



# **地球温暖化を考える講演会**

## **電卓で計算して理解する地球温暖化**

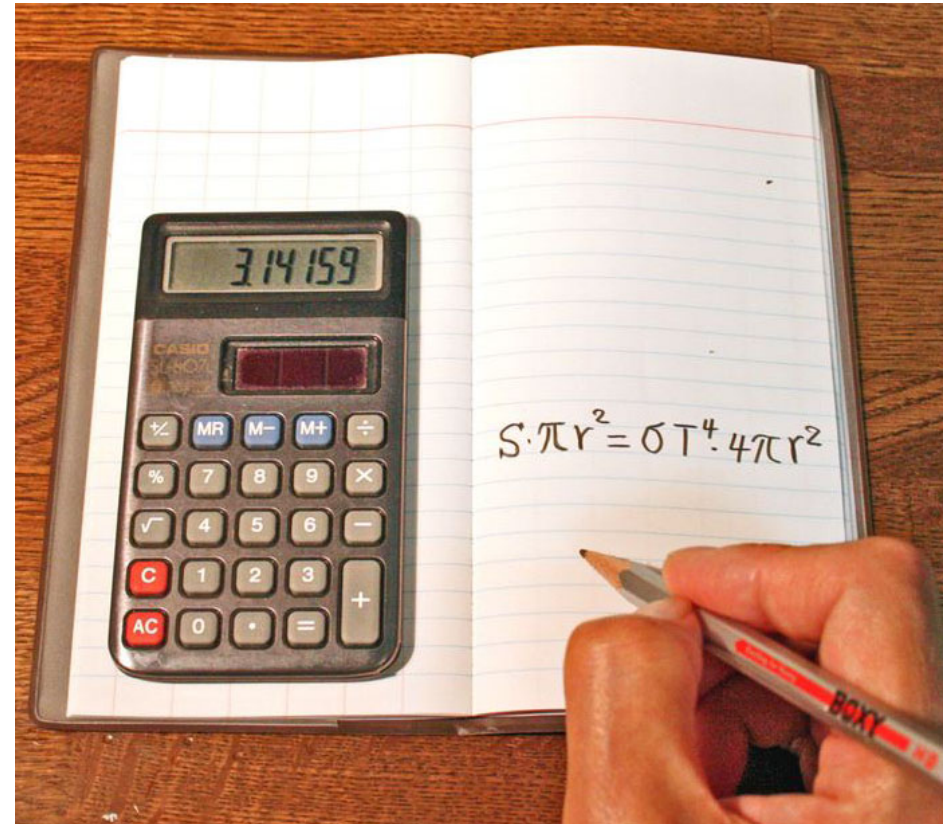
**2017年4月2日**

**新宿区立 環境学習情報センター**

**西田 進**

# 目次

1. はじめに
2. スーパーコンピュータによる地球温暖化の計算とは
3. 太陽系の惑星の表面温度はどのようにして決まるのか
4. 電卓で、地表面の平均温度を計算してみよう  
温室効果ガスがないと、 $-19^{\circ}\text{C}$
5. 温室効果ガスがあると、 $15^{\circ}\text{C}$
6. まとめ





## 1. はじめに

スーパーコンピュータでは、地球（地表・海洋・大気）の温度を、どのようにして計算しているのでしょうか。

スーパーコンピュータで計算した結果は、確かに「素晴らしい成果」ですが、「どのようにして計算したのか」市民には分りません。謂わば**ブラックボックス**です。

今日のお話は、

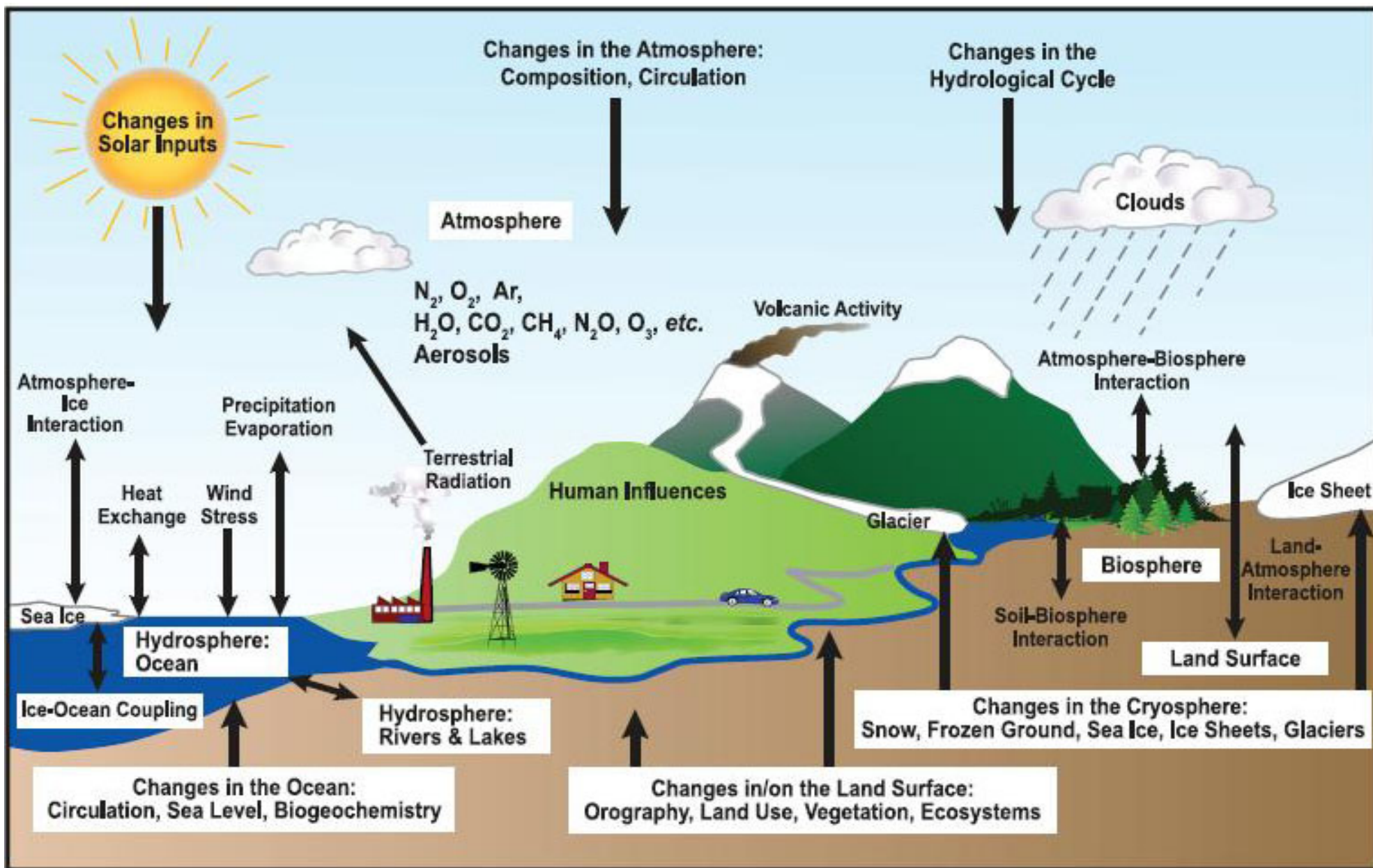
地球温暖化を**電卓**で計算して、計算の過程を少しでも**見える化**しようというもの。

ただし計算の方法はスーパーコンピュータと全く異なりマクロな方法です。



**2. スーパーコンピュータでは、地球（地表・海洋・大気）の温度を、どのようにして計算しているのだろうか。**

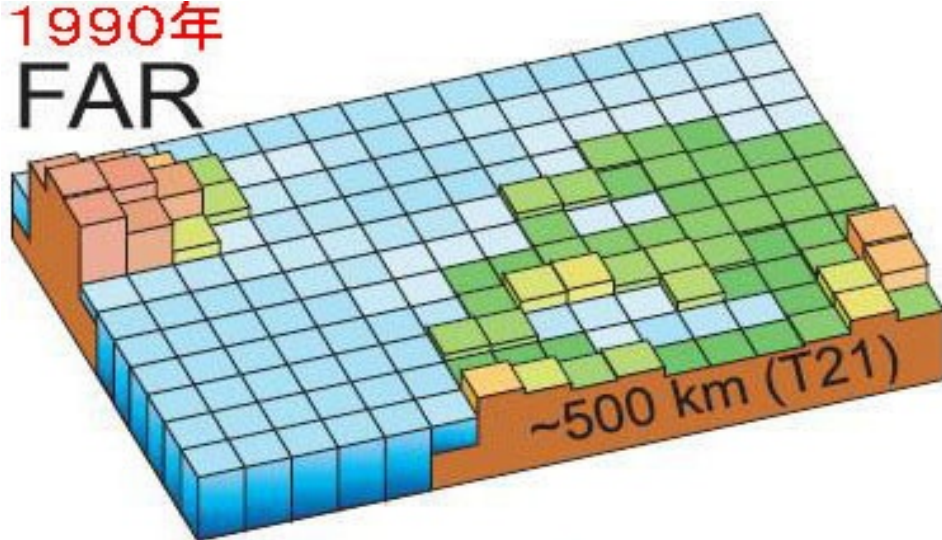
# 気候システムのモデル化：気候に影響するいろいろな現象を数式で表す



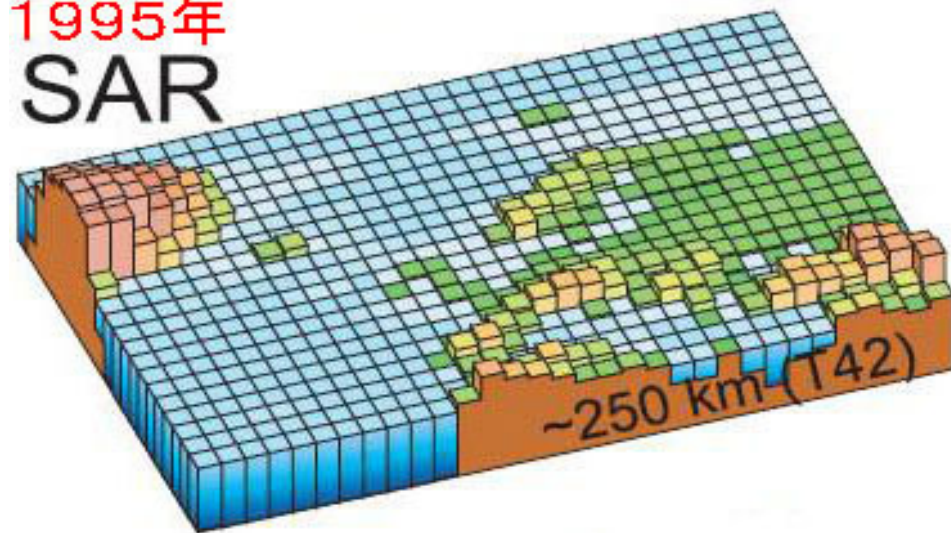


## 数値計算のための格子（微細化の歴史）

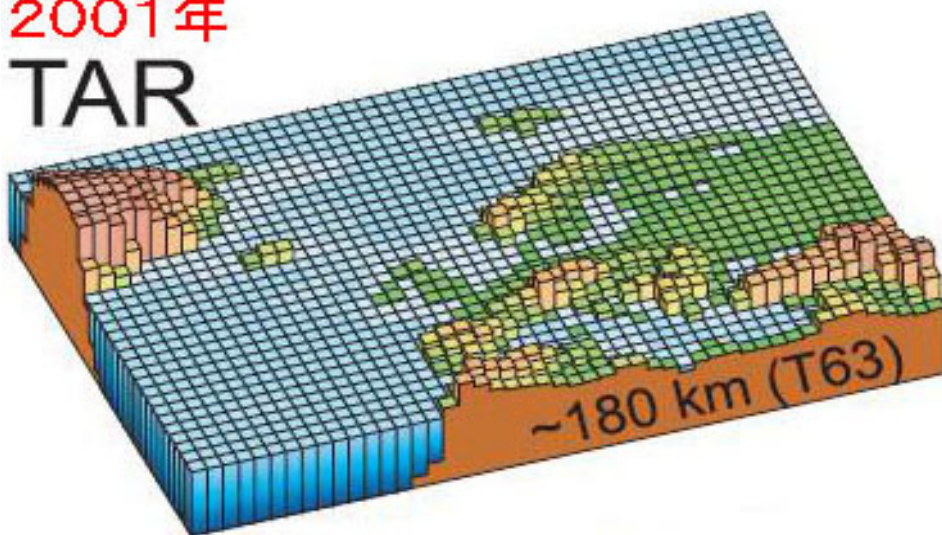
1990年  
FAR



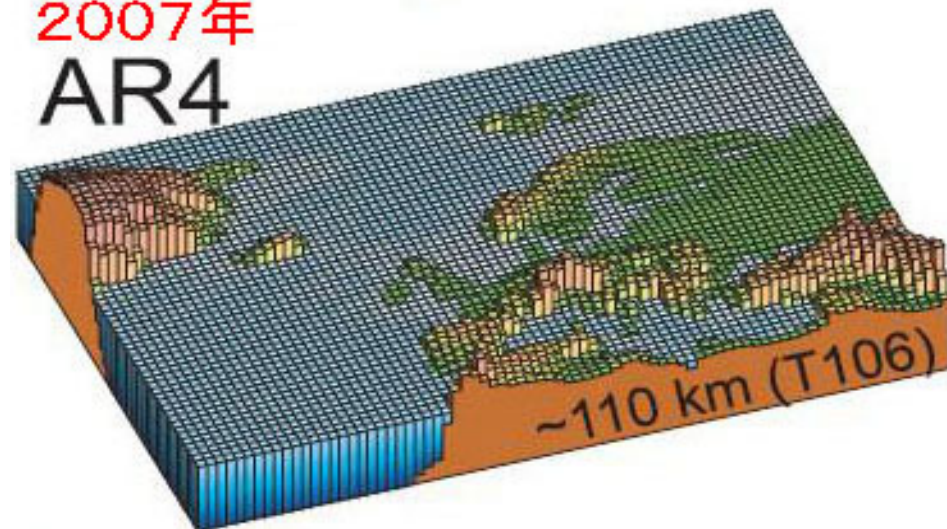
1995年  
SAR



2001年  
TAR



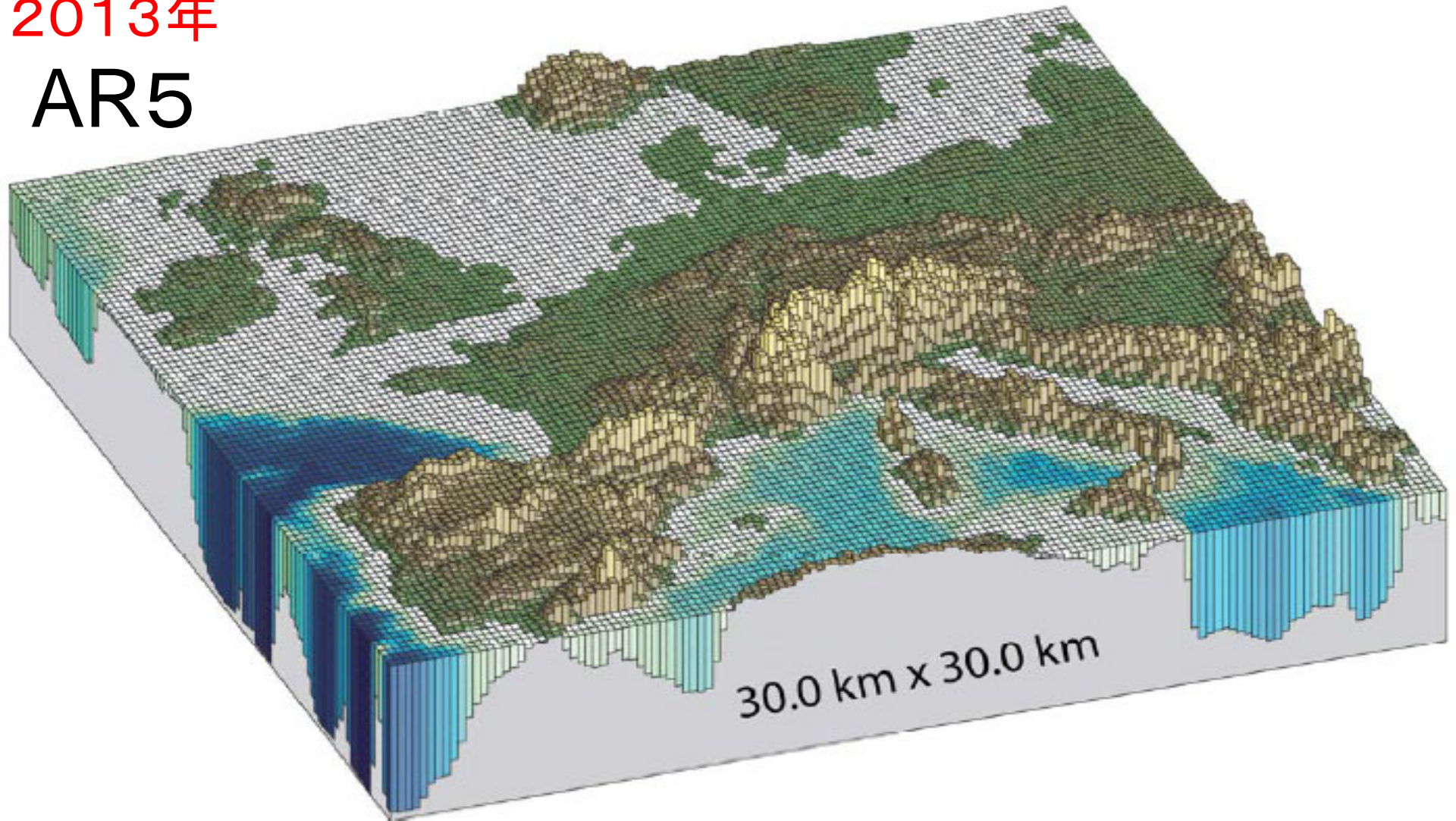
2007年  
AR4





シミュレーションの際の格子は、ますます微細になった  
第5次報告書では、このような格子も一部に使われている

2013年  
AR5



# 気候システムのモデル化：気候モデルの方程式

## 物理学の基本法則

1. 大気の運動量保存の法則
2. 質量保存の法則
3. エネルギー保存の法則
4. 海洋の方程式
5. 陸面の方程式
6. その他の方程式

## パラメター化(格子よりも小さな現象を方程式に取り入れるなど)

1. 格子よりも小さな空気の渦の効果
2. 雲の発生
3. 雲の凝縮による加熱
4. その他

パラメータ化の場合には観測値に適合するようにパラメータを調整する  
これをチューニングという



# わが国のスーパーコンピュータ



地球シミュレータ(建屋)



地球シミュレータ



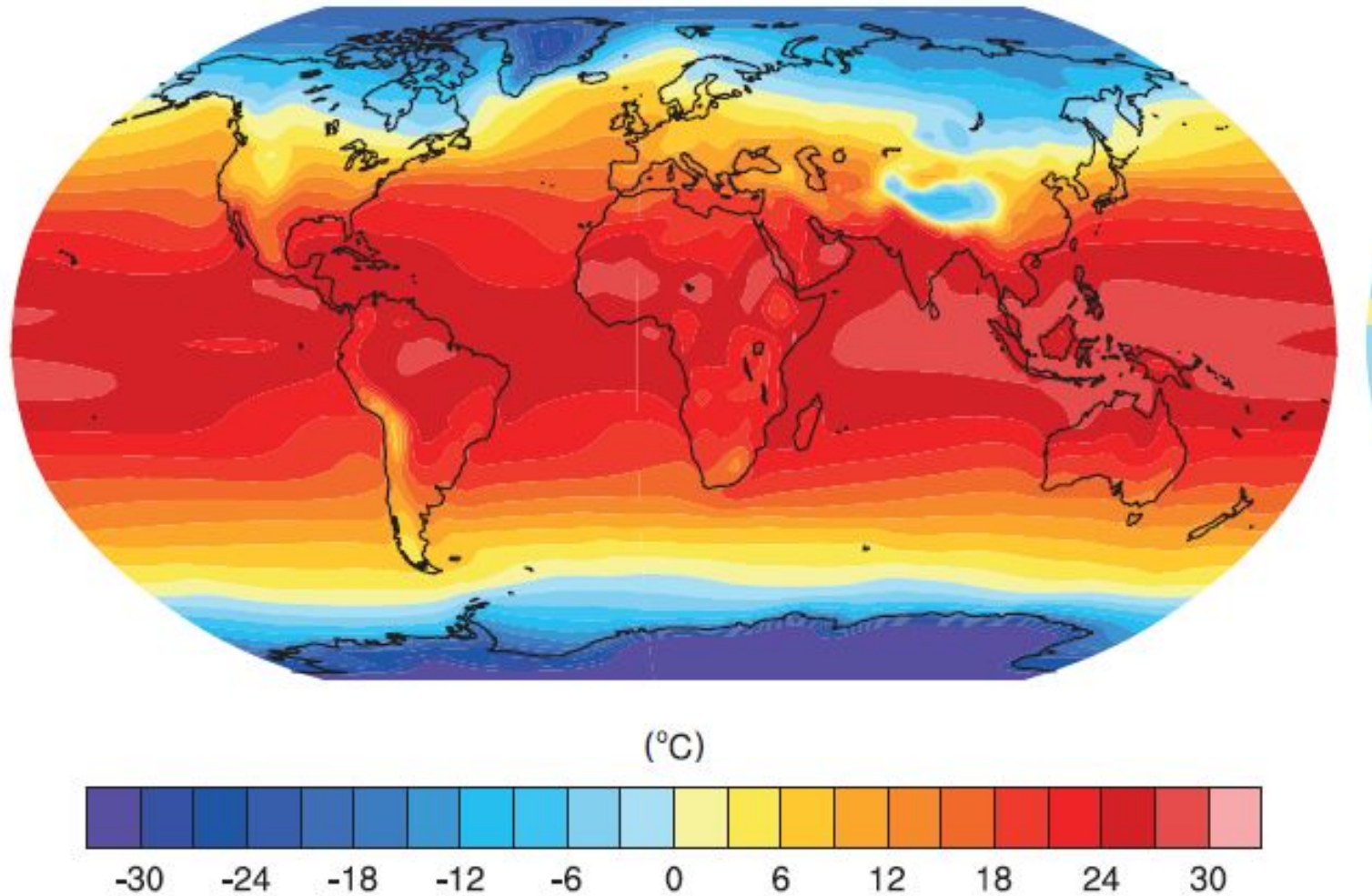
京

横浜市にある海洋研究開発機構に設置  
建物外観 50m×65m×17m  
2002年4月に世界最高の演算性能を達成  
開発費600億円

神戸市にある計算科学研究機構に設置  
浮動小数点数演算を1秒あたり1京回  
行なう処理能力(10ペタフロップス)  
2012年6月に完成、開発費1,120億円、

# スーパーコンピュータによる計算結果の一例

(a) Multi Model Mean Surface Temperature



WG1AR5\_Chapter09\_Fig.9.21(a)より

# スーパーコンピュータ と 電卓で、どう違うのか？

## スーパーコンピュータでは

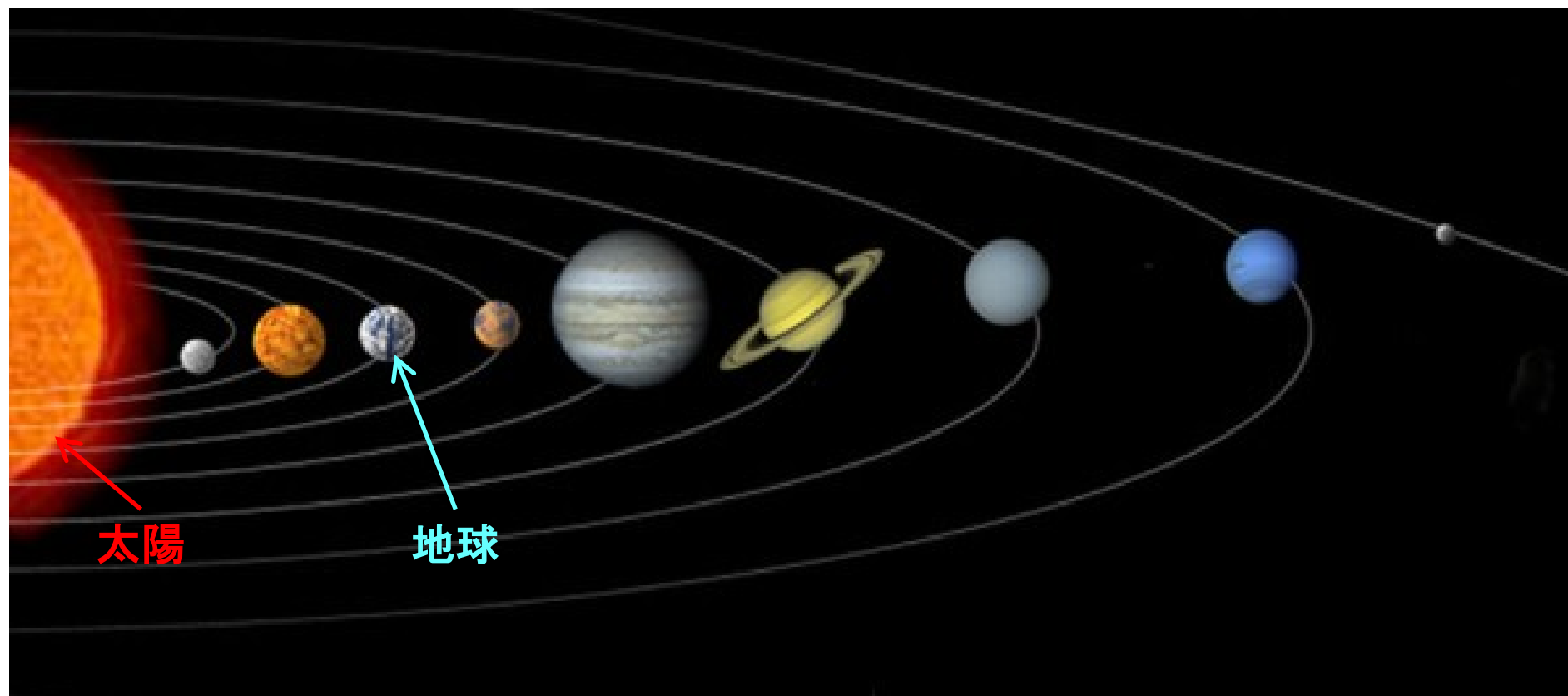
- ① 地球(たとえば大気)の予報変数(風、気圧、気温、水蒸気量など)の間の物理的関係を表す数式を導く
- ② 地球を緯度方向・経度方向・高さ方向に細かく区切る(メッシュ、格子という)
- ③ メッシュ毎に予報変数を計算し、メッシュ間を接続し、地球全体の予報変数を決める。それを時間的に接続して、100年後の予報変数を計算する

## 電卓では

地球を均質な1つの球と考え、1つの平衡温度を計算する



### 3. 惑星の表面温度はどのようにして決まるのか



これから先は、チョット硬い話が出てきます。

式は無視して、絵だけ見て下さい。

それでも、納得できる話です！

宇宙に浮かぶ黒体球に太陽放射が当たっているとき、黒体の温度は何度になるか？

太陽系の地球の位置に黒体を置いたとする

以下、単位系はISO単位系とする。

黒体球に入る**太陽放射**のエネルギー  $P_{in}$  [W]  
 $P_{in} = S \cdot \pi r^2$  式(1)

ここで、

$S$  = 太陽定数 =  $1.37 \times 10^3 \text{ W/m}^2$   
 $r$  = 黒体球の半径 [m]

黒体球から出る**地球放射**のエネルギー  $P_{out}$  [W]は、  
**シュテファン・ボルツマンの法則**から

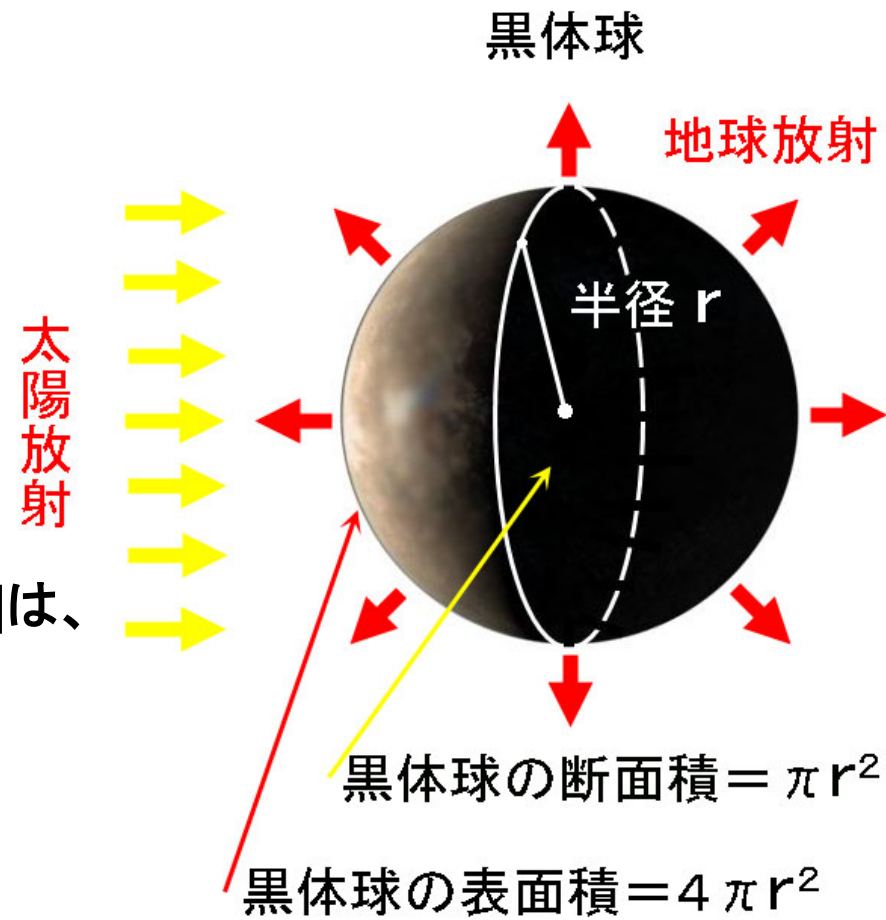
$P_{out} = \sigma T_0^4 \cdot 4 \pi r^2$  式(2)

高校の物理

ここで、

$\sigma$  = シュテファン・ボルツマン定数  
=  $5.671 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$T_0$  = 黒体の温度 [K]



## 黒体の平衡温度

黒体球は、太陽からの太陽放射を受けてエネルギーを受け取り、自ら赤外放射をしてエネルギーを発散する。

平衡状態では、 $P_{\text{in}} = P_{\text{out}}$  であるから、式(1) と 式(2)から

$$S \cdot \pi r^2 = \sigma T_0^4 \cdot 4 \pi r^2$$

$$\therefore T_0 = (S / 4 \sigma)^{1/4} = 278 \text{ K} = 5 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{式(3)}$$

地球の周辺で宇宙に浮かぶ黒体球に太陽放射が当たっているとき、黒体の温度は、**278 K ( 5 °C )** になることが分かる。

**$T_0$** を地球の位置での**黒体の平衡温度**という。

以上は地球の場合、さて地球以外の惑星ではどうだろうか？



## 太陽系の惑星の位置での黒体球の平衡温度を計算すると次のようになる

惑星名	太陽からの距離 (天文単位)	黒体の平衡温度 (私の計算値)	平均表面温度 (観測値・各種資料より)
水星	0.3871	447 K ( 124 °C )	−160～430°C(夜と昼)
金星	0.7233	327 K ( 54 °C )	470°C (92気圧のCO <sub>2</sub> による温室効果)
地球	1.0000	278 K ( 5 °C )	15°C (400ppmのCO <sub>2</sub> による温室効果)
火星	1.5237	225 K ( −48 °C )	−136～25°C (「冬の極」と「夏の赤道」)
木星	5.2026	122 K ( −151 °C )	−150°C
土星	9.5549	90 K ( −183 °C )	−180°C

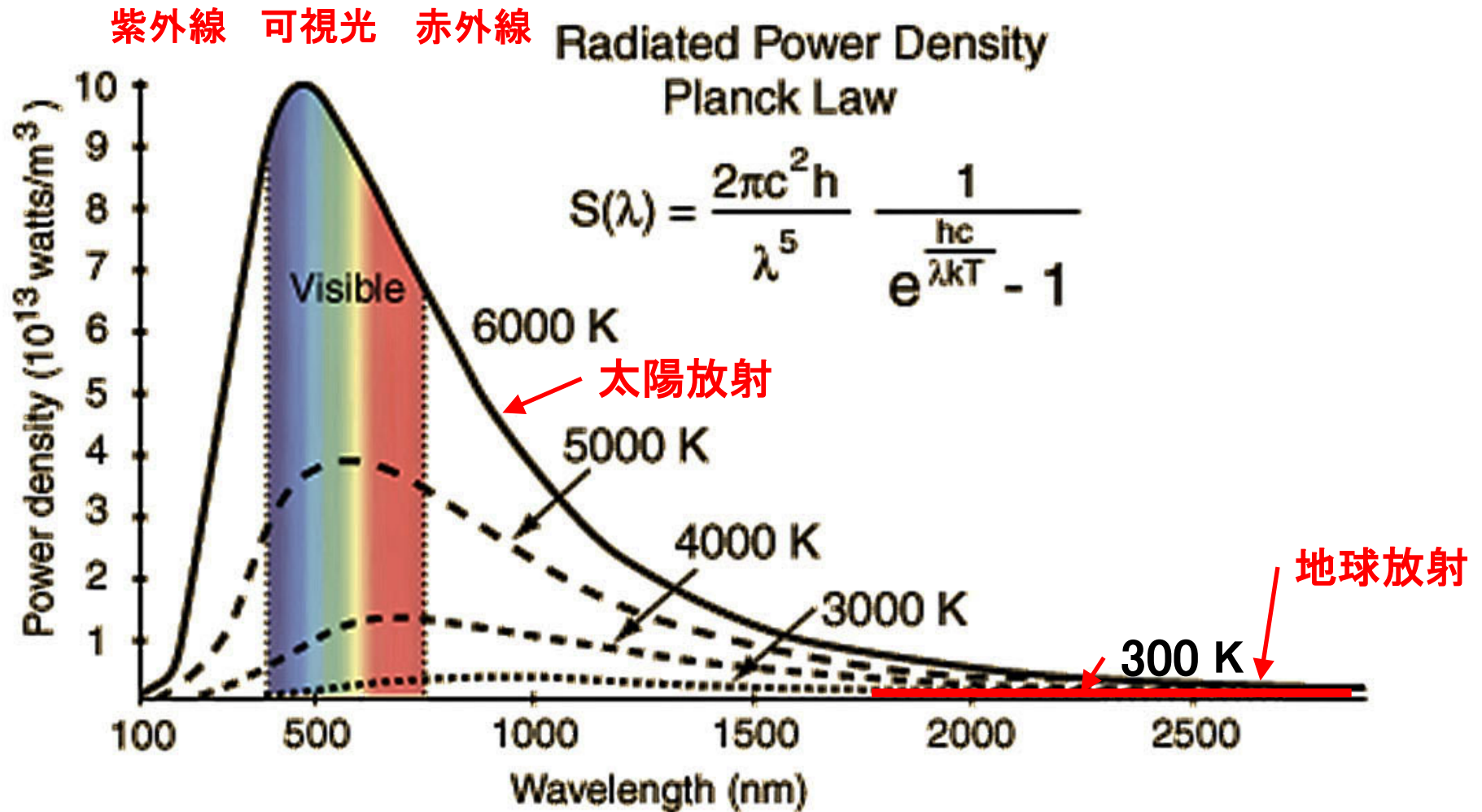
天文単位は地球と太陽との平均距離  $1\text{AU} = 1.496 \times 10^{11}\text{m}$

地球は、H<sub>2</sub>Oが液体で存在できる唯一の惑星。  
地球には生命誕生の温度条件が備わっている。  
なんと幸せなことだろう！

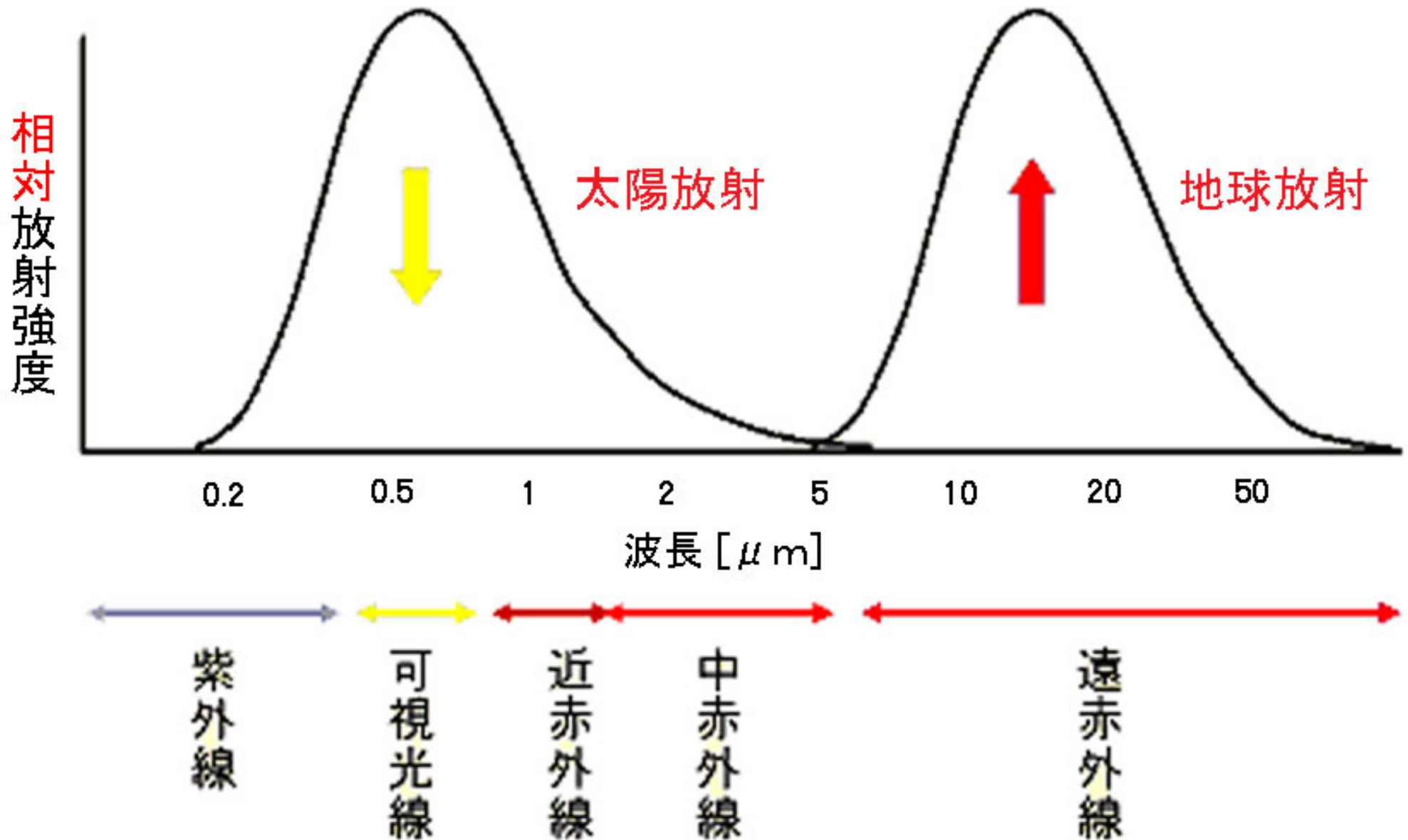
ここでチョット

## 放射の話

放射は、昔は輻射と言った



## 放射の話 太陽放射と地球放射の違い





# レオナルド・ダ・ヴィンチは、知っていた！

- ① 月の明るい部分は、太陽に照らされている
- ② 月の暗い部分は、地球に照らされている

地球に照らされることを**地球照**という  
**地球照**は太陽光の地球での反射によって生じる

地球による 太陽光の反射率が**アルベド**である  
**アルベド albedo** はラテン語で「白い」の意



レオナルド・ダ・ヴィンチ



月の地球照

月の太陽照

# 地球上の状態別のアルベド(albedo)の値

地球のアルベドの代表値は 0.3 (30%) であるが、場所により異なる。

状 態	アルベド ( % )	備考
白い雲	70	
裸 地	10 ~ 25	
砂、砂漠	25 ~ 40	
草 地	15 ~ 20	
森 林	10 ~ 20	
新 雪	79 ~ 95	氷雪の代表値は 80 %
旧 雪	25 ~ 75	
海面A	10 以下	高度角 25 度以上
海面B	10 ~ 70	高度角 25 度以下

新雪のアルベドは約90%であるから、太陽光の約90%は反射するので、新雪は融け難い。  
しかし、汚れた雪(旧雪)のアルベドは約30%であるから、太陽光を吸収し、融け易い。

## 4. 簡単なモデルで、地表面の平均温度を、 電卓で計算してみよう

現実の地球は黒体ではない！

そこで、アルベド(地球表面での太陽光の反射率)だけを  
考慮した簡単なモデルで、地表面の平均温度を、計算してみよう

式を飛ばして、絵を見て、筋だけ追っても結構です！



以下、計算が見やすくなるように、正規化放射強度を定義しておく

ここは計算したい人  
だけが読めばよい！

太陽放射と地球放射の計算では、いつも  $S$ 、 $\sigma$ 、 $4\pi r^2$ 、 $T^4$  が出て、煩雑なので放射強度  $P$  そのままではなく

$$\text{正規化放射強度 } I = P / 4\pi r^2 \sigma \quad [K^4] \quad \text{式(4)}$$

を定義しておく、便利である。

もし、ある黒体が正規化放射強度  $I$  の赤外放射を発しているなら、その黒体の温度は  $T = I^{1/4} [K]$  として計算できる。

(注)  $X^{1/4} = X$  の4乗根 =  $X$  の平方根の平方根 例え、 $81^{1/4} = 3$

太陽放射を受けている場合の正規化放射強度を  $I_0$  とすると、

$$I_0 = P / 4\pi r^2 \sigma = \pi r^2 S / 4\pi r^2 \sigma = S / 4 \sigma = T_0^4$$

その黒体の温度は  $T_0 = I_0^{1/4} = 278 K$  として計算できる。

(以下、“正規化”という言葉は省略する)

# 温室効果ガスがない場合のモデル

## 記号の説明

A = アルベド(地表面の反射率)

$I_0$  = 太陽放射強度

$I_g$  = 地球放射強度

$T_g$  = 地表面温度

## 温度の計算

地表面に入る太陽放射強度は

$$I_{in} = (1-A)I_0$$

地表面から出る地球放射強度は

$$I_{out} = T_g^4$$

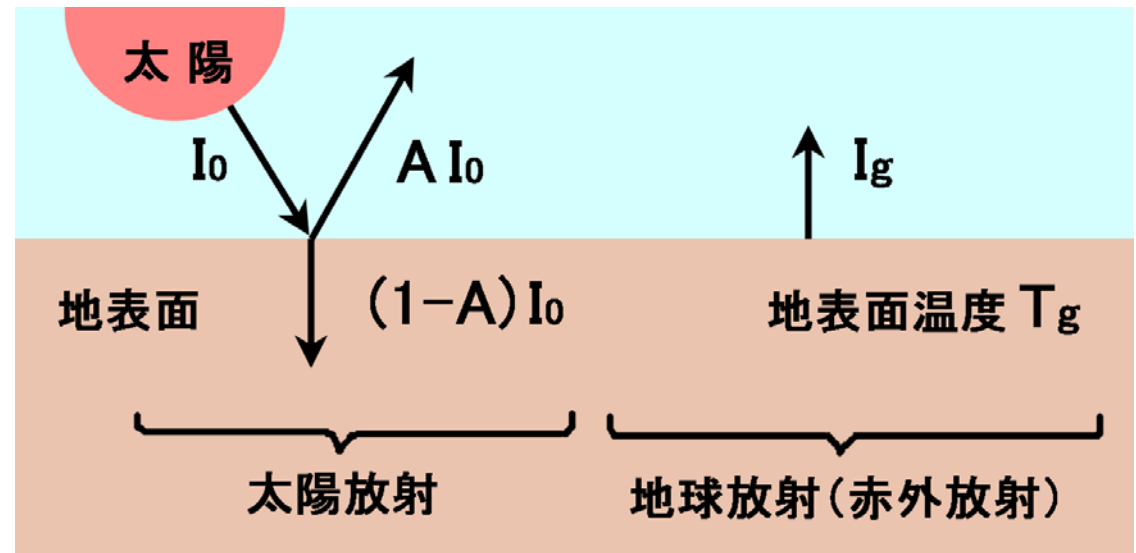
地表面でのエネルギーのバランスから

$$I_{in} = I_{out} \quad \therefore (1-A)I_0 = T_g^4$$

$$\therefore T_g = (1-A)^{1/4} I_0^{1/4} = 278 \cdot (1-A)^{1/4} \text{ [ K ]} \quad \text{式(5)}$$

アルベド  $A = 0.3$  とすると、 $T_g = 254 \text{ K} = -19 \text{ }^\circ\text{C}$

温室効果ガスがなければ地表面温度は $-19 \text{ }^\circ\text{C}$ となり、観測される平均温度  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  より $34 \text{ }^\circ\text{C}$ も低い。温室効果ガスがなければ、人間は地球に住めない。



## 5. より精度のよいモデルによる計算

4章の簡単なモデルでは温室効果を過大に評価したので、もっと精度のよいモデルを考え、電卓で計算してみよう。

より精度のよいモデルとは、どんなモデル？

下記のことを考慮する

- ①地球のアルベド(太陽光の反射率)
- ②大気中での太陽光の吸収
- ③大気中の温室効果ガスの効果

以下、計算を見易くするため、正規化放射強度を定義しておく

簡単なモデルの場合と同様に

$\sigma$  = ステファン・ボルツマン定数 =  $5.671 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$S$  = 太陽定数 =  $1.37 \times 10^3 \text{ W/m}^2$

$r$  = 黒体球の半径 [m] 、  $T$  = 黒体球の温度 [K]

ここは計算する人  
だけが読めばよい

太陽放射と地球放射の計算では、いつも  $S$ 、 $\sigma$ 、 $4\pi r^2$ 、 $T^4$  が出て、煩雑なので放射強度  $P$  そのままではなく

$$\text{正規化放射強度 } I = P / 4\pi r^2 \sigma \quad [\text{K}^4] \quad \text{式(1)}$$

を定義しておくと、便利である。

もし、ある黒体が正規化放射強度  $I$  の赤外放射を発しているなら、その黒体の温度は  $T = I^{1/4} \quad [\text{K}]$  として計算できる。

太陽放射を受けながら赤外放射をして平衡している場合の正規化放射強度を  $I_0$  とすると、

$$I_0 = P / 4\pi r^2 \sigma = \pi r^2 S / 4\pi r^2 \sigma = S / 4 \sigma = T_0^4$$

その黒体の温度は

$$T_0 = I_0^{1/4} = (S / 4 \sigma)^{1/4} = 278 \text{ K (いわゆる黒体の平衡温度)} \quad \text{式(2)}$$

として計算できる。(以下、“正規化”という言葉は省略する)

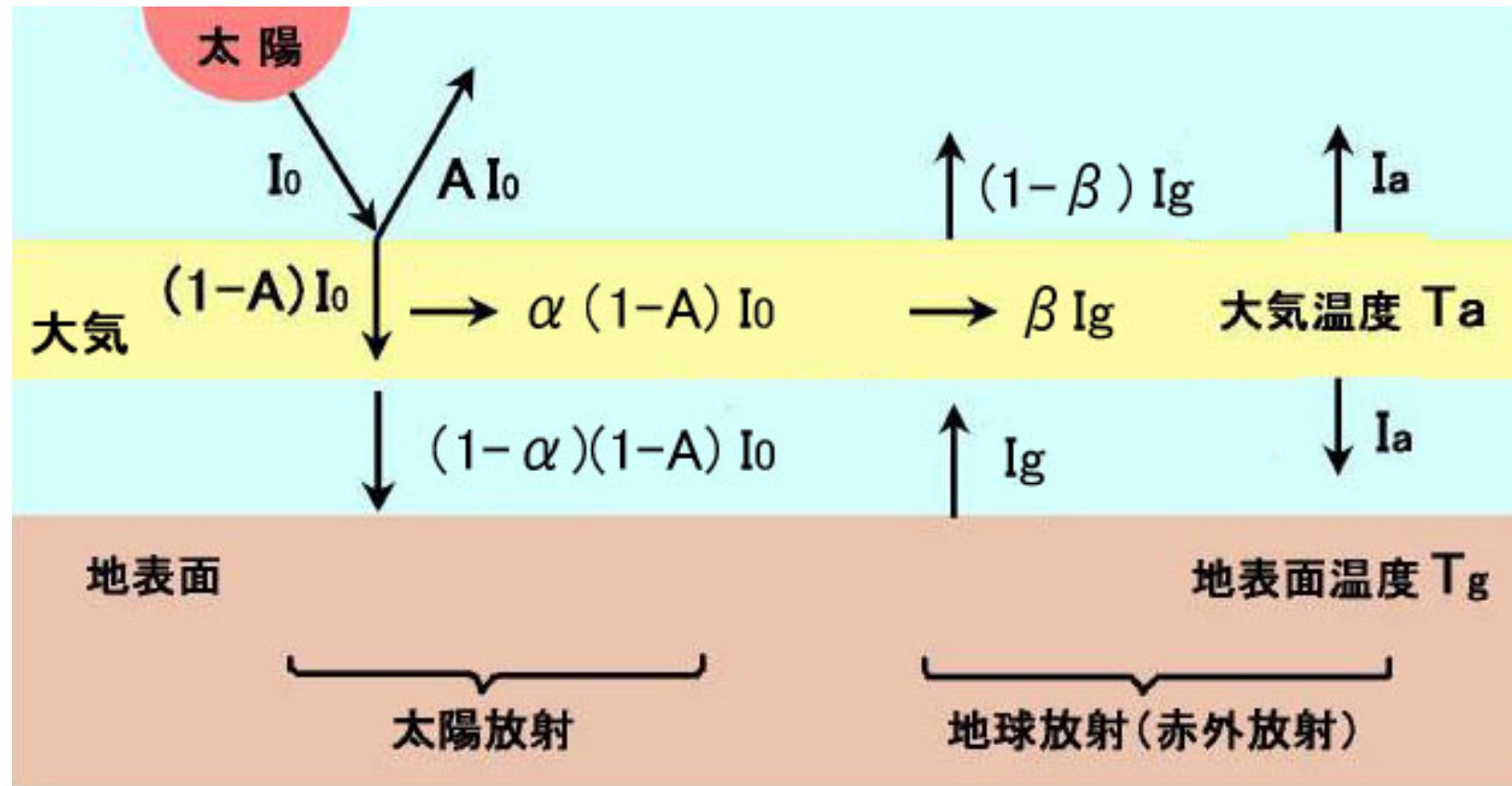
# 温室効果ガスが存在する場合の地表面温度計算モデル

ここでは、次の3つを考慮したモデルを作ることにする

$A$  = 地球の太陽放射の反射率 (ここではアルベドは雲によって決まるとする)

$\alpha$  = 大気中の太陽放射の吸収率

$\beta$  = 大気中の地球放射の吸収率



$g = \text{ground}$ ,  $a = \text{atmosphere}$



## 温室効果ガスが存在する場合の放射強度の計算

ここは計算する人  
だけが読めばよい

地表面のエネルギーバランスから

$$(1-\alpha)(1-A)I_0 - I_g + I_a = 0$$

大気中のエネルギーバランスから

$$\alpha(1-A)I_0 + \beta I_g - 2I_a = 0$$

式(3)

中学2年でやる連立方程式

$$\begin{cases} 2x + 3y = 8 \\ 3x + y = 5 \end{cases}$$

式(3)は、未知数  $I_g$  と  $I_a$  についての連立方程式である。未知数  $I_g$  と  $I_a$  を求めると

$$I_g = \frac{2-\alpha}{2-\beta} (1-A) I_0$$

$$I_a = \frac{\alpha+\beta-\alpha\beta}{2-\beta} (1-A) I_0$$

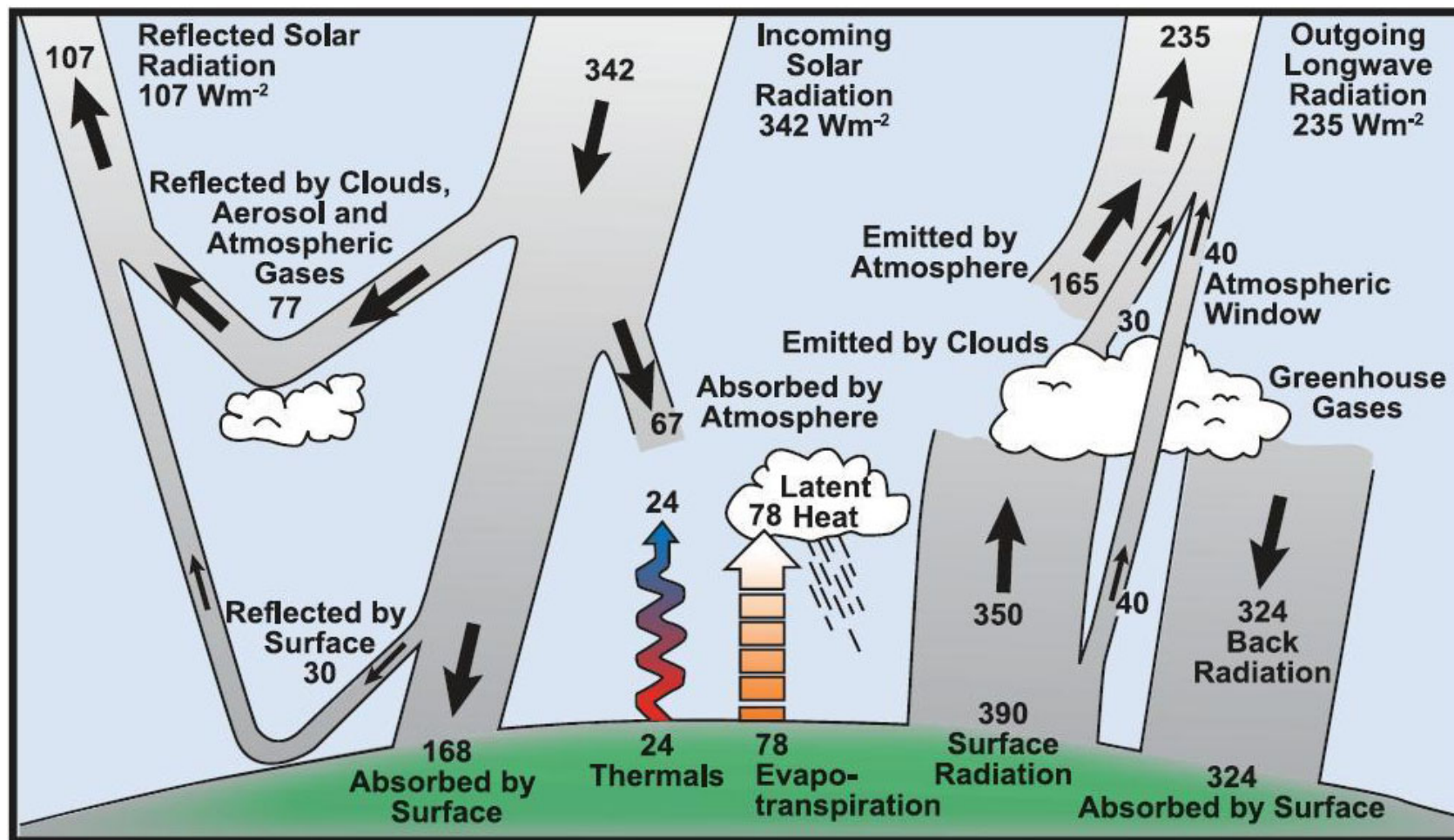
式(4)

地表面の温度は

$$T_g = I_g^{1/4} = \left\{ \frac{(2-\alpha)(1-A)}{2-\beta} \right\}^{1/4} I_0^{1/4}$$

$$= 278 \cdot \left\{ \frac{(2-\alpha)(1-A)}{2-\beta} \right\}^{1/4} \text{ [K]} \quad \text{式(5)}$$

## A, $\alpha$ , $\beta$ の値の推定



IPCC 第4次評価報告書より

上の図から A,  $\alpha$ ,  $\beta$  の値を推定する

A = 地球の太陽放射の反射率 =  $107 / 342 = 0.31$

$\alpha$  = 大気中の太陽放射の吸収率 =  $67 / (342 - 77 - 30) = 0.28$

$\beta$  = 大気中の地球放射の吸収率 =  $350 / 390 = 0.90$

## 温室効果ガスが存在する場合の地表温度の計算

面頁の表から得られた

$A$  = 地球の太陽放射の反射率 = 0.31

$\alpha$  = 大気中の太陽放射の吸収率 = 0.28

$\beta$  = 大気中の地球放射の吸収率 = 0.90

を式(5)に代入すると、

$$T_g = 278 \cdot \left\{ \frac{(2-\alpha)(1-A)}{2-\beta} \right\}^{1/4} \text{ [K]}$$

$$= 278 \cdot 1.019 = 283 \text{ K} = 10^\circ\text{C}$$

となり、観測値 $15^\circ\text{C}$ に比べて、やや低い温度となる。

パラメータとして、古典的な値  $A=0.30$ ,  $\alpha=0.20$ ,  $\beta=0.90$  を代入すると、

$$T_g = 278 \times 1.035 = 288 \text{ K} = 15^\circ\text{C}$$

となり、観測値 $15^\circ\text{C}$ に近い値となる。

## 6. まとめ

1. スーパーコンピュータによる地球温暖化の計算とはどんなものか
2. 惑星の表面温度はどのようにして決まるのか
3. 簡単なモデル(アルベドだけを考慮)で、地表面の平均温度を、電卓で計算してみた。(温室効果ガスがない場合)

その結果、地表面温度は $-19^{\circ}\text{C}$ となり、観測される平均温度 $15^{\circ}\text{C}$ より $34^{\circ}\text{C}$ も低い。

4. より精度のよいモデル(アルベドのほかに、大気中での太陽光の吸収、温室効果ガスによる赤外線放出も考慮)で、計算してみた

その結果、計算された地表面温度 $15^{\circ}\text{C}$ となり、観測される平均温度とよい一致を見た。

このような簡単なモデルで電卓を使って、地球温暖化の概略の計算ができた。これが地球温暖化の理解に少しでも役立てば幸いです。

## 参考文献（本稿に限らず温暖化で重要な文献を示す）

### 1. IPCC報告書（良くも悪くも、地球温暖化論議はこれを読んでから）

- ① IPCC第5次報告書（英文で合計約5,000頁）

<https://www.ipcc.ch/report/ar5/> からダウンロードできます

- ② IPCC第5次報告書（下記の3つの日本語要約で合計約150頁）

自然科学的根拠（第1作業部会）の政策決定者向け要約

[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc\\_ar5\\_wg1\\_spm\\_jpn.pdf](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf)

影響・適応・脆弱性（第2作業部会）の政策決定者向け要約

[http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th\\_pdf/ar5\\_wg2\\_spmj.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th_pdf/ar5_wg2_spmj.pdf)

気候変動緩和（第3作業部会）の環境省独自の要約

[https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5\\_wg3\\_overview\\_presentation.pdf](https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_wg3_overview_presentation.pdf)

### 2. IPCC報告書懐疑論（代表的な3書を挙げる。誤解や誤りもあるが、一読の価値あり）

- ① 「正しく知る地球温暖化」、赤祖父俊一、誠文堂新光社、B6、183頁、1400円

アラスカ大学北極圏研究センター元所長の赤祖父氏が、IPCC主導の気候研究に警鐘を鳴らす…

- ② 「地球温暖化論に騙されるな」、丸山茂徳、講談社、B6、188頁、1400円

プルームテクトニクスを提唱した世界的に有名な地質学者（東京工業大学教授）の言いたい放題…

- ③ 「二酸化炭素温暖化説の崩壊」、広瀬隆、集英社新書、新書版、222頁、700円

反原発で大活躍のジャーナリスト広瀬隆氏の面目躍如だが…

### 3. IPCC報告書懐疑論に対する反論（これが正論とされているが、説明が下手なため説得力に欠ける）

- ① 地球温暖化懐疑論批判 明日香、江守ほか、IR3S／TIGS 叢書 No.1

[http://www2.ir3s.u-tokyo.ac.jp/web\\_ir3s/sosho/all.pdf](http://www2.ir3s.u-tokyo.ac.jp/web_ir3s/sosho/all.pdf)

- ② 「地球温暖化の予測は正しいか」、江守正多、(株)化学同人、B6、238頁、1700円

IPCC報告書執筆者の国立環境研究所の江守氏が気候モデルの信頼度について真摯に解説する…





**ご清聴、有難うございました**

**ご質問は、西田まで [joy@nishida-s.com](mailto:joy@nishida-s.com)**