■資料■特集 光環境の基本要素である光について今改めて考える
次に大気ができた

光環境としての赤外放射

Then, the atmosphere was formed—infrared radiation as a component of the optical environment

◀キーワード：赤外放射，温室効果，地球温暖化，大気の世界，大気微量成分，人工衛星

今 須 良 一
Ryoichi Imasu

1962年生，1985年名古屋大学理学部物理学科卒業，1989年同大学院中退，公資源環境技術総合研究所在，人工衛星による大気環境計測や，代替フロン等の環境影響評価等に從事，1993年理学博士。

1. 大気の世界と成分

太陽は，水素・ヘリウムを主成分とする星間雲が収縮して形成され，その回りを回転する残りの原始星雲から惑星が誕生したと考えられている。その惑星は，一次大気として原始星雲ガスを身にまとい，近傍を通過する微惑星を捕捉する効率を高めることで，惑星自身の成長に寄与した。この時，微惑星が集積することにより開放された重力エネルギーは熱に変わり，惑星全体を暖めたが，一次大気による温室効果（詳細は第2節参照）で，非常に高温（2500K以上）の環境が作り出された。その結果，固体物質の溶融が起こり，それらが重力分離することによって，地球内部にコア・マントル構造が形成されるに至ったものと考えられている。

惑星形成の初期にこのような役目を担った一次大気は，太陽からの強い太陽風により吹き飛ばされ，その後，高温の地球内部からの急激な脱ガスにより二次大気が形成されたものであることが，希ガス量や同位体元素比（ $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等）などから示されている。その時の主な成分は，水（～200気圧），二酸化炭素（～25気圧），塩酸（3気圧），二酸化硫黄（2気圧），窒素（0.4気圧）であり，その後の地球の冷却により水は凝集して高温の海を作り，その中に二酸化炭素や塩素，二酸化硫黄が溶けていくことによって，ほぼ現在のような分圧を構成するに至った。

しかし，地球の大気が金星や火星などの他の地球型惑星と大きく異なる点は，酸素が多量に存在することである。初期の二次大気中に酸素が生成される機構としては，紫外線による水の光解離による作用があるが，この作用だけでは現存酸素量の数%から多くても10%に満たない量しか生成することができない。化石などの様々な証拠が示すように，先カンブリア紀から始まった生物の光合成により地球大気中に酸素が増加し始め，カンブリア紀（約6億年前）ごろから始まる急激な生物の進化に伴って光合成による酸素生産が支配的となり，今日のように約2割を酸素が占める大気が形成されてきたものと考えられている。この過程で，生物自身が作った酸素の光分解で生成されたオゾンにより，有害な紫外線が遮断され，生物の生息域の拡大や進化に寄与した点は興味深い。また，現在の光合成による酸素生産量の5～9割が海洋植

物プランクトンによるものであることは注目すべき事である。これまでに述べた地球大気の世界については，参考文献1）等に詳しく記されている。

2. 放射による大気温度の決定

地球の大気を加熱するほとんど唯一のエネルギー源は太陽からの放射（日射）である。この日射にさらされた地球において，どのように大気，あるいは，地表面の温度が決定されるかを本節において考えてみたい。

まず，最も単純な考え方として，地球に降り注ぐ日射と同量のエネルギーを，地球自身が放射として宇宙空間に向けて射出することにより，エネルギー的に平衡になっているものとする。地球は温度の4乗に比例する形で表されるステファン・ボルツマンの法則に従うブラックスの放射を射出するものとする。この時の地球表面の平均温度は255Kとなるはずである。ところが，実際の地球表面温度の全球平均値は288Kであり，上記の仮定により求められた温度よりも30℃以上も高いことになる。この違いはどこから生じるのであろうか。

日射は5780K程の温度の黒体からの放射とほぼ同じとされ，そのスペクトルは可視域に最大値を持つ。一方，255K，あるいは288Kの物体からの放射は赤外域に中心をもつ（図1参照）。ここで重要なのは，現在の地球大気は，可視光に対してはほぼ透明であり，赤外放射に対しては，各種微量気体成分の吸収による効果で，かなり不透明であるということである。大気を透過した日射は，地表を暖め，あたかも地表に熱源があるような状況を作る。一方，地表から発せられた赤外放射は，大気により遮られ，同時に大気自身もその温度に応じた放射を上方

図1 太陽放射（日射）と地表面からの放射のスペクトル分布。

と下方の両方に向けて射出する。この2つの点が大気温度を決定する最も重要な点である。

上記の議論を、もう少し定量的に記述してみよう。ある高度における赤外放射の上向き、および、下向きフラックスをそれぞれ $F_{\uparrow}$ 、 $F_{\downarrow}$ とし、その高度の温度 T において射出される放射フラックスを $\pi B(T)$ 、また、大気の上端から計った光学的厚さを τ とする（下向きが正であることを注意）。これらを用いて、放射伝達の基本方程式を $F_{\uparrow}$ と $F_{\downarrow}$ について記述すると、

$$\frac{d F_{\uparrow}}{d \tau} = F_{\uparrow} - \pi B(T) \quad (1)$$

$$-\frac{d F_{\downarrow}}{d \tau} = F_{\downarrow} - \pi B(T) \quad (2)$$

となる。放射的に平衡状態にある大気温度の分布を求めるために、この2式を以下の条件のもとで解く。

- ・放射平衡にある（どの高度でも放射の蓄積がない）：
 $d(F_{\uparrow} - F_{\downarrow})/d\tau = 0$ (3)
- ・大気の上端で下向き赤外放射がない： $F_{\downarrow} = 0$
- ・大気の下端で上向き赤外放射が πB_g ： $F_{\uparrow} = \pi B_g$

結果は、図2に示すように、 $F_{\uparrow}$ 、 $F_{\downarrow}$ とも同じ傾きの直線となり、大気気温に対応した放射フラックスは、これらの和の1/2の量となる。このうち、直線の傾きが同じということは、地上において、地表が発する上向き放射と、上空の大気からくる下向き放射との差($F_{\uparrow} - F_{\downarrow}$)が保たれたまま大気上端から抜け出ていることに对应している。また、大気温度に対応した放射フラックスが $(F_{\uparrow} + F_{\downarrow})/2$ ということは、ある高度の大気から上向きと下向きに発せられる放射が同じ量 ((1)式, (2)式において共に $\pi B(T)$) であることに起因している。特に興味

図2 単純な大気モデルにおいて、日射による地表の加熱と赤外放射による冷却が平衡状態にある時の上向き、および、下向き赤外放射の鉛直分布。波線は大気温度に対応する放射量。

図3 現実的な大気温度の鉛直分布を仮定した時の、放射のみの効果による大気温度変化率³⁾。変化率ゼロは、放射のみによる平衡が成り立っていることを示す。

深いのは、大気の下端の温度が、地表面温度と、放射量にして $(F_{\uparrow} - F_{\downarrow})/2$ だけギャップがあることである。いずれにしても、不透明な大気が存在することと、地表に熱源がある状況において、下層ほど大気温度が高いというこのような効果を、“温室効果”と呼んでいる²⁾。

このように、日射による地表の加熱と赤外放射による大気の冷却のみを考えたモデルでは、上空ほど大気温度が低いという結果になった。しかし、実際の大気では、上空にあるオゾン層が、太陽からの紫外線と可視光を吸収することによって大気を加熱し、高度10数kmから約50 kmの間では、高度と共に気温が上昇する“成層圏”を形成している。さらに、実際の気温の鉛直分布のもとで、放射のみによる気温の変化率を計算すると、図3のように対流圏では“負”の値となる。これは、下層から運ばれた対流による熱（潜熱、顕熱）エネルギーを、赤外放射の形で大気圏外へ逃しているためであり、このことから対流圏の実際の温度分布は、“放射”と“対流”により決定されていることが分かる。一方、成層圏においては、温度変化率はほとんどゼロであり、ここでの温度分布は、“放射”のみによって決まっていることが分かる³⁾。

3. 赤外線を利用した大気環境の測定

前節までは、大気中でのエネルギー収支の観点から赤外放射の果たす役割について考えてきた。そこで本節では、大気環境を知るための情報源としての観点から赤外放射を考えてみたい。特に、大気の温室効果量や光化学反応過程を左右し、かつ、人間活動の影響が最も顕著に現れるものの一つである大気微量気体成分量に着目する。

大気中に存在する微量気体成分は、そのほとんどが赤外放射領域に強い吸収をもち、その度合は温度や気圧にも依存している。また、放射の吸収と同時に、その場の温度に対応した放射の射出を大気自身が行っているため、様々な気圧や温度の大気中を伝達してくる赤外放射は、複雑な吸収、射出の過程を経て、地上や宇宙空間に到達することになる。しかし、気体の吸収特性が良くわかっている場合には、大気中での気体濃度や温度の分布を仮定することにより、最終的に宇宙空間などに到達する放射スペクトルを求めることは比較的容易に行うことができる。図4は、このような計算により求められた放射スペクトルの一例であり、様々な気体による吸収、射出の特性を見ることができる。

宇宙から観測される大気の放射スペクトルが、光路途中の微量気体濃度や温度の影響を受けるということから、逆に、このスペクトル情報から気体濃度や気温分布を推定できないかということが考えられる。一般にこの

ようなデータ解析手法を“反転解析法”と呼び、実際の大気の観測に応用されている。図5には、人工衛星から大気を観測する場合の典型的な手法についての概念図を示す。図中には、それぞれの手法で主に利用される放射の種類と、関係する大気との相互作用が示してある。①は大気等による散乱された太陽光の吸収を利用して途中の吸収気体の濃度を求める方法である。②は太陽を光源としてその間の大気による吸収を利用する方法。③は放射の射出がほとんどない宇宙空間を背景とし、大気からの射出光を捕らえることで気体濃度を求める方法。④は、地球を背景にする方法である。ただし、最後の④の方法では、大気の温度と地球表面の温度にあまり差がないことから、地球表面からの放射の吸収だけでなく、大気自身からの射出も考慮しなければならず、上述の反転解析法が適用される。近年、地球環境問題が重要視されてくる中で、人工衛星を用いて地球環境の変化を全球的に観測しようという計画が各国において進められている。日

図4 宇宙から観測される地球大気の赤外放射スペクトルのシミュレーション結果の一例。大気状態としては米国標準大気を仮定し、地表面温度は300 Kとしてある。スペクトル分解能は 0.1cm^{-1} 。

図5 人工衛星による大気観測原理を示す概念図。それぞれの手法について、主に利用される放射の種類と、関係する大気—放射の相互作用を示してある。

本においても、1996年8月に打ち上げられる ADEOS 衛星に、通産省の開発した IMG と呼ばれるセンサーを搭載して、温室効果気体の全球分布を求めようという計画が進められている⁴⁾。ここでも、反転解析法によるデータ解析が行われることになっている。

4. 地球温暖化について

地球環境問題の中で、特に気候変化を引き起こすということで重要視されているのが地球の温暖化の問題である。これは、長年にわたる化石燃料の使用などにより、二酸化炭素のような強い温室効果を持つ物質が多量に大気中に放出されたためとされる。温室効果気体の増加が気候に及ぼす影響を予測するため、力学過程や放射過程など、大気中で起こる様々な物理・化学過程を取り入れ、大気の流れや雨の降り方などの気候要素の変化を計算機上に再現しようという、“大気大循環モデル”と呼ばれるものが、各国の研究機関において作成されている。そのモデルの示す結果などから、大気中での温室効果気体の増加は、単に平均気温の上昇や、極域の氷が溶けることによる海面の上昇だけでなく、気候に様々な影響が及ぼされる可能性があることが示された。特に、降雨の集中化や土壌の乾燥などにより、災害や食料生産への影響などが懸念される点は、極めて重要な点でありながら、一般の人々にはあまり認識されていない点のようである。

このような気候変化は、世界中の国々に影響を及ぼすものであることから、各国政府の対応が求められるものであるが、そのためには、可能な限り正確な科学的知見の集約が求められる。そのため、1988年に世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)の共催により“気候変動に関する政府間パネル(IPCC)”が組織され、1990年に最初の報告書が提出された。1995年の終わりには、第2回の報告書が提出される予定であるが、その一部が“特別報告”として先に提出された⁵⁾。この中では、第1回の報告と比べて、地球温暖化の原因を明確に人為起源と指摘している点などが特徴的である。図6には、その報告の中にある、温暖化に対する各種因子の寄与率を表す図を転載する。この図は、対流圏界面での放射フラックスの変化量で定義される放射強制力と呼ばれる量で表されている。これを見ると、温暖化の直接効果である各

図6 温暖化に対する各種因子の寄与率⁵⁾。対流圏界面での放射フラックスの変化量で定義される放射強制力により表されている。

種気体成分の寄与率のうち、二酸化炭素の他にメタンやフロンが大きな割合を示していることが分かる。一方、負の値を示す効果に、対流圏エアロゾル(浮遊粒子状物質)の効果が新たに加わったものとして示されている。これは、エアロゾル粒子による日射散乱の増加(直接作用)や、雲の反射率の増加(間接作用)が、温暖化を抑制する効果があることを示している。とは言え、これらの作用をもつエアロゾルの増加は、その多くが人為起源のものであり、自然の微妙なバランスを保つためには、本来あってはならないものであることに注意していただきたい。

参考文献

(1) 森山茂：大気の歴史，東京堂出版 pp.5-80 (1981)
(2) 会田勝：大気と放射過程，東京堂出版 pp.178-184 (1982)
(3) Manabe, S and Strickler R. F.: Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment. J. Atmos. Sci. 21 pp. 361-385 (1964)
(4) 今須良一：大気成分・気温の全球観測，日本赤外線学会誌 3-1 pp.1-8 (1993)
(5) IPCC: Climate Change 1994, Cambridge univ. press pp. 195 (1995)