

第2部

地球温暖化研究の最前線

温暖化問題は どこまで 解明されてきたか

第1章 | 地球の温暖化は本当に起こっているのか
- 地球観測が示すもの -

第2章 | 気候モデルと温暖化の予測

第3章 | 地球温暖化の影響とリスク

第4章 | 温暖化抑制政策の評価

第1章 地球の温暖化は本当に起こっているのか 地球観測が示すもの

1 1 はじめに

【 1 】水俣病

有機水銀中毒による慢性の神経疾患。しびれ・運動障害・言語障害・難聴・四肢麻痺などの症状を示し、胎児にも発現し、重症者は死亡する。化学工場の廃液中の有機水銀によって汚染された魚介類の摂食により、1953年頃から、熊本県水俣湾周辺に集団的に発生。68年に公害病と認定された。新潟県阿賀野川流域でも64年頃同じ病気が発生（第二水俣病）。

【 2 】四日市ぜんそく

四日市市の塩浜地区に居住する、主として中高年以上の人に見られる気管支喘息。この地域の空気が工業団地から排出される高濃度の硫酸酸化物によって汚染されることに起因する。1972年公害病に認定される。

【 3 】放射強制力

ある因子が地球と大気システム間に出入りするエネルギーのバランスを変化させる影響力の尺度であり、気候を変化させる可能性の大きさを示す。放射強制力は、 1m^2 当たりのワット数 (Wm^{-2}) で表される。

公害という環境問題が日本で認識されるようになったのは、第2次大戦後の復興の最中である。有名な所では、水俣病【 1 】や四日市ぜんそく【 2 】などが、50年代から60年代にかけて数多くクローズアップされた。日本が産業大国であると同時に公害大国でもある、と言われ始めていたのもその頃である。

これらの公害問題の被害はその発生地域周辺に限られていたために、汚染物質の排出削減や汚染除去などがある程度効果を上げることができ、今では公害の数もずいぶん減ってきている。

しかし一方では、地球温暖化という新しい環境問題が発生しつつある。この問題が今までと違う所は、世界規模で発生しているという点である。その規模の大きさをゆえに、今まで誰も全体像を把握することができなかったほどである。

しかし、2001年のIPCC第3次報告書では、平均地上気温が20世紀の間に約0.6 上昇（この気温上昇は過去1000年のどの世紀よりも大きかった可能性が高い）していることや、また衛星データによる60年代以降の雪氷面積の減少、海洋の貯熱量の増加など、様々なことが分かってきており、地球の温暖化の傾向はよりはっきりしてきたと述べている。

このような現在と過去の気候の調査によって、世界的な温暖化についての全体像が明らかになりつつある。さらに、温暖化に影響を与えると考えられている、人間活動によって排出された二酸化炭素などの温室効果ガスおよびエアロゾルなどの大気中の濃度が、ますます増加していることが、多くの観測から示されている。

これらの人間活動による大気成分の変化が、その放射強制力【 3 】を通じてどのように地球の温暖化に関係しているかについて詳細な検討が行われている。この検討には、過去数10年間の太陽放射の変化、大規模な火山の噴火によるエアロゾルの生成などの自然界で発生した気候要素も含まれている。

IPCC第3次報告書では、総合的に見て、ここ50年の間に観測された温暖化のほとんどが人間活動による可能性が高いという結論を出している。

本章では、地球温暖化の直接の指標となる気温、水温の長期的な変動がどうなっているかをまず記し、さらに地球温暖化と直接関連する、山岳氷河の動き、海水面の上昇などがどうなっているかを示すことに

する。

次に、20世紀後半の気温の上昇が、人間活動の結果であると考えられている根拠について簡単に解説する。

そして最後に、地球の温暖化を引き起こしていると考えられている温室効果ガスの変動がどのように観測されているのか、また、温室効果ガスとして重要な炭素の循環が、どのように維持され、何が変化を引き起こす要因になっているのか、などについてその観測方法や成果をまとめることにする。

1 2 地球の気候はどのように変化してきたか？

1 | 2 | 1 地球表面の気温は何で決まるか？

気温や降水量など地球上の気候は、基本的には地球への太陽からの放射エネルギーと地球から宇宙空間に放出される放射エネルギーとのバランスによって決められている。

しかしそれ以外にも、自然や人間などが外部から様々な影響を与えている。その影響を見るのに、すでに述べた放射強制力という考え方を使うと分かりやすい。

たとえば、太陽放射の変化や大規模な火山噴火などは自然を起源とした外部要因であるが、これらも放射強制力の変化として見ることができる。

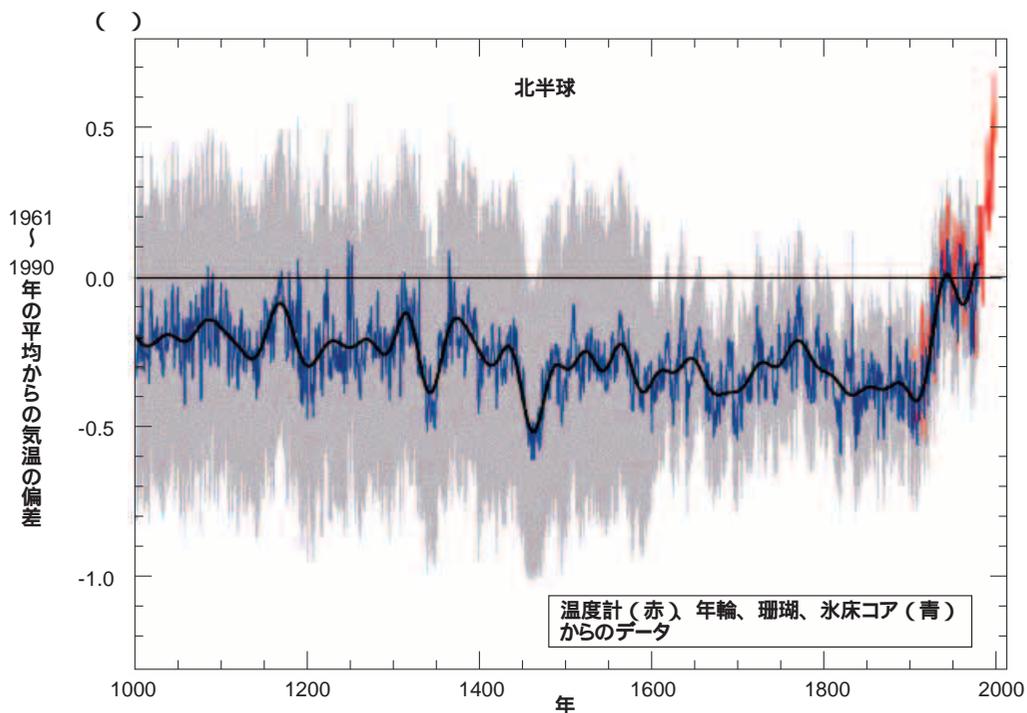
具体的にいうと、火山噴火は太陽放射を遮ることによってマイナスの放射強制力（地表を冷やす）を持つがその効果は数年しか継続しない。逆に、人間が主に生み出す二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素などの温室効果ガスはプラスの放射強制力（地表を暖める）を持つため、これらが増加すると地球の温暖化に結びつくことになる。

したがって、放射強制力を与える大気を構成する物質の変動を観測し、さらにこれらの物質がどの位の放射強制力を持つかに関する理解を深めることが重要である。

さらに、大気中の二酸化炭素、メタンなどの炭素循環のカギとなるプロセスを理解し観測することも、「温室効果ガスの大気濃度の将来予測」を進めるためには大切なことになる。

1 | 2 | 2 陸域における気温・気候の変化

IPCC第3次報告書では、樹木の年輪、サンゴ、氷床のコアなどから情報を得て解析した、過去1000年間の北半球の地上気温の変化が示されている【図1】。



【図1】 過去1000年における北半球の地上温度の変化 (IPCC, 2001) 青い実線は各年の年平均気温偏差、陰影部はその誤差範囲を示す。黒い実線は年々の変動を除去するための50年平均値を、又赤い実線は温度計による観測値を示している。

【4】

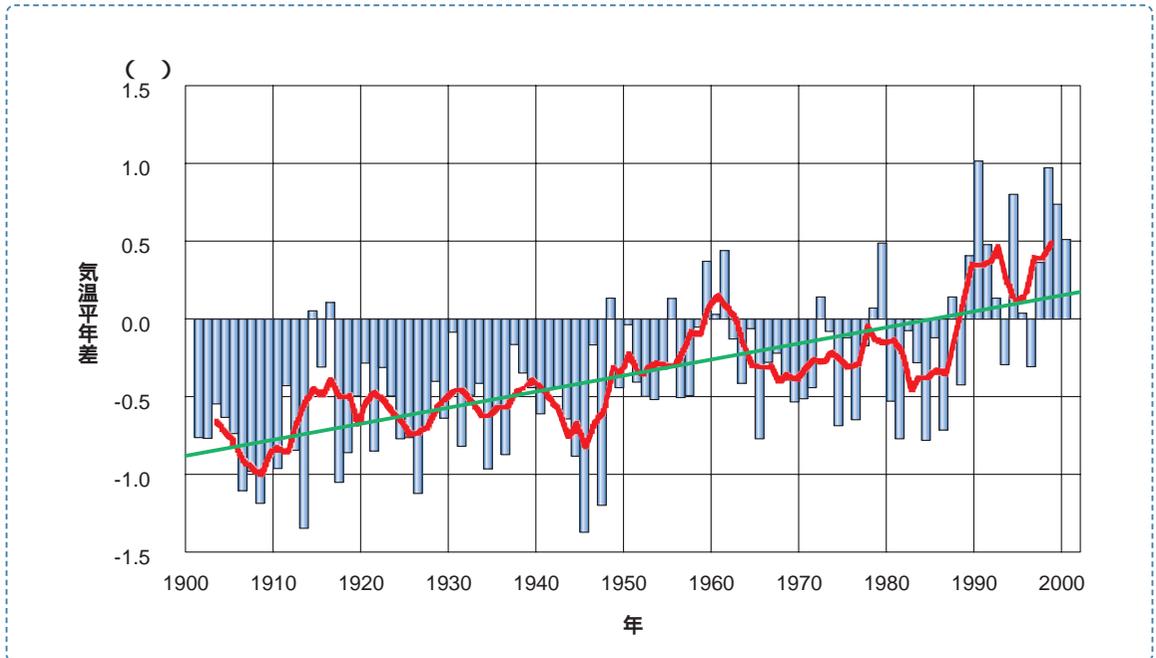
網走、根室、寿都、山形、石巻、伏木、長野、水戸、飯田、銚子、境、浜田、彦根、宮崎、多度津、名瀬、石垣島の17観測点

この図は1961～90年の年平均気温からのずれで気温変動を示しているが、過去900年にわたって下がる傾向にあった気温が、20世紀になってから急激に上昇してきたことがわかる。

このような気温の上昇は、日本でも観測されている。気象庁は1901年以降、都市化による人為的な気温変動が少ない観測点17【4】を全国から選んで、20世紀の年平均の地上気温の変化を調べている【図2】。

日本では、1940年まで低温で推移してきた気温が、60年代および90年代に急激な上昇を示しており、20世紀を通しての気温上昇は約1.0と世界全体の平均上昇率よりも明らかに高い(地球全体で見ると、20世紀の気温の上昇率は約0.6)。

日本は北半球の中緯度に位置しているが、このような地域は高緯度地域での大陸の積雪が減少するなどにより、日射の反射が減少し、より温暖化しやすいことが指摘されている。



【図2】日本の年平均地上気温の経年変化 1901～2000年（気象庁，2002）棒グラフは各年の平均気温の平年との差、赤のおれ線はその5年間の移動平均を示す。又緑の実線は長期的傾向を示したものである。

1 | 2 | 3 | 海域における水温変化はどうなっているか？

海洋は地球表面の7割を占め、大気との間で熱と水蒸気を交換することで陸の気候を大きく支配している。

海洋は、大気と同じ流体でありながら、熱を蓄える容量は大気に比べ1,000倍と大きいため海水温は容易には上昇しない。また、熱を伝えるプロセスである移流（空気や海水の移動によって、水蒸気・塩分・圧力・熱・密度・運動量などが運ばれる過程）と拡散は遅い。したがって、表層は大気の気温変動に比較的早く応答するが、それが中層・深層では数年以上かかるゆっくりしたものになり、より長期的な影響力を持つという特徴を持っている。

海水温は、その緯度の季節によって変動するが、年を越えた周期的な変動もある。

たとえばエルニーニョやラニーニャは太平洋赤道域で大規模な水温の変化を起こすが、これには明らかに数年ごとの周期性が認められる。

その周期性の原因は、気候システムを決める多くの要因によって起こる現象であると考えられているが、その発現頻度、持続時間、強度は100年前に比べると増大している。

以上のことを踏まえると、陸地で見られる温暖化傾向が海水温にも現れているかは、一概には言えず、長期的な観測によって確認するこ

とが必要である。

外洋の海水温度の変化が、長期間にわたって観測されている報告例は少ないが、バーミュダ沖で、1922～1995年にわたって観測を行ったとの報告がなされている（Joyce and Robbins, 1996）。

それによるとこの亜熱帯海域の深層水（水深約1500～2500m）では、長期的な水温の上昇傾向（100年で0.47℃）がはっきりと出ている。この上昇値は海水の体積が膨張することによって、100年あたり約7cmの海水面の上昇を引き起こす海水温の上昇に相当する。

しかし、このバーミュダ沖の深層水で観測された結果とは逆の水温低下が、大西洋の亜寒帯域の深層水では見られており、パミュダの結果が大気の温暖化を反映しているかどうかは不明である。

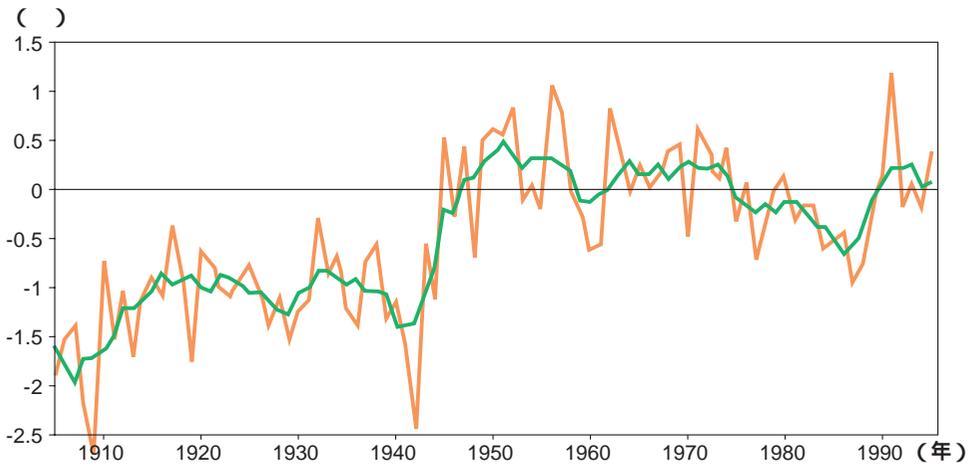
一方、過去50年にわたる全海洋での水温の観測データを用いて、表層から3000mの深さまでを平均して観測値を整理した研究では、これまでに約0.05℃水温が上昇していることが示されている。

これらの観測は、地球の気候システムの中で巨大な熱の貯蔵庫である海洋も、地球表層の温暖化の影響を受けているらしいことを示している。

北太平洋中部の海面水温の冬季（12～2月）における年間偏差を約100年にわたって示したデータを気象庁が発表している【図3】。

この図は、神戸海洋気象台で集められた、主に20世紀初頭からのデータ（北太平洋中部の商船、漁船、観測船、旧海軍などのデータ）にアメリカで作成された総合海洋気象データセット（COADS）【5】を加え

【5】総合海洋気象データセット
アメリカ気候データセンター（NCDC）において、海の地図を作成するために収集されたデータを基礎とし、他機関の協力を得て1854年以降の全世界の海洋気象データを収集したもの。



北緯36度から48度、東経140度から150度で囲まれた海域における、冬季（12～2月）の海面水温の年間偏差。橙線は毎年の値、緑線はその5年移動平均。又、平均値は1961～1990年の30年間の平均値。

【図3】北太平洋中部の海面水温の冬季における年間偏差1905～1995年。（気象庁，2002）

て作られたもので、長期の気候変動を知るには貴重なデータである。

この図をみると、北太平洋中部で1940年代に海水温が1℃以上急激に上昇したということが分かる。

1 | 2 | 4 | 氷河、海氷などに温暖化の影響は出ているだろうか？

地球温暖化の影響を示す観測結果として、よく取り上げられるのが地球上に広がる山岳氷河、あるいは両極域の氷床や海氷である。

氷河や山岳氷河の水としての総量は地球上に存在する水の約2.1%を占めており、氷河の動向は気候変動の指標となるばかりでなく、海水面の変化にも直接の影響をもたらす。

衛星などによる北極海の海氷の観測によれば、夏期の海氷の大きさは1950年代と比較すると10～15%減少しており、これは北半球の高緯度で春の気温の上昇と一致するとの報告がある。

最近では、アメリカ、ロシア両国の潜水艦の観測によって、北極の海氷の厚さはこの数十年で明らかに減少していると報告されている。

また、世界の限られた地域であるが、この数十年間における山岳氷河の衰退も見られる。しかし、南極の氷床に関しては、衰退などの報告はされていない。

日本では、富山県の剣岳などで雪渓の厚さが薄くなっていることが確認されており、これらは温暖化に関係しているものと思われる。

それらの中で、一番資料が豊富な長野県の諏訪湖を例にとってみよう。

諏訪湖では冬季に湖が全面凍結したあと、その後の低温で、湖水が線状に盛り上がる「御神渡り（おみわたり）」【6】といわれる現象が見られる。この現象が諏訪大社の神事と結びついているため、1443年以降から記録が残されており、過去数百年の冬季の気候変動を知るための資料としては貴重なものだといえる。

この【図4】のうち、1898年以降は実際の観測値であり、それ以前が、結氷時期と冬季気温の相関から求めた推定値である。

近年ではこの「御神渡り」の現象がまれにしか見られなくなっており、暖冬が継続していることの影響と考えられる。しかし、湖水の汚染なども影響すると考えられているので断定はできない。

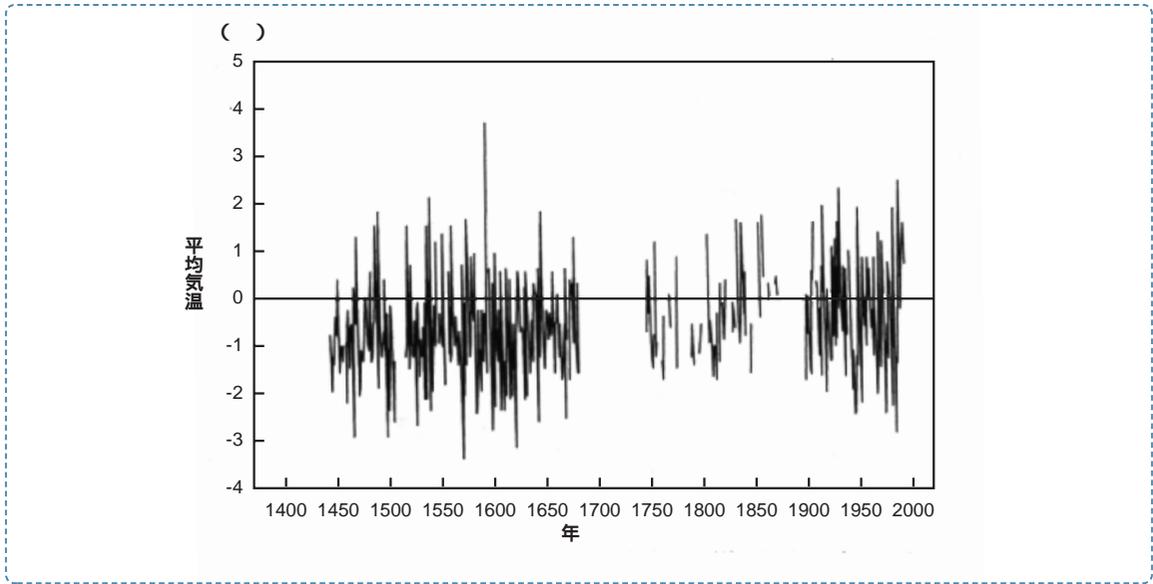
温室効果ガスが増加することにより、地球上の水循環にも影響を及ぼすと考えられている。

近年、頻発する大規模な自然災害も、熱帯性低気圧による洪水などの極端な降水現象や干ばつであることが多く、世間の注目を集めている。

しかし、過去約20年間の世界における降水量は、二つの大きなデータソースを使って調べてみても、減少傾向あるいは大きな増減は示されない。このことは、これまでの地球温暖化のモデルの多くが結論づけた、温室効果ガスの増加による温暖化とともに地球全体で水の循環が活発になり、降水量も増加するという予測とは相容れないものになっている。

【6】御神渡り

諏訪湖で見られる氷の亀裂現象。湖面が全面結氷した後、低温が続くと夜間の冷え込みで氷が収縮してひびわれが生じ、この部分の湖水が再結氷し、朝の昇温に伴って氷が膨張し、割れ目の部分を押し上げて氷堤を作る。諏訪大社の祭神が上社から下社へ渡った跡として、亀裂の方向で吉凶を占う。



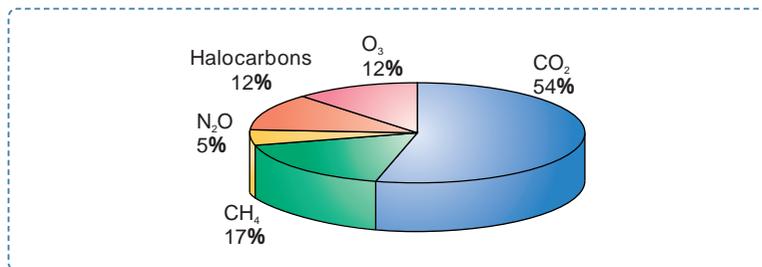
【図4】 諏訪湖結氷期日から推定した諏訪の冬季（12月・1月）の平均気温の約500年における変化。（三上・石黒, 1998）

1 3

気候を変える大きな要因としての大気中の温室効果ガス・エアロゾル濃度は、どの様に変化してきたか？これからどうなるか？

地球の温暖化は、化石燃料を消費したり森林を伐採するなどの人間活動により、大気中に二酸化炭素などの温室効果ガスが蓄積されて引き起こされる。温室効果ガスを世界各地で長期に観測するモニタリングが、問題を理解し、将来を予測し、どの様な対策を立てるかを定めるために重要である。

大気中の水蒸気が最も重要な温室効果ガスであるが、その濃度は人為によらない気候システムの中で決まり、一般的には分けて扱う。次いで重要なのが二酸化炭素であり、その他を含めて、その割合は【図5】のようになっている。



【図5】各種温室効果ガスの温暖化寄与率

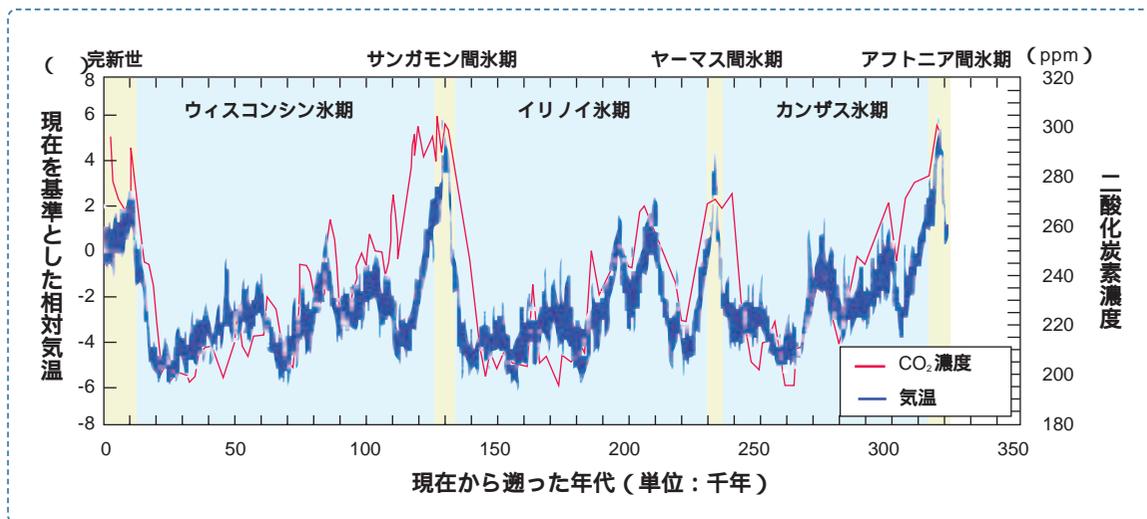
大気中二酸化炭素濃度の上昇量を一定程度に抑さえ濃度を安定化させるには、人間活動に伴う二酸化炭素の大気への放出量を削減するとともに、大気からの吸収・固定量を増大させることが必要である。植林等森林生態系の適正な管理が、その吸収・固定量を増加させるのにどの程度有効であるかをはっきりさせることが、1997年12月の京都における気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）以降重要な課題となっている。

1 | 3 | 1 過去数十万年の記録は南極の氷の中にある

人類が大気中の二酸化炭素を観測し始めたのは、後で述べるように45年前でしかない。それより前の濃度がどうであったかは、南極やグリーンランドに積もった雪の間に大気が閉じ込められ、さらに上に積み重なった雪により固められ氷になったものを掘り出して、その中に含まれている空気を分析することにより分かる。わが国では国立極地研究所が東北大学などの協力を得て、こうした測定を行っている。

今より32万年前からの二酸化炭素濃度と、その時の気温を【図6】

に示した。気温は、氷の水分子の中に含まれる酸素の同位体（ ^{18}O ）の割合から推定できる。この図を見ると分かる通り、約10万年おきに二酸化炭素の濃度や気温の高かった時期があることが分かったが、二酸化炭素がどのような理由で増え地球が温暖化したのか、逆に、どのような理由で温暖化が進み、二酸化炭素が増えたのかについては、未だ議論が分かれている。



【図6】南極ドームふじで採取した250m深の氷を分析して得られた過去の二酸化炭素の濃度。気温は氷の水分子の酸素同位体比から推定。(Kawamuraら, 2003)

1 | 3 | 2 | 最近の直接観測の結果は、人為的な排出や気候の変動と連動している

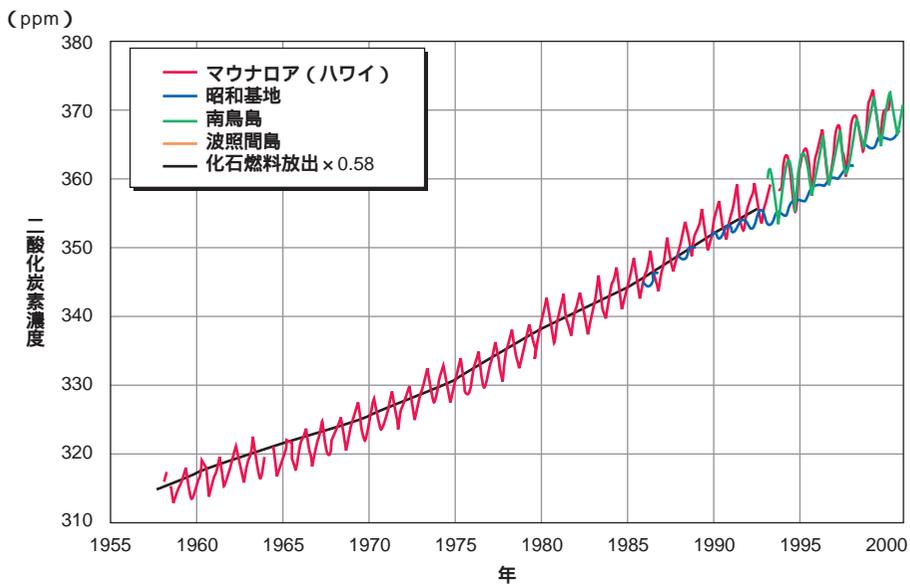
1958年にハワイ島のマウナロア山や南極点でKeeling博士によって大気中の二酸化炭素の濃度測定が開始された。これと南極の氷の分析データとはよい連続性があり【図7】、産業革命以前の人間活動の小さかった時代の二酸化炭素濃度は280ppm程度であった事が分かる。

現在では人為や森林の影響を直接受けないバックグラウンドと同様に見なせる場所での定常的な観測は、わが国が実施している数力所、綾里、南鳥島、与那国島（気象庁）波照間、落石（国立環境研究所）昭和基地、スパールバル諸島（国立極地研究所・東北大学）を含め世界の約30か所余りで行われており、その他に定期的に容器にサンプリングして分析している場所が100か所近くある。



【図7】過去250年間の大気中二酸化炭素濃度の変動。1953年以前は南極の氷に含まれる空気から、それ以降は南極点での大気観測データから作成。(Machida, 1990に加筆)

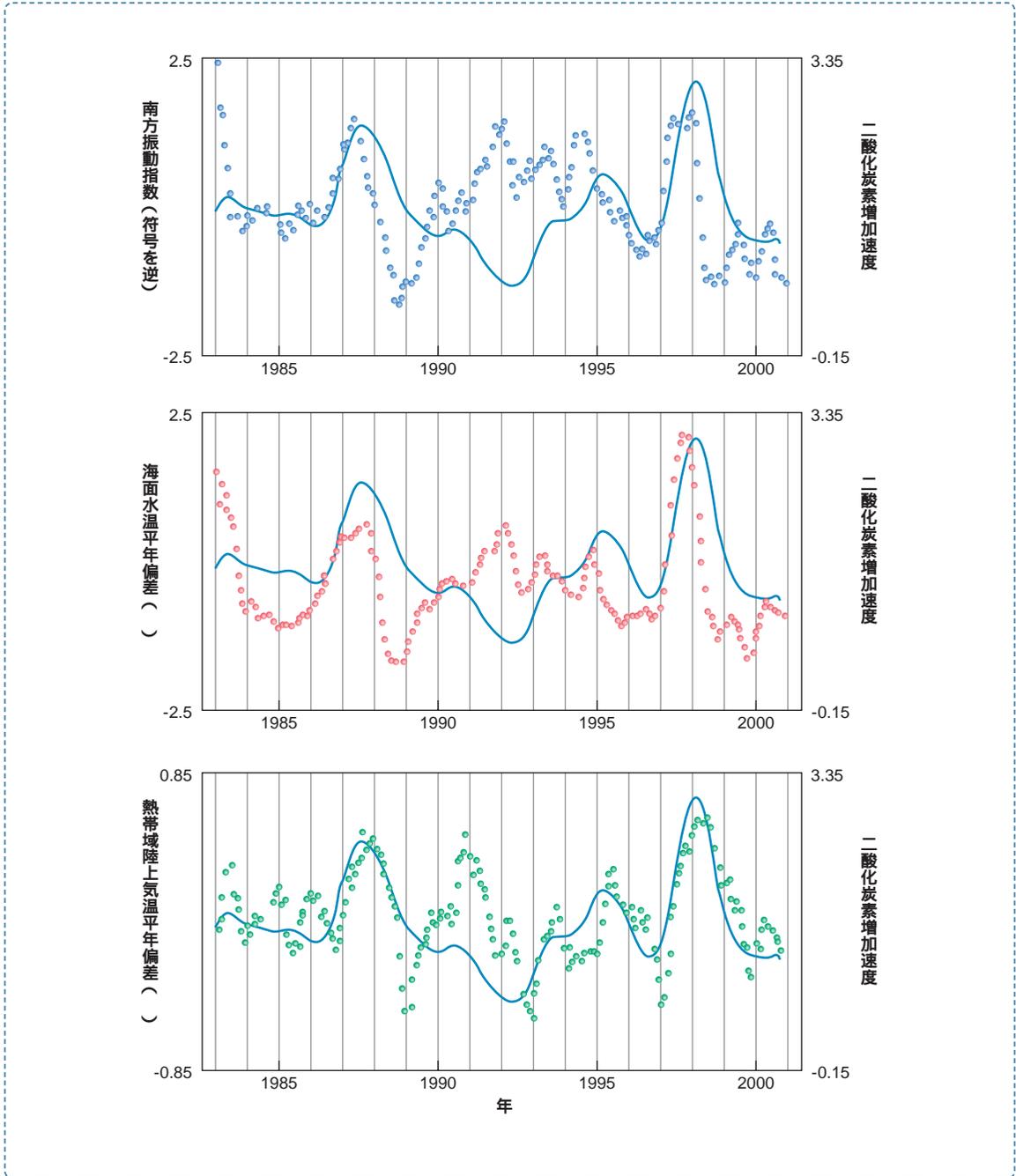
【図8】にアメリカのNOAAが行っているマウナロア、さらに日本が行っている南鳥島、波照間島、昭和基地の観測結果を示す。前三者の観測結果は、ほぼ同様な季節変化を繰り返しつつ増加を続けている。これに対し南極の昭和基地のデータは季節変動が極めて小さいのが特徴である。季節変化を見てみると、春先に濃度が最大となるが、陸域の森林が光合成により二酸化炭素を吸収する結果、活動が終わる秋口まで濃度が減少し、その後は土壌や植物の呼吸による二酸化炭素の放出により再び増加する。同じ緯度では大気の循環で混合しやすいため、緯度ごとにほぼ同じ振幅で季節変動が繰り返されている。森林の割合が大きい北半球高緯度ではその振幅が大きく、森林のない南極では極めて小さいことを【図8】は示している。



【図8】ハワイ島マウナロア(NOAA)、南極昭和基地(国立極地研究所、東北大学)、南鳥島(気象庁)、波照間島(国立環境研究所)での長期の大気中二酸化炭素観測データを取りまとめたもの(WMO WDCGGより)。黒実線は化石燃料消費による二酸化炭素放出量の積算値の58%に相当する濃度。

季節変動はほぼ周期的なのでこれを取り除き、長期の増加成分を抽出する事ができる。この増加分を人為的な二酸化炭素発生量の積分値の58%と比較すると驚くほど一致しており、長期の二酸化炭素の増加は人間活動の結果であること、その内、約6割が大気中に蓄積されていることが明らかである。

詳細に見ると、その長期の増加速度は一定ではなく、年により異なる事が分かってきた。熱帯域の二酸化炭素増加速度を、エルニーニョ/ラニーニャの指標、海面温度、気温と共に表示したものが【図9】である。1990年代前半はピナツボ火山の噴火による影響で通常と異なるが、気温の偏差との関係が強いことが分かる。この事実は地球の温暖化により二酸化炭素濃度の増加が加速される危険性を示唆している。



【図9】 熱帯域 (30°N - 30°S) における大気中の二酸化炭素濃度増加率と南方振動指数 (SOI) (上)、海面水温年偏差 (中)、熱帯域の陸上気温年偏差 (下) の変化。陸上気温偏差は、NCEP再解析データ (1000hPa面気温) から求めた。実線が濃度増加率、丸が各要素の5か月移動平均値を示す。(WMO WDCGGデータベースから気象庁が作成)

1 | 3 | 3 | メタン、亜酸化窒素、CFC、オゾンなど、その他の温室効果ガスは？

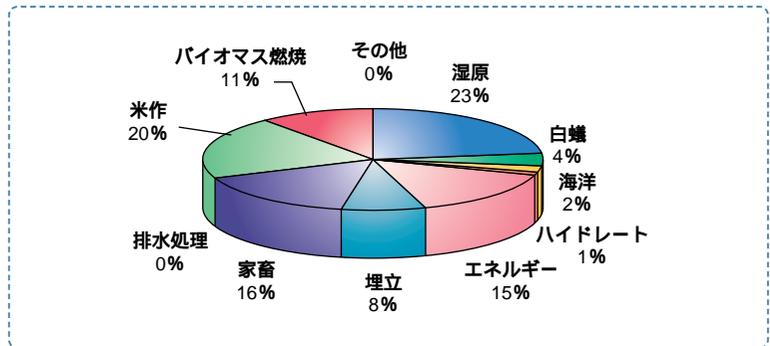
【 7 】ハロゲン化炭化水素

フロンガス、ハロンガス、フロン代替ガスなど、フッ素、塩素、臭素を含む炭化水素。フロンガスによる成層圏オゾン層破壊が問題となり、フロンガスとハロンガスは1989年モントリオール議定書で廃止が決まった。

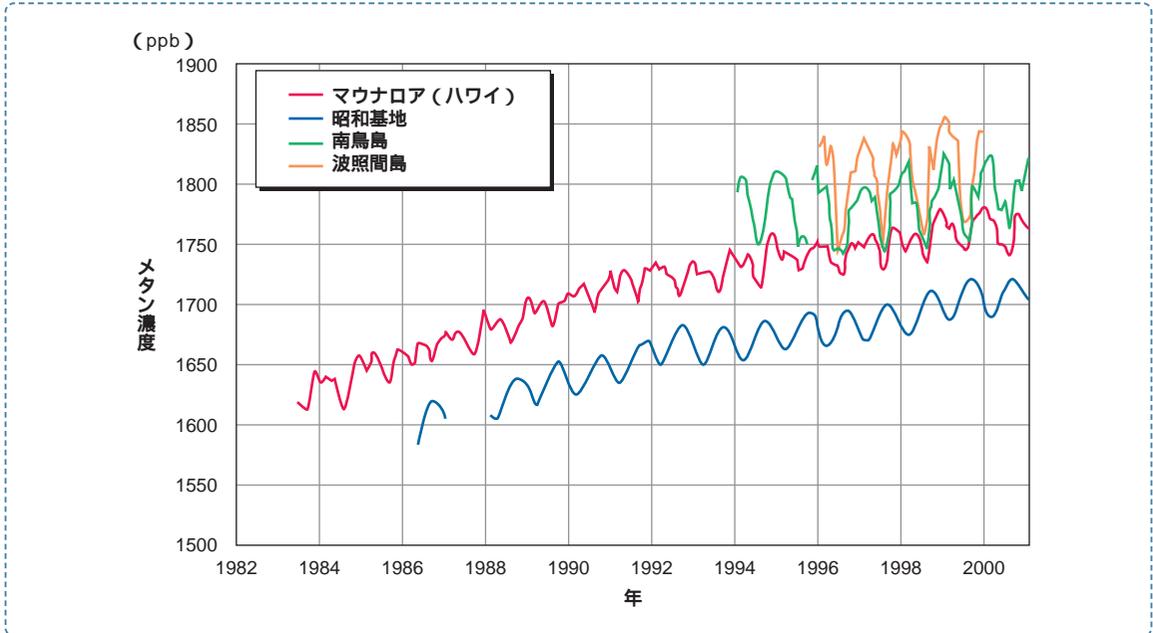
【 8 】オゾンホール

酸素に紫外線が当たるとオゾンという物質に変化する。オゾンは、特有の臭いのある気体で生物に有害な紫外線をさえぎる性質があり、地球上をおおうオゾン層は、生物を有害な紫外線から守っている。オゾンホールとは、オゾン層が破壊されることによってオゾンの量が少なくなってしまい、毎年9月から10月にかけて南極上空で穴があいたかようになってしまう現象。

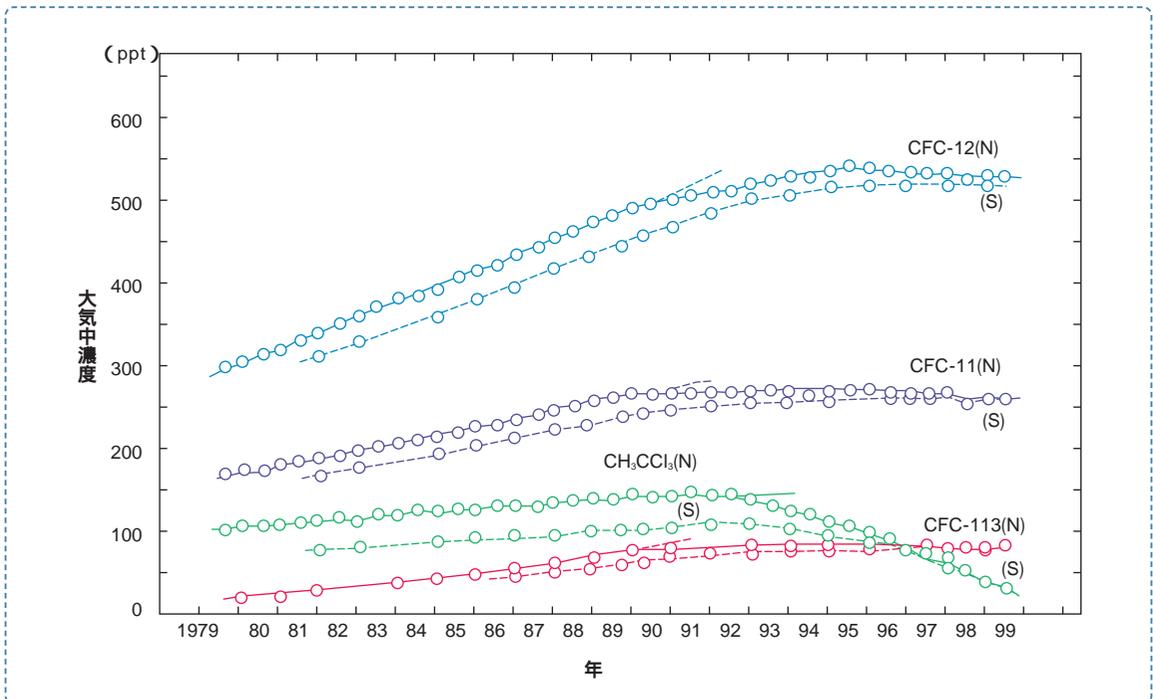
メタンの発生源は様々であるが【図10】、大気中の蓄積速度は遅くなっている【図11】。その理由はメタン濃度が高まり大気中での除去速度（大気中のOHラジカルとメタンの反応）が大きくなっているため、それと発生量がバランスしてきたためと考えられている。亜酸化窒素は対流圏の大気中で安定であり、成層圏に到達して初めて光化学反応で消滅するので寿命は110年以上あり、発生量は大きくないが着実に増加している。ハロゲン化炭化水素【 7】(CFC)【図12】はオゾンホール【 8】の発見を契機に成層圏オゾン保護のため全面的に生産が禁止されたため、1990年代前半からその増加が止まり、その寿命は45年(CFC-11)から640年(CFC-13)と長いにもかかわらず減少に向かいつつある。このようにハロゲン化炭化水素に比較して、二酸化炭素などの排出は現代の科学技術文明に根ざしており短期に大幅な削減を実施困難なことであるが、温室効果ガスの削減の努力をすれば、大気中濃度は確実に減少に向かうことがよく分かる。



【図10】メタンの発生源別の割合



【図11】ハワイ島マウナロア（NOAA）、南極昭和基地（国立極地研究所、東北大学）、南鳥島（気象庁）、波照間島（国立環境研究所）での長期の大気中メタン濃度観測データを取りまとめたもの。（WMO WDCGGより）



【図12】大気中の主なハロゲン化炭素濃度の変動（東京大学による測定、N: 北海道、S: 南極昭和基地）（環境省, 2001）

【 9 】硫酸ミスト

火山爆発で成層圏まで届いた亜硫酸ガスや、工場や生物が作り出したもののうち水に溶けにくいために成層圏まで運ばれた亜硫酸ガスは、光化学反応で硫酸ミストと呼ばれるエアロゾルとなる。地上の光化学スモッグ時に視程を悪くしているものがこれである。

硫酸ミストとは、有毒な二酸化硫黄が、大気中において微細な浮遊粒子の表面をおおっている水の膜に溶け、紫外線による光化学反応によってさらに毒性の強い三酸化硫黄となったものである。いわば「硫酸の霧」ともいえるものである。

化石燃料消費に伴う窒素酸化物の排出増で、光化学反応により生成する対流圏オゾンが増加している。さらに、化石燃料消費に伴って排出される二酸化硫黄(SO_2)などが大気中で酸化され硫酸ミスト【 9 】などが生成し、また、燃焼による煤などにより大気中のエアロゾルが増加している。前者はそれ自体が太陽光を散乱したり、雲生成を活発化して太陽光をさえぎるので寒冷効果があると考えられている。また、後者は光を吸収するので温室効果があるとされている。しかしながら、現在のところエアロゾルが増大しているという確実な観測結果は得られていない。これらは短寿命であるため、寿命の長い温室効果ガスとは異なるが、定常的には気候に大きな影響を与える。