

地球温暖化と気候変動

原田朗（昭和 33 年卒、元気象研究所長）

はじめに 地球温暖化や気候変動という用語は、昭和の中頃まではまだ耳慣れない専門用語だった。昨今は、報道はもとより、国際政治の舞台で議論されるようになった。これは化石燃料の急速な大量消費が地球大気に温暖化をもたらし、ひいては気候変動に及ぶことが行政や政治の理解を得るようになったからである。一方、大学における学術研究の分野では、昭和 41 年（1966）には京大防災研究所に災害気候部門が設置され、中島暢太郎先生（昭 21 年卒）が教授に就任され、気候変動に関する研究が始まっている。これは、気候や気候学、また気候変動の研究を地球物理学的観点から行おうとしたものである。地理学の延長にあった気候学は、ここで地球物理学の一分野に変貌しつつあった。その後、昭和 61 年（1986）には、理学部に気候変動実験施設が設置され、山元龍三郎先生（昭 26 年卒）が施設長に就かれた。以後、気候の語を冠した組織は方々に設置されるようになった。筆者はかつて職務において二酸化炭素等の温暖化物質の観測体制、また温暖化や、それがもたらす気候変動に関する諸問題に関わってきた。ここでは、温暖化と気候変動問題に関する気象界の関わりを紹介したい。

地球の平均気温 地球表面の寒暖について、年間の全球平均気温を想定すれば、大気の無い地球ではおおよそ -20 になる。この温度は、地球と太陽間の距離で定まる。一方、現大気に覆われた現実の地球では、おおよそ 15 である。両者の差は、地球大気による温室効果の結果である。それは、大気中に含まれている水蒸気や二酸化炭素などが地球の赤外放射を吸収し、かつ放射して地球を暖めることによるが、わずか 0.04% だけ含まれている二酸化炭素による効果が大きい。二酸化炭素を温室効果気体と呼ぶのはそのためである。 CO_2 以外にも、大気中には多くの微量な温室効果気体が存在するが、量的には CO_2 の影響がもっとも大きい。この CO_2 濃度が増せば地球の地上気温は上昇する。これは放射理論の示すところである。ところが 20 世紀になると化石燃料の大量消費が進み、大気中に大量の CO_2 が排出されるようになった。 CO_2 濃度の上昇は地球の気温上昇を予想させるが、観測結果もそのことを示している（図 1）

地球史上最速の気温上昇 この大気に覆われた地球の平均地上気温は、地球の歴史の中では、いくども上昇下降を繰り返してきた。長い地質時代を経て、人類の先祖が生き抜いてきた過去 100 万年の間も、氷期と間氷期が繰り返されてきた。そのときの気温の変化を見積もってみると、大まかに見て、 $0 \sim 10$ 、経過時間は万

年～10万年と推定されている。ところで過去100年の地球の地上平均気温の推移は、図1に見るように、上昇下降を繰り返しながらも、近年着実に上昇している。この図の右側半分を見ると、100年間におよそ1℃ほど上昇したことが読み取れる。先の氷期間氷期が繰り返す気温の推移と、この過去100年の地上気温の推移を上昇率で比較すると、最大に見積もった前者の数値より後者の数値が2桁も大きい。これは、同図の右半分に見る全球平均地上気温の上昇が人類が経験する地球史上最速の気温の上昇であることを示している。人類社会はこの急激な気温の上昇に対応出来るのだろうか。地球温暖化による気候変動の問題はそれが問われている。

気候モデルによる気温予測 昭和30年代の初期には、気象庁の気象観測は、まだ手回しの計算機と計算尺が用いられていた。一方、電子計算機の実用化が始まり、急速にその計算能力が向上しつつあった。そこでは気象予測がもっとも有効な利用分野だと考えられた。従来から数値モデルによる天気予報の研究を進めていた気象界では、電子計算機による気象予測の研究が進められた。米国に渡った真鍋淑郎は、天気予報の数値モデルを気候予測に適用し、ハーバード大学と米国気象局が運営する研究施設でCO₂濃度を2倍にした大気の気温予測の研究を行い、3℃ほど気温が上昇するという結果を発表した。1968年のことだった。後に真鍋氏の研究にはブループラネット賞(1992)が贈られた。以後今日まで、この研究を拡張し精度を高めて、方々の研究機関で気候の数値モデルの研究が進められている。

二酸化炭素濃度の観測 真鍋氏はCO₂濃度を倍増した大気を扱ったが、一方では現実の大気でその濃度を測る必要があった。しかし測定場所を選定して常時測定を行う実務は意外に困難なことであった。人間活動からも自然の植生からも、自然の大気のCO₂濃度が影響を受けない場所で測定したい。人為活動があればそこには有機物の燃焼がともないCO₂濃度に変化をもたらす。植物は、季節に従い、日夜に応じCO₂の取り込みと排出を繰り返し、大気のCO₂濃度を変化させる。このような影響を受けない場所で測定しなければならない。地球大気のCO₂の増減は把握できない。絶海の孤島の裸山かその砂浜以外に適地は見つからない。

そのような場所に測候所をもうけて1968年から観測を続けているのがハワイ島の4000mの山頂にあるマウナロア観測所である。図2にみる1年周期のCO₂濃度の変動は、北半球の植生によるCO₂の取り込みとその腐食によるCO₂の放出によってもたらされたもので、北半球の生態系による息吹を捉えたものと理解することができる。

ところで日本付近でそのような場所を求めるのはきわめて困難である。ところが早くから候補に挙がっていた適地があった。太平洋の孤島南鳥島で、そこには東京から南東1200kmの洋上に海底火山の頂上を覗かせた標高わずか8mの島で、ようやく1300mの滑走路一本を建設することができる定住者のいない珊瑚礁である。世

界的にまたとないCO₂観測所である。商業交通のないこの孤島で、1993年から気象庁は観測を継続している。

世界気候会議と国連 IPCC CO₂濃度が倍増するかもしれない50年後、100年後の気温予測の研究を生み出し、マウナロア山頂のCO₂濃度の着実な増加と過去100年近くの地球大気平均気温の推移を見届けていた気象関係者は、気象機関の長で構成する国連の世界気象機関WMOの会合である「世界気候会議」の例会開催の折、

はじめて「世界気候会議」を開いた。1979年のことである。もとより気象災害対策に取り組んでいた同会議のメンバーは、温暖化による気候の変化がもたらす気象災害を懸念し、新時代の気候科学の研究の必要性を決議した。さらにこの会議は、気候問題は政治経済と科学が結合した問題だという認識に立って、化石燃料の消費に関する政治経済界における国際間の議論が必要なことを提唱した。化石燃料の大量消費で成長し発展してきた20世紀の経済産業界は、この世界気候会議の成果を前向きには受け止めなかった。しかしこの気候会議の決議は、国連の下部機構である「世界気象機関」WMOと「国連環境計画」UNEPに「気候変動に関する政府間パネル」IPCCの設立を促すことになった。その第1回会合は1988年に開催された。各国代表からなる本パネルは三つのワーキンググループWG1、WG2、WG3よりなり、WG1は気候変動の科学的知見について、WG2はその影響について、WG3はそれに対して今後とるべき戦略の研究についてそれぞれ行動を開始した。各国から代表が集まって議論をし、報告書をまとめては公表してきた。筆者は、かつて第8回と9回のパネルの総会で日本代表を勤めてきた。昨年は第27回のパネルが開かれ、第4次報告書が発表された。

IPCC 第4次報告書の概要 気候問題については、世界各国にはそれぞれの立場があり意見がある。異なった意見の持ち主に広く理解を得るために、報告書は各方面の文献を引用し、分厚い印刷物になっている。ために利用者の便宜を考慮して、報告書には「政策決定者向け要約」が付されている。第4次報告書の要約の要旨を見ると、

温暖化：疑う余地はない、気温は過去100年に0.74 上昇した、

海面水位：1961年以降年に平均1.8mmの速度で上昇した、

21世紀末の気温予測：温室効果ガス排出量2000年固定大気で0.6 上昇、各種想定排出量シナリオ大気では0.6~4.0 上昇する、

21世紀末の水位予測：0.2~0.6m 上昇する、

気候変化の観測結果：降水量；1900~2005 南北アメリカ東部、ヨーロッパ北部、アジア北部中部でかなり増加した、サヘル地域、地中海地域、アフリカ南部やアジ

アの一部では減少した、強い熱帯低気圧が 1970 以降北大西洋でその強度が増加した可能性がある、大雨の発生頻度；増加した可能性大、陸域の熱波の発生頻度；増加した可能性大、

北極の海氷面積：1978 年以降の衛星データによると 10 年間で 2.7%縮小した、などが列記されている。

この膨大な報告書は、世界の第一線にある科学者の意見を集約し、専門家の修正意見を繰り返し取り入れ、最終的にパネルの総会で承認されたものである。1991 年に第 1 次報告書が公表され、このたび 2007 年に第 4 次報告書が公表された。そこに示されている文面は、次数を重ねるごとに科学的知見はより高度になり、報告書の国際政治への貢献度の向上が認められる。たとえば第 2 次と今回の報告書で数値の表現を比較すると、第 2 次報告書では過去 100 年の気温の上昇を 0.3~0.6 と推定していたが、今回は 0.74 と示されている。精度はより高く、表現はより確定的である。これは、かつて当理学部の気候変動実験施設で行われていた不均一な観測資料から汎球平均地上気温をより客観的に求める研究、たとえば論文「最適内挿法を用いて求めた過去 100 年間の北半球の平均地上気温の推移」^(注1)などの研究成果が反映されているものと思われる。

注 1：Jour. Met. Soc. Japan 1980、Yamamoto 他

気候変動枠組み条約 世界気候会議は、一つには「IPCC」を発足させ、国際間で対処する戦略の推進にあたっては、1992 年に「気候変動に関する国際連合枠組み条約」の採択に導いた。これは「気候変動枠組み条約」、「温暖化防止条約」などと略称されている。この条約の目的は、大気中の温室効果ガスの増加が地球に温暖化をもたらし、自然の生態系等に悪影響を及ぼすおそれがあるので、これを人類共通の関心事と認識し、大気中の温室効果ガス濃度を安定化させ、将来にわたって気候を保護しようというものである。世界気候会議の議論は、ここにおいて実行に移されたことになる。その後締約国は頻繁に会合を開き、1997 年に第 3 回会議が京都で開催されたのは記憶に新しい。その条約の履行に、本年は洞爺湖サミットでその議論がなされた。CO₂濃度の安定化を求めていたこの締約国会議は CO₂排出量削減目標を、EU8%、米国 7%、日本 6%、ロシア 0%と設定し、先進国が他国で削減する仕組みを承認し、さらに森林吸収量の算入を認め、排出量取引を承認するなどを取り決めている。しかし締結後、米国は条約から離脱している。政治経済と科学の結合は進みつつあるが、国際政治の現状はこのような状況にある。

気候変動対策に関する日本の貢献 地球大気保全の諸問題に取り組むとき、各国は取り決めた責任を果しながら、国力に応じて、広く地球環境保全の立場に立って協力しなければならない。気候モデルによつて CO₂ 倍増大気の数値実験を行い成果を挙げてきた日本の気候変動の研究活動は今も活発で、その力量は高く、モデルの精度

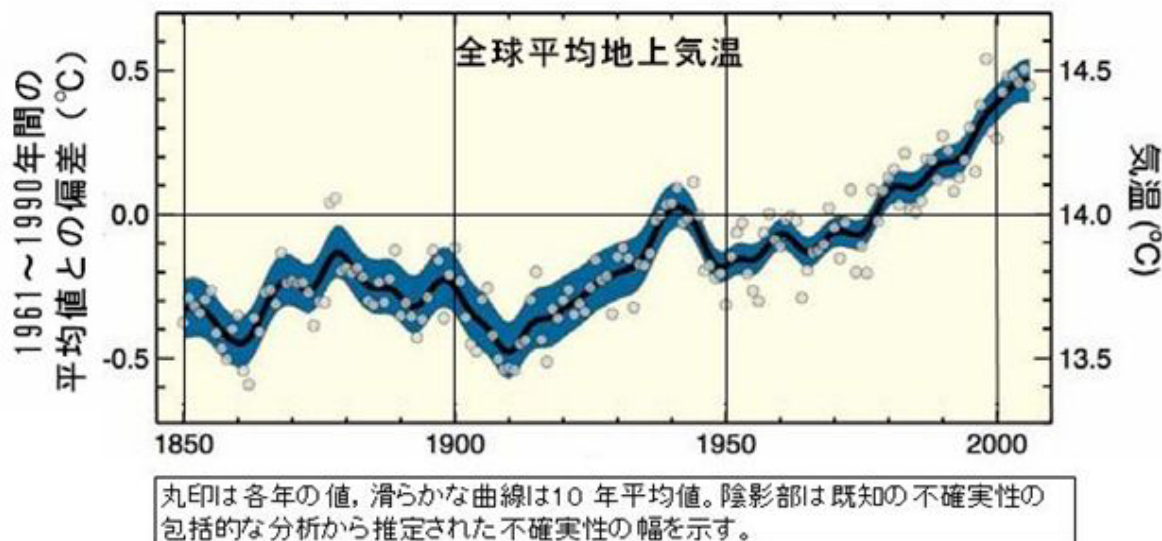
向上に高性能の電子計算機を駆使して IPCC に成果を提供しつづけている。その中に当理学部地球物理学教室の出身者の活動も含まれている。CO₂の観測では、ハワイ島における米国の観測に一步も二歩も遅れを取ってきた日本だが、世界気象機関からは CO₂資料などの温室効果気体の観測資料の世界の管理運営事業の要請を受け、1990年に気象庁に「温室効果気体世界資料センター」を設立し、その運営が行われている。これらの活動は IPCC の分担ではWG 1に属する活動である。一方、WG2 とWG 3の分野を分担する活動も進んでいる。この気候変動にさらされた地球環境を護る戦略を研究する目的で、日本の出資によって設立された国際研究機関に「地球環境戦略研究機関」IGESがある。1998年に神奈川県の葉山町と横須賀市の境界にある湘南国際村に設置された。広く内外の研究者の長期滞在や訪問を受け入れ、アジア太平洋地域における持続可能な開発の実現を目指して実践的かつ革新的な政策研究が行われているという。環境省所管のこの法人は日本の地に設けられた国際的研究機関である（写真）。

温暖化による気候変動問題の理解のために 報道機関を通して喧しい温暖化や気候変動の議論には、単に情緒的な環境保護論の延長にあるものもある。これは社会に対する弊害がない限り、是認されてもよい。またときに出くわす議論に、温暖化の対策を待つよりは、氷河期の再来や地球の冷却を待てばよいという発言があるが、地質時代の時間スケールで現代の政治経済の問題を論じる愚を犯してはならない。これは放言の域をでないで理解しておきたい。しかし、的外れの反社会的な発言や、誤った理解に基づいた議論は、正されることが望ましい。

温暖化や気候変動を論じて、その説明が原因と結果の対応を厳密に明示していないことから温暖化の議論に疑問を抱き、それを非科学的な科学技術として否定する発言が後を絶たない。気候科学が原子炉や人工衛星などの工学的科学技術とは異なり、ウエザーマシンとでも言うべき地球大気という複雑系の問題を扱っていることを理解しなければならない。これは専門分野に関わらず、われわれ地球物理学教室の出身者に課せられた社会的責任でもあろう。現在社会は、原子力発電の普及、人工衛星打ち上げ、空陸の高速交通機関の普及、地球を覆う通信網などなど、近代科学の成果で日常生活が支えられている。これらの近代科学技術は原因結果を実験装置で証明した後で実用に供することができる。しかしこのウエザーマシンの作動状況に支配されて起こる温暖化や気候変動は、実験室でその作動状況を試してみることの出来ない典型的な複雑系の問題である。温暖化もそれがもたらす気候変動も、原因結果の厳密な証明を求めることの出来ない現象である。気象の科学の中でも特に気候科学は実験室を持たないので、日常の観測資料の解析と数値実験を基にして研究が進められている。地球環境という複雑系の将来予測が、非精密科学の手法で進められている。したがって IPCC による気候変動対策の戦略は、温暖化に対する影響が手遅れになる前に、「後悔しない政策」(ノーリグレット・ポリシー)の立場

で進められているのである。

おわりに 北欧の地で生まれ、その地で理論体系を整えてきた気象学は、過去100年、天気予報に応用されながら、数値モデルによる天気予報が出来るまでに発展してきた。近年その気象学が電子計算機の発展と相まって、100年後の気候予測に応用されるようになった。もとよりこの計算機を駆使した予測の科学は非精密科学で、かつ非決定論科学であり、誤差と不確かさが共存した科学技術である。そして新しい気候学というべきものである。しかしこの新しい気候学は、IPCCの実務においては欠くことのできない科学技術である。一方、気象学の立場からみれば、このIPCCは上質の顧客といえよう。このIPCCが、昨年、ゴア前米国副大統領とともにノーベル平和賞授賞の荣誉に輝いた。多くの専門分野の研究者が貢献したIPCCだが、なかでも設立からその後10年ほど議長を勤めた北欧の学者ボリン氏の功績は大きい。氏は高齢で体調が許さず、授賞式に出席することなく昨年の暮れに他界した。その著書では「再生可能エネルギーの持続的な供給が最重要な長期目標である」と言い残しているという。



(IPCC第4次報告書(2007/11/17)文科省, 経産省, 気象庁, 環境庁訳
(<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/interim-j.pdf>)図SPM-1より抜粋)

図1 全球平均地上気温の時間的变化

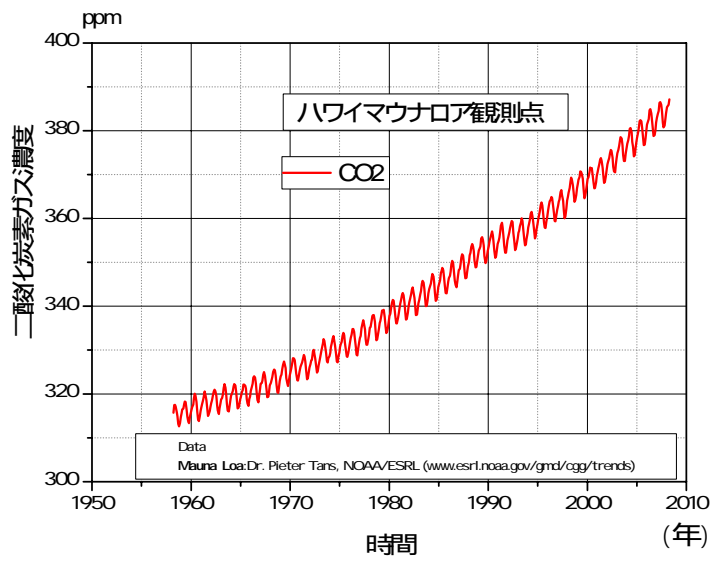


図2 マウナロアにおける二酸化炭素濃度の推移
 (Dr. Pieter Tans, NOAA/ESRL(www.esrl.noaa.gov/gmd/cgg/trends))



写真 IGES の建物全景