

地球温暖化問題の現状

CURRENT STATUS OF GLOBAL WARMING ISSUE

花木 啓祐*

Keisuke HANAKI

ABSTRACT; According to the most recent report by IPCC, the increasing trend of greenhouse gases (GHGs) continues and simulation suggests that the estimated temperature rise in 2100 will be about 2 °C. Simulation based on general circulation model assuming the future scenarios suggests that CO₂ emission must be reduced significantly to stabilize the atmospheric concentration of CO₂ even at higher level than the current value. The problems of loss of land by sea level rise, reduction in crop production and water resource shortage due to the climate change will be serious more in the developing countries rather than the developed countries.

KEY WORDS; global warming, climate change, greenhouse gas, impact, sea level rise, agriculture, water resources

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の報告書が1995年12月に公表された¹⁾⁻³⁾。それによれば、科学的な知見の見通しはやはり近い将来の気候変化を予測しており、これまでに実際に起きた気候変化が予測よりも小さかったのは大気中に放出されたイオウ酸化物のせいもあり、今後はやはり温暖化は起きるであろうとされている。また、大気中の二酸化炭素濃度を安定化する（一定の濃度の水準に抑える）ためにはかなりの努力が必要であることも示されている。予測される気候変化の影響の中には土木工学との関わりの深い海面上昇の問題、水資源の問題もあり、これらの問題は未だ顕在化していないが将来的には大きな問題になりうる。温暖化の影響を評価しつつそれに備えるという立場と、それにも増して必要なのは温室効果ガスの排出を抑制する努力である。

2. 地球温暖化の機構

温室効果ガスとは、地球の対流圏大気に存在する気体で、太陽からの短波入射（日射の直達）をさえぎらない一方で、地表からの長波放射（赤外放射）を吸収する温室のような性質を持っているものをいう（図-1⁴⁾）。地球の大気と外側とのエネルギーの収支のバランスがとれたところで地球の大気の状態が落ちつくわけであるから、太陽からの入射分に釣り合うだけの放射が行われなければならない、このような性質（放射強制力という）を持つ気体が大気中に存在すると地表の温度が上昇する結果となる。

もっとも、自然の条件でも地球大気中には二酸

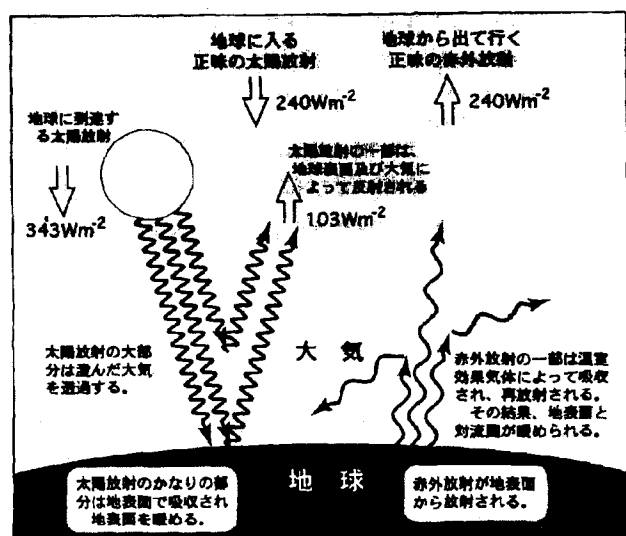


図-1. 大気の全球的、長期的な放射バランスを示す単純化した図⁴⁾

* 東京大学先端科学技術研究センター

Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

化炭素と水蒸気を中心として温室効果ガスが存在しており、これらのガスの温室効果のおかげで地球大気は約33℃高められ、生物が生存できる現在の環境が形成されている。その意味では温室効果は地球の生物の生存にとって本来は不可欠の現象である。しかしながら、産業革命以降の人間活動は大気中の温室効果ガスの濃度を人為的に高め、それによって温室効果が1割程度強まり気温の上昇を始めとする気候変動が起きると懸念されているのである。

3. 温室効果ガス

3. 1. 種類と傾向

人為的な排出が問題となっている温室効果ガスは種々存在するが、実際の気への温室効果の強さは、この吸収の強さとガスの大気中での寿命によって決定される。IPCCは科学的知見をまとめ、各温室効果ガスの大気濃度の変化の傾向、寿命、現時点で排出されたガスが今後20、100あるいは500年間にわたって及ぼす温室効果を示している¹⁾。表-1はその一部をまとめたものである。この中

表-1. 温暖化ポテンシャル (GWP).
それぞれの温室効果ガス1kg がCO₂の1kg に比べて何倍の温室効果を持つかを示したもの。ガスにより寿命が異なるので、今後何年間を対象期間にするかにより値が異なる (文献1)からの抜粋)

	対象期間		
	20 年	100 年	500 年
二酸化炭素	1	1	1
メタン(間接効果含む)	56	21	6.5
亜酸化窒素	280	310	170
CF ₄	4,400	6,500	10,000

CFC (クロロフルオロカーボン) 自身は温室効果を持つが、成層圏オゾン層破壊を通じて冷却効果も持つ

表-2. 人間活動の影響を受ける温室効果ガス¹⁾

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC-11	HCFC-22	CF ₄ (パーフルオロカーボン)
工業化以前	~280 ppmv	~700 ppbv	~275 ppbv	zero	zero	zero
1994 年濃度	358 ppmv	1720 ppbv	312 ppbv	268 pptv	110 pptv	70 pptv
1980 年代の年間濃度変化	1.5 ppmv/yr 0.4%/yr	10 ppbv/yr 0.6%/yr	0.8 ppbv/yr 0.25%/yr	0 pptv/yr 0%/yr	5 pptv/yr 5%/yr	1.2 pptv/yr 2%/yr
大気中の寿命(年)	(50-200)*	12†	120	50	12	50,000

*CO₂の寿命については様々なシンクのプロセスがあるため、唯一の値が定まらない。
†メタンの間接効果から算出 1 pptv = 1 parts per trillion (1兆分の1)

で、成層圏のオゾン層の破壊の原因となっているクロロフルオロカーボン (CFCs、フロン) については、それ自身は温室効果を持つが、オゾン層の破壊を通じて冷却効果を持っており、当初よりも実質の温室効果は小さいと考えられるようになってきている。CFCsの代替物質の中には、オゾン層は破壊しないものの温室効果を持つものがあり、これらは注意を要する。工業化以前の安定した状態から現在までの程度温室効果ガスが増大したかを示すと表-2 によるになる。二酸化炭素の場合、産業革命前の280 ppmvから358 ppmvにまでわずか100~200年の間に増加している。過去20万年の間の大気の組成と気温の変化の相関を南極の氷柱から調べてみると

図-2 のようになり、地球大気中の二酸化炭素の濃度は現在ほど高かったことはこれまでになく、またこのような急速な濃度上昇を地球は経験したことがない。すなわち、これまでに地球で起きたことのない現象が起きてても何ら不思議のない状況といえるだろう。

産業革命以降現在

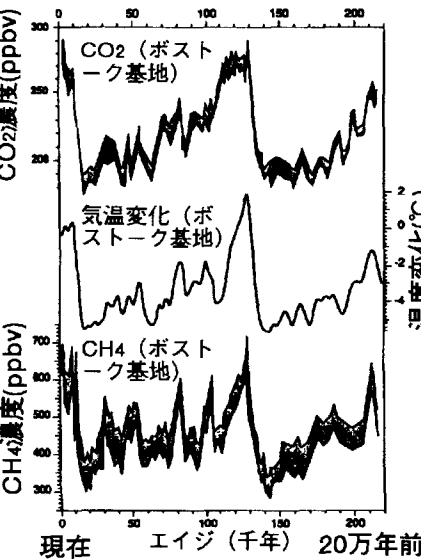


図-2. 南極ポストーク基地の氷柱(ice core)の解析によるメタン、二酸化炭素と気温の相関関係⁵⁾

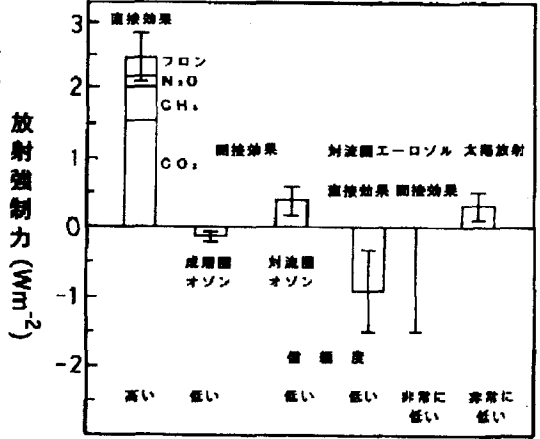


図-3. 産業革命以降現在までの温室効果気体とエアロゾルの変化による全球平均した放射強制力の見積⁴⁾

までに排出された温室効果ガスがそれぞれどの程度放射強制力として温室効果に寄与してきたかを示すと図-3のようになる。これらの中では二酸化炭素の寄与がやはり最も大きく、メタンガス、CFCs、亜酸化窒素がそれに続いている。しかし、前に述べたようにCFCsは成層圏オゾン層破壊により負の効果をも同時にもたらしめている。近年着目されているのが大気汚染物質のイオウ酸化物の排出に起因する硫酸ミストのエロゾルによる冷却効果である。すなわち、大気汚染のために冷却効果が生じており、その効果が無視できないと言う皮肉な結果になっている。なお、同じ大気汚染物質でも窒素酸化物は、光化学スモッグとして良く知られるように対流圏オゾンの生成につながり、これは温暖化に寄与する。

温室効果ガスの増加によって大気の放射バランスが変化するが、実際の気候はこの変化に正のフィードバックが加わり、いわば増幅した形で起きる。例えば、自然の温室効果ガスである大気中水蒸気濃度が温度上昇のため増加することによる温室効果の増幅、寒冷地の氷河の融解によるアルベド（太陽エネルギー反射率）の変化による熱収支への影響はその例である。更に重要なことは実際に気候変化が起きるまでには大きな時間遅れが生じることである。このことは、既に気候変化が起き始めているにも関わらずそれが確認されるまでに時間がかかるということ、また温暖化防止対策をとり温室効果ガスの排出削減に成功したとしてもその効果が出るまで温暖化が更に進行し続けるということを意味する。不確定な中で温暖化対策の見極めをつけていかなければならないとされるゆえんである。

3. 2. 温室効果ガスのソースとシンク

地球温暖化を防ぎ、あるいは遅らせるためには、各温室効果ガスについてその発生源（ソース）と消失先（シンク）を特定することがまず要求され、そのための努力が全世界でなされている。

二酸化炭素では化石燃料の燃焼に伴う排出と森林破壊による実質的な放出がソースになっている。図-4に示すように、そもそも大気と地上生態系の間では50~100×10¹⁵ g/年程度の炭素の交換が起きている。森林破壊によってそれがわずかにアンバランスになるだけでも大気中の二酸化炭素濃度に大きな影響が与えられる。地球全体でのソース、シンクと大気中の二酸化炭素の濃度上昇の間の収支は次のように推定されている¹⁾。

炭素収支[Pg(10¹⁵g=Gt)-C/年]

ソース

化石燃料燃焼・セメント生産	5.5±0.5
熱帯での森林破壊	1.6±1.0
合計	7.1±1.1

シンク

大気中への蓄積	3.3±0.2
海洋による吸収	2.0±0.8
北半球での森林吸収	0.5±0.5
その他の陸上吸収源 (missing sink)	1.3±1.5

陸上吸収源：施肥効果（CO₂増による光合成増0.5~2.0、窒素肥料によるもの0.2~1.0）

このうち、十分に特定できていないシンクがmissing sinkと呼ばれていたが、現在では陸上の吸収によるものではないかと考えられるようになっている。

メタンのソースには様々なものがあり、その様子は図-5のようである。これらのソースの内、人為的に制御可能なものは限られており、特に都市部では廃棄物の埋め立てにともなうメタン生成の管理が必要とされる。

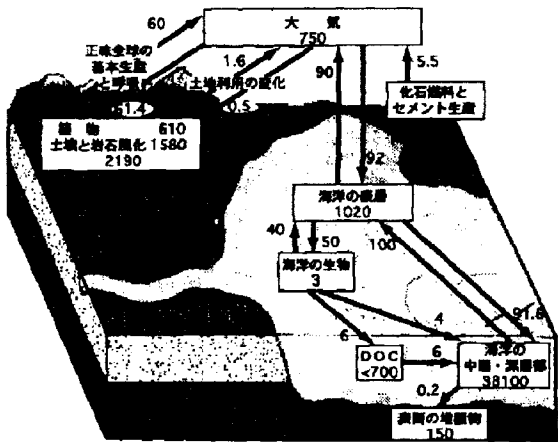


図-4. 全球的な炭素循環⁴⁾。箱の中の数字は各貯蔵庫の大きさをGt(Pg)Cで示したもの。各々の矢印は炭素のフローをGt(Pg)C/年で示す。

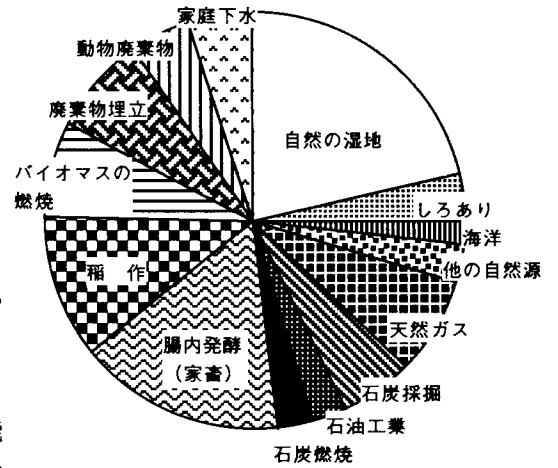


図-5. メタンの発生源⁵⁾

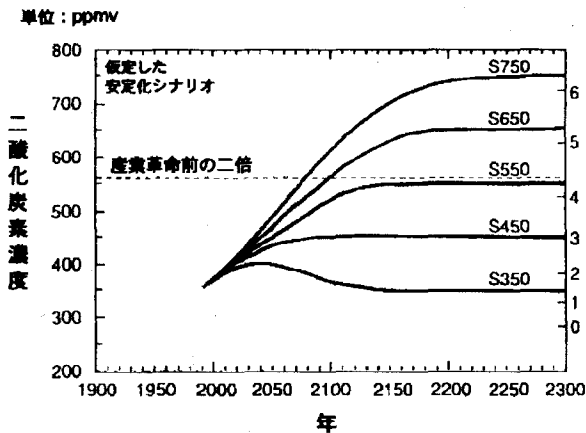


図-9. 二酸化炭素の大気中濃度が350, 450, 550, 650, 750 ppm に安定化するときの大気中濃度の変化⁴⁾

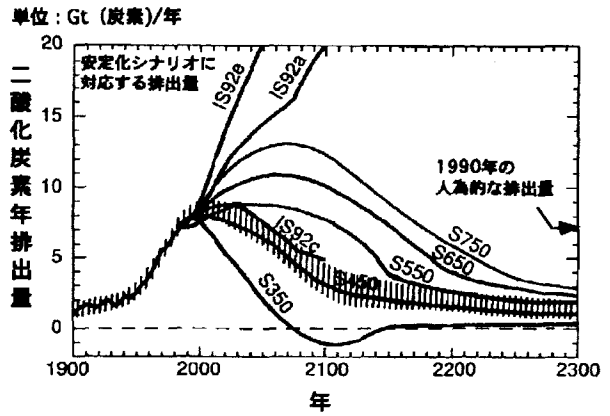


図-10. 二酸化炭素の大気中濃度が350, 450, 550, 650, 750 ppm に安定化させるためのCO₂排出量の変化⁴⁾ (気候モデルの感度は中位)

の下でGCMによる推定を行った結果が図-8である。2100年には温度上昇は1.3-2.5℃程度となる。成りゆきに近いと考えられるIS92aシナリオでは2℃程度である。

このような温度上昇は一見大きくないが、将来ともそれが継続すれば重大な影響が懸念される。そこで、大気中の二酸化炭素を始めとした温室効果ガスの濃度を増加させずに抑制する（安定化という）ことが目標として考えられる。図-9は最終的に安定化するCO₂濃度を設定したときの道のりである。そのためにはCO₂の発生量をどの程度抑制する必要があるかを示したものが図-10である。先ほどのシナリオの内、IS92aでは最終的な安定化からはほど遠いことがわかる。極めてCO₂排出量の低いシナリオIS92cでようやく450-500 ppmでの安定化の道のりに沿うことになる。このシナリオの場合、21世紀の半ばには世界全体でのCO₂排出量を1990年水準に戻さなければならず、発展途上国の社会の発展と人口の増加に伴って必然的に起きるエネルギー消費の増大を考えれば極めて困難な道のりであると言わざるを得ない。

5. 温暖化の影響と対策

気候の変化に伴い、様々な面で影響が現れることが懸念されている。本来は、影響の程度を明確に評価してから対策を立てるべきであるが、影響の把握は実際には容易ではない。一方で、影響が現れてからでは手遅れになる面もある。そこで、影響を見越しつつ予防措置をとっていくことが必要とされる。ここでは、いくつかの影響についてその特徴を見たい。

まず、海面上昇に関しては先に示したCO₂排出のシナリオに対して図-11に示すような予測がなされており、2100年には全球平均で50 cm 程度の上昇が予測されている。グリーンランドや南極の氷床は融解するとけた違いの海面上昇幅をもたらすが、表-4に示すように当面そのような

表-4. 過去100年間と将来の海面上昇への要因の寄与(cm)¹⁾

要因	低位	中位	高位	2100年予測*
海水の熱膨張	2	4	7	28
氷河/小氷冠	2	3.5	5	16
グリーンランド氷床	-4	0	4	6
南極氷床	-14	0	14	-1
地表水と地下水の貯留	-5	0.5	7	
合計	-19	8	37	49
観測値	10	18	25	---

* 2100年予測はIPCC IS92a シナリオにより、モデルの感度は2.5℃

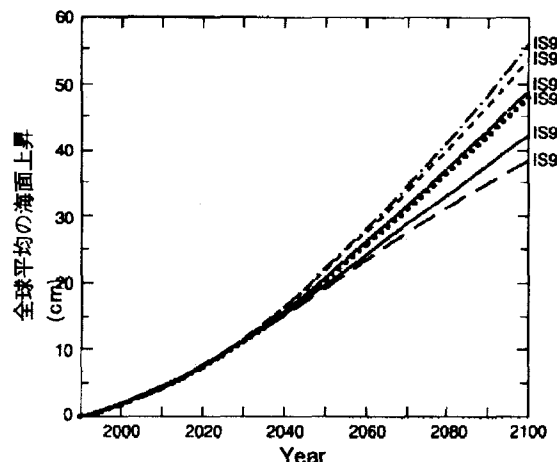


図-11. シナリオ別の海面上昇予測¹⁾。(気候モデルの感度は中位)

事態は生じないと考えられる。海面の上昇幅は場所により異なるが、同じ上昇幅でも、実質的な影響の受け方について

亜酸化窒素については、その生成反応が未解明で、また微生物による反応はきわめて不均質なマイクロの環境に依存するために見積の幅が大きくなっている（表－3）。推定されたソースと大気中濃度の増加を比較すると、未確認の亜酸化窒素のソースが存在していると考えられる。都市部では自動車排ガスや燃焼工程に由来するものが大きく、また推定困難であるが排水に由来するものも無視できない。

4. 温暖化の将来予測

温室効果ガスが原因になり気候変化が起きることは間違いないが、実際に起きる気候変化の程度と時期は気候システムにより支配される。これを解明し、将来を予測するために大循環モデル(GCM)によるシミュレーションが用いられる。このモデルは物理的な根拠に基づいたものであるが、最大の困難な点はそ地球が未経験の現象の予測の妥当性を検証する方法がない点である。そこで、現在までに実際に生じている気温変化がこのモデルで説明できるかどうかを確かめることがされる。図－6に示すように、硫酸ミストによる冷却効果を組み込んでGCMで計算すると現在までの0.5℃程度の温度上昇が説明できることが示されている。

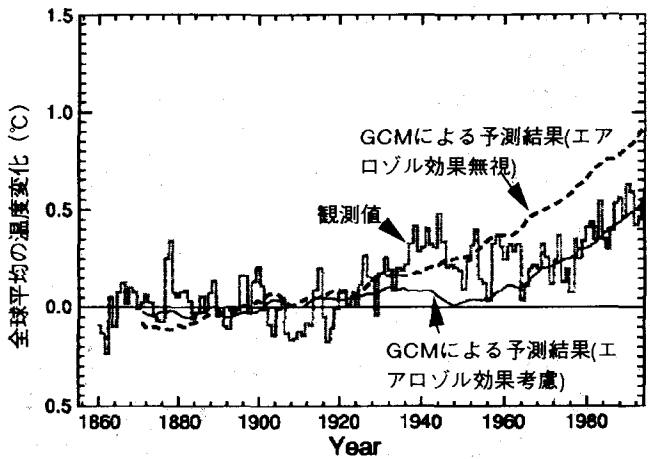
しかし、提唱されているいくつかのGCMの間では得られる結果に若干の相違があり、将来予測はを不確定な幅を持ったものにならざるを得ない。

いくつかのシナリオを設定して将来予測が行われている。図－7にはIPCCが検討に用いた二酸化炭素排出のシナリオを示す。それぞれのシナリオ

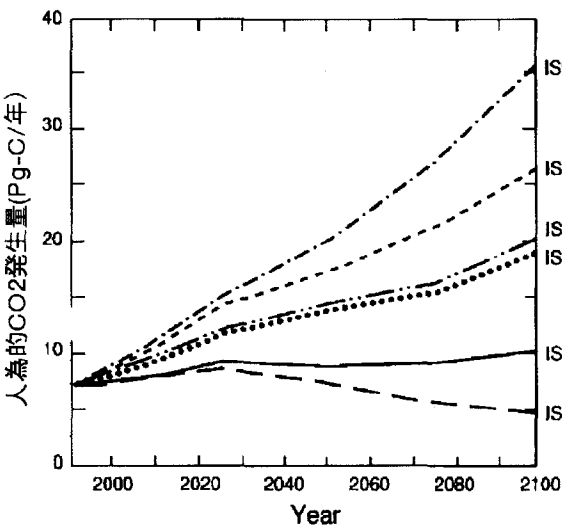
表－3. N₂Oのソースとシンク (Tg=10¹²g)
文献5に基づき作成

ソース (Tg-N/年)		シンク (Tg-N/年)	
自然起源		成層圏での分解	9-16
海洋	1-5	土壌中での分解	?
熱帯土壌			
湿林	2.2-3.7		
乾燥サバンナ	0.5-2.0		
温帯土壌		シンク合計	9-16
森林	0.1-2.0		
草地	0.5-2.0		
人為起源			
耕地	1.8-5.3	大気中の濃度上昇	
バイオマス燃焼	0.2-1.0		3.1-4.7
工業起源*	0.7-1.8		
畜牛関係	0.2-0.5		
わかっているソース合計	10-17	推定されるソース合計	13-20

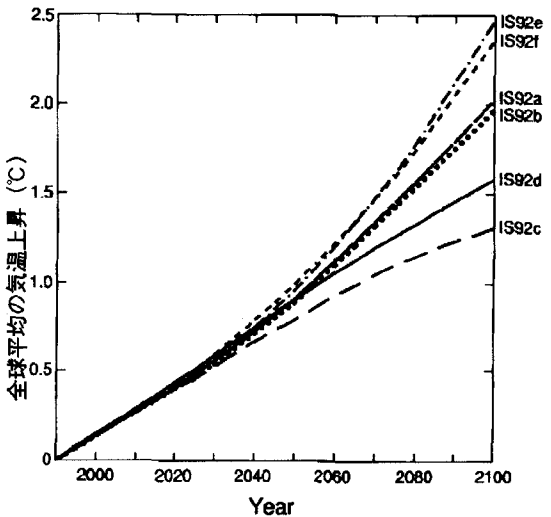
*工業起源には自動車排ガス (0.1-0.6) とアジピン酸製造プロセスを含む。



図－6. 1860年から1990年までの全球の年平均温度の変化¹⁾。温室効果ガスの増加のみを考慮した計算、硫酸エアロゾルを考慮した計算、観測値を示す。



図－7. シナリオIS92における人為的CO₂発生量の予測¹⁾



図－8. IS92シナリオ毎の1990年から2100年までの全球の平均気温上昇の予測。モデルに対する感度は2.5℃とした¹⁾

は国によって大きな不公平性がある。すなわち気候変化の原因者である先進国で致命的な影響が生じない反面、発展途上の島嶼国は大きな打撃を受けるのである。また、湿地をも含む生態系にとっては100年程度で50 cmの上昇幅は非常に速い変化であり、生態系が追従できないと言う問題が基本的にある。また、人工的な構造物を後背地に持つ場合には砂浜が失われる結果となる。このように、弱者が影響を受けるという点は看過できない問題である。

次に農業への影響については、気候変化の影響とCO₂濃度の増大による光合成の促進効果がある。ただし、後者については作物の種類によって異なり、例えばとうもろこしなどはその恩恵を受けない。表-5にはいくつかのGCMの結果に基づく穀物収量の予測結果を示す。適応策をとれば、先進国ではむしろ収量が増加するが、発展途上国ではそれでもなお収量が減少するという、公平でない結果がここでも予測されている。

水資源については、そもそも社会・経済的な要因によって水の需給が逼迫しているよう

な場所で気候変化がいわば追い打ち的に影響を与えることが予測される(図-12)。気候変化は、降水量の変化をもたらす、蒸発散量の増加をもたらす。それぞれの場所で利用可能な水資源が増大するか否かは場所によって異なる。一人当たりの利用可能水資源を比較したものが図-13であ

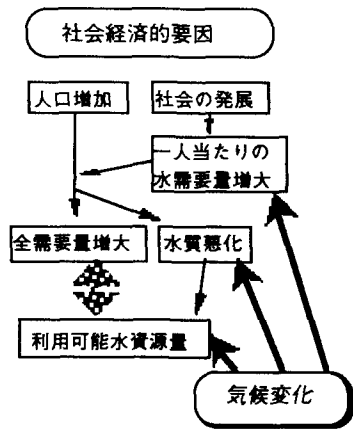


図-12. 水資源への気候変化の影響

る。おおざっぱには一人当たりの水利用可能量が1,000m³/年・人を下回ると水不足の状態になるとされている。南アフリカの場合、現状では水資源は何とか足りているが、2050年には気候変化がなくとも不足状態に陥る。気候変化がその事態を更に悪化させるが、その程度については用いるGCMによって予測が異なっている。発展途上国であるマダガスカルでは社会・経済的な要因による水不足が極めて大きいことがわかる。ベトナムの場合も大幅に一人当たりの水資源量が減少するが、水資源が豊富なため、深刻な水資源不足は生じないと予測される。

参考文献

- 1) IPCC (1996), "Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge University Press
- 2) IPCC (1996), "Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge University Press.
- 3) IPCC (1996), "Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Cambridge University Press.
- 4) 気象庁(1995)「地球温暖化監視レポート1994」(IPCC 1994の要約の和訳より)
- 5) IPCC (1995), "Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of The IPCC IS92 Emission Scenarios.", Cambridge University Press.

表-5. GCM平衡気候における穀物収量(2060年の収量に対する増減の%で表示) 1)

地 域	GCMの種類		
	GISS	GFDL	UKMO
世界全体			
気候効果のみ	-10.9	-12.1	-19.6
+CO ₂ の生理効果	-1.2	-2.8	-7.6
+適応レベル1	0.0	-1.6	-5.2
+適応レベル2	1.1	-0.1	-2.4
先進国			
気候効果のみ	-3.9	-10.1	-23.9
+CO ₂ の生理効果	11.3	5.2	-3.6
+適応レベル1	14.2	7.9	3.8
+適応レベル2	11.0	3.0	1.8
発展途上国			
気候効果のみ	-16.2	-13.7	-16.3
+CO ₂ の生理効果	-11.0	-9.2	-10.9
+適応レベル1	-11.2	-9.2	-12.5
+適応レベル2	-6.6	-5.6	-5.8

適応レベル1では作物は変えないが、品種は変更、1ヶ月以内の作付け時期変更、新たなかんがいなし。適応レベル2では作物も変更、肥料も変更、1ヶ月以上の作付け時期変更可、新たなかんがい実施

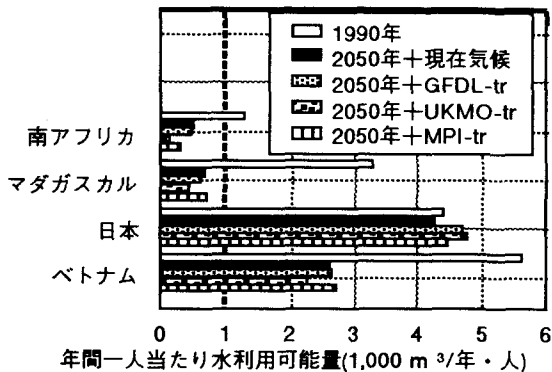


図-13. 将来の一人当たり水利用可能量に与える人口増加と気候変化の影響(IPCC 1995報告原案のデータを元に花木作成)