

## 人間活動に伴う地球温暖化

北海道大学工学部衛生工学科 太田幸雄

近年、人間活動に伴い、大気中の二酸化炭素濃度が急増し、その結果地球の温暖化を引き起こすことが指摘され、世界的な問題となってきた。本稿では、二酸化炭素濃度の増加に伴い地表気温が上昇する機構、すなわち温室効果について説明し、さらにフロンガス等、二酸化炭素以外の気体による地球温暖化についても述べる。

### 1. 温室効果

地球は太陽放射（日射）を吸収して暖められ、一方地球自身も絶えず赤外放射（地球放射）を射出することにより冷却されて、一定の温度を保っている。このように、両者が釣り合った状態にあることを放射平衡の状態と言い、この時の温度を放射平衡温度という。

今、仮に地球に大気が全く存在しないものとして、この放射平衡温度  $T_e$  を求めてみる。図1に示すように地球の半径を  $R$  とし、太陽放射の入射方向に垂直な単位面積あたりに入射する太陽放射量（これを太陽定数と呼ぶ）を  $S_0$ 、太陽放射に対する地球の反射率（これをアルベドと呼ぶ）を  $A$  とすると、毎秒あたり地球全体が受け取る太陽放射量は地球の断面積が  $\pi R^2$  であるから、

$$S_0(1-A)\pi R^2, \quad (1)$$

一方、地球が黒体放射をしていると仮定すると、地球の表面積は  $4\pi R^2$  であり、 $\sigma$  を stefan 定数とすると、温度  $T_e$  の黒体の単位面積あたりの放射量は  $\sigma T_e^4$  であるから、地球全体の毎秒あたりの放射量は

$$4\pi R^2\sigma T_e^4 \quad (2)$$

放射平衡状態においては、両者は等しいから

$$S_0(1-A)\pi R^2 = 4\pi R^2\sigma T_e^4 \quad (3)$$

が成り立つ。地球のアルベド  $A$  はほぼ 0.30 であり、太陽定数  $S_0 = 1.96 \text{ cal} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  を代入すると(3)式より  $T_e = 255 \text{ K}$  が得られる。実際の地球表面の温度は  $T_0 = 288 \text{ K}$  であり、この計算結果により  $33^\circ$  高温となっている。これこそ、後述するように、地球大気が温室効果を持っているためである。

図2に、太陽放射及び放射平衡温度  $T_e = 255 \text{ K}$  における地球放射のエネルギーの波長分布を示す。このように、太陽放射及び地球放射は波長  $4 \mu\text{m}$  を境にして、より短波長側とより長波長側とに明確に二分されて

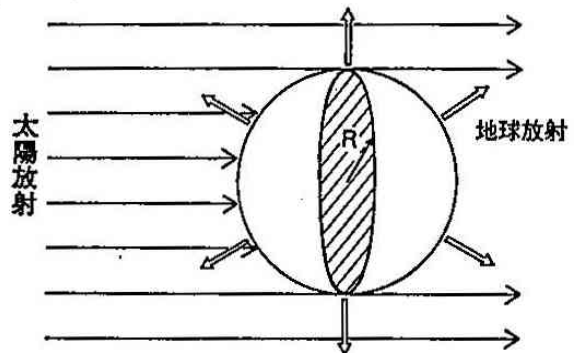


図1 断面積  $\pi R^2$  の地球（半径  $R$ ）に入射する太陽放射と、表面積  $4\pi R^2$  の地球表面から射出される地球放射（赤外放射）。

いる。この意味でまた、太陽放射を短波放射、地球放射を長波放射と呼ぶ。

さて次に、図3に示すように、大気のない地球上を、太陽放射に対しては透明であり、一方赤外放射は完

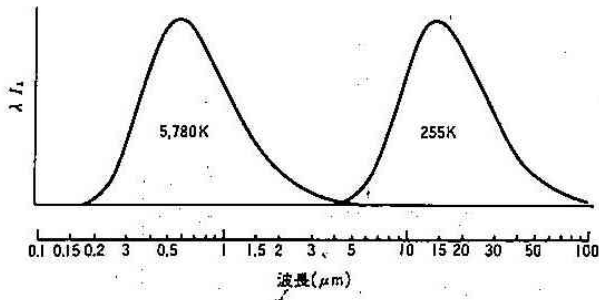


図2 太陽放射(黒体温度 5780 K; 左図)と地球放射(黒体温度 255 K; 右図)の波長別エネルギー分布曲線。地球上に大気がないと仮定した時の、地球の放射平衡温度は 255 K となる。

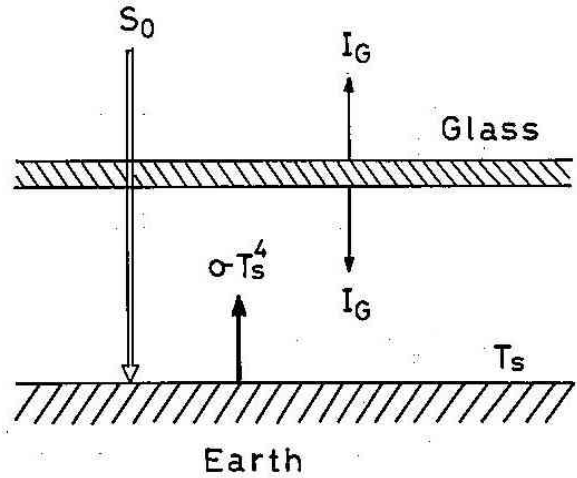


図3 大気のない地球表面上を、ガラス板で覆った場合の各放射項。 $S_0$ : 太陽放射、 $\sigma T_s^4$ : 温度  $T_s$  (K) の地球表面からの黒体放射、 $I_G$ : ガラス板からの赤外放射(再放射)。

全に吸収するような物質、例えばガラス板で覆ったとする。この場合、太陽放射により地球に与えられる熱量は、ガラス板が完全に太陽放射を透過させるため、

(1)式と同様に  $S_0(1-A)\pi R^2$  で与えられる。しかし、 $4\mu\text{m}$  以上の長波長領域(赤外領域)ではガラス板が地球放射を吸収し、自分自身が暖まって、宇宙空間及び地球表面へ  $I_G$  という強さの放射を射出する( $I_G$  を再放射又は逆放射と呼ぶ)。このため、地球表面は、ガラスが存在することにより  $4\pi R^2 I_G$  だけよけいに放射エネルギーを獲得する。

以上のことから、ガラス板が存在する場合、地球表面の放射平衡関係は、地表面温度を  $T_s$  とすると、

$$S_0(1-A)\pi R^2 + 4\pi R^2 I_G = 4\pi R^2 \sigma T_s^4 \tag{4}$$

となり、(3)式と(4)式との比較から、 $T_s$  は  $T_e$  よりも高温となること、すなわち、ガラス板のような赤外吸収物質が地球上に存在した場合には、地表面温度はより高温となることがわかる。これがいわゆる温室効果である。

なお、実際の温室において、室内の温度が上昇するのは、主として、温室が完全に密閉された部屋となっていて、外部との乱流による熱の交換(顕熱輸送)及び蒸発による熱の交換(潜熱輸送)が妨げられるためであり、ガラス板による再放射の寄与は非常に小さいことが近年明らかにされている。その意味では、地球表面に赤外吸収物質層が存在することによる温度上昇効果は、正しくは、ブランケット(掩蔽)効果とでも呼ぶべきものであるが、すでに温室効果として広まっていることから、本稿でも温室効果と呼ぶこととする。

ところで、上述したように、大気のない場合の地球表面の放射平衡温度  $T_e$  が 255 K であるのに対し、実際の地球上の平均地表面温度  $T_0$  は 288 K であり、 $33^\circ\text{C}$  もの高温となっている。これは、大気もまたガラス板と似たような温室効果を持っているためである。地球大気の波長  $0.1\mu\text{m}$  から  $30\mu\text{m}$  までの領域における吸収率を図4に示す。吸収率が小さい程透明であることを意味する。この図に示されているように、地球大気は波長  $0.3\sim 0.8\mu\text{m}$  の可視領域の光に対してはほぼ完全に透明であり、波長  $0.8\sim 4.0\mu\text{m}$  の近赤外領域の光に対してもかなり透明である。しかし、波長  $4\mu\text{m}$  以上の赤外領域においては透明ではない。

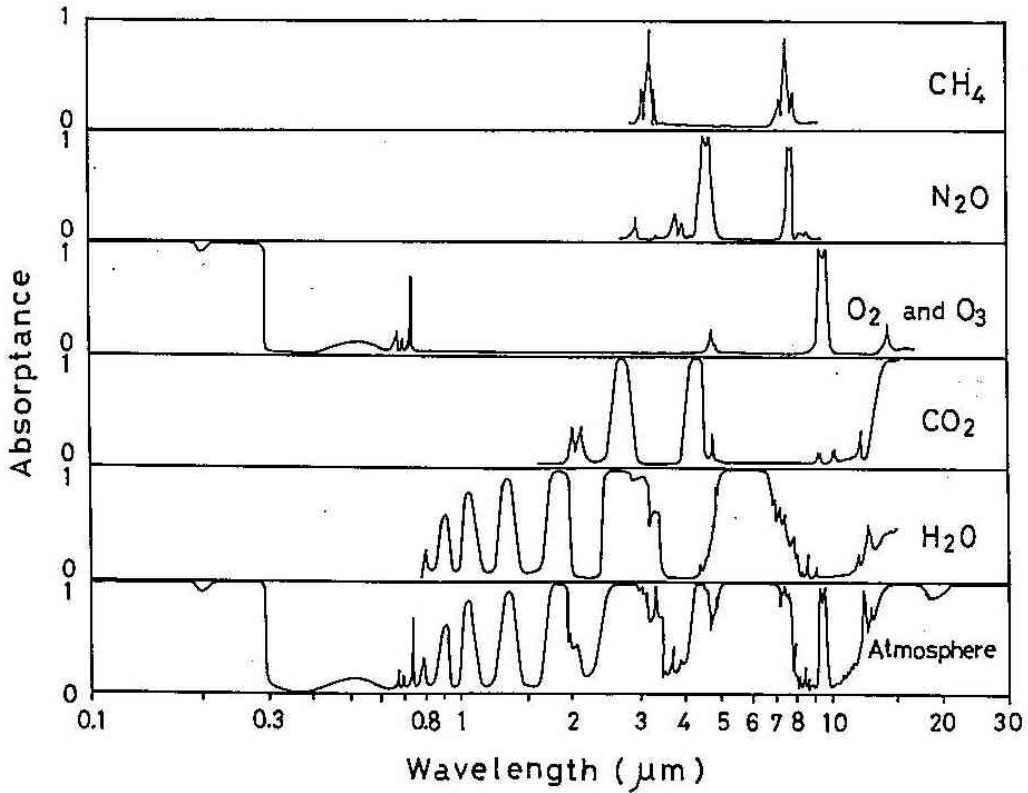


図4 地球大気 (Atmosphere) 及び大気中の各成分気体の波長別吸収率。

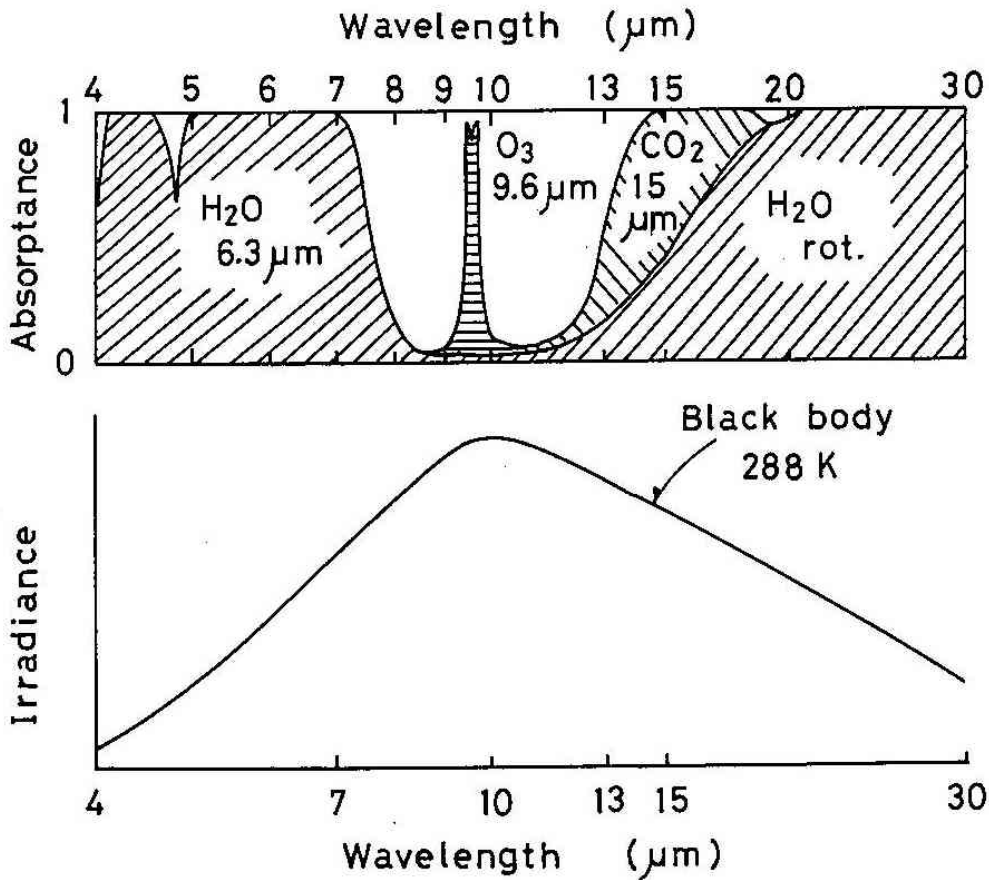


図5 地球大気の赤外領域での吸収率と、288 Kの黒体放射 (地球放射)。  
 H<sub>2</sub>O 6.3 μm: 水蒸気の6.3 μm吸収帯 H<sub>2</sub>O rot: 水蒸気の回転吸収帯  
 CO<sub>2</sub> 15 μm: 二酸化炭素の15 μm吸収帯 O<sub>3</sub> 9.6 μm: オゾンの9.6 μm吸収帯

図5に、波長4～30  $\mu\text{m}$ の赤外領域における地球大気の吸収率と、地球を黒体とみなした場合の288 Kにおける黒体放射エネルギーの波長分布を示す。波長4～8  $\mu\text{m}$ の水蒸気の6.3  $\mu\text{m}$ 帯、波長13  $\mu\text{m}$ 以上の水蒸気回転帯及び波長13～18  $\mu\text{m}$ の $\text{CO}_2$  15  $\mu\text{m}$ 帯により、波長が4～7  $\mu\text{m}$ の間の領域、及び波長が13  $\mu\text{m}$ より長波長の領域の赤外放射（地球表面より射出された地球放射）は、地球大気で吸収される。地球大気はこれらの領域の赤外放射を吸収して暖められ、地表面への再放射を行なう。つまり地球大気も温室効果を持っている。大気のない場合の地球の放射平衡温度255 Kに比べ、実際の地球の平均地上気温が33 Kも高温なのは、このためである。

ところで、赤外領域の7～13  $\mu\text{m}$ の波長範囲では、オゾンの9.6  $\mu\text{m}$ 帯を除けば大気はかなり透明であり、この領域を大気の窓領域と呼ぶ。地表付近からの赤外放射は、この窓領域では、ほとんど地球大気に吸収されることなく、直接、宇宙空間に放出されて行く。すなわち、大気の窓領域においては、地球放射はほとんど大気により再放射されることがなく、温室効果は生じない。

しかし、二酸化炭素は13～18  $\mu\text{m}$ に強い吸収帯（ $\text{CO}_2$  15  $\mu\text{m}$ 帯）を持っており、この吸収帯は二酸化炭素の濃度が増加すれば13  $\mu\text{m}$ 以下の波長域まで広がって、大気の窓領域を狭めることになる。それ故、二酸化炭素の濃度が増加すれば、地表からの赤外放射（地球放射）はより多く大気に吸収され、また従って、より多く地表へ再放射されることになり、温室効果が強まって、地表気温の上昇をもたらすことになる。これが、二酸化炭素の濃度の増加に伴う温室効果の強化、及びそれに伴う地球の温暖化の基本的な機構である。

なお、これはまた、水蒸気についても同様である。図4に示された波長4～8  $\mu\text{m}$ の水蒸気の6.3  $\mu\text{m}$ 帯及び波長13  $\mu\text{m}$ 以上の水蒸気回転帯の両吸収帯は、水蒸気の濃度が増加すれば、より広がって、大気の窓領域を狭め、温室効果を強めて地表気温を上昇させる。

この水蒸気濃度の増加に伴う温室効果の促進、地表気温の上昇効果は、また、気候変動における正のフィードバック効果を与えるものとして重要である。すなわち、水の飽和蒸気圧は温度の上昇とともに増加するため、地表気温（海面温度）が上昇すると海水及び陸水からの蒸発量が増加し、大気中の水蒸量が増加する。この水蒸気濃度の増加に伴い、温室効果が促進され、地表気温はなお一層上昇する。

## 2. 温室効果気体の増加に伴う地球温暖化

以上述べたように、大気中の二酸化炭素濃度の増加に伴い地表気温が上昇することは疑いのない事実であり、これまで、Manabe and Wetherald (1967) を始めとして、大気中の二酸化炭素濃度の増加に伴う地表気温の上昇量について数多くの予測計算が行なわれてきた。その結果、気候モデルの違いにより研究者間で差はあるものの、これまでのところでは、大気中の二酸化炭素濃度が2倍に増加したとすると、全球平均の地表気温は、フィードバック効果を考慮しない場合は、1.26 K、種々のフィードバックを考慮した場合は、 $3.0 \pm 1.5$  K 上昇すると考えられている。

なお、この地表気温の上昇は、緯度別に見た場合には高緯度ほど著しく、例えば Manabe and Wetherald (1980) のモデル計算では、二酸化炭素濃度を2倍にした場合に、緯度10～20°の低緯度では2℃前後の上昇に対し、緯度50°で4℃、緯度80°では7.5℃にも達する上昇を示している。

ところで、大気中には、二酸化炭素及び水蒸気以外にも、種々の微量気体成分が混在している。前節で述

べたように、もし、これらの気体成分の中で、波長 $0.3\sim 4.0\mu\text{m}$ の太陽放射領域ではほぼ透明であり、一方、赤外領域の波長 $7\sim 13\mu\text{m}$ の大気の窓領域において強い吸収を持つ気体成分が、ある程度以上の濃度で存在するならば、二酸化炭素や水蒸気と同様に温室効果を持ち、濃度の増加に伴い地表気温を上昇させるはずである。このような効果(能力)を持つ気体成分を、二酸化炭素及び水蒸気をも含めて、「温室効果気体」と呼ぶ。

1970年代には、温室効果気体として二酸化炭素及び水蒸気のみが考慮され、その増加に伴う気候変動が議論されてきた。しかし、1980年以降、大気放射過程の計算が精密化され、また各種気体成分の赤外吸収特性が明らかにされるにつれて、二酸化炭素以外の温室効果気体の地球温暖化に及ぼす影響が予想外に大きいことが推察され、注目されることとなった。

この二酸化炭素以外の温室効果気体としてまず挙げられるのは、メタン( $\text{CH}_4$ )及び一酸化二窒素(又は亜酸化窒素とも言う)( $\text{N}_2\text{O}$ )である。図4に示すように、メタン及び一酸化二窒素は、大気の窓領域の短波長側にあたる波長 $7\sim 8\mu\text{m}$ に強い吸収帯を持っており、濃度の増加に伴い、地表気温を上昇させる可能性がある。最近のメタンの大気中濃度は $1.7\text{ppm}$ (メタン $1\text{ppm}$ は $1\text{m}^3$ の空气中に $100$ 万分の $1\text{m}^3$ のメタンが含まれていることを意味する： $1\text{ppm}=10^{-6}\text{m}^3/\text{m}^3$ )であり、年に $1\sim 2\%$ の増加率を示している。また一酸化二窒素も大気中に $0.3\text{ppm}$ の濃度で存在し、やはり年に $0.3\%$ の割合で増加している(Wang et al., 1986)。

メタンは、主として土壤中において微生物(メタン発生細菌)によって生成され、大気中に放出される。特に水田、沼沢地等の湿地帯において多量に生成されている。また、哺乳動物の腸内にはメタン発生細菌が生息しており、牧場地域や畜舎からも多量に発生している。なお、シロアリの消化管中にもメタン発生菌が生息しており、そこで生じて大気中に放出されるメタンの量が全地球表面を考えるとかなりの量に上るといふ報告もある。さらに、樹木、柴、草本類等の燃焼(これをバイオマス燃焼と呼ぶ)によっても多量に生成されている。

最近の大気中のメタン濃度が増加している原因としては、世界的な人口の増加に伴い、水田面積が非常に勢いで増えていること、家畜数が増加していること、及び特に熱帯地域において焼畑農業や炊事における薪や柴の使用等バイオマス燃焼量が増加していること等が挙げられている。

一方、一酸化二窒素( $\text{N}_2\text{O}$ )もまた主として土壤中において微生物活動により生成されている。すなわち、土壤中においてバクテリアにより、アンモニア( $\text{NH}_3$ )が硝酸塩( $\text{NO}_3^-$ )に酸化される過程(これを硝化作用と呼ぶ)において多量に生産され、大気中に放出される。また同様に土壤中においてバクテリアにより、硝酸塩( $\text{NO}_3^-$ )から窒素( $\text{N}_2$ )に変換される(これを脱窒作用と呼ぶ)時にも、その一部が $\text{N}_2\text{O}$ となり、大気中に放出される。さらに一酸化二窒素は、化石燃料の燃焼によっても生成される。

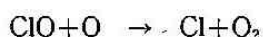
最近の大気中の一酸化二窒素の濃度の増加は、主として化石燃料の使用量の増加によるものと思われるが、さらに、農耕地が拡大し、硝酸アンモニウム(硝安)等の窒素農業肥料が多量に施肥され、土壤中の硝酸塩の量が増加して脱窒作用により大気中に放出される一酸化二窒素の量が増加していることも、その一因と考えられている。

次に、フロンガスもまた、強い温室効果を示す問題の成分である。なお「フロンガス」とは日本の産業界で名付けた呼称であり、正式には「クロロフルオロカーボン類(CFCs)」と言う。メタン( $\text{CH}_4$ )やエタン( $\text{C}_2\text{H}_6$ )等のアルカン類炭化水素の水素が塩素及びフッ素に置き換えられたものである。代表的なものとして、フロ

ン 11 (CCl<sub>3</sub>F)、フロン 12 (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)、フロン 113 (C<sub>2</sub>F<sub>3</sub>Cl<sub>3</sub>) 等が挙げられる。なお、アルカン類炭化水素が塩素、フッ素の他にさらに臭素によっても置き換えられているものを「ハロン」と呼ぶ。代表的なものとして、ハロン 1211 (CF<sub>2</sub>BrCl)、ハロン 1301 (CF<sub>3</sub>Br) 等がある。

フロンガスは、化学的に安定であること、不燃性、冷媒として優れていること、毒性がほとんどないこと、油に対する溶解性が高いことなどから、半導体の基板やフィルム及び精密部品の洗浄剤、冷蔵庫やクーラーの冷媒、ウレタンフォームや発泡スチロールを製造する際の発泡剤、ヘアスプレーや脱臭剤等の噴射剤等、様々の分野で多量に使用されている。

フロンガスは波長 0.24 μm (240 nm) 以下の紫外線を受けると分解 (光分解) して、塩素を放出する。一方、オゾンもまた波長が 0.3 μm (300 nm) 以下の紫外線を強く吸収し、このオゾンが成層圏に非常に高濃度に存在する (これを成層圏オゾン層と呼ぶ) ため、波長 0.3 μm 以下の紫外線は地表には到達せず、フロンガスは大気下層 (対流圏) では破壊されることなく、安定に存在している。しかしながら、対流圏内に蓄積されたフロンガスはやがて成層圏にまで輸送され、オゾン層による紫外線の遮蔽が及ばない高さにまで運ばれると、太陽紫外線により光分解して塩素を放出する。この放出された塩素 (Cl) は、



の反応で、正味、オゾン (O<sub>3</sub>) と酸素原子 (O) を酸素分子 (O<sub>2</sub>) に変換し、自分自身は再び Cl に戻ることにより、オゾンを経続的に破壊して行く。これがフロンガスによる成層圏オゾン層の破壊のメカニズムである。

成層圏オゾン層が破壊されると、生物にとって有害な波長 0.28~0.32 μm の領域の紫外線 (これを UV-B と呼ぶ) の地上への透過量 (照射量) が増加するため、皮膚ガンの増加や作物収量の低下が予想され、現在非常に重大な環境問題となってきている。

このようにフロンガスは、最初は成層圏オゾン層の破壊という観点からのみ問題とされた。しかしながら、1980 年以降、フロンガスの赤外吸収特性が明らかになるにつれて、地球温暖化に対してフロンガスもまた相当な寄与を及ぼすことが明らかになってきた。すなわち、フロンガスは、波長 7~13 μm の大気の窓領域に非常に強い吸収帯を持っており、モデル計算では、フロン 12 の大気中の濃度が 0 から 1 ppb (=10<sup>-9</sup> m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) になると地表平均気温は 0.17℃ 上昇する。一方、二酸化炭素は 300 ppm (=30 万 ppb) の濃度が 2 倍に増加した場合、2.0℃ 程度の地表気温の上昇となるので、一分子あたりの温室効果は約 2 万倍も大きいことになる。

1988 年時点での北半球中緯度におけるフロンガスの大気中濃度は、フロン 11 が 0.247 ppb、フロン 12 が 0.457 ppb であるが、それぞれ年に 4~5% ずつ増加しており、また半導体部品等の洗浄剤としてその使用が最近急激に増加しているフロン 113 は、大気中濃度が 0.06 ppb であるが、年に 10~20% の増加率を示している (富永、1989)。

以上の様に、このままフロンガスの使用及び大気中への放出を続けるならば、近い将来、成層圏オゾン層の破壊及び温室効果による地球の急激な温暖化という二重の破局を招きかねないことから、最近、フロンガスの製造抑制及び将来の製造禁止、現在使用しているフロンガスの回収及び再使用等の措置がとられつつあり、さらに、地表付近 (対流圏内) での太陽光で、すなわち波長 0.3 μm 以上の太陽光で容易に光分解し、しかも毒性の少ない代替フロンの開発が非常な勢いで行なわれている。

上に述べたように、オゾンは波長 0.3 μm 以下に強い吸収帯を持ち、さらに波長 0.4~0.7 μm にも弱い吸

収帯を持っていて、太陽放射をかなり吸収する。気温の高度分布が高度 50 Km で極大となるいわゆる成層圏界面が生じるのは、成層圏オゾン層によるこの太陽放射の吸収による昇温のためである。一方、また、図 4 に示したように、オゾンは赤外領域の波長  $9.6 \mu\text{m}$  にも強い吸収帯 ( $\text{O}_3$   $9.6 \mu\text{m}$  帯) を持ち、それ故、温室効果を持つ。

このように、オゾンは、温室効果気体ではあるが、さらに、強い太陽放射吸収気体でもあること、及び地上 20~25 Km 付近に極大値を持つような濃度分布をしていること等のために、他の温室効果気体とは異なり、オゾン全量が増加しても、増加量に比例して地表気温が上昇するとは限らず、複雑な効果を及ぼす。すなわち、成層圏のオゾン濃度がフロンガス等との反応により減少した場合、地表気温に及ぼす効果は、赤外領域においては、温室効果が弱まるために地表気温を低下させる方向に働くが、一方、太陽放射領域については、オゾンにより吸収量が減るために、より多量の太陽放射が地球表面まで到達できることになり、地表面の受け取る太陽放射量が増加し、地表面温度を上昇させる方向に作用することになる。この結果、両方の作用が打ち消し合って、地表気温はほとんど影響を受けないことになる。一方、対流圏オゾン量の変化に対しては、赤外領域での温室効果は、やはり対流圏オゾン濃度の増加に対しては地表気温を上昇させる方向、対流圏オゾン濃度の減少に対しては地表気温を低下させる方向に働くが、太陽放射領域での効果は、成層圏オゾン量の変化の際の効果とは逆に、赤外領域での温室効果と同じ方向に働く。すなわち、対流圏オゾン濃度が増加した場合、オゾンによる太陽放射吸収は地表気温を上昇させる方向に働く。これは、対流圏内のオゾンにより吸収された太陽放射が直接気層を加熱し昇温させる効果の方が、地表面に到達する太陽放射量の減少により下層大気が地表面から加熱されて昇温する量が減少する効果よりも、大きいからである。

このように、オゾン濃度の変化が地表気温に及ぼす効果は、どの高さにおけるオゾン濃度が増加するかによって依存しており、図 6 に示すように、オゾン濃度の増加は、正味、地表面温度を上昇させる方向に作用するが、特に高度 5~15 Km の対流圏上層及び成層圏最下層のオゾン濃度が増加した場合に最も効果的に地表気温を上昇させることが分る (Wang et al., 1980)。

今後、燃料の燃焼や農耕等の人間活動が益々活発となり、それに伴って、大気中に放出される一酸化窒素 ( $\text{NO}$ ) 及び二酸化窒素 ( $\text{NO}_2$ ) の量が増加することが予想されるが、対流圏内における  $\text{NO}$  及び  $\text{NO}_2$  濃度の増加はオゾンを増加させる方向に作用するため、対流圏オゾン濃度も今後増加し、地球温暖化を益々促進する

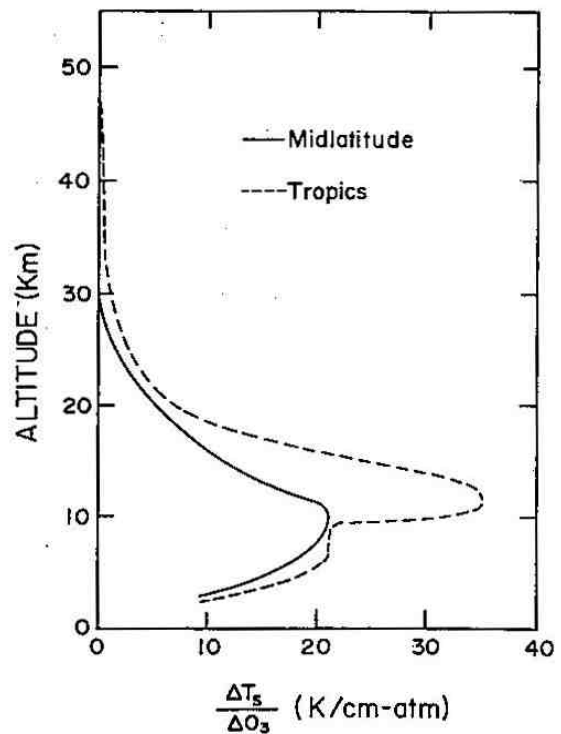


図 6 中緯度 (—) 又は熱帯 (……) の大気を想定した場合に各高度においてオゾン量が 1 cm-atm 変化した時の、地球平均地上気温  $T_s$  の変化量 (Wang et al., 1980)。1 cm-atm とは 1 気圧、 $0^\circ\text{C}$  の下で 1 cm の厚さになる気柱内の気体濃度のことである。

ことになるのではないかとと思われる。

以上のように、二酸化炭素以外に、メタン、一酸化二窒素、フロンガス及び対流圏オゾンと下部成層圏オゾンもまた温室効果気体として地球の温暖化に大きな影響を及ぼす恐れのあることが明らかになってきた。そこで、1980年時点における各種温室効果気体の濃度及び増加率と、1980年以降50年間の人間活動の活発化に伴う各種気体の発生量、消滅量の変化を考慮して、2030年における各種温室効果気体の濃度を求め、1980年から50年後の各温室効果気体の増加による地上気温の上昇量を計算したものが図7である(Ramathan et al., 1985)。ただしここでは、フィードバック効果は考慮されていない。この結果から、すべての温室効果気体の増加による50年後の地上気温上昇量は1.54 Kであり、二酸化炭素のみの増加による気温上昇量は0.71 Kであること、すなわち、50年後には二酸化炭素以外の温室効果気体による気温上昇量が0.83 Kとなり、二酸化炭素のみにによる地上気温上昇量を上まわることになることが予想される。

以上の事から、今後、二酸化炭素はもちろんのこと、さらに、メタン、一酸化二窒素、フロンガス、対流圏オゾン及び成層圏オゾンの地球規模での濃度の測定、監視を行って行くこと、各温室効果気体の発生源からの発生量を明らかにすること、将来の発生量の予測評価を行なうこと、さらには、メタン、一酸化二窒素、オゾン及びNOx(NO及びNO<sub>2</sub>)等を含む系における反応及び反応速度を明らかにして行くこと等が重要な課題となってくるものと思われる。

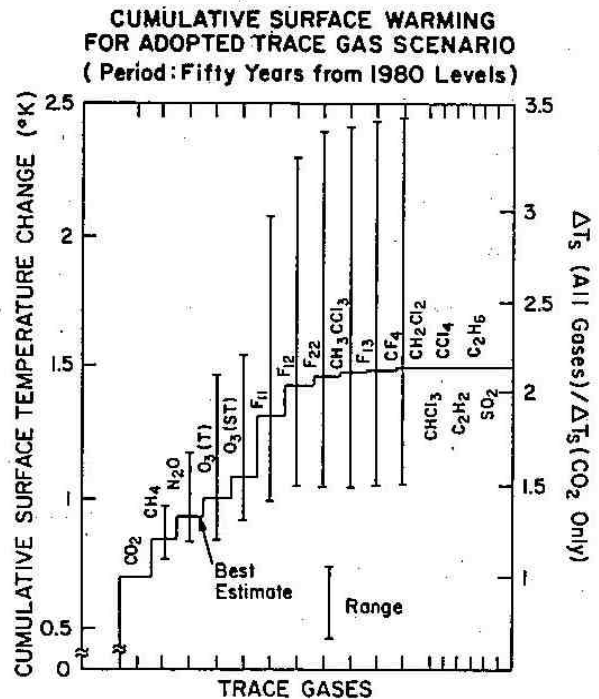


図7 1980年から50年後(2030年)の、各温室効果気体の増加に伴う地球平均地上気温の上昇量(左側縦軸)。右側縦軸は、二酸化炭素のみの増加による昇温量を1とした時の、各温室効果気体の増加に伴う地上気温の上昇割合(Ramathan et al., 1985)。

- O<sub>3</sub>(T) : 対流圏オゾン
- O<sub>3</sub>(ST) : 成層圏オゾン
- F<sub>11</sub> : フロン 11、F<sub>12</sub> : フロン 12
- F<sub>13</sub> : フロン 13、F<sub>22</sub> : フロン 22。



参 考 文 献

- Manabe, S. and R. T. Weatherald, 1967 : Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.*, **24**, 241–259.
- Manabe, S. and R. T. Weatherald, 1980 : On the distribution of climate change resulting from an increase in CO<sub>2</sub> content of the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 99–118.
- Ramanathan, V., R. J. Cicerone, H. B. Singh and J. T. Kiehl, 1985 : Trace gas trends and their potential role in climate change. *J. Geophys. Res.*, **90**, D3, 5547–5566.
- 富永 健、1989 : III-4、着実に増えるフロンガス濃度 (105 頁)、『オゾン層を守る』(環境庁「オゾン層保護検討会」編、全 224 頁)、NHK ブックス、NO. 574.
- Wang, W-C., D. J. Wuebbles, W. M. Washington, R. G. Isaacs and G. Molnar, 1986 : Trace gases and other potential perturbations to global climate. *Rev. Geophys.*, **24**, 110–140.
- Wang, W-C., J. Pinto and Y. L. Yung, 1980 : Climatic effects due to halogenated compounds in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 333–338.