

## 特集まえがき

近年、人間活動による温室効果による大気中の二酸化炭素やメタンなどの増加による温室効果で、地球規模の温暖化がおこるのではないかと心配されている。実際に温暖化がすすんだ場合、地球環境、とりわけ大気圏や生物圏に異変が生ずるだけでなく、人間の社会生活や経済活動にも大きな影響が出てくるであろう。しかし、温暖化とその影響の予測には不確実な点も多く、きちんとした科学的検討とそれにもとづいた対策が、いまつ

よく求められている。

この特集では、温暖化がどうしておこるのか、そのメカニズムの解明から説きおこし、生物界や人間の生産活動にどんな影響があらわれるのかを、おもに生態系や農業などの面からさぐっていく。あわせて、温暖化対策をめぐる世界各国のとりくみとその背後にある問題点を解明する。地球温暖化に関する諸問題の正しい理解と、これからの行動の指針に役立つことができれば幸いである。  
(編集委員会)

## ●特集 暖かくなる地球——その原因・影響・対策



## 地球温暖化はどのようにしておこるのか

増田善信

## はじめに

「地球にやさしい足元からの行動に向けて」をテーマにした平成2年版『環境白書』が、大いに売れて、ちょっとしたブームになっているという。今年の白書は、地球温暖化の原因とされる石油など化石燃料を中心とする「エネルギー対策」と、乱伐など減少の著しい熱帯林など「森林資源の保全」を、緊急に取り組むべき課題としたうえで、10年後の2000年の地球環境を展望、官民一体の「足元からの行動」を訴えているのが特徴である。

また、去る7月11日に採択されたヒューストン・サミット（第16回西側先進国首脳会議）の「経済宣言」も、特別に環境問題を取り上げ、温暖化問題と関連させて、「エネルギー関連の環境破壊に対処するには、エネルギー効率の改善と代替エ

ネルギー源の開発に優先度が与えられなければならない」としたうえで、「原子力は、エネルギー供給のうえで引き続き重要な貢献を行うものであり、温室効果ガス排出の伸びを減少させるうえで重要な役割を果たすことができる」などと称し、チェルノブイリの事故の教訓を無視して、原発推進をうたっている。

一方、温室効果ガス増加問題で国際的取り組みを協議するために、世界気象機関（WMO）と国連環境計画（UNEP）が、専門家を集めて設置している「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）も、あい次いで部会を開き、この秋には最終報告を採択しようとしている。

わが国でも、気象庁気候問題懇談会温室効果検討部会が去る7月9日、新たな観測資料などをもとに、日本などの地域的な気候変動の見通しを発表した。これは昨年の「近年における世界の異常気象と気候変動」<sup>1)</sup>に続くもので、昨年の評価をやや下方修正した面もあるが、依然として地球温暖化が深刻であるとの見通しをのべている。

このように地球温暖化の問題が、国際的にも国内的にも精力的に取り上げられている背景には、この問題がきわめて深刻で、早急な国際的な規制

## ◎増田善信(ますだ・よしのぶ)◎

1923年生まれ。気象技術官養成所（現気象大学校）研究科卒。気象学専攻。元気象研究所研究室長。元日本気象学会会員（第四部・地球物理学）。『数値予報』（東京堂出版）、『核の冬—核戦争と気象異常』（新草出版）、『地球環境が危ない』（新日本出版社）など。

が望まれているからである。ここでは、この地球温暖化がどのようにしておこるのか、主としてその物理的な側面に重点をおいてのべようと思う。

## 1 大気の温室効果と温室効果気体

地球は自転をしながら太陽の周りを公転しているので、四六時中太陽から熱エネルギーを受けている。ところが地球の温度はほとんど一定に保たれているのはどうしてであろう。それは、地球も太陽から受けとったと同じ量のエネルギーを宇宙空間に放出しているからである。ステファン・ボルツマンの法則というのであるが、すべての物体は、その表面温度の四乗に比例して、熱を放射するという性質を持っている。太陽の放射も、本質的にはこの法則で放出されているのであるが、表面温度が6000度という高温であるため、主として目に見える光、すなわち可視光線で熱を放出している。一方、地球をはじめ表面温度がずっと低い物体は、波長の長い、したがって目に見えない赤外線を主体にして、熱を放出している。このように太陽から受ける熱とほぼ同じ量の熱を、赤外線の形で常に宇宙空間に放出しているので、地球の平均気温はほぼ一定に保たれているのである。これを放射平衡といい、その時の温度を有効放射温度という。

さて、もし地球が月のように大気のない天体だったらどうであろう。地表面で吸収された熱は、地表面から宇宙空間に直接放射され、その時の地表面の温度は、前述の有効放射温度になる。それを太陽定数や太陽と地球との距離などを用いて求めてみると、約 $-18^{\circ}\text{C}$ になる。地球全体で求めた実際の地表面の平均気温は約 $15^{\circ}\text{C}$ であるから、実際の地表面の平均気温は、実に約 $33^{\circ}\text{C}$ も有効放射温度より高いのである。その役割を果たしているのが大気の温室効果とよばれるもので、その大気のおかげで、現在のような温かな地球環境がつけられているのである。

地球の大気、とくにその中に含まれている水蒸気や二酸化炭素は、温室の窓ガラスのように、太陽の可視光線はとおすが、赤外線は吸収する性質

を持っている。太陽から放出されたエネルギーの大部分は可視光線であるから、途中の空気中の微粒子による散乱や反射で減りながらも、その半分以上が直接地面に到達し、地面を暖める。一方、前にものべたように、すべての物体はその温度に比例した赤外線を放出するから、地面からは赤外線が放出される。これはもちろん最終的には宇宙空間にも放出されるが、一部は途中の空気に吸収されてその空気層を暖める。ところが、この空気層もまた、その空気の温度に比例した赤外線をその層の上下に放出する。したがって、地面はその上にある空気層全体からの赤外線を受けるので、地面付近がもっとも暖められるのである。一方、上層へいくほど、その層より上の層から受け取る赤外線が少なくなるので、それほど暖められない。その結果、地面付近がもっとも温度が高く、上層にいくほど温度が低くなるような温度分布ができる。地球全体の地表面の平均気温約 $15^{\circ}\text{C}$ はこのようにしてできたのである。

水蒸気や二酸化炭素は可視光線はとおすが、赤外線はほとんど吸収するので、温室効果にもっとも有効的に作用する。このような温室効果に効果的な気体を総称して「温室効果気体」という。温室効果気体には二酸化炭素のほか、フロン、メタン、オゾン、一酸化二窒素などがある。水蒸気は自然現象であるのでいたし方ないが、最近、二酸化炭素など人間活動の活発化によってつくられた温室効果気体の増加によって、地球温暖化の問題が深刻になってきたのである。

## 2 増え続ける温室効果気体

大気中の二酸化炭素の濃度は、当初は現在の10万倍にも達していたが、水に溶けて石灰岩になったり、海の中のプランクトンやサンゴなどの体や殻を作るのに使われたり、植物の光合成を通して、植物の栄養として使われ、約1万年前の最後の氷河期の終わりころには、275 ppm程度になった。それ以後、18世紀後半から19世紀初めにかけての産業革命頃までは、ほとんど変化せず、この値のまま推移してきた。(ここで、ppmというのは、

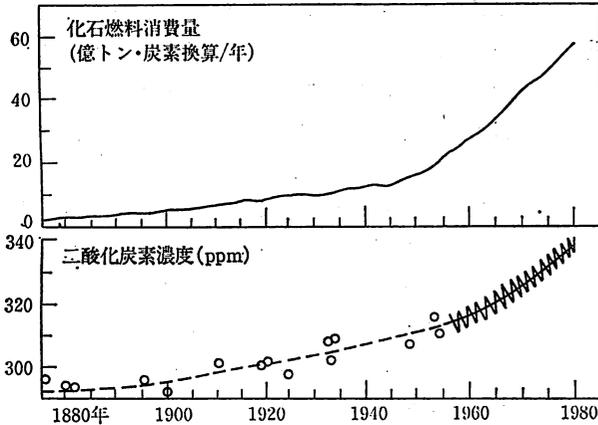


図1 大気中の二酸化炭素濃度の増加と化石燃料消費量の変化  
出所：内嶋善兵衛ら『激化する異常気象』，1985

ある物質の全体に占める割合を100万分の1の単位で表すもので、微量物質の濃度を表すのに用いられる。気体では体積比で示されるので正確にはppmvであるが、ここでは簡単にppmとした。その1000分の1をppb、さらにその1000分の1をpptという)

二酸化炭素の恒常的な観測は、C. D. キーリングによって、1957年からハワイのマウナロア山で始められた。彼は長年観測を続け、二酸化炭素濃度が年々増加していることを見出した。人間活動の急速な発展にともなって、二酸化炭素濃度が増加したもので、これが気候に影響を及ぼす可能性があるのではないかと、広く関心が持たれるようになってきた。その結果現在では、日本を含め世界の14地点で、恒常的に二酸化炭素濃度の観測がなされている。

過去の二酸化炭素濃度の変動は、南極やグリーンランドの氷のなかに閉じ込められていた、気泡の濃度を分析して推定された。図1の下の方の図はこのようにして推定された、1875年以降の大気中の二酸化炭素濃度と、1957年以後のハワイのマウナロアで観測された二酸化炭素濃度を、連結して示したものである<sup>2)</sup>。この図で1957年以後の二酸化炭素濃度に1年周期の変化が見られるのは、夏には植物が繁茂するため、二酸化炭素が多く消費され、そのために二酸化炭素が減少し、冬にはあまり成長しないので逆に増加するためである。また、この図の上の部分には、この期間の化石燃料の消費量が示してある。二酸化炭素が化石燃料の

消費量とともに年々増加しているようすが良く理解される。

化石燃料の消費のほか、最近の急激な森林破壊による二酸化炭素の増加も問題になっている。森林破壊は、植物の炭酸同化作用による二酸化炭素の固定能力が減る、伐採された樹木は木材や紙となり、いずれは燃されて二酸化炭素を放出する、土壌中に蓄えられている有機物が分解され、二酸化炭素が放出されるなどの理由で、二酸化炭素を増加させるのである。国連食糧農業機関（FAO）の統計によると、森林の伐採、焼失などによる二酸化炭素の放出と、

植林などによる植生の回復による吸収を差し引くと、植物群落から年間16億トンの炭素が放出されるという。化石燃料による二酸化炭素の放出量は年間約55億トンであるから、その3割近い量が森林破壊で放出されているのである。

その結果、産業革命以前は約275 ppmであった二酸化炭素濃度が、産業革命以後の化石燃料の大量消費や、最近の急激な森林破壊によって年々増加し、1987年現在では、地球全体で平均した濃度は348.1 ppm程度にまで達したのである。

他の温室効果気体のメタン、一酸化二窒素、フロンおよびオゾン、大気中には非常に微量にしか含まれていないが、二酸化炭素などよりも赤外線吸収する効率が高い。なぜならば、これらの気体は、水蒸気や二酸化炭素が吸収する赤外線の波長とは違った波長の赤外放射を吸収するからである。

メタンは化石燃料の採掘や水田、沼、森林、海洋などにある有機物の発酵などで発生するもので、地球の温暖化がおこると、高緯度の永久凍土が融け、そこに蓄積されている有機物の分解がおこり、さらにメタンが増えるのではないかと懸念されている。一酸化二窒素は土壌中の有機物や窒素肥料の分解、化石燃料や植物の燃焼などで発生する。窒素肥料が原因だとすると、今後、人口増加ともなう食糧増産と関連して、さらに増加する可能性がある気体である。

オゾン、とくに対流圏のオゾンも有力な温室効果気体である。対流圏のオゾンは、窒素氧化物やメタンなど人為的に排出されたガスが、光化学反応を受けて作られたものである。年々、これら排ガス、とくに自動車からの排ガスの増加にともなって、対流圏オゾンも増えてきている。フロンガスはオゾン層破壊の元凶として最近とくに重視されているが、温室効果の面からも無視できないものである。フロンは化学的に非常に安定な物質であるので、たとえ今すぐ使用を中止しても、長期にわたって気候に影響を及ぼすおそれがある。

現在、これらの気体の温室効果は、二酸化炭素の温室効果と匹敵するようになっていると推定されている。気象庁気候問題懇談会温室効果検討部会は、その他の温室効果気体の効果も二酸化炭素濃度に換算して加えると、二酸化炭素の濃度が、2030年には倍増するであろうと予想している。

### 3 温暖化はすでに始まっている

地球が温暖化すると、地表付近の気温が上昇するだけでなく、海水が膨脹し、その結果海水面が上昇する。また、海水が融けてやはり海水面が高くなる。図2はV.ゴルニッツら(1982)が調べた地球全体の海水面の高さの変化と、P.D.ジョンズら(1986)が求めた地球全体の地上気温の変化を示したものである<sup>9)</sup>。数年ないし数十年の変動をしながらではあるが、大きく見ると、この100年の間に、地上気温にして約0.5℃、海水位にして約8センチメートル海面が上昇していることが認められる。

地球の温暖化が温室効果でもたらされたものであるとすると、地面から放出される赤外線が対流圏内の温室効果気体で吸収されるので、対流圏では気温が上昇するが、成層圏では下層からくる赤外線がその分だけ減るので、逆に気温が下がるはずである。もちろん、フロンガスによってオゾン層が破壊される影響で、成層圏の温度が下がる点は考慮に入れなければならないが、オゾンがもっと

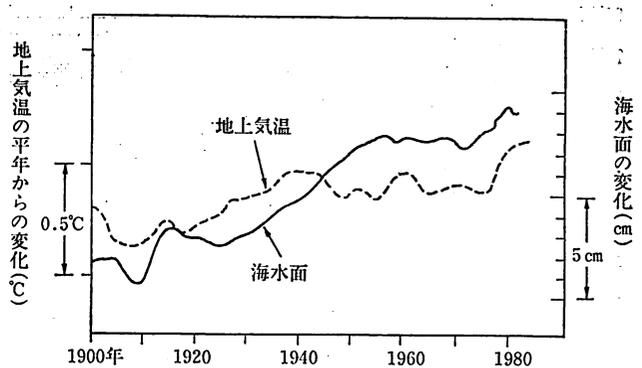


図2 海水面の上昇と気温の上昇

出所：B.ホリンら『SCOPE29』, 1986

も濃い層より高い層の気温を調べれば、温室効果の影響がある程度わかるはずである。綾里(岩手県三陸町)で気象ロケットによって観測された、高度約42キロメートル付近の平均気温を調べると、10年間で約1.7℃温度が低下していた。このことから、二酸化炭素など温室効果気体の増加により、地球温暖化が進行しつつあることがうかがえる。もちろん気候変動の原因にはいろいろあり、数十年から数万年もの時間スケールの変動が含まれている。したがって、最近のたかだか100年足らずの観測値から温室効果の影響を見つけることは至難のわざであるが、大きく見て温暖化の兆候はすでに始まっているといっているであろう。

### 4 二酸化炭素が倍増するとどうなるか

二酸化炭素以外の温室効果気体の効果も含めた意味で、二酸化炭素が2倍になると、世界の気候がどう変わるかという問題は、この意味できわめて重要になってきた。二酸化炭素の増加と気候の問題は、大気大循環モデルを用いた数値シミュレーションで研究される。大気大循環モデルとは、毎日の天気予報の基礎になっている、予想天気図を作るために開発された“数値予報”の方式と同じもので、風の変化を予報する運動方程式、温度の変化を予報する熱力学の式、水蒸気の変化を計算する水蒸気の収支の式を、日射の吸収、赤外線の放射、水蒸気の凝結熱、地面や海面と大気間の熱のやりとりなどの効果を入れて解き、大気の

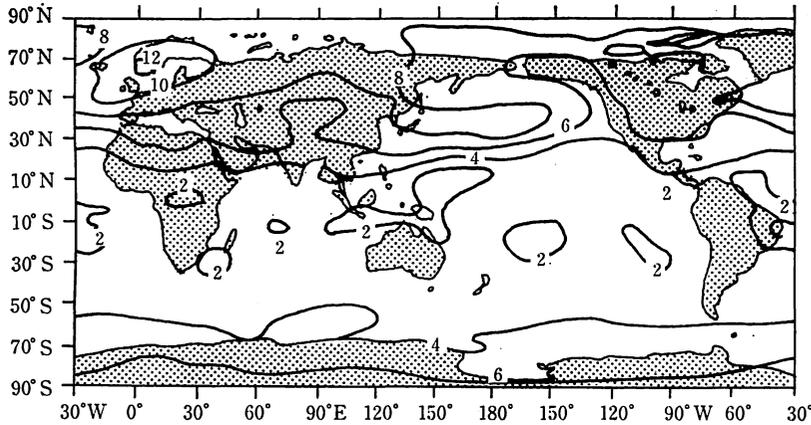


図3 気象庁気象研究所大気・海洋混合層モデルによって得られた二酸化炭素2倍増にともなう年平均気温の上昇量(°C)

出所: 気象庁『近年における世界の異常気象と気候変動』, 1989

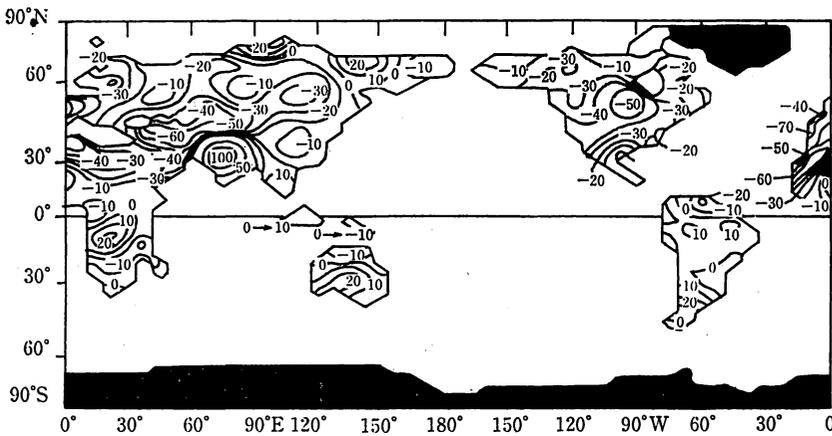


図4 二酸化炭素が2倍になったときの土壌水分の変化をパーセントで示したもの

出所: 真鍋淑郎ら (1987)

流れの様相を予測するものである。最近では海洋の流れを考慮した海洋大循環モデルと、大気大循環モデルとを結合させた大気・海洋大循環モデルまで用いられるようになってきた。

現在、多くの研究者がこの問題に取り組んでいる。ここでは海洋の取り扱いをやや簡単にした、気象研究所の大気大循環モデルを用いて計算された、二酸化炭素濃度が倍増したときの結果を示す<sup>1)</sup>。図3は二酸化炭素濃度が産業革命当時の2倍になったときの地上気温の上昇量を予測したものである。地球全体の平均の地上気温の上昇量は約4°Cであるが、もっとも大きな温暖化が両半球

のいずれも極地方で起こっている。これは氷や雪が積もっていると、太陽光線はほとんど反射されて地面を暖めないが、地球が温暖化して氷や雪が融けると、太陽光線が地面を直接暖めるようになり、その結果さらに温暖化が進むためである。また温暖化にともなって海水氷が融け、緯度にして約5°ないし10°海水域が極地方に後退することも予測されている。しかし、南極の氷が融けることはない。

このほか雨の降り方も大きく変わる。その結果土壌水分にも大きな変化が生じる。図4は二酸化炭素が2倍になったときの土壌水分の変化を示したものである。これは真鍋淑郎ら(1987)<sup>4)</sup>の結果であるが、北半球ではインドを中心とした東南アジアとシベリアの一部を

除いて、ほとんどの地域で土壌水分が減少している。とくに現在の穀倉地帯の中緯度地方で、50パーセント以上も減少している点は、農業生産の上からみてきわめて深刻である。すなわち、現在の穀倉地帯が砂漠化する恐れがあるのである。

## 5 地球の温暖化は何をもたらすか

現実の気候システムは非常に複雑で、それをモデル化した大気・海洋大循環モデルには、多くの近似や単純化が含まれている。したがって、これらの予測がすべて正しいとは限らない。しかし、この予測に用いられた大気大循環モデルは、日常

の天気予報にも使われていて、精度が高いことが証明されており、また、別々にやられた研究によっても、ほぼ同じ結果が得られているので、二酸化炭素を含めて、温室効果気体がこのまま増え続けるならば、21世紀の半ばには、地球の温暖化がおこる可能性があることは、おそらく間違いないであろう。

1989年3月、気象庁はそれまでに得られていた最新の科学的知見をもとに、温室効果による将来の気候変化についての一応の見通しを発表していたが、今年7月、さらにそれ以後の科学的検討、とくに大気・海洋大循環モデルの結果などを考慮して、前回の見通しをやや下方修正した次のような見通しを発表した。

①温室効果気体の濃度が現在の増加率で増え続けるとすれば、地球全体の平均気温は2030年代に現在より1.2～3.0℃上昇すると予想される。昇温量は、冬期、とくに北半球の高緯度で大きい。南半球の高緯度では地上気温の昇温が他の緯度に比べ大きく遅れる可能性がある。日本を含む北半球中緯度では上記昇温量と同程度、低緯度ではそれより小さいとみられる。大陸・海洋スケールで見ると大陸上の昇温のほうが顕著である。

②地球全体の平均降水量および蒸発量は2～9パーセント増加する。中緯度多雨帯はとくに北半球で極方向にずれ、全般に高緯度で降水が増加する。

③南極氷棚の底面融解が進むと考える場合、2030年頃の海面水位は10～60センチ上昇するとみられる。氷棚の底面融解が進まないとする、10～30センチ上昇すると予想される。

わずか100年も経ない間に、気温が数度も上昇するという事は、氷河期以後にはなかったことで、人類の誕生以来経験したことのない大きな環境変化である。したがって、予想もつかない問題が発生するであろう。たとえば、温室効果による温暖化では、対流圏下層ほど気温が上がり、逆に、成層圏は温度が低下する。このことは、気層が不安定になることを意味する。気層が不安定になればなるほど、雷雨や低気圧が発達しやすい。

海水温も上がっているのだから、蒸発量も増え、水蒸気も多くなっている。したがって、もし台風が発生したら、気層は不安定なうえ、十分な水蒸気が補給されるので、おそらく今まで経験したことのないような、巨大な台風が襲来するおそれもある。

気候温暖化とそれにとともなる降水量、土壌水分の変化でもっとも大きな影響を受けるのは農業であろう。数値シミュレーションの結果でも明らかのように、北半球ではおおむね中緯度地帯での土地の乾燥が著しく、アメリカやカナダの穀倉地帯で干ばつになるおそれがある。一方、高緯度地方は気候が温暖化して、従来農業生産が不可能であったところが、農業ができるようになるかもしれない。しかし、この地域は現在一般に泥炭地で地味も悪く、しかも凍土地帯であるから、この程度の温暖化で、果たして飛躍的に発達した農業が可能になるか疑問である。

海水面の上昇も深刻である。国土の60パーセント近くが海面より低いオランダはもちろん、バングラデシュでは、海拔1メートル以下の低地に数百万人もの人びとが住んでおり、1970年にはサイクロンの襲来で、一度に30万人もの人命が失われた。しかもこういう低地には、一般に貧しい人が住んでいるので、いっそう被害が大きくなる。1メートル水位が上がったら、世界で4千万世帯が家を失うといわれている。

四面海に囲まれた日本も大きな影響を受けるであろう。東京や大阪の下町は水没するであろう。昨年8月建設省は、もし海面が1メートル上昇したら、ゼロメートル地帯が現在の2.4倍に広がり、73兆円の資産が水没の危険にさらされるであろうとの予測を発表した。

この意味では温室効果気体の規制が急がれるところである。ところが6月11日からロンドンで始まった「ノルドベイク宣言に関するワークショップ」では、24カ国が提案した「二酸化炭素など温室効果気体の排出量をただちに60パーセント以上削減を」という決議案に対し、米、日、ソ、英の4カ国が反対したという。現在もっとも大量に二

酸化炭素を排出しているのはアメリカ、次いでソ連、中国、日本、西ドイツ、イギリスの順で、この六カ国で世界の60パーセント以上を占めているのである。これらの国は「温暖化に対する科学的知見が十分ではない」「温暖化を検討中の『気候変動に関する政府間パネル』（IPCC）がこの秋に出す中間報告を待ってからでも遅くない」などの理由で反対したといわれている。規制よりも経済を優先させた姿とっていいであろう。このような姿勢を改めさせ、一刻も早く温室効果気体

の規制を実現させる必要がある。

#### 参考文献

- 1) 気象庁編『近年における世界の異常気象と気候変動—その実態と見通し—(IV)』大蔵省印刷局, 1989.
- 2) 内嶋善兵衛他『激化する異常気象—異常気象時代—いま何がおこっているか』講談社, 1985.
- 3) B. Bolin 他『The greenhouse effect, climatic change, and ecosystems, SCOPE 29』John Wiley and Sons, 1986.
- 4) S. Manabe 他 "Large-scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide", J. Atmos. Sci., 44. pp. 1211-1235, 1987.

### 第18回瀬戸内シンポジウム

### 第16回瀬戸内沿岸住民集会

## 広 島 宣 言

第18回瀬戸内シンポジウム・第16回瀬戸内沿岸住民集会は、地球環境問題に対する内外における世論の高揚が見られる一方で、リゾート開発が強行されつつあるという状況のなか、広島市内において開催されました。このシンポジウムには、日本科学者会議に結集する研究者、瀬戸内の環境を守る連絡会に連なる各地域の住民をはじめ、広島県内の地方自治体関係者、学生、一般市民など多数のひとびとが参加し、県内におけるこの種の集会としてはかつてないほどの規模と盛り上がりが見られました。

パネルディスカッション「21世紀の瀬戸内像をさぐる—環境保全型開発への道筋」では、大気汚染による地球の温暖化、酸性雨・酸性霧の問題、水理模型実験に基づく水質改善の試み、環境経済システム論に立った環境資源保全の展望、観光事業に携わっての積極的な提言、「リゾートは開発ではなく、リゾートという名の地域づくり」との問題提起、サステイナブル・デベロップメントの具体化と定式化等々、現状での様々な問題・テーマが多面的に浮き彫りにされる一方、全体として、瀬戸内の自然と文化を活かした発展のみちすじが示唆されたと評価できます。

第1分科会「瀬戸内の環境問題の現局面」では、昨年末に開催されたプレシンポジウムの成果を引き継いで、大気・水質汚染問題などの現状が分析され、依然として厳しい局面にあることが確認されました。

第2分科会「瀬戸内のリゾート開発と景観保護」では、前回の山口でのシンポジウムのテーマを継承して、リゾート開発と住民運動を総括的に検討する場となりました。大手資本主導のゴルフ場など乱開発型リゾートに對して、住民自治に根ざした民主的な地域づくりのあり方が追求されたことは有意義でした。

第3分科会「環境問題の担い手と環境教育」では、次代を担う青少年、婦人、市民など、環境問題の拡がりに対応した市民運動の新しい担い手を育成するという意識のもとで、市民生協の地道な活動、青少年活動の実践例、貧困の克服を目指す開発教育と人権教育、環境教育と平和教育などの貴重な経験を学びました。

しかし、現在の情勢はけっして楽観できません。瀬戸内の「適正利用」の美名のもとで、この地域のすぐれた海洋環境、美しい自然景観が営利目的の対象とされ、様々な開発圧力にさらされているからです。かつての乱開発の再現ともなりかねない現状が見られます。この乱開発を阻止し、かけがえのない国民の共有財産である瀬戸内海を守り通すことこそ、いま求められています。そのため、私たちは、それぞれの立場でより一層の取り組みを進めることを表明します。

1990年7月22日

第18回瀬戸内シンポジウム

第16回瀬戸内沿岸住民集会