

どこまで
地球温暖化を
二酸化炭素で
説明できるか

渡辺 宏

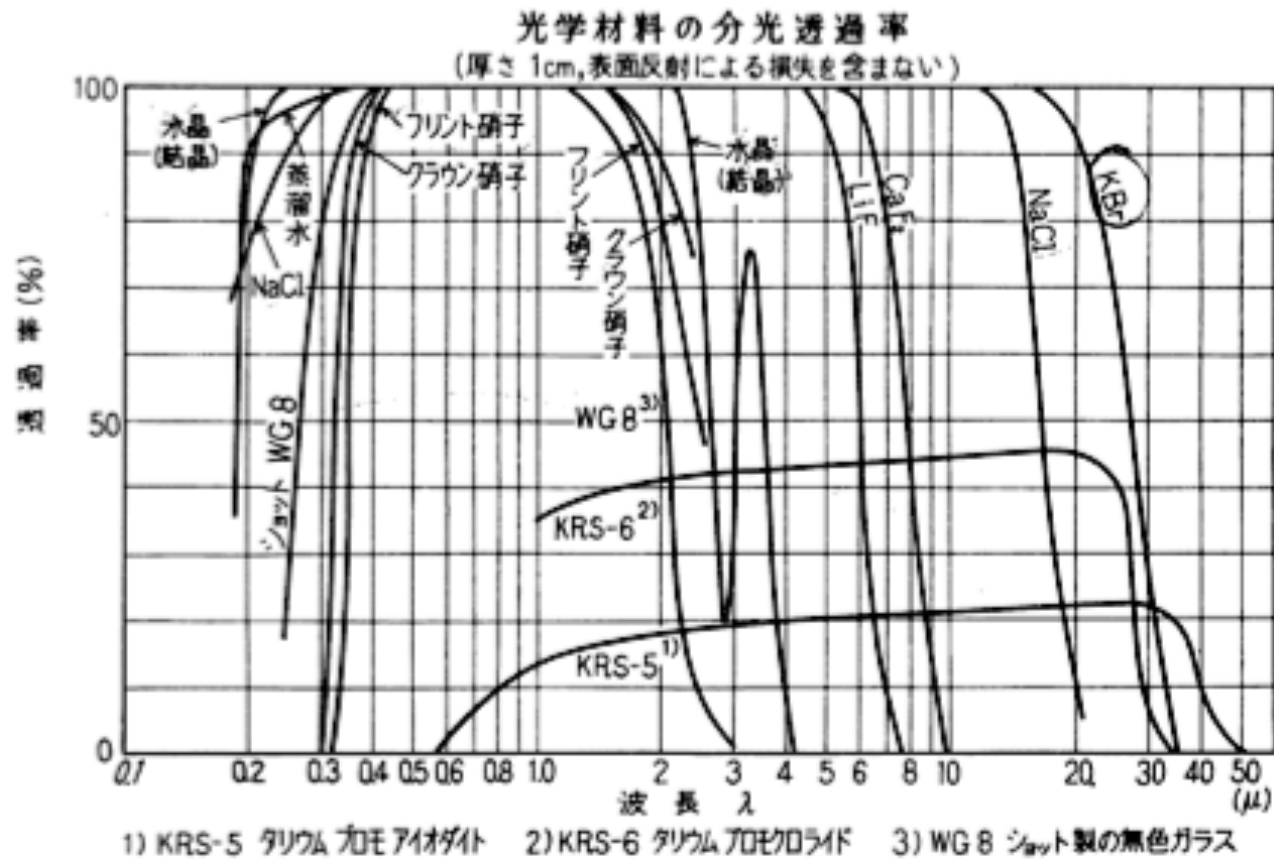
本日のプレゼンテーションの概要

- 地球の温暖化が炭酸ガスに全て起因する、という図式に対する疑問点を議論する。
- 温室効果を考える基礎的事項
- 主な論点
 - 地球の温度を決めるファクターは炭酸ガスのみではない
 - 温室効果をもっとも大きいと思われる水が考慮されていない
 - Wienの変位則のピークの扱い方
 - 収支バランスの図への疑問
- IPCC の主張と我々のエネルギー収支
- 結論

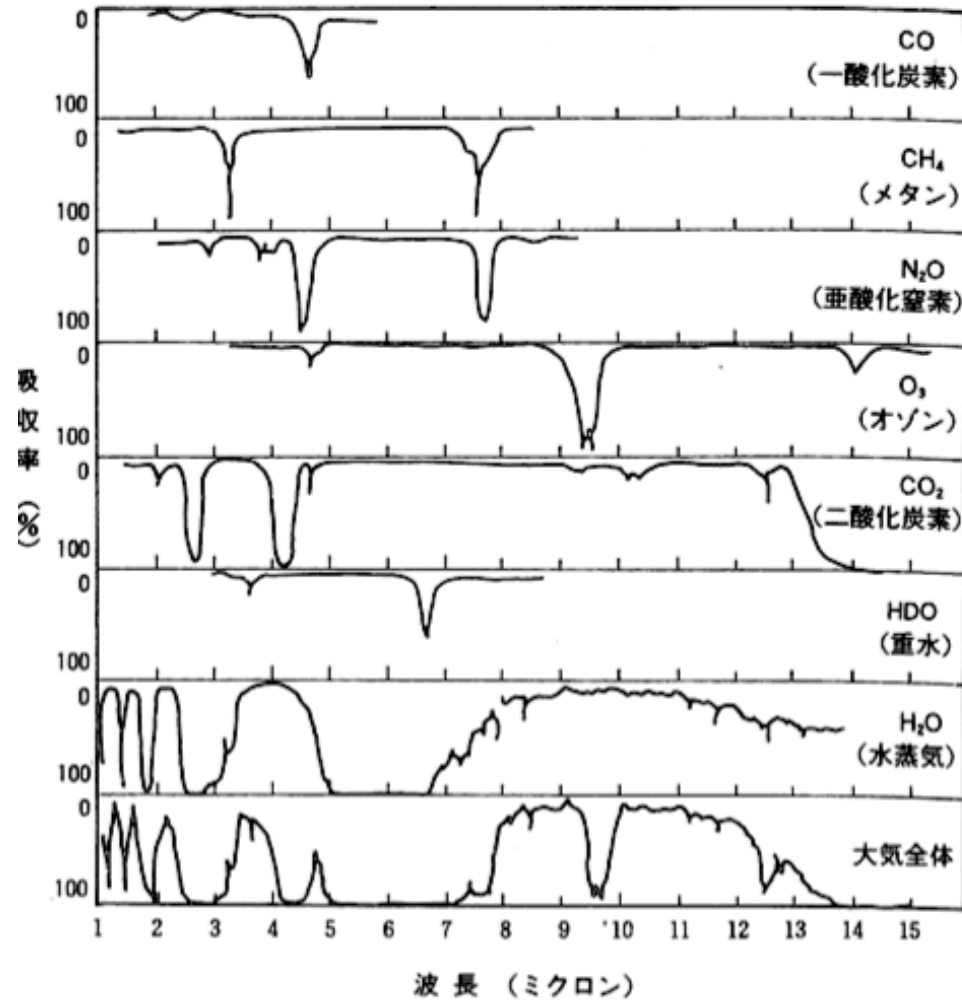
温室効果とは？

- 温室効果とは、ガラスやビニールなどで出来た温室では太陽からの光を吸収し、効率よく温室内をあたためることを言う。
- 5800Kの温度である太陽光のスペクトルは、可視光0.5micronにピークをもち、温室の材料である、ガラスやビニールをほとんど完全に透過する。
- 温室内の植物や地面に吸収された太陽からの光は、温室内部の植物や地面から300Kの黒体として放射されるが、この熱赤外線は、ガラスやビニールでほとんど完全に吸収され、光としては外に出ない。
- 結果として、温室は、太陽のエネルギーを効率よく吸収し、暖かい環境を作り出す。
- では地球+大気の系は温室と見なせるか？

ガラスの透過率



気体の透過率の波長特性



地球の平均温度(1)

- 地球は太陽からのエネルギーを吸収し、地球自身からエネルギーを放射することによってエネルギーのバランスを保っている。こうした機構によって、地球のみならず惑星の温度の大枠は決まる。
- 実際、太陽からの放射エネルギーが地球で吸収され、地球から放射されると仮定すると、地球の平均温度が計算される。地球の位置での太陽からの放射エネルギーは、太陽常数として知られ、約 1.38kw/m^2 である。この値と(このエネルギーを全部吸収するとして)全地球表面からの放射がバランスすると考えると、地球の平均温度は275K程度になる。
- 実際は、地球は球形で緯度によって太陽のあたり方が違い、また、反射率、放射率も異なる。地球の70%を占める海洋・湖では反射率は0%に近く、放射率は、1に近いが、平均の反射率を30%とすると、平均温度は250K程度になる、と言う説明が一般にはなされているようである。

地球の平均温度(2)

- 実際の地球の平均温度はもう少し高いのでこれを温室効果で説明しているのが一般的である。
- さらに地球には大気があり、そのために、温度の変化が緩和され、また、温室効果があって、温度は何度か高くなる、と説明されている。太陽からの距離としてはほとんど同じ位置にある月は空気がなく、また、水もないため反射率が地球よりは高い。結果として、月では温度の変化が激しく、また、平均温度も地球より低くなっている。

温室効果を考える基礎的事項

Planckの法則(周波数ベース、波長ベース)

$$\frac{d\phi(\nu)}{d\nu} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \quad (1)$$

$$\frac{d\phi(\lambda)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (2)$$

ここで

h : Planck 常数

c : 光の速度

k : Boltzmann 常数

T : 物質の絶対温度

λ : 放出される電磁波の波長

ν : 放出される電磁波の周波数

温室効果を考える基礎的事項(2)

Planckの式の微分=>Wienの変位則

(1)から $\nu_{\max}/T_{\max}=5.876 \cdot 10^{10} \text{ Hz/K}$

($x=h\nu/kT$ において、 $e(x)=3/(3-x)$ を解く=> $x=2.82$)

(2)から $\lambda_{\max} \cdot T_{\max}=2900 \text{ micron} \cdot \text{K}$

($x=hc/k\lambda T$ において、 $e(x)=5/(5-x)$ を解く=> $x=4.97$)

ここで、振動数あるいは波数で表したPlanckの式の最大を取る振動数に対応する波長と、元々波長で表した場合のPlanckの式の最大を取る波長は、異なっている。

波数ベースと波長ベースのWienの変位則

波数ベースの議論		
太陽光のピーク	11365.6	cm-1
(波長に換算)	0.8799	micron
地球の温度でのピーク	587.9	cm-1
(波長に換算)	17.01	micron
波長ベースの議論		
太陽光のピーク	0.5000	micron
(波数に換算)	20002	cm-1
地球の温度でのピーク	9.666	micron
(波数に換算)	1034.6	cm-1

温室効果を考える基礎的事項(3)

Planckの法則の積分 => Stephan-Boltzmannの法則

$$E = \frac{2\pi^5 k^4 T^4}{15 c^2 h^3} = \sigma T^4 [\text{watt}/\text{m}^2]$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{watt}/\text{m}^2/\text{K}^4]$$

太陽を5800Kの黒体とすると、地球の位置でのエネルギー束Eは

$$E = \sigma T^4 * (R(S)/R(S - E))^2 = 1.38 \text{kw}/\text{m}^2$$

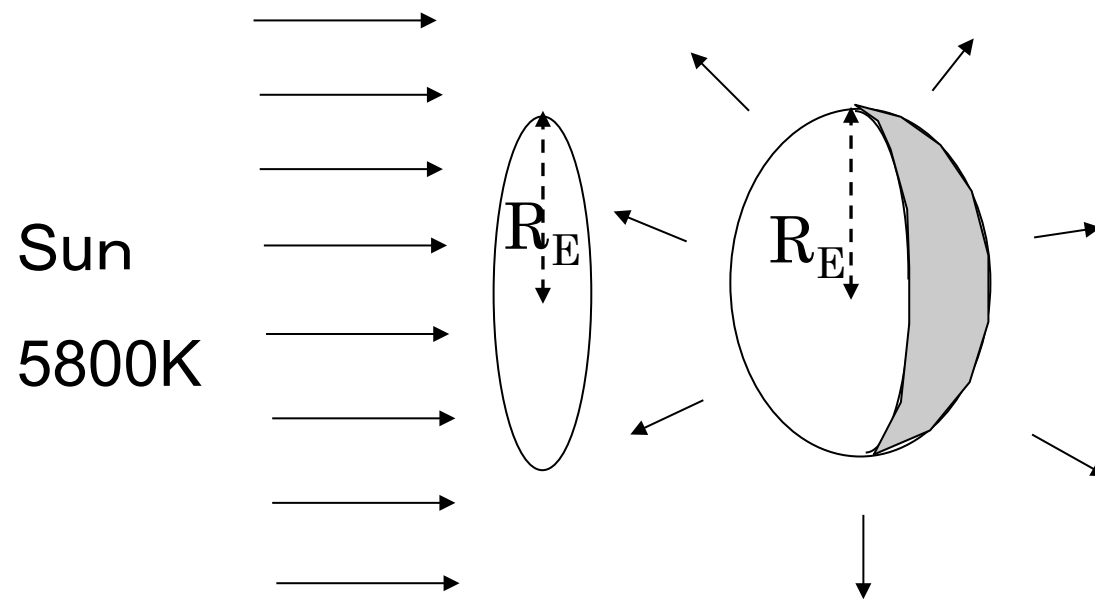
この値は、大気圏外を回る人工衛星の太陽電池パネル等でも確認されている。

太陽からの放射

主要なパラメータ

R(S-E)	1.49E+08	km
R(S)	6.69E+05	km
R(E)	6.38E+03	km
T(S)	5.80E+03	K

太陽光のエネルギーと地球の放射(1)



太陽光のエネルギーと地球の放射(2)

- 太陽光から得られるエネルギーと地球からの放射がバランスするとすると、

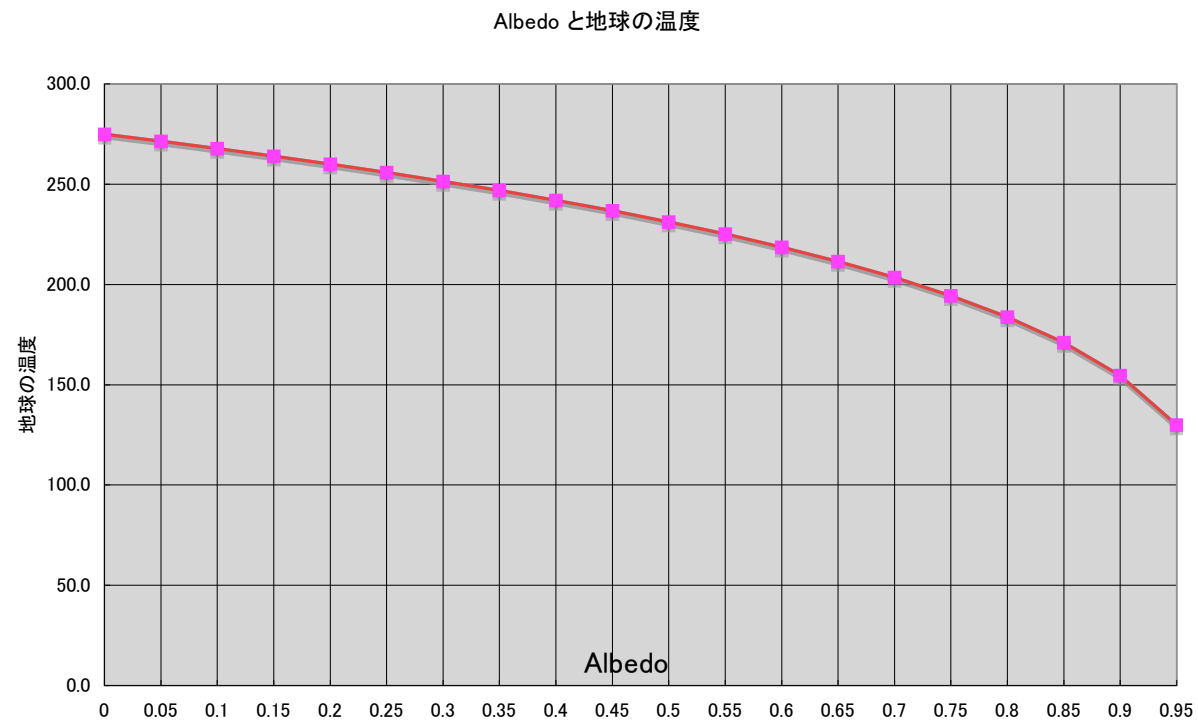
$$\sigma T_S^4 * \left(\frac{R_S}{R_{SE}}\right)^2 (1 - A) * \pi R_E^2 = \sigma T_E^4 * 4\pi R_E^2$$

- ここで、Aは地球全体のAlbedo(反射率)とする。この式から、

$$T_E = T_S * \sqrt{\frac{R_S}{2R_{SE}}} * \sqrt[4]{(1 - A)}$$

- この式はAlbedo Aの関数になっているが、Aの関数としての T_E を次のスライドに示す。よく言われているのは、地球全体の平均Albedoは0.3、従って、地球全体の平均気温は250K。これに対して実際の平均温度は、15°C(288K)。これが温室効果によるものという説明が一般になされている。
- また、一般の惑星の温度もこの式から推定される。

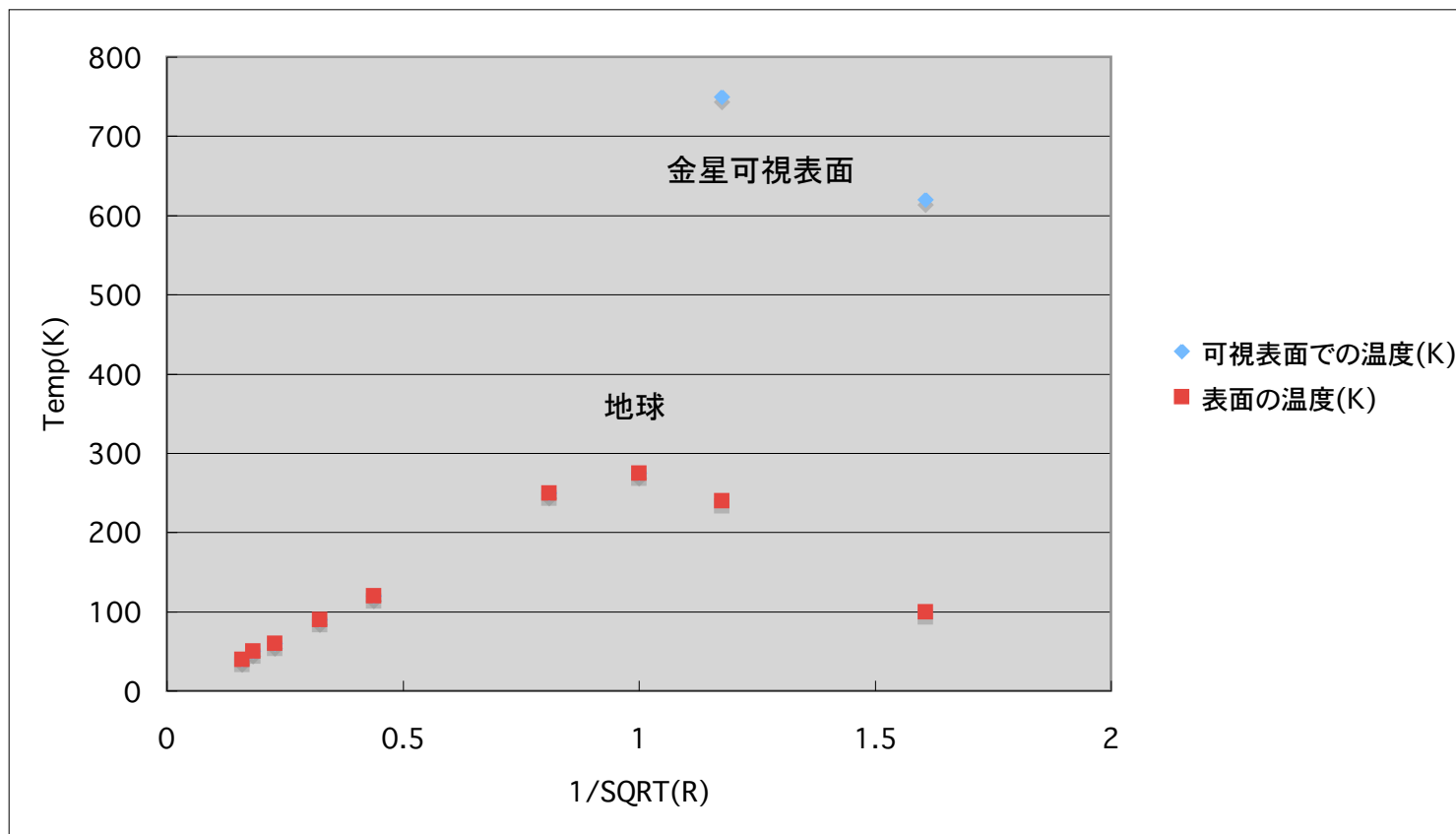
太陽光から推定したAlbedoの関数としての地球の平均温度



地球の軌道の楕円性、太陽活動

- 地球は太陽の周りを正確には円ではなく**楕円軌道**を描いて回転している。地球と太陽の平均距離 a は 1.496×10^8 km程度であり、これを天文単位というが、楕円の離心率 e は0.01672である。
- その結果、近地点では $a \cdot (1 - e)$ 、遠地点では $a \cdot (1 + e)$ の距離になる。太陽からの光量は距離に逆比例するので**近地点では平均距離の時の約3.3%(2e)多く、遠地点では同じ量少ない**。近地点は正月、遠地点は6月頃になる。
- また、地球自転の回転軸は公転面に直交する方向に対して、**23.5度傾いて**おり、このために季節による温度差が起こる。
- この**離心率、自転軸の傾きそのものが非常に長い周期で変化する**ので、このことによっても長い周期の温度変化が起こる。
- また、**太陽の活動そのものが変化し**そのことによる温度変化もある。

太陽からの距離の関数としての惑星の温度



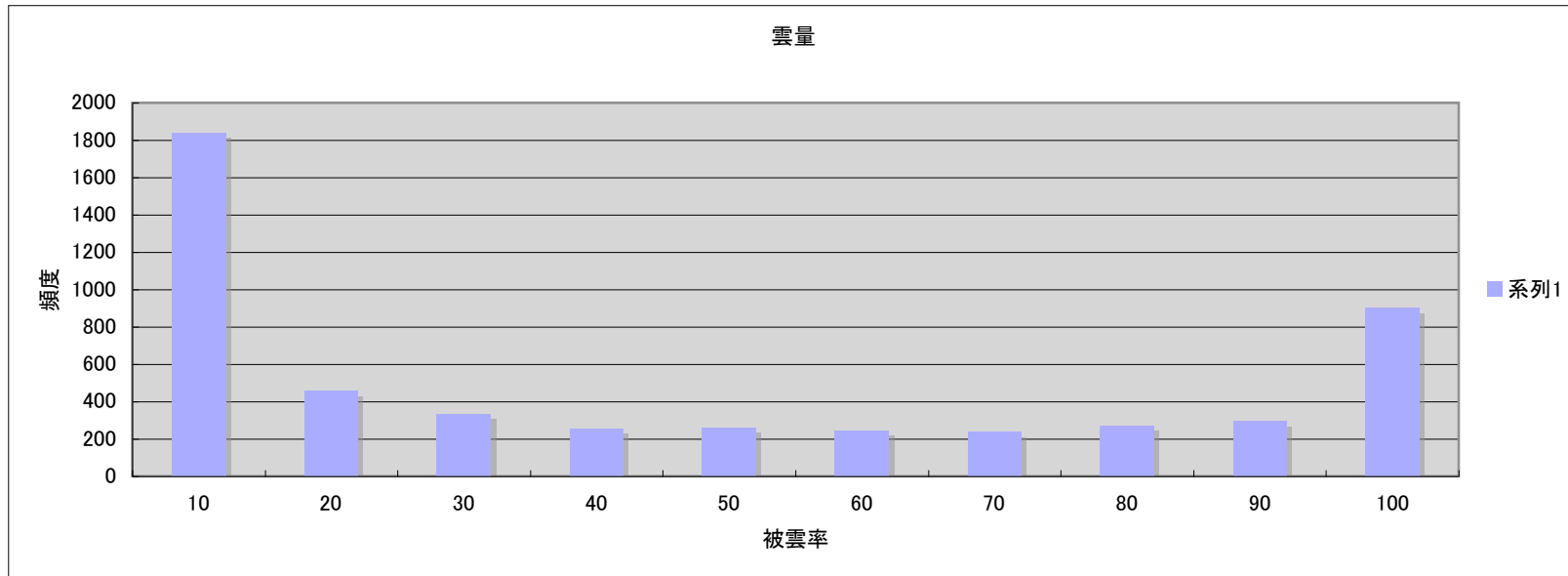
金星の温度

- 既に述べたように、惑星の温度もエネルギー収支の観点からは太陽と惑星の距離の平方根に逆比例するが、水星や金星の雲表面の温度は単純に推定される温度より遙かに高い。特に金星は炭酸ガスで覆われているため、炭酸ガスの温室効果の例として引き合いに出される。
- しかし、この説の疑問点は、温度が高くなると黒体放射のピークの温度はさらに短波長側にずれることになる。金星表面は反射率が70%で有るため温度が低く、そのためにピークが長波長側にずれて温室効果が顕著になると言う説明がされる場合がある。しかし、それで結果的に温度が上がれば炭酸ガスの温室効果ガスの吸収帯からは外れてしまう。

可視・近赤外域での平均反射率は30%か？

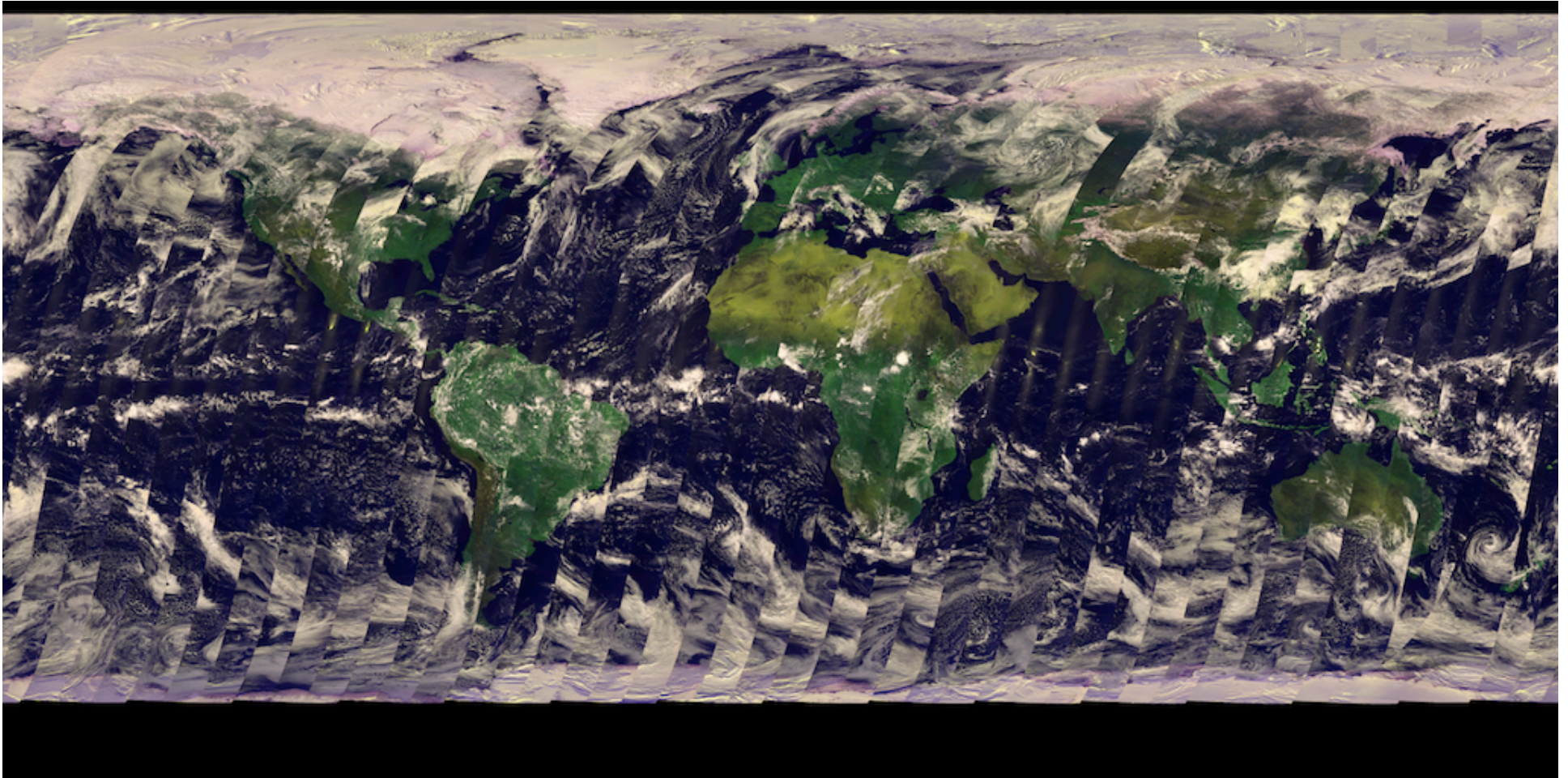
- MODISの陸域でのBlack-Sky Albedoによれば、0.858 micronで16%程度、1.64 micronで12-16%程度、2.10 micronで9-12%程度となっている。また、全地球表面の70%を占める海域の反射率は、2%程度と考えられる。これらから判断すると地球の平均反射率はもう少し低いと考えられる。
- しかし、これは、雲がない場合の計算であって実際はもっと複雑で30%というのはそういうことを考慮したものだ、という説明がある、果たしてそうか？
- 私がASTERを使って調べた結果では被雲率は別紙のようになっていた。ここで晴天率は60km*60kmの領域の中での被雲率の統計値である。これからは平均被雲率は45%程度という結果になるが、もっと多いと言う計算もあり、変動も大きい。
- また、最新のGOST CAIの全球分も添付する。

ASTERから計算した被雲率



平均被雲率: 45%

CAI全球ブラウザ画像(20090423-0425)



2009/10/26

原子力安全ゼミ

21
21

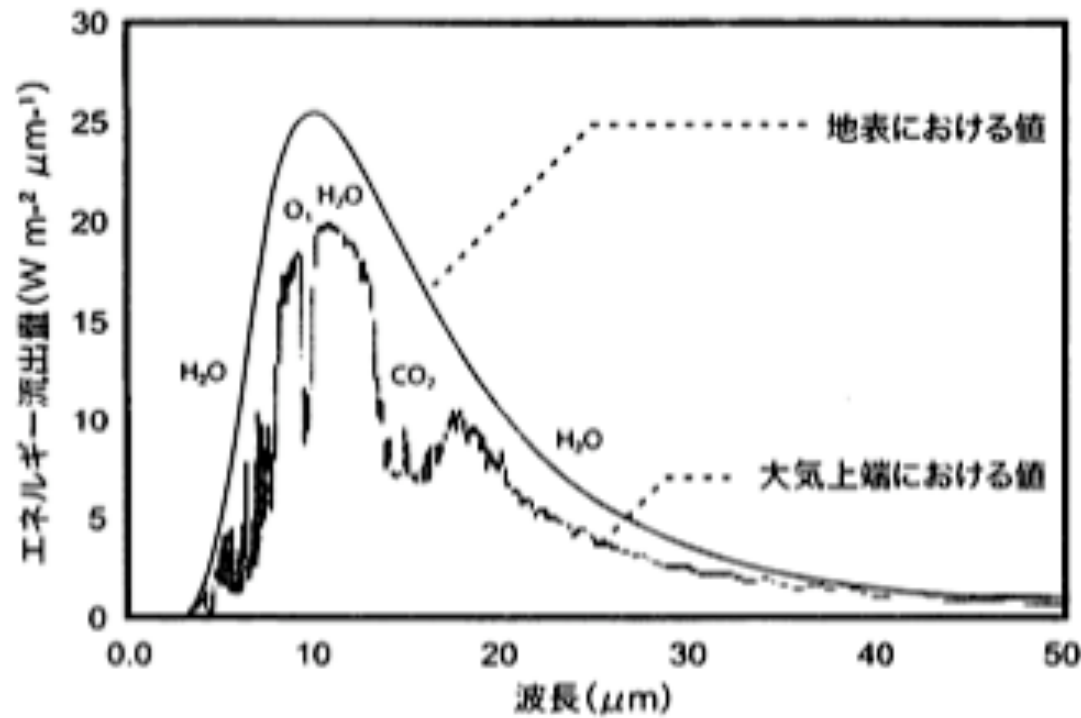
地球の放射と炭酸ガスの吸収帯の位置

- 炭酸ガスの主要な吸収帯は14micronより長い波長帯にある。一方、地球が288Kで黒体放射をするとすると。波長の関数としてみると10micron帯にピークがあり、炭酸ガスの吸収帯とは位置がずれる。(たとえばKiehl and Trenberth1997)
- 一方、これを周波数または波数(cm^{-1})で表すと、ピークは長波長側にずれ、14micronに近づく。(田中正之1989)
- 実際は積分して比較しなければならないが、Planck関数の9-11micronでの積分値は 62watt/m^{**2} であるのに対し、14-16micronでは 42watt/m^2 程度であり、後者の表現は正当ではない。

地球の温度決定に対するH₂Oの寄与

- 全体としての温室効果ガスの寄与は環境研の資料ではH₂Oの寄与が最も大きい、とされてる: H₂O 60%, CO₂ 26%,,(地球環境センターニュースVo.18,No.6,p.10(2007年9月) 但しCO₂にはfeed back効果が有るとされている。
- しかも、これは、晴天時の計算で、H₂Oは気体としての寄与のみが考えられているが、雲など、個体、液体のH₂Oでは、電磁波の透過は極めて少なくなる。晴天時の夜間の放射冷却と、曇天時の保温はよく知られた現象である。

地球からの放射光の大気圏外でのスペクトル



各温室効果ガスの寄与		
H ₂ O	60%	(75 $W m^{-2}$)
CO ₂	26%	(32 $W m^{-2}$)
O ₃	8%	(10 $W m^{-2}$)
その他	6%	(8 $W m^{-2}$)

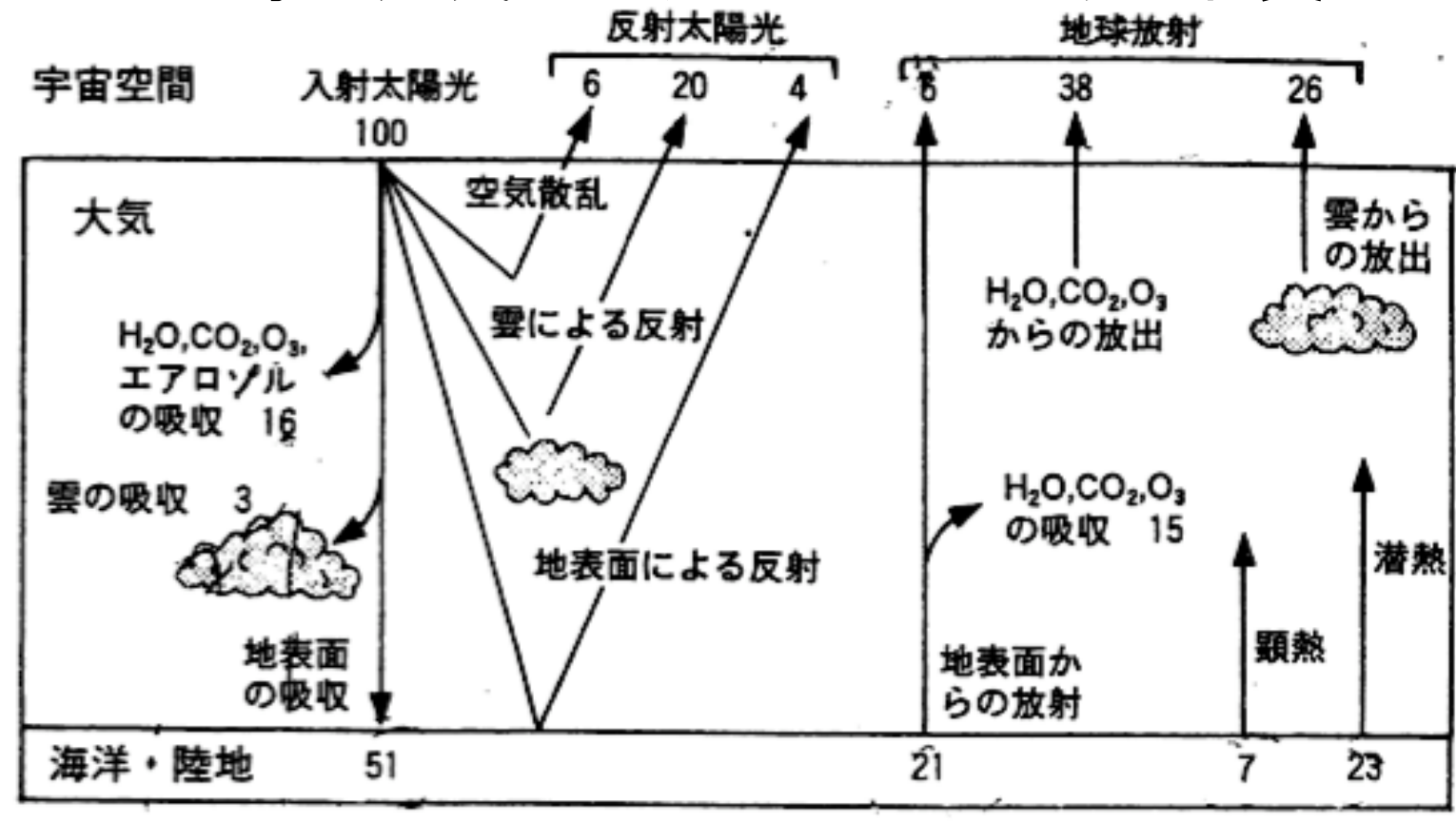
各温室効果ガスの寄与 (ここが知りたい温暖化11-2)

気体	Percentage(%)	放射束(watt/m**2)
H ₂ O	60	75
CO ₂	26	32
O ₃	8	10
その他	6	8

地球一大気システムの前提は正しいか？

- このあたりの議論から、地球一大気システムのエネルギー収支、と言う話が出てくる。この図の典型的なものを次ページに示す。ここでは、平均的な比率が書いてあるのだろうが、そもそも、雲の量、反射率などは、その時の状況で時々刻々、また、場所毎に変化するものでこのような固定的な数値には成り得ない。
- この図は、なかなか巧妙に出来ていて、前述の地球全体としての Albedo (反射率) 30% 尾言う条件も満たしているし、雲や大気の中、地球での吸収、放射はともに収支がゼロになっている。NASAもこの図は採用している。
- 上記のように、これは、明らかに固定的な値ではなくダイナミックに変化しつつ全体としてほぼ平衡を保っているがそれが少しずつ崩れていっているように見える。

地球一大気システムのエネルギー収支

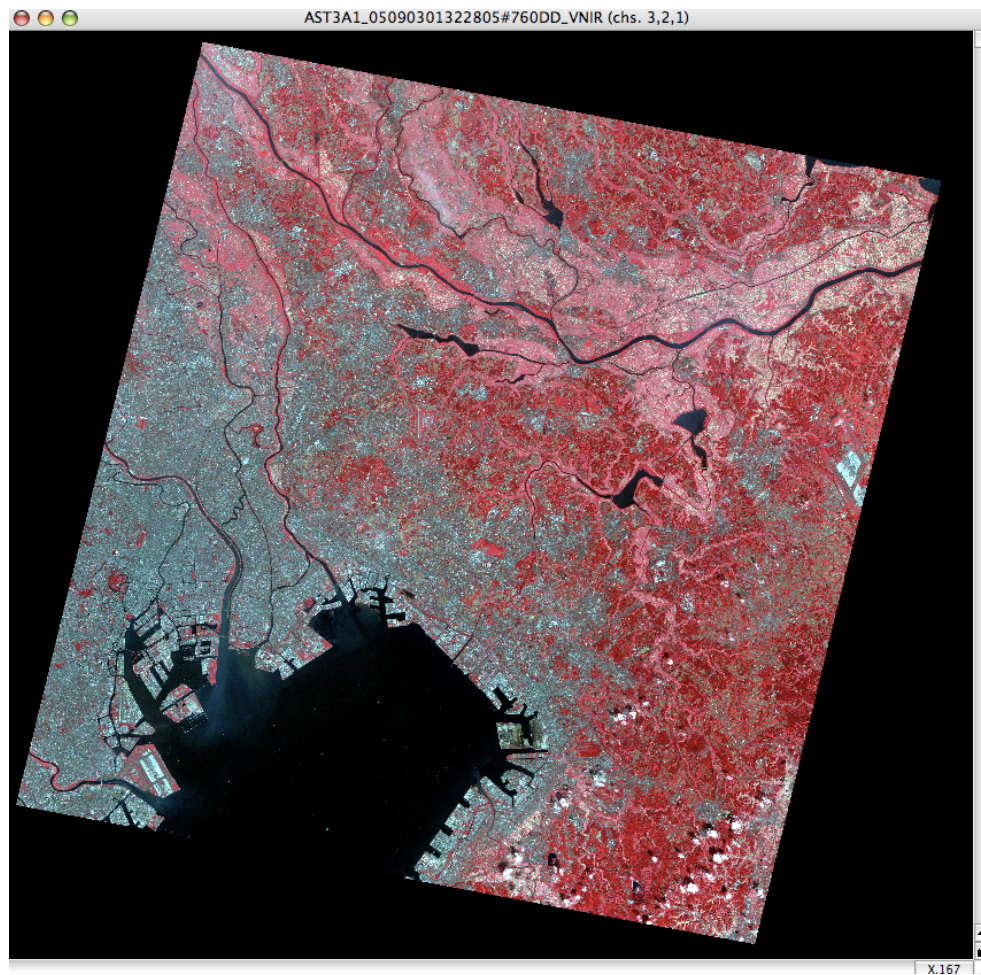


(田中正之「温暖化する地球」)

エネルギー収支図の疑問点

- まず、地球への太陽光の入射は、主として可視光であるが、これは、全体の51%か？これは、雲の存在確率を考慮したものか？
- 次に、地表から出た熱赤外光21ポイントのうち、8ポイントしか大気圏外に出て行かないのか？ASTERのTIRデータから大気による減衰を考えないで計算した地表の温度は、実際の地表面の温度とそれ程大きな差はない。少なくとも38%の放射束では気温の推定は出来ないはずだ。また、これらのTIR画像では地表の状況が鮮明に写っており、大気によって散乱されるものがほとんどであれば、このような画像は得られないのではないか？

東京のVNIR画像(050903)

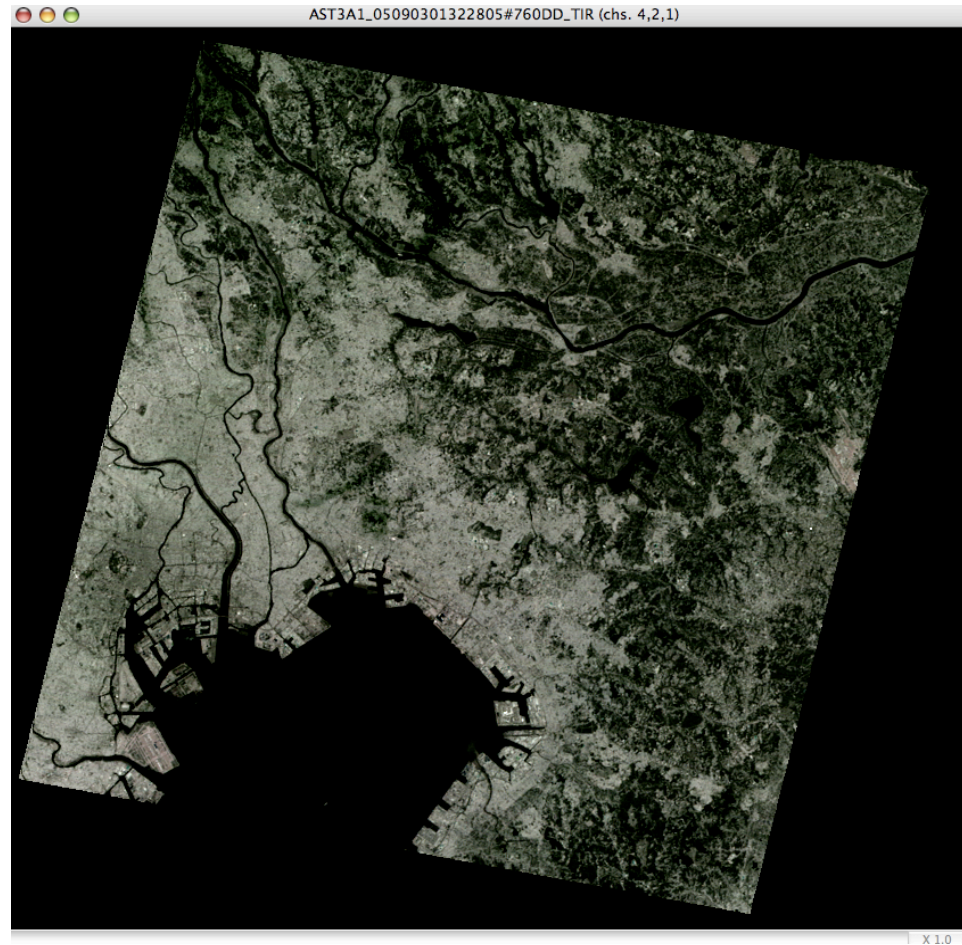


2009/10/26

原子力安全ゼミ

29

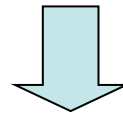
東京のTIR画像050903



Band10,11,13

Temperature (Planck's formula 1/2)

Apply Planck's formula to the source data to derive Absolute Temperature T.



$$T = \frac{C_2 / \lambda_n}{\ln \left(\frac{C_1}{\pi \lambda_n^5 L} + 1 \right)}$$

*“n” indicates the band number (10-14)

$$C_1 = 2\pi hc^2 = 3.7418 \times 10^{-16} (Wm^2)$$

$$C_2 = hc/k = 1.4388 \times 10^{-2} (mK)$$

$$L = (DN_n - 1)R_n$$

h: Planck's constant (6.626176×10^{-34})

k: Boltzmann's constant (1.380662×10^{-23})

c: Speed of light (2.997925×10^8)

DN: DN value in Level 1B product

L: Radiance $W/(m^2 \cdot sr \cdot m)$

ASTER TIRから推定される温度

- ASTER TIRの東京湾のDN 値は、1170,1200,1300,1580,1660程度であり、大気の減衰がないとして計算した温度は18°C程度である。
- 観測日は2005年9月5日で、実際は若干海温は18°Cより高いと思われるが、何倍と言うことはあり得ない。
- p.28のエネルギーバランスの図にあるように、地表から出た電磁波の1/3程度しか大気圏外に出ないと言う説ではこのことは説明できない。
- また、熱赤外の画像は地上の状況をVNIRほどではないにしろ反映している。熱赤外線が過度に散乱したら、このような画像にはならないはず。

地球の過去の温度はどうだったのか？

- 過去の地球の温度は現在よりも暑かったことも寒かったことも有るが、第4紀の中で4回の氷河期と間氷期の繰り返し(洪積世)が終わり 1万年くらい前から始まる沖積世に属する。
- 過去の地球の温度の変化は、**ミランコビッチ仮説**で説明されてきた。これは、地軸の傾きの変動、地球の才差運動、地球が太陽の周りを回転する楕円軌道の離心率の変化での説明であり、温室効果ガスによるものではない。実際、日射量は第4紀を通じて10%程度は変化しているようである。しかし、ミランコビッチ仮説も実際の温度変化を完全に説明しているわけではない。この他に太陽の活動(黒点の活動)の強弱の影響も指摘されている。

放射強制力(Radiative Forcing)

- Wikipediaでは、一般的定義とIPCCでの定義を区別して掲げている。
- 一般の定義

In [climate](#) science, radiative forcing is (loosely) defined as the difference between the incoming radiation energy and the outgoing radiation energy in a given climate system. A positive forcing (more incoming energy) tends to warm the system, while a negative forcing (more outgoing energy) tends to cool it. Possible sources of radiative forcing are changes in [insolation](#) (incident solar radiation), or the effects of variations in the amount of radiatively active gases present.

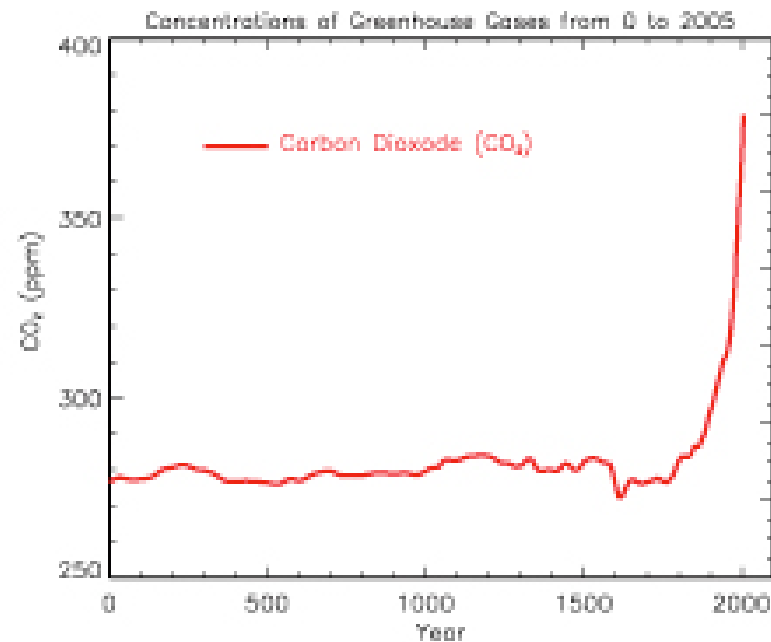
放射強制力(Radiative Forcing)--2

- IPCCでの定義
 - http://en.wikipedia.org/wiki/Radiative_forcing
 - The radiative forcing of the surface-troposphere system due to the perturbation in or the introduction of an agent (say, a change in greenhouse gas concentrations) is the change in net (down minus up) irradiance (solar plus long-wave; in Wm^{-2}) at the tropopause AFTER allowing for stratospheric temperatures to readjust to radiative equilibrium, but with surface and tropospheric temperatures and state held fixed at the unperturbed values.
 - 尚、IPCCとは
 - ・ 気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change、IPCC)とは、国際的な専門家で作る、[地球温暖化](#)についての科学的な研究の収集、整理のための政府間機構である。

放射強制力(Radiative Forcing)--3

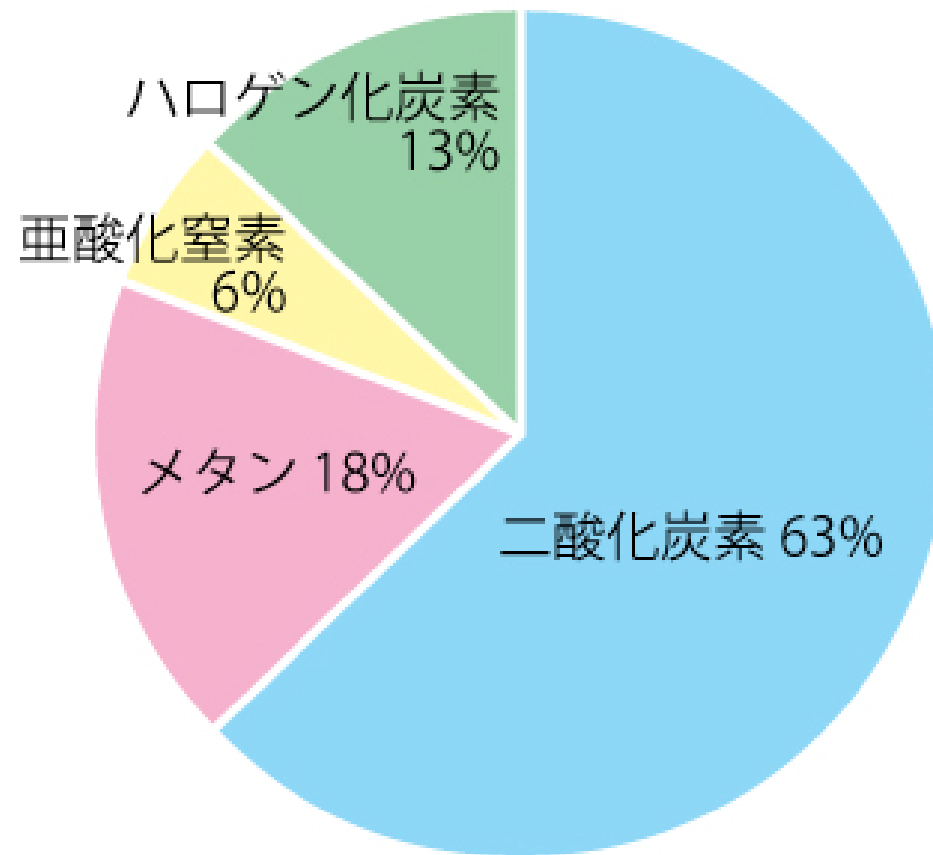
- さらに以下のように付言している：
 - In the context of [climate change](#), the term forcing is restricted to changes in the radiation balance of the surface-troposphere system imposed by external factors, with no changes in stratospheric dynamics, without any surface and tropospheric feedbacks in operation (i.e., no secondary effects induced because of changes in tropospheric motions or its thermodynamic state), and with no dynamically-induced changes in the amount and distribution of atmospheric water (vapour, liquid, and solid forms).
- すなわち、地表-圏界面(対流圏)での放射バランスに変化を与えるもののみ限定している。水や雲の影響が大きいことを忘れさせる様な表現が取られているようにおもわれる。

炭酸ガスの濃度の変化

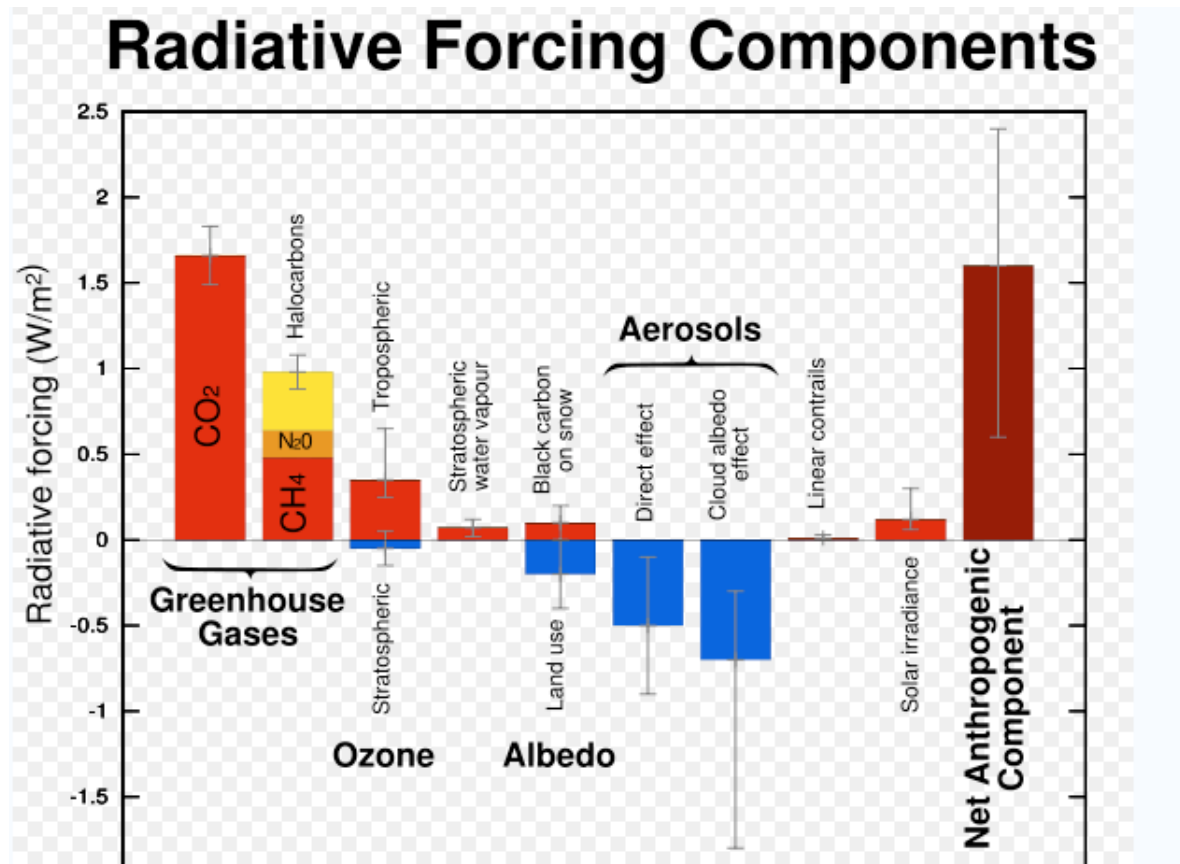


FAQ 2.1, Figure 1. Atmospheric concentrations of important long-lived greenhouse gases over the last 2,000 years. Increases since about 1750 are attributed to human activities in the industrial era. Concentration units are parts per million (ppm) or parts per billion (ppb), indicating the number of molecules of the greenhouse gas per million or billion air molecules, respectively, in an atmospheric sample. (Data combined and simplified from Chapters 6 and 2 of this report.)

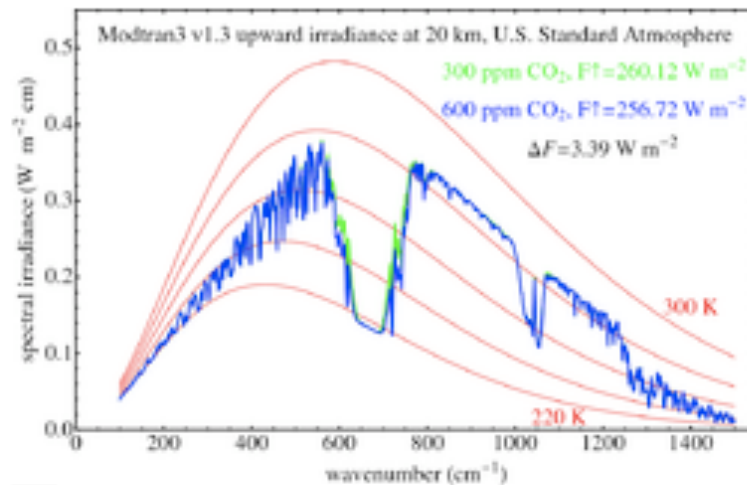
放射強制力の割合



IPCCによる放射強制力



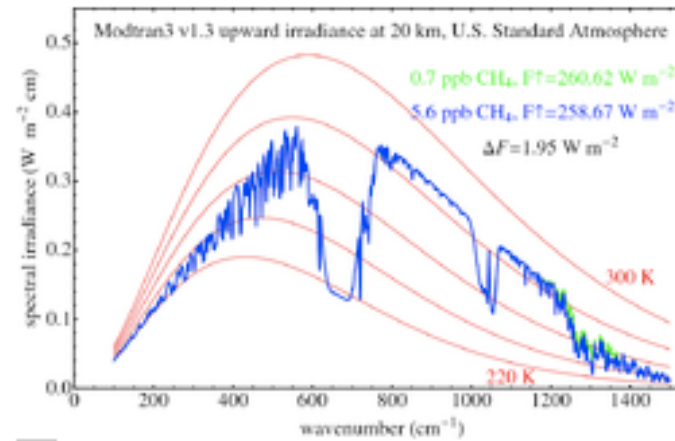
CO₂増加のシミュレーション



□ Radiative forcing for doubling CO₂, as calculated by radiative transfer code Modtran. Red lines are Planck curves

この図でも波数で表現されたプランクの式が使われている。この緑と青の差が炭酸ガス濃度が300ppmから600ppmに倍増した場合の差である。(現在の平均は380ppm程度)

CH₄増加のシミュレーション



□ Radiative forcing for eight times increase of CH₄, as calculated by radiative transfer code Modtran.

Radiative forcing (放射強制力)からの 温度上昇の計算方式

- Stephan-Boltzmannの方程式から

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{E} * \frac{T}{4}$$

- ここで ΔE = radiative forcingとすれば、 $T=300$ K, $E=1370$ w/m²としてCO₂の場合、大気の放射伝達モデルコードのMODTRANの計算によれば

$$\Delta E = 5.3 \ln\left(\frac{C}{C_0}\right)$$

- これらから、CO₂の濃度が2倍になった場合、3K温度が上昇することになる。

IPCCでのRadiative Forcingの数値

- IPCCで示されているRadiative Forcingの数値は18-19世紀頃の温室効果ガスの推定値から現在の濃度にまでに濃度が上がった場合の放射強制力のようなものである。
- 温室効果ガスの中で最大の放射強制力を持つというCO₂が1.7 w/m² 程度であるが、これは後述するように、日本の平均的なエネルギー消費より小さい。

人間の排出するエネルギーはどの程度か？

	エネルギー消費		エネルギー消費	太陽定数に対する割合
			kw/m**2	%
太陽定数			1.360E+00	
家庭	300	kwh/月/家	2.500E-02	1.838
日本の1次エネルギー	6.00E+15	kcal/年/日本	2.152E-03	0.158
世界のエネルギー	5.00E+17	BTU/年/世界	1.114E-04	0.008

#但し実際に地球の大気圏外での平均では太陽常数の1/4、地表まで到達するのは平均的には太陽常数の1/8程度という計算もある。

計算の前提

エネルギー消費

家庭のエネルギー消費: 2007年渡辺家3階建てアパート

日本のエネルギー消費: 2007年IMIDAS

世界のエネルギー消費: 2010年Energy Information
Administration(US Government)

<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html>

割るべき面積

アパートの面積: 50 m²

日本の面積: 3.72×10^5 km² 理科年表

世界の陸域の面積: 1.49×10^8 km² 理科年表

結論

- 炭酸ガスの大気中の濃度が日変化、季節変化を伴いながら増加しているの
ことを示すいくつかの観測結果がある。空間的な変動もそれほど大きくはない。
しかしながら、大気中の**炭酸ガス濃度の主要な部分は尚自然起源のもの**
であり、人的起源のものは尚、従的なfactorでしかない。
- **地球一大気全体のシステムは非常に複雑であり、炭酸ガスなどの温室効果**
は存在するものの少なくとも最も主要なものではない。複雑なシステムの挙
動はまだ十分説明されていない。少なくとも炭酸ガスが通常の温室と同じ意
味で温室効果を持つ、と言うことはかなり疑問が有る。
- しかしながら、太陽からの光のエネルギー(1.38kw/m²)に対して(さらに雲や
大気により減衰を考えればさらに少ない入力に対して) **人起源のエネルギー**
消費は局所的には1%程度(あるいはそれ以上に)まで上昇しており、エネル
ギー消費そのものを抑制(直接的に炭酸ガスではない)する手段を講じな
ければ地球一大気システムへのインパクトは避けられない。
- 従って、地球温暖化=炭酸ガス濃度の増加、と言う図式にとらわれず、**エネ**
ルギー消費そのものを抑制していく必要がある。IPCCの放射強制力の説明
も炭酸ガスの温暖化への影響を過大に評価させる危険性を含んでいる。

補遺1

- 炭酸ガス悪玉説への極端な傾斜は異常な状況である。電車の切符や家電製品にも使用電力ではなく、消費した炭酸ガス量が記されている。そもそも、発電方式によって炭酸ガス使用量が違うわけで、消費電力から、消費炭酸ガスが決められるわけではない。
- 「環境に優しい」とか、「エコ製品」とは何か？炭酸ガスを出さない事が即、環境に優しく、エコなのか？日本の首相ばかりか、IPCCなどもそちらの方向に雪崩を打って行くのは、心胆寒からしめるものがある。
- 駅スパートなどでCO₂の消費が**kgなどとするのは明らかに行き過ぎである。
- 一方、環境研、私自身もそうなのだが、炭酸ガスや環境は、規模は小さいが、炭酸ガスを生活の種にしている。

補遺2: 大気科学の問題点

1. 膨大な計算量: 宇宙からの炭酸ガスの観測には、放射伝達モデルに基づく膨大な計算を行う。JAMSTECの地球シミュレータなど。NIESのGOSATプロジェクトも東大計算機センターのかなりの部分を占有する。
2. 濃度計算: スペクトル方向に非常に細かい分解能のデータから、その途中での炭酸ガスの濃度分布をRetrievalと言う計算を行いながら推定する。やっていることは、途中の炭酸ガスの濃度を色々変化させて見て、衛星で得られるスペクトルカーブをどれだけよく説明できるか、を計算する。濃度の高さ方向の変化をプロファイルと言うが、ちょっとした、入力パラメータの違いで、プロファイルは大きく変わる。
3. 温暖化モデルの計算は更に多くの仮定を含む。自然を虚心坦懐に見ると言う立場から離れ、モデル計算過信に落ちいつているのではないか？

補遺3:地球温暖化懐疑論の文献

- 矢沢潔:地球温暖化は本当か?技術評論社、2007/1/25
- 伊藤公紀、渡辺正:地球温暖化のウソとワナ(史上最悪の科学スキャンダル)、KKベストセラーズ、2008/5/10
- S.Fred Singer, Dennis T. Avery、地球温暖化は止まらない、東洋経済新報、2008/3/13

補遺4：懐疑論の主な論点(1)

- 最近はいくつかの温室効果ガスによる温暖化の懐疑論が出てきている。以下はその論点の例：
- 大気を校正する分子は80%が窒素、20%が酸素で、CO₂は370-380 ppm(0.037-0.038%)、CH₄は4-5 ppm(0.004-0.005%)でしかない。温室効果があるが、最も大きな温室効果はH₂Oによるがこの評価は不十分である。
- 大気の温度の評価は難しい。過去の温度の推定は更に信頼性が小さい。年輪による推定は必ずしも正しくない。
- 温暖化の要因になりうるのは温室効果ガスだけではない。太陽の活動、離心率などの軌道パラメータの変化なども地球の気温に大きな影響を与えてきた。

補遺5: 懐疑論の主な論点(2)

- 地球の温暖化は必ずしも人起源の温室効果ガスだけではない。炭酸ガス濃度が上がる前から温度上昇は認められる。また、炭酸ガス濃度が上がっても温度上昇が起こらない場合もある。
- 北極・Greenlandと南極で氷の増減のメカニズムが違う。実際南極での温度は必ずしも上昇しておらず、氷も溶けていない。
- 炭酸ガスは海洋中に多く溶け込んでおり、海洋の温暖によって大気中に放出される。従って、炭酸ガスの高濃度化は、温暖化にとって原因であるより、むしろ結果ではないか？