

地球流体構造論

Global Fluid Dynamics and Natural Structure Formation

第1部: 地球流体システム論

Part 1: Global Fluid Dynamic System

第2部: 秩序構造形成論

Part 2: Natural Structure Formation

(注: 2022年度までの「地球流体防災論」から名称変更)

水曜日, 8:45~, J201

Wednesday

広島大学先進理工系科学研究科・総合科学部

Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

小澤 久

Hisashi Ozawa

Ver. 2023

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

概要1 Outline 1

Part 1. 地球流体システム論 Global Fluid Dynamic System

- はじめに

Introduction

- 非平衡開放系としての地球流体システム

The global fluid dynamic system: a non-equilibrium open system

- 地球の放射収支

Global radiation balance

- 大気温度の高度分布

Vertical temperature distribution

- 大循環運動による熱輸送

Heat transport by the general circulation

- 熱輸送に伴うエネルギー散逸率

Energy dissipation due to heat transport

概要2 Outline 2

Part 2. 秩序構造形成論 Natural Structure Formation

- 自然界の縞模様
Periodic patterns in nature
- 流体系の散逸構造とその特徴
Dissipative structures of fluid systems
- 粉体流の秩序構造
Pattern formation in granular flows
- 割れ目の周期構造
Periodic patterns of cracks
- フラクタルと散逸構造
Fractal and dissipative structures
- まとめと課題 (小レポート)
Summary and exercises
- 講義資料の画像ファイル (PDF) : Moodle
Lecture materials (PDF): Moodle

参考文献

References

- Lorenz, E. N., “The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere”, WMO, Geneva, 1967.
- Prigogine, I., and I. Stengers, “Order out of Chaos”, Bantam, New York, 1984 (混沌からの秩序, みすず書房).
- Mandelbrot, B. B., “The Fractal Geometry of Nature”, Freeman, New York, 1982.

1. 非平衡開放系としての地球流体システム

The global fluid system: a non-equilibrium open system

閉じた系と開いた系, 平衡と非平衡

Closed and open system, equilibrium and non-equilibrium

閉じた系: 外界とエネルギーや物質のやりとりのない物質系

Closed system: a system without exchanges of energy or matter with its surroundings

(孤立系, 物理的な閉鎖系)

(isolated systems, physically closed systems)

開いた系: 外界とエネルギーや物質のやりとりのある物質系

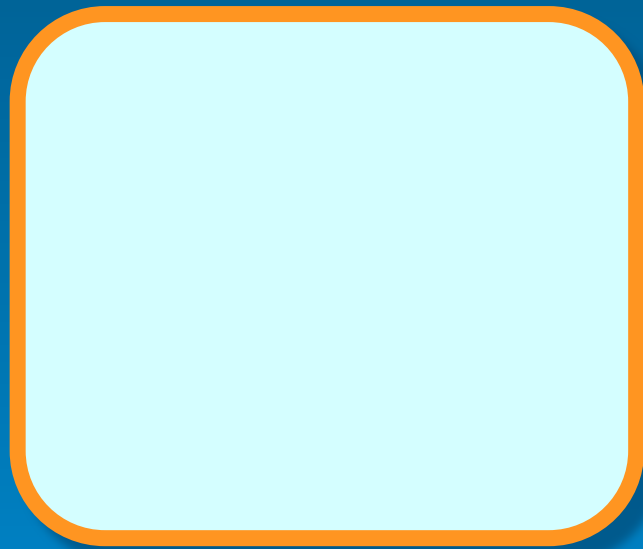
Open system: a system with exchanges of energy or matter with its surroundings

(物理的な開放系)

(physically open systems)

閉じた系

Closed system



熱平衡系

Equilibrium system

十分に時間がたった最終的な定常状態:

The final steady state after long time:

熱平衡状態

Thermodynamic equilibrium state

温度差, 速度差, 濃度差のない均質な
状態 (エントロピー最大)

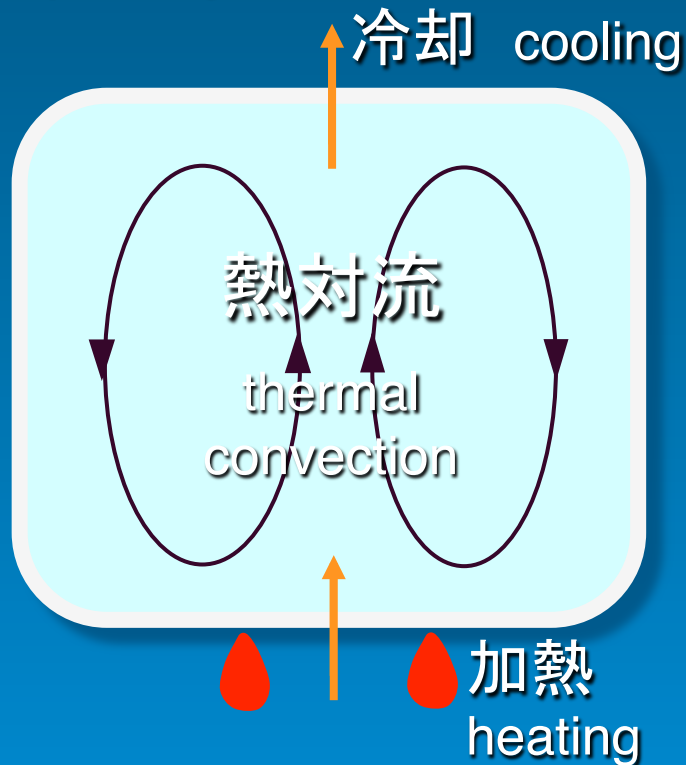
A homogeneous state without temperature or velocity
or concentration differences (maximum entropy)

エネルギーや物質の流れのない“熱死”
の状態

A state without energy or material fluxes: “heat death”

開いた系

Open system



外からエネルギーや物質を取り込む事で、定常状態でも、エネルギーや物質の流れを維持できる。

An open system can maintain energy or material fluxes even in its steady state.

非平衡状態

non-equilibrium state

動きのある“生”の状態

A moving “living” state

非平衡開放系

Non-equilibrium systems

例: 熱対流, 生物, 地球システム

E.g. thermal convection, living systems, the Earth system

対流運動の発達の様子 [実験動画]

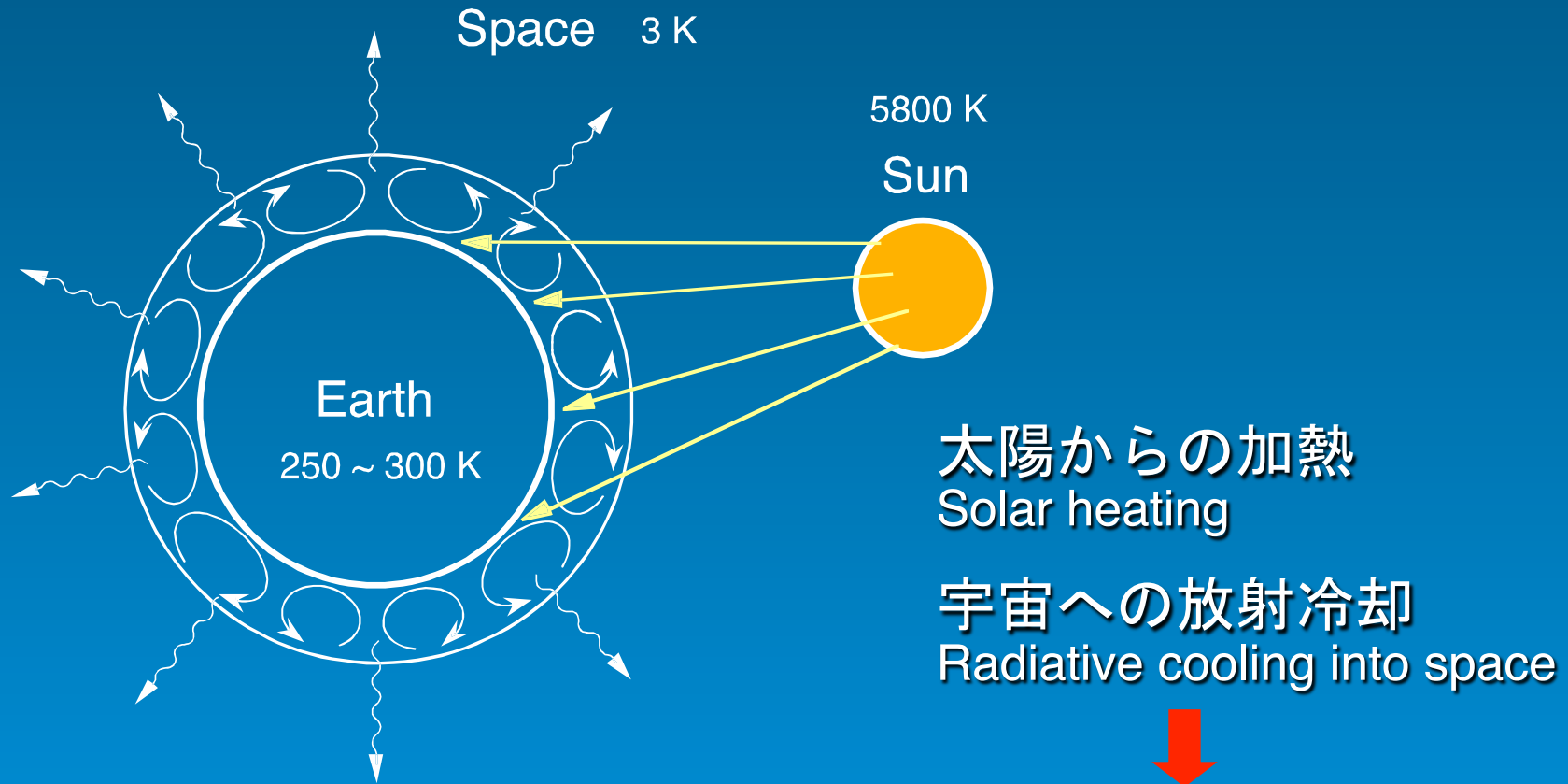
Development of convective motion



Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

地球流体システム: 非平衡開放系

The global fluid system: a non-equilibrium open system



動きのある“生”の状態
Moving “living” state

大気や海洋の大循環運動
Circulation of the atmosphere and oceans

生命活動 living activities

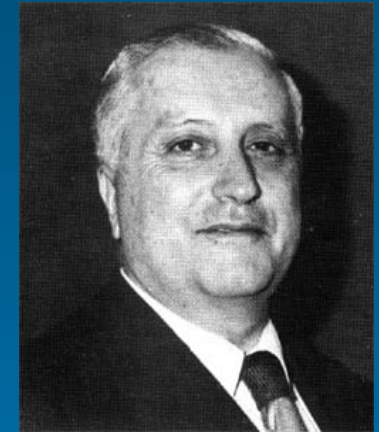
Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

非平衡開放系に共通する特徴

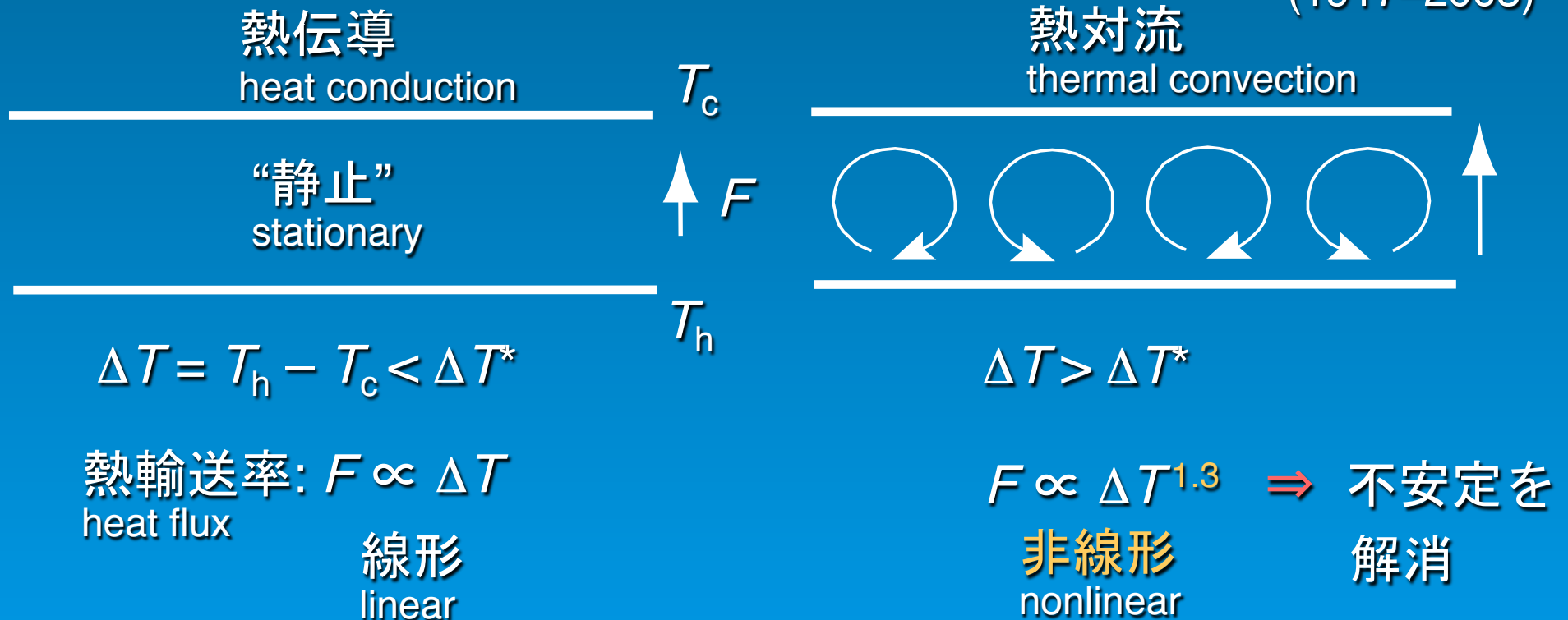
Characteristics of non-equilibrium open systems

非平衡度が大 \Rightarrow 秩序構造が形成 (自己組織化)
large non-equilibrium ordered structure formation

散逸構造: Prigogine (1955)
dissipative structure



Ilya Prigogine
(1917–2003)



Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

散逸構造の例

Examples of dissipative structures

Bénardの熱対流 (上面が空気)

Bénard convection



Velarde and Normand (1980)

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

散逸構造の例

Examples of dissipative structures

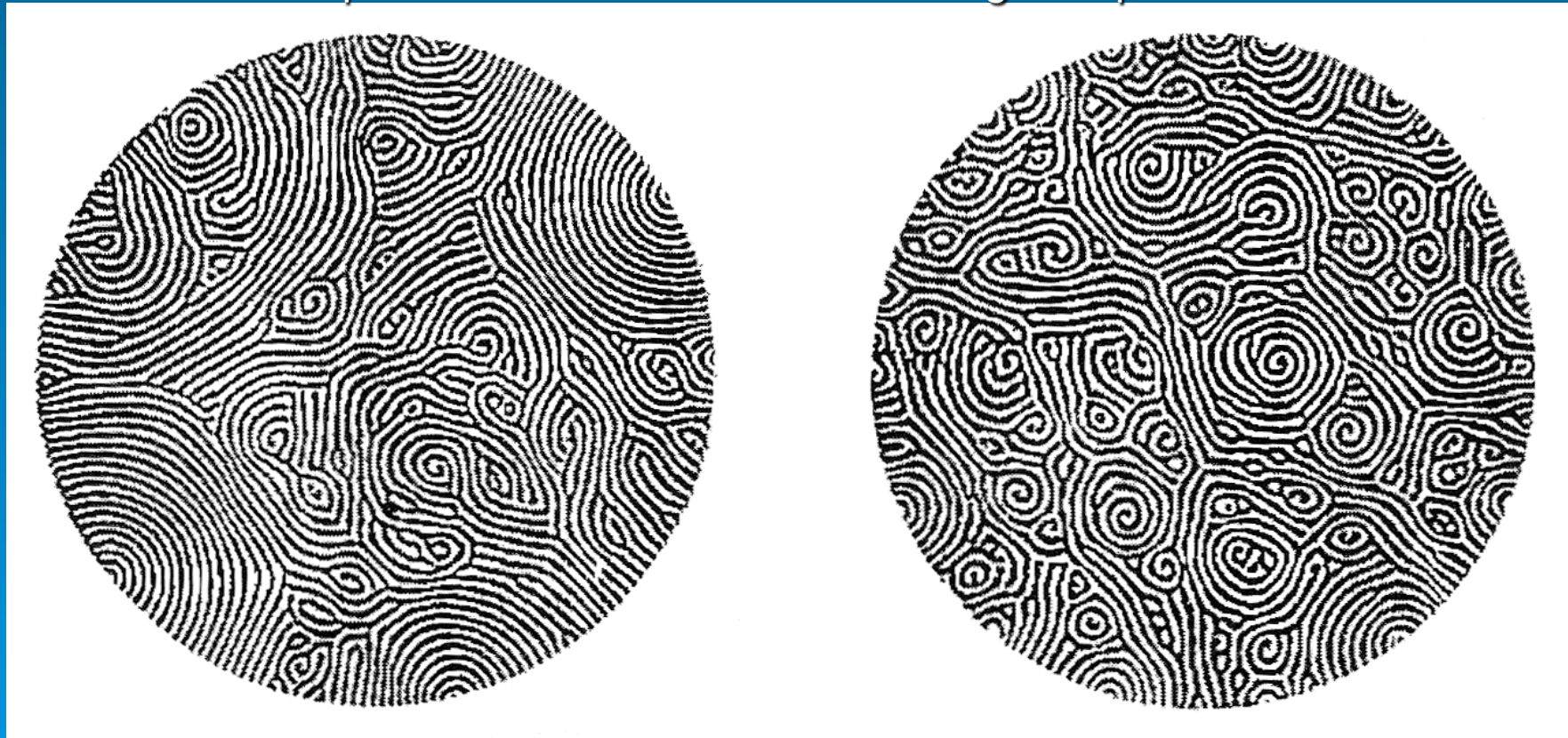
Bénardの熱対流 (上面と下面が固体) Bénard convection

温度差小

small temperature difference

温度差大

large temperature difference



Morris et al. (1993)

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

散逸構造の例

Examples of dissipative structures

地球大気の大循環構造

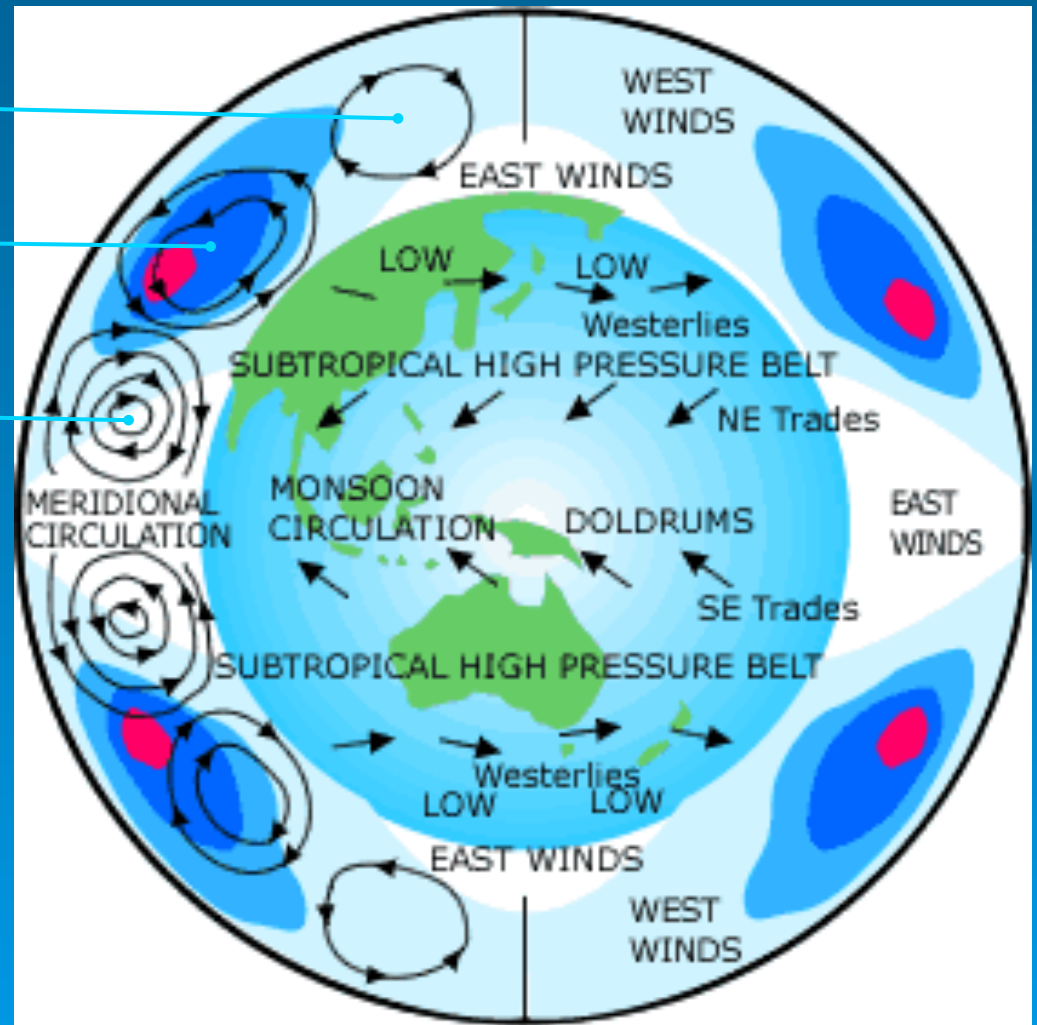
Atmospheric general circulation

極循環
polar circulation

Ferrel 循環
Ferrel circulation

Hadley 循環
Hadley circulation

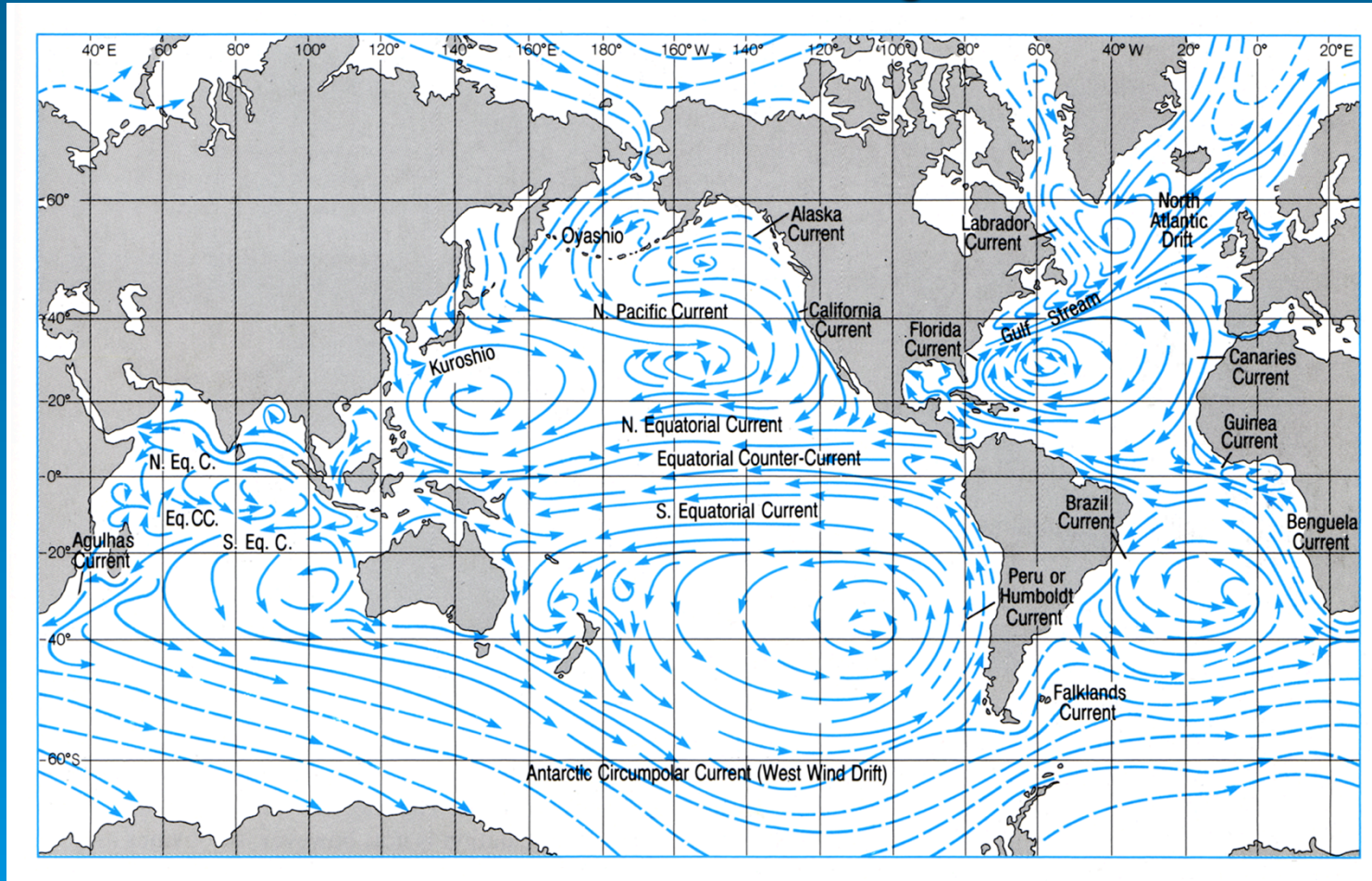
赤道と中緯度と極の3つの
対流セルからなる循環構造
3-cell circulation structure



散逸構造の例

Examples of dissipative structures

海洋表層の循環運動 oceanic general circulation



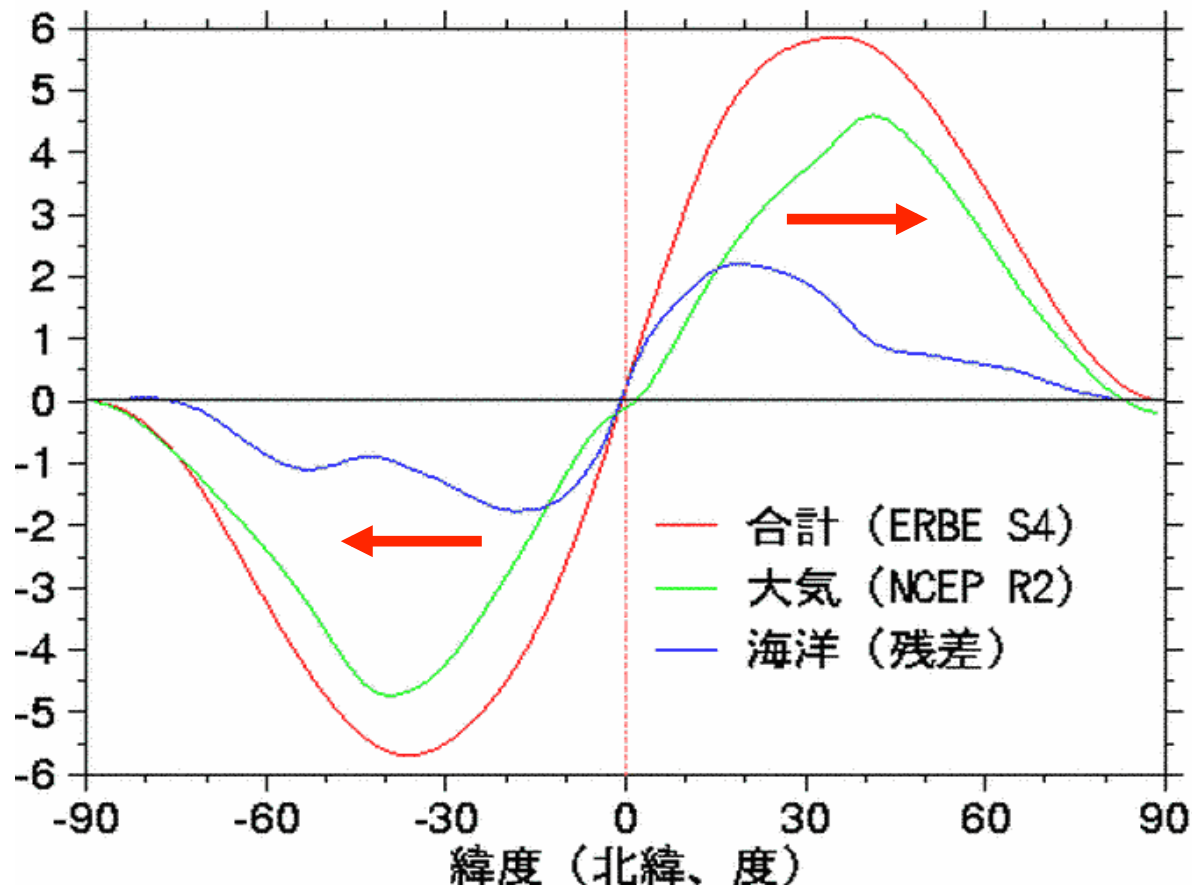
Brown et al. (1989)

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

地球全体の熱輸送の状態

Total heat transport in the Earth

北向きエネルギー輸送 (10^{15} W), 1985年2月 - 1989年4月



最も高い効率で熱を高温の赤道域から、低温の極域へ運ぶ状態。

The most efficient heat transport from the equator to the polar regions.

(エネルギー最大散逸状態 → Part 1-4.)

by K. Masuda

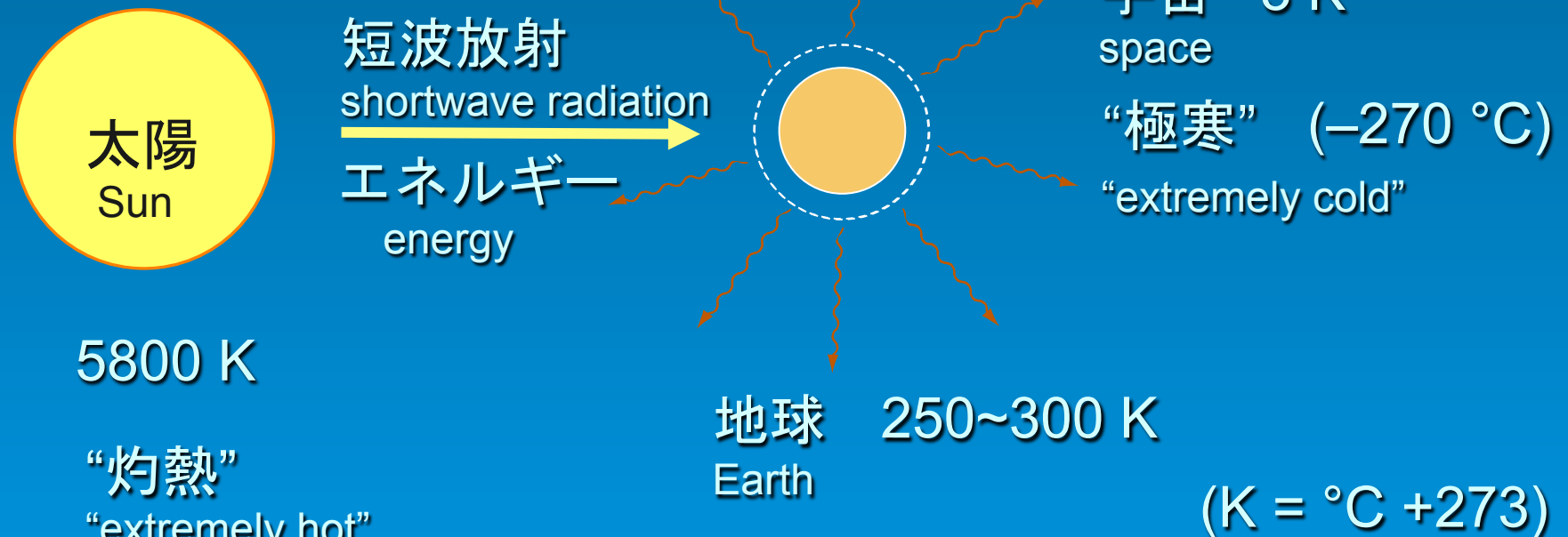
Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

1-2. 地球の放射収支 Global radiation balance

地球は、太陽放射によって暖められている。

The Earth is heated by solar radiation

短波放射 (太陽光)
shortwave radiation (sunlight)



[非平衡開放系]

[non-equilibrium open system]

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

すべての物質は、“暖かさの度合い” に応じた量の放射の
(固体, 液体, 気体 ...) 絶対温度

エネルギーを外向きに放出する。 ← 熱運動

All heated materials emit radiant energy according to the absolute temperature of the materials. ← thermal motion

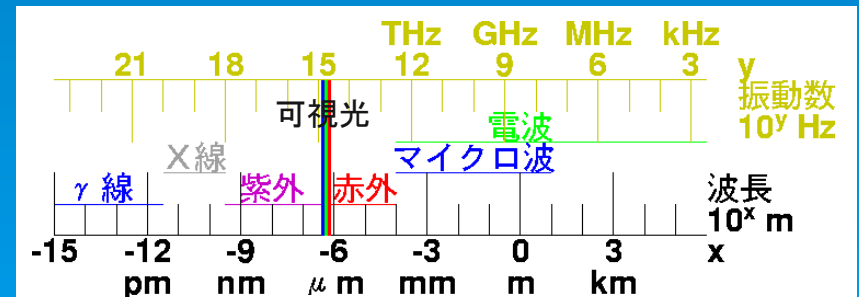
- 放射のエネルギー流 \propto (絶対温度)⁴
Radiant energy flux (absolute temperature)⁴

[Stefan–Boltzmannの法則 (絶対温度の4乗則)]
the forth power law

$$F \approx \sigma T^4 \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8}$$

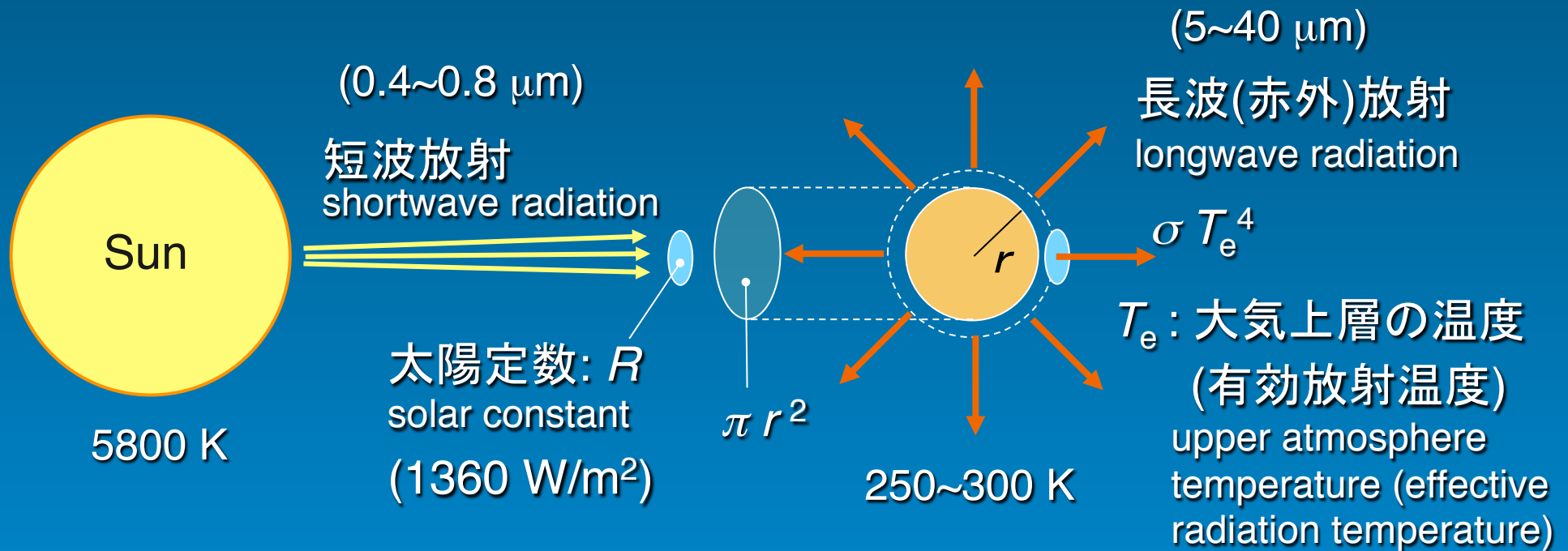
(W/m²) (K) Stefan–Boltzmann constant

- 放射の波長 \propto 1/(絶対温度)
Mean wavelength 1/(absolute temperature)
 $\lambda_m \approx 2.9/T$ [Wien's law]
(mm) (K)



地球の放射収支

Global radiation balance



- 太陽の短波放射の吸収率 \approx 地球からの長波放射の放出率
Absorption of shortwave radiation Emission of longwave radiation

$$R \times \pi r^2 (1-\alpha) = \sigma T_e^4 \times 4 \pi r^2$$

α : 惑星アルビード (短波放射に対する平均反射率)
Planetary albedo (mean reflectance)

有効放射温度: T_e

Effective radiation temperature

$$T_e = [(1-\alpha)R/4\sigma]^{1/4}$$
$$\approx 255 \text{ K} \quad (-18 \text{ }^\circ\text{C})$$

α : 惑星アルビード (反射率) ≈ 0.30
planetary albedo

R : 太陽定数 $\approx 1360 \text{ W/m}^2$
solar constant

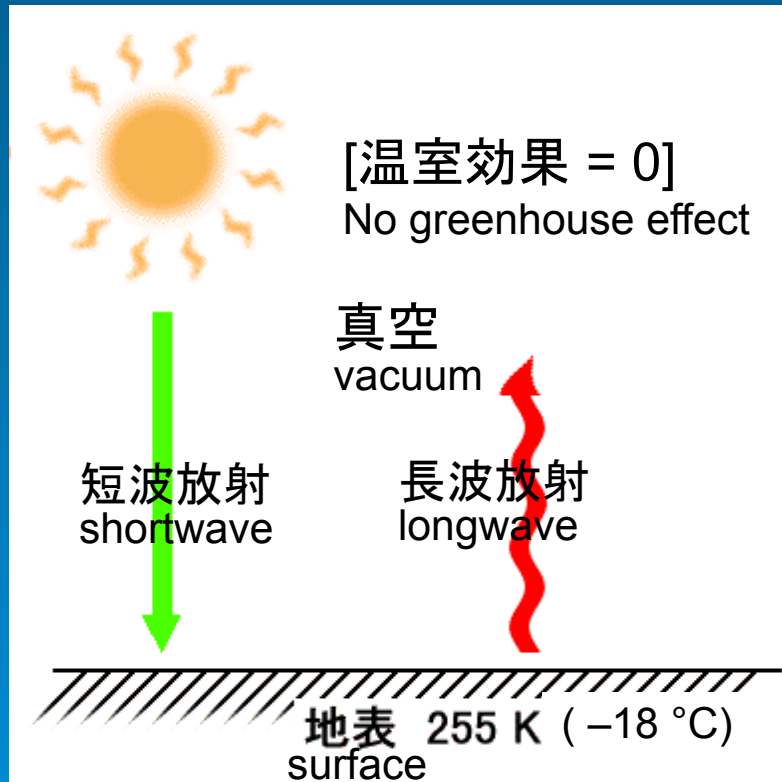
σ : Stefan-Boltzmann定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

* 地球の大気上層の平均温度は、放射のエネルギーのバランスから決まっている。

The radiation balance determines the mean temperature of the upper atmosphere.

1-3. 温度の高度分布 Vertical temperature distribution

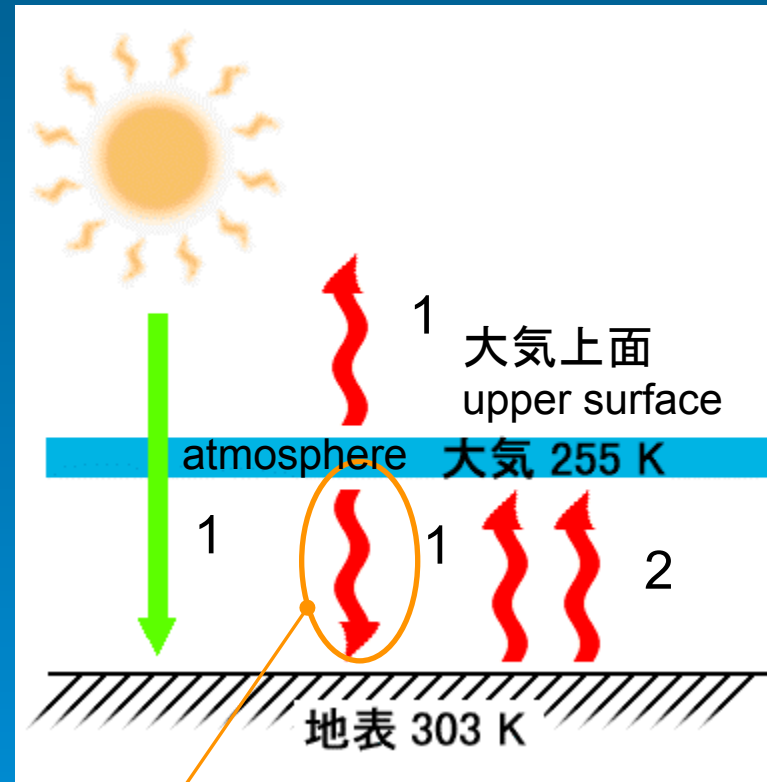
1. 大気がない場合 No atmosphere



平均地表温度 ≈ 255 K
mean surface temperature

“極寒”の地球 (有効放射温度)
“extreme cold” Earth

2. 大気がある場合 (1層) With an atmosphere (1 layer)

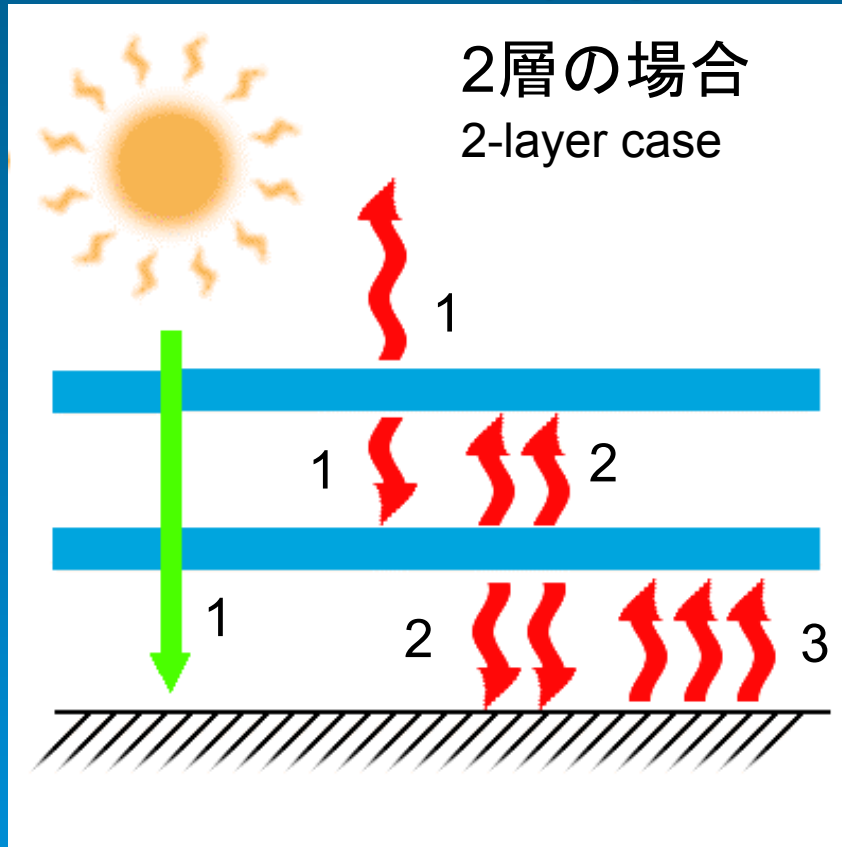


大気の“温室”効果 (H_2O , CO_2)
The “greenhouse” effect

地表温度 \gg 有効放射温度
surface temp. \gg effective radiation temp.

温度の高度分布 Vertical temperature distribution

3. 実際の大気: 約3層分の温室効果 Real atmosphere: 3-layer greenhouse effect

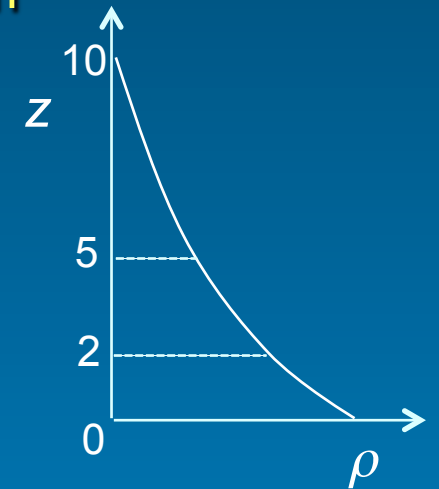


大気層 1 ≈ 255 K
layer 1 \wedge

大気層 2 ≈ 303 K
layer 2 \wedge

地表温度 ≈ 335 K
surface temp.

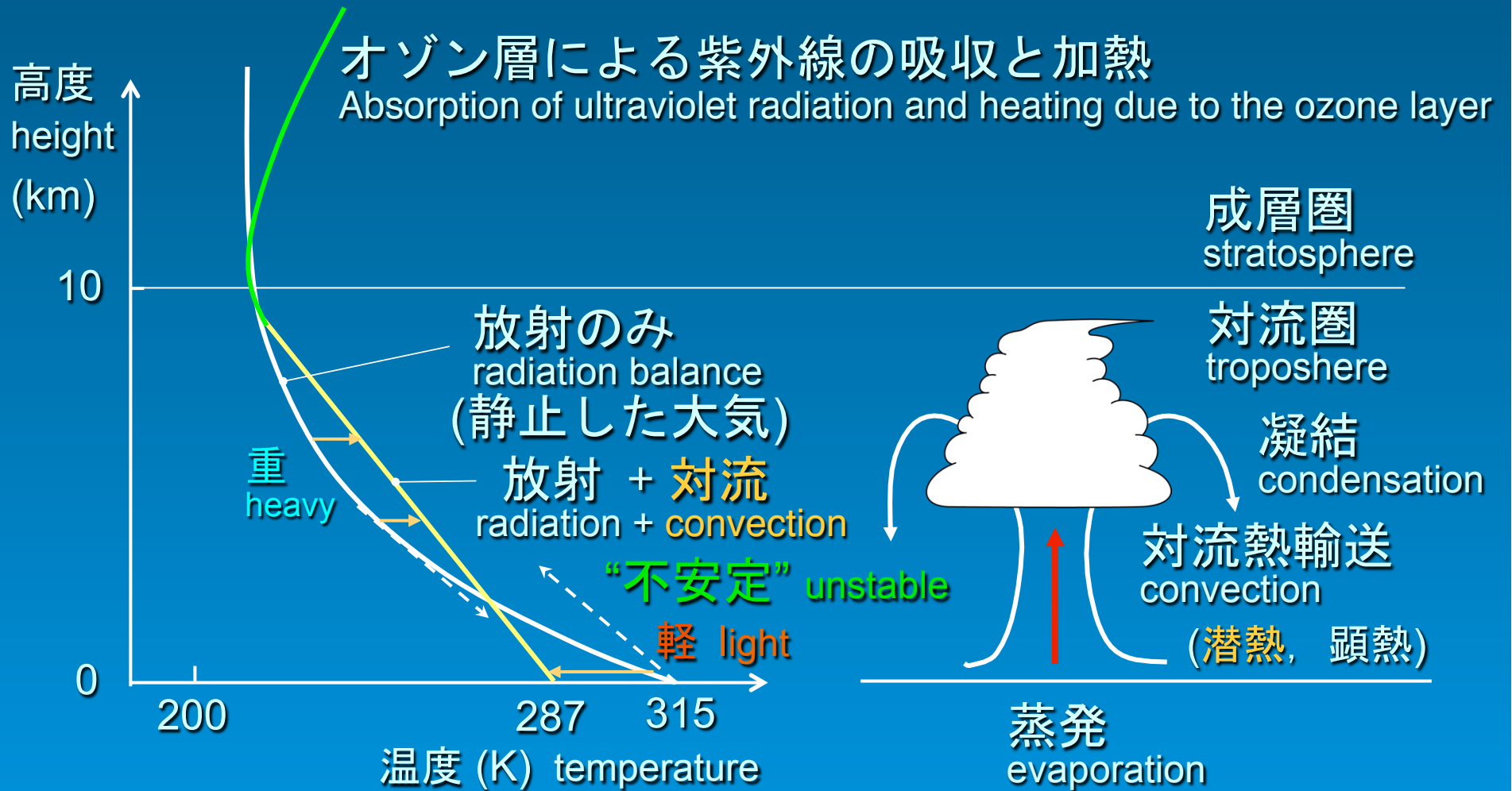
下層程, 温度が上昇
The lower is the higher temp.



- 実際の大気は連続的, 短波放射も吸収 + 対流。
The real atmosphere is continuous with shortwave absorption and convection.

連続的な大気 (3層分の温室効果+短波放射の吸収)

A continuous atmosphere (3-layer greenhouse effect and SW absorption)

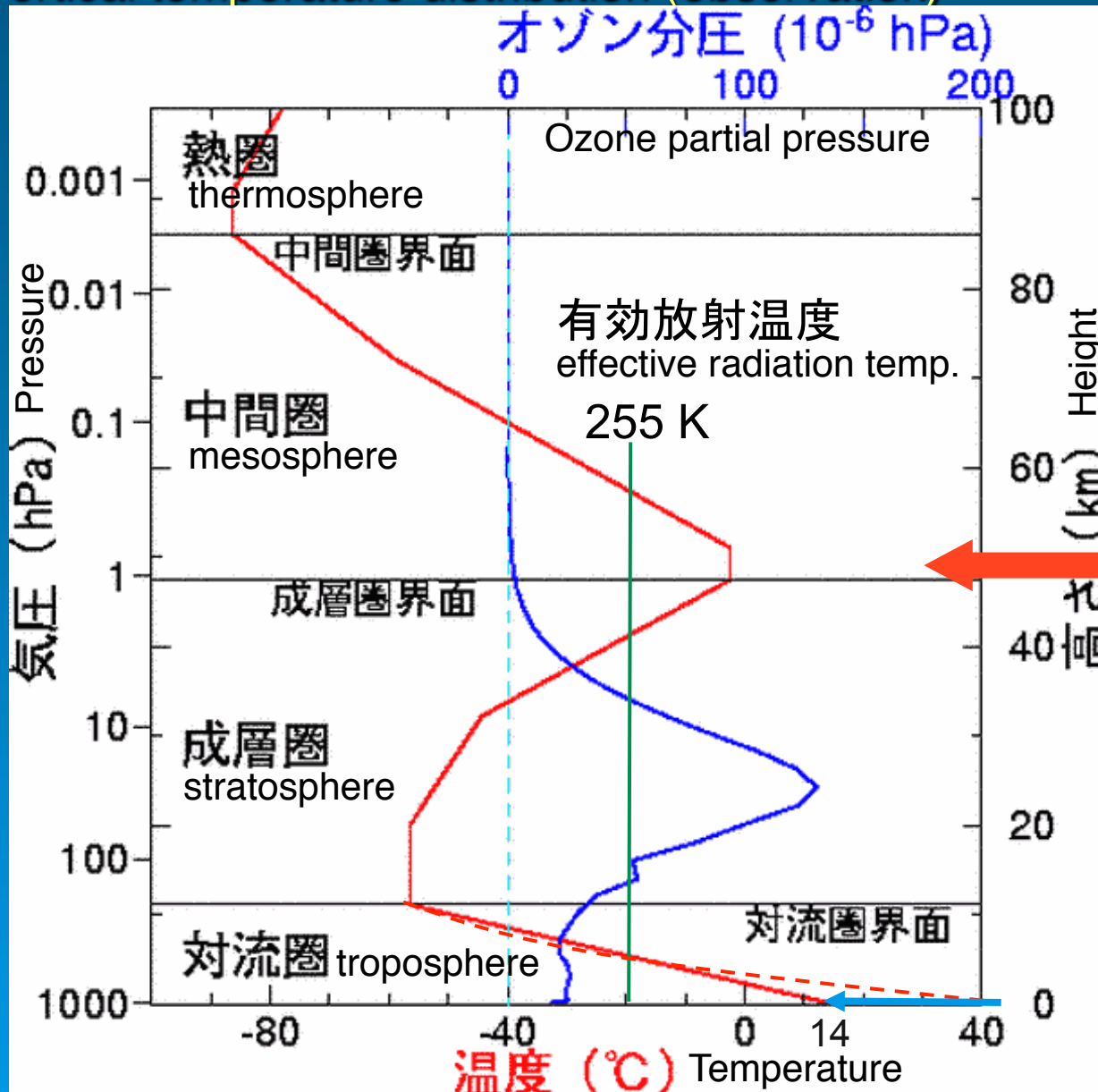


- 対流による熱輸送により，地表が冷やされている。
The surface is cooled by convective heat transport.

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

大気の温度の高度分布 (観測)

Vertical temperature distribution (observation)



オゾン層による紫外線の吸収と加熱
Absorption of ultraviolet radiation and heating in the ozone layer



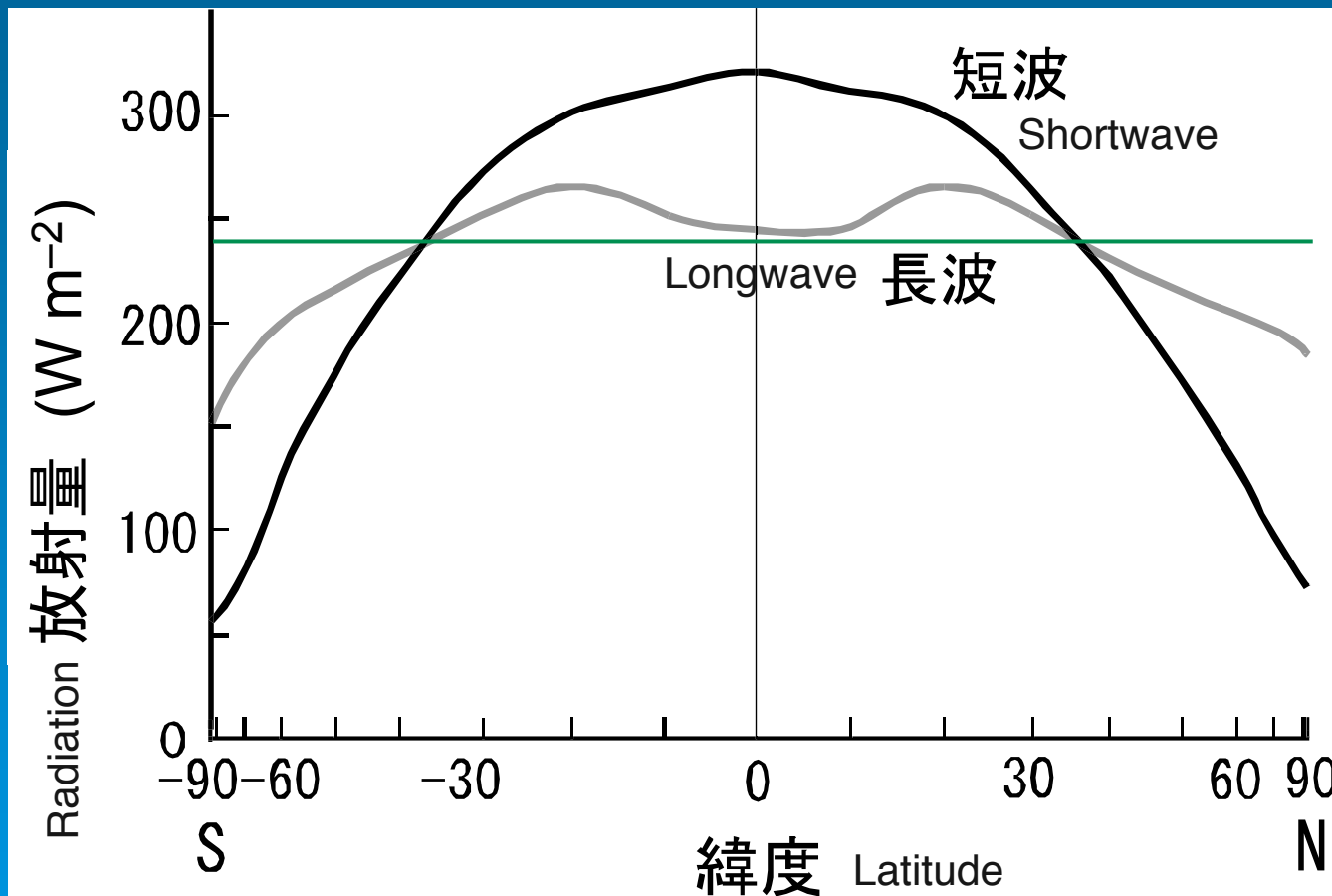
Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

1-4. 大循環運動による熱輸送とエネルギー散逸率

Heat transport and energy dissipation by the general circulation

放射収支の緯度分布

Latitudinal distribution of radiation



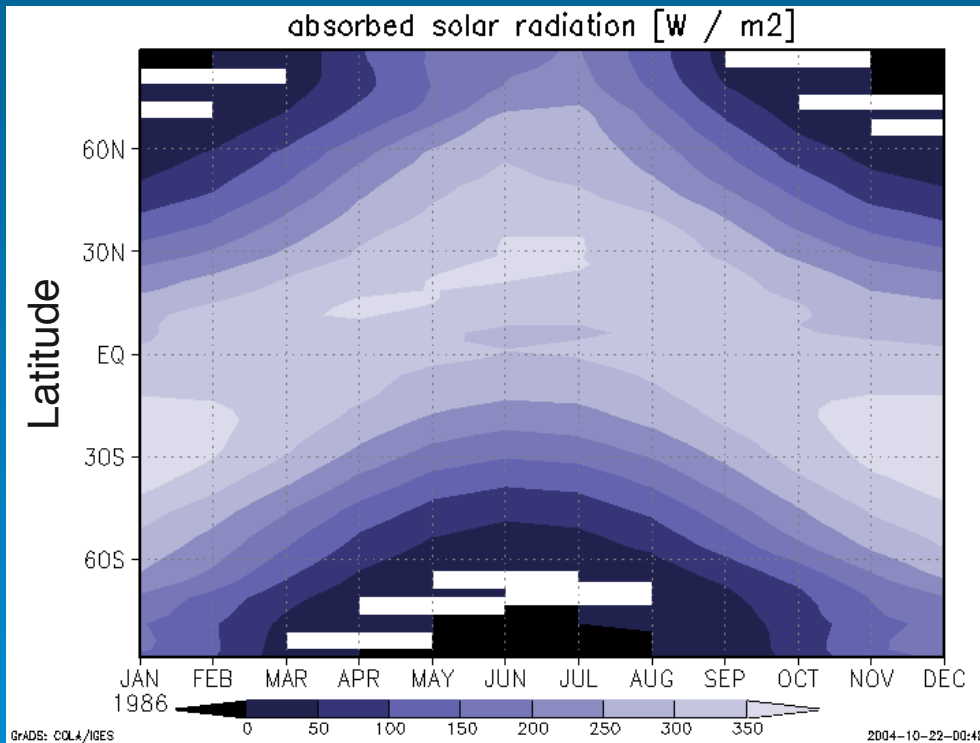
238 (W/m²)

放射の季節変化

Seasonal variation of radiation

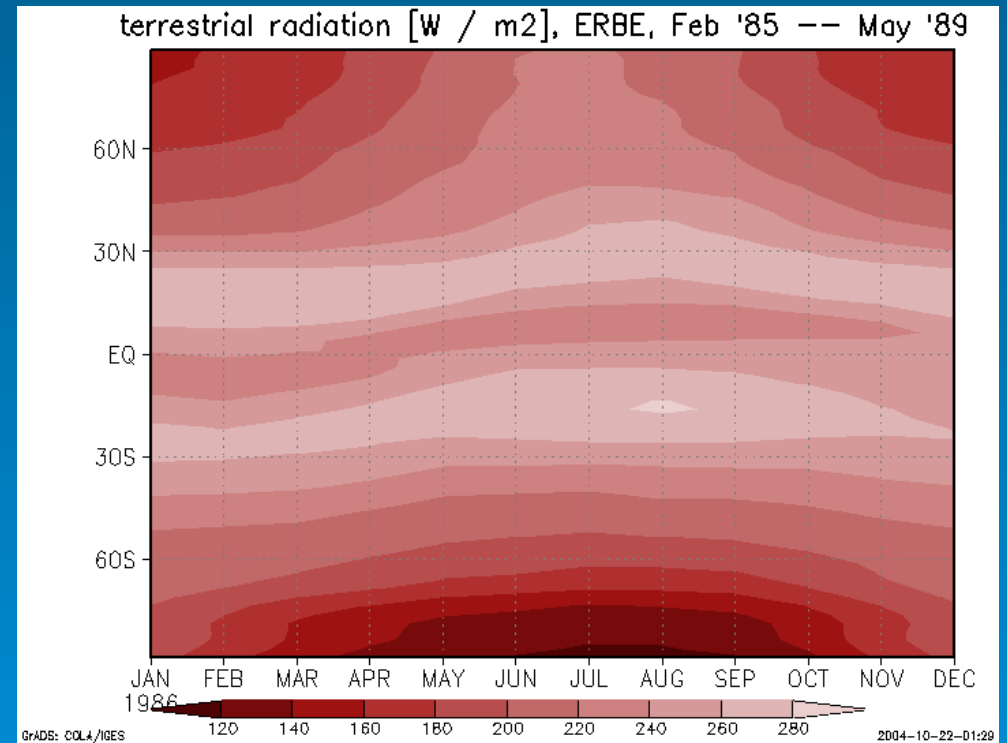
短波放射の吸収率

Absorbed shortwave radiation



長波放射の放出率

Emitted longwave radiation



ERBE観測データ1985 by K. Masuda

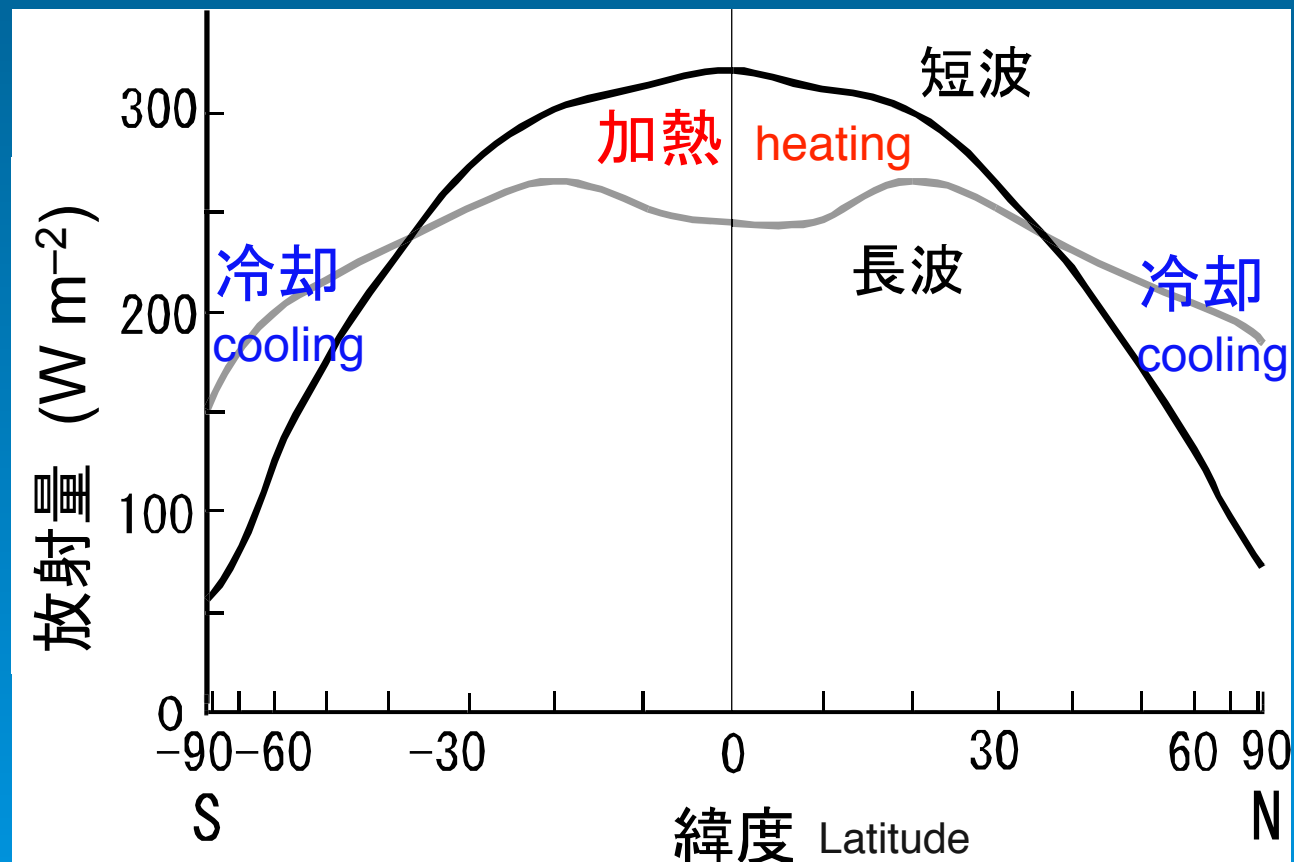
Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

地球のエネルギー収支 (緯度分布)

Latitudinal distribution of radiation balance

エネルギーの過不足

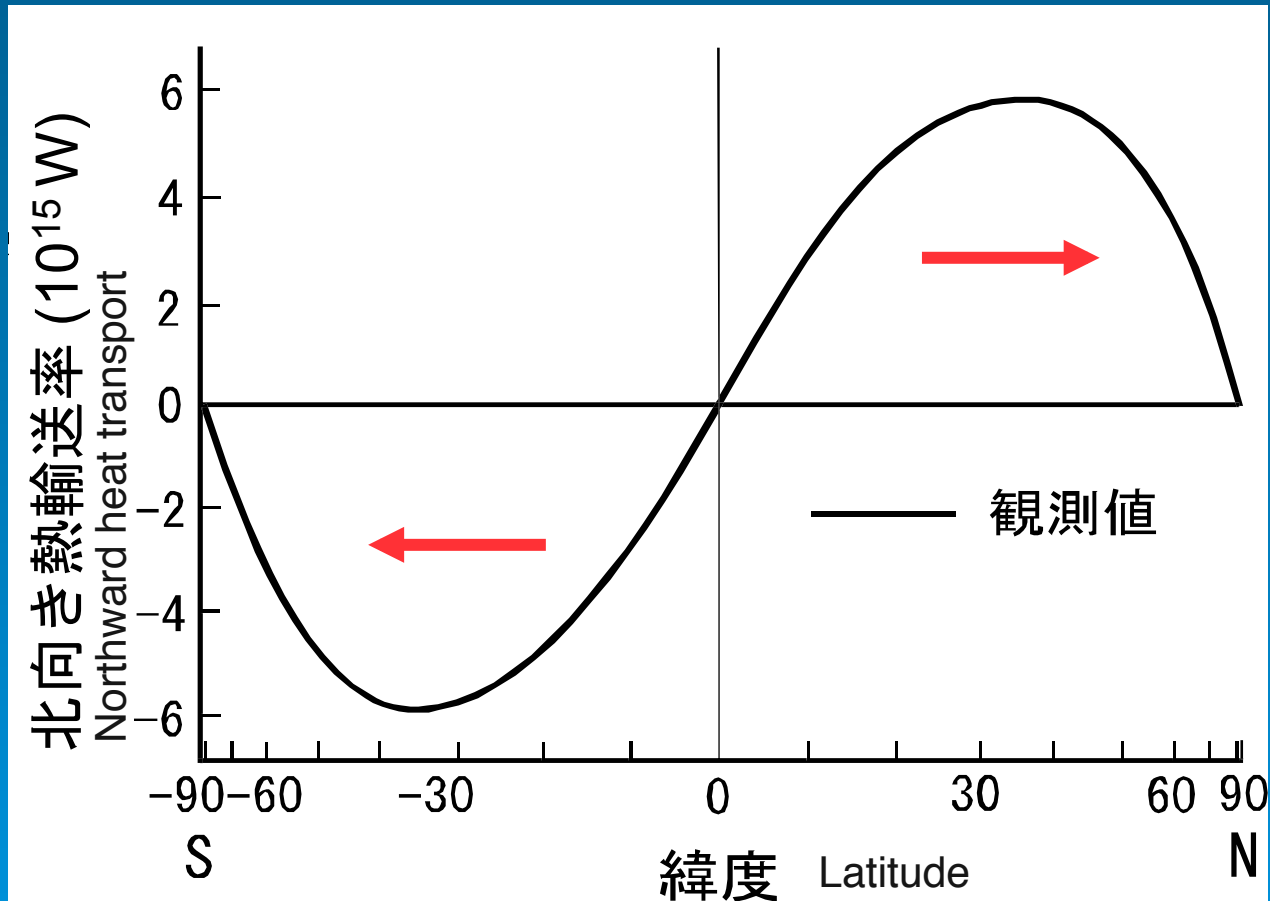
Excess and deficit of radiation energy



大気と海洋の運動による極向きの熱輸送

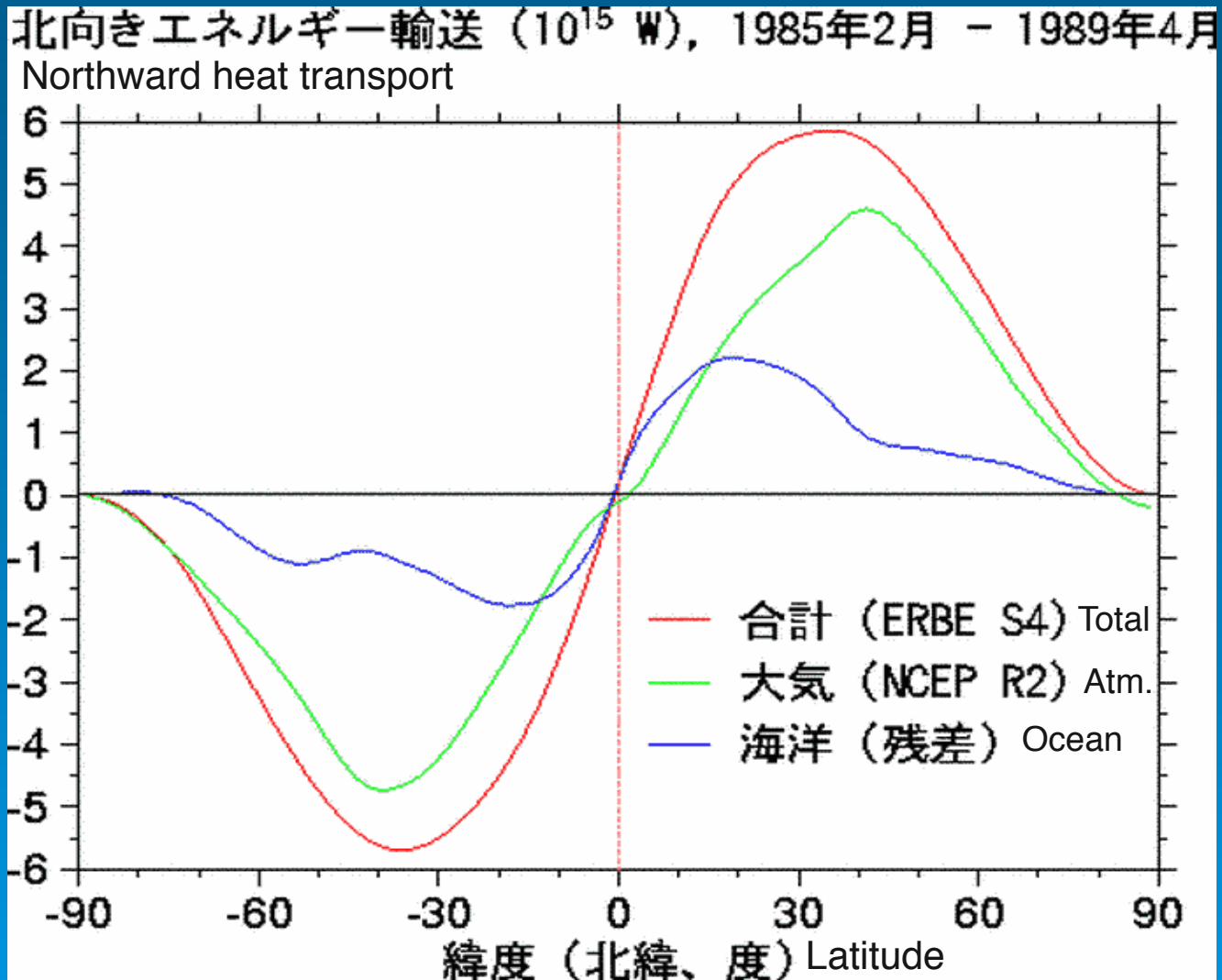
Northward heat transport by the general circulation

大循環



大気と海洋の寄与

Atmospheric and oceanic transports



by K. Masuda

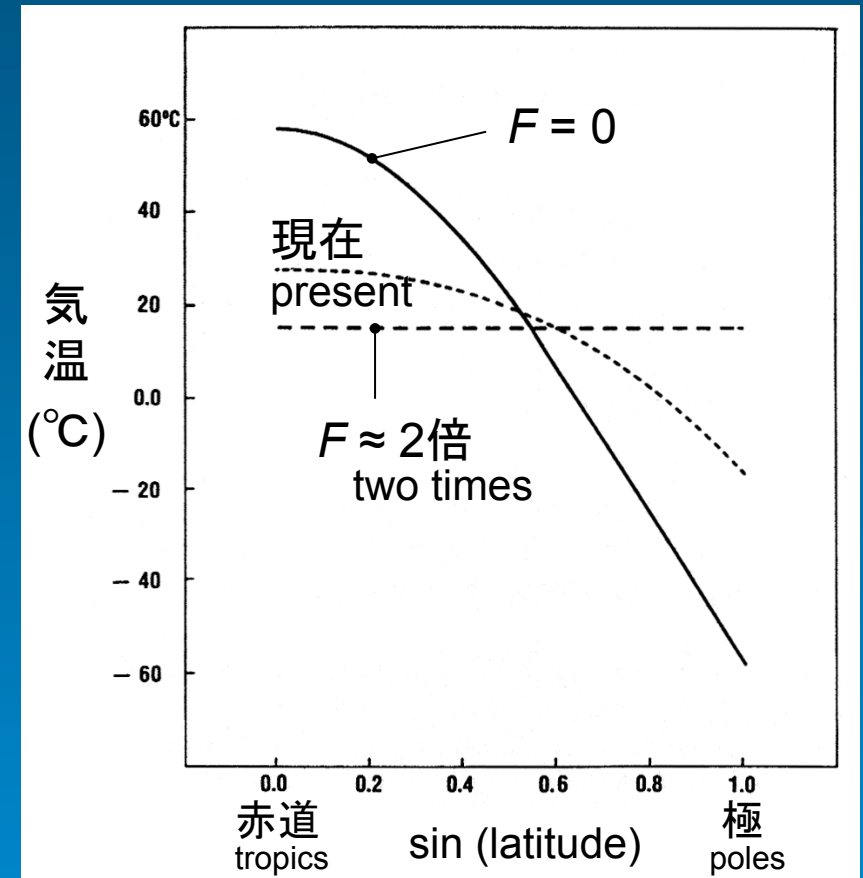
Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

熱輸送率と気候状態

Heat transport and climate conditions

もし、今よりも熱輸送率 (F) が小さくなると、赤道と極の温度差が増加。
If the heat transport becomes less than present, the temperature contrast between the tropics and poles becomes larger.

逆に、今よりも熱輸送率が大きくなると、赤道と極の温度差が減少。
If the heat transport becomes more than present, the temperature contrast becomes smaller.



North et al. (1981)

⇒ 熱輸送率の大きさが、地球の平均的な気温の分布（気候状態）を決めている。The heat transport determines the global distribution of temperature (climate distribution) of the Earth.

熱輸送率の推定

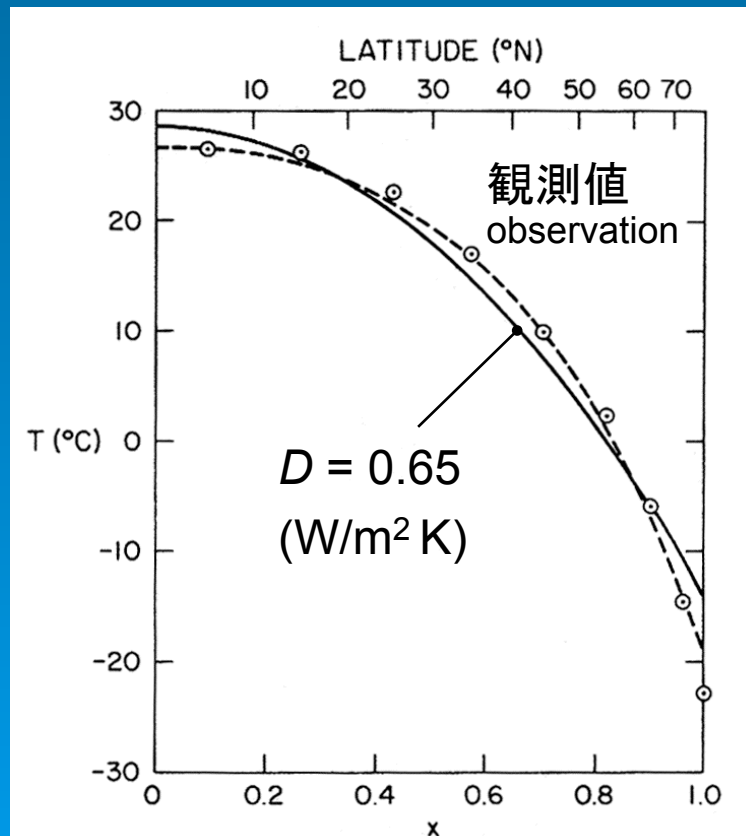
Estimation of the heat transport

- 見かけ熱輸送係数による方法
Effective heat transfer coefficient method

熱輸送率 : $F \approx -D \frac{dT}{dx}$
heat flux

Budyko (1969), North (1975) ...

D : 見かけ熱輸送係数
effective heat transfer coefficient



$$(D = \rho c v_{\text{eddy}})$$

v_{eddy} : “渦”拡散係数
“eddy” diffusivity

$$(\approx \lambda v_{\lambda})$$

North et al. (1981)

$D \approx 0.65$ の意味

meaning

D	熱輸送率 heat transport	赤道と極の温度差 equator-to-pole temperature contrast
0	0	$2 \times \Delta T_p$
∞	$2 \times F_p$	0

現在: 0.65
present

$$\underbrace{F_p \times \Delta T_p}_{\text{最大}} = \text{最大 maximum}$$

⌘

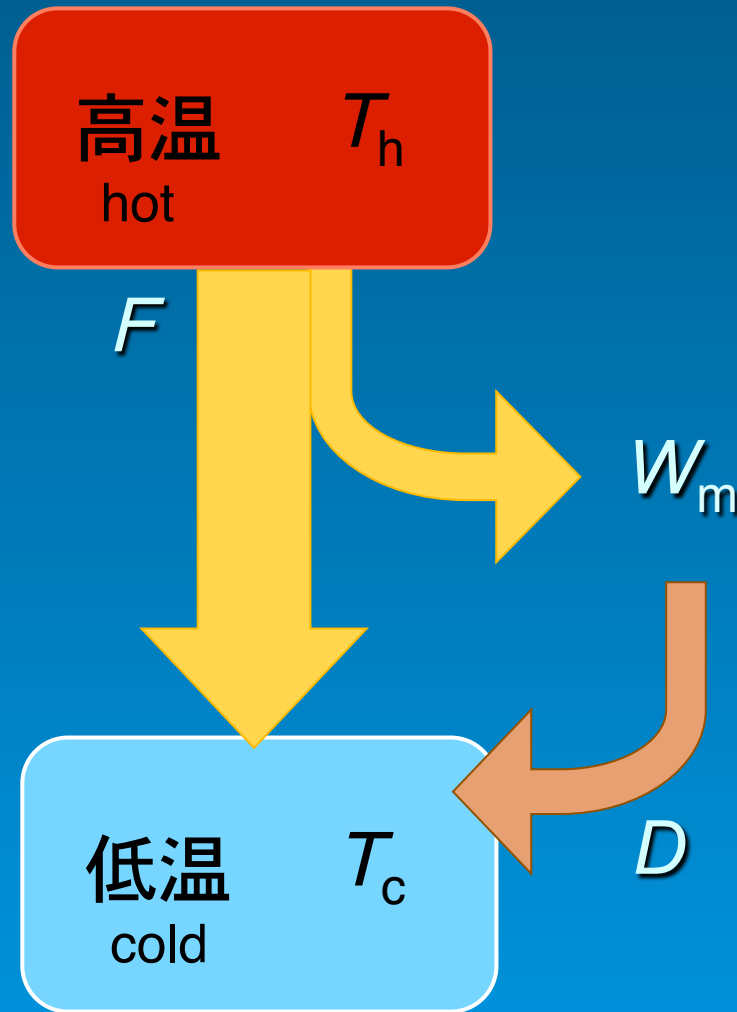
Lorenz (1960), Paltridge (1975) ...

力学エネルギーの生成率 (カルノーの仕事率)
Generation rate of available energy (Carnot working rate)

力学エネルギーの生成率 (\approx 散逸率) が最大の状態
Maximum generation rate (\approx dissipation rate) of available energy

カルノーの仕事率

Carnot working rate



Sadi Carnot (1824)

熱を高温から低温に運ぶ時に、取り出せる最大の仕事率

Maximum working rate that can be converted from heat while transporting heat from a hot to cold place.

$$W_m = F \underbrace{\frac{T_h - T_c}{T_h}}_{\parallel}$$

カルノーの効率: η_C
Carnot efficiency

$$\Rightarrow W_m \approx \infty F \Delta T$$

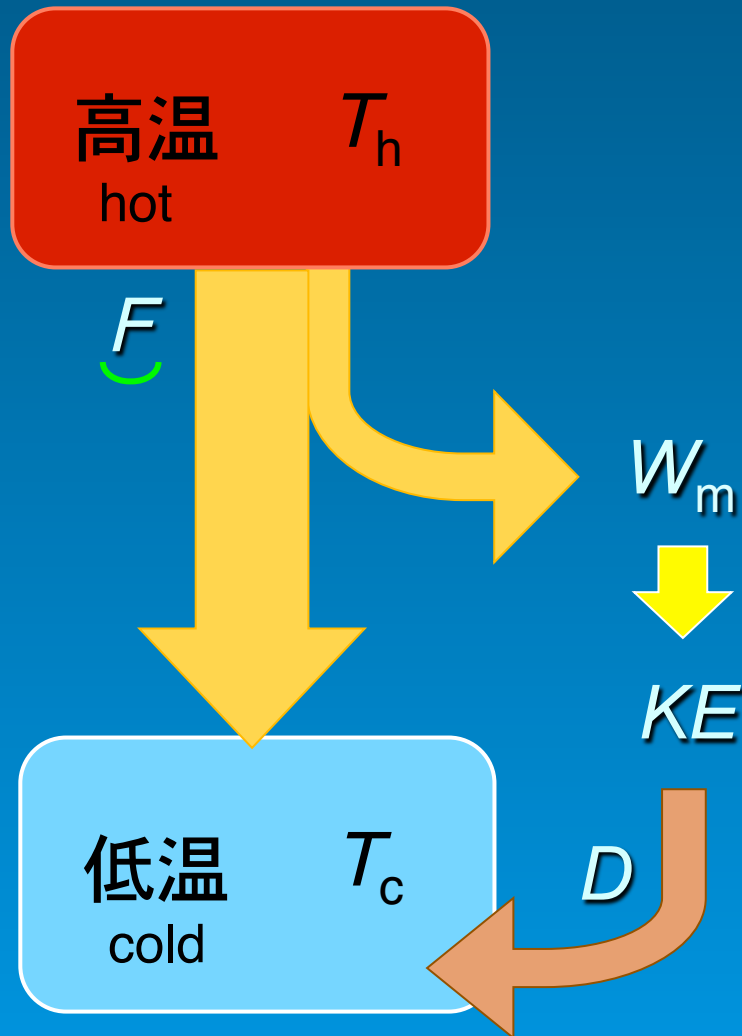
$\approx D$: 散逸率

Dissipation

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

カルノーの仕事率

Carnot working rate



Sadi Carnot (1824)

熱を高温から低温に運ぶ時に、取り出せる最大の仕事率

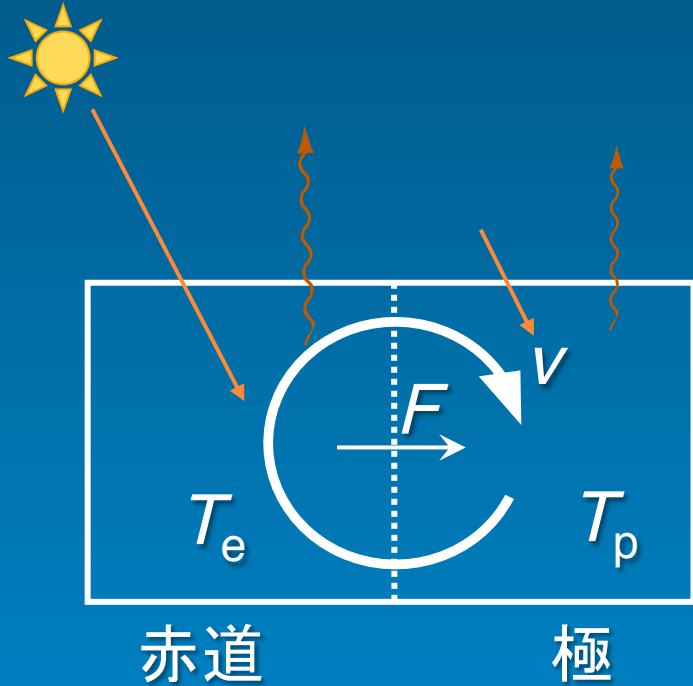
Maximum working rate that can be converted from heat while transporting heat from a hot to cold place.

$$W_m = F \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

$W_m \Rightarrow$ 大気の運動: $KE \Rightarrow F$ の増加

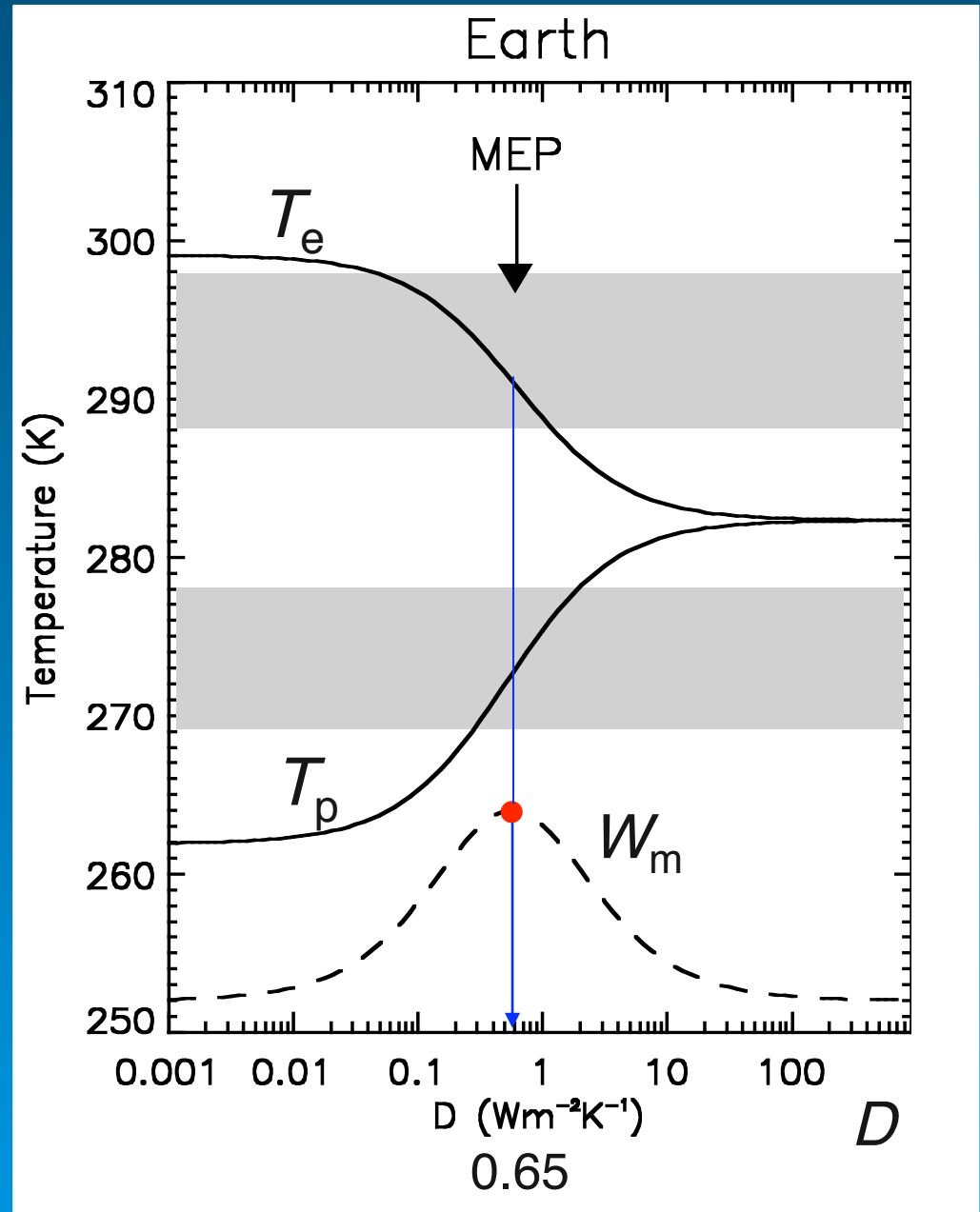
熱輸送により生成する力学的エネルギーを取り込みながら発達する
"自己増殖的"な運動？

2箱の地球モデル



$$F = D(v) \Delta T / \Delta x$$

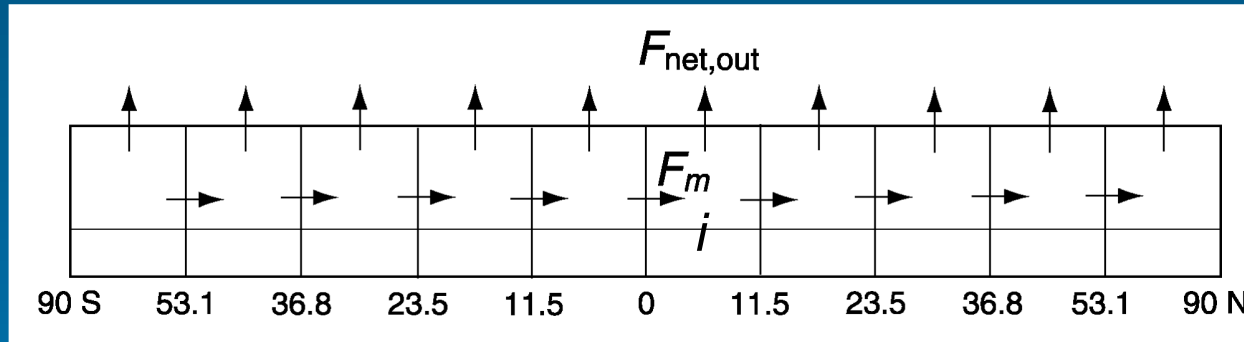
$$W_m = F \frac{\Delta T}{T_e}$$



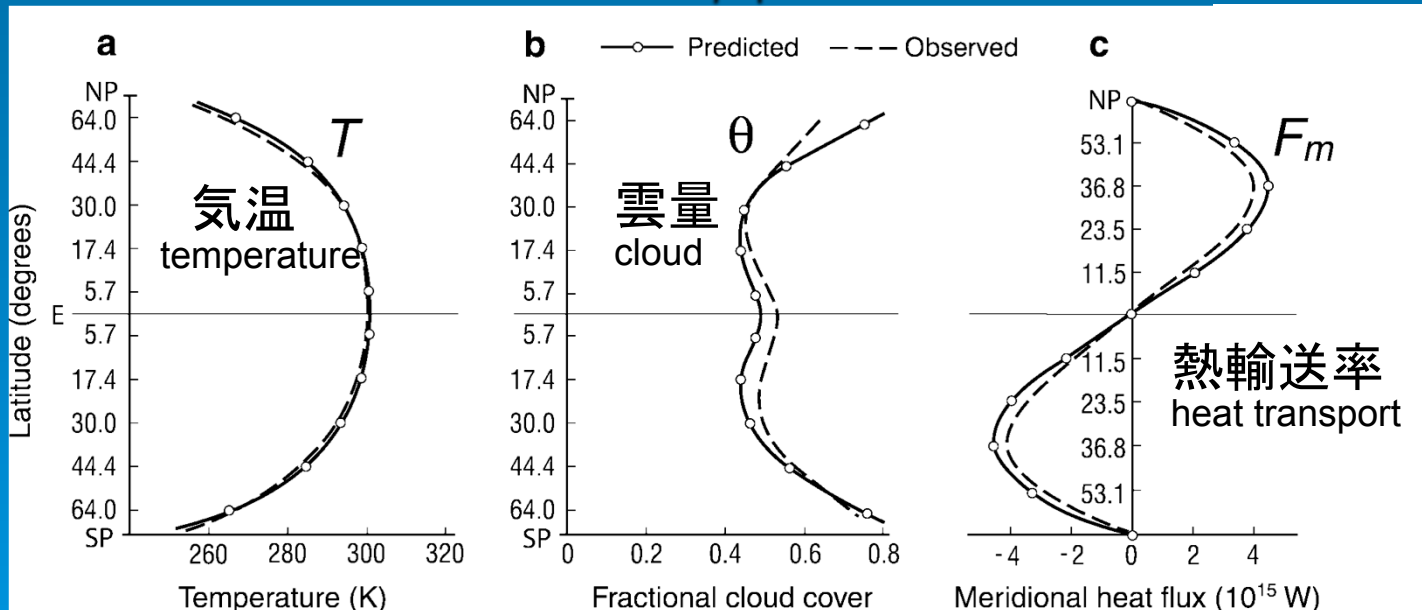
10箱の地球モデル

10-box earth model

Paltridge (1975)



$$W_m \approx \sum_{i=1}^{10} F_{m,i} \frac{T_{i-1} - T_i}{T_{i-1}} = \text{最大 maximum} \quad (\dot{S} \approx W_m / T_r)$$



- 現在の定常状態：力学的エネルギーの生成率と散逸率が最も大きい状態
Present state: maximum generation and dissipation of available energy *Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.*

Part 1 のまとめ Summary

- 地球の気候システムは、太陽からの短波放射による加熱と、宇宙への長波放射による冷却により、内部に動きのある状態を維持している**非平衡開放系**の1つと考える事ができる。

The climate system of the Earth is considered to be a non-equilibrium open system that maintains its dynamics by solar shortwave heating and longwave radiative cooling into space.

- 地球内部の温度分布は、放射のエネルギー収支の条件に加え、内部での熱輸送率の分布に合わせて特徴づけられている。

The temperature distribution of the Earth is determined by the radiation balance condition and internal heat transport processes.

- 現在の平均的な熱輸送の状態は、熱輸送に伴う**力学的エネルギーの生成率と散逸率が最大の状態**に近い事が、経験的に知られている (Lorenz 1960, Paltridge 1975)。

⇒ 他の非平衡開放系の状態にもなりたつか？ Part 2で議論

引用文献 (Part 1) References

Brown, J., Colling, A., Park, D., Phillips, J., Rothery, D., and Wright, J., *Ocean Circulation*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1989.

Budyko, M. I., *Tellus* **21**, 611, 1969.

Lorenz, E. N., in *Dynamics of Climate*, Ed. R. L. Pfeffer, 86–92, Pergamon, New York, 1960.

Morris, S. W., Bodenschatz, E., Cannell, D. S., and Guenter, A., *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2026, 1993.

North, G. R., *J. Atmos. Sci.*, **32**, 2033, 1975.

North, G. R., Cahalan, R. F., and Coakley, J. A. Jr., *Rev. Geophys.* **19**, 91, 1981.

Ozawa, H., Ohmura, A., Lorenz, R. D., and Pujol, T. *Rev. Geophys.* **41**, 1018, 2003.

Paltridge, G. W., *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **101**, 475, 1975.

Prigogine, I., *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, Springfield, Charles C. Thomas, 1955 (Wiley, New York, 1962).

Velarde, M. G., and Normand, C., *Scientific American* **243** (1), 92, 1980.