

**機械系大学院生の熱流体力学に
ついての関心と知識と理解
— 簡単なアンケートの結果
から見える—側面 —**

**航空宇宙工学専攻
熱工学研究室
吉田英生**

sakura@hideoyoshida.com

www.wattandedison.com

熱物理工学（M1前期、基盤科目）

◆松本充弘さん（前半）

ミクロな熱に関係する計算物理学的なテーマ 7回

◆吉田英生（後半）

主にマクロな熱流体力学とエネルギー

「大気と海洋の科学」（「地球温暖化の科学」含め） 4回

「水素エネルギーの科学と工学」 1回

「原子力エネルギーの科学と工学」 1回

「アポロ計画をふりかえる」 1回

（工学研究科『知のひらめき2016』講義をトピックス的に）

受講者数 = アンケート回答者数 : 114名

レポート課題の例

あとで水素を取り上げる関係で、以下の問題を考えてみよう。資料7ページには地球大気の組成として『**Hydrogen 0.50 parts per million**』とある。地球は水の惑星であるにもかかわらず大気中に水素分子がほとんどない理由として、『**水素は最も軽い分子なので、浮力で大気中をどんどん上昇する。そして最後には宇宙空間に拡散する。**』というような説明・解釈がなされることがある。これは正しいか。もし正しくないとしたら、どのように考えればよいだろうか。

● THE ATMOSPHERE IS THE PROTECTIVE BUBBLE WE LIVE IN.

Gas	Symb.	Content	
Nitrogen	N ₂	78.084%	} 99.998%
Oxygen	O ₂	20.947%	
Argon	Ar	0.934%	
Carbon Dioxide	CO ₂	0.033%	
Neon	Ne	18.20 parts per million	

Helium	He	5.20 parts per million
Krypton	Kr	1.10 parts per million
Sulfur dioxide	SO ₂	1.00 parts per million
Methane	CH ₄	2.00 parts per million
Hydrogen	H ₂	0.50 parts per million
Nitrous Oxide	N ₂ O	0.50 parts per million
Xenon	Xe	0.09 parts per million

Ozone	O ₃	0.07 parts per million
Nitrogen dioxide	NO ₂	0.02 parts per million
Iodine	I ₂	0.01 parts per million
Carbon monoxide	CO	trace
Ammonia	NH ₃	trace

http://www.srh.weather.gov/srh/jetstream/atmos/atmos_intro.htm

感心したレポート解答例 (2008年)

まず地球以外の惑星の大気の組成について調べた。

●水星

質量	$3.303 \times 10^{23} \text{kg}$
赤道半径	2439.7km
ヘリウム	42%
ナトリウム	42%
酸素	15%
その他	1%

●金星

質量(kg)	4.869×10^{24}
赤道半径 (km)	6051.8
二酸化炭素	96%
窒素	3+%

●地球

質量(kg)	5.976×10^{24}
赤道半径(km)	6378.14
窒素	77%
酸素	21%
その他	2%

●火星

質量(kg)	6.421×10^{23}
赤道半径(km)	3397.2
二酸化炭素(CO ₂)	95.32%
窒素(N ₂)	2.7%
アルゴン(Ar)	1.6%
酸素(O ₂)	0.13%
一酸化炭素(CO)	0.07%
水(H ₂ O)	0.03%

●木星

質量(kg)	1.900×10^{27}
赤道半径(km)	71492
水素	90%
ヘリウム	10%

●土星

質量(kg)	5.688×10^{26}
赤道半径(km)	60268
水素	97%
ヘリウム	3%

●天王星

質量(kg) 8.686×10^{25}

赤道半径(km) 25559

水素 83%

ヘリウム 15%

メタン 2%

●海王星

質量(kg) 1.024×10^{26}

赤道半径(km) 24746

水素 85%

ヘリウム 13%

メタン 2%

水素の占有率が大きい惑星は、木星、土星、天王星、海王星である。これらと他の惑星では、水素が急激になくなっている。私はこのことが惑星の質量に関係しているのではないかと考えた。気体の分子量を m 、惑星の質量を M 、半径を R 、速度を v とすると、気体が惑星を脱出するには

$$(1/2)mv^2 = GMm/R$$

となり、脱出速度は M/R に依存することが

わかる。

M/R(g/m)

水星 1.3538×10^{20}

金星 8.0450×10^{20}

地球 9.3690×10^{20}

火星 1.8900×10^{20}

木星 2.6570×10^{22}

土星 9.4300×10^{21}

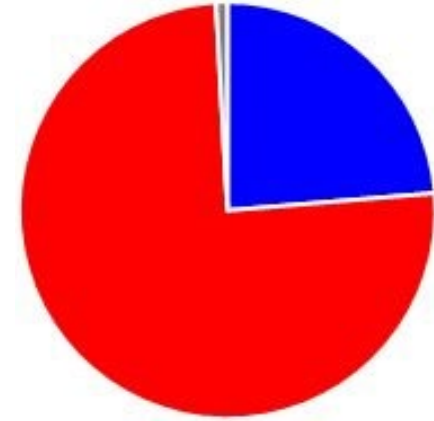
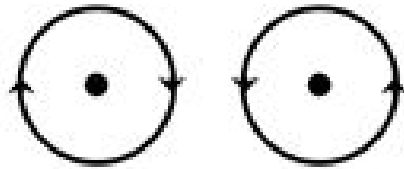
天王星 3.398×10^{21}

海王星 4.1300×10^{21}

単純に温度や水素以外の構成元素を無視して、これらの結果を木星、土星、天王星、海王星間で比較すると、木星より土星の方が水素の占有率が高いのは当てはまらないが、他は M/R の大きさと水素の占有率の高さが一致している。このことから、水素が地球の大気中に存在しないのは、 M/R が小さいため、水素が地球から脱出してしまうためだと考えられる。

【1】渦の運動（2次元ポテンシャル流れの渦糸）

(a) 同強度の渦対（反対方向回転）の挙動

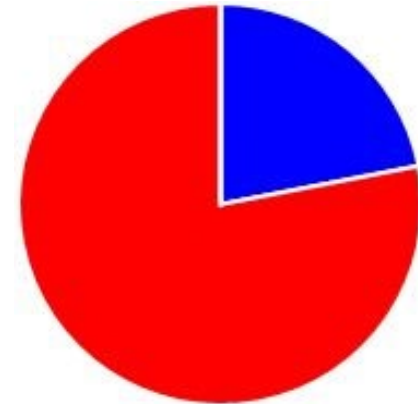
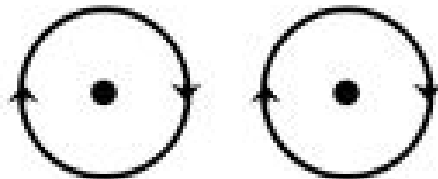


① 自信をもってわかっていた（24%：青）

② 自信をもってはわかっていた（75%：赤）

③ その他（1%：灰）

(b) 同強度の渦対（同方向回転）の挙動



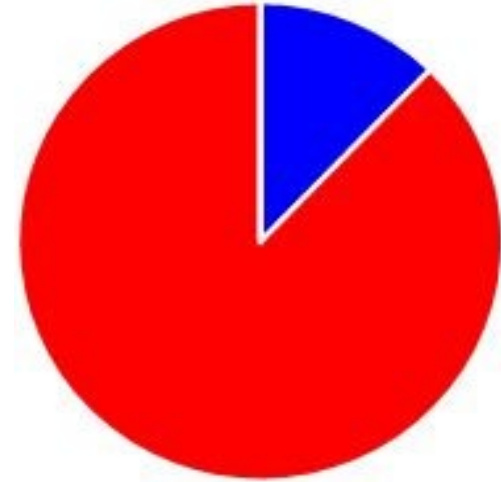
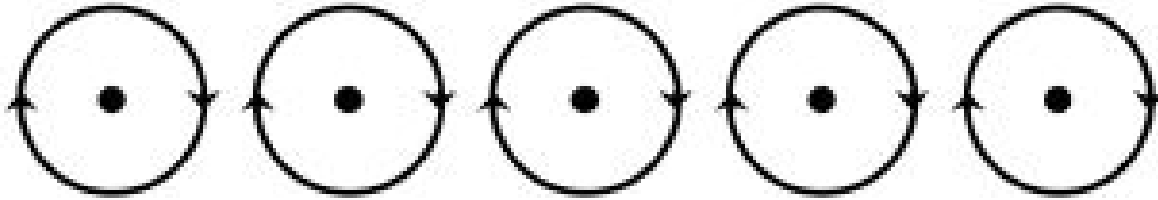
① 自信をもってわかっていた（22%：青）

② 自信をもってはわかっていた（78%：赤）

③ その他（0%：灰）

【1】渦の運動（2次元ポテンシャル流れの渦糸）

(c) 同強度の一直線上の無限渦列の挙動



① 自信をもってわかっていました（12%：青）

② 自信をもってはわかっていなかった（88%：赤）

③ その他（0%：灰）

【2】境界層積分法（森・土方：流れと熱の工学Ⅱ、Bénard cell不安定解析に関連して）

$$\left(\frac{d^2}{d\eta^2} - r^2\right)^2 G - r^2 Ra \theta = 0 \quad (6.4.70)$$

$$\left(\frac{d^2}{d\eta^2} - r^2\right) \theta + G = 0 \quad (6.4.71)$$

境界条件を満足するように G と θ に関しつぎのように分布型を仮定する.

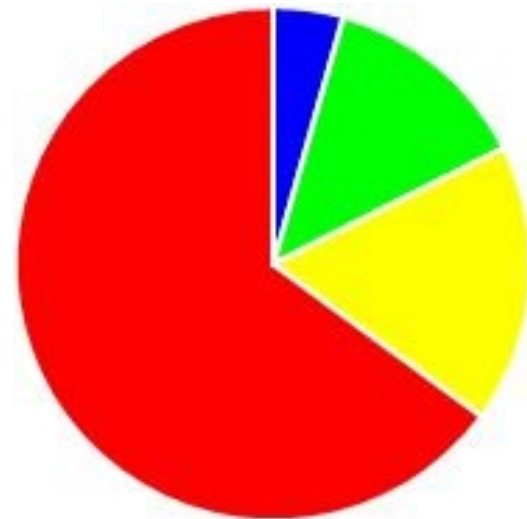
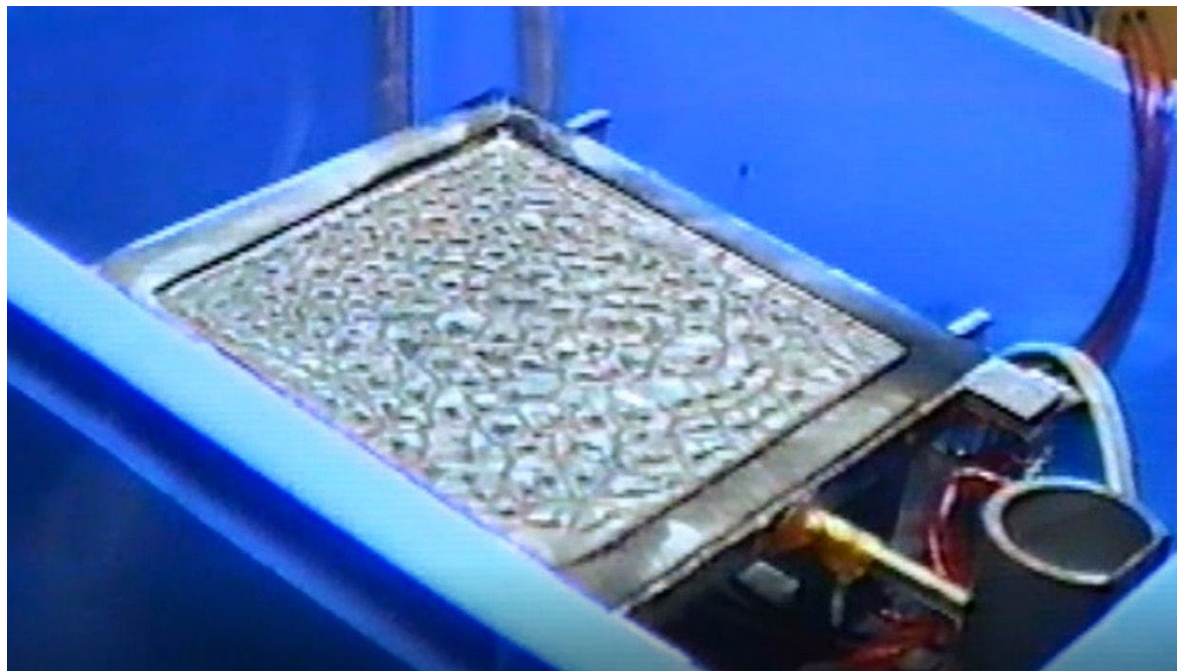
$$G = A(1 - 8\eta^2 + 16\eta^4) \quad (6.4.74)$$

$$\theta = B(1 - 4\eta^2) \quad (6.4.75)$$

-
- ① 語も手法も知っていた (12% : 青)
 - ② 語は知らなかったが手法は知っていた (11% : 緑)
 - ③ 語は聞いたことがあった (ような気がする)
が手法は知らなかった (36% : 黄)
 - ④ 語も手法も知らなかった (40% : 赤)
 - ⑤ その他 (0% : 灰)



【3】Bénard cell (自然対流)



① 語も現象も知っていた (4% : 青)

② 語は知らなかったが現象は知っていた (13% : 緑)

③ 語は聞いたことがあった (ような気がする) が現象は知らなかった (18% : 黄)

④ 語も現象も知らなかった (65% : 赤)

E.L. Koschmieder and S.G. Pallas, Heat transfer through a shallow, horizontal convecting fluid layer, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 19, pp. 991-1002, 1974.

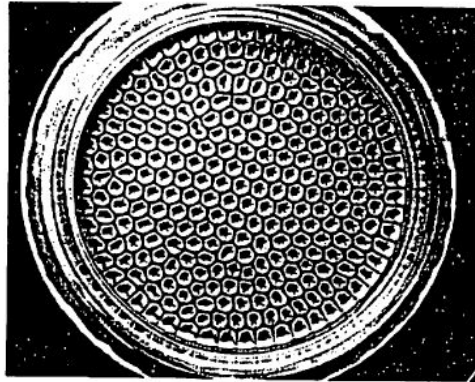


FIG. 2. Bénard cells under an air surface.

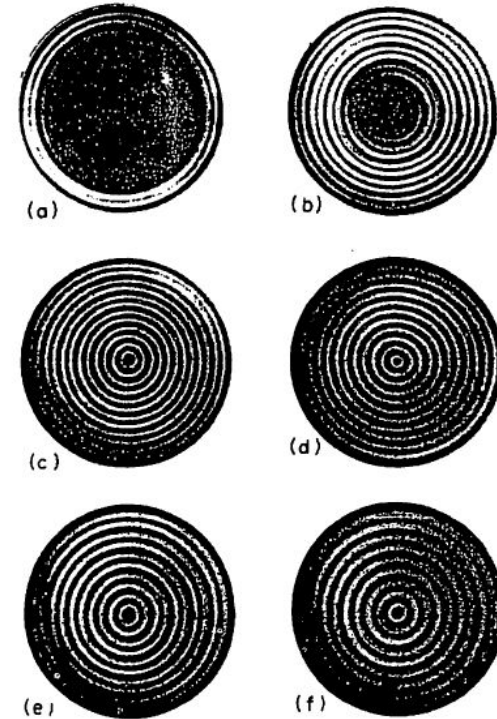
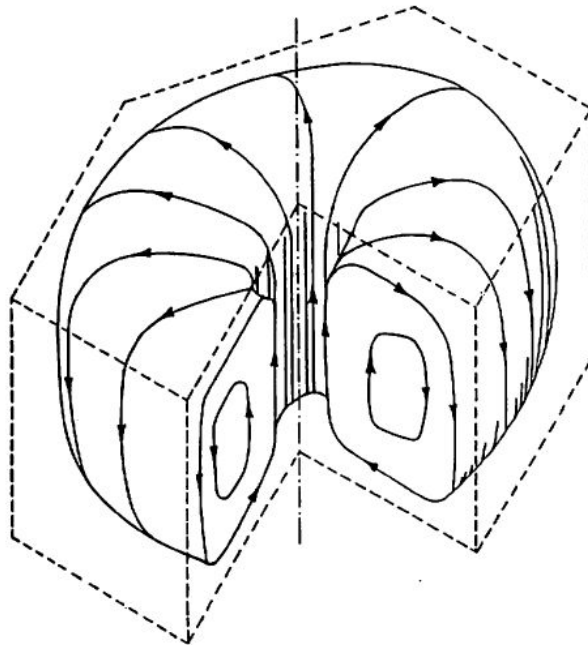
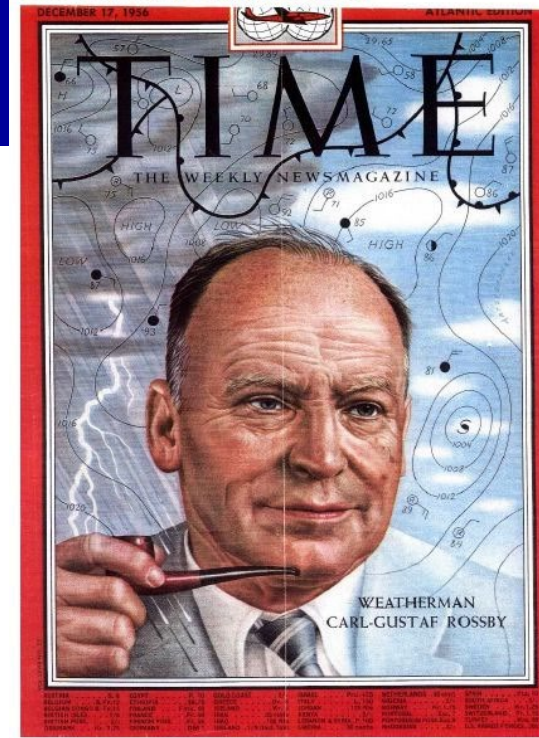


FIG. 3. Development of concentric rolls under the sapphire lid and increase of wavelength with supercritical Rayleigh number. (a) Three rolls adjacent to circular wall. $R = 0.85 R_c$. (b) Eleven concentric rolls. $R = 0.95 R_c$. (c) Thirteen circular rolls. The outermost rim roll is almost completely hidden. $R = 1.3 R_c$. (d) Twelve concentric rolls with shrinking center roll. $R = 2.2 R_c$. (e) Eleven concentric rolls just after the disappearance of the twelfth ring. $R = 3.4 R_c$. (f) Ten circular concentric rolls. $R = 6 R_c$.

【4】Rossby数

Carl-Gustaf Rossby (1898-1957)



① 語も意味も理解していた (5% : 青)

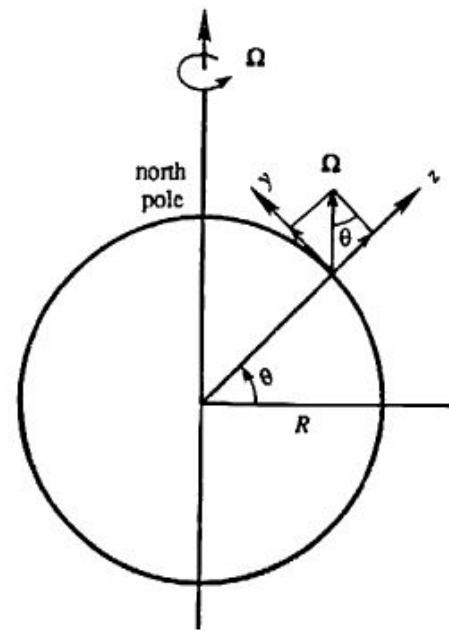
② 語は知らなかったが、回転をともなう流れでは慣性力とコリオリ力の比が重要であることは理解していた (16% : 緑)

③ 意味は理解していなかったが、語は知っていた (14% : 黄)

④ 語も意味も全く知らなかった (65% : 赤)



Rossby数と 大気中の諸現象の 時空間スケール

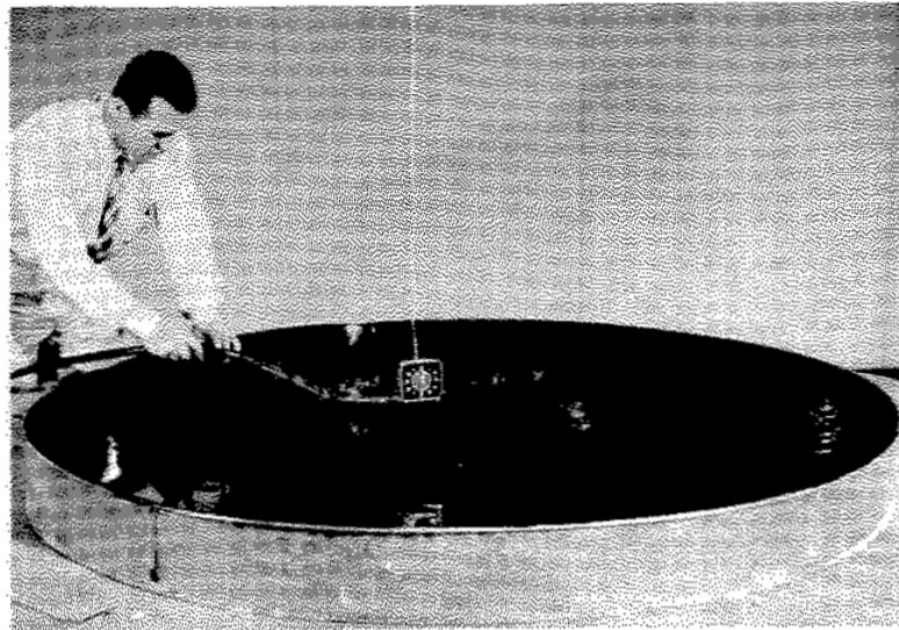


Ro (Rossby) 数

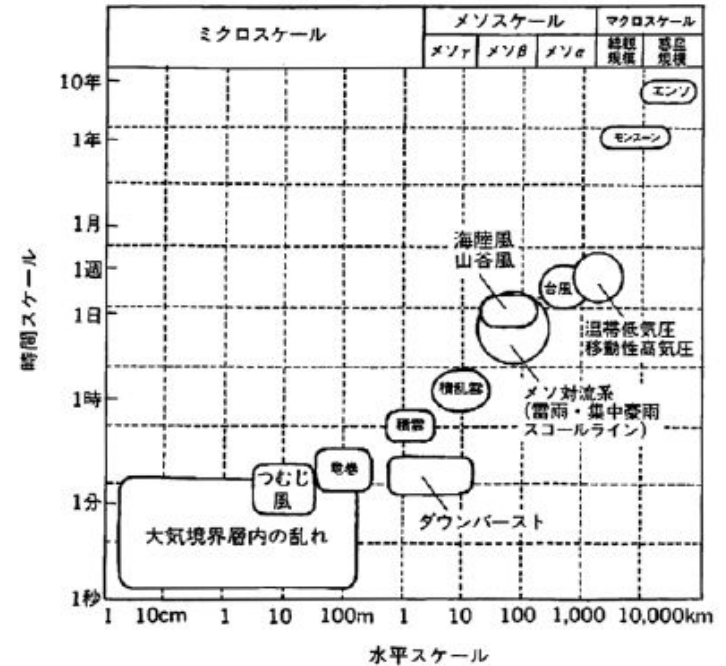
$$Ro \equiv \frac{\text{慣性力}}{\text{Coriolis力}} = \frac{U^2/L}{fU} = \frac{U}{fL}$$

$$f \approx 10^{-4} [s^{-1}]$$

Carl-Gustaf Rossby (1898-1957)



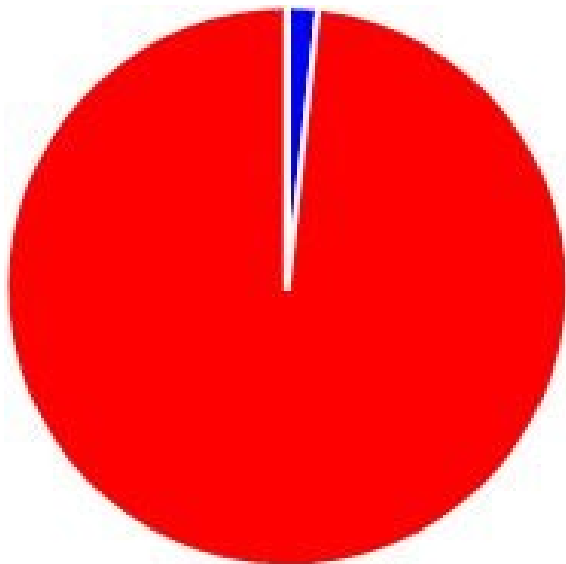
13. A tank six feet in diameter and six inches high, with a drain hole $\frac{3}{8}$ inch in diameter at the center, is filled with water swirling *clockwise*. It is then covered to minimize motions induced by air currents, by buoyancy, and by impurities on the surface causing non-uniform surface tension, and it is allowed to stand for 24 hours. The flow is started by pulling a plug from the end of a hose, several feet long, attached to the drain. The experiment is carried out at latitude 42° N near Boston, Mass.



微小なCoriolis力の影響を調べる実験

【5】Taylor-Proudmanの定理

- ①知っていた
(2% : 青)
- ②知らなかった
(98% : 赤)
- ③その他
(0% : 灰)



Taylor-Proudman Theorem [63]

$$-2\Omega v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (20.1)$$

$$2\Omega u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (20.2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (20.3)$$

Elimination of p by cross differentiation between the horizontal momentum equations gives

$$2\Omega \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) = 0 \quad (20.4)$$

Using the continuity equation, this gives

$$\frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (20.5)$$

Also, differentiating (20.1) and (20.2) with respect to z , and using (20.3), we get

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (20.6)$$

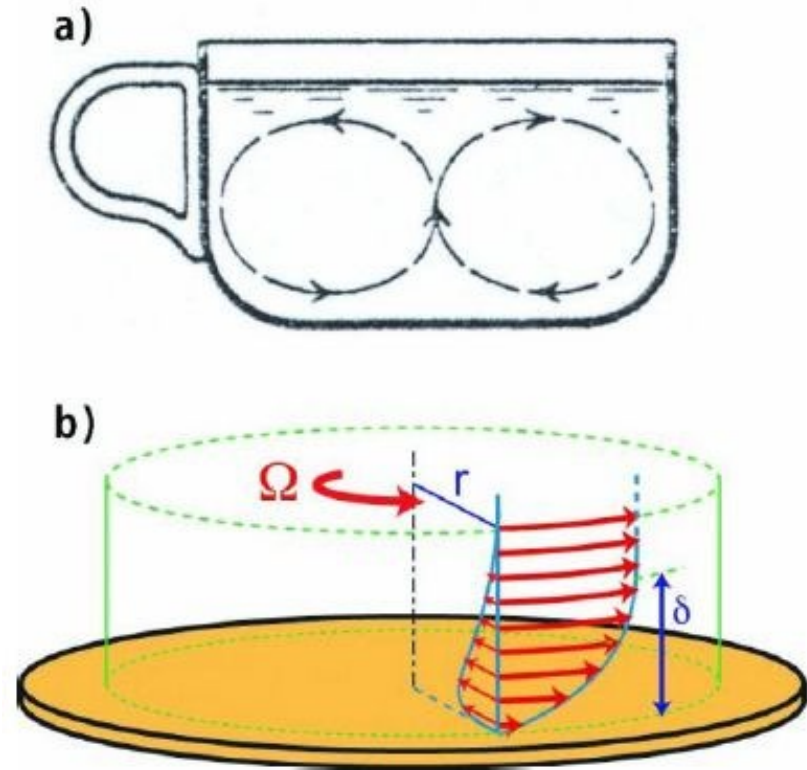
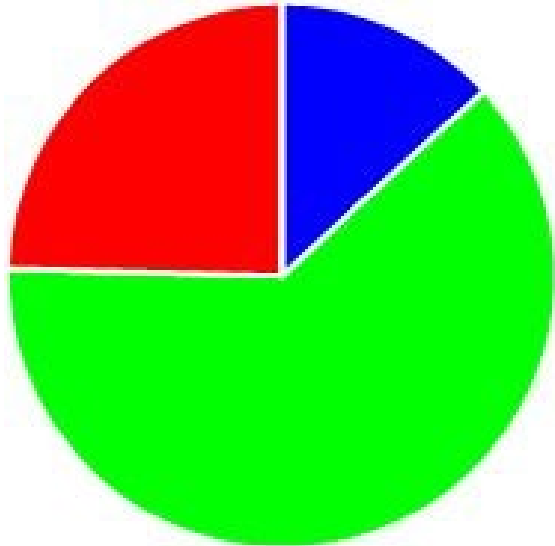
Equations (20.5) and (20.6) show that

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = 0 \quad (20.7)$$

showing that the velocity vector cannot vary in the direction of $\mathbf{\Omega}$. In other words, steady slow motions in a rotating, homogeneous, inviscid fluid are two-dimensional.

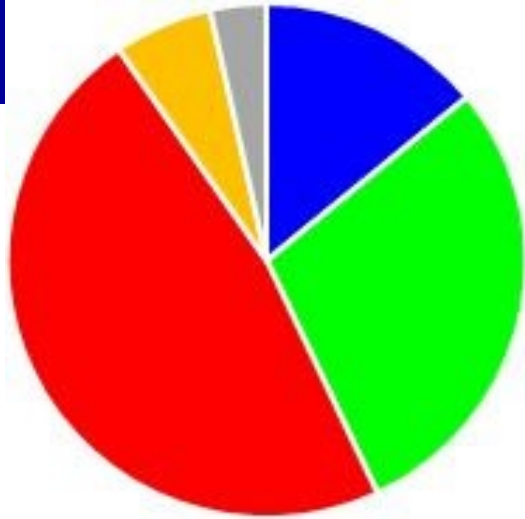
【6】カップ・お茶碗での回転流 (Ekman境界層) におけるお茶っ葉の挙動

- ①よく理解していた (13% : 青)
- ②この現象に気づいてはいたが、よく理解していなかった (62% : 緑)
- ③そもそも考えたことがなかった (25% : 赤)



【7】天気予報で見る西高東低の気圧配置と

北風



地衡風 (geostrophic wind)

地表から離れて表面摩擦がなく、定常の場合、次式が成立する。

$$-fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (18.1)$$

$$fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}$$

南から北に向かって圧力が減少する $p = f(y) = -cy$ のとき

$$-fv = 0$$

$$v = 0$$

$$fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{c}{\rho_0}$$

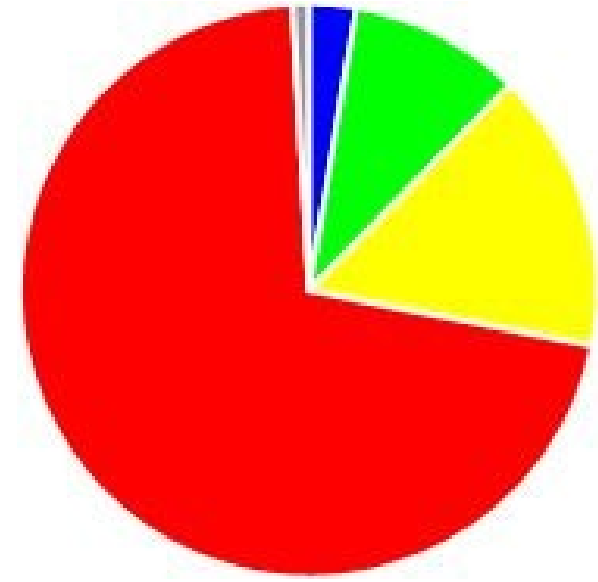
→

$$u = \frac{c}{f\rho_0}$$

(18.2)

- ①地衡風であることを理解していた (14% : 青)
- ②地衡風であることは理解していなかったが不思議には思っていた (29% : 緑)
- ③とくに不思議にも思っていなかった (47% : 赤)
- ④ (留学生などで日本の天気予報に触れることがなく) そもそもこのことを知らなかった (6% : 橙)
- ⑤その他 (4% : 灰)

【8】西岸強化



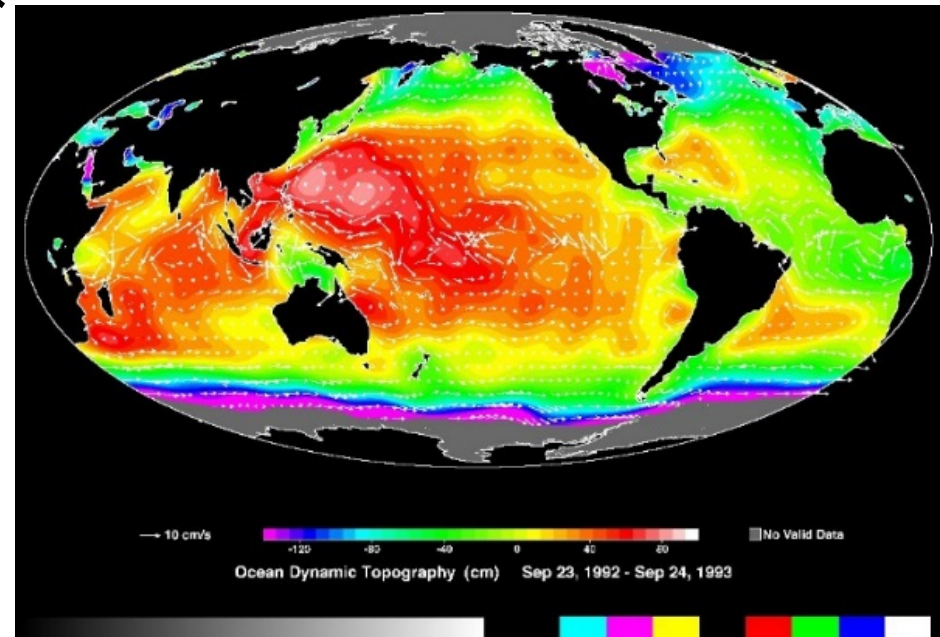
① 語も現象も知っていた (3% : 青)

② 語は知らなかったが現象は知っていた (10% : 緑)

③ 語は聞いたことがあった (ような気がする) が現象は知らなかった (16% : 黄)

④ 語も現象も知らなかった (71% : 赤)

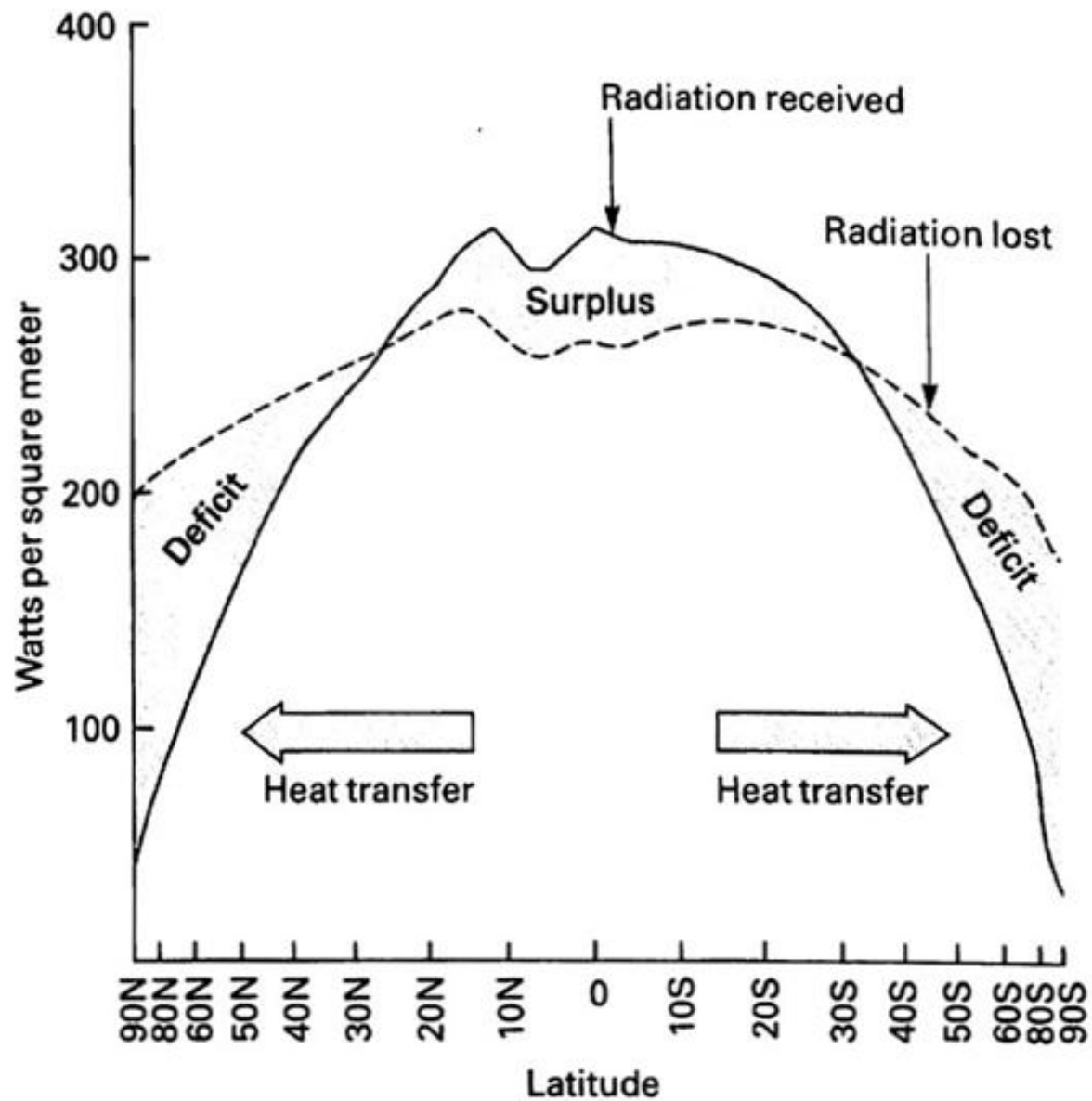
⑤ その他 (1% : 灰)



世界の海流

むすび

そもそも、大気や海洋が運動するのはなぜでしょうか？



Comparison of the incoming solar radiation and outgoing terrestrial radiation. J. R. Eagleman, *Meteorology, the Atmosphere in Action*, 2nd ed., Wadsworth Pub. Co. (1985).