

—夏期大学講座内容①—

地球大気の温暖化

札幌管区気象台 中山 嵩

はしがき

近年、世界各地で毎年発生している異常気象は、人間活動に伴う大気中の温室効果気体（二酸化炭素、フロン、メタン、一酸化二窒素、オゾン等）の増加による地球大気の温暖化の影響が現実化し始めた結果ではないかと危惧されています。

二酸化炭素の大気中濃度は、ハワイ島マウナロアにおける観測によれば、産業革命前の1770年代の約275 ppmから1986年には約345 ppmに増加し、なお年約0.4%で増加しています（図1-1）。

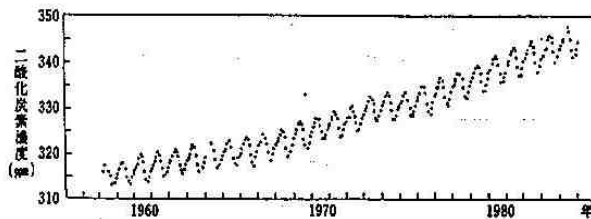


図1-1 ハワイ島マウナロアにおける二酸化炭素濃度

(Keeling et al. 1982及びNOAA, 1986: 気象庁の異常気象レポートによる)

1987年1月から観測が開始された気象庁の岩手県三陸町綾里の気象ロケット観測所における観測でも年平均で2.8 ppm増加しています（図1-2）。

フロンの大気中濃度は、1970年代にはフロン11、12の生産量の拡大により急増し、その後やや低下しましたが、なお年約5%で増加しています（図

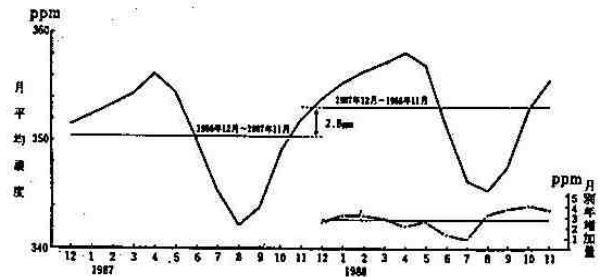


図1-2 岩手県三陸町綾里における二酸化炭素月平均濃度

1987年の月平均濃度の最高356.1 ppm（4月）、最低342.2 ppm（8月）

1988年の月平均濃度の最高358.3 ppm（4月）、最低345.5 ppm（8月）

（気象庁の異常気象レポートによる）

1-3)。フロンは、地球放射の窓領域（地球放射の吸収されにくい8~12 μ mの波長帯）に吸収帯をもっているため温度上昇への寄与率が高く、成層圏のオゾンの減少をもたらすとみられています。

1980年から2030年までの温室効果気体の増加に伴う地表気温の昇温は、Ramanathan et al.の1次元放射対流平衡モデルを用いた計算によると約1.5 $^{\circ}$ Cで、二酸化炭素と二酸化炭素以外の温室効果気体の寄与率がほぼ同程度となっています（図1-4）。

気象庁は、1989年3月に異常気象レポート「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)」を発表し、詳細な解析と今後の

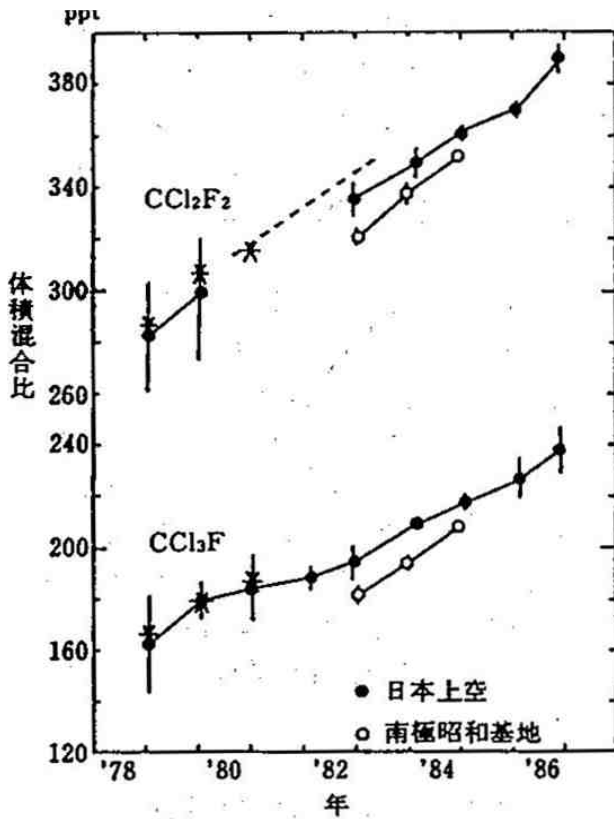


図1-3 対流圏における CCl_2F_2 および CCl_3F の平均体積混合比

- 、○：日本上空 (34-38°N) および南極昭和基地における平均値と標準偏差
- …：北海道・女満別における CCl_2F_2 の連続測定から求められた経年変化
- *：米国オレゴン州 (45°N) における平均値

(広田他、1986：気象庁の異常気象レポートによる)

見通しを明らかにしています。

ここでは、この異常気象レポートをもとに、大気中の温室効果気体の増加による地球大気の温暖化について概説します。

大気の温室効果

地表面と大気の現在の温度状態が維持されてい

成分	工業化以前(1880年)の推定された濃度	1980年の濃度	2030年に予測される濃度
CO_2	270 ppm	339 ppm	450 ppm
CH_4	1.15 ppm	1.65 ppm	2.34 ppm
N_2O	285 ppb	300 ppb	375 ppb
O_3 (対流圏)	1980年より12.5%減少		1980年より12.5%増加
CFC-11	0	0.18 ppb	1.1 ppb
CFC-12	0	0.28 ppb	1.8 ppb

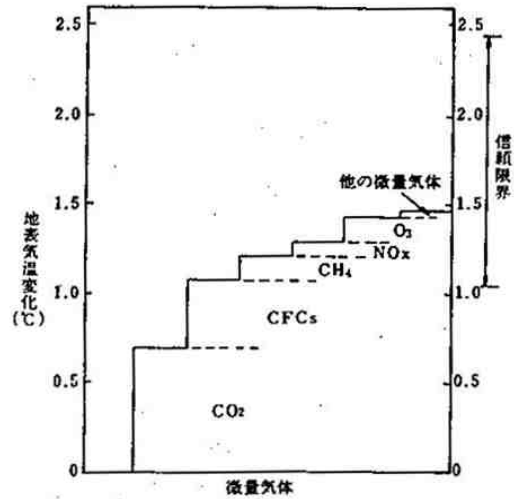


図1-4 地表気温の変化

上表；計算に用いた主要な微量気体の全球平均濃度

(Ramanathan et al., 1985)

下図；地表気温の変化

一次元放射対流平衡モデルを用いて計算された1980年から2030年までの温室効果気体の増加に伴う地表気温の変化。Ramanathan et al. (1985)の結果を Bolin et al. (1986)より引用。

(気象庁の異常気象レポートによる)

るのは、大気に入射する太陽からの放射エネルギーと地球大気から宇宙空間へ射出される放射エネルギーが平均として釣り合った状態に保たれているためです。太陽からの放射(太陽放射)は、波長の短い波(0.2~4 μm)に集中し、地球大気からの放射(地球放射)は、波長の長い波(4~100 μm)に集中しています(図1-5(a))。

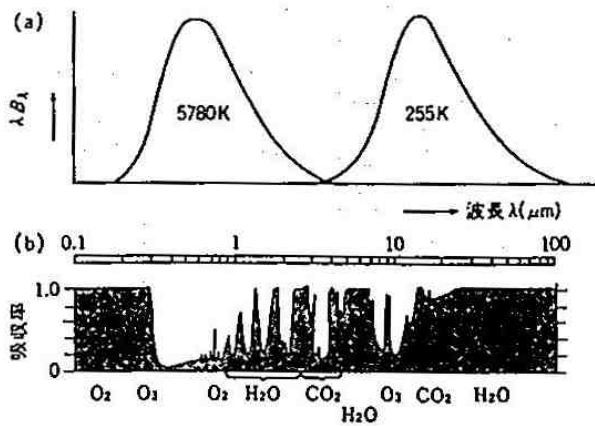


図1-5 太陽放射と地球放射

(a) 5780K (太陽の有効放射温度に相当)と255K(地球の有効放射温度、地球大気平均温度に近い)の黒体放射エネルギー B_λ の曲線、地球が吸収する太陽放射量と地球が射出する地球放射量は等しいので、両曲線は等面積となるように描かれている。
 (b)大気の垂直気柱にふくまれる気体成分による吸収。ただし、雲および塵の効果はふくまない。おもな吸収気体による吸収帯の位置が図に示されている。

(Houghton, J. T. (1970)を一部修正 : 気候学気象学辞典による)

太陽放射と地球放射は、大気中で大気組成物質により吸収されます。CO₂の主なる吸収帯は、4.3 μm 付近と13~18 μm 、H₂Oの主なる吸収帯は、近赤外領域、6.3 μm 付近と20 μm より長い波長域、O₃の吸収帯は、生物に有害な太陽放射の紫外線領域にあります(図1-5 (b))。

大気上端に入射する太陽放射量を100%として、地表面と大気中での平均のエネルギーの収支は、図1-6のようになります。太陽放射は、大気中での散乱、反射、吸収により地表面に達するのは55%で、51%が地表面で吸収されます。地表面からは、大気上端に入射する太陽放射量より多い

118%の放射エネルギーが射出されますが、CO₂やH₂O等により吸収され、宇宙空間に放出されるのは6%です。CO₂やH₂O等は、97%の放射量を地表面へ射出し、大気下層の高温を維持しています(温室効果)。もし、大気が全くない場合には、地表面付近の気温は、現在の気温より約33℃下がるといわれています。

物質の原子や分子は、物質固有の不連続なエネルギーレベルをもっています。原子や分子は、放射エネルギーを吸収するとエネルギーの低いレベルから高いレベルの状態に移り、エネルギーの高いレベルから低いレベルの状態に移ると放射エネルギーを射出します。このため、大気組成物質は、とびとびの波長帯で放射エネルギーを吸収し、同じ波長帯でその物質の温度等に依存する放射エネルギーを宇宙空間と地表面へ向けて射出しています。

気候を変動させる自然的要因の評価

地球規模の気候変化をみるためには、長い期間のしかも広い範囲の観測データを調べることが必要です。地上気温資料が豊富であり、信頼性も高いと考えられます。地上気温資料といえども海洋上では少ないので解析方法の相違によって結果が多少異なることがあります。

北半球の平均地上気温の年間偏差の変化傾向をみると、1920年代に上昇し、1940年頃に極大に達し、その後1960年代まで低下し、1960年後半から1980年代初めにかけてかなり急速に上昇した後、高温状態が持続されています。北半球の緯度帯別の平均地上気温の年間偏差でみると、高緯度ほど上昇幅が大きくなっています(図1-7)。

世界の異常気温の発生状況をみると、1950年代から続いていた傾向が、1980年代に一転し、異常高温が異常低温より多く発生するようになってきます(図1-8)。気候が温暖化すると異常高温が、寒冷化すると異常低温が多発しやすくなります。

これらの過去100年程度の全球・半球平均地上

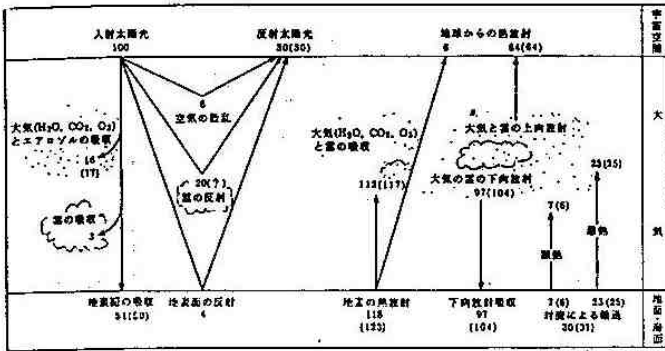


図1-6 大気・地表系のエネルギーの流れ。大気圏外での入射太陽を100として表してある。カッコ内の数値は、CO₂が2倍になったときの推定値。(松野太郎(1987)による)

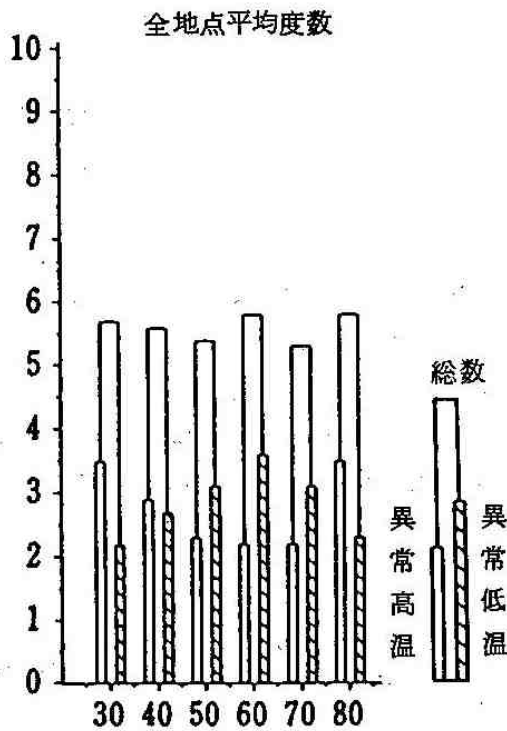


図1-8 世界の月平均気温の異常値発生度数危険率5%、1930年以降の各10年代ごと、発生総数を地点数で割った1地点あたりの発生度数。ただし、1980年代は1980-1987年の発生総数を10年間分になるよう10/8倍してある。(気象庁の異常気象レポートによる)

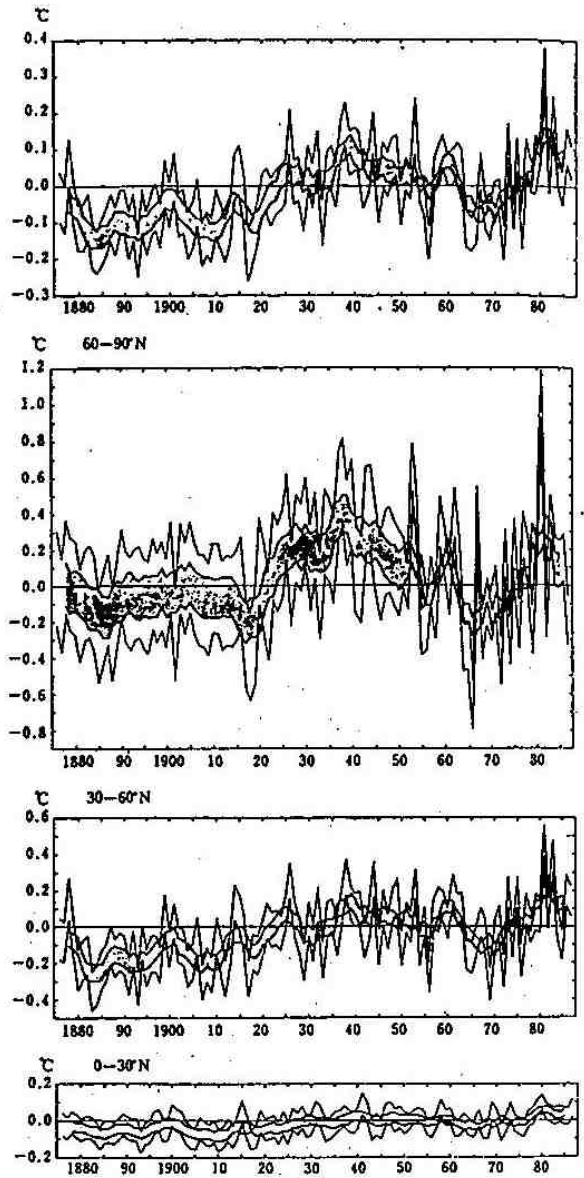


図1-7 北半球の平均地上気温の経年変化(1876~1987年)
 最上端図;北半球の平均地上気温
 下 図;北半球各緯度帯の平均地上気温
 実線は年平均値、太実線は5年移動平均値。誤差を考慮して上下に幅(68%の推算誤差範囲)をもたせて表現してある。(気象庁が最新の情報を提供し、星合愛知学院大学教授が調査、作成した。Yamamoto and Hoshiai(1980), 星合(1985)参照。)(気象庁の異常気象レポートによる)

気温の変化から、太陽活動や火山噴火等の様々な気候を変動させる自然的要因を考慮して、自然的要因による気温の変動幅を見積もると、0.3~0.4℃程度とみられます。大規模な火山噴火によって成層圏まで吹きあげられる微粒子による気温低下は、0.3℃程度でその期間も1~2年程度、太陽活動の変動による影響は、近年の衛星観測の結果から、0.1℃程度とみられています。

温室効果気体の増加による気温上昇量は、自然的要因による気温の変動幅より大きいと予測されています。今後数10年程度の気候変動の最も大きい要因として温室効果気体の増加の影響が考えられます。

温室効果気体増加の影響

真鍋とWetheraldは、1次元放射対流平衡モデルを用いて、CO₂が現状値に近い場合と、その半分および2倍の場合について、大気温度の鉛直分布を計算しました(図1-9)。CO₂が現状の2倍近い場合には、対流圏の温度が約1.5℃上昇し、O₃が現状通りとすると成層圏の温度が下降することが明らかにされました。CO₂の増加による気温上昇で、大気中の水蒸気量が増加し、その水蒸気による気温上昇も計算されています。

大気中の水蒸気の増加は、雲の性質や分布等に影響を与えます。雲の変化は、その放射効果を通して気候変化にかかわります。放射効果は、雲量、雲の厚さや形状等に依存しています。一般に下層の水雲などのように光学的に厚く、低い高度に現れる雲ほど太陽放射を反射し、巻雲などのように光学的に薄く、高い高度に現れる雲ほど温室効果が働きます。

地表面の温度の上昇は、雪氷面積に影響を与えます。雪氷面積が減少すれば、地表面の放射効果が変わります。雪氷は、太陽放射を反射しますが、雪氷が消えれば太陽放射を吸収しますので、大気温度を上昇させる働きをします。また、雪氷面積が大幅に減少すれば、海面水位の上昇の恐れもでてきます。

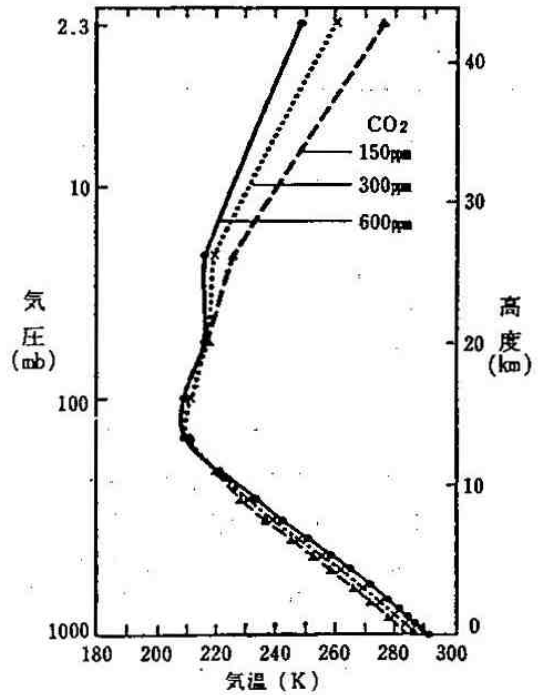


図1-9 放射対流平衡にある大気鉛直気温分布

(Manabe and Wetherald, 1967 :

図は真鍋, 1985による)

(気象庁の異常気象レポートによる)

対流圏の温度の上昇は、地球上で一様に起こるわけではないので大気循環に影響を与えることが考えられます。例えば、中緯度帯には上空にジェット気流と呼ばれる強い西風が吹き、地上では高・低気圧が西から東に移動し、降水量の多い緯度帯があります。この緯度帯が南北に変移すれば、多雨域が少雨域に、少雨域が多雨域に変わることも考えられます。

海洋は、地球表面の70%を占め、熱容量が大きく暖まりにくく冷えにくいので、温室効果気体による地表の気温の上昇を遅らせる緩衝効果や大気との物質交換過程で二酸化炭素等の微量気体の供給源になっているか吸収源になっているかで温室効果気体の大気中の濃度に影響を与えることが考えられます。

これらの過程は、相互に影響しあいますので、3次元の気候モデルによる総合的な研究が進めら

れています。

3次元気候モデル

気候モデルは、物理法則に基づいて気候の理解および将来の気候変化を定量的に予測する方法です。気候モデルでは、地球を均質な立体格子網で仮想的に覆い、格子点上に風、温度、水蒸気量等を与えて大気の状態を表し、風や温度等の時間変化を表す物理学の方程式を解いて将来の大気の状態を予測します。日々の大気の状態の予測は、2週間程度先までが限界とみられています。気候モデルでは、長い期間の大気の状態を平均して気候状態を予測することになります。気候モデルには、

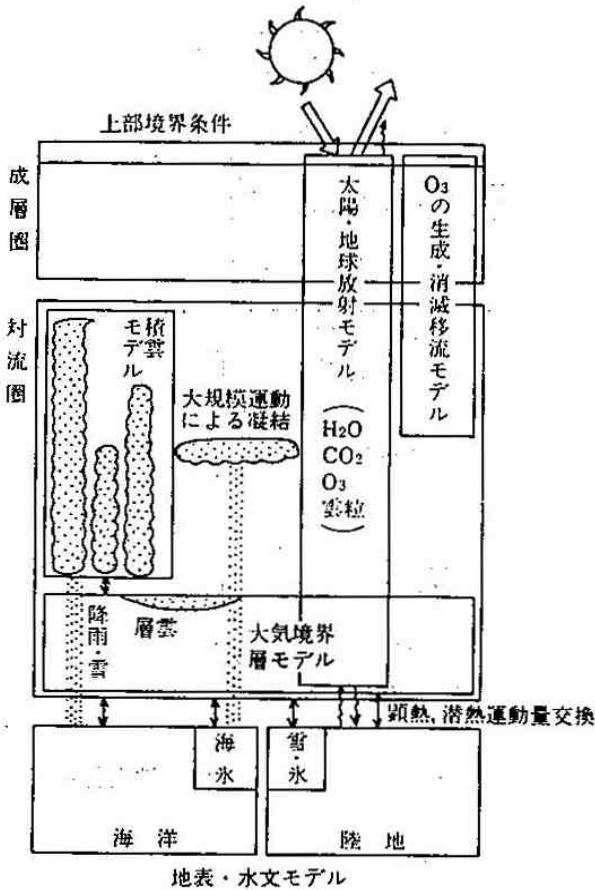


図1-10 大気大循環モデルに組み込まれている物理過程の模式図
気象研究所の大気大循環モデルをもとにしたもの。
(気象庁の異常気象レポートによる)

気候の形成にかかわる諸物理過程、太陽活動、大気と海洋の相互作用、大気と陸地の相互作用、大規模山岳、水蒸気の凝結過程、積雲対流、雲と放射等の効果が取り入れられています(図1-10)。

気候モデルには、主に大気と海洋の相互作用の効果の取り入れ方から3段階のモデルがあります。それらは、海面水温に気候値を用いている大気大循環モデル、海面下数10mの温度がほぼ一樣な海洋混合層を結合した大気・海洋結合モデル、大気大循環モデルと海洋大循環モデルとを結合した大気・海洋結合モデルです。大気・海洋結合モデルの結果は、最近になって発表されるようになってきました。

気候モデルによる気候状態の再現例として気象研究所の大気大循環モデルの結果を示します(図

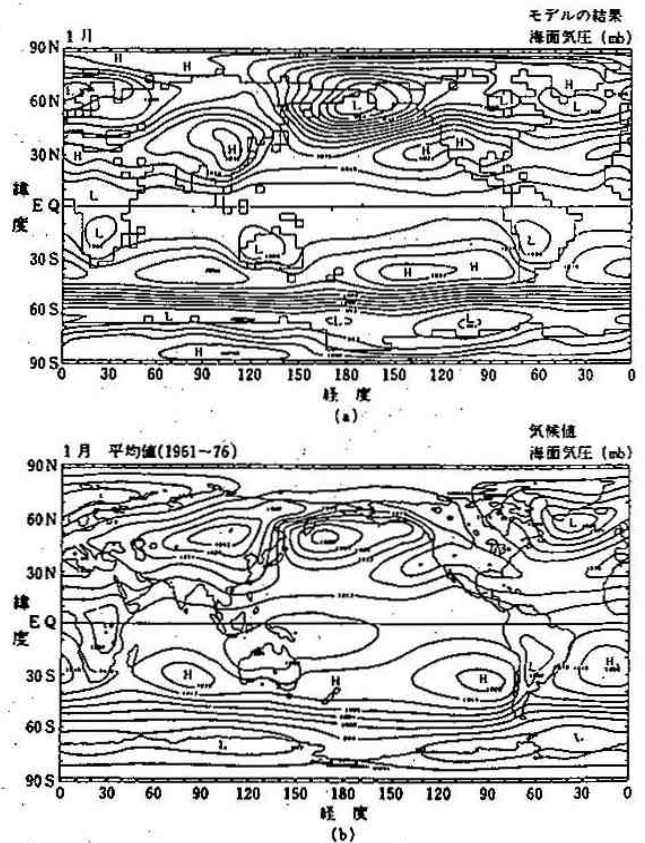


図1-11 気象研究所大気大循環モデルで再現された
1月の月平均海面気圧
(a)モデルの結果 (b)気候値
(気象庁の異常気象レポートによる)

1-11)。気候状態がかなり良く再現されています。

気候モデルによる研究には、ロッキーやヒマラヤ等の大規模山岳の影響を調べるために、山岳のある場合とない場合の実験結果を比較した研究、大気中の二酸化炭素の増加の影響を調べるために、二酸化炭素が現状の場合と2倍になる場合の実験結果を比較した研究等があります。気象研究所の大気・海洋混合層モデルによる二酸化炭素2倍に

伴う地上気温の増加の地理的分布を示します(図1-12)。

現在の気候モデルには不十分なところがあります。気候モデルに取り入れられている諸物理過程に自然を的確に反映しているかどうか観測資料が不十分なため解らないところがあるためです。今後、観測資料が蓄積され、物理過程の解明が進むとともに、気候モデルは、更に良くなっていきます。

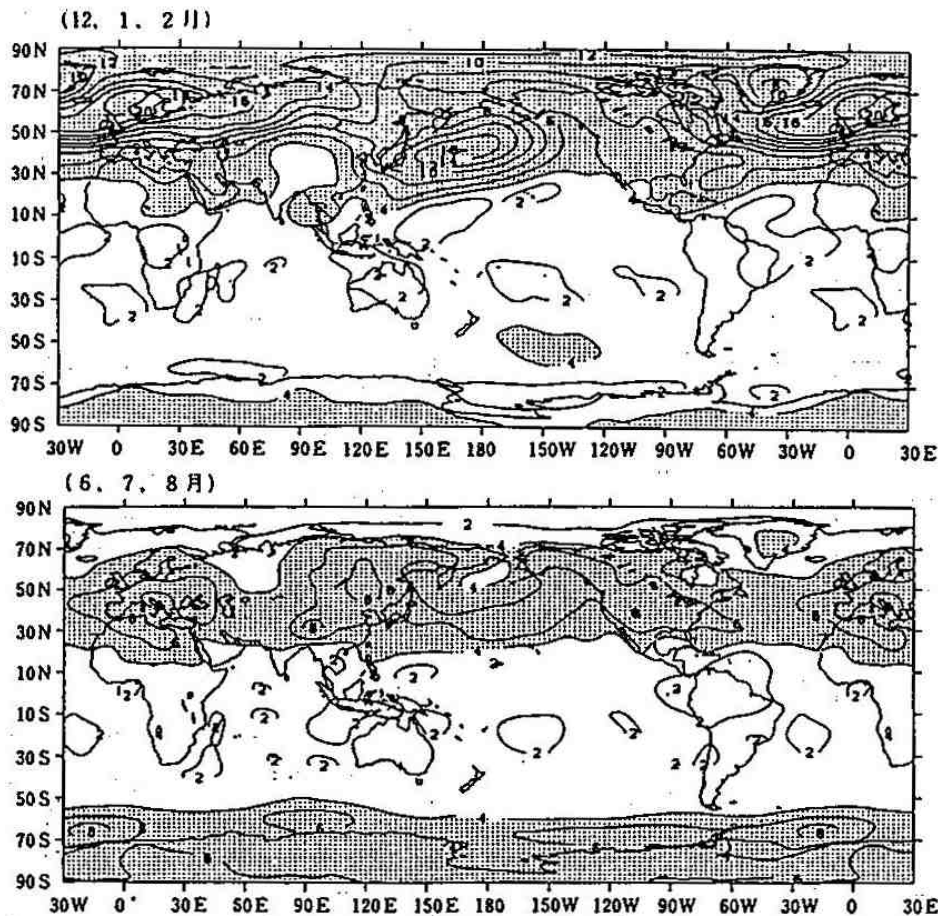


図1-12 気象研究所大気・海洋混合層モデルによって得られた二酸化炭素2倍に伴う地上気温の増加の地理的分布

上:12, 1, 2月平均、下:6, 7, 8月平均(単位℃)

(注意:冬期、日本海の大きな昇温域は、 $1 \times \text{CO}_2$ (現在)の気候のシミュレーションにおける海氷の南限付近と一致している。観測される海氷の南限はもっと北に位置するので、実際の昇温ももっと高緯度で起こると予想される。これは、海洋混合層モデルにおいて海洋による熱輸送を零と仮定しているため、高緯度域のシミュレーションが観測より低温になっていることを反映している。)

(気象庁の異常気象レポートによる)

温室効果気体増加による気候変動

多くの気候モデルの結果(表1-1)を総合し、数10年後のおおよその気候変化の見通しを気象庁の異常気象レポートから引用します。

温室効果気体の増加の不確かさや気候モデルの不完全さのために、この見通しが、この範囲外の値になる可能性もあることを留意しておく必要があります。また、現時点では、地域的な気候変化の詳細な見通しをたてることは困難です。

(地上気温)

- 全球平均(地上)気温は、今後温室効果気体増加に自然的要因による影響が加わり、変動を繰り返しながらも徐々に上昇する事が予想される。
- 全球平均の年平均(地上)気温は、2030年代に現在より1.5~3.5℃程度上昇すると予想される。昇温量は、冬半球特に北半球の高緯度で大きく、日本を含む北半球中緯度ではこ

れと同程度、低緯度ではこれより小さいと見られる。南半球での昇温は北半球より遅れるとみられる。

(海面水位)

- 全球平均気温の昇温量を1.5~3.5℃程度とすれば、これに伴う海面水位上昇量は20~110cmとなる。
- 来世紀中には大規模な南極氷床の融解及び西南極の棚氷の崩壊は起こらず、これによる大きな海面水位の上昇はないとみられる。

(降水量等)

- 全球平均降水量の増加が予想される。蒸発量も増加する。
- 中緯度の多雨帯は特に北半球で極方向にずれる。
- 海水域が後退する。
- 温暖化により春の雪解けが早く始まり、その

表1-1 種々の大気・海洋混合層モデルの特性とそれによって得られた地表気温上昇量 ΔT_s (℃)と降水量増加率 ΔP (%)

(* Mitchell (1980) より引用: 気象庁の異常気象レポートによる)

研究者名	二酸化炭素増加率	海洋混合層の厚さ(m)	海流による熱輸送	雲分布	ΔT_s	ΔP
Hansen et al. (1984)	2倍	気候値 (>65)	気候値	予報	4.2	11.0
Washington and Meehl (1984)	2倍	50	0	予報	4.0*	18.0*
Wetherald and Manabe (1986)	2倍 (4倍)	68	0	予報	4.0 (7.2)	8.7
Manabe and Wetherald (1987)	2倍 (4倍)	50	0	予報 [固定] (固定)	4.0 [2.3] (4.5)	
Wilson and Mitchell (1987)	2倍	60	気候値	予報	5.2	15.0
気象研究所大気大循環モデル(MRI-GCM-I)	2倍	50	0	予報	4.3	7.4

後地表面からの蒸発の盛んな期間が長く続く。
(異常気象)

現在のところ、上記の気候変化に伴う異常気象の発生総数の増減を予測することは困難であるが、異常気象の発生形態の変化として次のようなことが予想される。

- 気温の長期的な上昇傾向により、異常高温の発生数が増加する。
- 降水分布の変化に伴い、地域により異常多雨あるいは異常少雨の増加が考えられる。

【参考文献】

気象庁, 1989: 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

真鍋淑郎, 1985: 二酸化炭素と気候変化、科学 55、84-92

松野太郎, 1987: 二酸化炭素の気候に与える影響、気象研究ノート 160、161-185

浅井富雄, 1988: 気候変動—異常気象—長期変動の謎を探る一、東京堂出版

新田尚, 1980: 大気大循環論、東京堂出版

吉野正敏他編集, 1986: 気候学・気象学辞典、二宮書店

