

二酸化炭素 (CO₂)

岩 坂 泰 信*

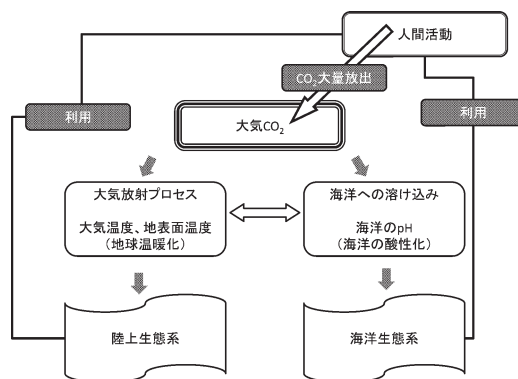
気象学では、大気中に存在する大気組成のうちで二酸化炭素 (CO₂) は大気温度と関係して古くから関心を集めていたが、最近では地球温暖化現象と関係して取り上げられることが多い (第1図)。

地球大気の大気放射 (あるいはエネルギー収支) において、CO₂ の働きは極めて多岐にわたっているが、大気温度を決める要因の一つになっている放射を通じた働きは最もよく知られたものであり、かつよく理解されているプロセスの一つである。放射を通じた働きで本質的な点は、「可視領域の波長の光に対しては透明 (=何の相互作用もない) であるが赤外域の光はよく吸収する」と言う点に尽きるように思われる。

太陽からやってくる放射のうち可視域の部分にエネルギーが集中している。大気中の CO₂ は、太陽からやってくる放射エネルギーの主要部分に対しては何の関係も持たないことになる。地球の大気は、CO₂ の他にも様々な組成が存在しているが、可視域の太陽放射に対して透明か、それに極めてわずかに相互作用するものがほとんどである。

太陽放射は、地球大気の影響が十分に小さい高度およそ100 km ぐらいでは、あたかも5780 K に相当する黒体放射のように観測される。このような放射の波長スペクトラムは可視域の緑色に近い波長の光にピークがある。

ほぼ透明に近い大気層を通過した太陽放射は、地球の表面で吸収されたり反射されたりする。地表面で吸収された放射の多くは地表面を加熱するために使われる。そしてある温度を持った地表面からはその温度



第1図 大気中の CO₂ 濃度の変化は、大気放射を変化させることで大気温度や地表面温度に影響を与える。一方で海洋に溶け込む CO₂ 量の変化を通して海洋水の酸性度に影響を与える。人間の活動が急激に拡大したことによって生じた CO₂ 濃度の増加は地球環境に大きなストレスを与えつつある。

に対応した放射が出る。もちろん、熱は伝導や対流によっても地表面から大気にあるいは地中に運ばれるがここではふれない。地表面の温度は地球全体を平均すると288 K (15°C) ぐらいと考えられるので、大ざっぱに言えば、地球全体で地表面からその上を覆っている大気に向かってこの温度に相当する放射が出ていることになる。

288 K の放射ではエネルギーの集中する波長は赤外域になる。大気中の水蒸気や CO₂ はこの波長帯に大きな吸収係数を持っている。当然、この放射を吸収して大気を温めることになる。

赤外域の放射を吸収した CO₂ などの分子は、そのプロセスに誘導されて自分の持っているエネルギーを

* Yasunobu IWASAKA, 滋賀県立大学.

iwasaka@mti.biglobe.ne.jp

© 2013 日本気象学会

放出する(再放出, 誘導放出)。光の波長が長くなるほど再放出が生じる確率は高くなる。このために、宇宙で地球から放出される赤外放射を観測すると、地表面からの放射や大気(持つ温度に応じた)放射が(大気中のCO₂をはじめ赤外域の光を吸収する様々な気体が吸収と再放出を繰り返しながら大気圏を伝播して)あたかもにじみ出てきたかのような放射が大気の上端から放出されているのを見ることになる。

宇宙空間から地球が放出している赤外放射の波長分布を観察すると、8 μm から20 μm に及んでおり、その中心部分は15 μm 付近にある。大気組成の中で、このあたりに強い吸収係数を持っている大気組成の代表的なものがCO₂なのである。

誘導放出や吸収を伴いながら媒体の中を光の形を取ってエネルギーが移動してゆくプロセスを、放射伝達あるいは放射輸達と呼んでいる。英語では、両方とも Radiative Transfer である。放射が次々に、姿を変えながら(すなわち、誘導放出を伴いながら)、バケツリレー(といっても、方向は一方向だけではなく四方八方にバケツリレーされるのに近いが)のようにして運ばれているようなイメージを抱かせる用語である。

大気の上端から赤外線で地表面方向をのぞくと、この付近は大気の密度が低いために少しは透明でありほんやりとではあるが少し下が見えるかもしれない。それにしても地表面付近を見ることはできまい。ということは、大気中の成層圏や中間圏からの放射は大気上端に直接届くかもしれないが、地表付近からやってくる放射を直接検知できる確率は限りなく小さいということになる。

大気の上端から宇宙空間に向かって放出されている放射は、地球から宇宙に運ばれているエネルギーであり、このプロセスで地球を冷やしていることには間違いない。ただ、上の説明から分かるように、地表面から大気の上端までの空間のどこをどれだけ冷やしているのかを言うのはなかなか難儀なことである。

地表面から大気層に向かって放出された放射は、大気中のCO₂や水蒸気によって吸収される。その後大気圏内で吸収と再放出を何度も繰り返しながら、放射エネルギーを上向きにあるいは下向きに運ぶ。吸収と再放出の過程は、これらの組成の吸収係数の大きさとともに、組成の濃度にも大いに左右される。

水蒸気は対流圏に分布しており成層圏では著しく濃度を低下させる。一方、CO₂は成層圏や中間圏におい

ても混合比は一定であり熱圏下部に至って初めて光分解によって混合比が減ってくる。このようなことから、大気の上端付近まで放射を運ぶのにCO₂が大きな役割を果たしていることは容易に想像がつく。

CO₂の他にも、人間が大気中に放出している物質がいろいろな点で話題になることがある。産業活動に伴って放出される有機系のガス、農業で使われる農薬等はその代表的なものである。しかし、これらは一般的には反応性が強いことが多く、空気中で比較的早い時間で分解されたり太陽放射を吸収して分解したりして、放射過程に影響を与えるほどの存在にはなることは少ない(一部には、きわめてタフな物質があり注意はされている)。逆にCO₂はほとんど反応せず、長時間にわたって大気中を浮遊し良く攪拌された状態で分布している。そのようなCO₂が赤外放射を支配する主要な組成であると言うことは、なかなか味わい深い。

もしも、大気中の化学的活性が強く比較的短い寿命の大気組成が大気放射伝達の主役を務めているような状態であったら、大気の熱的状态は極めて不安定なものになっているに違いない。

大気層を無数の水平層に切って、各層の大気放射が上向きにどれだけあり下向きにはどれだけあるかは、あるいは他の層から上向きにあるいは下向きにどれだけやってくるかを知るには、地球大気中の赤外吸収の能力の高い物質(地球大気では特にCO₂が重要)の濃度分布、地表面温度、大気温度分布等がわかれば推定することが出来る。

CO₂濃度が人間の様々な活動、とりわけ化石燃料の消費によって急増していることはよく知られている。地球から宇宙へエネルギーを逃がす役目をしているCO₂の濃度が変われば当然のことながら地球大気中での放射のバランスに大きな影響が出るのは誰でも予想が付く。

さて、CO₂が地球から宇宙空間へ放射を送る役目をしているのなら、「CO₂濃度があがればますます効率よく放射が送り出されて地球は冷えるのではないか」と考えたくなる人がいるかもしれぬ。事はそう簡単に行かない。前にも出たように大気中のCO₂から放出される下向きの放射だって同時に増えるのである。このために上向きの放射と下向きの放射のバランスがどのようにになっているか、大気各層について吟味する必要があるのである。

地球大気中には様々な、CO₂以外の赤外放射を吸収

する物質（温室効果ガス）がある。水蒸気はその代表的なものであるが、大気中の水蒸気濃度はある幅の中で、長い間安定している。現在社会的に関心を集めている物質は、人間活動の影響を受けて近年著しく濃度を高めた物質である。メタン (CH₄)、一酸化二窒素 (N₂O)、フロン類（クロロフルオロカーボン (CFC)：塩素・フッ素・炭素の化合物）、ハロン類（塩素・フッ素・炭素・臭素の化合物）、六フッ化硫黄 (SF₆)、その他多数挙げられている。このようにたくさんの化学組成があがっているけれども、CO₂は特別の存在であると言わねばならない。

その要因の一つは、人間活動に必須のエネルギーに深くかかわっていることである。エネルギーなしには人類はやって行けない。エネルギー源の代表的なものは化石燃料であり、これらを燃焼することでエネルギーを得ている。燃焼に伴って必然的にCO₂が大気中に放出される。CO₂の増加問題は、人間活動を支えているエネルギー獲得の仕方に深くかかわっていることから、他の物質の場合に比べて格段に重い問題になっているのである。

地表面とその上にある大気層の2層からなる系を想定して、地球にやってくる太陽放射とバランスするように地球から赤外放射が逃げてゆく状態を考えると、地表面の温度は大気層からの放射の強さに関わる係数（射出率）と次のような関係が成り立つ（中澤 1999）。

地表面温度

$$= [(1 - \alpha) \cdot S / \{2\sigma(2 - \text{射出率})\}]^{1/4}$$

ここで、 α は地球の反射率（太陽放射を反射させる割合）、 σ はステファン・ボルツマンの定数で、 S は地球に入射する太陽放射エネルギーである。

S や α の値は変わらないと考えてよい。となると、射出率が増える（例えば、大気中のCO₂量が増える）と地表面温度が上昇する関係になることが分かる。

筆者が気象を勉強し始めた頃は、温室効果ガスと総称されている大気組成の中でフロンに関してやや関心が寄せられておりその他の物質に関して話題に上ることはほとんどなかった。そのフロンも、オゾン層破壊物質としての懸念が挙げられていたのであり温室効果に対する関心は皆無であった。

当時、CO₂濃度は、地球平均で315 ppmとか320 ppmと言われていたことを良く覚えている。今では380 ppmと言う値が使われる。50年余りの間に20%近く上昇しているのは驚きと言うほかない。

このようなことから、大気中のCO₂を見る視点も「気温を決める要素である」から「地球環境を考えるための主要な要素である」と大きく変わったのであるが、同時に気象学が地球環境問題の根幹にかかわる学術であることを強く示すことにもなったのである。

CO₂に関する気象学的话题として、酸性雨あるいは環境の酸性化に関するものがある（第1図）。

CO₂は、別名「炭酸ガス」と呼ばれている。炭酸という酸性物質を作るガスと言うことである。

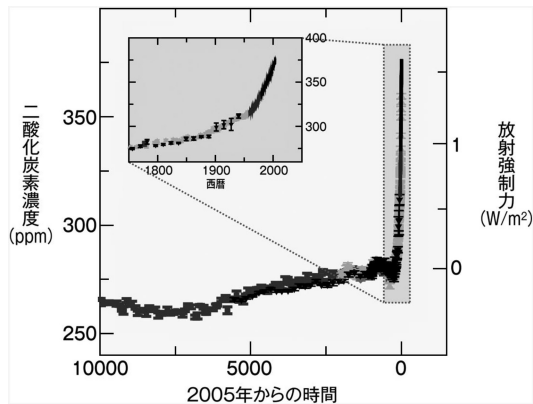
酸・アルカリという概念は「溶液（あるいは溶液状物質）」に用いられる。地球大気の中には、ガス状の物質の他にも様々な状態の物質が含まれている。ガス状物質以外のもので比較的長時間大気中に浮遊する微小物質を総称してエアロゾル（時に、大気エアロゾル粒子、大気エアロゾル、エアロゾル粒子）と呼んでいるが、このエアロゾルのうち液体もしくは液状の表面を持っているものの割合は相当に高い。この方面の知見はまだまだ貧弱であるが、ほとんどのエアロゾルがそうであろうと主張する研究者もいる。大気中に浮かんでいる粒子状物質の中で液体状のもの典型例は、雲粒であろう。地表面近くでは、さまざまな条件で発生する霧も液体で出来たエアロゾル粒子の典型例である。

雨粒は雲粒が衝突・併合して出来たものである。

雲粒は雲の中で、雨粒は落下途中で周辺の空気にさらされている。ということは、大気中のCO₂濃度に見合うように、水の中にCO₂を溶け込ませていることになる。

この雨滴に限らず、地球表層にあって空気にさらされているものはすべて大気中のCO₂と触れあっている。もしそのものが表面に水分を持っているなら、大気中のCO₂濃度と釣り合うようにその水分中にCO₂を溶け込ませていることになる。地球表層にあるものは、大気中にCO₂がある程度存在していることを前提として存在しているのである。

過去の空気の中にどの程度CO₂が存在していたかを知る手段は極めて限られているが、例えば、南極の氷床コアの分析がある。この氷床に閉じ込められた気泡の分析からは、およそ20万年から数百年前までの間、180-300 ppmの間にあったと推定されている。グリーンランドの氷床コアを使うとさらに最近の変化を詳しく追いかけることが出来る。こちらの試料からは1800年ごろからCO₂濃度は280 ppm程度から急増し始めており、現在に至るまで濃度は上昇一途であった



第2図 観測から得られた過去の大気中のCO₂濃度の変動の様子。近年の人間活動の影響のすさまじさを良く示している (IPCC 2007; 気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書第1作業部会の報告 政策決定者向け要約 http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1_spm_Jpn.pdf より)。

ことが分かる (第2図)。

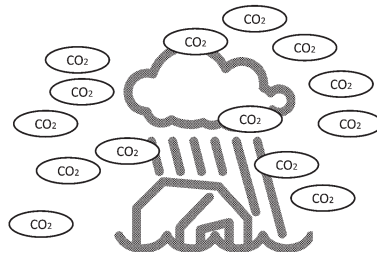
このようなことを考えると、地球表面は相当長い間200 ppmを越えるあたりの炭酸ガス濃度にさらされていたことになる。南極やグリーンランドの水床コア解析の結果を敷衍すれば「地球は、1000年近くの間、おおよそ280 ppmの炭酸ガス濃度になるようなシステムであった」のである。地表にあるあらゆるものが、このシステムのもとで存在していたのであるから、雨水であれ海水であれこのCO₂分圧に対応した酸性度をもっていき、水を利用する動物や植物もそのような状態のもとで活動することを当然としていたと考えられる。

酸性雨かどうかを判断する基準として、大気中のCO₂濃度に見合う水のpH値を基準とするという考え方が広く受け入れられている。

日本の行政機関で広く使われているのは、CO₂濃度350 ppmとした時の水溶液のpH=5.6である。この値よりも低い値を持つ雨などが観測された時、その雨を「酸性雨」と呼んでいる。一方で、このような画一的な方法が良いかどうかについては異論もある。

例えば、日本列島には数多くの火山があり、そこから放出される二酸化硫黄 (SO₂) の影響も長年にわたるものであり、その影響下にあるものは十分にその影響となじんだ状態にある。その影響も考慮するなら、

人間は、長い間濃度250ppm程度のCO₂を含んだ大気に囲まれて活動して来た



第3図 長い間、我々の生活は、CO₂濃度が250 ppm程度の大気のもとで行われてきており、CO₂が少々混合している状態を基準に酸性雨などを定義するのは妥当な考え方といえる。

日本においてはもう少し低いpH値も許容範囲ではないかとするような考えである。

中学校や高等学校では、理科や化学の時間に酸や塩基 (さらには、酸性や塩基性) について勉強する。この時、溶液中の水素イオン濃度で溶液の性質を分類する方法を学ぶ。

酸性：pH<7, 中性：pH=7, 塩基性：pH>7

の分類である。この分類で行けば、日常的に降っている雨水は酸性に分類されてしまうが、先に述べたように我々は古来pH=5.0を少し上回る値の降水に馴染んだ生活してきたので、こちらの値を基準とするほうが妥当なのである (第3図)。もちろん、『一般的に雨水は弱い酸性 (=pHの値が7より小さい) を示している』と言うような表現は正しい。

海に与えるCO₂濃度増加の影響は、一つは放射場の変化を通して、すなわち大気からの赤外放射が増えることで以前よりもたくさんの放射エネルギーが海に与えられることから起きる影響であり、他の一つは海に溶け込むCO₂量の増加を通して海洋水の酸性の程度が増すことから生じる影響である。この二つに分けて議論されることが多い。

前者は、海洋表面水の温度上昇につながり、赤道付近でより効果が大きいと考えられている。最近の気象庁の報告によれば、海洋表面水の水温上昇は地球平均で100年当たり0.51°Cになっていると言う。海水温度は、太陽放射や大気放射の影響のほか様々な影響、例えば大気と海洋間の相互作用で生じるエルニーニョ・

ラニーニャ現象、雲・降水活動に伴うエネルギー輸送などを受けているのでCO₂濃度の上昇による部分だけを取り出すことはなかなか難しい。多くの場合、想定される様々な気候変動要因や海水面の変動要因を取り込んだ気候モデルのなかで炭酸ガス濃度を変化させて、シミュレーションによって判定される。日本の気象庁では、気候モデルによるシミュレーション結果から、世界的に見られる表層海水温度の上昇は(気温の上昇とともに)人間活動に伴う温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性が高いことを示している(文部科学省・気象庁・環境省 2009)。

後者については、海洋水の酸性の程度が強くなることによって、サンゴのように海水のpH値に極めて敏感な生き物が大きなダメージを受けたり生息域を変化させたりすることが、連鎖的に海洋生物の生存に影響を与えるのではないかと懸念されるようになっている。

「海洋酸性化」などの言葉がしばしば使われるようになったのは、比較的最近である。天然にある海水、湖沼水や河川水のpHの値は8.1程度でありややアルカリ性になっている。この値は、大気から様々な形で天然水に運び込まれるCO₂の影響と水が岩石などの一部を溶かしこんで生じた様々なイオンとがバランスして生まれたものである。

海水中に溶け込んだCO₂からは、炭酸水素イオン(HCO₃⁻)や炭酸イオン(CO₃²⁻)が生じ、これ等のイオンは海水中の様々な他のイオンとともに全体として中性となっている。この時、海中に溶け込んでいるCO₂の濃度[海中CO₂]とこれ等のイオンの濃度を比べて見ると



となっており、海中に溶け込んでいるCO₂濃度が少々変動しても海水の炭酸水素イオン(HCO₃⁻)や炭酸イオン(CO₃²⁻)の濃度(すなわち海水の酸性度が)急にそれに応じて変化するという具合にはなっていないのである。比率で言うところ炭酸水素イオン(HCO₃⁻)濃度100に対してCO₂濃度1と言う具合であるから、炭素は圧倒的にHCO₃⁻の形で存在していると見なしてよいのである。CO₂濃度が2倍になったとしても、その100倍の濃度のHCO₃⁻の濃度から見ると1%の変動しかもたらさないことになる。

海水の酸・塩基の状態は「やや過剰な『アルカリ』」状態の海水に溶け込んだCO₂の働きで中和し、その

結果pH=8.1程度」となっている。CO₂が海中に溶け込んで多量のHCO₃⁻イオンやCO₃²⁻イオン(このイオン濃度はCO₂の10倍程度ある)が存在する状態にあつて、比較的中性に近い状態にあることになる。

もしCO₂を含まない海水であれば、酸・アルカリのバランスは大変不安定なものになってしまい、少しの酸性物質が溶け込んでも大きくpHの値が変化する世界になっていると思われる。

海で進化してきた多くの水生生物は、中性付近の環境に適合するように進化してきていると考えられ、極端なpHのもとでは生存することが難しい。

このことは「大気中のCO₂濃度の変化」と言う観点から見ると、以下のように、2重の意味で大気中のCO₂は長い期間にわたって海洋中に極端なpHの変動を引き起こさずに安定した環境にあらしめた重要な大気組成であったことを意味している；

- 大気中のCO₂が海中に溶け込んでいるおかげで、海水中の多量のHCO₃⁻イオンやCO₃²⁻イオンが生まれ、少々の酸性物質(代表的なものは、今日的には酸性雨に含まれる物質、歴史的には火山噴火などで放出される硫酸化合物など)が流れ込んでも酸・アルカリのバランスは維持され続けた。
- 大気中のCO₂の濃度は、ここ数十万年の間およそ200 ppmから270 ppmのレベルで推移し、大ざっぱに言って比較的安定したレベルにあった。このことは海洋中のHCO₃⁻イオンやCO₃²⁻イオン濃度の長期間の安定(=pHの値の一定)した状態を実現するのに寄与してきた。

現在、大気中のCO₂濃度の急激な増加が、海洋の化学環境にどのように影響するか、気象関係者のみならず水産・漁業をはじめ学術的にも社会的にも広い関心と呼びつつあるが、どんなことが起きるのか皆目想像がつかない状態にある。これまでの、生物影響に関するデータ(多くは実験室のもので、実際の海洋での観察・観測は極めて限られている)に基づいて、ドイツの科学者評議会は、産業革命以前のpH値から0.2小さくなると海洋生態系に決定的な影響が現れると警告している(German Advisory Council on Global Change 2006)。

ある程度妥当な以下のような仮定を置いて、現在の海洋表層水のpHを概算してみるとおおよそ8.06程度となる；

- 海水温は18°C
- 海水の塩分とアルカリ度はそれぞれ34‰と

2300 μ 当量/kg

この値を、海水温は変わらないとして産業革命以前のCO₂濃度280 ppmの時代の値を求めてみると8.17程度となる。このようなCO₂濃度の増加が続けばpH値の低下はさらに続くと思われる。このような傾向を、人によっては海の酸性化と呼んだりしている。

海の酸性化は、結果的には海中での炭酸カルシウム(CaCO₃)生成に大きな阻害要因となると考えられており、回り回ってこのことが炭素循環上で海が果たしてきた役目(大気中に放出されたCO₂のおよそ半分が海に吸収されている)が大きく阻害されると考えられている。

大気中のCO₂は、いろいろな切り口から吟味できる大気組成である。この稿では、大気放射と海洋の酸性度と言う見方から概観したが、地球表層のシステムの安定的な維持と言う観点から見るとさらに地球史や生命史ともつながりが出てくる。いずれにしても、大

変興味深い大気組成の一つである

参 考 文 献

- German Advisory Council on Global Change, 2006: The Future Oceans - Warming Up, Rising High, Turning Sour. Special Report 2006, 110pp. (<http://www.wbgu.de/en/special-reports/sr-2006-the-future-oceans/>)
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. S. Solomon *et al.* eds, Cambridge University Press, 1056pp.
- 文部科学省, 気象庁, 環境省, 2009: 温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」. 10-21.
- 中澤高清, 1999: 温室効果気体の増加と地球温暖化. 岩波講座地球環境学 3 大気環境の変化 (安成哲三, 岩坂泰信編), 岩波書店, 119-155.