

# 地球温暖化

200335239 伊藤健一 200335242 大久保貴義 200335253 屋所健司

指導教官 内山洋司先生

## 第 I 章

### はじめに

現在，地球規模の温暖化が進み気候が変動しつつある．われわれ人間の高度な産業の発達に伴って，二酸化炭素に代表される温室効果ガスを大量に排出して来た．排出された温室効果ガスが地球温暖化の原因であると考えられている．本報告では，どのような過程で温室効果ガスを排出してきたか．また，生物が生きていく上で必要不可欠な温室効果の仕組み，過剰な温室効果ガスの排出による地球に対する影響，さらに今後温暖化を抑制するためにはどのような対策が必要になるのかを述べる．また，最後に我々が独自に計算した予測される 100 年後の気温上昇を示す．

## 1 温室効果ガス

### 1.1 温室効果ガス

ビニールで覆い囲み温室を作ることがある．温室の中の温度は外の温度より高くなっている．この現象は入っていくエネルギーは通し，出ていくエネルギーをブロックするという特性による．このような特性によって地球の平均気温を 15℃ に保つことが出来る．もし温室効果がなかったら，地球の平均気温は -19℃ で，われわれの知っているような生体系は存在していなかっただろう．

生きていく上で必要不可欠な温室効果ガスなのだが，近年，大気中の濃度は人為的に排出してきたものによって増加傾向を示す．このまま増加が続くと，破壊的な気候変動をも

たらすこととなるだろう．温室効果ガスの中で二酸化炭素が放出の最も多い物質である．二酸化炭素の主な発生原因は，電力発電・建設・産業過程の化石燃料の燃焼である．二酸化炭素の濃度は化石燃料の使用が急激に増えた 150 年前より約 30 % も増加している．

また一方でメタンの濃度も強い増加の傾向がみられる．メタンは人口増加と密接関係がある．その発生源は，天然ガスの生産・石炭の採掘・稲作・動物の消化・ゴミ処理場・湿地など，さまざまである．亜酸化窒素の濃度増加も問題になっている．亜酸化窒素の主な発生源は，それを含む化学肥料の使用である．その化学肥料は世界中で芝生などに散布されている．ハロカーボン(フロン)は炭素・塩素・フッ素・臭素の混合物であり，表 1 に示す CFC-11 といったような chlorofluorocarbons(CFCs) を含む．フロンの濃度増加は確実に人間活動に原因がある．なぜなら，フロンは自然界には存在しない物質であるからである．産業が発達し始めた 1930 年代から，冷凍システム・エアロゾル缶などが普及し，大量に排出されるようになった．環境上の問題より，CFCs やその他のフロンの発生を除去するための国際的な協定が結ばれた．これにより，フロンを排出することは禁止されている．

表 1 に示してある HCF-22 は，CFCs の代用となりうる．これもまた温暖化に影響を与える物質であるのだが，フロンの濃度増加が禁止されて以来 HCF-22 の濃度が増えている．表 1 に述べられている特性は，これらの温室効果ガスは大気中に数十年から数世紀にかけて存在することである．つまり，地球温暖化が起こってしまったら元に戻すのは容易では

表 1: 1850 年以來の大気中に存在する温室効果ガス濃度の増加

量	二酸化炭素	メタン	亜酸化窒素	CFC-11	HCF-22
産業化時代の濃度	280ppm	700ppm	275ppb	0	0
1994 年における濃度	358ppb	1,720ppb	312ppb	268ppt	110ppt
近年の濃度変化	1.5ppm/yr	10ppb/yr	0.8ppb/yr	0ppb/yr	5ppt/yr
大気中の残存年数	50-200[世紀]	12[年]	120[年]	50[年]	12[年]

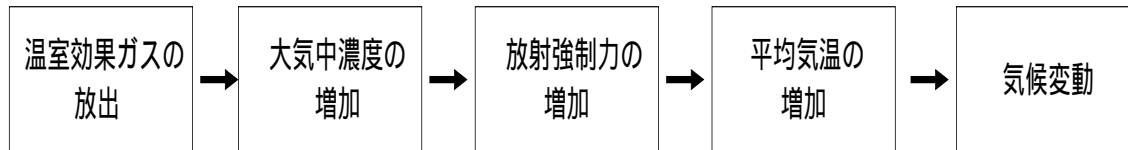


図 1: 地球温暖化の基本的なプロセス

ないことを意味する．そのためわれわれは、温暖化の仕組みは何なのか？温暖化問題を軽減させるためにはどうすればよいのか？といった疑問に対して、解決していく必要がある．

温室効果ガスがもたらすプロセスを図 1 に示す．温室効果ガスと気候変動の関係は地球規模で明らかにする必要がある．それには、陸・海・空の 3 つの気象モデルが必要である．また、それぞれのモデルを設定するパラメータには、不確実性が含まれているため、定量的に求めるのは極めて困難である．われわれは地球温暖化について、地球の放射バランスの崩壊からどのような影響があるのかという視点から学んだ．次節以降で段階的に温暖化現象について説明をする．

## 1.2 地球温暖化係数

地球温暖化係数 (Global Warming Potential) とは、各温室効果ガスの地球温暖化をもたらす効果の程度を、二酸化炭素の当該効果

に対する比で表したものである．

$$GWP = \frac{\int_0^Y \Delta F_{GHG} f_{GHG}(t) dt}{\int_0^Y \Delta F_{CO_2} f_{CO_2}(t) dt} \quad (1)$$

分子は温室効果ガスの放射エネルギーのトータル  $\Delta F_{GHG}$  と経過年数  $Y$  である．分母は  $CO_2$  の場合である．ペルフルオロメタンは  $CO_2$  に比べ 1 万倍に及ぶ大きな値を示しているが、フロン類の赤外吸収が著しく強い上に、寿命が長いためである．

## 2 地球のエネルギーバランスと温室効果

温室効果ガスが大気へ加えられることによって、太陽から地球への放射と地球から宇宙への放出のバランスが崩れる．もし大気がなく温室効果が無かった場合と比較して、温室効果ガスの追加が地球に与える影響を述べる．

## 2.1 放射エネルギー

まず、全ての物体からはエネルギーが放射されていることを理解することにする。以下では放射させるエネルギーの理論的な値を仮定し、分かりやすく話を進めることにする。

絶対零度より高い温度の物体からは連続的にエネルギーが放射されている。放射量は温度と表面の性質に依存する。エネルギーの最大比はステファン-ボルツマン式によって求められる。

$$Q_{\max} = \sigma AT^4 \quad (2)$$

$Q$ : エネルギー放射の最大量

$\sigma$ : ステファン-ボルツマン定数

$A$ : 物体の面積

$T$ : 物体の絶対温度

最大量での放射は黒体として知られている。実際はこの理論値よりも少ない放射量である。

## 2.2 簡単な地球エネルギーバランス

ここで、もし温室効果がなかったらどうなっていたかを考察する。この場合、太陽エネルギーによって表面を一定に暖められる。入ってくる太陽エネルギーと反射して出ていくエネルギーが等しいとき、均衡状態となる。地球表面が黒体であると仮定すると、単位面積当たりの出ていく放射量は

$$q_{\text{earth}} = \sigma T_e^4 \quad (3)$$

である。単位平方メートルあたりに受ける太陽エネルギー  $S_0$  は  $342[\text{W}/\text{m}^2]$  である。電磁波の性質より、入ってきた太陽エネルギーの一部は反射して宇宙へと戻ってくる。この反射されたエネルギーをアルベドと呼ぶ。アルベドは地表の特性に依存する。氷や雪といった白く滑かな面では反射が多く、ザラザラで暗い面では反射は少ない。アルベドは見積もって 31% であると考えられている。この意味

は、反射されず残る 69% の太陽エネルギーは吸収され熱となる。一般に太陽エネルギー吸収率は

$$S_0(1 - a) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (4)$$

である。エネルギー吸収と、式 (1) から求められる地球放射の量は、均衡状態の下で一定の表面温度を与える。

$$\text{エネルギー吸収量} = \text{エネルギー放出量} \quad (5)$$

このように

$$S_0(1 - a) = \sigma T_e^4 \quad (6)$$

$T_e$  について解けば地球温度を求められる。

$$T_e = \left[ \frac{S_0(1 - a)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

この簡単なモデルでは、アルベドと太陽エネルギーが温度を決定するパラメータとなる。ステファン-ボルツマン定数を代入して、

$$T_e = \left[ \frac{(342)(1 - 0.3)}{5.67 \times 10^{-8}} \right]^{\frac{1}{4}} = 254 \text{ K} = -19 \quad (8)$$

温室効果がないと地球の平均気温は -19 と予測される。実際の平均気温は 15 で、その差 34 が温室効果によって暖められている

## 2.3 温度と放射スペクトル

放射エネルギーは電磁波もしくは、光子微粒子である。光子エネルギーは出現頻度に Planck 定数をかけたものである。

$$E = h\nu \quad (\text{joules}) \quad (9)$$

この式は高頻度の光子は大きなエネルギーを持つことを意味する。ただし、放射スピードが光速であるとき、波長  $\lambda$  が特長を決定する。波長は通常マイクロメートル程度で、頻度とは逆の関係がある。

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (10)$$

$c$ : 光の速度

式(8)に式(9)を代入すると,

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (11)$$

となる. この式より, 波長が短いほどエネルギーが大きくなる事が分かる.

次に, 放射エネルギーの波長や頻度は, 物質放射の温度との重要な関係を述べる. Planck の法則を用いて, 絶対温度  $T$  の黒体による波長  $\lambda$  のエネルギー放射を求める.

$$E_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5(e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (12)$$

$E_\lambda$ : 単位体積および単位波長あたりの黒体によるエネルギー放射量

$\lambda$ : 波長

$T$ : 黒体の絶対温度

$C_1$ : 第一定数 =  $3.743 \times 10^8$  ( $W - \mu m^4/m^2$ )

$C_2$ : 第二定数 =  $1.44 \times 10^4$  ( $\mu m - K$ )

この  $E_\lambda$  の値は黒体の放射力として知られている. 式(11)から分かるように物体の温度が違えば, 黒体からのスペクトル分布も違う. つまり, 太陽からの放射と地球で反射されたアルベドの放射では波長の長さが違う. 温室効果において, この違いが重要なのである. 温室効果ガスが違えば吸収するスペクトルの波長帯も違う. 複数のガスの吸収する波長帯が重複する場合, 互いのガスが相関して放射強制力の値が決まる.

## 2.4 温室効果の定義

温室効果は入ってきた太陽エネルギーのほとんどを通し, 出ていく放射をブロックすることで生じる. 波長の長い赤外線を吸収するガスが温室効果ガスと定義される. 温室効果ガスに蓄えられたエネルギーの一部は宇宙へと放出するが, そのほとんどが地表へ戻る. この戻ったエネルギーを吸収することによ

て, 地表の平均気温を 15 に保っている. 水蒸気は温室効果の 85 %も占めているほど強力なガスである.

## 2.5 地球エネルギーバランスの再定式化

大気の役割における新しい見識を使ったモデルを紹介する. 層の温度を  $T_a$  で統一し, 黒体の放出と仮定する. さらに, 層は地球からの放射の全てと, 太陽放射の一部を吸収するとする. 単位表面積あたりのエネルギーは簡単に  $\sigma T^4$ . 入ってきた太陽エネルギーは  $S_0 = 342 W/m^2$  という平均値を得る. そのうち 31 %強,  $107 W/m^2$  はアルベドとして反射される. 残った総吸収量  $S_a W/m^2$  は

$$S_a = S_0 - aS_0 = 342 - 107 = 235 [W/m^2] \quad (13)$$

このモデルでも地球表面の均衡温度  $T_e$  を求める必要があるのだが, それが, 先に示した簡単なモデルに比べて複雑になっており困難なのである.

$$S_a \alpha_a + \sigma T_e^4 = 2\sigma T_a^4 \quad (14)$$

$$S_a(1 - \alpha_a) + \sigma T_a^4 = \sigma T_e^4 \quad (15)$$

2式を同時に解くことによって, 地球表面温度  $T_e$  は 17 と求められる. 実際の平均気温は 15 なので, 前に示したモデルより現実的である事が分かる.

## 2.6 高度な大気モデル

温室効果がどのように地球の放射バランスを変えてしまうのか? IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change:気候変動に関する政府間パネル)による正確な報告を図2に示す. このモデルには, 地表からの上昇気流・水蒸気の潜熱・大気表面での気化熱も示されている. 図2に示すように, 地球から宇宙へと出て

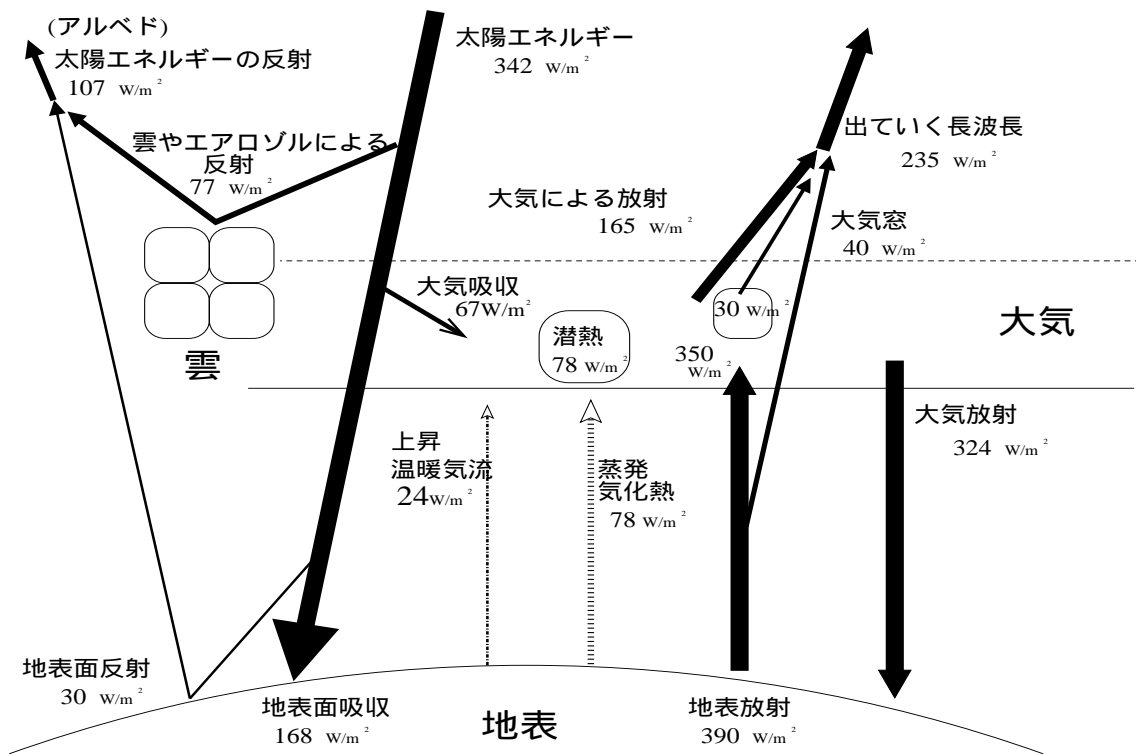


図 2: 高度な大気モデル

いく放射のほとんどを大気が吸収している。しかし、その放射の約 10% は大気窓を通して、大気からの放射と共に宇宙へと放出している。大気中から地球への放射は、大気から宇宙への放射より大きい。事実、大気の上部は下部より冷たい。つまり、低いエネルギーの放射は低い温度である。

温室効果ガスの真の放射量を予測するためには、大気モデルに物理的な放射と熱伝導・雲のふるまい・その他、大気の構成物質の詳細が必要である。それらをふまえた図 2 は、観測衛星によって確認されている高度なモデルである。

### 3 放射強制力

これまで大気の構成は一定であり、太陽から地球への放射と地球から宇宙への放射のバランスが均衡した状態であると考えてきた。実際に起こっているように、二酸化炭素やメタンといった温室効果ガスが増加したら、ど

んなことが起こるかについて考えてみる。定義によって、温室効果ガスは地球から放射される赤外線を吸収するものである。つまり、温室効果ガスが大気中に加えられたら、宇宙へ出ていくはずの放射の一部がガスによって吸収される。その結果、単位面積あたりの出ていく放射の量が減る。つまり、均衡が保たれていた放射バランスに不釣り合いが起きるのである。このように温室効果ガスの増加現象などが持っている、バランスの不釣り合いを起こさせる影響力を放射強制力  $\Delta F$  と呼ぶ。

#### 3.1 気候変動させる放射強制力

放射強制力はいくつかの方法によって引き起こされる。1つは太陽活動による太陽光の変化。理論上、太陽光の強さはわずかであるが増加しているとされている。しかし、太陽活動の変化にはとても長い時間がかかると明らかになっている。人間活動が及ぼす放射強制力の変動に比べると、太陽による放射強制

力の変動は小さい。このことから，今回の報告では太陽光の変化を考慮にいれないことにする。他には大気中の二酸化炭素やメタンといった温室効果ガスが増加した場合もそうなのだが，大気中のエアロゾルの増加も放射強制力を産み出す。エアロゾルとは，直径 $10\mu\text{m}$ 以下の浮遊微粒子である。大気中に追加されると，太陽エネルギーを反射させる性質を持つ。つまり，アルベドが増加し，結果として入ってきた放射よりも出ていく放射のほうが多くなり，冷却効果が期待できる。

大気中の温室効果ガス濃度が微少である場合，追加される温室効果ガスの影響は大きい。温室効果ガスの濃度が増えるに従って，追加される温室効果ガスの影響は小さくなる。変化する前の濃度を $C_0$ ，変化後を $C$ とする時，低濃度・中濃度・高濃度でそれぞれ関係を示す。

低濃度

$$\Delta F = A(C - C_0) \quad (16)$$

中濃度

$$\Delta F = B(\sqrt{C} - \sqrt{C_0}) \quad (17)$$

高濃度

$$\Delta F = k(\ln C - \ln C_0) \quad (18)$$

3つの式中の $A$ や $B$ や $k$ はそれぞれのガスによって値が違う。

### 3.2 工業化時代の放射強制力

大気中の温室効果ガスが劇的に増加し始めたのは，今から150年前の1850年である。工業化時代の始まりである。表2に1850年から現在までの大気中の温室効果ガスの濃度変化を示す。この表を見ても分かるように1850年以来，増加の一途をたどっている。表2より，二酸化炭素による放射強制力の値は， $1.56\text{W}/\text{m}^2$ である。これは，放射強制力全体の64%を占めている。これにより，二酸化炭

素の発生源である電力発電，建設，それに車の排気ガスがいかに温暖化に影響を及ぼしているかが分かる。また，人間活動全体の放射強制力の値は $2.45\text{W}/\text{m}^2$ である。これは，地球から宇宙に放出される長い波長の放射全体の約1%も占めている。つまり，人間が地球に大きな打撃を与えており，今後とも注目される。

エアロゾルと呼ばれる対流圏の至る所に存在する微粒子がある。エアロゾルの濃度変化も地球の放射バランスを崩す。エアロゾルには3つの種類がある。1つ目は硫酸塩粒子。これは石炭や石油といった硫黄を含んだ化石燃料を燃焼させることによって発生する。2つ目は，生物体を燃焼させることによって発生する。これら2つは太陽エネルギーを反射させ，アルベドの量を増加させる能力がある。つまり，地球にとって冷却効果がある。3つ目は，化石燃料が燃焼するとき発生する，すすの微粒子である。これは上の2つとは違い太陽エネルギーを吸収し，温暖化効果を発揮する。エアロゾルは，二酸化炭素・メタン・二酸化窒素のような温室効果ガスとは違い大気中に留まる期間は短い。エアロゾルの性質上，雨に流されてしまうため，大気中に留まっていられるのは雨が降るまでの数日間だけである。

温室効果ガス全体の影響を評価するのに，複合的な温室効果ガスを二酸化炭素に置き換える方法がある。この場合，式(17)の $k$ に二酸化炭素の場合の数値を代入する。これにより，全体の放射強制力を求めるには次式を用いる。

$$\Delta F_{total} = 6.3 \ln \left( \frac{C_{equiv}}{C_0} \right) \quad (19)$$

濃度 $C$ について解けば，

$$C_{equiv} = C_0 \exp \left( \frac{\Delta F_{total}}{6.3} \right) \quad (20)$$

これが，二酸化炭素に換算した時の濃度である。

表 2: 1850 年から 1990 年の放射強制力の世界平均

放射強制力の根源	濃度増加 [ppb]	放射強制力 [W/m <sup>2</sup> ]
温室効果ガス		
二酸化炭素	78,000	1.56
メタン	1,014	0.47
二酸化窒素	36	0.14
フロン	0-0.5	0.28
トータル		2.45
エアロゾル		
硫酸塩粒子		-0.4
生命体の燃焼		-0.2
化石燃料のすす		0.1
トータル		-0.5

## 4 放射強制力による気温変化

温室効果ガス濃度が増えることによって、放射強制力を引き起こすことを示した。そのようにして生じた放射バランスの不均衡は、大気からの放射が増大させ地表をより暖める。地表が暖められることによって気候変動が起こる。そうすると地球の気温が上昇し、その時新しい均衡状態に落ち着く。

### 4.1 気候感度ファクタ

放射強制力  $\Delta F$  によって地表の温度が最終的に  $\Delta T_e$  だけ上昇するとき、 $\Delta F$  と  $\Delta T_e$  の比  $\gamma$  は気候感度ファクター (climate sensitivity factor) として知られている。

$$\gamma = \frac{\Delta T_e}{\Delta F} \quad (21)$$

気候感度は気候モデルを行なうにあたって重要なパラメータである。それは温室効果ガスやエアロゾルによって引き起こされた放射強制力が最終的にどれだけ気温を上昇させるかに関係する。

$$\Delta T_e = \gamma(\Delta F) \quad (22)$$

これは、放射強制力が  $1[\text{W}/\text{m}^2]$  ならば平均気温は  $\gamma$  上昇することを意味する。

しかし、気候感度ファクターを測定するのは非常に困難である。温室効果が無い状態では地表の吸収エネルギーが  $1[\text{W}/\text{m}^2]$  増加すると、 $0.27$  温度が上昇することになる。温室効果がある状態では、様々な要因が複雑に関係し、温暖化をする一方で冷却化も生じる場合がある。例えば、地表の温度が上昇すれば川や海より多くの水が蒸発する。前述したように水蒸気は強い温室効果ガスとなる。そのため、地表からの放射を一層妨げられ、温暖化が促進する。一方、多くの水蒸気が発生すれば大量の雲が生じ、太陽エネルギーを反射させる能力が増大する。つまり、冷却化も起こる。このように正確な値を計算することは不可能に近い。しかも、将来気候感度ファクターの値が一定である保障もない。一定でないことが将来の気温変化を予測する限界の理由である。実際の計算では、地表面の平均温度と宇宙へ放出される赤外線量を関係づけ、その2つは線形の関数になっていることから気候感度ファクターを求めると、 $0.6 \text{ W}/\text{m}^2$  という平均値を得ることが出来る。将来を予測する場合において便利上使用している。