

宇宙理工学概論

1.地球、金星、火星の気象の違い

土木工学科 仲吉信人
nakayoshi@rs.tus.ac.jp
5号館3階

専門:都市気象・気候学
温熱生理学
生気象学

✓ 気象とは

大気の組成や流れの状態.

熱・物質・運動量の輸送（移流・拡散）

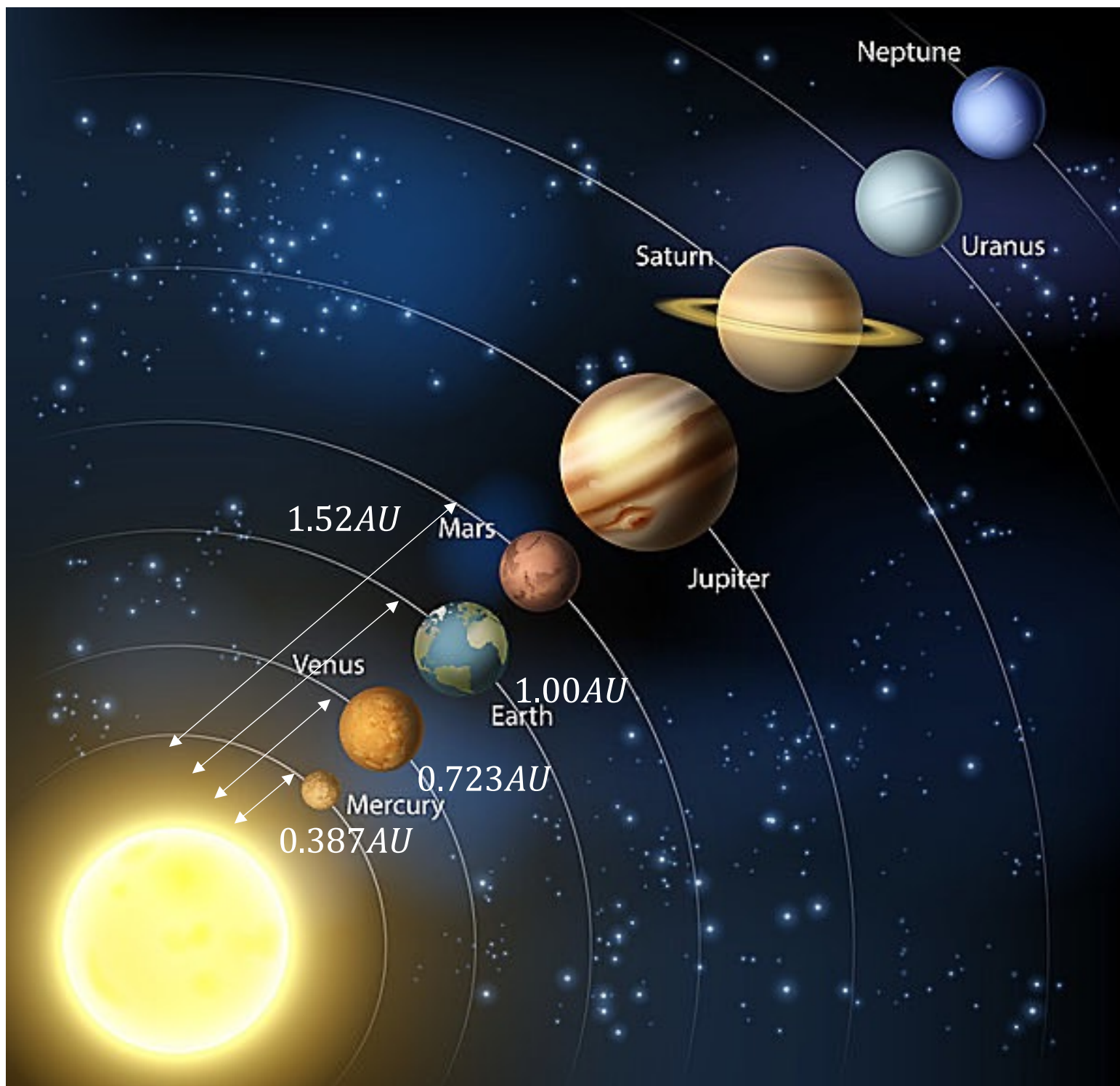
ex) 台風, 突風, 渇水, 熱波, 寒波

1. 温度と放射

2. 温度と大気循環

✓ 惑星気象を知る利点

- 宇宙飛行士の作業環境を知る
- 機器の動作環境を知る
- 定住可能性の検討
- 生物の生育環境を知る
- 地球気象のよりよい理解



	金星	地球	火星
地表面温度 [K]	730	288	220
太陽定数 [W m^{-2}]	2600	1380	590
惑星アルベド	0.78	0.3	0.24
主要気体の存在比率	CO ₂ :96.5 % N ₂ :3.5%	N ₂ :78.1 % O ₂ :20.9% H ₂ O:~2% CO ₂ :0.04%	CO:95.3% N ₂ :2.7% Ar:1.6%
重力加速度 [m s^{-2}]	8.9	9.8	3.7
地表面気圧[hPa]	92000	1013	6
1昼夜の長さ	117日	1日	1日

金星の地表面気圧はなぜ大きい？
金星はなぜ高温？

気圧とは

a) 気圧 (air pressure) [Pa or N m⁻²]:
高度 z より上空の空気の重さ (単位面積あたり)

空気柱の重力と圧力の釣り合い

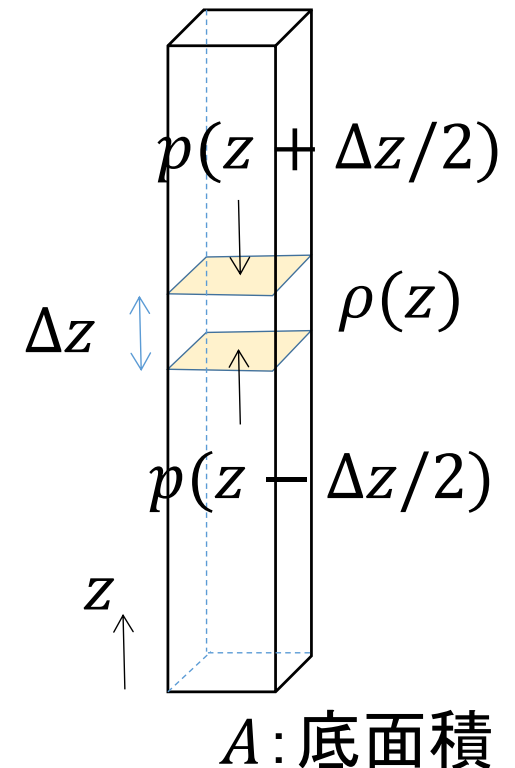
$$\left\{ p\left(z - \frac{\Delta z}{2}\right) - p\left(z + \frac{\Delta z}{2}\right) \right\} A = \rho(z) g A \Delta z$$

z 周りにTaylor展開し2次以上無視すると

$$-\frac{dp}{dz} = \rho(z)g$$

変数分離し, 地上から高度 z まで積分

$$\int_{p_0}^{p_z} dp = - \int_0^z \rho(z) g \, dz$$
$$p_z - p_0 = - \int_0^z \rho(z) g \, dz \quad p_0 = p_z + \int_0^z \rho(z) g \, dz$$



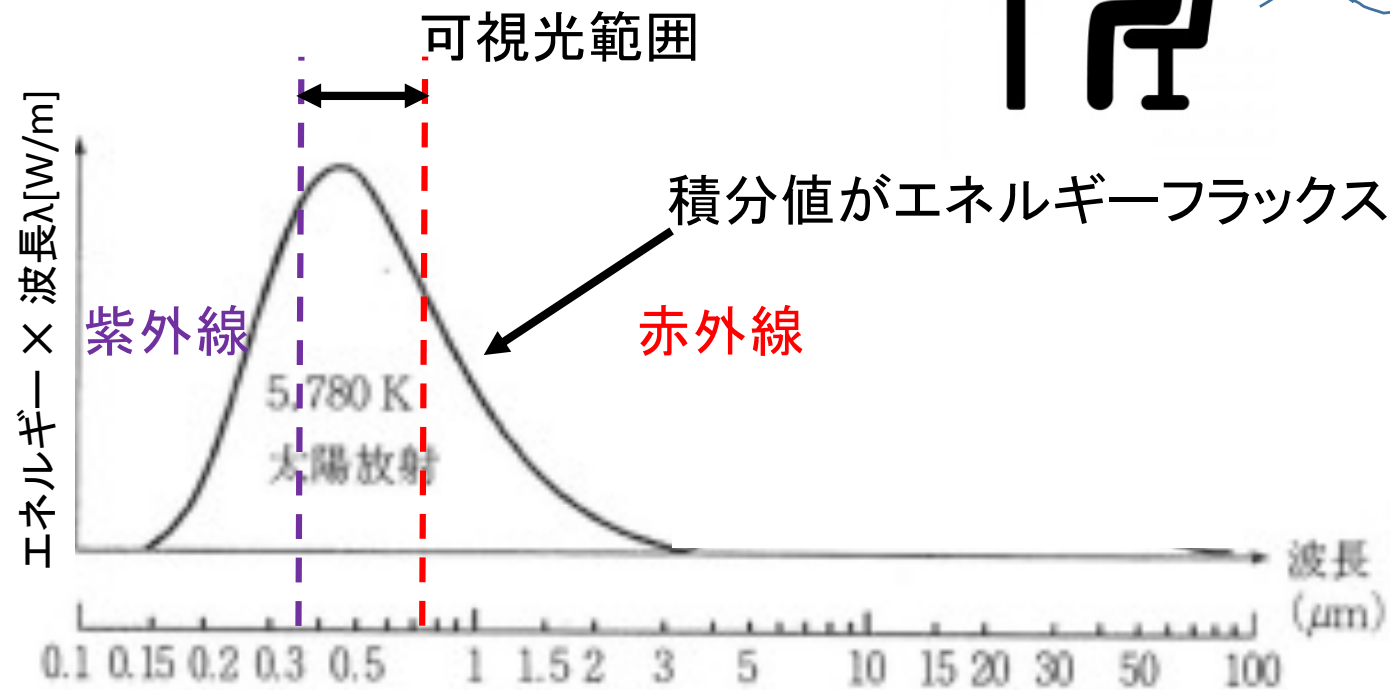
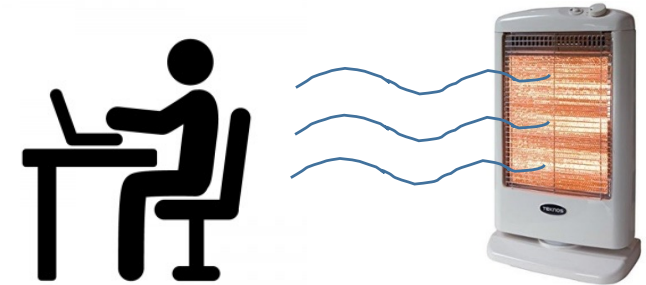
1. 温度と放射

放射エネルギー(Radiation): 電磁波によるエネルギー輸送

ex) ハロゲンヒータ

特徴: 空気はほとんど暖まらない、物体を直接加熱

放射: 光のエネルギー



太陽のエネルギースペクトル
(波長ごとのエネルギー分布)

放射によるエネルギーフラックス:

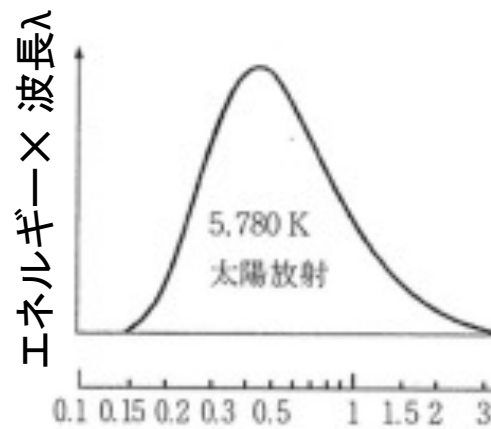
フラックス (flux): 単位時間あたりに単位面積を通過する物理量

ステファン・ボルツマンの法則: $Flux_{rad} = \varepsilon \sigma T^4$ [Wm^{-2}]

ε : 物体の射出率[-]

σ : ステファン・ボルツマン定数 $5.67 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$

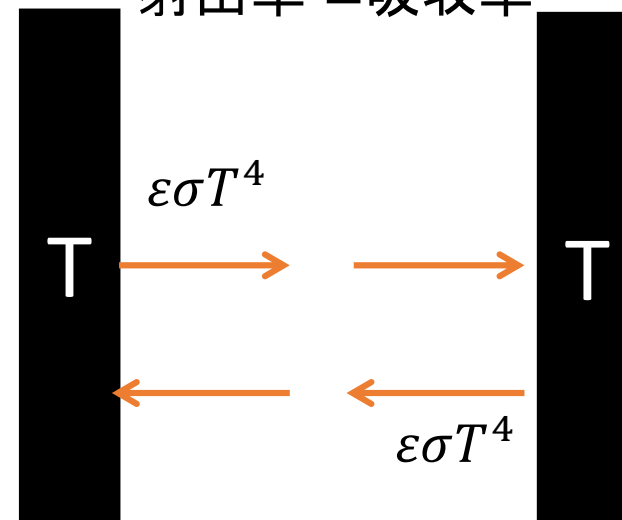
T : 物体温度[K]



太陽のエネルギースペクトル

放射平衡を考えると

射出率 = 吸収率



エネルギースペクトルのピーク波長：

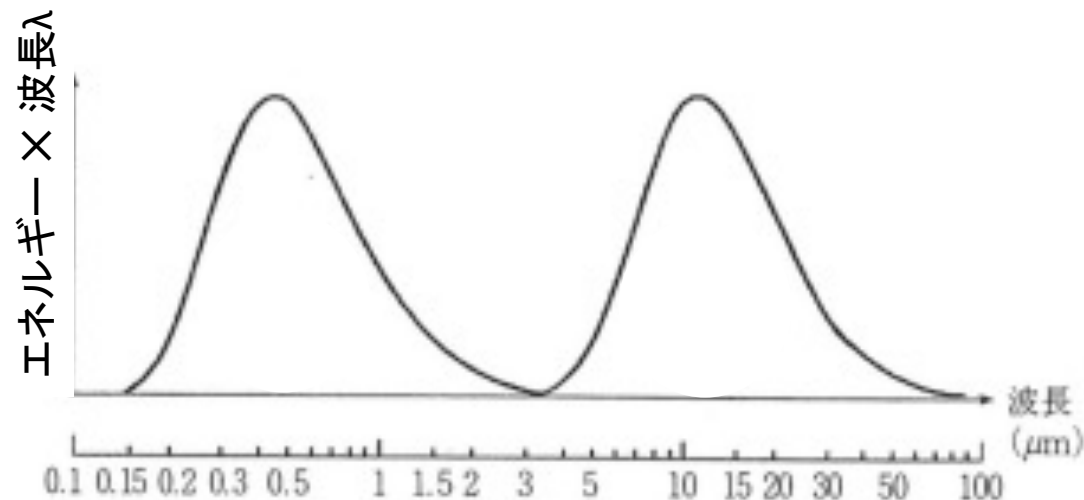
ウィーンの変位則： $\lambda_{max} = \frac{2897}{T} [\mu m]$

太陽：6000[K] $\rightarrow \lambda_{max} = 0.48 [\mu m]$

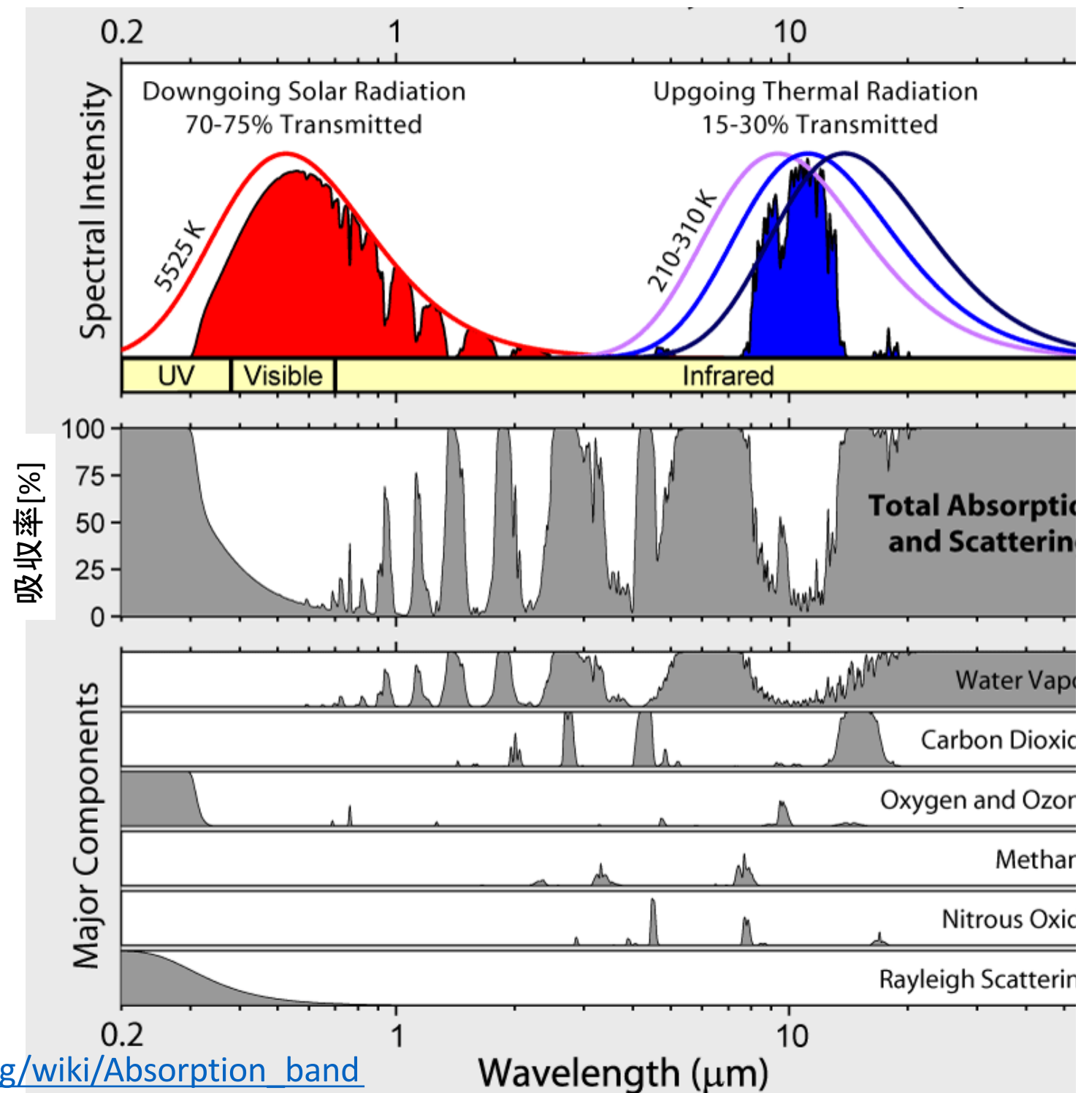
短波放射 (Shortwave radiation)
3 $[\mu m]$ 以下

地物や雲：300[K] 位 $\rightarrow \lambda_{max} = 9.7 [\mu m]$

長波放射 (Longwave radiation)
3 $[\mu m]$ 以上

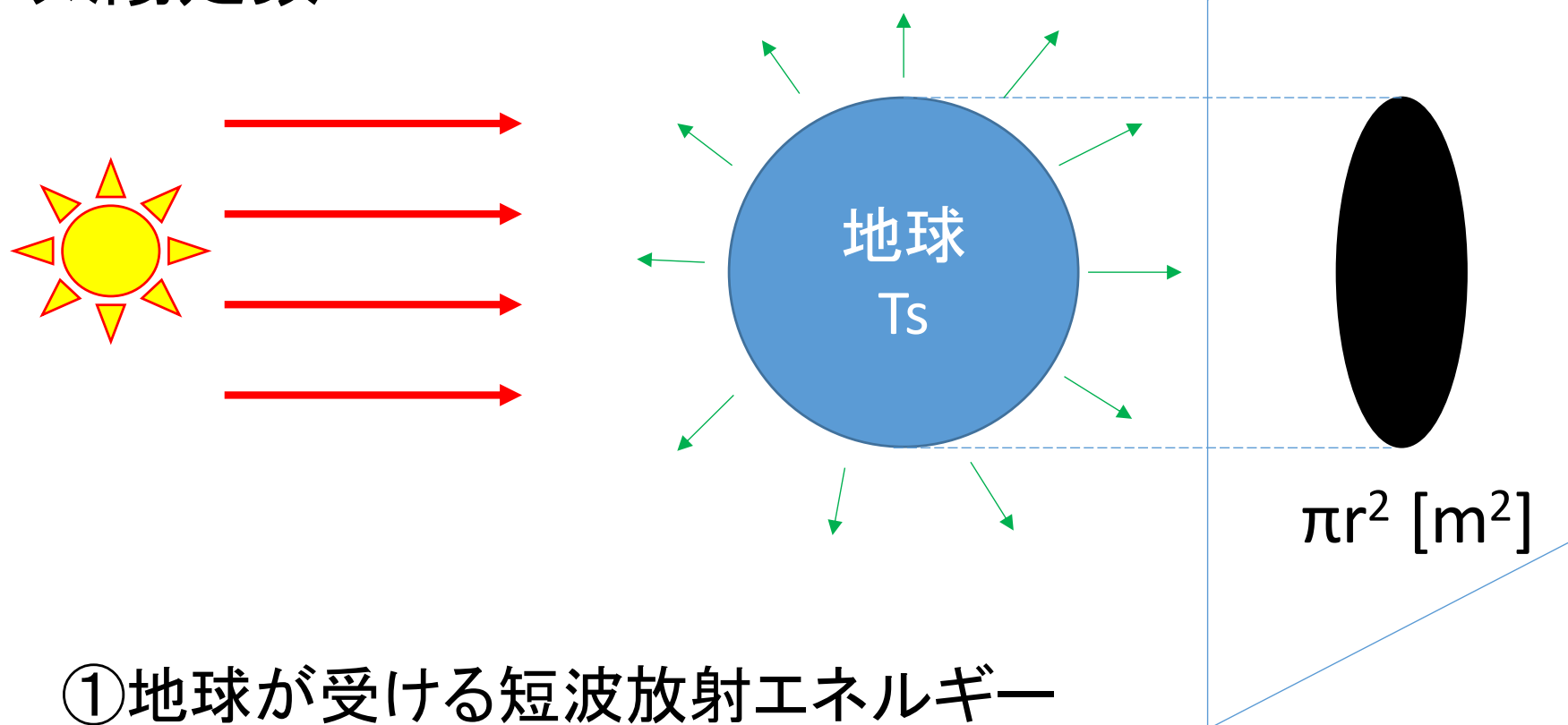


放射と大気組成



～惑星温度と放射平衡～

太陽定数 $S = 1360 \text{ W m}^{-2}$



①地球が受ける短波放射エネルギー

$$(1 - \alpha) S \times \pi r^2$$

②地球表面から宇宙に出て行く長波放射エネルギー

$$\varepsilon \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2$$

～惑星温度と放射平衡～

放射平衡状態: ①=②

$$(1 - \alpha)S \times \pi r^2 = \varepsilon \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2$$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha)S}{4\varepsilon\sigma}}$$

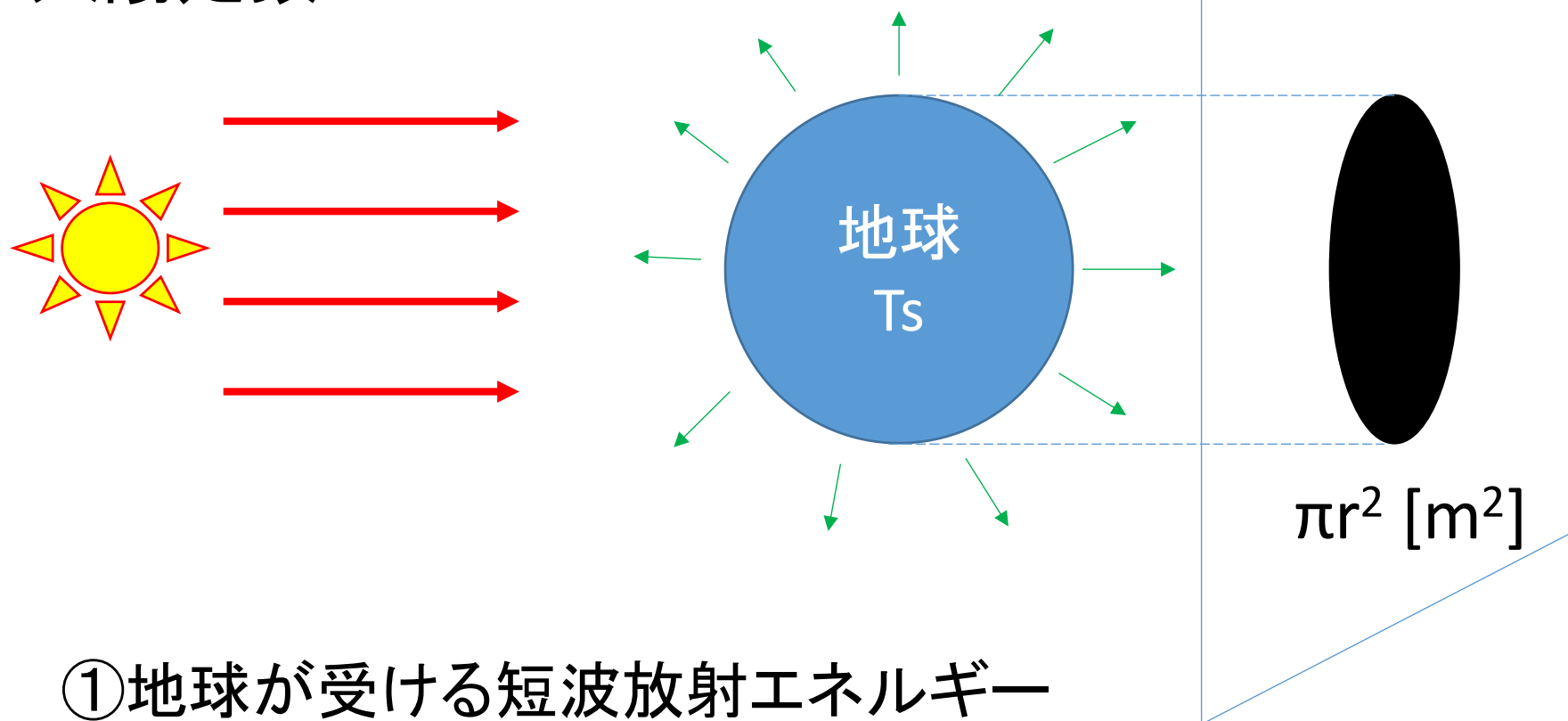
地球表面の平均 $\alpha=0.3$ 地球表面の平均 $\varepsilon=1.0$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{(1 - 0.3) \times 1360}{4 \times 1 \times 5.67 \times 10^{-8}}} \approx 255 \text{ [K]} = -18[^\circ\text{C}]$$

平均地球表面温度(15°C)を大きく下回る！

～惑星温度と放射平衡～

太陽定数 $S = 1360 \text{ W m}^{-2}$



①地球が受ける短波放射エネルギー

$$(1 - \alpha) S \times \pi r^2$$

②地球表面から宇宙に出て行く長波放射エネルギー

$$\varepsilon \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2$$

～惑星温度と放射平衡～

放射平衡状態: ①=②

$$(1 - \alpha)S \times \pi r^2 = \varepsilon \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2$$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha)S}{4\varepsilon\sigma}}$$

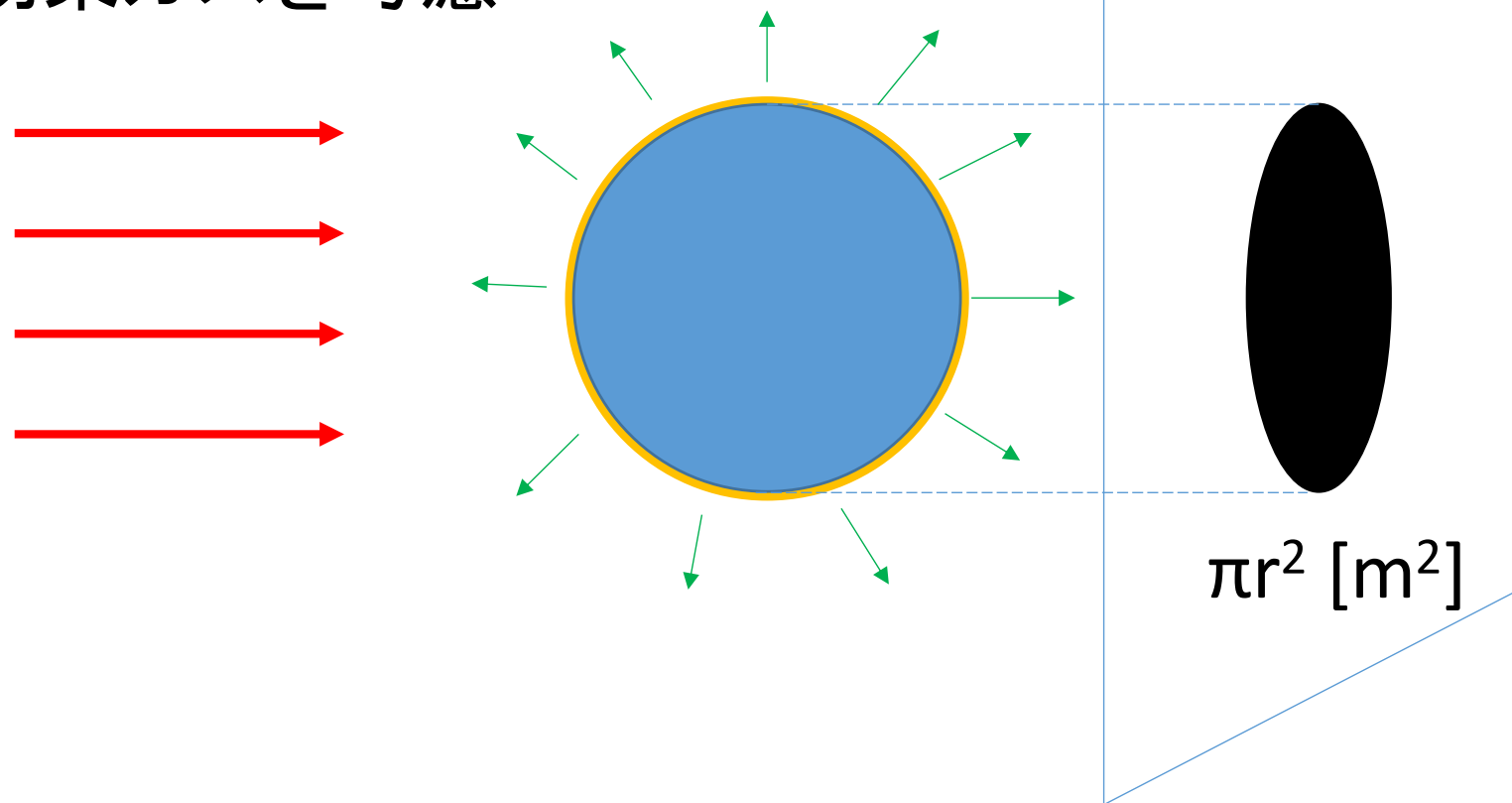
地球表面の平均 $\alpha=0.3$ 地球表面の平均 $\varepsilon=1.0$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{(1 - 0.3) \times 1360}{4 \times 1 \times 5.67 \times 10^{-8}}} \approx 255 \text{ [K]} = -18[^\circ\text{C}]$$

平均地球表面温度(15°C)を大きく下回る！

～惑星温度と放射平衡～

温室効果ガスを考慮



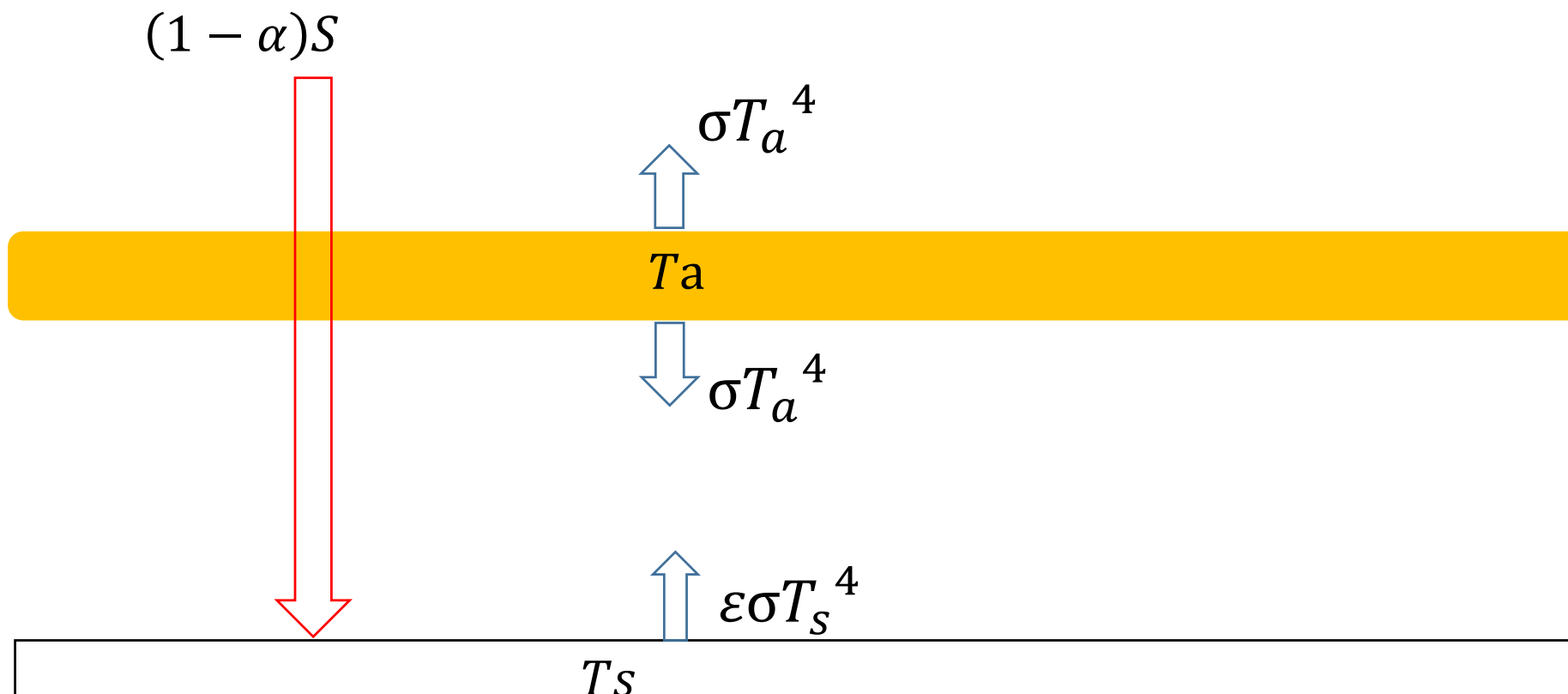
仮定

1. 大気は短波放射を完全に透過する
2. 大気は長波放射を完全に吸収する
3. 大気の厚さは無視できる

～惑星温度と放射平衡～

仮定

1. 大気は短波放射を完全に透過する
2. 大気は長波放射を完全に吸収する

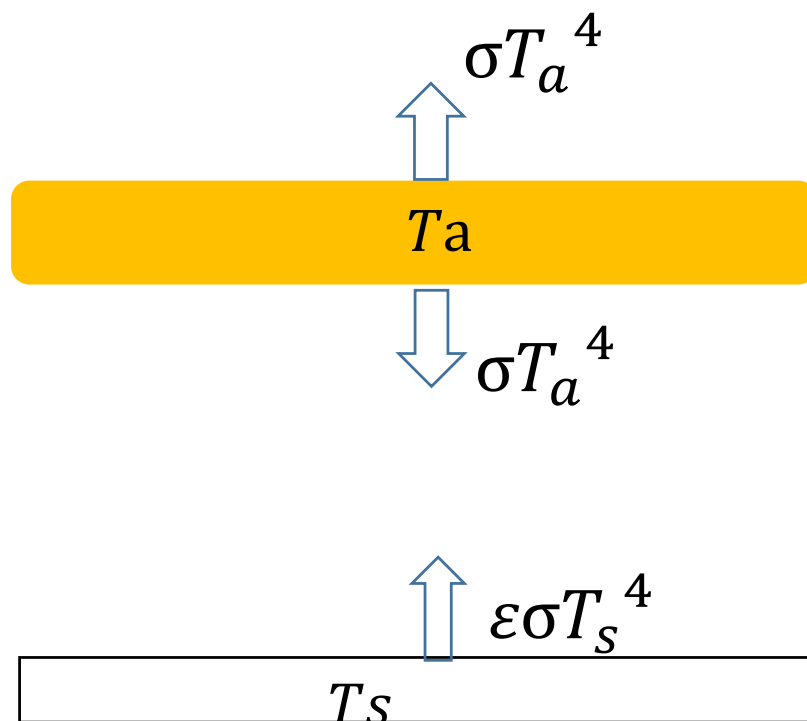


～惑星温度と放射平衡～

大気における放射バランス

①大気から出ていく長波放射: $2 \times \sigma T_a^4 \times 4\pi r^2$

②地球から大気に入射する長波放射: $\varepsilon \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2$



$$\varepsilon \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2 = 2 \times \varepsilon \sigma T_a^4 \times 4\pi r^2$$

$$T_a^4 = \frac{T_s^4}{2}$$

$$T_a = T_s \sqrt[4]{\frac{1}{2}}$$

～惑星温度と放射平衡～

地球表面における放射バランス

①地球が受ける短波放射:

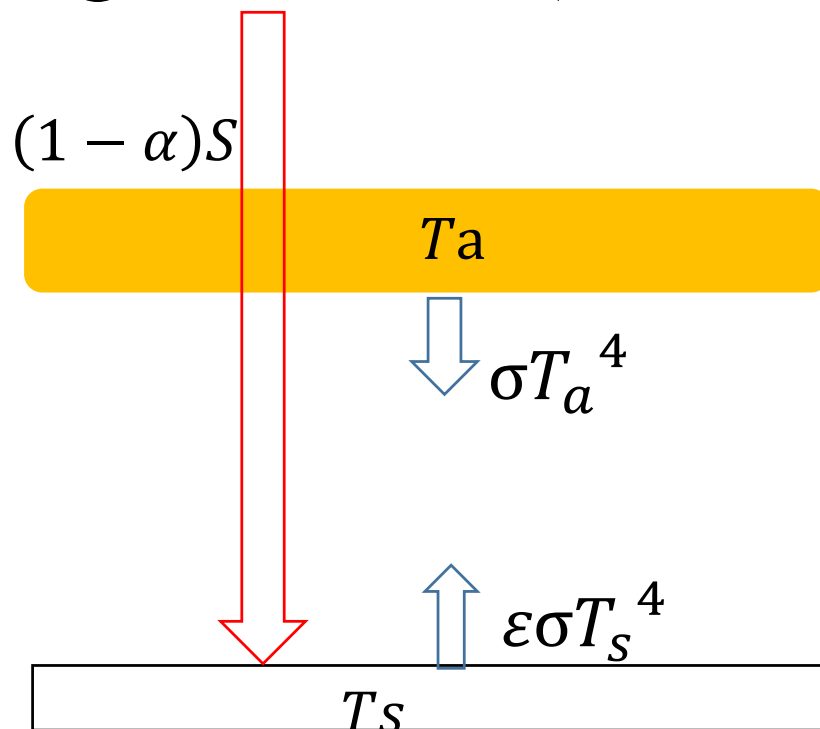
$$(1 - \alpha)S \times \pi r^2$$

②地球から出ていく長波放射:

$$\varepsilon \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2$$

③地球が受ける長波放射:

$$\varepsilon \sigma T_a^4 \times 4\pi r^2$$



$$(1 - \alpha)S \times \pi r^2 + \varepsilon \sigma T_a^4 \times 4\pi r^2 = \varepsilon \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2$$

～惑星温度と放射平衡～

地球表面における放射バランス

$$(1 - \alpha)S \times \pi r^2 = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) \times 4\pi r^2$$

大気における放射バランスより

$$T_a^4 = \frac{T_s^4}{2}$$

よって

$$(1 - \alpha)S \times \pi r^2 = \frac{1}{2} \varepsilon \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2$$

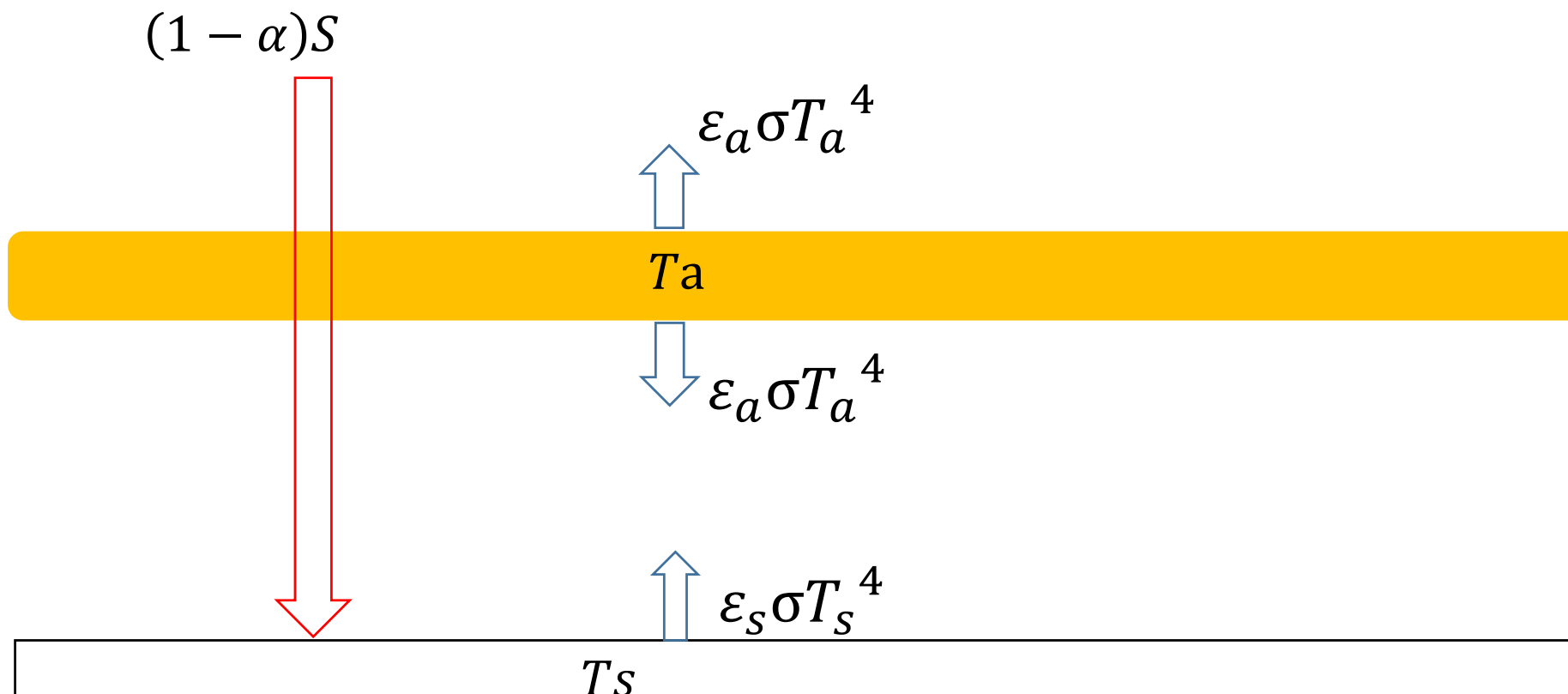
$$T_s = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha)S}{2\varepsilon\sigma}} \approx 303 \text{ [K]} = 30[^\circ\text{C}]$$

温室効果ガスの影響

～惑星温度と放射平衡～

仮定

1. 大気は短波放射を完全に透過する
2. 大気は長波放射を90%吸収する
3. 地面の射出率は98%

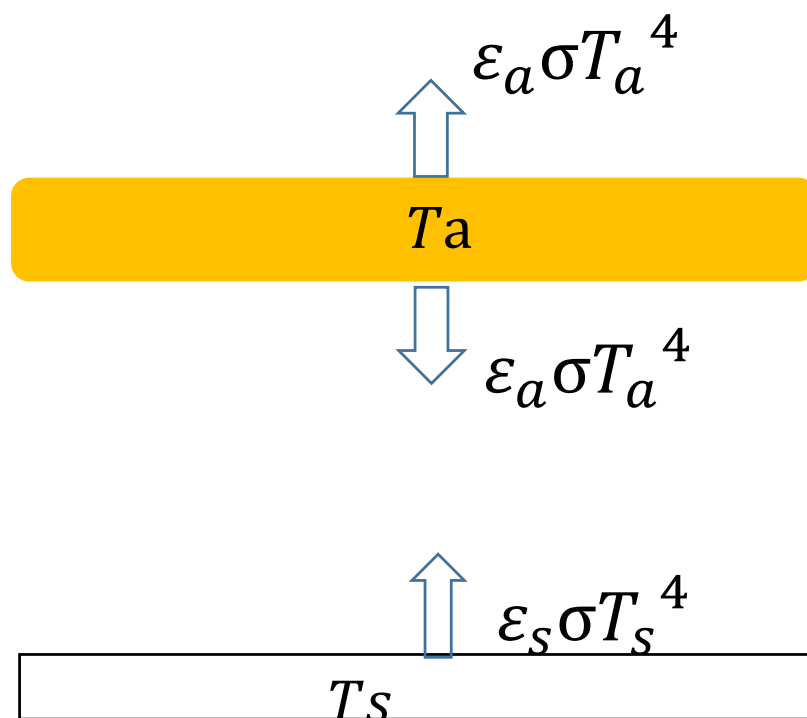


～惑星温度と放射平衡～

大気における放射バランス

①大気から出ていく長波放射: $2 \times \varepsilon_a \sigma T_a^4 \times 4\pi r^2$

②地球から大気に入射する長波放射: $\varepsilon_a \varepsilon_s \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2$



$$\varepsilon_a \varepsilon_s \sigma T_s^4 \times 4\pi r^2 = 2 \times \varepsilon_a \sigma T_a^4 \times 4\pi r^2$$

$$T_a^4 = \frac{\varepsilon_s T_s^4}{2}$$

$$T_a = T_s \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_s}{2}}$$

～惑星温度と放射平衡～

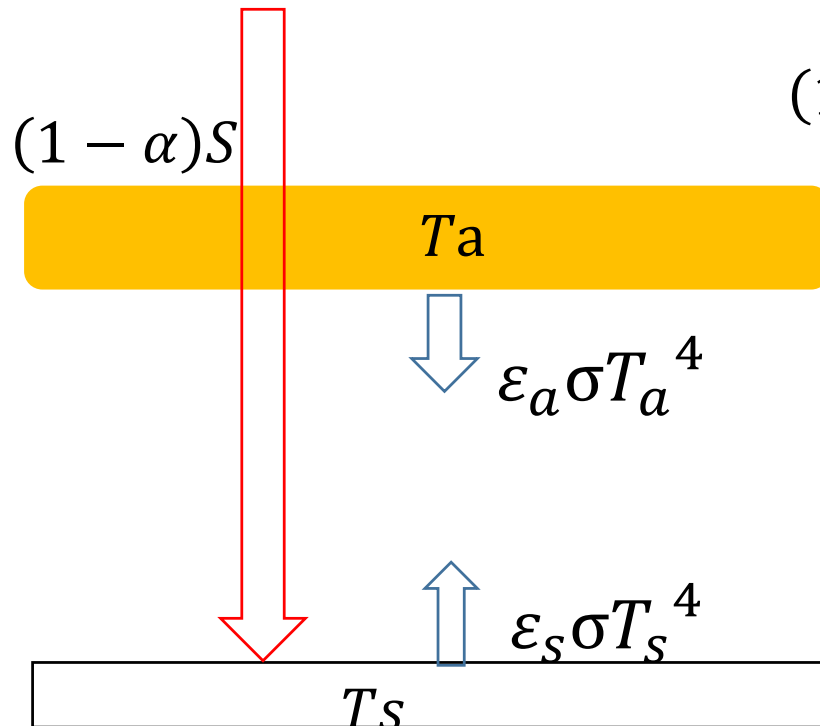
地球表面における放射バランス

①地球が受ける短波放射: $(1 - \alpha)S \times \pi r^2$

②地球から出ていく長波放射: $\varepsilon_s \sigma T_s^4 4\pi r^2$

③地球が受ける長波放射: $\varepsilon_s \varepsilon_a \sigma T_a^4 \times 4\pi r^2$

$$(1 - \alpha)S \times \pi r^2 = \sigma(\varepsilon_s T_s^4 - \varepsilon_s \varepsilon_a T_a^4) \times 4\pi r^2$$



～惑星温度と放射平衡～

地球表面における放射バランス

$$(1 - \alpha)S \times \pi r^2 = \sigma(\varepsilon_s T_s^4 - \varepsilon_s \varepsilon_a T_a^4) \times 4\pi r^2$$

大気における放射バランスより

$$T_a^4 = \frac{\varepsilon_s T_s^4}{2}$$

よって

$$(1 - \alpha)S \times \pi r^2 = T_s^4 \left(\varepsilon_s \sigma - \varepsilon_s^2 \varepsilon_a \frac{\sigma}{2} \right) \times 4\pi r^2$$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha)S}{4 \left(\varepsilon_s \sigma - \varepsilon_s^2 \varepsilon_a \frac{\sigma}{2} \right)}} \approx 295.8 \text{ [K]} = 22.7[^\circ\text{C}]$$

$$T_a = T_s \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_s}{2}} = 247.5 \text{ [K]} \cong -25.6[^\circ\text{C}]$$

温室効果ガスの影響

有効放射温度～金星と火星～

地表面温度： 金星730 K, , 火星220 K

太陽定数： 金星 2600 W m^{-2} , 火星 590 W m^{-2}
0.723 AU 1.52 AU

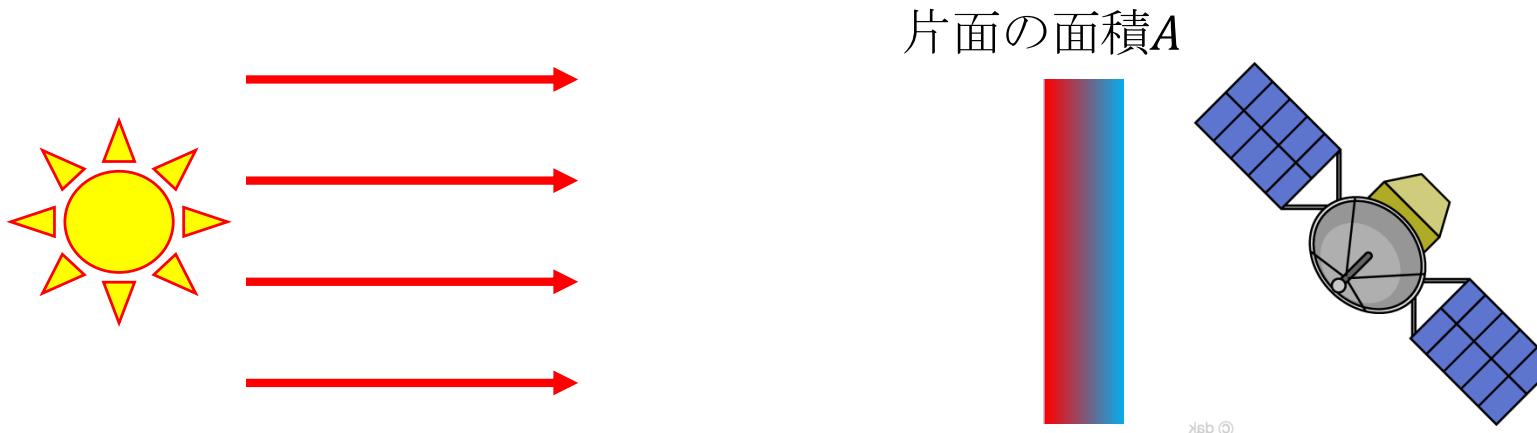
アルベド： 金星0.78, , 火星0.24

有効放射温度： 金星224 K , 火星210 K

	金星	地球	火星
地表面温度 [K]	730	288	220
太陽定数 [W m^{-2}]	2600	1380	590
惑星アルベド	0.78	0.3	0.24
主要気体の存在比率	CO ₂ :96.5 % N ₂ :3.5%	N ₂ :78.1 % O ₂ :20.9% H ₂ O:~2% CO ₂ :0.04%	CO:95.3% N ₂ :2.7% Ar:1.6%
重力加速度 [m s^{-2}]	8.9	9.8	3.7
地表面気圧[hPa]	92000	1013	6
1昼夜の長さ	117日	1日	1日

金星の地表面気圧はなぜ大きい？
金星はなぜ高温？

大気の層: 数百



加熱面から裏面への熱移動は熱伝導によって生じる。熱伝導率が十分小さいと仮定すると、

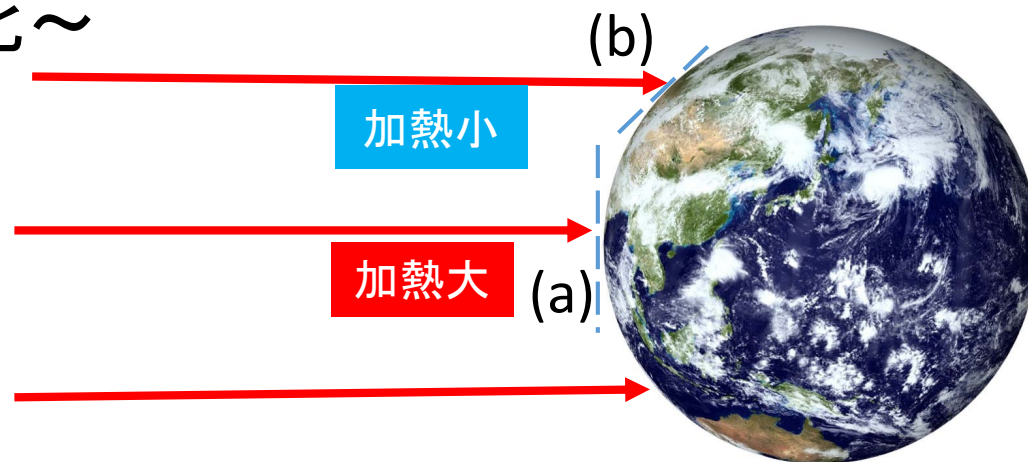
①太陽に正対する衛星が受ける短波放射エネルギー
 $(1 - \alpha)S \times A$

②衛星が射出する長波放射エネルギー
 $\varepsilon \sigma T_s^4 \times A$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha)S}{4\varepsilon\sigma}} \cong 374 \text{ K } (S = 1360 \text{ W m}^{-2}, \alpha = 0.2, \varepsilon = 0.98 \text{ で計算})$$

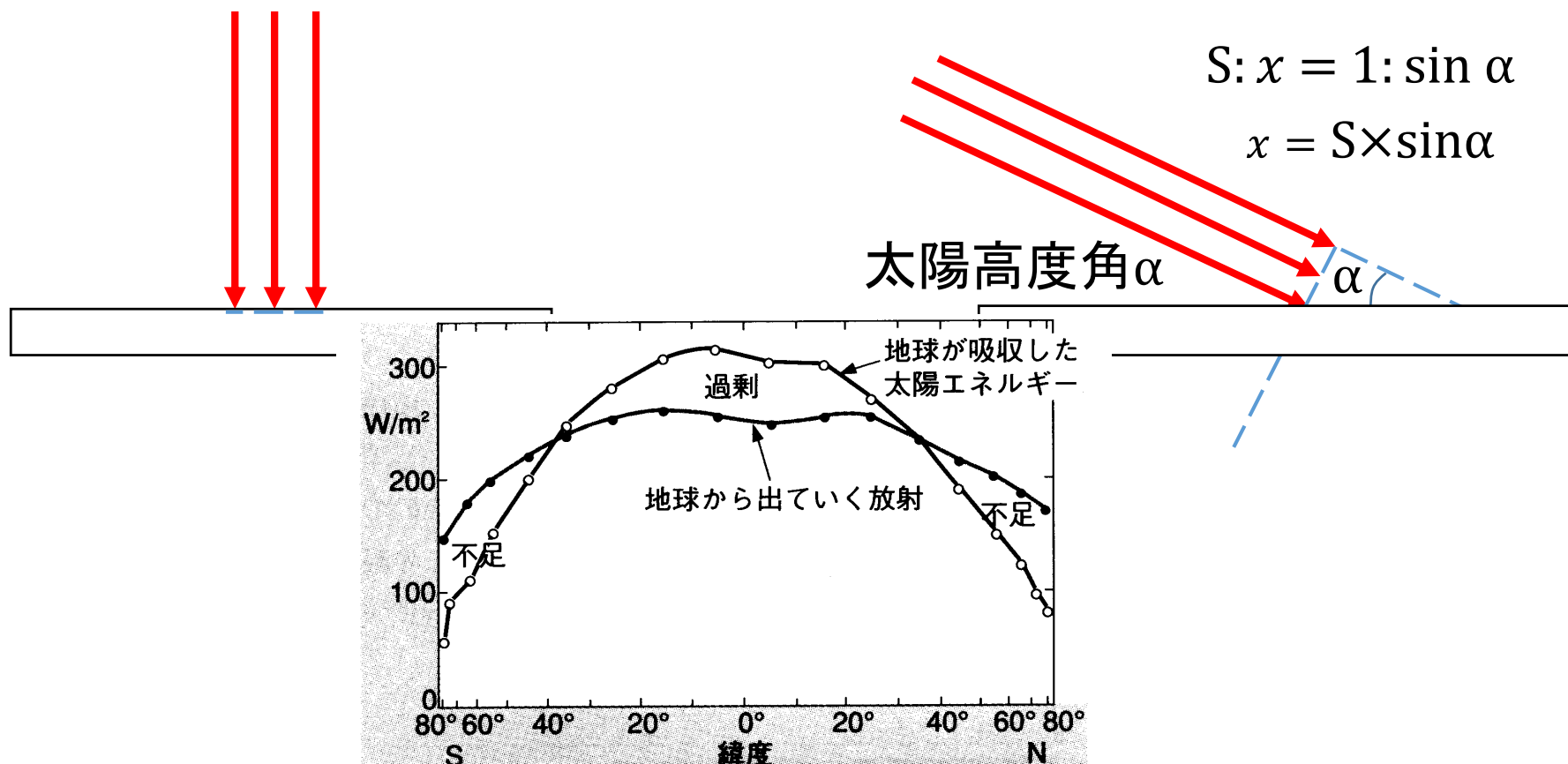
✓ 放射～日変化・季節変化～

地球太陽定数 $S = 1360 \text{ W m}^{-2}$



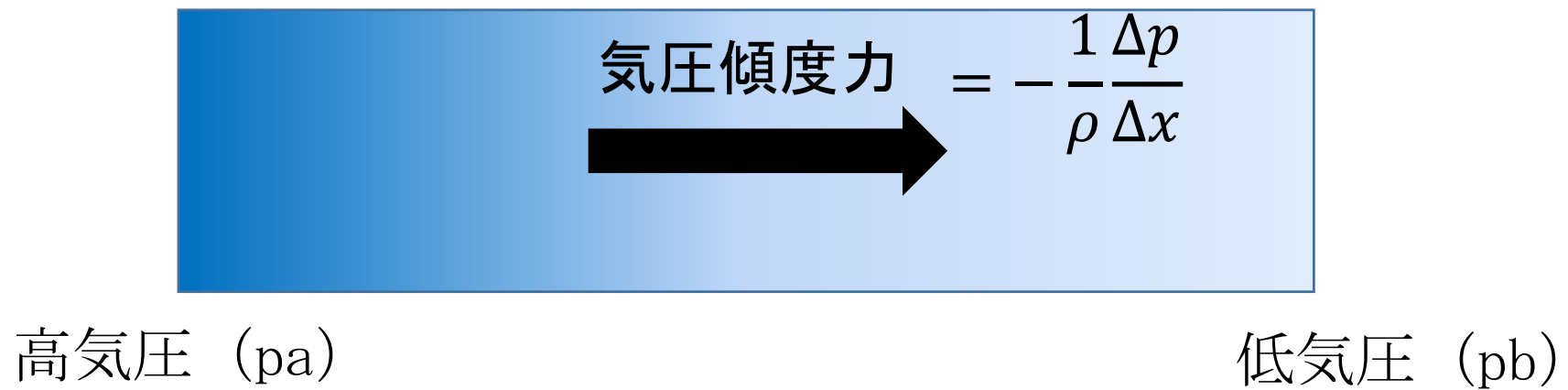
(a) 放射強度 $S [\text{W m}^{-2}]$

(b) 放射強度 $S \times \sin \alpha [\text{W m}^{-2}]$

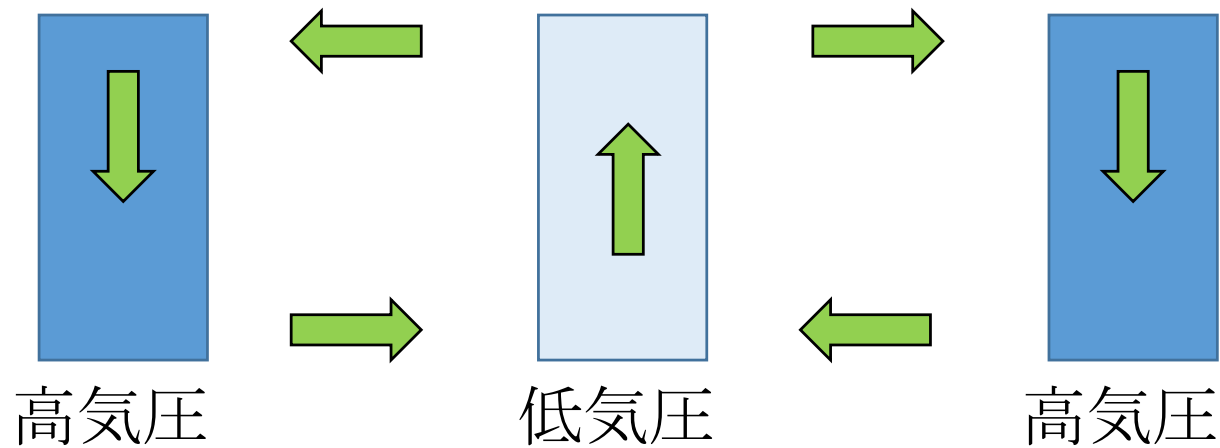


気圧と大気流れ

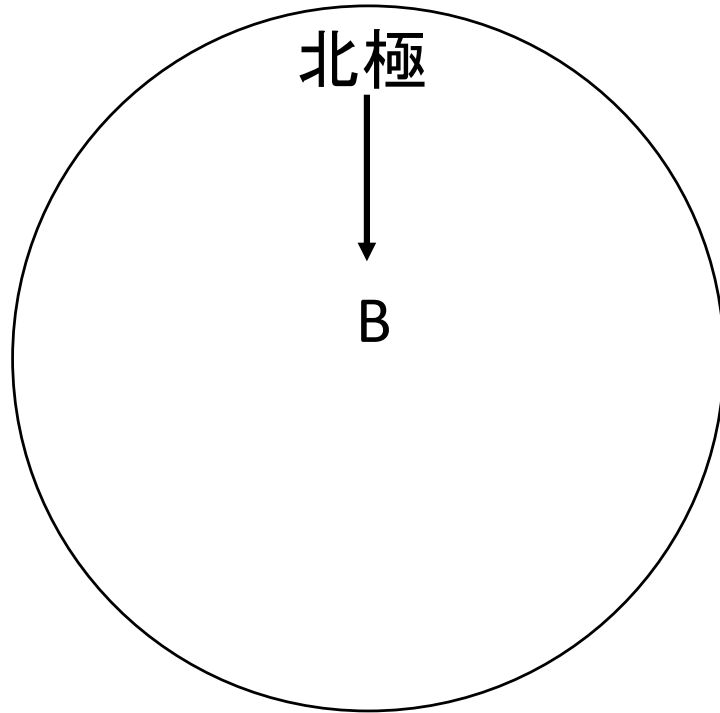
水平面



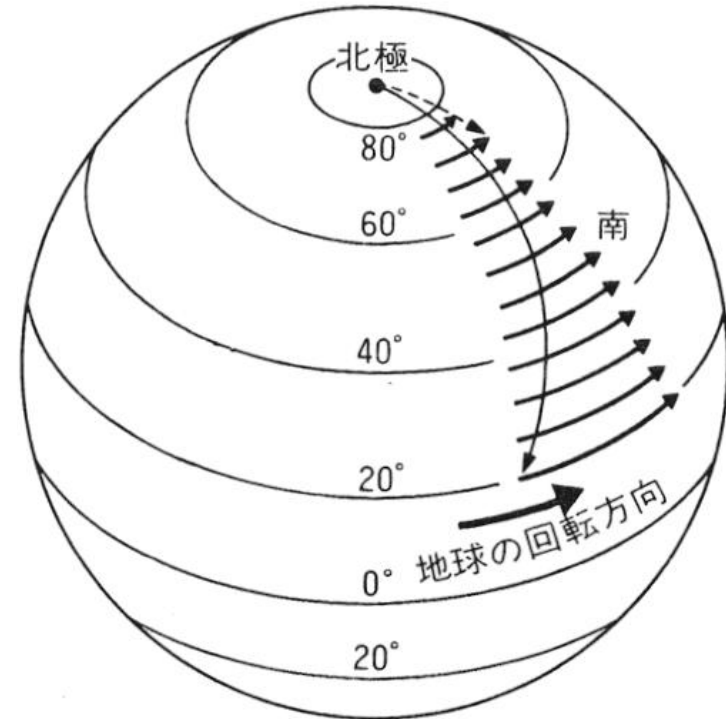
鉛直面



気圧傾度力と風向き



宇宙から見ると(慣性系)



地球から見ると(回転座標系)

進行方向直角に力を受けているように見える.

コリオリ力

コリオリ力

回転球体上(自転する地球)

北半球: 進行方向右向き

南半球: 進行方向左向き

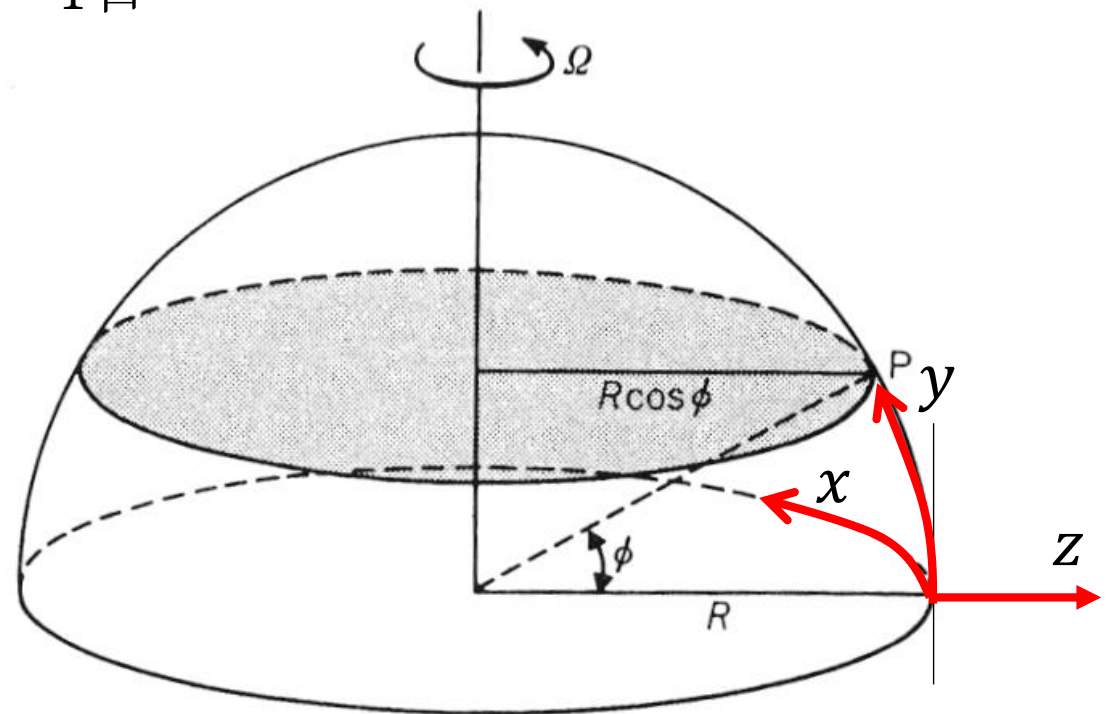
ともに風速に比例 $(-fu, fv)$,
 u : 東西風速 $[m\ s^{-1}]$
 v : 南北風速 $[m\ s^{-1}]$

地球自転による角速度: $\Omega = \frac{2\pi}{1\text{日}} = 7.292 \times 10^{-5} [s^{-1}]$

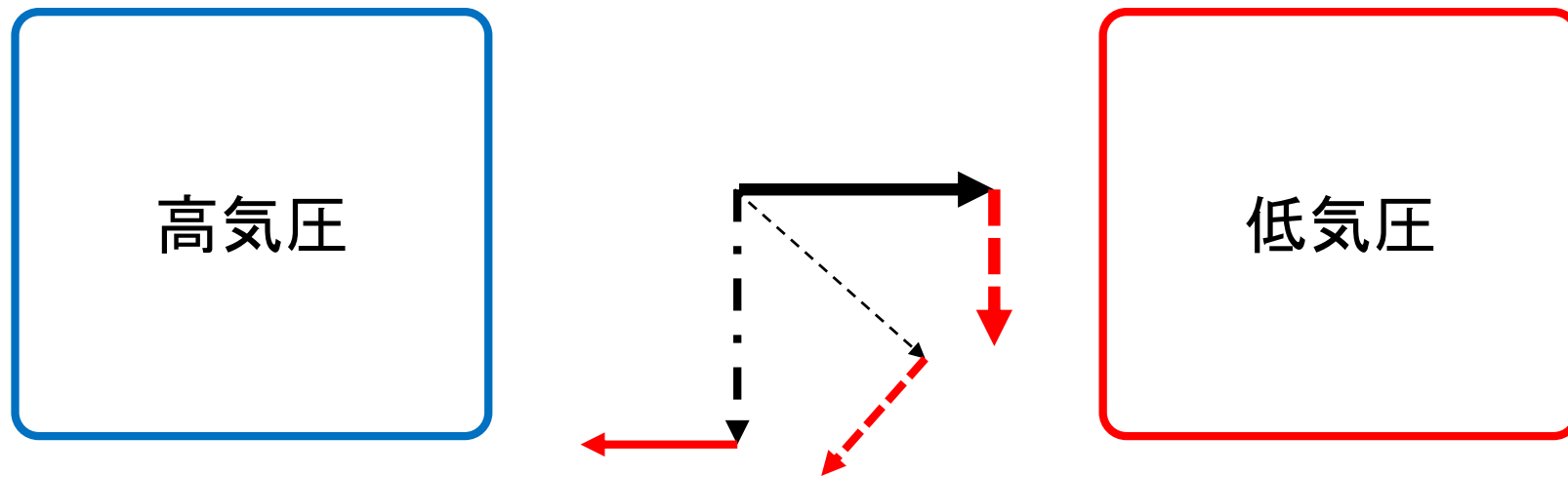
コリオリパラメータ

$$f = 2\Omega \sin \phi$$

ϕ : 緯度 $[\text{rad}]$



惑星自転の作用により高気圧→低気圧は成立しない



気圧傾度: $-\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x}$



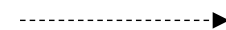
コリオリ力



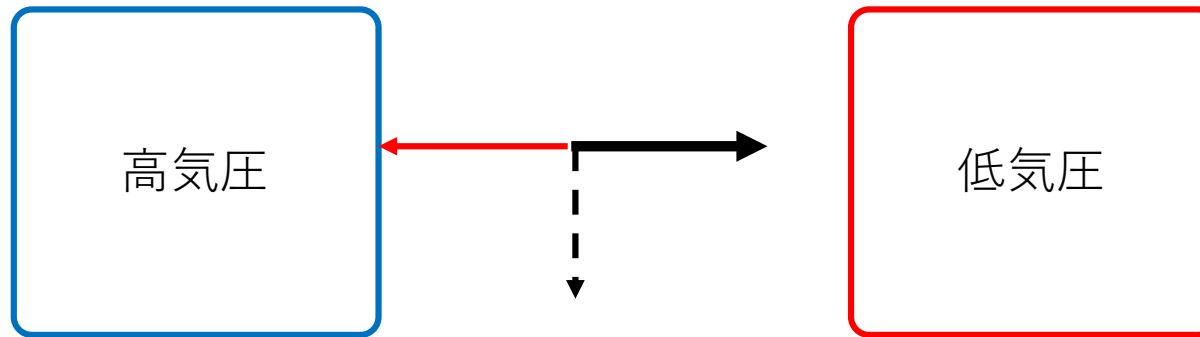
地衡風



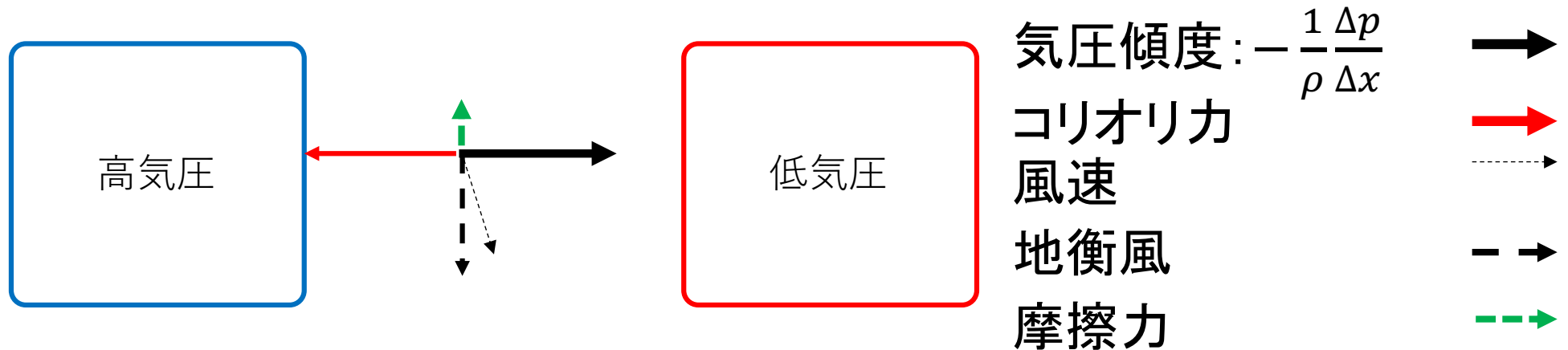
地衡風バランスを
説明するための風
速とコリオリ力



地衡風：コリオリ力と気圧傾度力がバランス



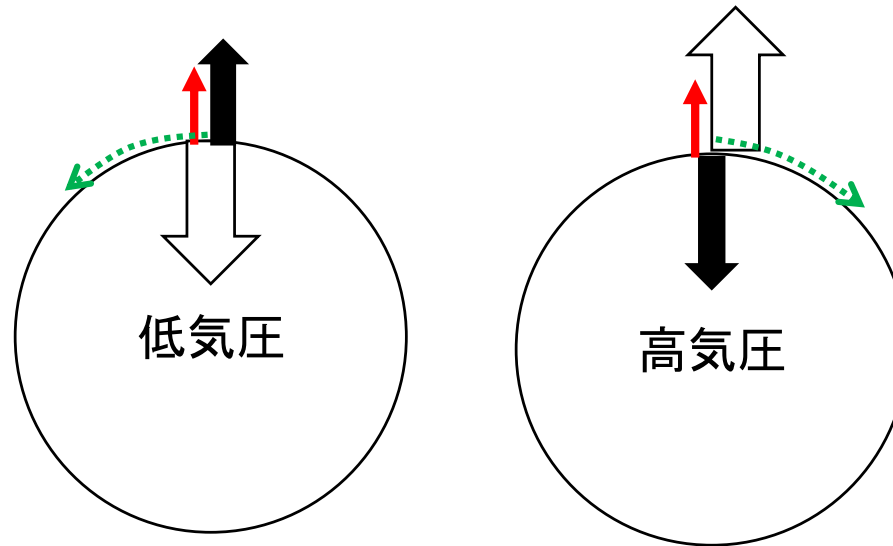
地表付近(～1km)：摩擦力と気圧傾度力、コリオリ力のバランス



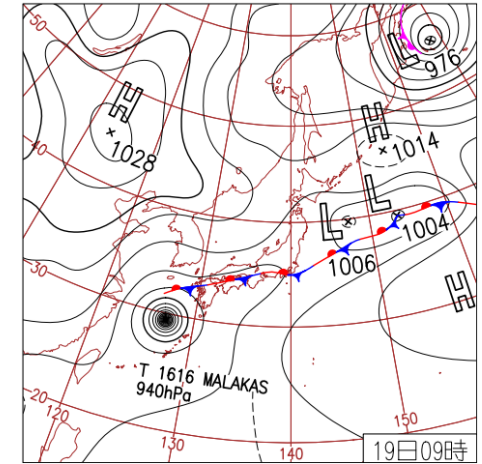
摩擦力作用：風速が弱まる→コリオリ力の低下
→地衡風バランスが崩れる→風速が低圧側に傾く

発達した熱帯低気圧や台風の場合：空気塊は曲線運動

- 気圧傾度力
- コリオリ力
- 遠心力
- 風速



北半球の場合

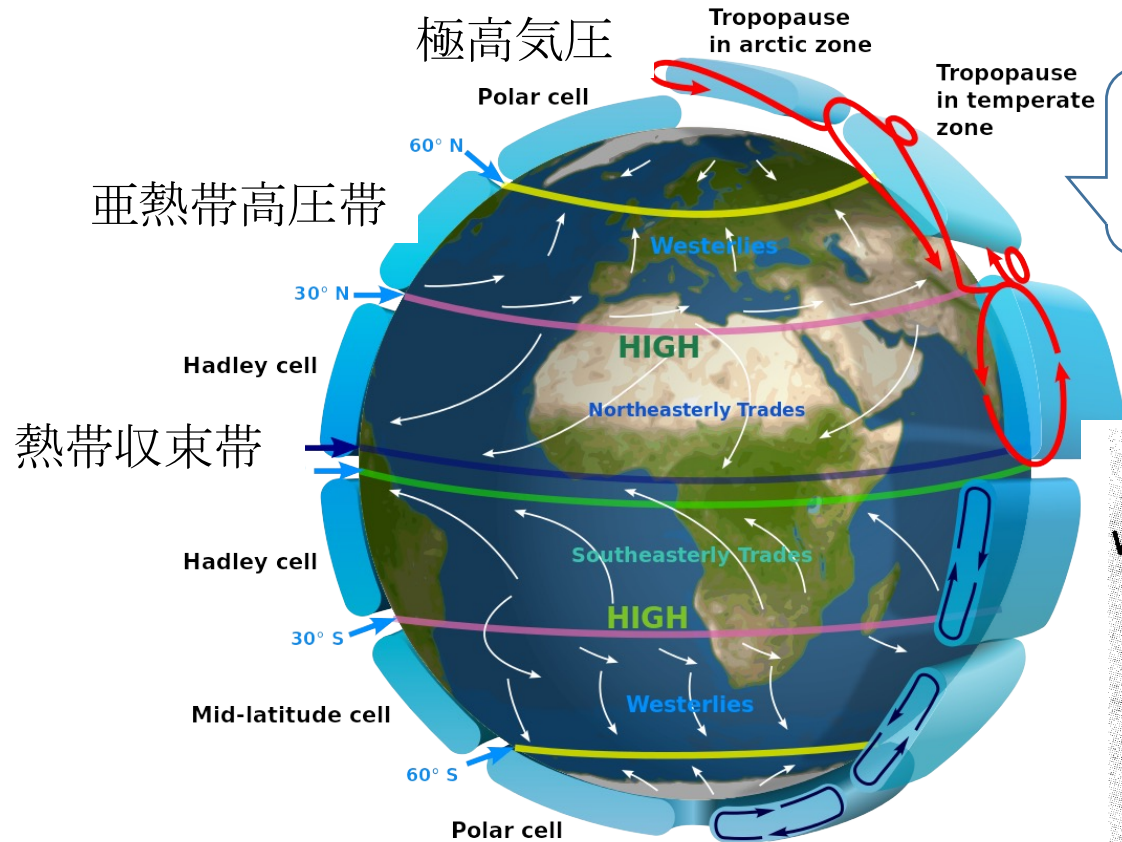


気圧傾度力、コリオリ力、遠心力の釣り合い

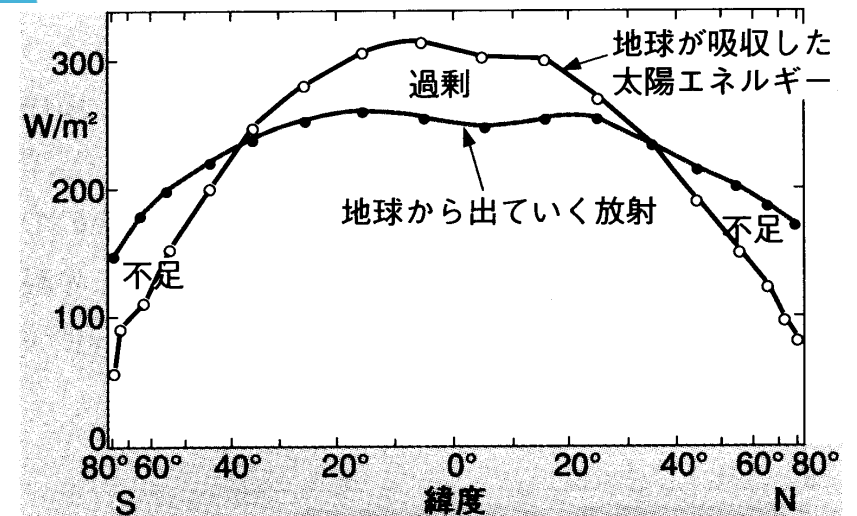


傾度風

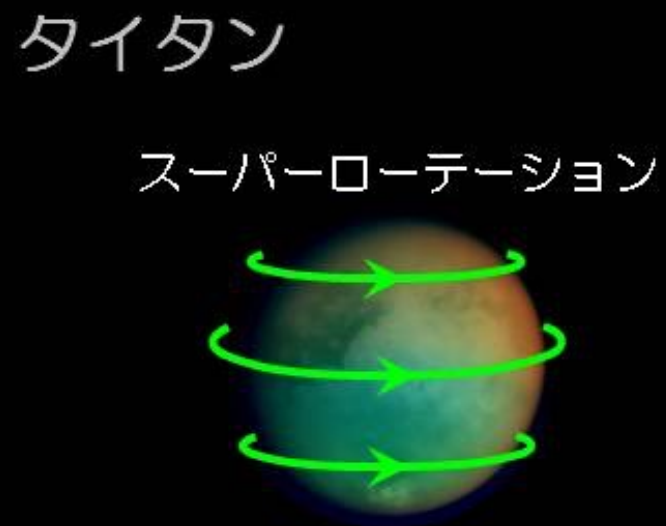
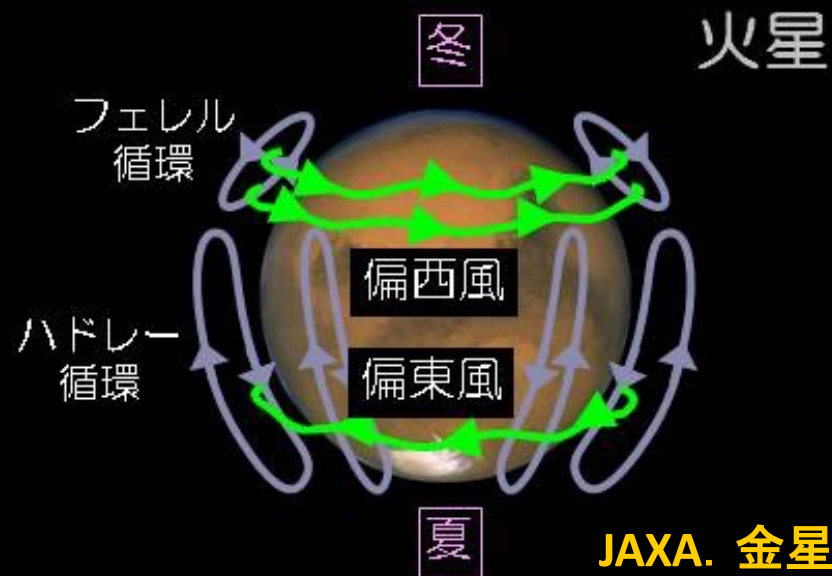
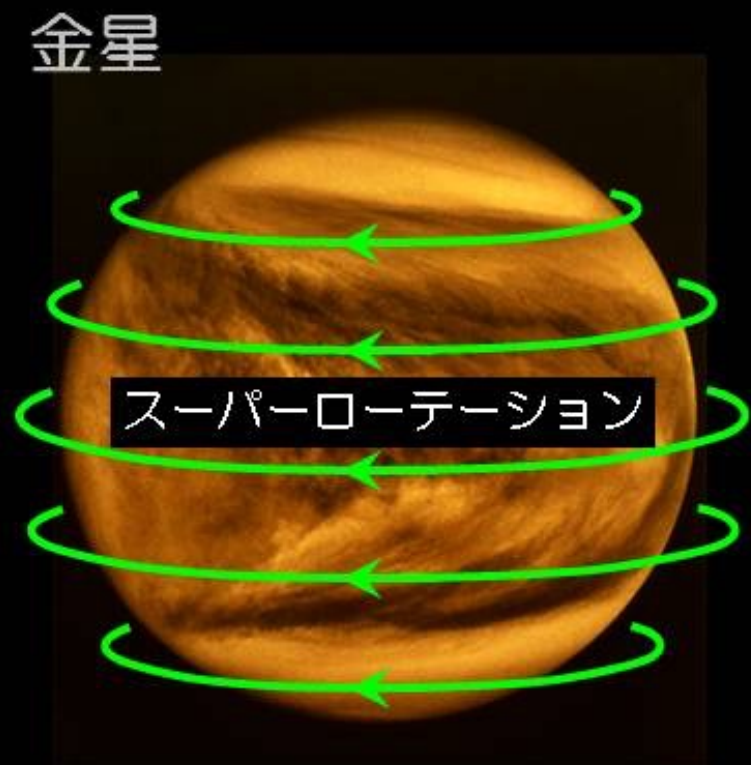
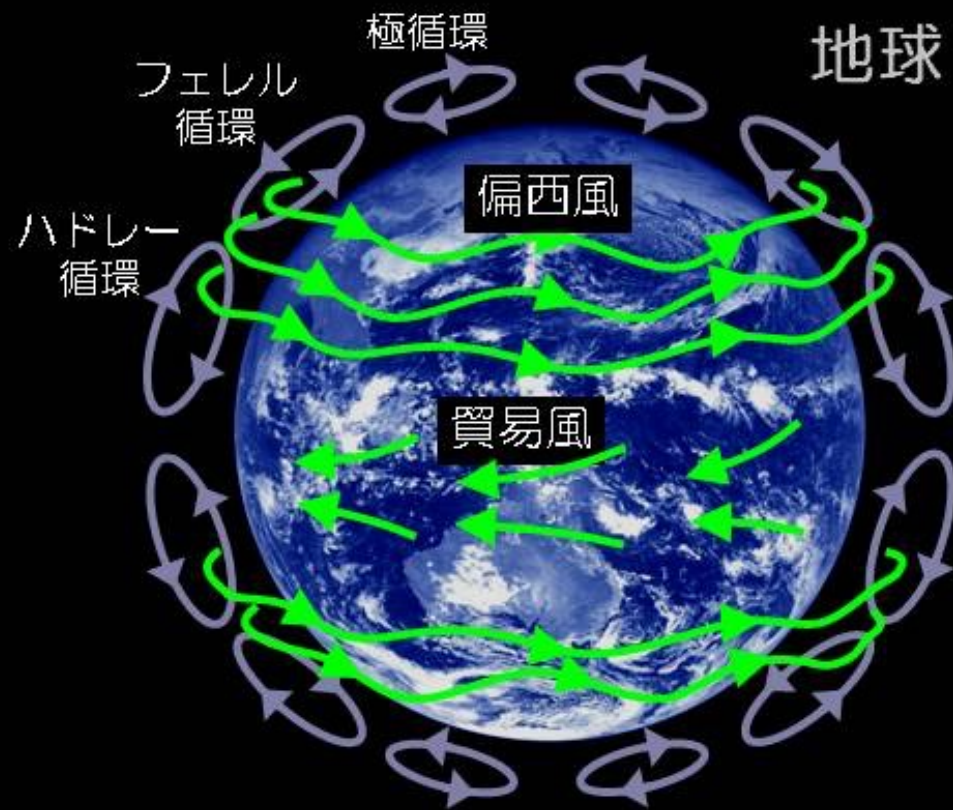
大気大循環



地球上のエネルギーの不均一さが大気大循環を駆動。
その結果、多雨地域、乾燥地域など、様々な気候区分が形成される。



	金星	地球	火星
1昼夜	117日	1日	1日
地表温度日変化	数K	数10 K	0~100 K
地表面温度季節変化	数K	50 K	150 K
大気量(地球を1として)	100	1	0.01



JAXA. 金星探査機 あかつきより