

## 【現代人のための科学Ⅱ 気候変動と地球温暖化問題】

### 1. 地球大気の大循環

生命体にとってかけがえのない地球には豊富な水が海洋に蓄えられており、宇宙から見た地球は大気存在により青く輝いている。水惑星と呼ばれることもある地球は、その70%が海に覆われ、白く輝く雲が全体の約半分を覆っている。赤道付近には偏東風（貿易風）が存在し、そこでは太陽放射により暖められた空気が活発な積雲対流の群れを形成している。ちょうどその様子は鍋の底から湧きたつ沸騰した泡のように発生を繰り返し、時には広域に組織化することでクラウドクラスターを形成しながら、偏東風に流されて西進する。時折、その積雲の中から大きな渦巻が発生し、台風となって日本付近まで北上する。

赤道付近で東西に延びる上昇気流は、軸対象なハドレー循環を駆動し、大量の雨をもたらすことで熱帯雨林気候を形成する。そして赤道で上昇した空気は、南北約30度の亜熱帯高圧帯で乾燥した下降気流となることから、ここでは雲の少ない領域ができ、地上では広大な砂漠を

形成する。その下降気流の一部は赤道に戻り、ハドレー循環を完結させる一方で、高緯度に向かう気流は海面から大量の水蒸気をもらって北上し、中高緯度に存在する偏西風に取り込まれる。偏西風帯では南方からの湿った空気と北からの乾燥した寒帯気団の空気が入り乱れ、大きな温帯低気圧の渦を発達させる。温帯低気圧の渦は東西に数珠つなぎに並び、偏西風にながされて東進する。この温帯低気圧の渦巻により、南北の空気が混合

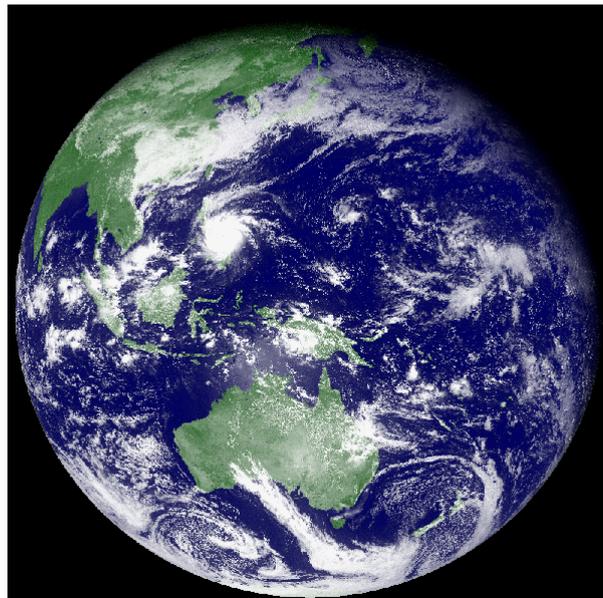


図1 宇宙から望む青い地球

され、全体として低緯度の熱と水蒸気が高緯度へと輸送される。北極上空では温帯低気圧によってもたらされた暖気が放射冷却により冷やされ、下降流となって寒帯に流れ出し、極循環を形成している。このように、大気の大循環は赤道付近の熱と水蒸気を、様々な形態の渦により高緯度へ輸送し、極域での放射冷却を活発化することで、全体としての熱と水蒸気のバランスを保っている。

宇宙空間から地球大気を望むと、漆黒の宇宙空間と大地がなす水平線との間に、厚さ数十キロの青く光る大気層を確認することが出来る。この大気存在により、地球は青く見えるのである。この青く輝く大気層は、有害な紫外線や宇宙線を遮

断し、地表で生息するすべての生命体をやさしく包み込んでいる。46億年の地球の歴史の中で、約35億年前に発生したひとつの生命体が、この大気と海洋に守られながら遺伝子を繋ぎ、無数の種に分化させて繁殖を繰り返し、今日に至っている。宇宙空間から地球を見ると、陸地は植生で覆い尽くされ、海洋も微生物に溢れ、地球表面は生命体に限なく覆い尽くされている事実に気が付く。今や生命体の海となって全地球を覆い尽くす遺伝子は、生命体に都合の良いように地球大気をもコントロールする機能をいつの間にか身につけている。生命体の繁殖により、地球大気の組成と温度は、たとえ太陽放射強度が変化しても、ほぼ一定に保たれてきた。地球を覆い尽くした遺伝子により、地球全体があたかも一つの生命体のように地球環境をコントロールする。これは今日、ガイア仮説と呼ばれるひとつの地球の見かたとして定着し、生命体の重要性を再認識させている。

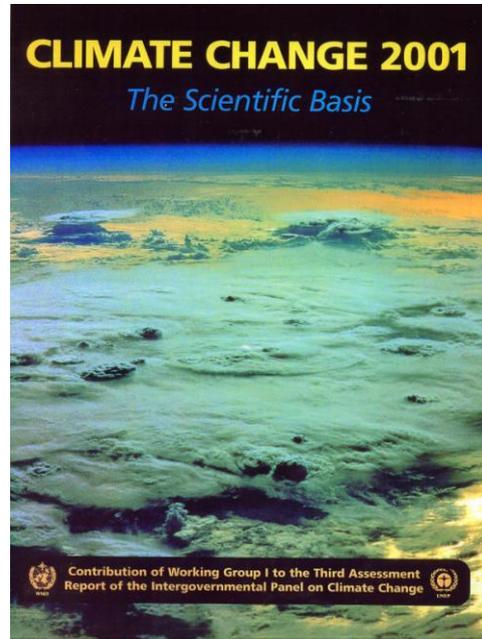


図2 地球を包み込む青い大気

その生命体のひとつとして、人類が地上に発生したのは数100万年前の事である。道具を使いこなし、火を焚いて暖を取り、穀物を料理して飢えから逃れることで子孫の繁栄を築いてきた人類は、文明を开花発展させ、やがて産業革命を迎えることで、これまで植生が何10億年もかけて光合成により固定化してきた石炭や石油などの化石燃料を掘り起こし、二酸化炭素として大気中に放出するようになった。かけがえのない地球環境が、近年、人類により急激に破壊されようとしている。もし、地球にガイアの神が本当にいるとすれば、その神は地球環境を破壊する人類をほおっておくことはないだろう。ガイアの神は、地球環境を破壊する人類に牙をむき、地球上から人類を排除する日が訪れるに違いない。人類がもたらした地球環境問題を、人類は自らの英知で解決することが出来るのだろうか。これが、今日の地球環境問題の本質である。

## 2. 地球環境問題

地球環境問題において、地球環境の変化をもたらす要因には人為的な要因と自然変動の2種類がある。自然変動としては太陽活動の変化や火山爆発によるエアロゾルの供給などがあげられる。かつて氷河時代と呼ばれた時代には地球全体が氷に覆われた時代もあったとされる。また、逆に地球上に氷河が存在しない温かな時代もあった。地球が氷に覆われると、太陽放射を多く反射するため地球全体の反射率(アルベド)が高くなる。すると、地球に吸収される太陽からの熱量が減少するため益々

温度が低下し、氷に覆われる面積が増える。こうして、氷の面積が増えれば、益々気温が低下し氷が増えるという無限のループが走り出すのである。これはアイス・アルベドフィードバックと呼ばれる地球システムが内在するメカニズムのひとつである。原因が結果をもたらすという物事の因果関係において、結果が原因に結びつく第2のループが登場し、因果がループ状に廻り、暴走し始める時、それを正のフィードバックという。このフィードバックが暴走し、なにも止められない場合、地球全体が氷に覆われるところまで寒冷化が進む。逆に氷が減少すると逆の事が起こり、そのループが暴走すれば地球上の氷がすべて消えてしまう。したがって、何かの原因で正のフィードバックが走り出すと、同一のシステムが両極端な結末を導くことが可能となる。地球の歴史にはかつてこのような暴走が何度か生じた記録が残されている。ただし、通常はその暴走を止めようとする負のフィードバックが台頭して、暴走は食い止められる事が多い。

太陽活動が変化しなくとも、地球の公転軌道の変化や自転軸の変化により

発生する気候変動も自然変動と考えられる。数万年の周期で氷期と間氷期を繰り返したミランコビッチサイクルは、氷河時代の中で見られる自然変動と考えられている。地球が受け取る太陽放射の量が僅かに変化する時、様々なフィードバックが働いて、その僅かの変化が増幅されることがある。このミランコビッチサイクルにより、地球の温度は 10℃ 程度増減し、それに伴い二酸化炭素やメタンの量も同調したことが、南極やグリーンランド氷床のアイスコアの調査から分かっている。アイスコアの調査では、大規模な火山爆発により大量のエアロゾルが成層圏に供給され、太陽放射をさえぎり（これを日傘効果という）、寒冷化した記録も残されている。こ

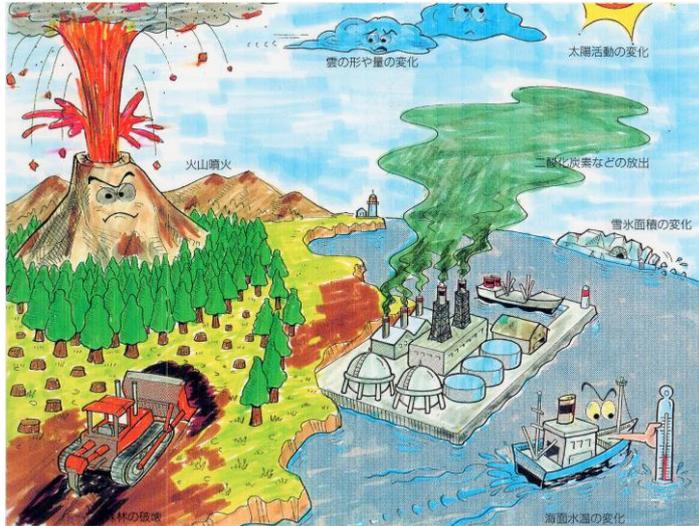


図3 自然変動と人為起源の地球環境問題

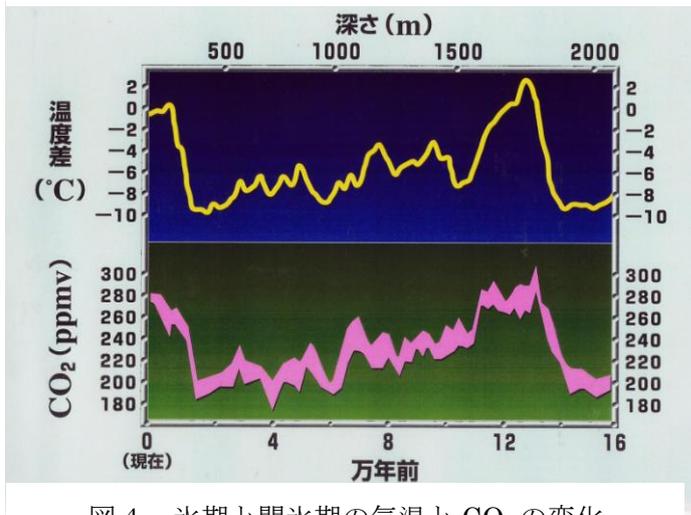


図4 氷期と間氷期の気温と CO<sub>2</sub> の変化

これらの変動は、人間が制御することのできない自然変動である。

一方、化石燃料の燃焼による二酸化炭素の増加などは、人間活動によりもたらされる気候変動の要因であり、人間が制御することが出来る要因である。大気汚染や森林伐採なども人為的要因である。森林伐採は二酸化炭素の吸収源を伐採することから、結果として二酸化炭素の増加に結び付く。大気中の二酸化炭素が増加すれば、地表から宇宙に抜ける赤外放射が二酸化炭素に吸収され、大気を暖める。これは地球システムが内在する温室効果と呼ばれるメカニズムである。地球システムは複雑なため、たとえ人為的な要因が些細なものであっても、アイス・アルベドフィードバックのような様々なシステムにより、その効果が増幅されて、地球環境の変化が暴走する可能性を含んでいる。このような危険性を認識した場合、人類は自らの将来を見通して、確実にその対策を取らねばならない。

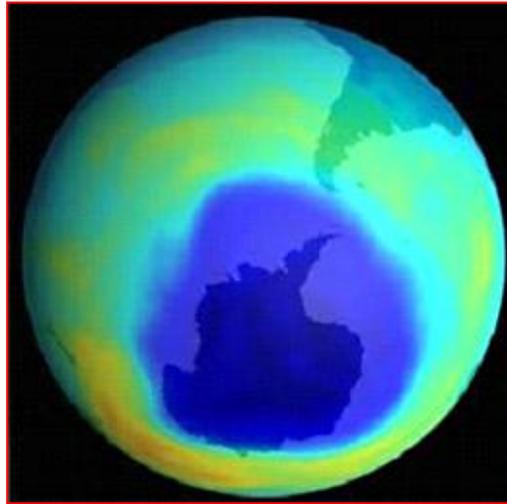


図5 南極上空のオゾンホール

以下では、人為起源の地球環境問題として、オゾンホールの問題と二酸化炭素の増加による地球温暖化問題の2つを取り上げて説明し、両者の問題を比較してみよう。そこには解決しがたい決定的に違う問題が潜んでいることが分かる。

### 3. オゾンホールの問題

オゾンホールとは南極成層圏に存在する極微量のオゾン層が、人為的な要因で近年急激に破壊され、オゾン層に穴があいたようになった現象のことをいう。このオゾンホールの問題を説明するために、オゾン層ができるまでの地球大気の変遷を追ってみよう。

地球が46億年前に誕生した当時の大気は、惑星空間に豊富に存在する水素やヘリウムが主要な成分となっていた。これを1次大気という。1次大気は強烈な太陽風に吹き飛ばされ、地球大気は一時真空状態になったとされる。その後、地球内部から火山噴火により放出された大量の水蒸気と二酸化炭素、ヘリウム、亜硫酸ガス、塩化水素などがマグマオーシャンを包

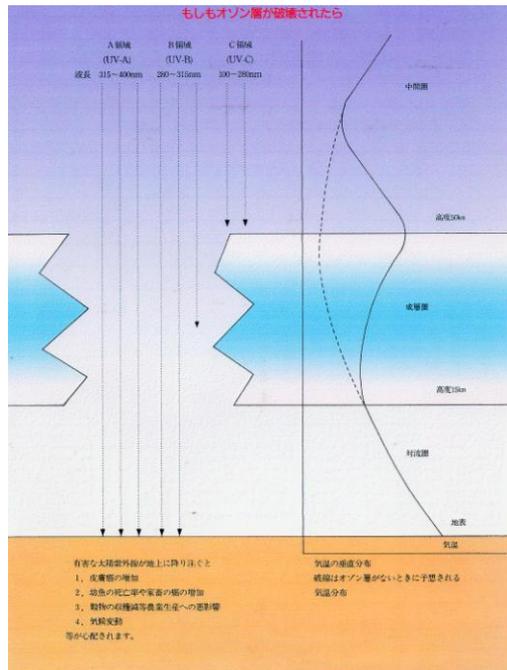


図6 成層圏の気温とオゾンホール

み込むように大気を作った。これを2次大気という。やがて地球が冷えるにつれて、200気圧もあった水蒸気が凝結し、雨となって平均水深2000mの海が形成され、そこに亜硫酸ガスや塩化水素が取り込まれることで、二酸化炭素とヘリウムを主成分とする大気が形成された。ただし、この時点で酸素はまだない。そして35億年前には、地球に画期的な出来事が発生した。生命の誕生である。やがて生命体は光合成により二酸化炭素を取り込んで酸素を吐き出すようになる。こうして地球大気には酸素が供給され、それが上空に拡散し、太陽の紫外線に反応してオゾン層を形成するようになる。これにより有害な紫外線が遮断され、生命体は海から陸に這い上がるようになり、魚類と両生類から爬虫類、鳥類、哺乳類へと進化し、人類が登場するようになる。つまり、35億年という気が遠くなるような歳月を経て、二酸化炭素が地中に固定され、酸素が増加し、オゾン層により対流圏の上に成層圏が形成されて今日の大気が形成されたのである。

ところが、人類は35億年かけてたどり着いたかけがえのない地球大気に対し、わずか100年程度の間でせつかく固定した化石燃料を掘り起こして二酸化炭素を放出し、地球温暖化問題を引き起こしている。また、無害と思って製造したフロンガスを大気中に放出して、わずか50年程度の間でせつかくできたオゾン層に穴を開けてしまったのである。有害な紫外線により、脆弱な微生物は死に絶え、人も皮膚がんや白内障の発症により野外での活動が制限される。

オゾン層は酸素分子に太陽からの紫外線が当たることで生成されるが、フロンガスにより破壊されるためには、極低温においてオゾン層高度で発生する極成層圏雲の存在と太陽の光が必要である。通常、成層圏に雲はないが、気温が氷点下80℃にまで下がる極夜の中では例外的に雲ができる。これが極夜の成層圏で発生する極成層圏雲である。すると雲粒子の表面で気体と固体の間の非均質反応によりフロンガスに含まれる塩素が乖離し、大気中に放出される。そこに太陽の光があたると塩素は活性化して、オゾンを連鎖的に破壊する触媒的存在となる。通常、気体同士では進行しない化学反応が、極成層圏雲の雲粒という固体の存在により進行するようになる。

極夜の南極成層圏で例外的に雲ができるのは、実は熱帯のハドレー循環と関係し



図7 オゾン破壊を起こす極成層圏雲

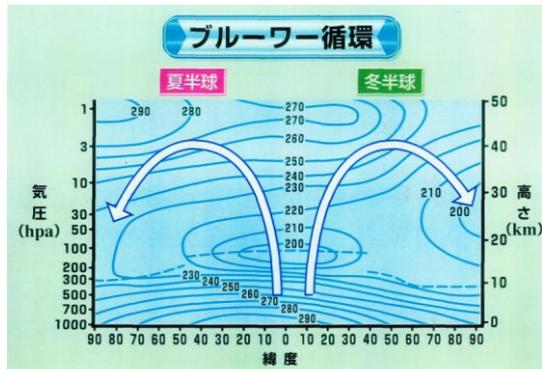


図8 成層圏の温度と大気循環

ている点も興味深い。赤道対流圏界面には氷点下 80℃ の層があり、ハドレー循環に伴う上昇気流の一部はここを突き抜けて成層圏に突入し、ブルーワー循環に乗って成層圏の空気を満たしている。成層圏では高さとともに気温が上昇するので、氷点下 80℃ まで冷やされ、カラカラに乾いた空気が凝結することはない。よって、成層圏に雲はないのである。しかし例外があり、それは冬至の前後の太陽光の届かない極夜の中である。ここでは放射冷却により氷点下 80℃ まで気温が下がり、極成層圏雲ができる。そこで上述の非均質反応が生じ、春先に太陽光が到達しだすときにオゾンホールが形成されるのである。

南極成層圏のオゾンに穴が開き始めたことを 1984 年に始めて発見した人は、日本人南極越冬隊の忠鉢繁さんとイギリス人のジョセフ・ファーマンである。発見後、オゾンホールの直径は年々拡大し、1990 年代には南極大陸の大きさを超えるようになった。オゾンホール中心部のオゾン濃度は年々減少し、ついにはゼロ濃度に到達し、問題は深刻化していった。

オゾンホールが南極上空で発生し、北極上空では発生しない理由は、大気大循環の違いから説明できる。北半球には大きな大陸があり、大規模山岳の力学的な影響でプラネタリー波と呼ばれる波長が 10000km 以上の波が励起され、偏西風ジェットを大きく南北に蛇行させる。これが北極の寒気と中緯度の暖気を混合させるため、北極成層圏の温度は極夜になっても氷点下 70℃ 程度に留まるため、ぎりぎり極成層圏雲ができないのである。そのためオゾンホールは北極上空にはできない。ところが、1997 年に、北極上空のオゾン層に突然大きな穴が開いたので、我々は一同に驚いた。その穴の開き方は、南極オゾンホールのでき始めの 1980 年代の様子と酷似していた。近年の二酸化炭素の増加は、地上で地球温暖化を引き起こす一方、成層圏では二酸化炭素が放射源となって気温を低下させ、極成層圏雲を頻繁

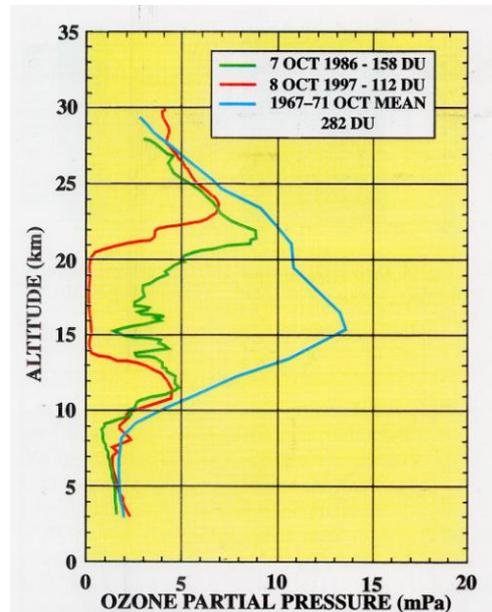


FIG. 16. Ozone profile (partial pressure, mPa) measured by balloon-borne ozonesonde at the South Pole on 8 October 1997 (red line) and comparisons to the October 1967-71 mean (blue line) and to 7 October 1986 (green line).

図9 オゾン濃度の鉛直分布

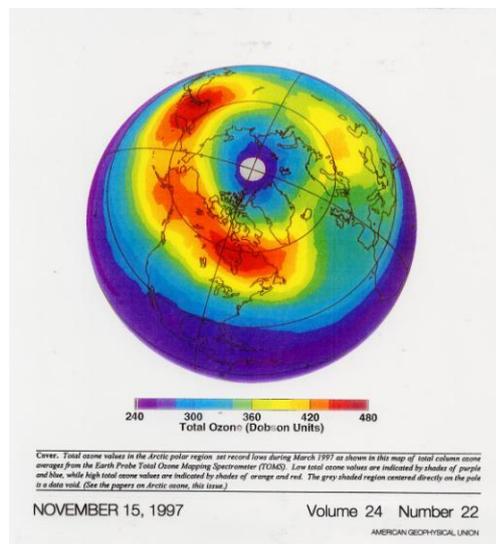


図10 北半球にできたオゾンホール

に発生させるようになった。なんと、地球温暖化問題が、できないはずの北極オゾンホールを進行させていたのである。このまま北極でもオゾンホールが年々拡大したら、人口の多い北半球では大問題となることが危惧された。

#### 4. モントリオール議定書

オゾンホールが発見されると、その問題の重大性は早くから認識されるようになった。そしてオゾンホールの原因が解明される頃には、カナダのモントリオールで関係者による国際会議が開催され、フロンガスの削減および全廃を掲げたモントリオール議定書が1987年に採択された。これによりフロンの放出が規制されるとともに代替フロンがそれにとって代るようになった。モントリオール議定書は着実に成果を収め、観測される大気中のフロン濃度

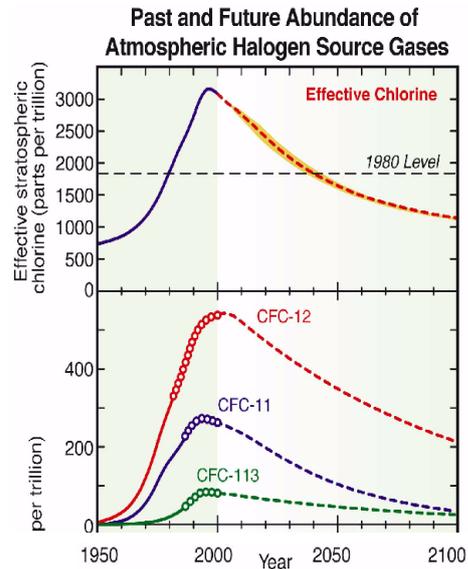


図 11 フロン濃度の変化予測

は 1987 年を境に明瞭に増加傾向から減少傾向に転じるようになった。このままゆけば、21 世紀の中頃には、フロン濃度はオゾンホール発見当時のレベルにまで減少し、オゾンホールの問題は解決に向かうことが予想される。ただし、フロンは減少しても実際のオゾンホールのサイズは現時点では横ばい状態で、縮小傾向にあるとは言いきれないという問題が残されている。

#### 5. 地球温暖化問題

温室効果ガスである二酸化炭素は、石炭や石油などの化石燃料の燃焼によって大気中に放出される。私たちが使う電気はその多くが火力発電所から来ているので、家庭やオフィスで電気を使えば、二酸化炭素を放出していることになる。20 世紀初めに 280ppm レベルにあった二酸化炭素は徐々に増加し、20 世紀末には 380 ppm にまで増加している。二酸化炭素が増加すれば、温室効果が高まり地球平均気温が上昇することが予測されるが、その予想を裏付けるように地球平均気温が近年上

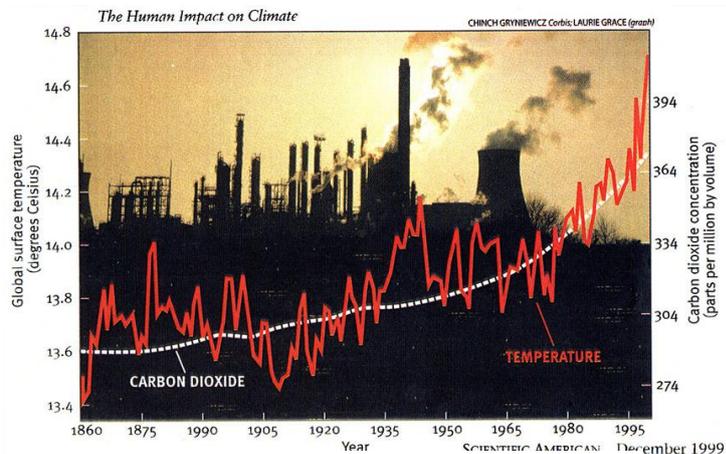


図 12 近年の地上気温と二酸化炭素の変化

昇している。

ここで、温室効果とは地表から宇宙空間に抜ける赤外放射が、大気中の二酸化炭素や水蒸気などの温室効果ガスに吸収されることで大気を暖める効果のことである。もし、温室効果がなければ地球の平均温度は放射平衡温度として理論的に算出される氷点下 18℃となる。実際にはそれよりも 33℃以上も高い 15℃程度になっているのは、温室効果のおかげである。したがって二酸化炭素が増えれば、地球平均温度は 3℃ 程度上昇すると予測されている。ちなみに、火星の表面温度はマイナス 50℃と寒いですが、試算によると、火星に高さ 10km の 2 重ガラスのドームを作れば、温室効果により地球と同じ温度に保てるとのことである。一方、金星の表面温度は 480℃の灼熱地獄である。金星大気は主に二酸化炭素からなり、強烈な温室効果の結果この温度になっている。かつて金星にも水があったそうであるが、水蒸気の暴走温室効果により、すべての水が干上がり、宇宙空間に逃げ去ったとされる。

産業革命以前の二酸化炭素の濃度は、氷床アイスコアの分析によると過去 1000 年はほぼ 280ppm と一定であり、それが近年、指数関数的に増加し、20 世紀末には 380ppm に達している。これは明らかに人為的な二酸化炭素の放出によるものと考えられている。二酸化炭素（炭素）の循環は大変複雑で、海洋で吸収される一方、エルニーニョの際には大量に放出されることもある。また、森林などの植生が二酸化炭素を吸収する一方、森林火災が発生すると大量に大気中に放出される。これらの自然界の二酸化炭素の収支は大まかにバランスする中で、人間が放出する分だけが実質的に大気中に残り残されていると考えられる。

この二酸化炭素の増加に対応するかのよう、過去 1000 年の地上気温も 19 世紀

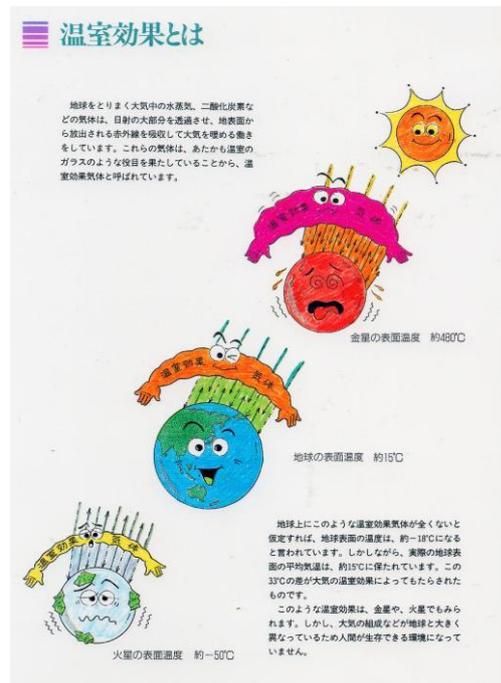


図 13 金星、地球、火星の温室効果

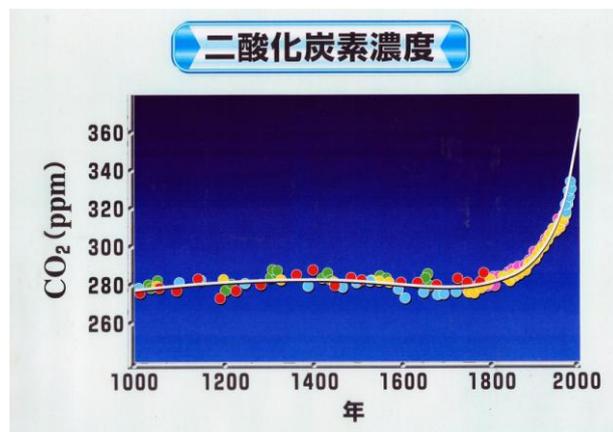


図 14 過去 1000 年の二酸化炭素濃度

以降上昇している。過去の気温は、木の年輪の成長の様子などを分析することで推定されるが、誤差も大きいと考えられる。ただし、よく見ると中世の温暖期から気温が徐々に低下し、18世紀には小氷期と呼ばれる寒冷期があり、その後、急激に気温が上昇に転じている。このことから、長期的な自然変動が背景に存在することも確かである。最近100年

の温度計による気温の経年変化を良く見ると、1940年代に一時期気温が高い。これは北極圏とそれを取り巻く周極域での高温が原因とされる。太陽定数のわずかな変化や火山灰のエアロゾルの減少などさまざまな説があるが、詳しいことはわ

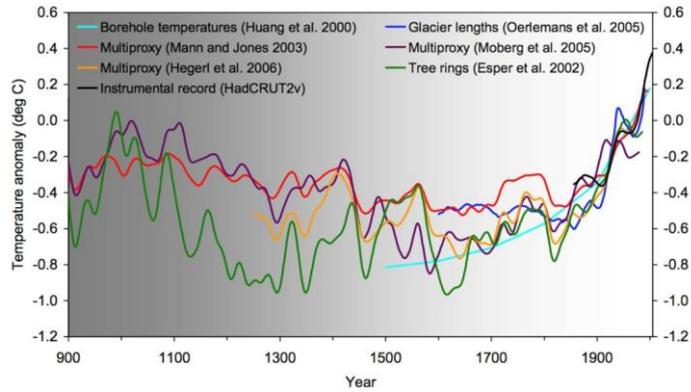


図 15 過去 1000 年の地上気温の変化

かっていない。その後 1970 年代までは気温が低下しており、当時はその気温変化を延長して氷期がやってくると騒がれた。そして 1970 年代以降は急激な温暖化が始まり、1988 年夏にアメリカで大早魃が発生したことをきっかけに、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が結成され、二酸化炭素増加による地球温暖化の問題が、人類最大の問題のひとつに挙げられるようになった。そして、大気と海洋を結合した各国の気候モデルが、

競い合うように将来予測を行った。はじめに、最先端の気候モデルで 20 世紀における気温変化をある程度再現できることを確かめた上で、今後 21 世紀に想定される温室効果ガスの増加により、具体的にどの程度気温が上昇するかを定量的に予測した。その結果、21 世紀末に地上気温の平均は現在よりも 3℃上昇するであろう、ということが IPCC によりまとめられたのである。

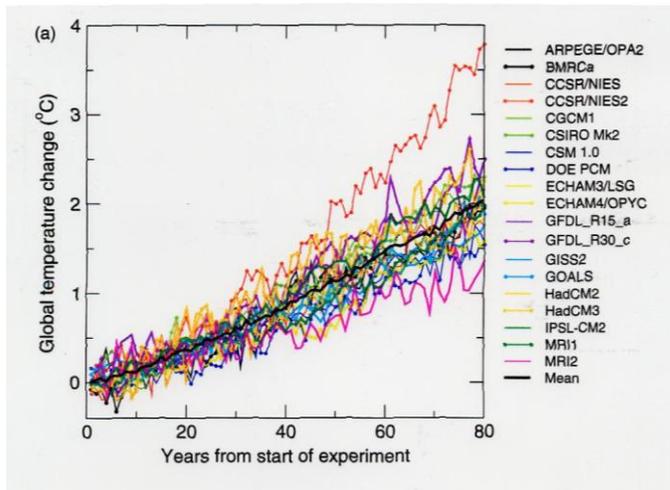


図 16 気候モデルによる地上気温の将来予測

地球温暖化の影響は海水面の上昇、洪水や早魃の増加、巨大台風の発生、生態系の変化など、広範囲におよぶことから、その対策が緊急かつ重大な課題となった。予想される温暖化の地理的分布を見ると、北極圏とその周辺での昇温が顕著であり、

全球温度が 3°C 上昇する場合、北極圏ではその 4 倍の 12°C もの昇温が予測される。これにより北極海の海水が 21 世紀半ばには完全に融解し、夏季には海水のないブルーオシャンとなるとの予測も出始めている。

## 6. 京都議定書

地球温暖化問題が深刻化するなかで、温暖化防止への世界的な取り組みは 1992 年に作られた気候変動枠組み条約(COP)に始まっている。1997年に第3回 COP 協議が京都で開催され、温室効果ガスの規制を宣言した京都議定書が採択された。これにより

2010 年前後までに温室効果ガスを 1990 年比で欧州は 8%、アメリカが 7%、日本が 6%、削減することが国際公約となった。しかし、二酸化炭素の排出は今日の我々の文明を支えるエネルギー産業と直結しており、その抑制は経済にも深刻な影響を与えることから、石油業界を支持母体とする米国のブッシュ政権は早々と京都議定書から離脱。それを追うようにカナダやオーストラリアも離脱した。一方、冷戦を終えて旧式機材の効率化が図られるロシアや東欧諸国では、1990 年比での二酸化炭素の削減は比較的容易とされる。しかし、1970 年代のオイルショックにより、既に省エネが進んでいる日本は、これ以上の二酸化炭素削減は容易でなく、2010 年には 6% 減らすべくところ、10% も増えてしまっている。

2005 年に京都議定書を批准した日本は、このままでは京都議定書で公約した 6% 削減を果たすことができない。その場合、国際排出権取引により、中国やロシアから二酸化炭素排出権を買い取って達成するより方法がないという状況も考えられる。試算によるとその場合、日本から支払われる税金の総額は 1 兆円と推定されている。地球温暖化問題の深刻さは各先進国では共有されており、2008 年夏の洞爺湖サミットで、当時の福田総理は 2050

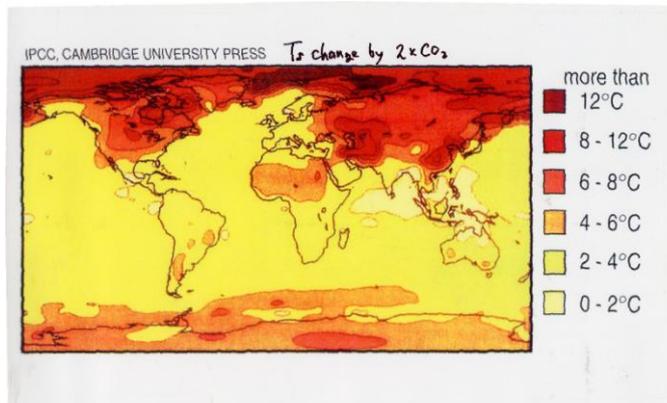


図 17 地上気温の将来予測の地理的分布

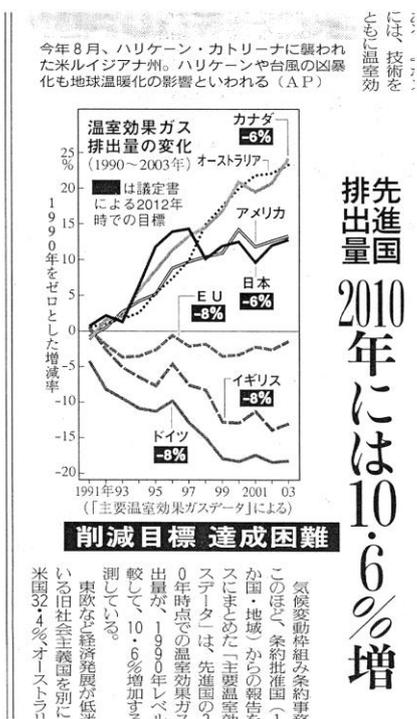


図 18 各国の二酸化炭素排出量の経年変化

年までに二酸化炭素を半減する努力目標を宣言した。自民党政権末期の麻生総理は2020年までに2005年比で15%の削減を目標に定めた。そして、民主党に政権が交代し、鳩山総理は最初の国連演説で2020年までに1990年比で25%の削減目標を国際公約として声高らかに宣言した。地球環境問題で日本が世界の主導権を握ることは良いことであろうが、鳩山イニシアチブを達成するために必要な国際排出権取引の総額は毎年2兆円を超えると見積もられている(JR 東海会長、葛西敬之 2009、文芸春秋の記事より)。この額の血税を、中国やロシアにみすみす手渡すことになるのであれば、日本の経済が沈没することは間違いない。

## 7. 21世紀の地球環境問題

人類が生み出した地球温暖化問題は、人類の英知で解決しなければならない重要な過大である。問題を棚上げにし、そのつけを子や孫の世代に残すべきではない。温暖化支持者は、「サイエンスの議論は終わった。もはや議論から行動へ。今行動しないと取り返しのつかないことになる。」と性急な決断と行動を求めている。一方、温暖化問題に懐疑的な温暖化否定論者は、「将来の温暖化予測には不明な点が多く、不確かな将来に数兆円もの血税は使うべきではない。」と反論する。

地球温暖化研究に携わる科学者としては、温暖化将来予測は真実が分からないので不確かではあるが、我々の最高の科学技術を駆使して予測した結果であることに間違いはない。温暖化の原因の一部が自然変動の可能性もあるが、最悪のシナリオにしたがって対策を講じる防衛原則を重視することも尤もである。ただし、温暖化支持者も否定論者も、少数の事例を材料に極論を展開している感がある。議論の振り子が片方に大きく振れ過ぎるときには、費用対効果を公正に分析し、バランスの取れた責任ある主張を行うことが求められている。

オゾンホール問題は、1987年のモントリオール議定書の採択により解決に向かっている。これは、問題の原因が明確であり、一部のフロン業者の首を絞める協定書を世界が採択すれば済んだからである。ところが地球温暖化問題に対しては、1997年に京都議定書を採択したものの、いまだに問題解決には至らない。これは、将来の温暖化予測は実際に将来にならないと分らない、という不確かさに加えて、削減しなさい、と首を締め付ける相手が実は自分自身であることによる。人類がもたらした地球環境問題を、人類は自らの英知で解決することができるのだろうか。子供たちに美しい地球環境を残してあげるためにも、皆で自然を正しく学び、問題点を議論して、振り子が一方に振れ過ぎることなく正しい判断を下すことが必要である。

おわり。 生命環境科学研究科・教授 田中博