

# 地球温暖化序論

長谷部 文雄

## 1. はじめに

近年問題になっている地球温暖化とは、人間活動によって大気中に放出された二酸化炭素などにより引き起こされた地表付近の温度上昇で、その大きさは産業革命以前と比較して1°C程度とされています。二酸化炭素は大気微量成分の一種で、大気に占めるその割合は僅か0.04%程度に過ぎません。このように微量の二酸化炭素が、なぜそれほどまでに重要なのでしょうか。

地球温暖化について知ろうと書店を訪れてみると、人間活動との関係を否定する書籍の多い事に驚かされます。しかし、地球温暖化が人為起源であるとの認識は研究者の大多数に共有されています。ただし、どの程度の二酸化炭素排出量がどの位の地球温暖化を引き起こすのかという問いに正確に答えるのは容易ではありません。また、地球温暖化が国境を越えた地球規模の問題であると同時に、アカデミズムの世界で閉じることなく広く社会生活に影響を与えるが故に、地球温暖化に関わる様々な問題について個々の科学者が個別の研究成果を学術誌に発表するだけでは社会的要請に応える事はできません。こうした認識の下、国連環境計画 (United Nations Environmental Programme; UNEP) と世界気象機関 (World Meteorological Organization; WMO) とが共同で設立したのが気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) です。1988年の設立以来、IPCCは地球温暖化に関わる世界中の専門家の参加を得て、気候変動に関する最新の科学的知見の評価を行う (第一作業部会; WG I) とともに、気候変動に対する生態系の応答・社会システムへの影響や適応策の評価 (第二作業部会) や温室効果ガスの排出抑制策や気候変動緩和策の評価 (第三作業部会) を行う事により、世界各国政府に対して最も信頼性の高い科学的根拠を提示してきました。

IPCCによる評価報告書は、1990年を手始めに数年おきに公表されてきましたが、昨年从今年にかけて3つの作業部会のそれぞれから第5次報告書 (AR5) が公表されました。本公開講座では、AR5執筆者を含む6人の講師が、WG Iのカバーする内容を中心に、その概要を分かりやすく説明します。その第1回である今回は、地表付近の気温はどのようにして決まるのか、温室効果とは何か、地球温暖化は人間活動の影響なのかなどについて概観します。

## 2. 地表付近の気温はどのようにして決まるのか？

気象衛星による全球可視画像 (図1) を見ながら、宇宙から見た地球を想像してみましょう。地球は漆黒の宇宙を背景に、太陽に照らされて輝いています (左側の可視画像)。この明るく輝く半球は、太陽光のエネルギーを受けて加熱されています。しかし、地球の温度は1年を通じて平均すればほぼ一定ですから、吸収量と同量のエネルギーが失われ、収支がバランスしているはずですが。実は、地球から宇宙空間へ失われるエネルギーは目に見えない赤外線で射出されている (地球放射) ため私たちは気付かないのです。それを可視化してくれるのが気象衛星の赤外面像 (図右) で、画像で白く見える領域ほど温度が低く射出エネルギーが小さいことを表します。

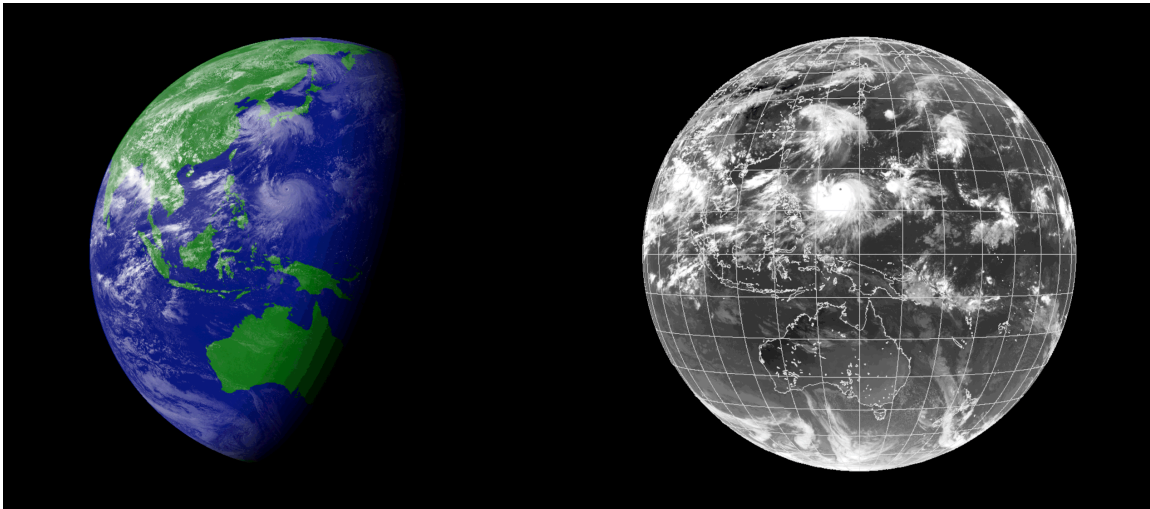


図 1: 2014 年 8 月 2 日 17 時の気象衛星画像。(左)可視,(右)赤外。気象庁ホームページより

衛星画像に白く写っていることは、雲が放射エネルギー収支に影響を与えている証拠です。なぜなら、可視画像で白く見える雲は太陽放射を反射して地球の加熱を妨げている事を、赤外画像で低温域と表示される雲は地球放射を減少させて保温効果をもつ事を意味するからです。雲はこのように相反する効果を持ちますが、両者の優劣は雲の種類などによって異なる複雑な問題です。

こうして、地球大気中に雲が形成される事により地球の放射収支が変化し、それに応じて地表付近の気温も変化することになりますが、地球大気にはこれとは別の目に見えない効果があります。それは、水蒸気・二酸化炭素・メタンなどの大気微量成分が、太陽光をよく透過する一方で、赤外線を効率的に吸収する性質をもつことによる効果で、これを温室効果といいます。

### 3. 温室効果とは何か？

気象衛星による赤外画像は、特定の波長で観測した赤外線の強度の空間分布でしたが、次に、宇宙空間へ射出される赤外線の強度が波長によってどのように分布するか（これをスペクトルといいます）を調べてみましょう。図 2 実線は、サハラ砂漠上空を飛行中の人工衛星で観測された地球放射のスペクトルで、いくつかの代表的温度をもつ理想化された物体（黒体）の放射スペクトルが破線で重ね書きされています。まず、「大気の窓」と書込まれた波長帯（10～13  $\mu\text{m}$  付近）を見ると、地球放射の強度は 320 K と記された放射スペクトルとよく似ています。絶対温度 320 K は 47°C に相当しますが、この波長帯では高温の砂漠表面から射出された赤外線がそのまま宇宙空間に到達していることが分かります。

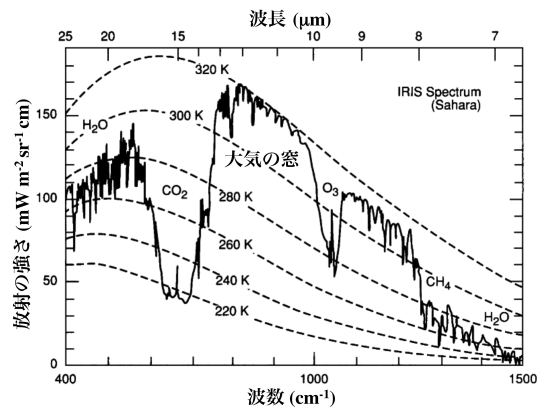


図 2: 衛星で観測された地球放射のスペクトル (Hanel et al., 1972 改変)

一方、そのすぐ左の  $15 \mu\text{m}$  付近では実線が大きく凹んでいます。これは、大気中の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) 分子が砂漠表面から射出された赤外放射を吸収し、エネルギーが宇宙空間へ逃げるのを妨げているためです。同様に、波長  $9.6 \mu\text{m}$  付近の凹みはオゾン ( $\text{O}_3$ )、波長  $18 \mu\text{m}$  より長波長側や  $8 \mu\text{m}$  より短波長側の凹みは水蒸気 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) による放射吸収により生じています。このように、大気は地球放射に対して透明ではなく、一部を吸収するという性質があります。

こうして吸収されたエネルギーは気温を上げるように作用することになりますが、大気には、吸収したエネルギーを失う過程も存在します。それは大気自身による赤外線の放射です。ここで重要な事は、大気からの赤外放射が宇宙空間へ向けて射出されるだけでなく、地球表面へと下向きにも射出されることです。赤外線は目に見えないため、我々は地表面と大気との間の膨大なエネルギー交換を実感する事ができませんが、実は、地表面を暖めるエネルギーは、大気から下向きに放射される赤外放射の方が太陽放射よりずっと大きいのです。太陽が沈んで夜になってもある程度の温度が維持されている理由の一つは、大気からの下向き赤外放射にあるのです。

#### 4. 地球温暖化は人間活動の影響なのか？

かつて、大自然は人間の力ではどうにもならない圧倒的な存在として恐れられ、また、敬われる存在でした。現代でも、猛烈な吹雪に道を閉ざされて倒れ、あるいは、大雨で増水した川に流されて命を落とすことは決して稀ではありません。また、台風の進路予報の信頼性は向上してきましたが、台風を弱めたりその上陸を防いだりするような手だてはありません。自然は、依然として人間が自由に操る事のできるような存在ではありません。その一方で、肥大化する人間活動によって環境中に蓄積された様々な廃棄物が、地球規模で人間の生活を脅かすにまで至っています。その最初の例と言ってよい南極オゾンホールが発見は、今から 30 年も前に遡ります。

大気中の二酸化炭素濃度が上昇しつつあることと、それが炭素の燃焼による酸素消費を伴っている事は観測事実として確立しています (図 3)。また、その大気中への蓄積が温室効果を強化し、

地表面温度を上昇させる方向に働く事も間違いありません。さらに、地球全体で平均した地表面付近の温度が近年上昇していることもほとんど間違いありません。

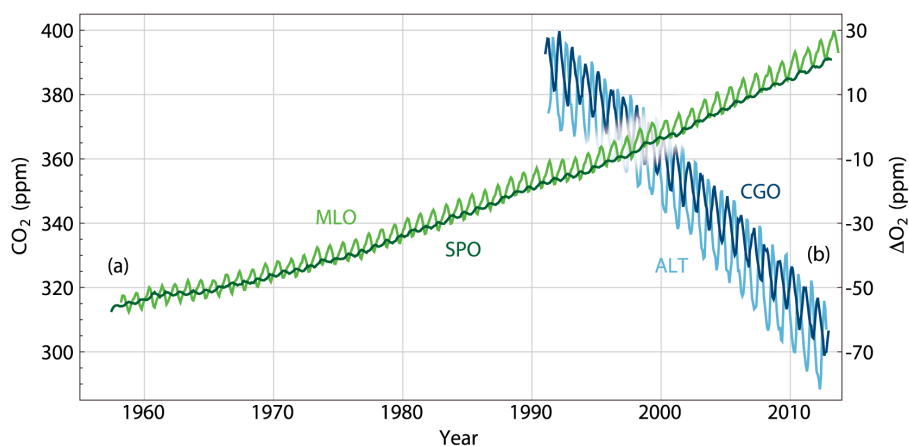


図 3: ハワイ (MLO) と南極点 (SPO) で観測された二酸化炭素混合比 (緑線) と北半球 (Alert; ALT) と南半球 (Cape Grim; CGO) で観測された酸素混合比の偏差 (青線) の時系列 (ppmv)。IPCC (2013) による

しかし、地球の気候を決める過程は多岐に富み互いに相互作用している（これを気候システムと呼びます）ために、気候変動を引き起こすメカニズムは極めて複雑です。また、人間活動とは無関係の自然変動も存在するため、観測された温暖化と人間活動との因果関係を科学的に確立するのは容易ではありません。私たちが全ての事を理解している訳ではありませんが、何をすべきかは明白です。それは、過去と現代の気候変動について調べ、得られた知見に基づいて気候変動に対する理解を深化させ、気候モデルの精緻化により、予測の不確実性を減らしてゆく事です。

観測は必然的に誤差を伴い、どんなに高速・大容量のスーパーコンピュータを導入しても、陽に扱う事のできない物理化学過程は残ります。大切な事は、気候変動予測のシミュレーションの限界を見極めることです。そうした努力の一端を図4に紹介します。黒線は観測された全球平均気温の変動で、赤線・青線は世界各国の気候モデルによる再現実験の結果を表します。ここで、(a)は人為起源と自然起源の変動を全て考慮した結果で、モデルは観測された変動を概ね再現している事が分かります。一方、人間活動による温室効果ガス排出等を含まない計算結果 (b) は近年の温暖化を再現できず、人為起源の変動のみによって計算した結果 (c) は温暖化を過大評価している事が分かります。この結果は、現代の気候モデルが過去の気候変動を再現する能力を有することと近年の温暖化が人間活動によって引き起こされた事を示唆する証拠と解釈できます。

## 5. おわりに

当日は、上記の内容に加え、よくある誤解についての解説等も予定しています。問題はたいへん複雑ですが、一緒に考えてゆきましょう。

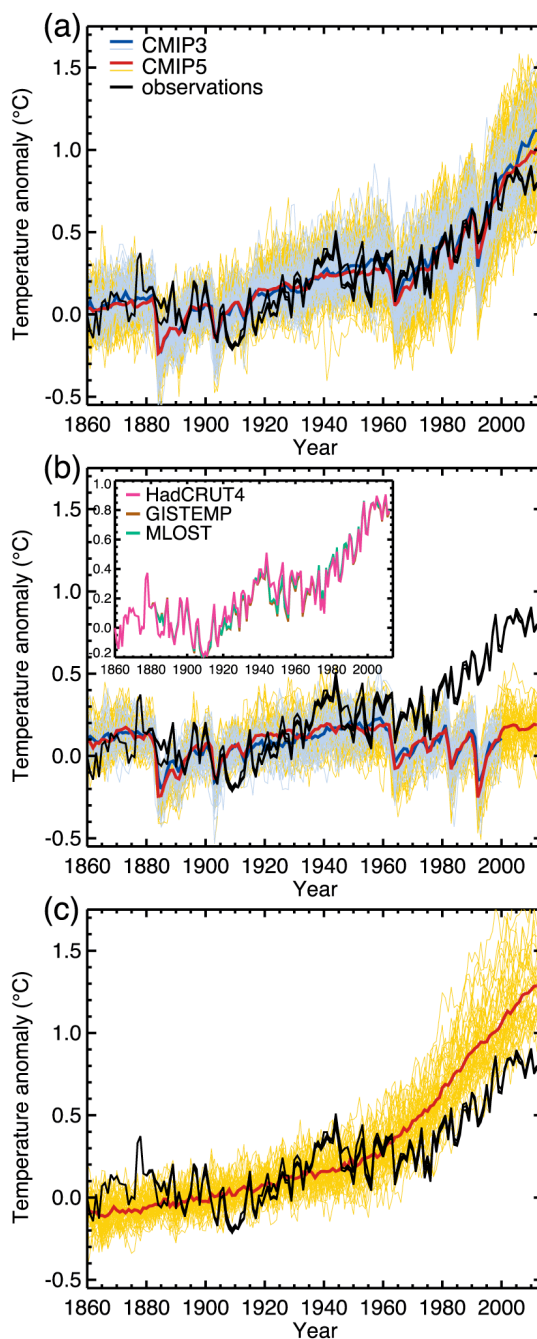


図 4: 観測された温度変動(黒線)の気候モデルによる再現実験。(a) 全ての要因を考慮した結果、(b) 人為起源の要因を含まない結果、(c) 人為起源の要因のみを含む結果 (IPCC, 2013)