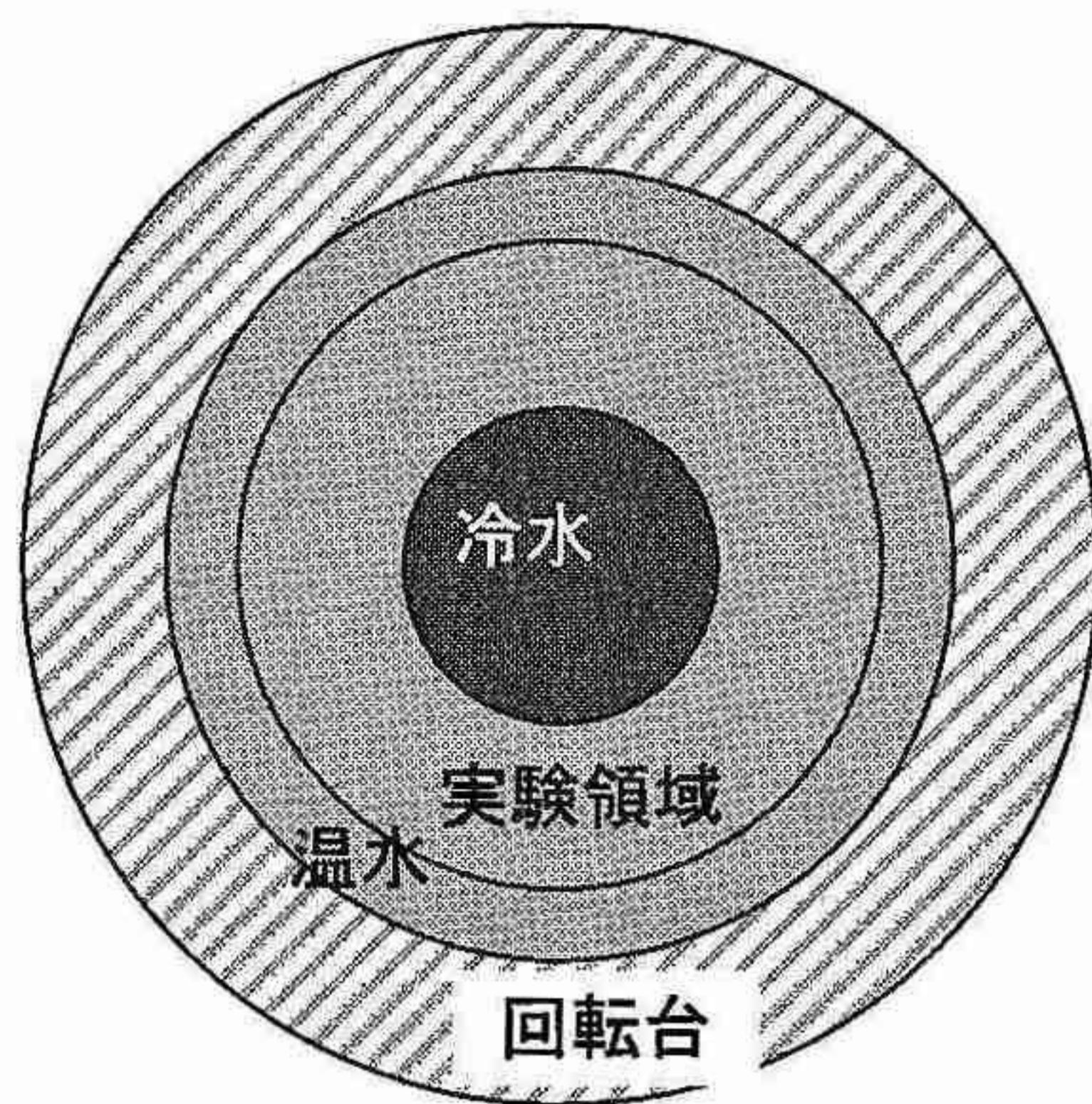


図 1 高低気圧実験装置. 回転台においたドーナツ型水槽(図の「実験領域」)を水で満たし, 内側を冷水で冷却, 外側を温水で加熱する.

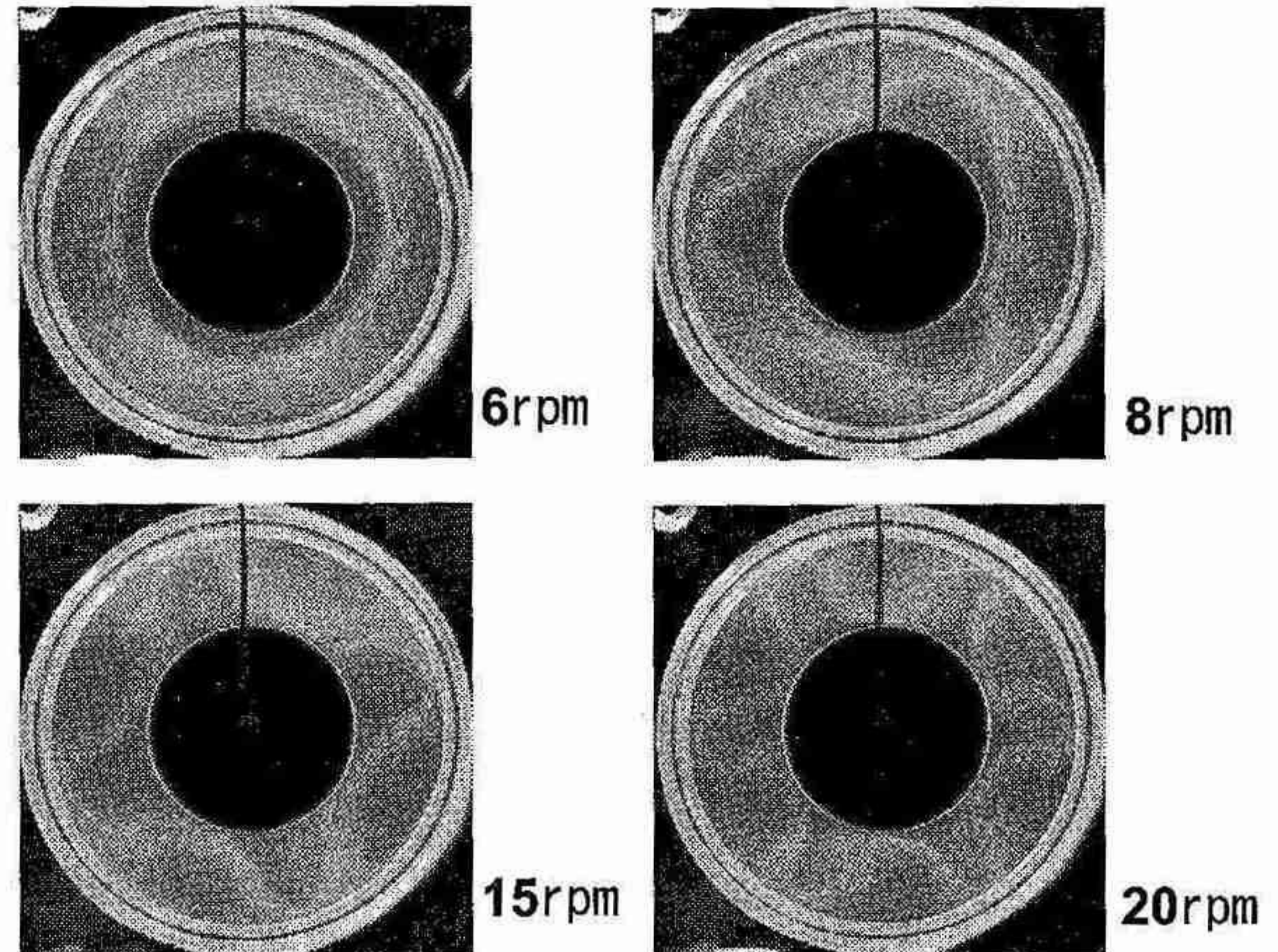


図 2 実験結果(文献 1 より) 温度差一定で回転数を 6, 8, 15, 20 rpm に上げた場合の水温分布のスナップショット(液晶シートで可視化).

図 2 でわかるように, 回転が速くなると「波」の山谷の個数が増えること, つまり波長が短くなるのがわかります. また, 条件を変えると, 「波数」(経度にそった山谷の個数) が時間的に一定の状態から, 個数が時間的に変動する状態を経て, 不規則に発生しては消えていく状態になります. こうなると, 生成消滅のある地球大気の高気圧システムに似てきます.

火星の高気圧では, 波数 2, すなわち経度にそって高気圧が 2 個ずつになるケースが多いと考えられています. これは, 単純に火星のほうが地球より小さい(直径は約 1/2 です) ことによるのではなく, 大きさに加え, 温度差と回転数の 2 つの指標によって決まることです.

さて, 高気圧の「役割」は何でしょう. それは低緯度から高緯度へ熱を運ぶことです. 前述の, 波のない平衡状態では, 低緯度が暖かく高緯度が冷たい状態でも鉛直・南北に流れが生じない, いわば, 対流を押さえ込んだ状態です. それに対し, 高気圧は南北に大気(水槽では水)を運びます. つまり対流の役割を果たしています. このことは一見わかりにくいのですが, 実際に高気圧中での流体の動きを, 南北-鉛直断面に投影してみると, 低緯度(外)側で上昇して上層を高緯度向きに移動し, 高緯度(内)側で下降して下層を低緯度に戻るよう動きまわります.

3. 平均東西風

地球大気においては, 対流圏の風系は中高緯度で偏西風が卓越し, 低緯度では偏東風が卓越することは良く知られています. これは, 前述のように地球の回転と南北の温度差(あるいは入射エネルギーの緯度分布に伴う低緯度高緯度間の循環)で基本的には説明できます. 地球に限らず, 多くの惑星では, 平均すると低緯度のほうが高緯度より強く太陽放射が入射します. しかし, 結果として生ずる東西風の分布は, 地球大気の場合とは似つかない場合もあります.

地球と大きく違う典型例は, 金星の大気です. 金星大気は地表面の温度(及びその付近の気温)が 400°C 以上もの高温になることが広く知られています. その金星大気の風系は, 図 3 のように上空ほど強い東風(西向きの風)になっています. 金星は自転の向きが地球と逆ですので, 地球で言えば西風にあたり, 自転を追い越す方向に風が吹いています. 地球と違って, 貿易風に相当する風はみつかりません. 金星は自転が非常にゆっくりなため, 上空の風は金星の自転にとりまわりの速度に比べて, 100 倍近い速度になっています. このような現象は, 金星だけに限りません. 土星の衛星タイタンでも同じように風が吹いています. また, 固体表面がない外惑星でも, 緯度分布の仕方は異なるものの木星や土星では自転を追い越す風が吹いています.

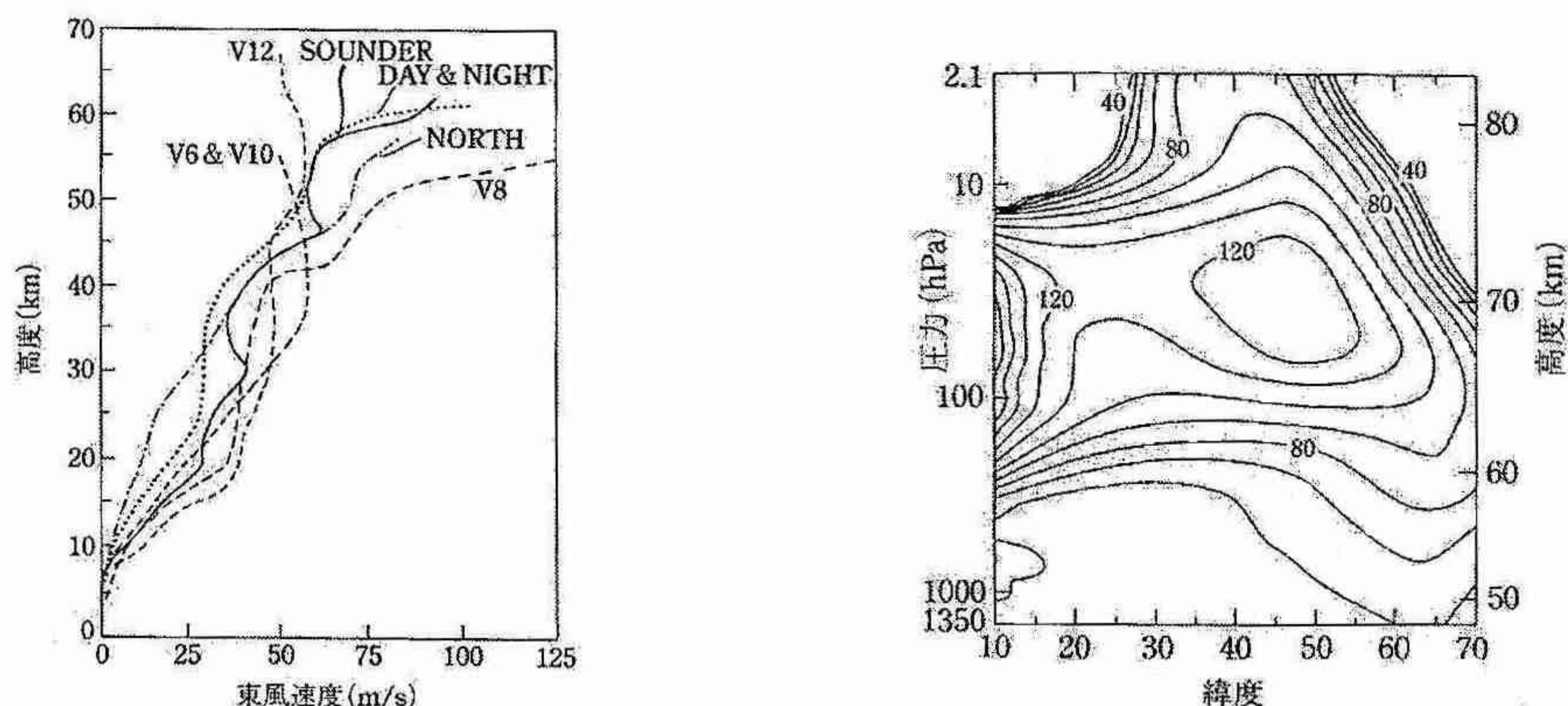


図3 金星大気の東西風(文献2より).

左: 探査機が落とした測器による直接観測結果.

右: 探査機の気温観測から導出した緯度-高度分布(高度 50km 以上).

実は、地球でも、成層圏以上では、自転を追い越す西風が吹くことがあります。赤道域成層圏の風は、準2年周期振動といって、平均して2年強の周期で、西風が継続する期間と東風が継続する期間が入れ替わるという奇妙なことになっています。さらに、成層圏の上部から中間圏にかけては、同様な現象が半年周期で起きます。

以上のような自転を追い越す風は、実は簡単には作れません。自転軸周りの風は、地面との摩擦で運動量をやりとりします。自転を追い越す風があれば地表との摩擦で減速されます。中高緯度では、自転を追い抜いても、赤道の地面の回転に比べれば「遅い」(専門的には「角運動量が小さい」)ことがありますので(地球の偏西風はそうです)、不思議ではないのですが、最も速く回る赤道の地面よりもさらに速い回転を作ろうと思うと、特殊な加速機構が大気内部に存在しなければなりません。それを担うのは、大気の波動です。地球の準2年周期振動においては、その役割を果たす波動は、上述の温帯高低気圧ではなく、赤道域に存在し鉛直に伝播する「赤道ケルビン波」および「大気重力波」というものです(相対性理論の重力波とは別物です)。いずれも、浮力を復元力とする波動です。

同じ性質の波は、水面で容易に見ることができます。静かな水面に石を投げ込みますと、石に引きずられてへこんだ水面が元に戻る過程で波紋が広がります。水面がへこむというのは、いわば空気を水に押し込んだ格好ですので、泡同様に浮力が働きます。さて、水と空気の境では密度は不連続に変わりますが、大気は上ほど軽いなだらかな密度分布をしています(正確には上下動に伴う密度変化を考慮する必要がありますが、それを差し引いても上ほど軽くなっています)。すると、同様な波は、3次元的に伝播する形で発生します。水面の波では、密度が変化する空気との境目が水平に広がるので、波は水平に伝播しますが、密度が連続的に変化する場合、波は鉛直にも伝播できます。実際には、この場合の重力波は、水平だけでなく鉛直にも必ず伝播するという性質をもっているのです(上向きと下向きの両方が可能です)。

気象において重要な重力波に、「山岳波」があります(図4)。山越えの気流があるとき、気流に乗って動く観測者からは、山が大気の下端を押し上げつつ移動しているように見えるでしょう。小石を投げ込む、つまり一箇所を短時間押し下げる代わりに、いわば、水面に棒を浮かせて引っ張るようなものです。このとき、「棒」が通過した後の、つまり山の下流側の、大気は波打ちます。これが山岳波と呼ばれます。山岳波は上空まで伝わり、しばしば山岳に平行に並ぶ雲の列を作ります。山岳波は大気を揺さぶるだけでなく、上空の偏西風を減速するなど、運動に関する影響も及ぼします。

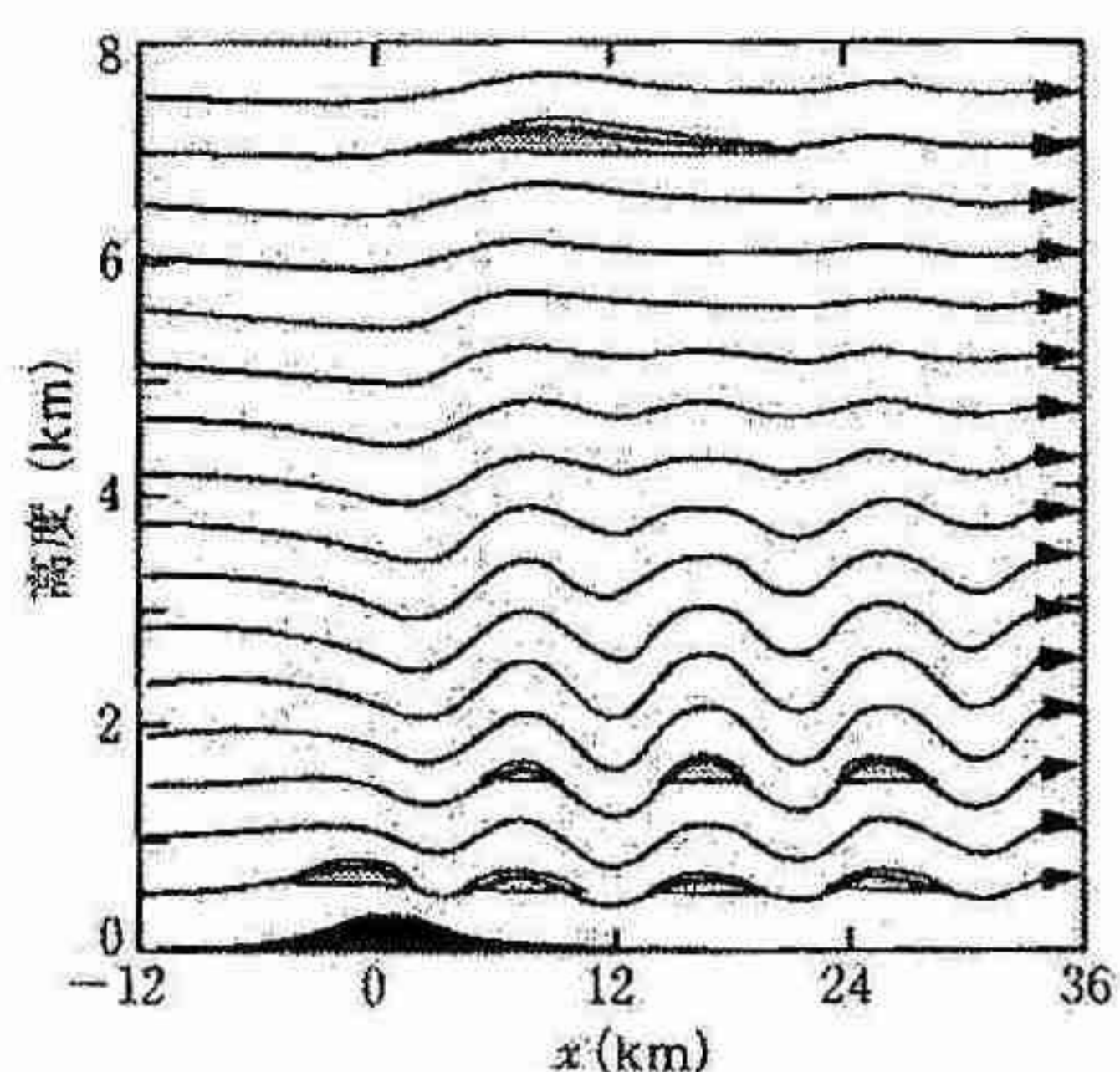


図4 山岳波の模式図(文献3より; 原図は Durran ら 1986). 気流の山越えに伴い, 下流に波が発生し, しばしば雲の列を発生させる

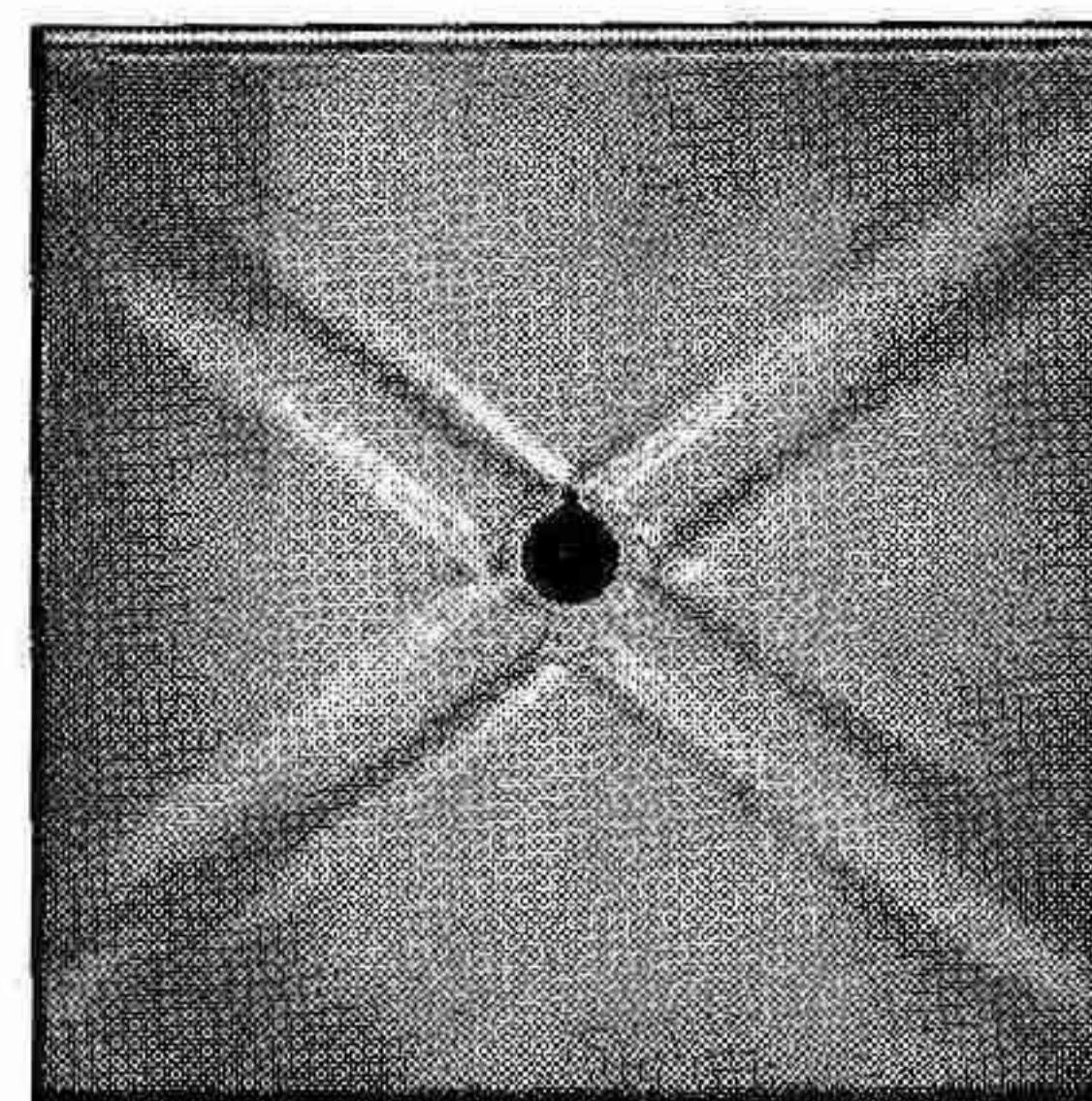


図5 塩で密度成層させた水中の重力波を可視化したもの(文献1より)

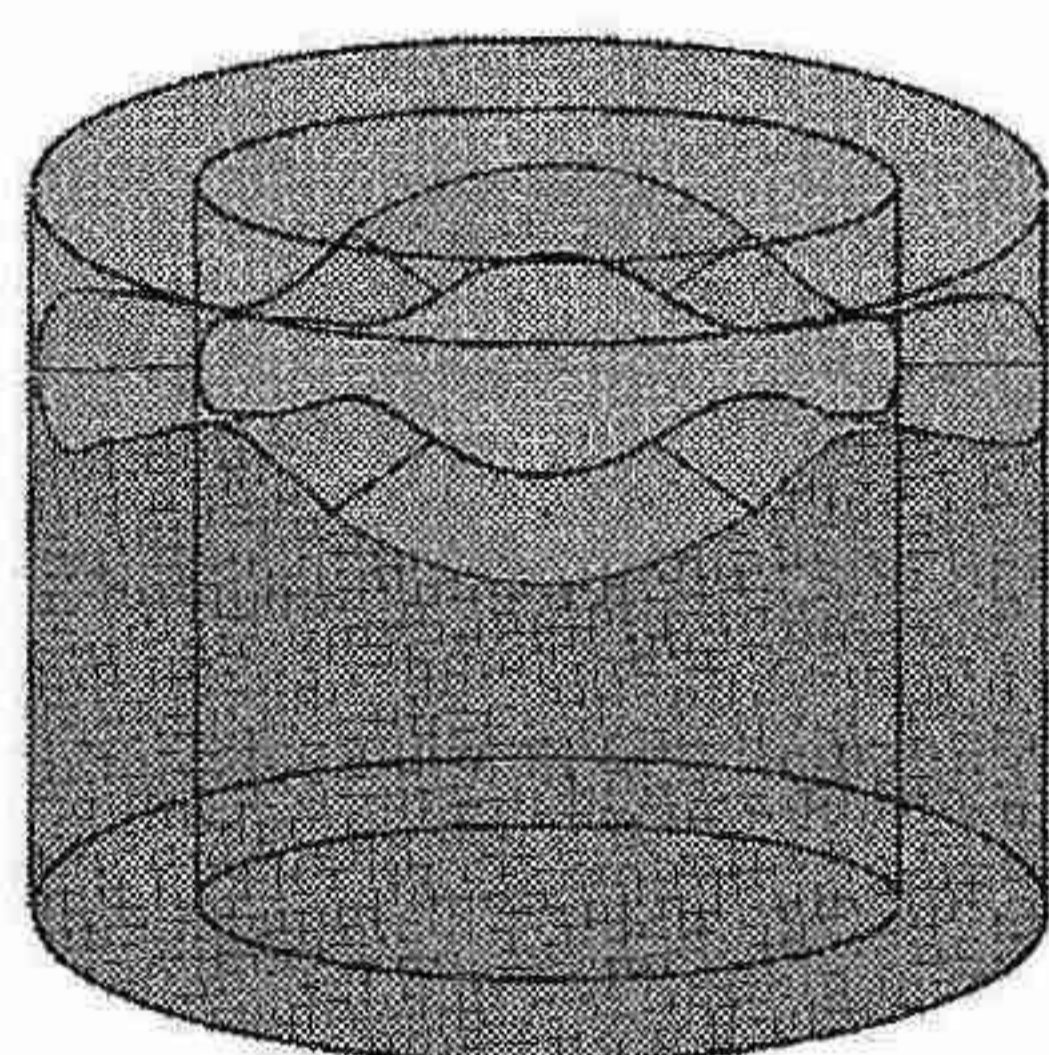


図6 実験室の「準2年周期振動」発生装置の模式図(文献1より)

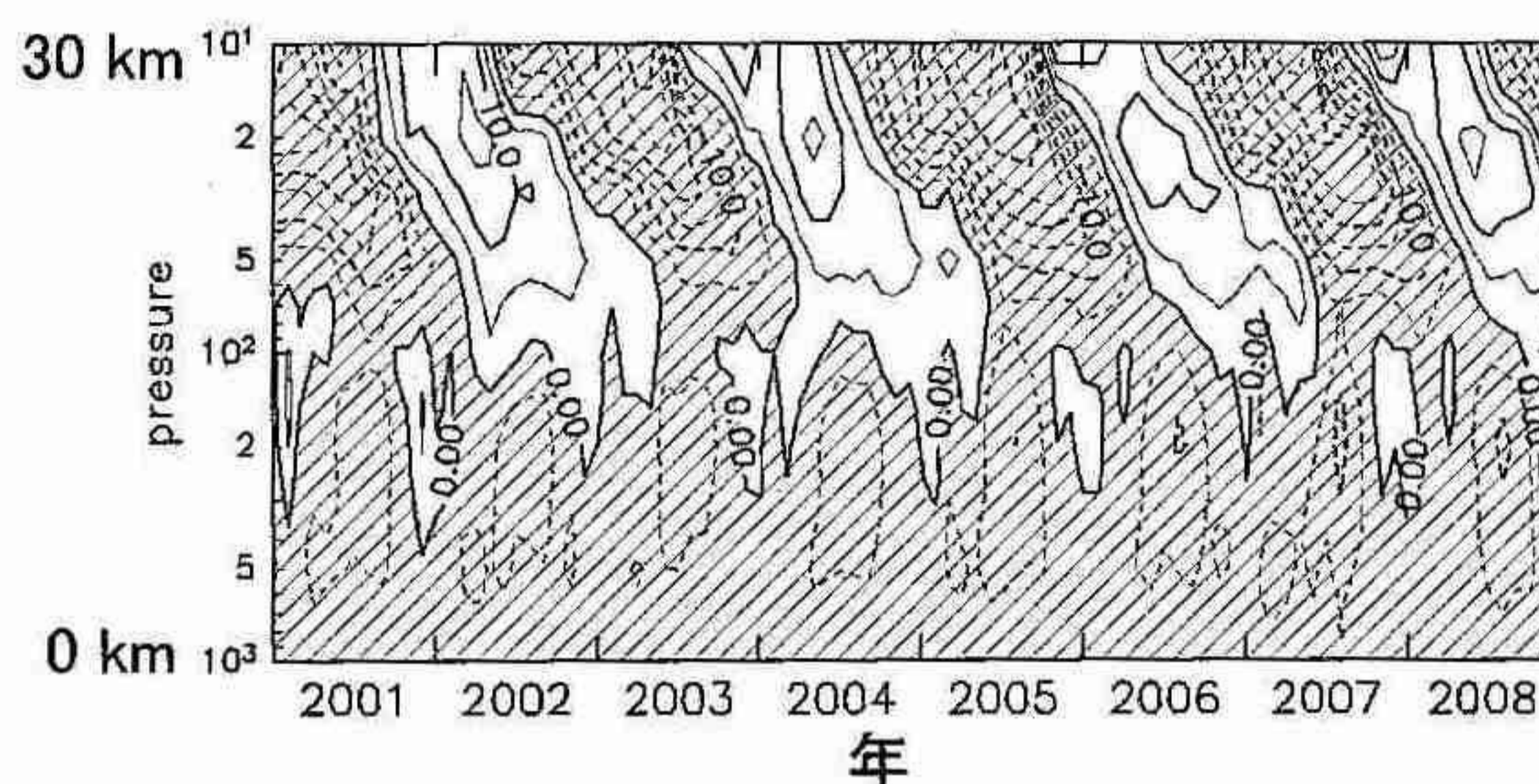


図7 成層圏の準2年周期振動: 赤道上の月平均の東西平均風を時間と高度の関数として表示. 東風に影をつける.

さて, 大気にみられる, 密度が上下に連続的に変化する状態は, 塩水を使って水槽の中につくることができます. 塩水を入れたタンクに真水を混ぜながら静かに水槽に水をひくと, 上ほど塩分が少ない(下ほど塩分が濃い)状態を作れます. これで, 上ほど密度が小さい流体を作ることができるのです. この水槽に棒などを入れてゆっくり揺らすと, 浮力を復元力とする重力波が発生します(密度が連続的に変化する場合, 水面の波より周期は長くなります. 大気中では数分から1日程度までと幅を持ちます.). 図5は, 発生した重力波を, モアレを使って可視化したものです. 重力波は位相がそろった「等位相面」(図で中央の棒からでる斜めの線)が, 波の存在領域が広がる方向と直角をなすという奇妙な性質があります. このため, 波の存在領域は棒からXの字型に広がるのに対し, それぞれに平行に縞模様が見えます. なお, 図4とのパターンの違いは, 図5では障害物が流れにとっては静止しているという違いのためで, 本質的には同じ現象です.

室内実験では, 以上のように重力波を作れるだけでなく, 重力波に流れを作らせることもできます. 前述の, 成層圏の準2年周期振動も, 決して簡単ではありませんが, 水槽の中で再現することができるのです. この実験では, 深いドーナツ型の水槽を使います(図6). その中に塩水を使って上ほど軽い密度分布を作ります. そして, 水槽の上端または下端で重力波を発生させます(実際の大气中では波は対流圏から成層圏に上向きに伝わりますが, 水槽実験においては下からでも上からでも構いません). すると, うまく行けば, ドーナツに沿った流れが発生し, ぐるぐる回ります. それは, 上下に伝播しつつ(波源が下ならゆっくり下に伝播します), 交互に入れ替わります. 図7には, 実際の赤道準2年周期振動を示します.(赤道域では高度約17km以上が成層圏です.)

4. 日本発の金星探査

金星の大気が、なぜ自転に比べ100倍近くもの高速で回転するのかは、幾つか説はあるものの、実はまだわかっていません。他にも、金星大気には様々な謎があります。例えば、金星には雷はあるのでしょうか。金星は厚い液体の硫酸の雲に覆われています。地球大気の常識では、雷の発生には固体(氷)の雲が必要ですが、金星でも雷のシグナルと思われる観測例がいくつかあります。しかし、その存在には決着がついていません。

現在、来年の打ち上げを目指して、宇宙航空開発機構(JAXA)を中心に、日本発の金星探査機が製作されており(図8)、金星大気の謎の解明に挑む革新的な計画として注目を集めています。この計画には、北海道大学でも多くの人に関わっています。講演ではこれについても簡単に紹介します。

5. その他の話題

実験室で再現できる気象現象はまだあります。
講演でご紹介したいと思います。

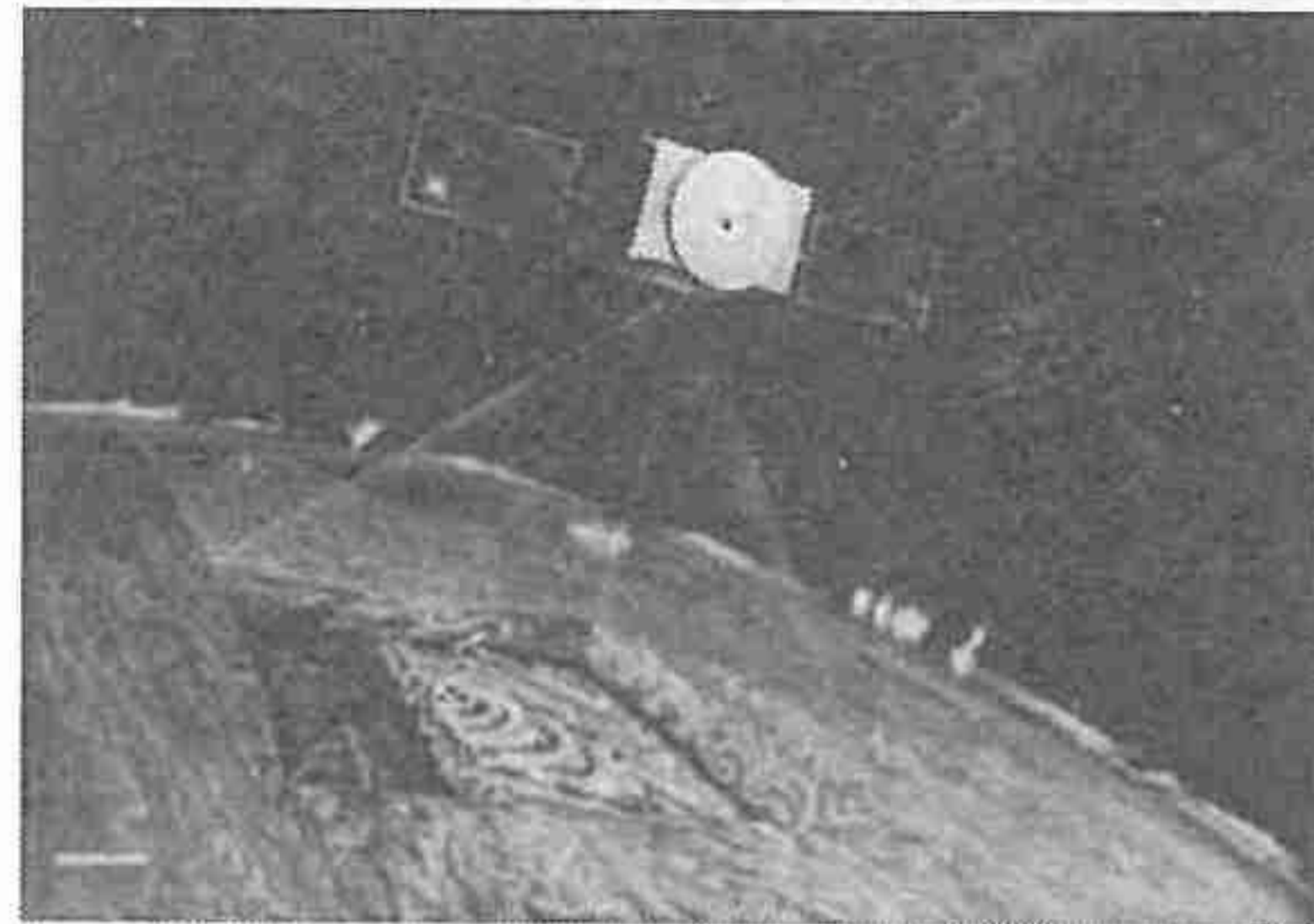


図8 金星探査機 Planet-C による観測のイメージ図
(JAXA ホームページより)

文 献

- (1) 酒井敏ほか「地球流体基礎実験集第二版 - 実験室の中の空と海」, Web ページ,
http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_j/index0.htm, 1997.
(この実験集は、京都大学総合人間学部(旧教養部)の地球科学実験をもとに作成されました.)
- (2) 松田佳久「惑星気象学」, 東京大学出版会, 2000.
- (3) 小倉義光, 「メソ気象の基礎理論」, 東京大学出版会, 1997.