

そこが知りたい！ 地球温暖化

物理学の基礎から電卓で計算してみませんか

2013年11月28日 家庭クラブ会館

山遊会 西田 進

目次

1. 身近に感じる温暖化
2. 惑星の表面温度はどのようにして決まるのか
3. 太陽光の反射率（アルベド）とは何か
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
5. スーパーコンピュータでは、地球（地表・海洋・大気）の温度の計算をどのようにしてやっているか。
計算の結果はどうなったか。
6. 地球が温暖化すると、どんな影響があるか
7. 今は温暖化で騒いでいるが、やがて氷期が來るのでは
8. いわゆる地球温暖化とヒートアイランド現象はどう違うのか
9. 原発や火力発電所の廃熱は温暖化に寄与しないのか
10. もっと精度のよいモデルによる計算（2014年3月3日追加）
11. まとめ

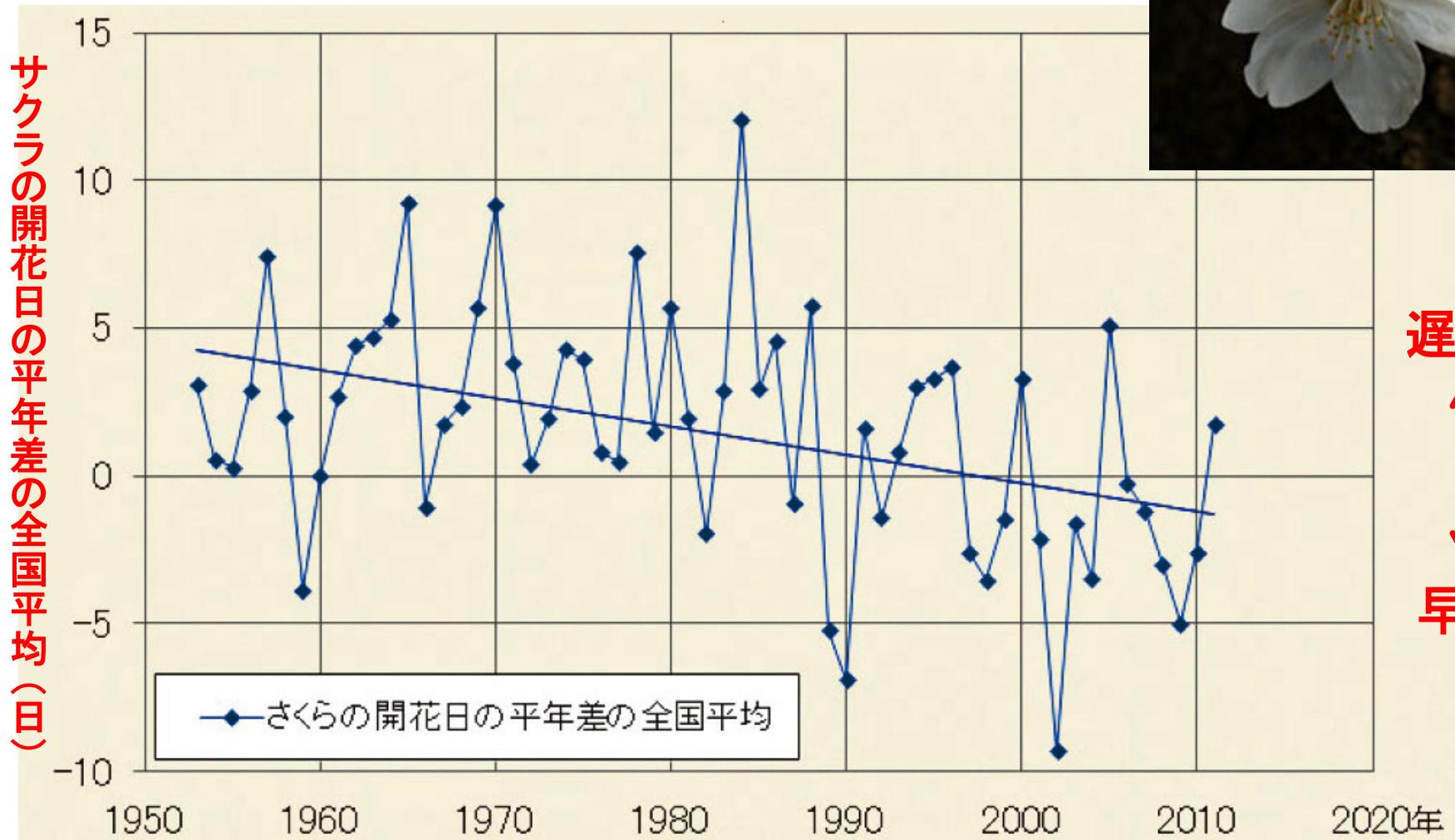
1. 身近に感じる温暖化

サクラの開花日

サクラの種類:ソメイヨシノ、エゾヤマザクラ、ヒカンザクラ

観測地点:全国59個所

種類による開花日の差を除くため、縦軸は平年差にしてある



カエデの紅(黄)葉日

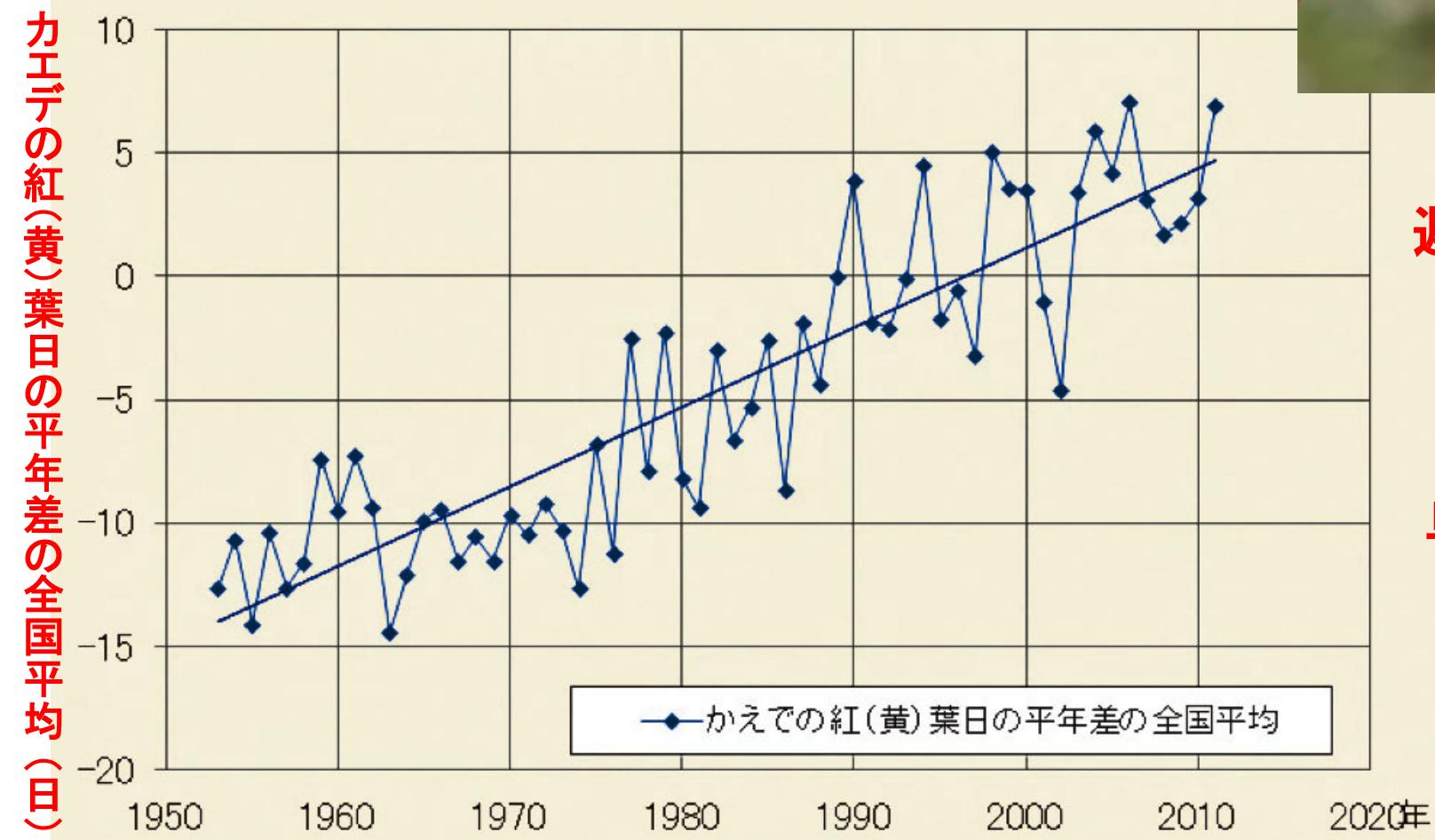
カエデの種類:イロハカエデ、イタヤカエデ、ヤマモミジ、オオモミジ

観測地点:全国52個所

種類による開花日の差を除くため、縦軸は平年差にしてある



遅い
↑
早い





南国の「ナガサキアゲハ」の飛来



「ナガサキアゲハ♀」が、横浜の我家の庭に現れました(2006年9月撮影)



氷河の後退



カナディアンロッキーのアサバスカ氷河は、
30年間に1.6kmも後退していた（2002年撮影）

2. 惑星の表面温度はどのようにして決まるのか

チョット硬い話からスタートします
式は無視して、絵だけ見て下さい

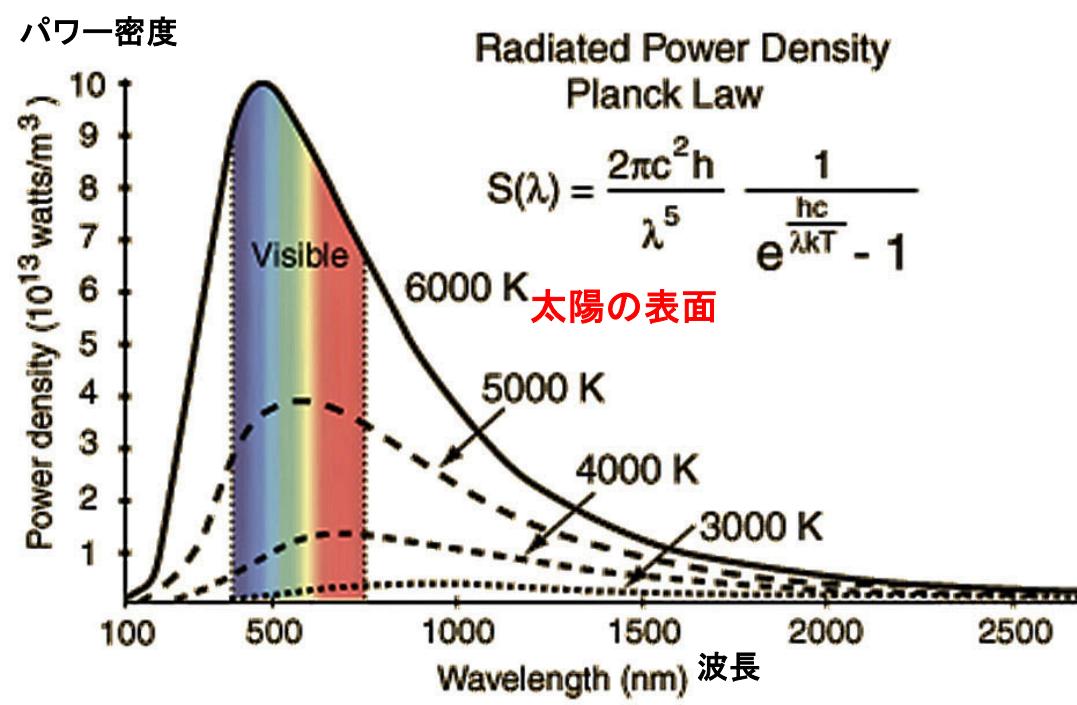
それでも、納得できる話です！

黒体放射の話

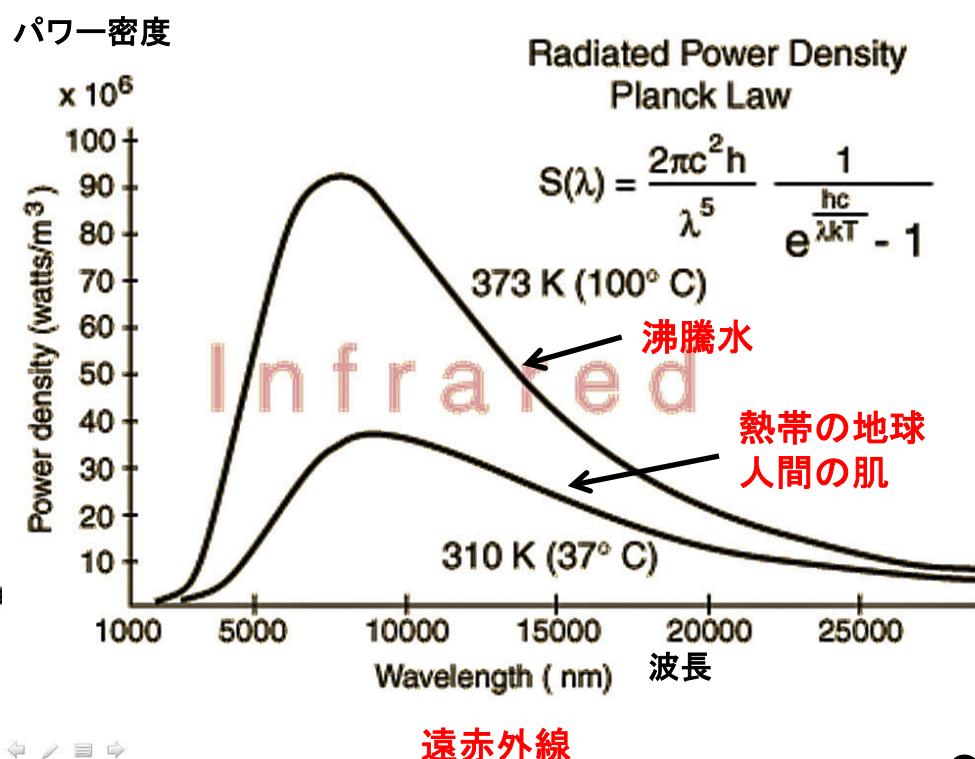
黒体とは、すべての波長の光に対して、反射率=0、放射率=1 の仮想物体。

黒体は、プランクの法則に従って、温度で決まる波長スペクトルの放射をする。

6000Kの黒体からの放射のスペクトル
太陽放射に対応する

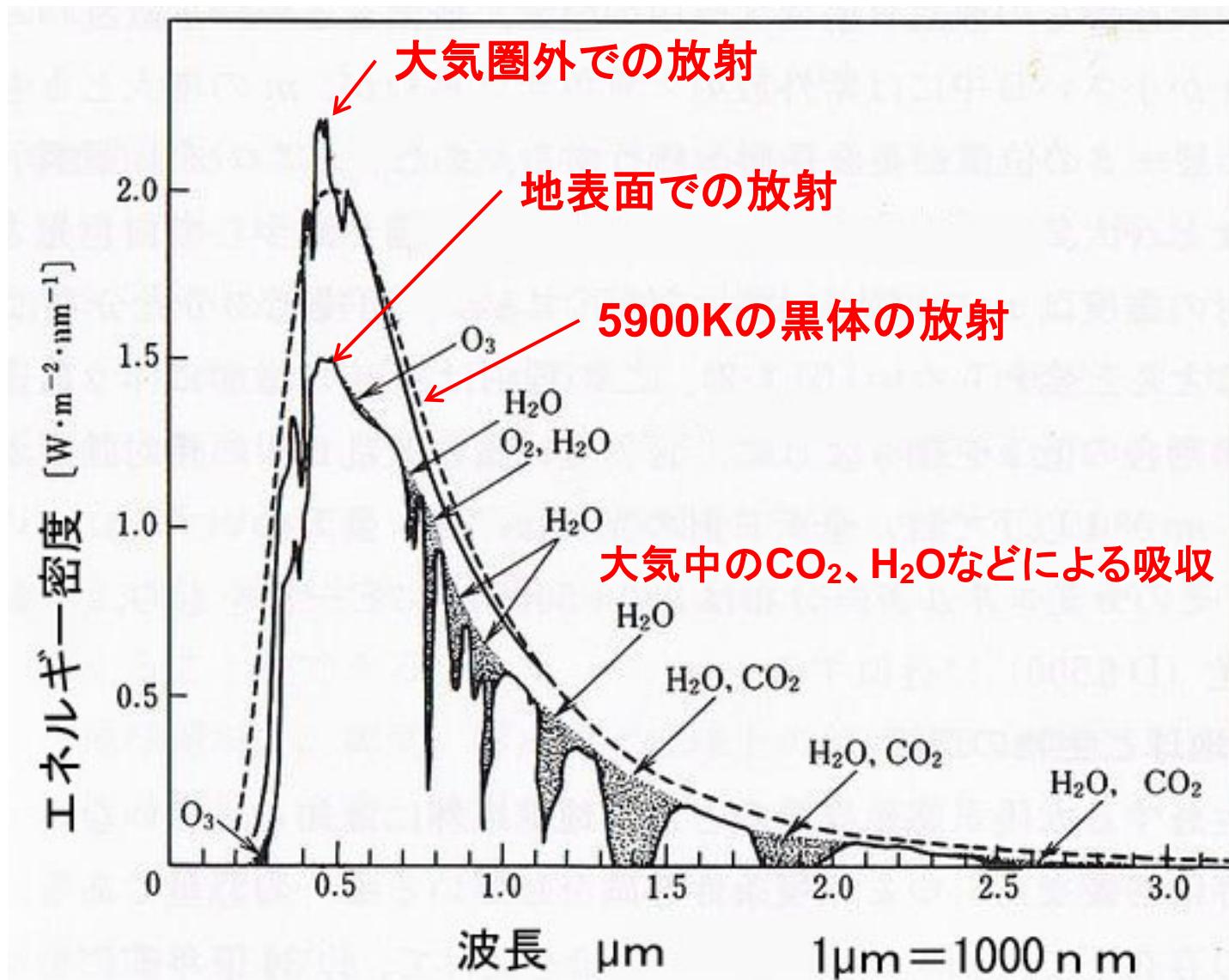


310Kの黒体からの放射のスペクトル
地球放射に対応する
赤外放射とも 熱放射ともいう



太陽放射のスペクトル

太陽放射は5900Kの黒体からの放射に近いが、
地表面では大気による吸収を受けている



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？

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]

$$P_{in} = S \cdot \pi r^2 \quad \text{式(1)}$$

ここで、

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

$$r = \text{黒体球の半径} [\text{m}]$$

黒体球から出る赤外放射のエネルギー P_{out} [W]

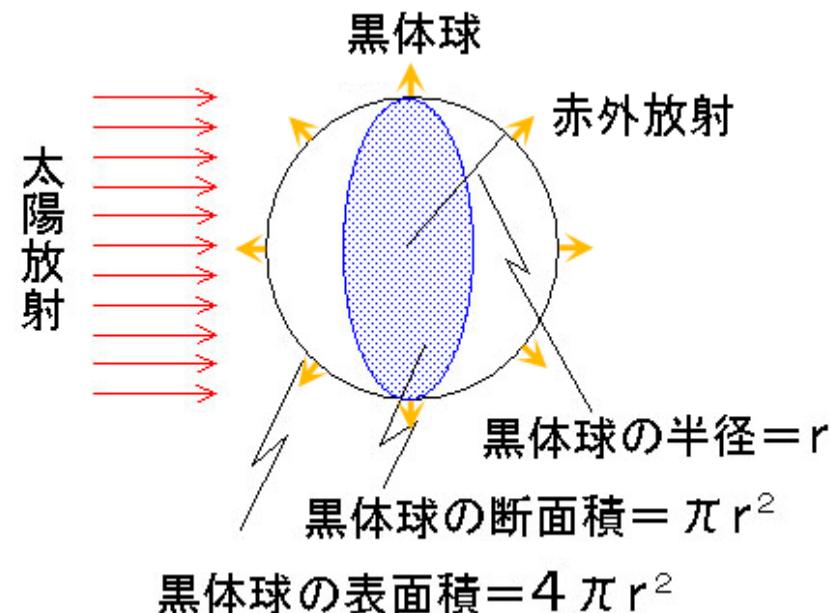
$$P_{out} = \sigma T_0^4 \cdot 4 \pi r^2 \quad \text{式(2)}$$

ここで、

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

$$T_0 = \text{黒体の温度} [\text{K}]$$

太陽・地球間と同じ距離の所に黒体を置いたとする



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もらい、自ら赤外放射をしてエネルギーを失う。

平衡状態では、 $P_{in} = P_{out}$ 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 (計算値) | 平均表面温度 (観測値) |
|-----|-------------------|------------------|--|
| 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 ₂ による温室効果) |
| 地球 | 1.0000 | 278 K (5 °C) | 15°C (400ppmのCO ₂ 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、H₂Oが液体で存在できる唯一の惑星。
地球上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！

3. 太陽光の反射率（アルベド）とは何か

レオナルド・ダ・ヴィンチは、知っていた！

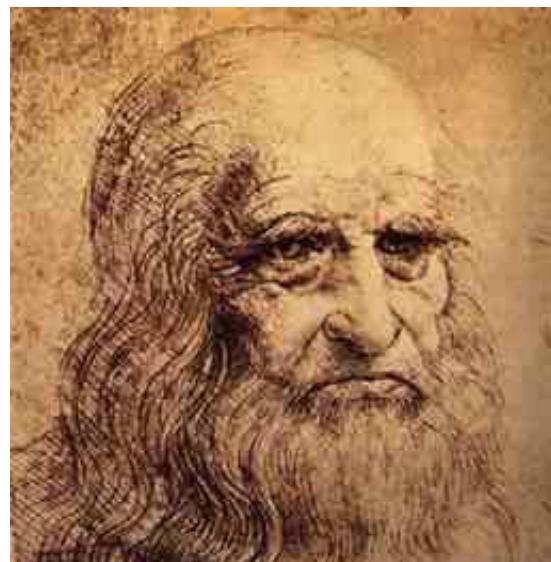
- ① 月の明るい部分は、太陽に照らされている
- ② 月の暗い部分は、地球に照らされている

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



地球照

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。

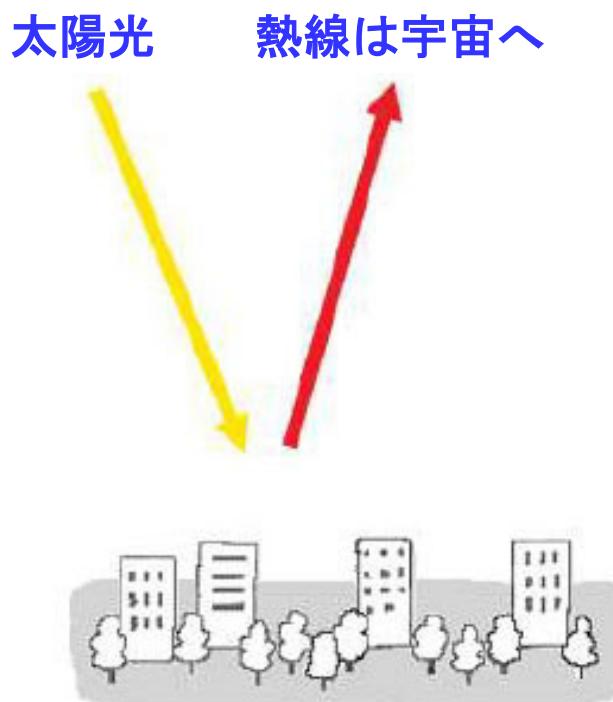
4. 簡単なモデルで、地表面の平均温度を、電卓で計算してみよう

現実の地球は黒体ではない！
そこで、アルベドと温室効果ガス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！

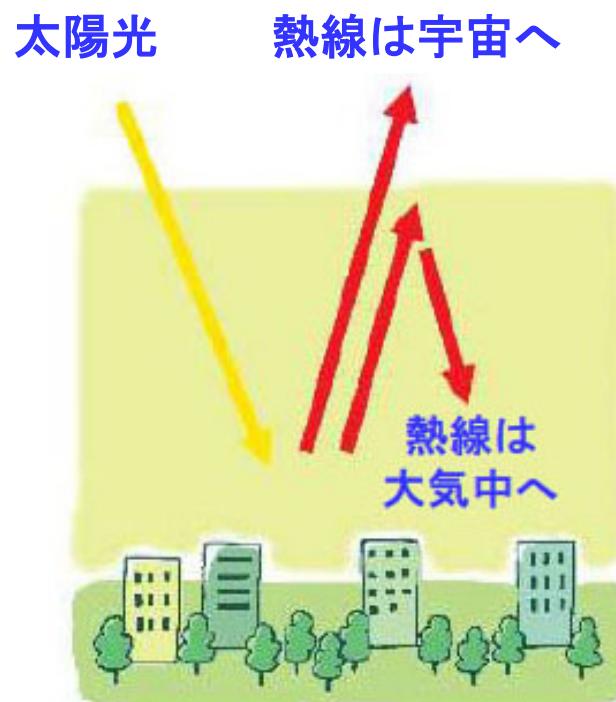
温室効果ガスはどのような作用をするか

もし、温室効果ガスが存在しなかつたら



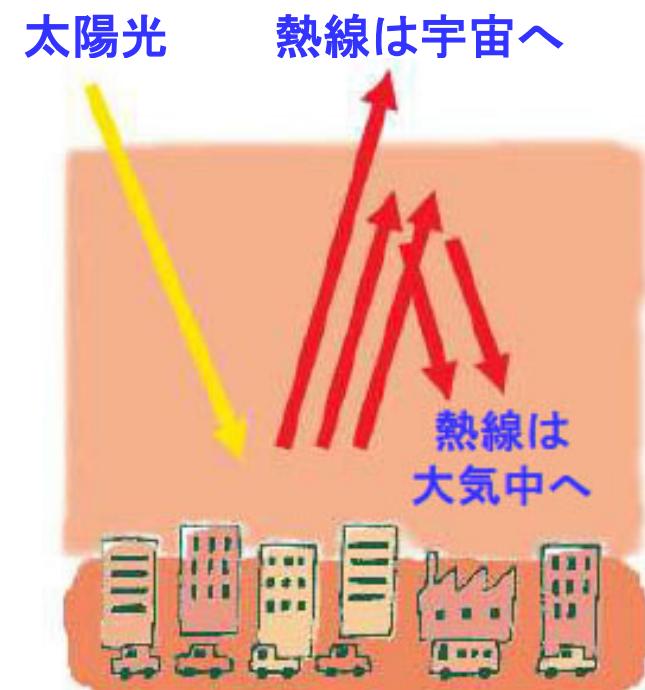
平均気温は -19°C

現在のように、温室効果ガスが適量あつたら



平均気温は 15°C

将来、温室効果ガスが過大になつたら



平均気温は 例えば 20°C

これをモデル化して、電卓で計算してみよう！

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
(こここの説明は、飛ばしてもよい)

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

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

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 $T = I^{1/4}$ [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 例えば、 $81^{1/4} = 3$

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、

$$I_0 = P / 4\pi r^2 \sigma = \pi r^2 S / 4\pi r^2 \sigma = S / 4 \sigma = T_0^4 \quad (\text{式(3)を入れた})$$

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

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

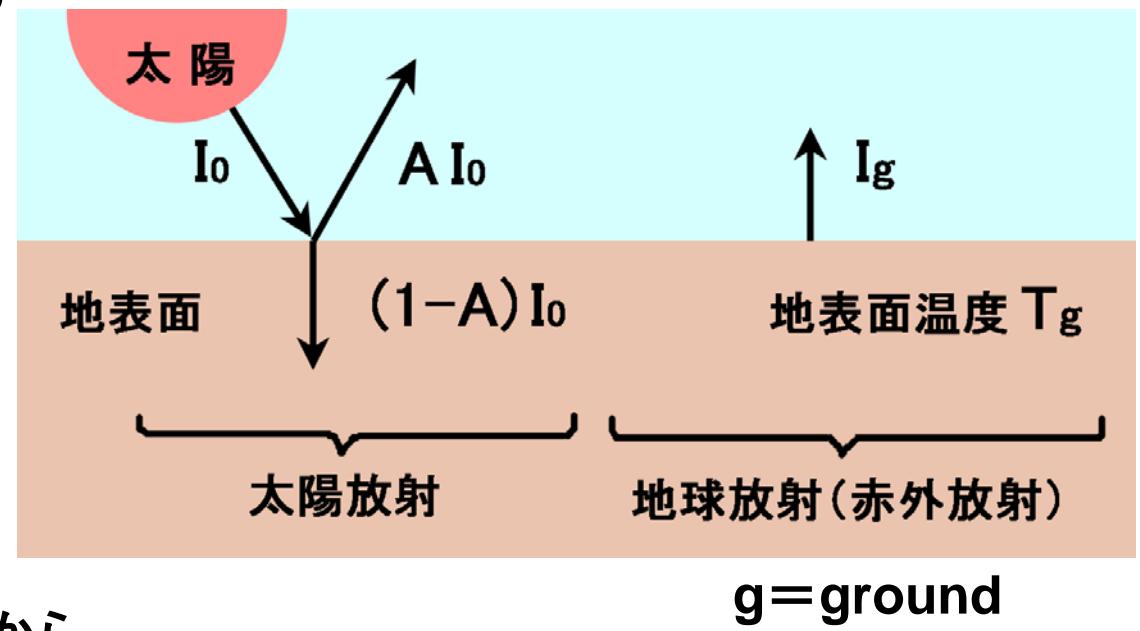
地表面でのエネルギーのバランスから

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

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

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

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



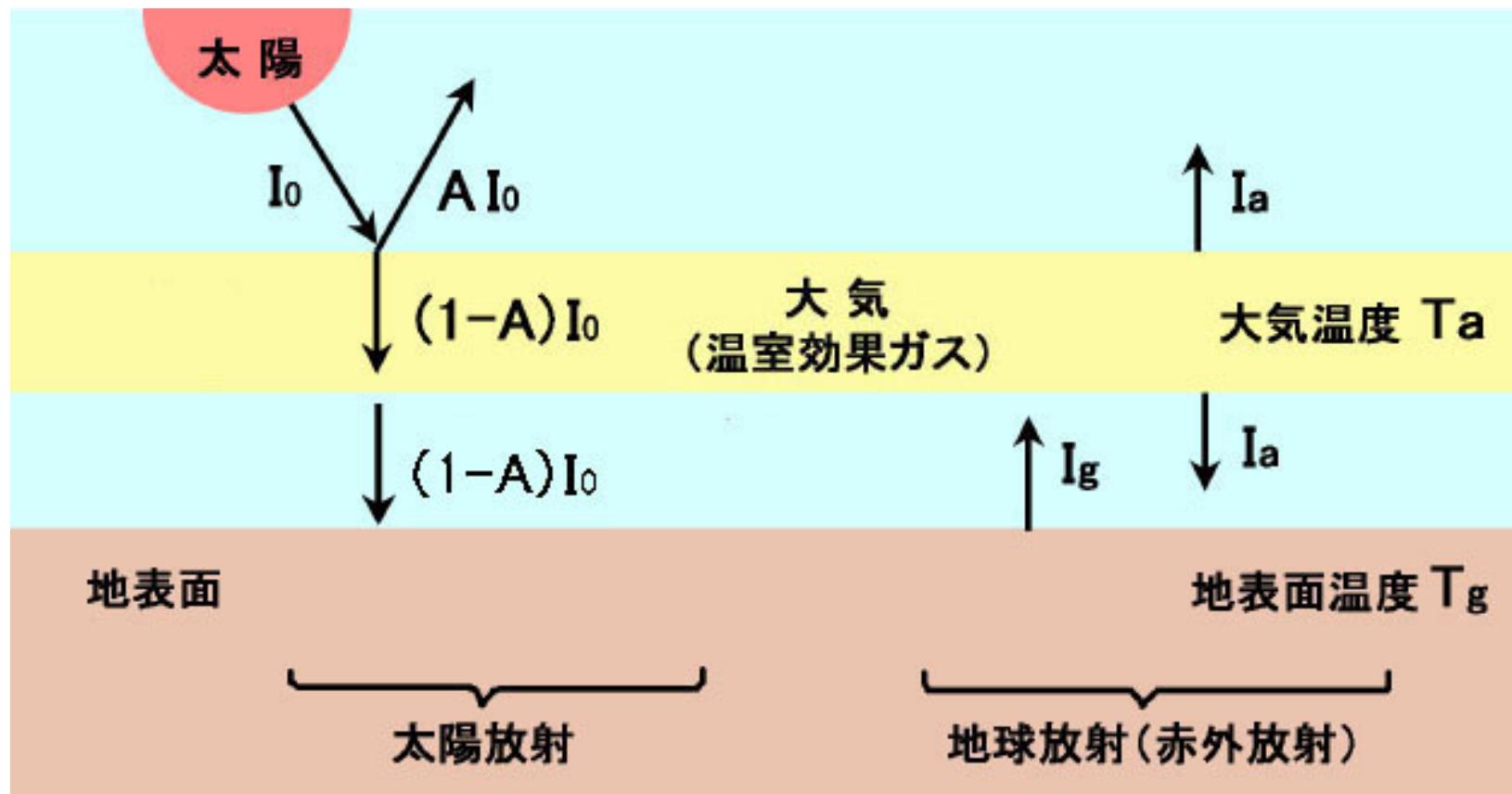
$g=ground$

温室効果ガスが高濃度で存在する場合のモデル

太陽放射の反射率アルベドAを考慮する

地球放射はすべて大気中で吸収されるとする(十分なガス濃度)

温室効果ガスは1層で、温度は均一であるとする



$t=transfer$, $g=ground$, $a=atmosphere$

温室効果ガスが十分に高濃度で存在する場合の計算

地表面のエネルギーバランスから

$$(1-A)I_0 - I_g + I_a = 0 \quad \text{式(6)}$$

大気中のエネルギーバランスから

$$I_g - 2I_a = 0 \quad \text{式(7)}$$

式(6)と式(7)から、未知数 I_g と I_a を求めると

$$\begin{aligned} I_g &= 2(1-A) I_0 \\ I_a &= (1-A) I_0 \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad \text{式(8)}$$

アルベド $A = 0.3$ とすると、式(8)から

$$\begin{aligned} T_g &= I_g^{1/4} = 278 \cdot \{(2(1-0.3)\}^{1/4} = 302 \text{ K} = 29^\circ\text{C} \\ T_a &= I_a^{1/4} = 278 \cdot (1-0.3)^{1/4} = 254 \text{ K} = -19^\circ\text{C} \end{aligned}$$

温室効果ガスが十分に高濃度で存在する場合の地表面温度は 29°C となる。

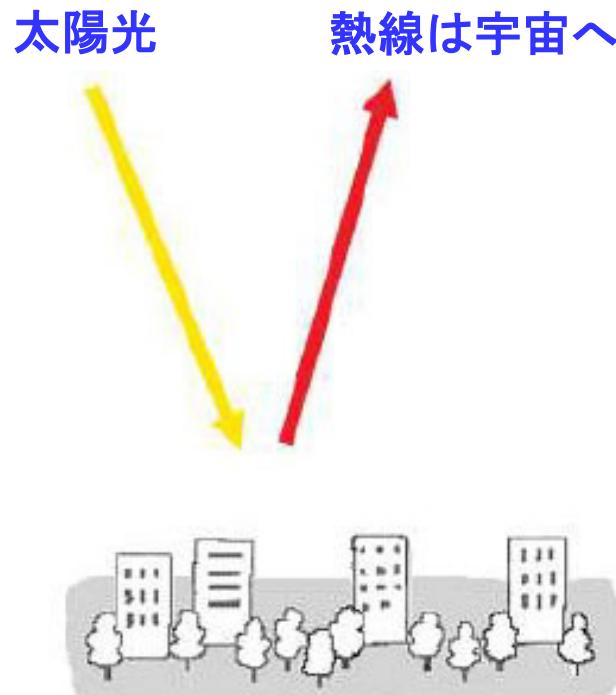
観測される平均温度 15°C より高いのは、温室効果ガスが十分に高濃度であると仮定したからであろう。

地表面の平均温度を、電卓で計算した結果

| | 主な仮定 | 地表面温度 | 温室効果による昇温 |
|---------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------|
| 電卓で計算した結果 (温室効果ガスなし) | アルベド $A = 0.3$ 温室効果ガスなし | 254 K (-19 °C) | — |
| 電卓で計算した結果 (温室効果ガス十分あり) | アルベド $A = 0.3$ 温室効果ガス濃度十分高い | 302 K (29 °C) | 48°C |
| 観測値(全地球平均値) | — | 288 K (15 °C) | 34°C |

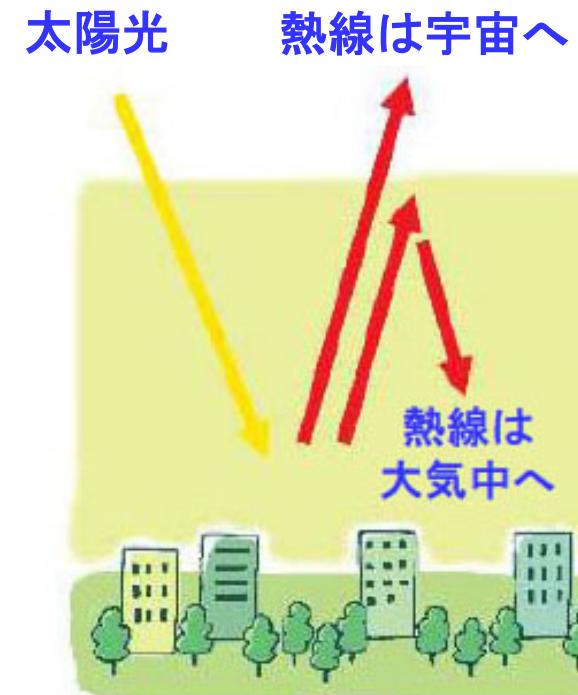
電卓で計算した結果！

もし、温室効果ガスが
存在しなかったら



(今やった簡単モデル) 平均気温は -19°C

十分な濃度の
温室効果ガスがあったら



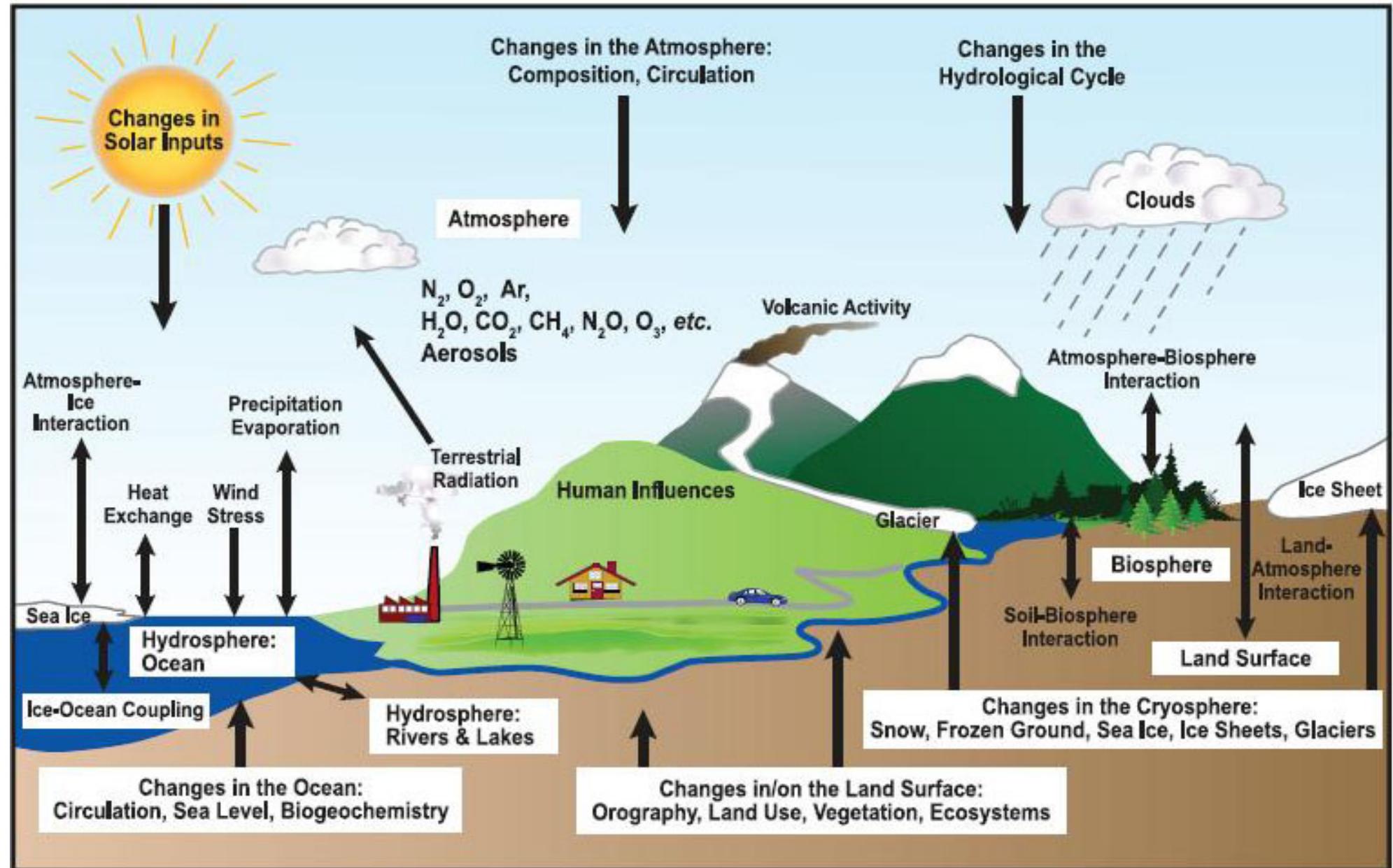
(今やった簡単モデル) 平均気温は 29°C

(実際の観測値) 平均気温は 15°C

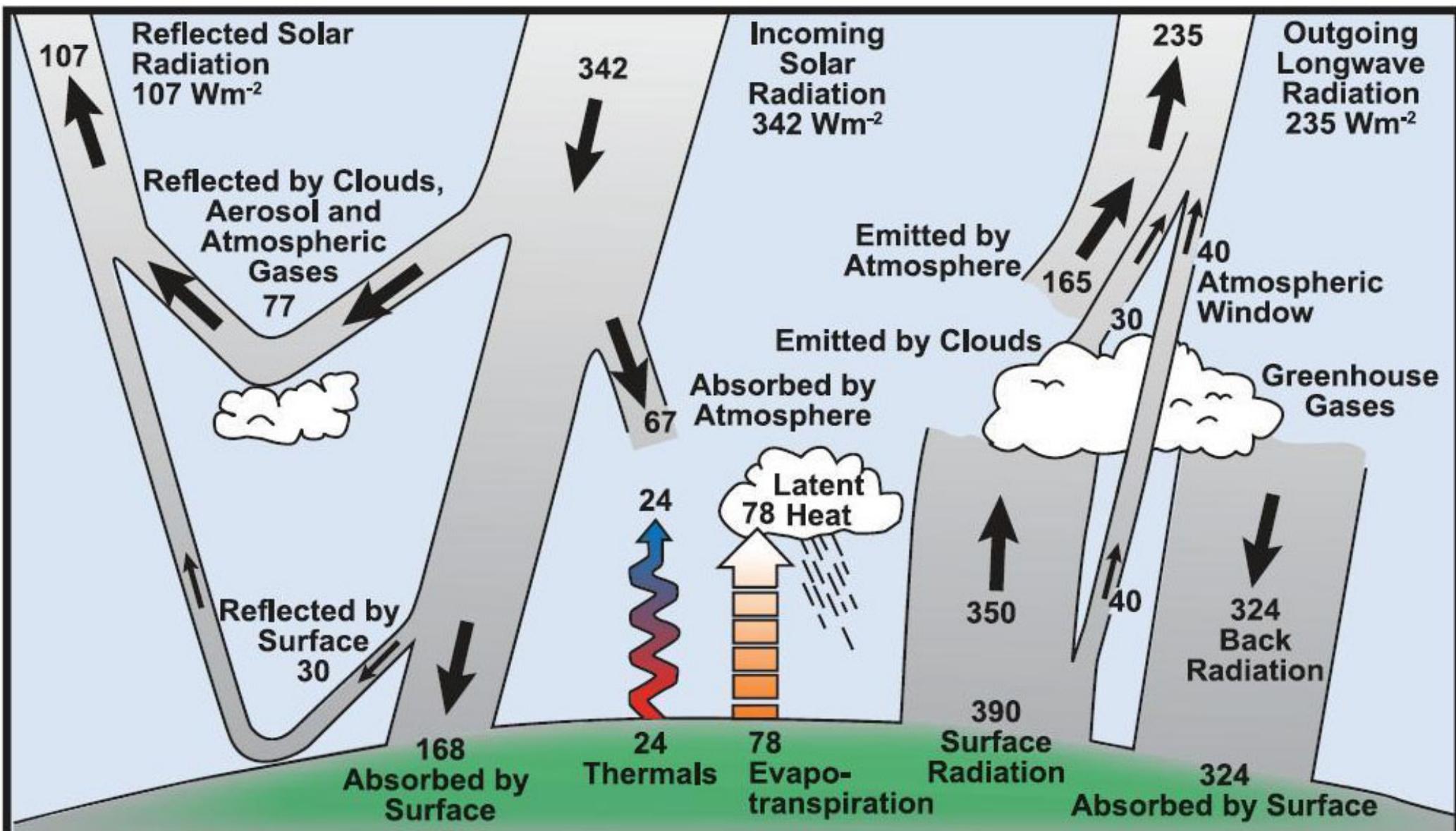
簡単モデルでは温室効果が過大に計算されてしまった。
より精度のよいモデルについては、最後の10章で述べる。

5. スーパーコンピュータでは、地球（地表・海洋・大気）の温度の計算をどのようにしてやっているか。計算の結果はどうなったか。

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

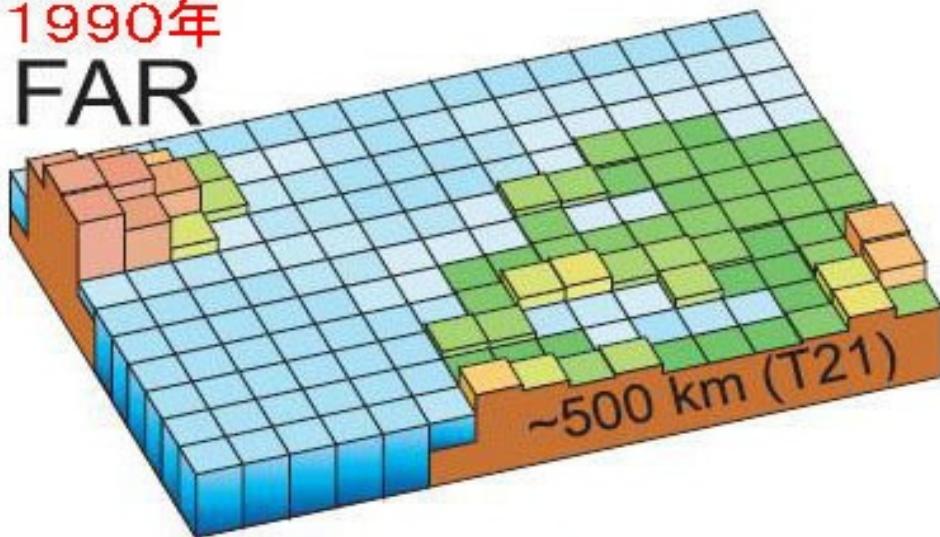


地球のエネルギー・バランス(太陽放射と地球放射)

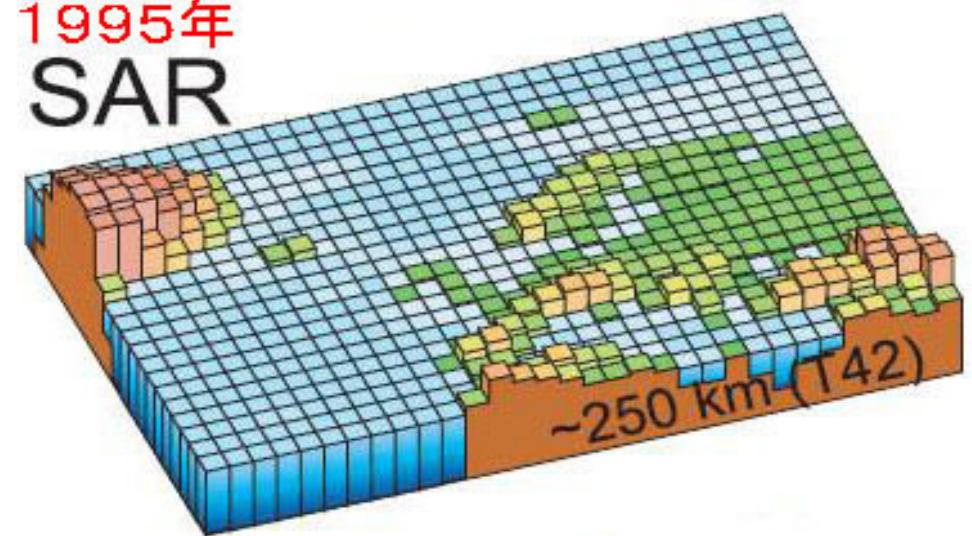


シミュレーションのためのモデルの進歩（メッシュの微細化）

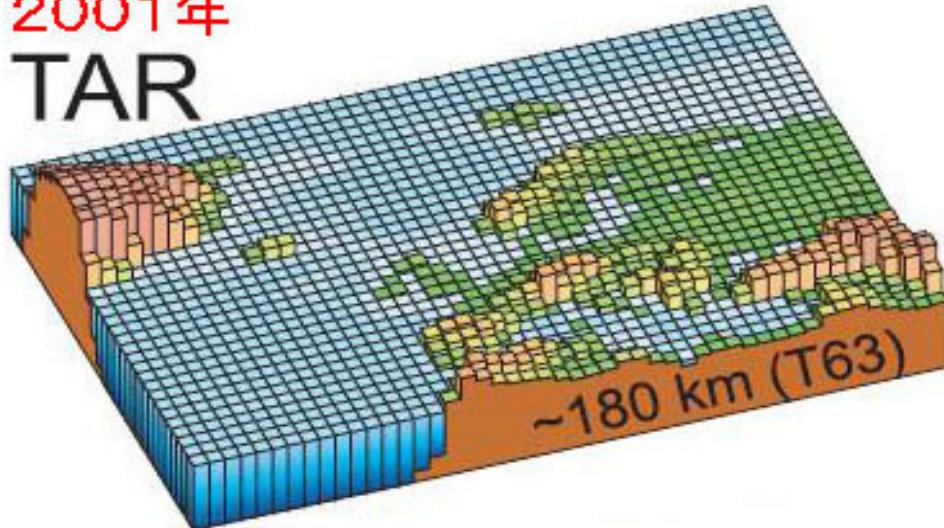
1990年
FAR



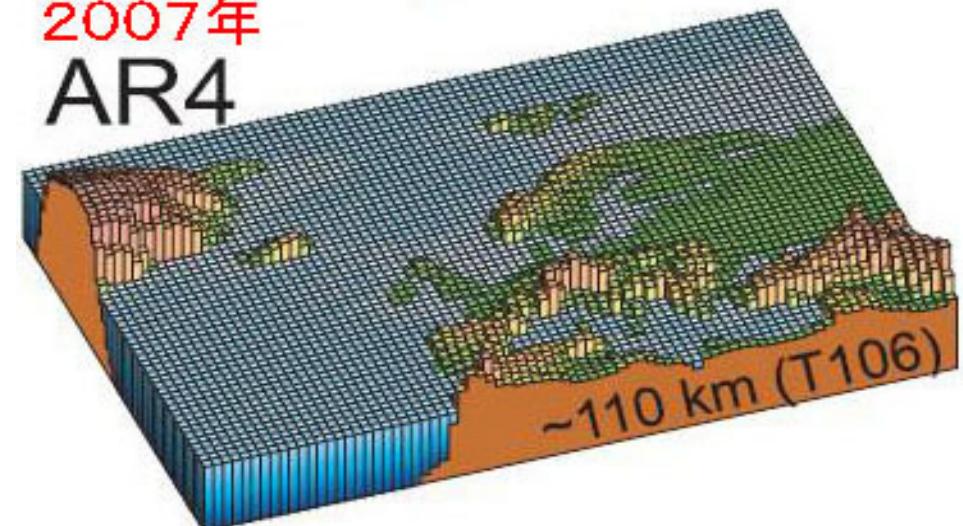
1995年
SAR



2001年
TAR



2007年
AR4

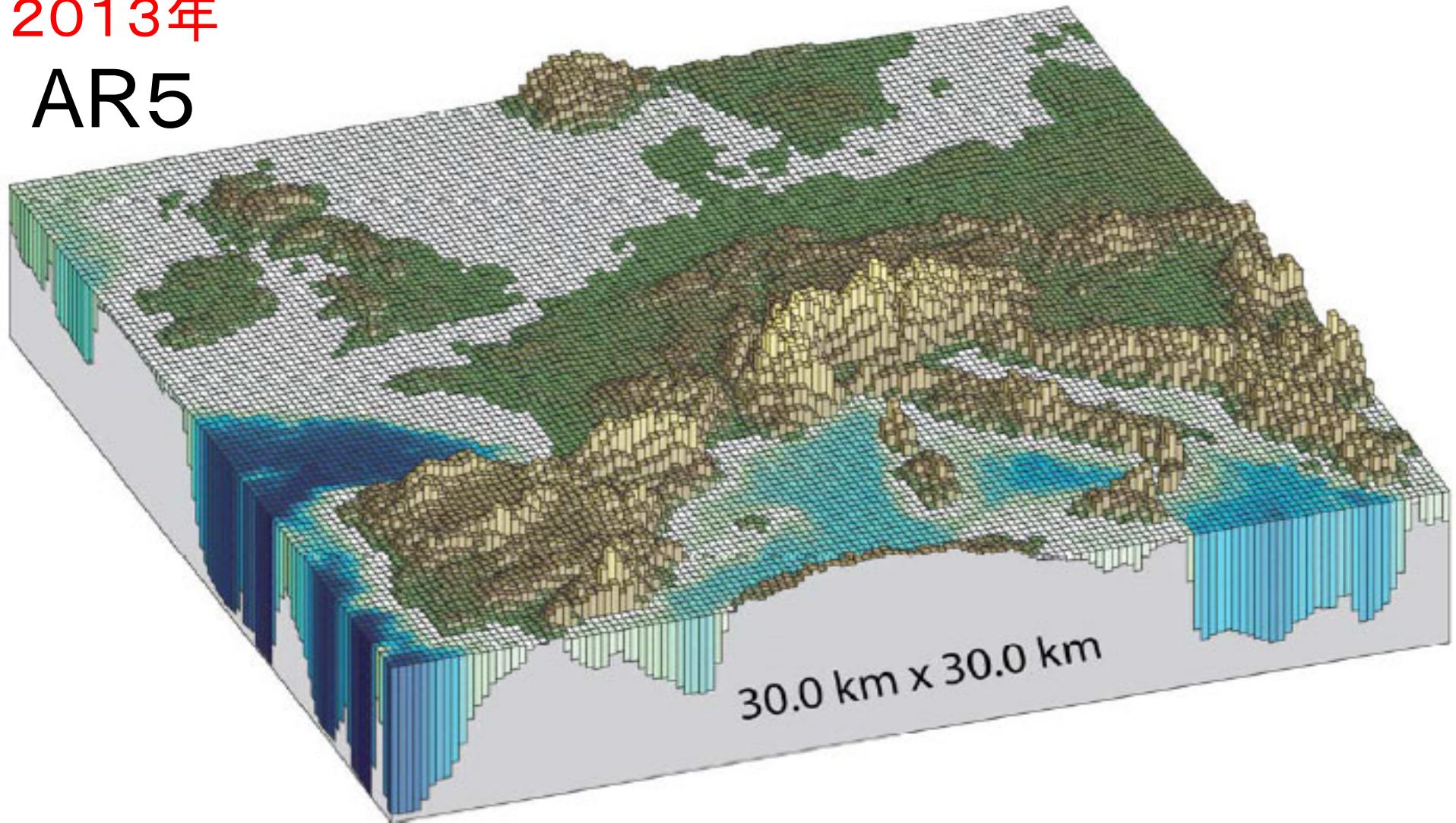


シミュレーションの際のメッシュは、ますます微細になった

第5次報告書では、このようなメッシュも一部に使われている

2013年

AR5



わが国のスーパーコンピュータ(地球シミュレーター)



建物外観 $50m \times 65m \times 17m$

神奈川県横浜市金沢区
独立行政法人海洋研究開発機構
世界最高の演算性能を達成 2002年4月

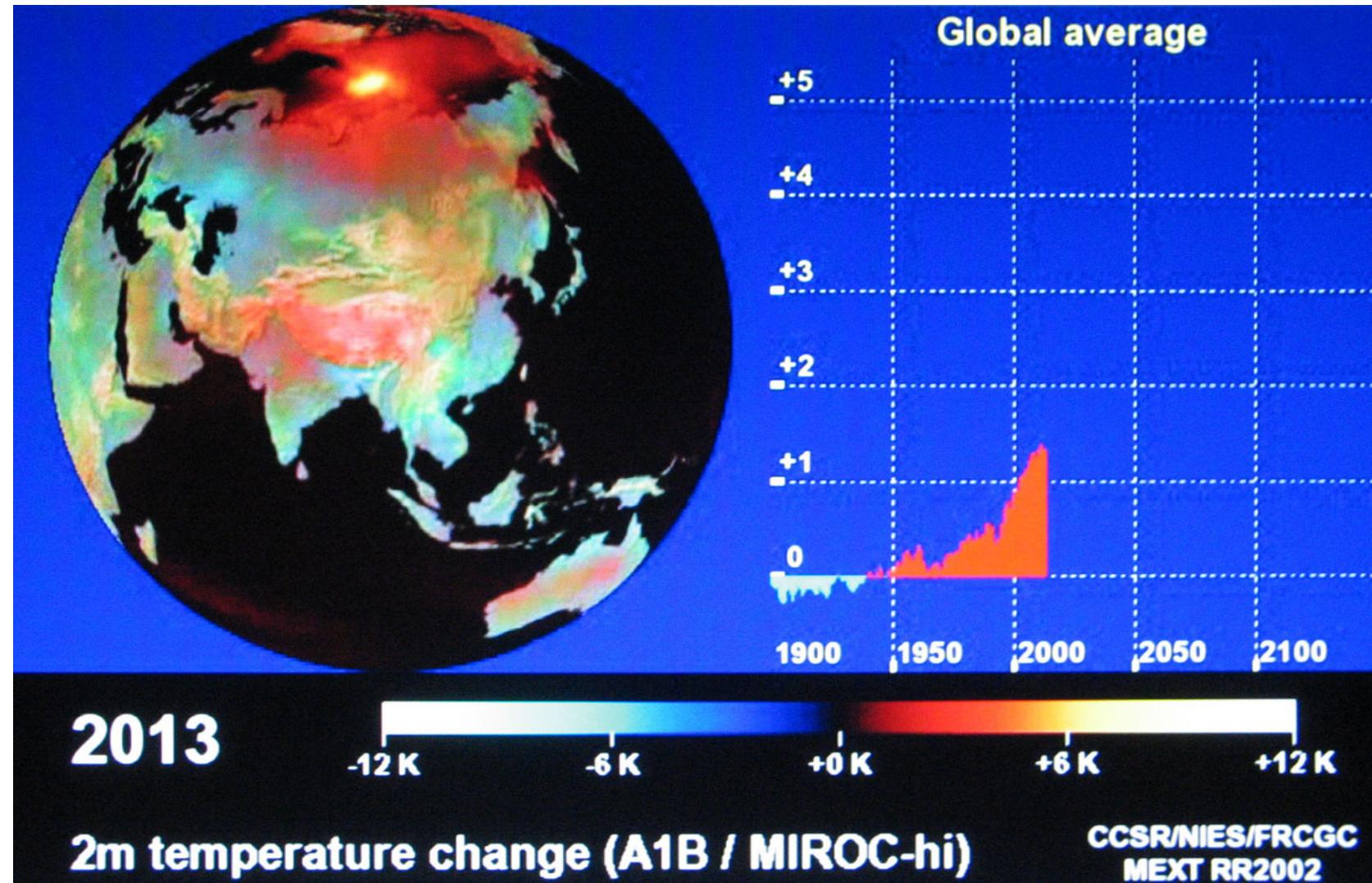
建物内部と性能

プロセッサ 5,120台
演算速度 40 Tflops
主記憶装置 10 TB

現在は、地球シミュレータよりも高性能な「京」も使用されている



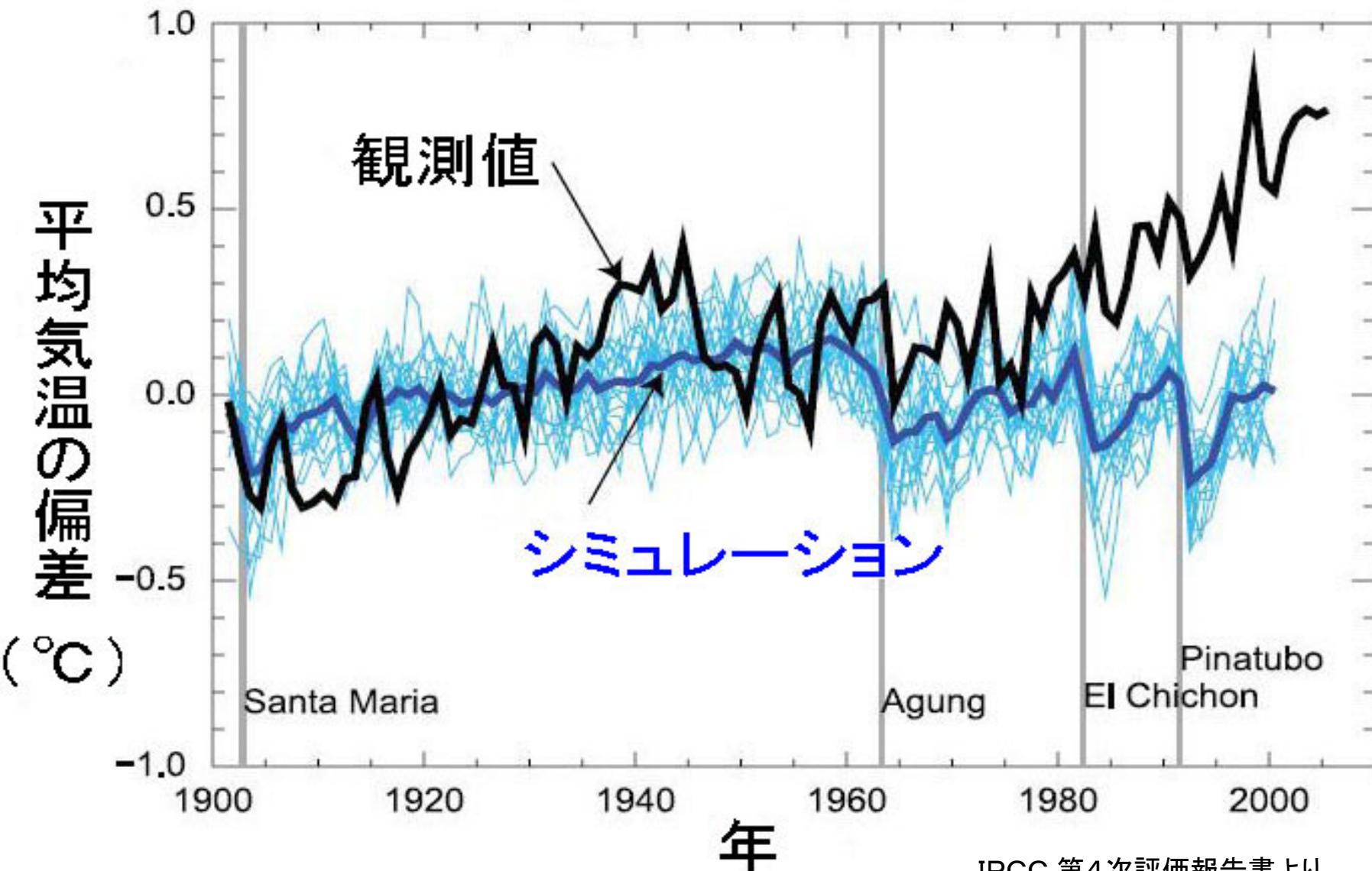
地球温暖化をコンピュータでシミュレーションしてみましょう



スタート

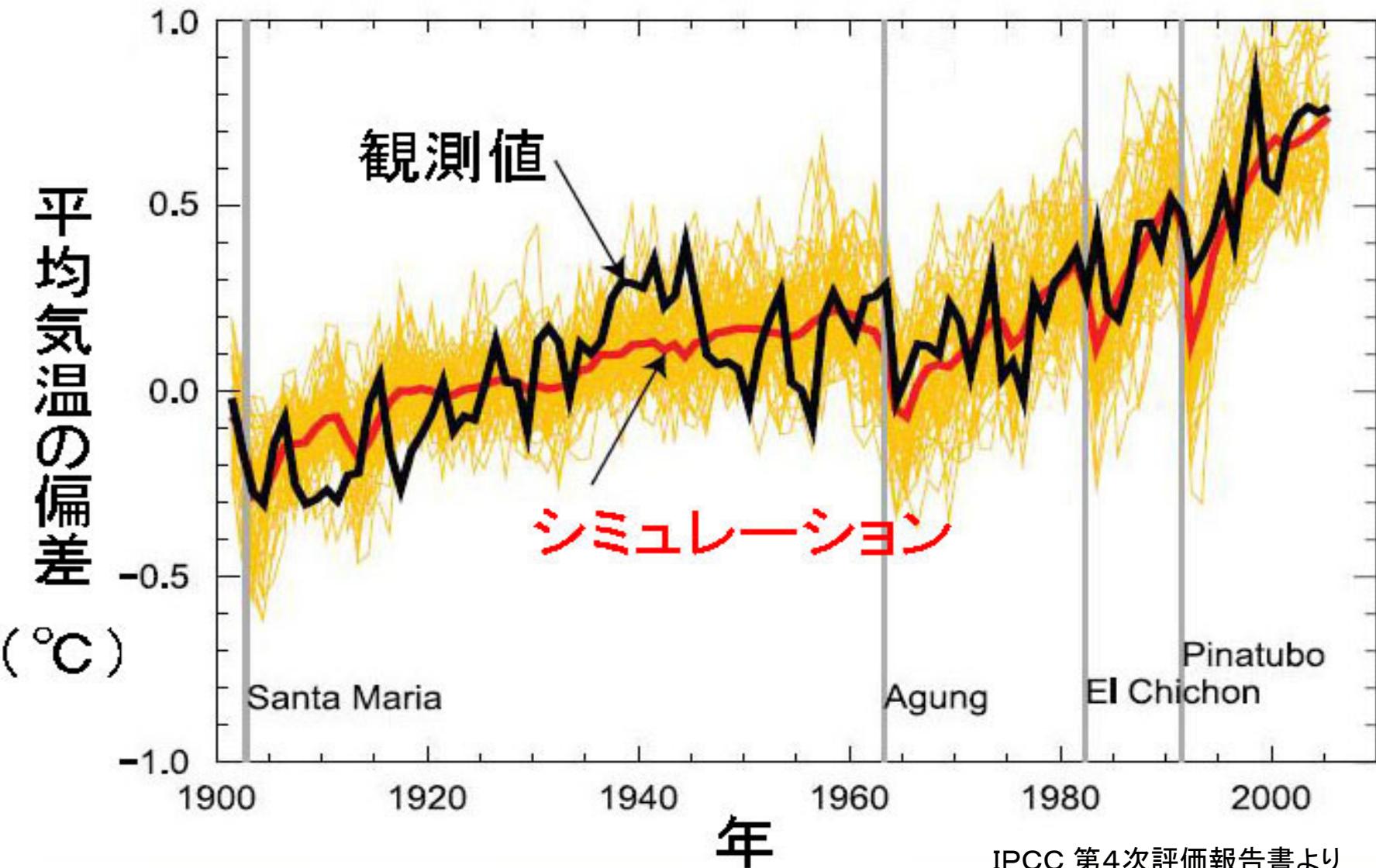
地球温暖化は、自然要因か人為要因か(1)

自然要因のみを考慮したシミュレーションでは、観測値と合わない



地球温暖化は、自然要因か人為要因か(2)

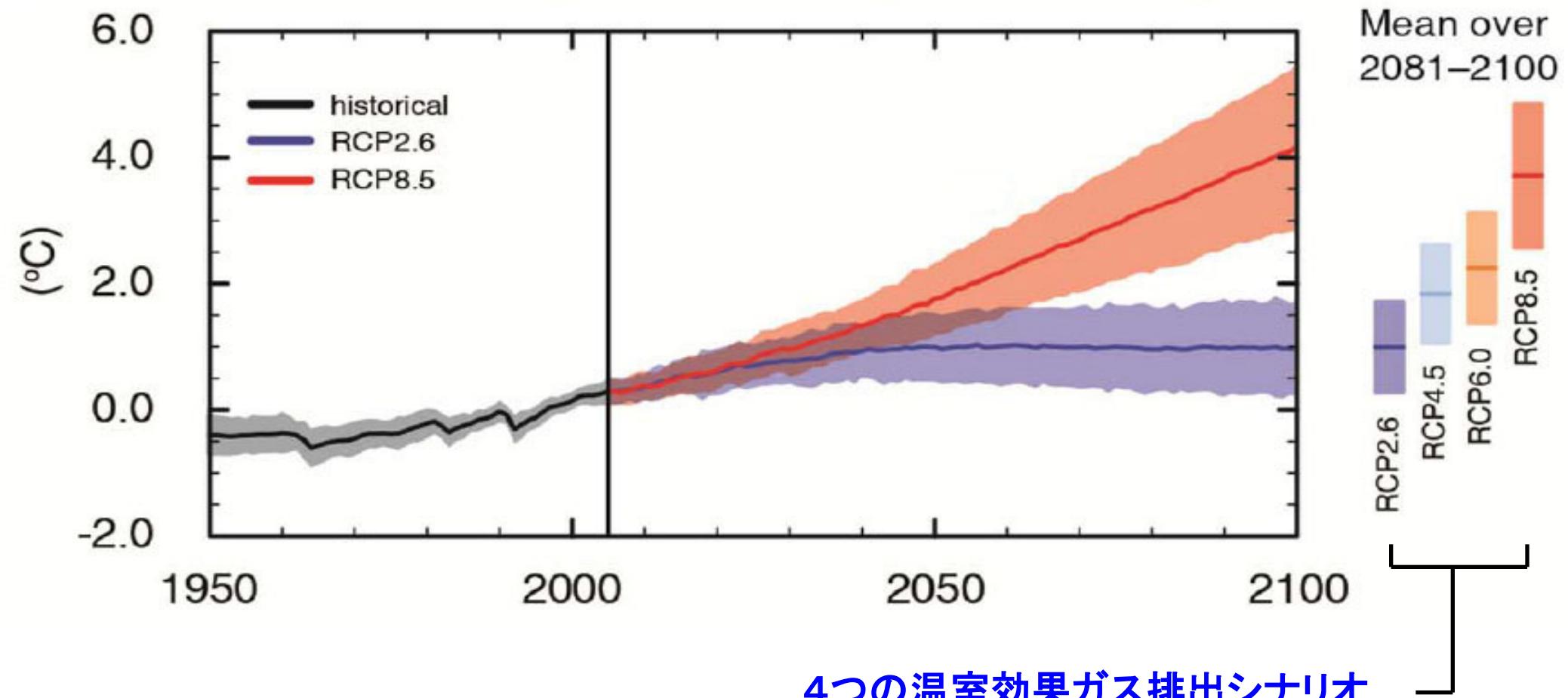
自然要因と人為要因の両方を考慮したシミュレーションは観測値とよく合う



気温の予測

全地球平均地表温度の過去観測値と将来予測値

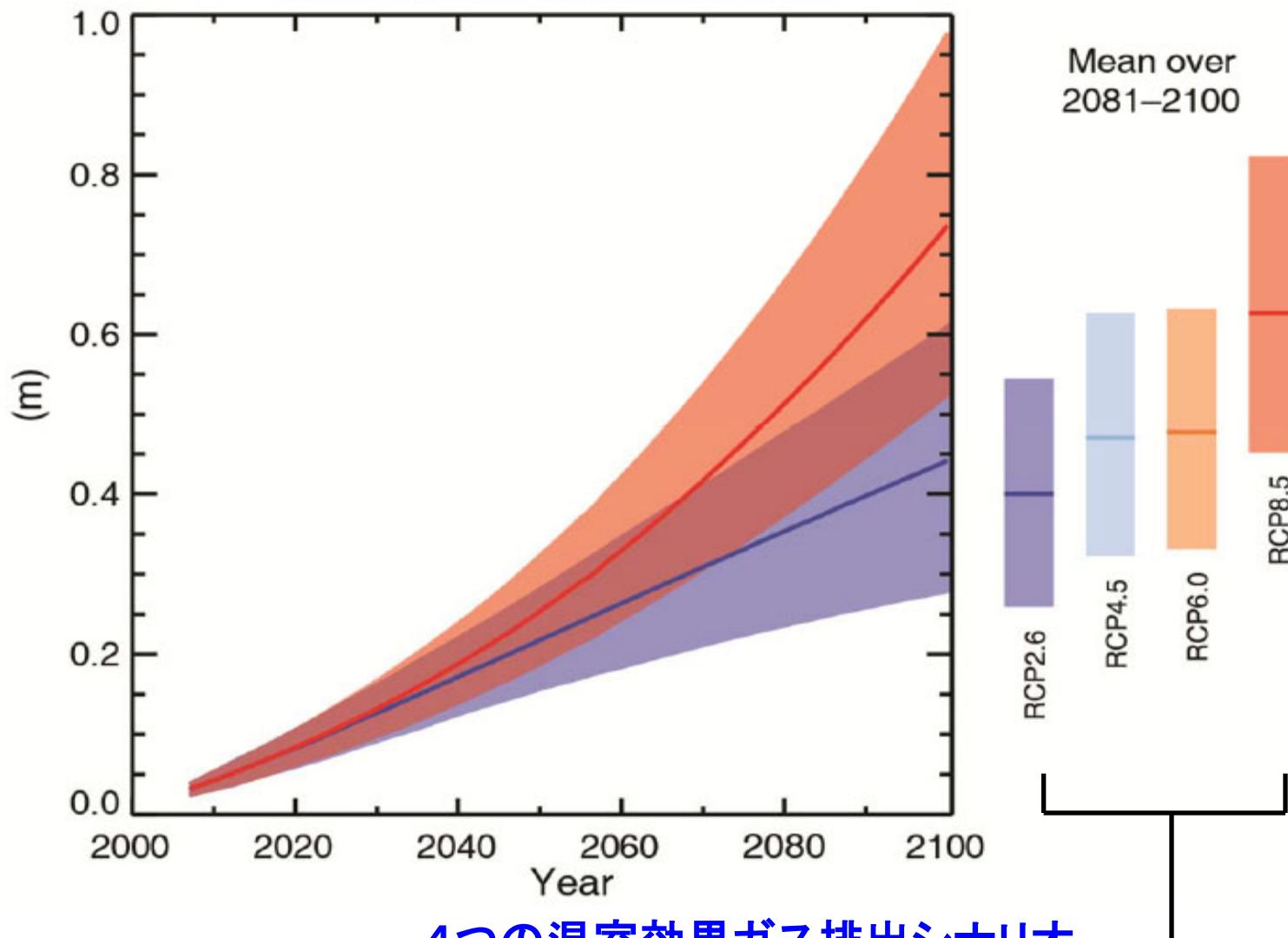
Global average surface temperature change



海面水位の予測

全地球平均海面水位の上昇

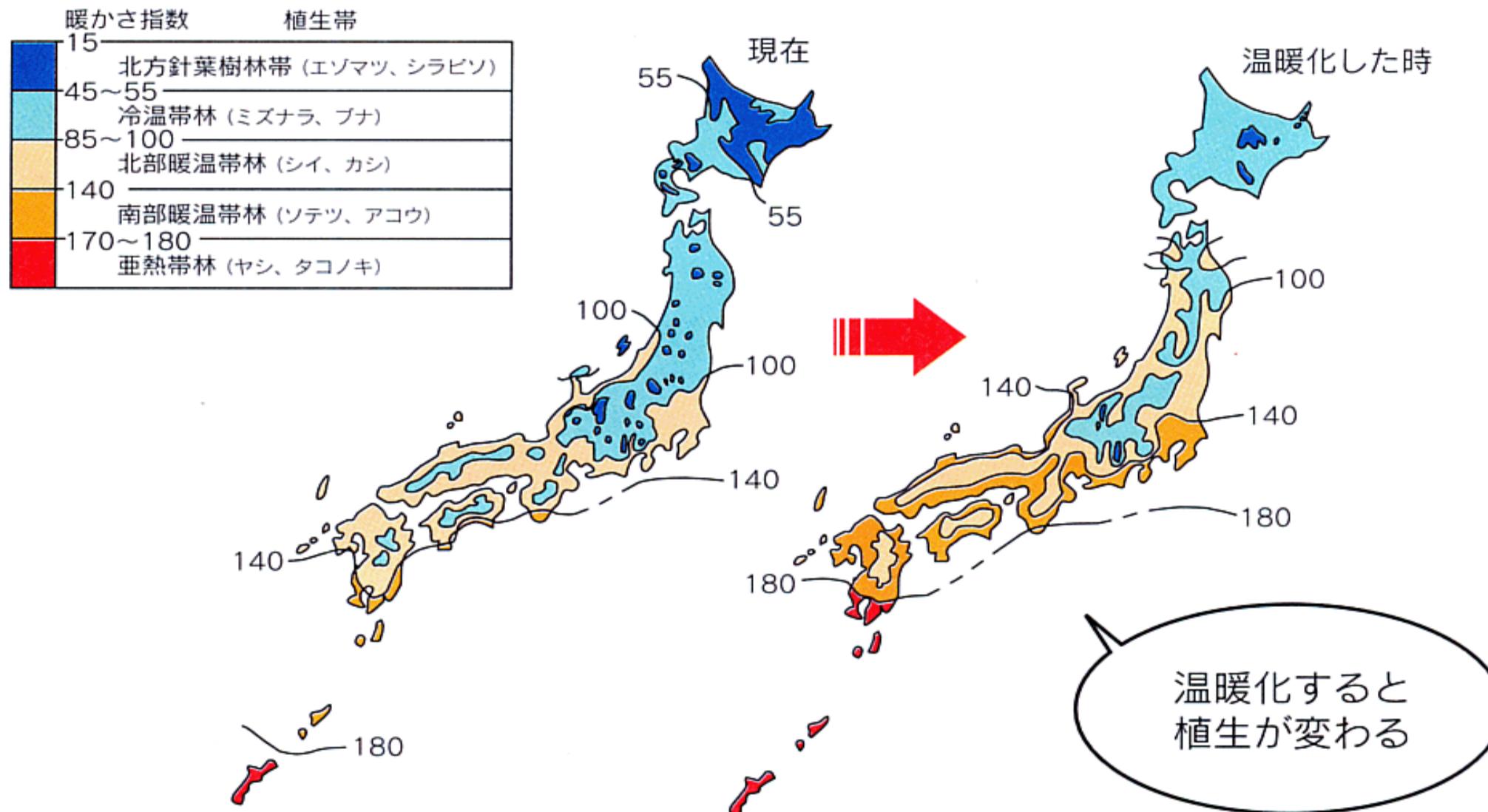
Global mean sea level rise



4つの温室効果ガス排出シナリオ

6. 地球が温暖化すると、どんな影響があるか

平均気温が3°C上昇した場合の森林植生の変化(1)



平均気温が3~4°C上昇した場合の森林植生の変化 (出典8より作成)



平均気温が3°C上昇した場合の森林植生の変化(2)

亜熱帯林（ヤシ、マングローブなど）

沖縄から九州南部へ移動



暖温帯林（シイ、カシ）

西南日本から東北日本へ移動

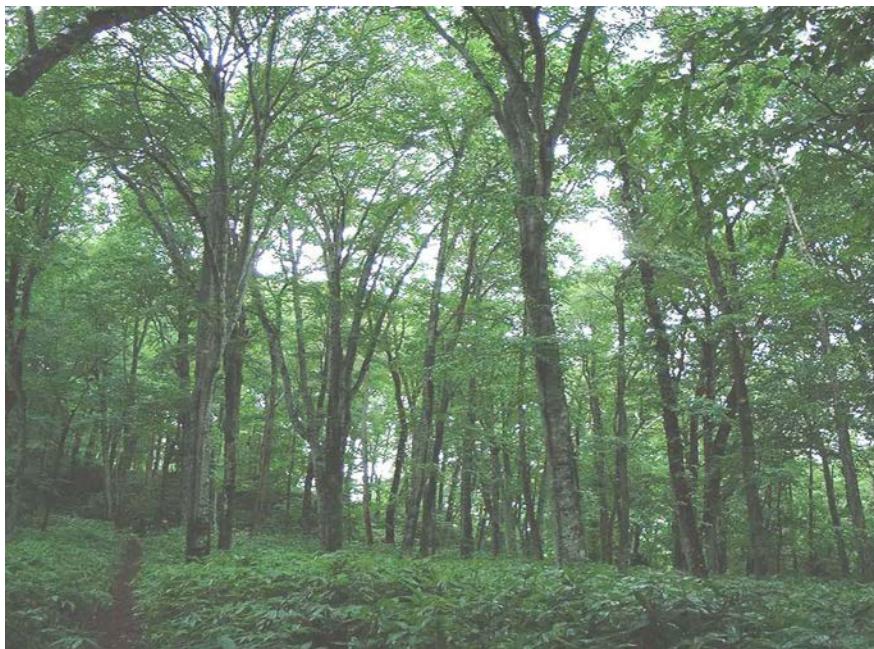




平均気温が3°C上昇した場合の森林植生の変化(3)

冷温帯林（ブナ、ミズナラなど）

中部山岳・東北から北海道へ移動

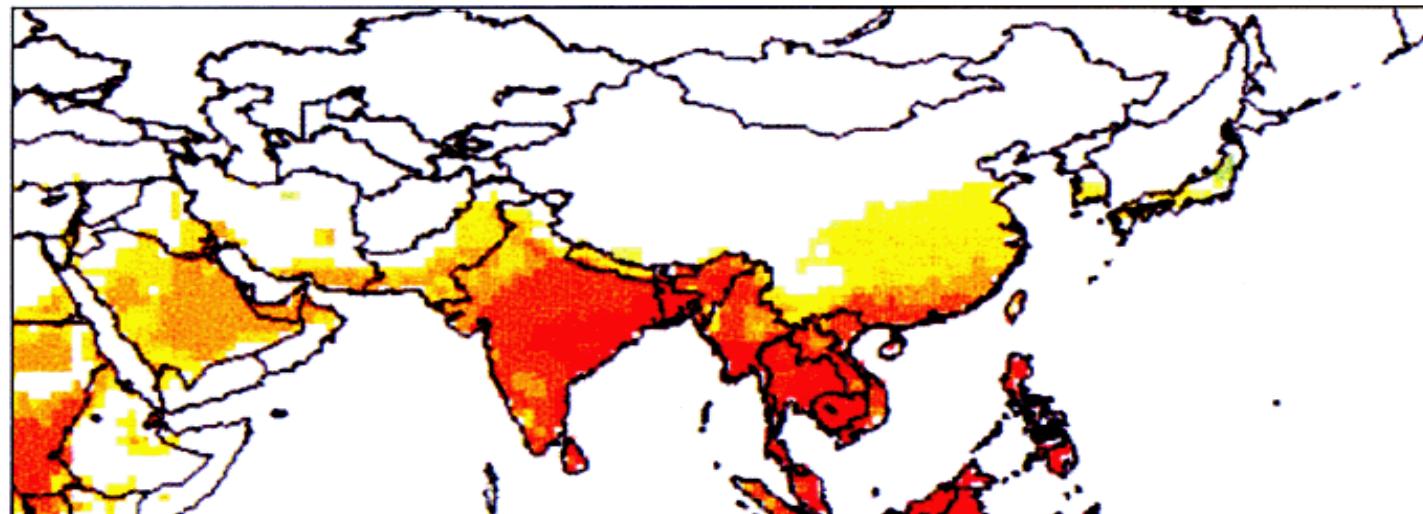


亜寒帯林（エゾマツ、シラビソなど）

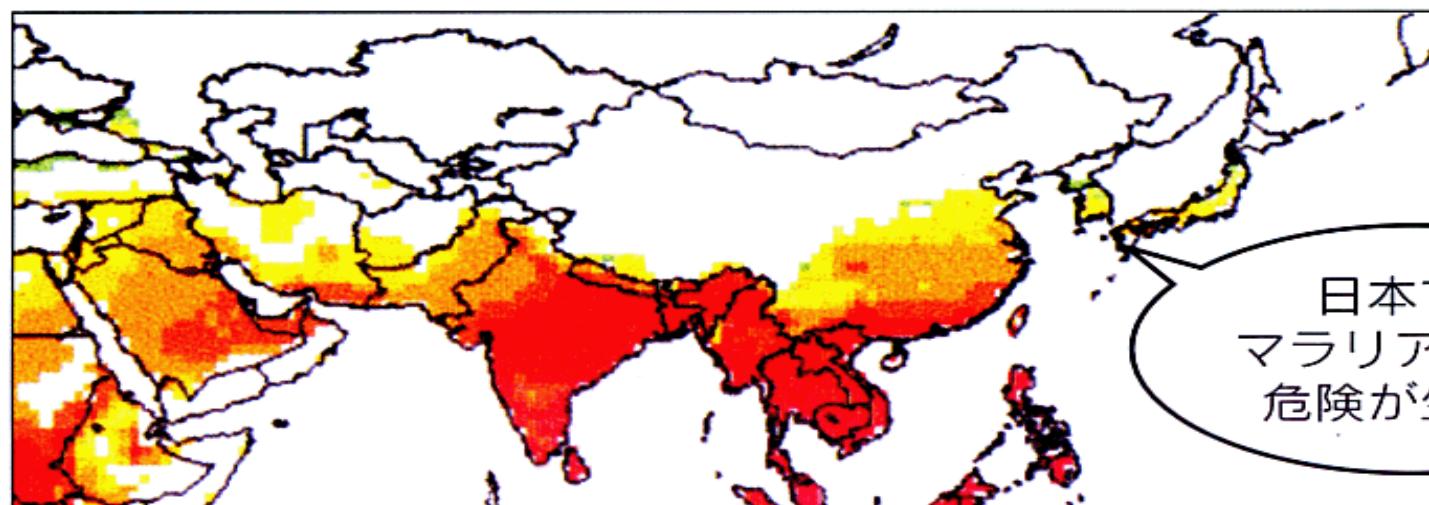
北海道から消滅



マラリアの流行地域 (CO₂の濃度が2倍になった場合)



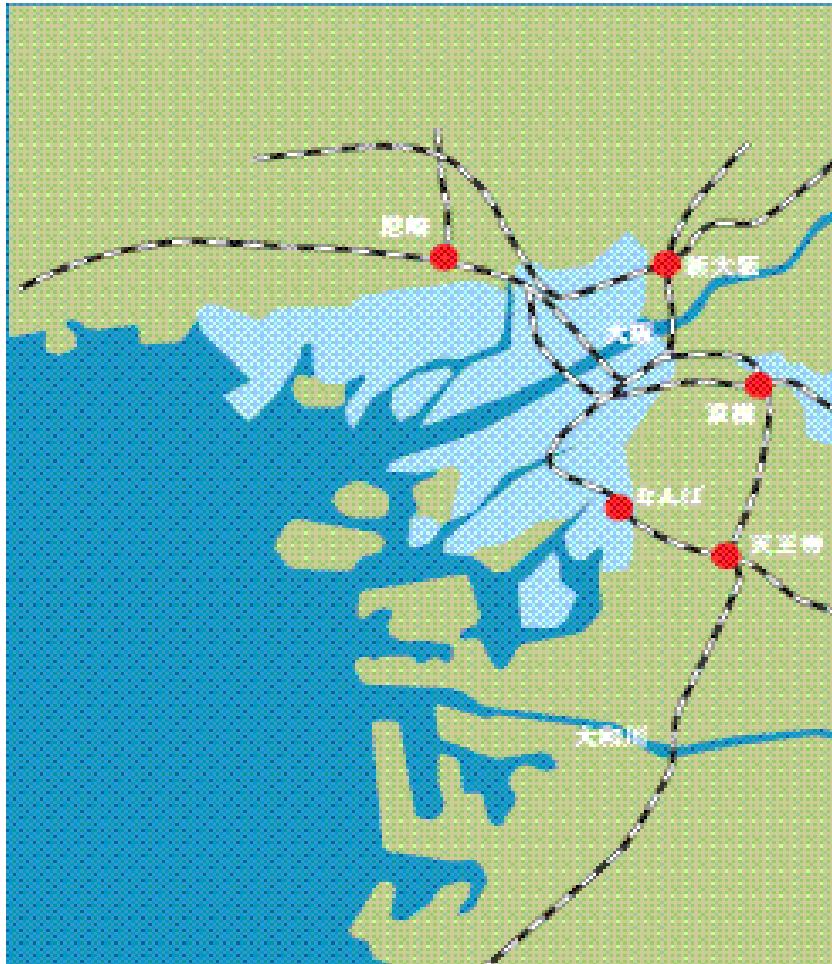
現在



CO₂濃度が2倍になった場合



海面が1m上昇すると、日本の都市部は水没する



京阪神地区

大阪の中心部と西北部は
ほぼ水没する



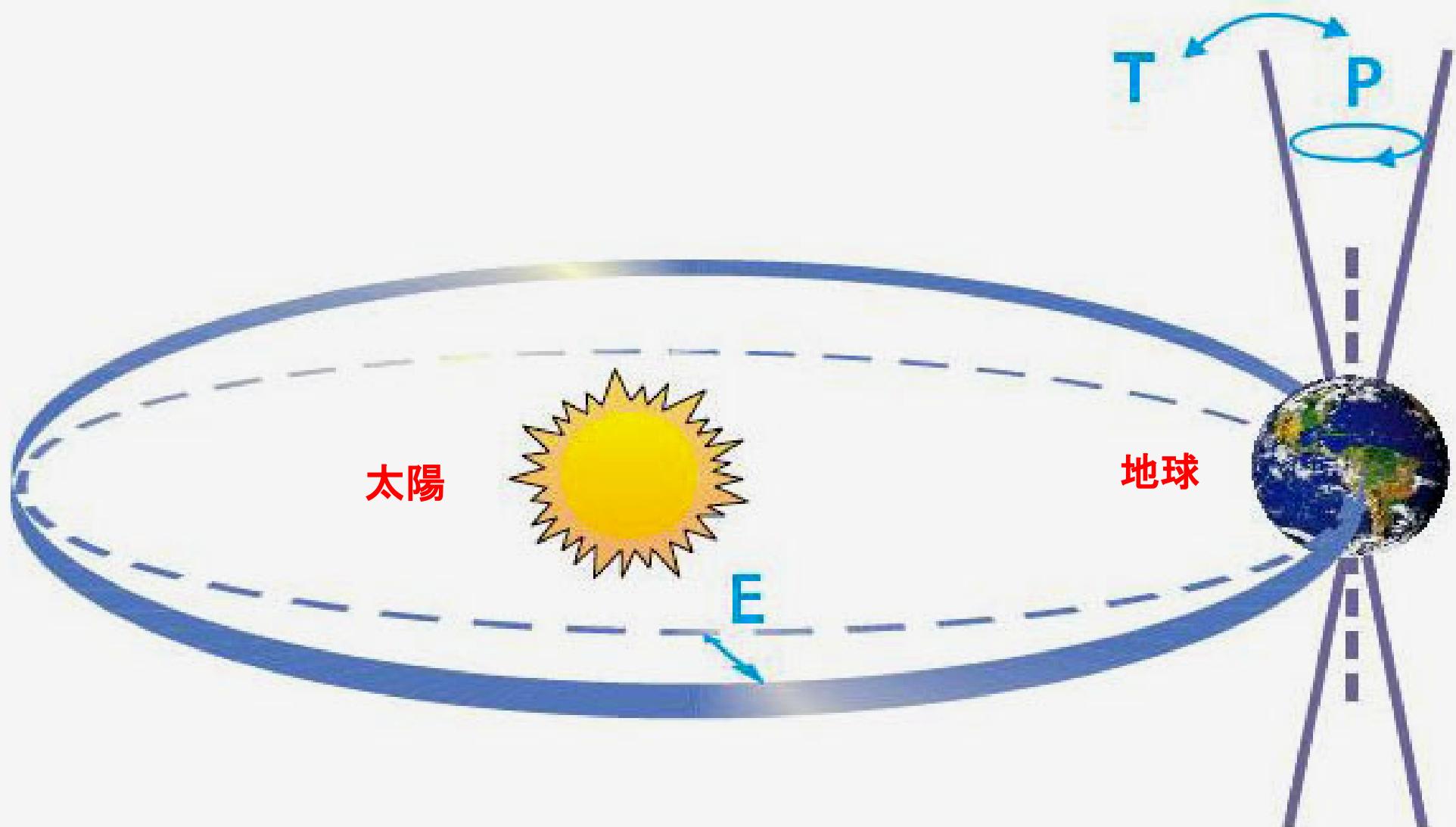
首都圏

江東区、墨田区、江戸川区、
葛飾区がほぼ水没する

7. 今は温暖化で騒いでいるが、やがて氷期が來るのでは

氷期が來るのは数万年後だが、温暖化は100年後に来る
氷期が來るのは自然要因によるが、温暖化は人為要因による

ミランコビッチ・サイクル (氷河期の原因といわれている)



過去65万年間のCO₂濃度と南極の気温の推移

CO₂濃度
(ppm)

同位元素から
推測した
南極の気温

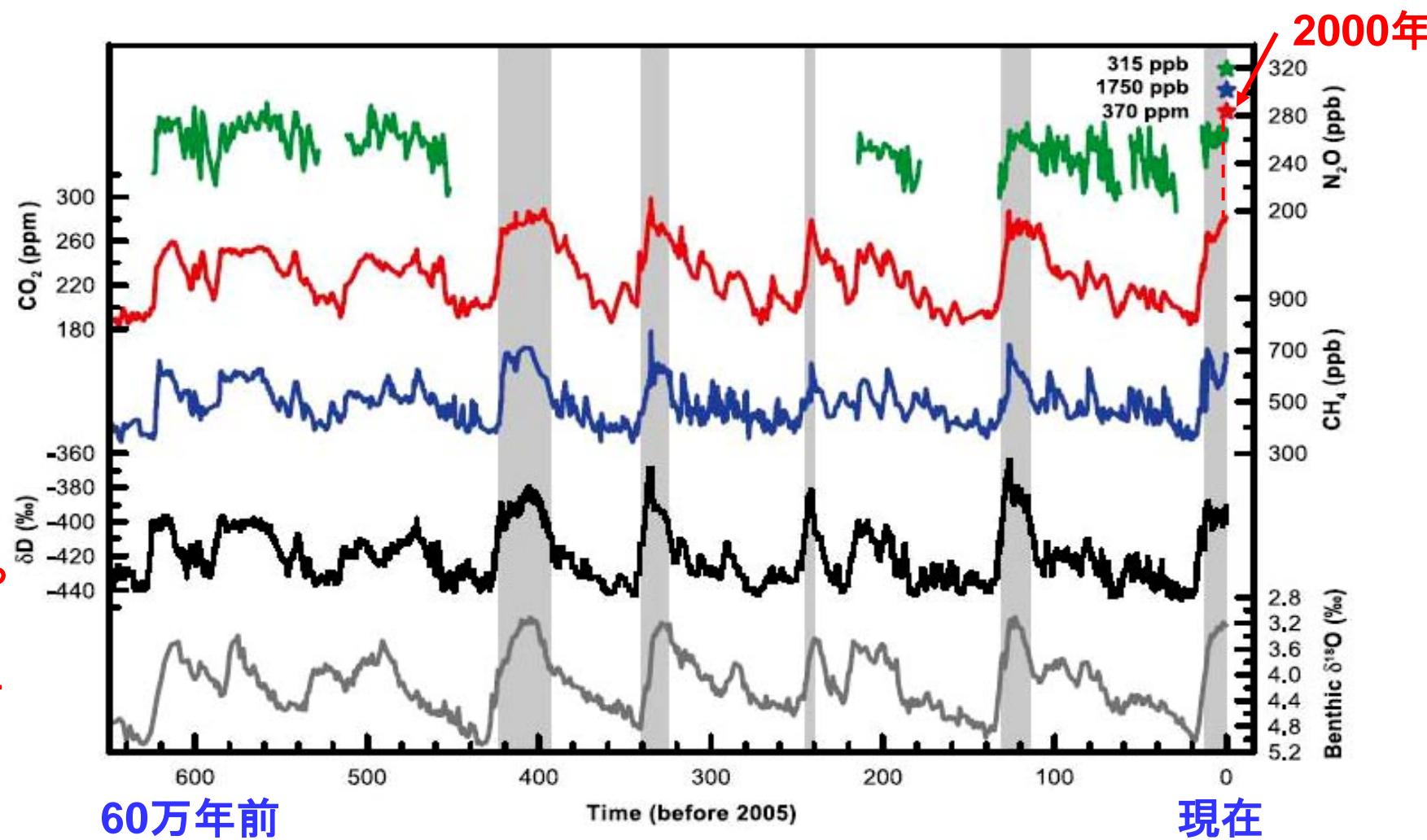
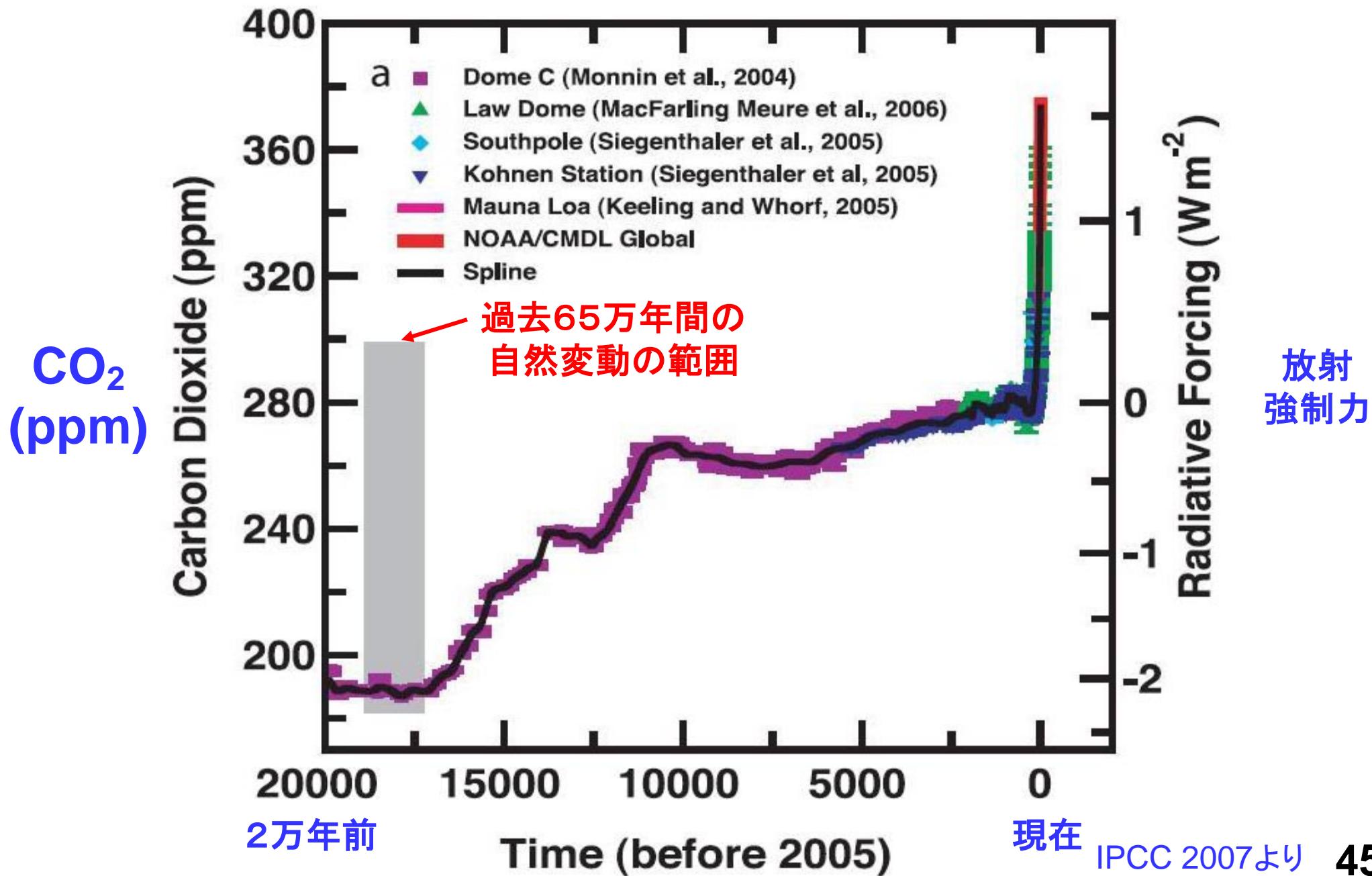


Figure 6.3. Variations of deuterium (δD ; black), a proxy for local temperature, and the atmospheric concentrations of the greenhouse gases CO₂ (red), CH₄ (blue), and nitrous oxide (N₂O; green) derived from air trapped within ice cores from Antarctica and from recent atmospheric measurements (Petit et al., 1999; Indermühle et al., 2000; EPICA community members, 2004; Spahni et al., 2005; Siegenthaler et al., 2005a,b). The shading indicates the last interglacial warm periods. Interglacial periods also existed prior to 450 ka, but these were apparently colder than the typical interglacials of the latest Quaternary. The length of the current interglacial is not unusual in the context of the last 650 kyr. The stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ marine records (dark grey), a proxy for global ice volume fluctuations (Lisiecki and Raymo, 2005), is displayed for comparison with the ice core data. Downward trends in the benthic $\delta^{18}\text{O}$ curve reflect increasing ice volumes on land. Note that the shaded vertical bars are based on the ice core age model (EPICA community members, 2004), and that the marine record is plotted on its original time scale based on tuning to the orbital parameters (Lisiecki and Raymo, 2005). The stars and labels indicate atmospheric concentrations at year 2000.

IPCC 2007より

過去2万年間のCO₂濃度と放射強制力

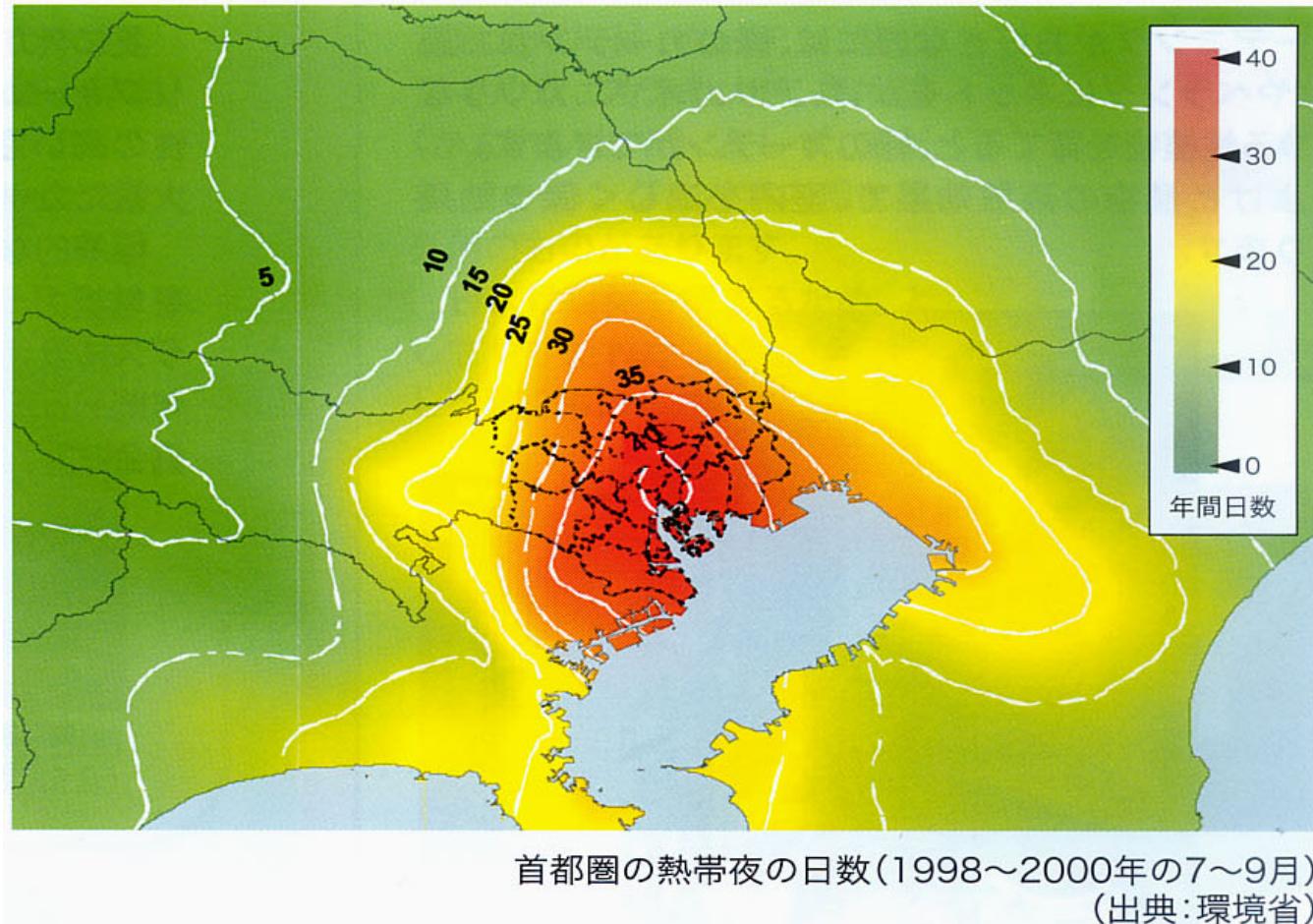


8. いわゆる地球温暖化とヒートアイランド現象はどう違うのか

ヒートアイランド現象

都市部が郊外に比べて平均気温が高くなる現象を、ヒートアイランド熱の島という。都市部では緑が少なく、地面がコンクリートで覆われていること、空調や自動車などの人工の廃熱が大きいことなどが原因。

過去100年間に、地球全体の平均気温は、 0.6°C 上昇、東京では 3°C 上昇した。



いわゆる地球温暖化は、温室効果ガスのために地球の平均気温が上昇する現象

9. 原発や火力発電所の廃熱は温暖化に寄与しないのか

日本列島に降り注ぐ太陽エネルギー(平均値)

$$\doteq \frac{1}{4} \times \text{太陽定数} \times \text{日本列島の面積} \times (1 - \text{アルベド}) \times \cos 35^\circ$$

↑
日中しか降り注がないから大雑把に見て

↑
日本列島の平均緯度

$$= 0.25 \times 1.37 \text{ kW/m}^2 \times 3.8 \times 10^{11} \text{ m}^2 \times (1 - 0.3) \times 0.82 \\ = 7.7 \times 10^{10} \text{ kW} = 7700000 \text{ 万 kW}$$

最新鋭の火力発電所は石油を燃やして発生した熱の40%を電気に変えている。
残りの60%は廃熱として海に捨てている。

$$\text{最新鋭の火力発電所の1基の廃熱} = \frac{60\%}{40\%} \times 100 \text{ 万 KW} = 150 \text{ 万 KW}$$

= 日本列島に降り注ぐ太陽エネルギーの1/50000に過ぎない。

したがって、発電所1基分の廃熱は、日本列島に均一に拡散されるならば、温暖化への影響はほとんどない。

ただし、もし東京23区(日本列島の面積の1/630)の狭い所に50基の発電所が集中すると、廃熱は東京23区に降り注ぐ太陽エネルギーの1/80に達し、無視できない。
これは、ヒートアイランド現象の原因の1つになりうる。

10. もっと精度のよいモデルによる計算 (2014年3月3日追加)

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。



モデルの簡単な説明

簡単なモデル では、

大気中での太陽光の吸収を無視した。これは「大気中での太陽光の吸収」が温暖化の原因であるかのような誤解を防ぐためであった。

また、簡単のため温室効果ガスの濃度が十分高いとし、大気中の赤外光の突き抜けがないとした。

精度のよいモデル では、

大気中での太陽光の吸収を考慮した。

また、温室効果ガスの濃度があまり高くないときに生じる大気中の赤外光の突き抜けを考慮した。

いずれのモデルでも、大気は一様な温度の1つの層であると仮定した。多層にすると問題が複雑になるからである。

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

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

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

$$r = \text{黒体球の半径 [m]} , T = \text{黒体球の温度 [K]}$$

太陽放射と地球放射の計算では、いつも S 、 σ 、 $4\pi r^2$ 、 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 $T = I^{1/4}$ [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

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

として計算できる。（以下、“正規化”という言葉は省略する）

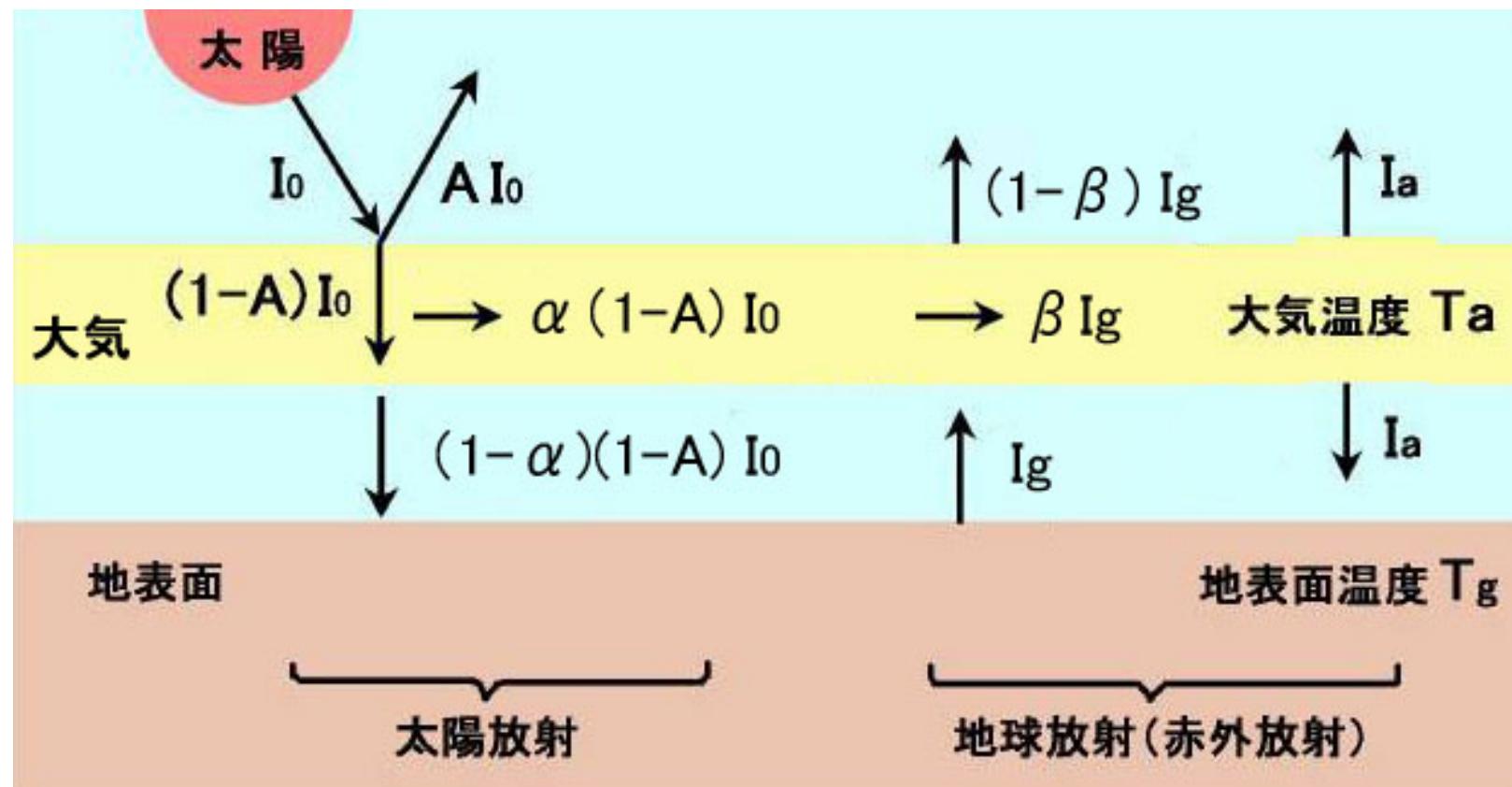
温室効果ガスが存在する場合の地表面温度計算モデル

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)

α =大気中の太陽放射の吸収率

β =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

地表面のエネルギーバランスから

$$(1-\alpha)(1-A)I_0 - I_g + I_a = 0 \quad \text{式(3)}$$

大気中のエネルギーバランスから

$$\alpha(1-A)I_0 + \beta I_g - 2I_a = 0 \quad \text{式(4)}$$

式(3)と式(4)から、未知数 I_g と I_a を求めると

$$\left. \begin{aligned} I_g &= \frac{2-\alpha}{2-\beta}(1-A)I_0 \\ I_a &= \frac{\alpha+\beta-\alpha\beta}{2-\beta}(1-A)I_0 \end{aligned} \right\} \quad \text{式(5)}$$

地表面の温度は

$$\begin{aligned} T_g &= I_g^{1/4} = \left\{ \frac{(2-\alpha)(1-A)}{2-\beta} \right\}^{1/4} I_0^{1/4} \\ &= 278 \cdot \left\{ \frac{(2-\alpha)(1-A)}{2-\beta} \right\}^{1/4} [\text{K}] \end{aligned} \quad \text{式(6)}$$

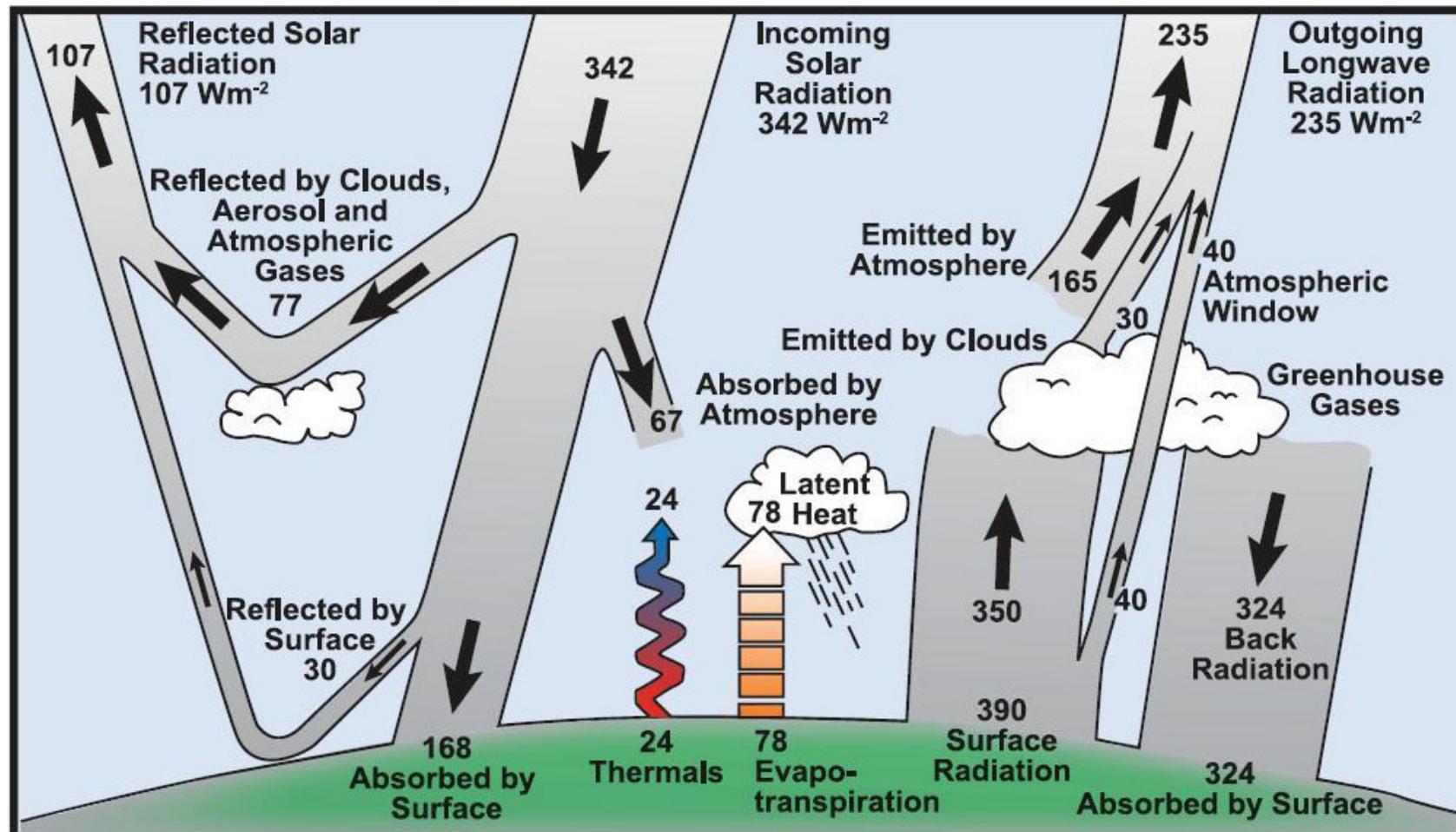
A, α , β の値の推定

下の図から A, α , β の値を推定する

$$A = \text{地球の太陽放射の反射率} = 107 / 342 = 0.31$$

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

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



温室効果ガスが存在する場合の地表温度の計算

上で得られた

$$A = \text{地球の太陽放射の反射率} = 0.31$$

$$\alpha = \text{大気中の太陽放射の吸収率} = 0.28$$

$$\beta = \text{大気中の地球放射の吸収率} = 0.90$$

を式(6)に代入すると、

$$T_g = 278 \cdot \left\{ \frac{(2-\alpha)(1-A)}{2-\beta} \right\}^{1/4} [K]$$
$$= 278 \cdot 1.019 = 283 K = 10^\circ C$$

となり、観測値15°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、

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

となり、観測値15°Cに近い値となる。

このように、第一原理によらない計算は、パラメータを調節することにより、観測に合わせることができる。「後出しジャンケン」といわれる所以である。

地表面の平均温度を、電卓で計算した結果一覧

| 項目 | 主な仮定 | 地表面温度 | 温室効果による昇温 |
|-----------|---|---|--------------------|
| 電卓で計算した結果 | 温室効果ガスなし、大気による太陽光吸收なし | $A = 0.3, \alpha = 0, \beta = 0$ 254 K (-19 °C) | — |
| | 温室効果ガス濃度十分高い、大気による太陽光吸收なし、アルベドに古典的値を使用(簡単なモデル) | $A = 0.3, \alpha = 0, \beta = 1$ 302 K (29 °C) | 48°C |
| | アルベド、大気による太陽光吸收と温室効果ガスによる赤外吸収には、最新の値を使用 | $A = 0.31, \alpha = 0.28, \beta = 0.90$ 283 K (10 °C) | 29°C |
| | アルベド、大気による太陽光吸收には、古典的値を使用、温室効果ガスによる赤外吸収には、最新の値を使用 | $A = 0.30, \alpha = 0.20, \beta = 0.90$ 288 K (15 °C) | 34°C |
| | 観測値 (全地球平均値) | — | 288 K (15 °C) |
| | | | 34°C |

11. まとめ

身边に感じる地球温暖化、温暖化はなぜ起こるのか、スーパーコンピュータによる温暖化の過去と未来の計算、温暖化で地球はどうなるか、などについて説明した。

以下の2つのモデルを作り、温暖化の計算を電卓で行った。

簡単なモデルでは、大気中での太陽光の吸収を無視した。また、温室効果ガスの濃度が十分高いとし、大気中の赤外光の突き抜けがないとした。そのため温室効果が過大に計算された。

精度のよいモデルでは、大気中での太陽光の吸収を考慮した。また、温室効果ガスの濃度があまり高くないときに生じる大気中の赤外光の突き抜けを考慮した。その結果、このモデルにより計算された地表面温度は、観測値(全地球平均)とよい一致を見た。

これらのモデルは、現在スーパーコンピュータで計算されている全球モデルと対抗しようというのではないことは言うまでもない。地球温暖化が、このような簡単なモデルで電卓を使って概略の計算ができ、計算のもとになっている現象やパラメータが高校生にも理解できるということを示したものである。



ご清聴、有難うございました

ご質問は、西田 joy@nishida-s.com まで

この資料は下記からダウンロードできます

<http://nishida-s.com/cc/shiritai-on-danka>