

1. 海洋の雪 (マリンスノー) と将来の気候

北海道大学大学院地球環境科学研究科 山中 康裕

1. はじめに

1980年代まで、気候と言え、日々の天気や季節変化などの気象現象の延長として理解されていたと思います。しかし最近10年間、海洋・陸面と空間的な拡がりと共に、物理的な過程に加えて、生物的・化学的な過程を含めたものとして理解されるようになりました。地球温暖化問題の中で、1990年代は二酸化炭素収支の問題として海洋や陸上植生の役割が議論され、2000年代は温暖化の影響を受けた陸上植生や海洋生態系がさらに温暖化を加速するのではないかと気候と生態系の相互作用が議論されています。また、最近の気候研究の一つの特徴は、国際的研究が盛んに行われるようになったことです。政府間機関であるUNESCO（国連教育科学文化機関）やそれに対応した非政府組織ICSU（国際学術連合会議）のもとで、物理的な側面としてのWCRP（World Climate Research Programme, 世界気候研究計画）とともに、生物化学的な側面としてIGBP（International Geosphere-Biosphere Programme, 地球圏-生物圏国際協同研究計画）が1990年から行われています。このIGBPのもとで、現在、大気・陸面・海洋について数多くの気候と生物に関する国際計画が行われています。

今日は、気候における学問や新しい見方が生まれていく様子を伝えられたら嬉しく思います。

2. 大気・陸上植生・海洋を巡る炭素循環

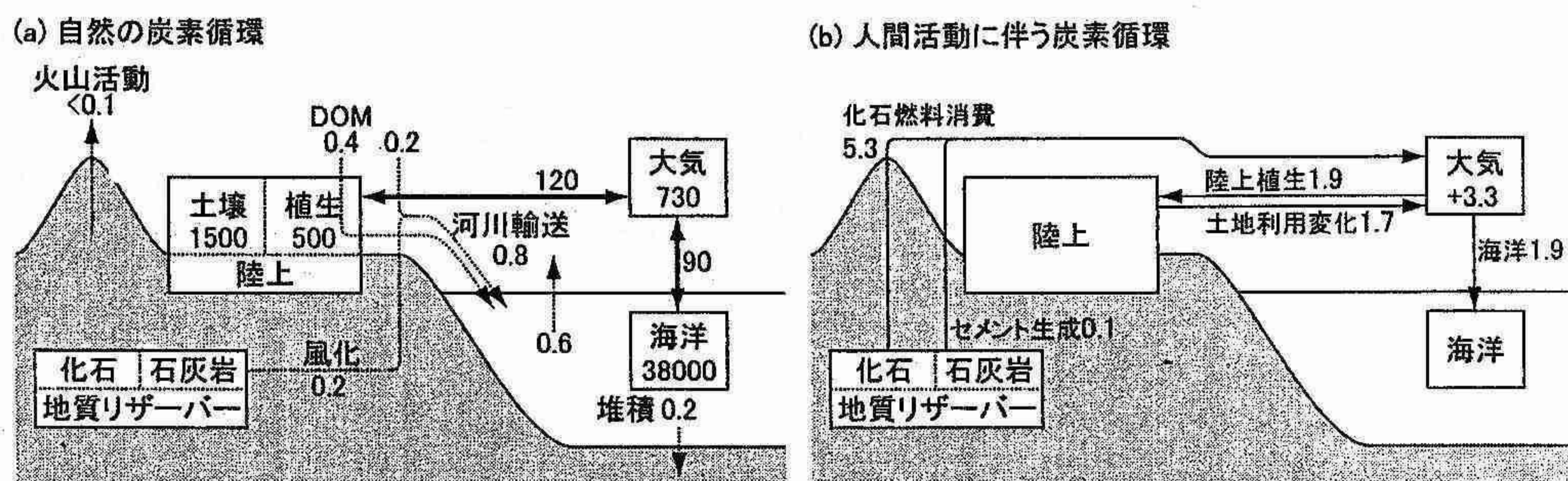


図1 (a)自然と(b)人間活動に伴う炭素循環。各要素における炭素量(1PgC)とその間のフラックス(年間PgC) [IPCC, 2001を日本語化]。

まず、大気・陸上植生・海洋に存在する炭素量とその間のやりとりについて見てみましょう(図1)。2003年における二酸化炭素の年平均濃度は約372ppm(1ppmは空気量の100万分の1)であり、炭素量約730PgC(1PgC=10¹⁵gC=1GtC)に相当し、陸上の植生と土壌の炭素量がそれぞれ約500PgC, 約1500

PgC, 海洋の炭素量は約38000PgCと見積もられています。また, 大気-海洋-陸上植生間の人為起源のやりとりは, 化石燃料の消費に伴う放出量が年間 5.4 ± 0.3 PgC, 大気-海洋間のやりとりが年間 -1.9 ± 0.6 PgC, 土地利用の変化に伴う放出量が年間1.7PgC (年間0.6~2.5PgC), 陸上植生の吸収量が年間 -1.9 PgC (年間 $-3.8 \sim 0.3$ PgC), それらの合計に相当する大気中二酸化炭素の増加量は年間 3.3 ± 0.1 PgCと見積もられています。人間活動によって放出された二酸化炭素の行方を議論する際に, 問題をややこしくする点は, 人間活動に伴うやりとりが元々自然あるものに比べて一桁・二桁小さいために, それらの量を観測によって正確に見積もることが難しいということです。例えば, 元々の循環の見積もりでは省略してしまうような陸上から海洋への河川による炭素の輸送とそれに伴う海洋から大気へあるいは海底への輸送量(図1a)が, 人間活動に伴うやりとりを考えるとときには無視出来ない大きさになることから, 想像出来るかと思えます。

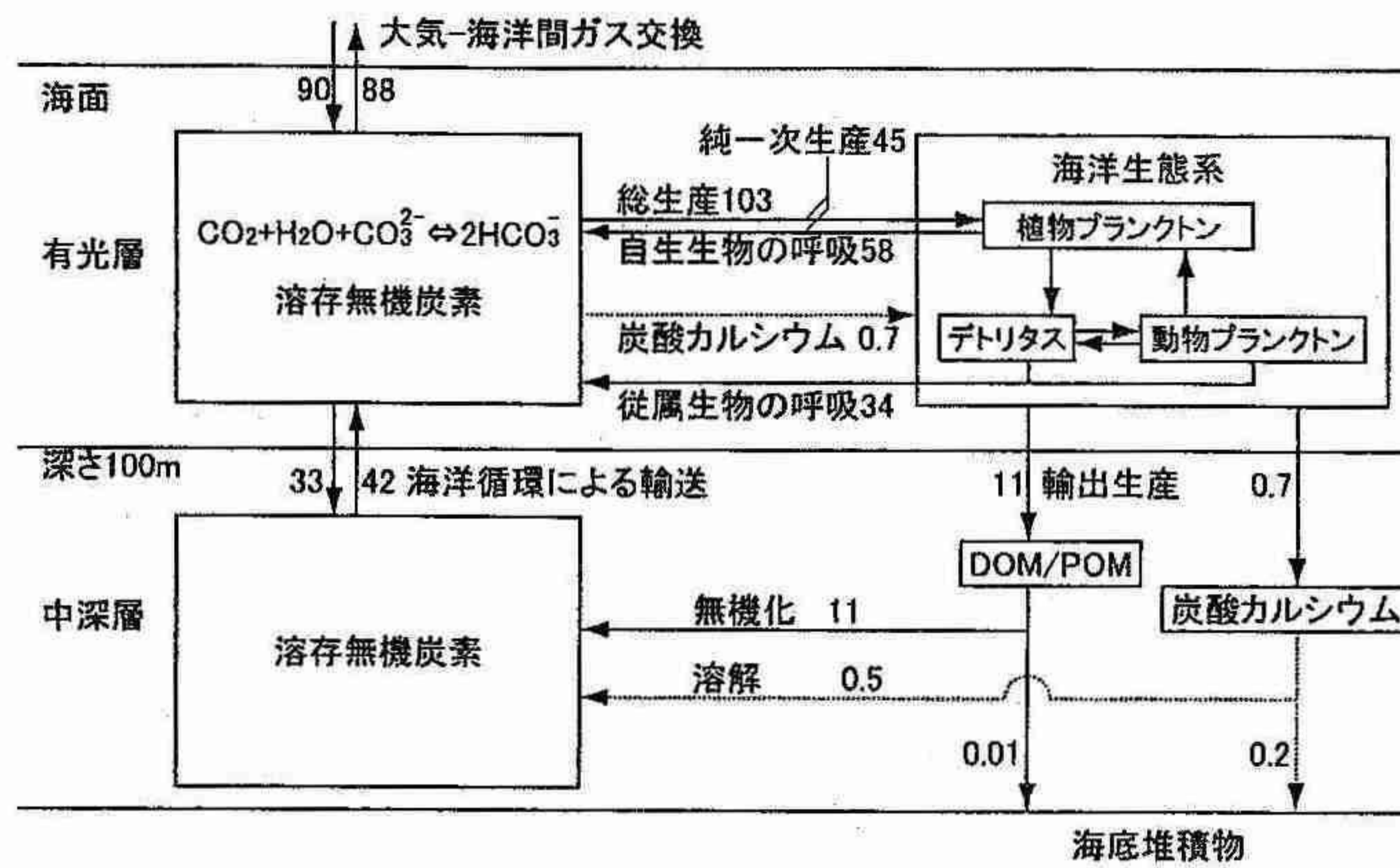


図2 海洋中の海水と生態系間の詳細なやりとり (年間PgC) [IPCC, 2001を日本語化]。

海洋中の二酸化炭素循環は, 海洋循環による物理過程と海洋生態系による生物化学過程に分けて考えられますが, 両者は密接に結びついています(図2)。海洋に吸収された二酸化炭素は, 二酸化炭素だけでなく重炭酸イオン(HCO_3^-)と炭酸イオン(CO_3^{2-})の形で海洋に溶けています。植物プランクトンの光合成により, 海水中の二酸化炭素や栄養塩から有機物が作られます(基礎生産, GPP)。その量はおよそ年間100PgCで陸上植生とほぼ同じ程度で, その約1割が, 沈降粒子(Particulate Organic Matter, POM)や溶存有機物(Dissolved Organic Matter, DOM)として有光層より深いところへ輸出されます。これらは輸出生産(Export Production)と呼ばれ, およそ年間11PgC程度と見積もられています。

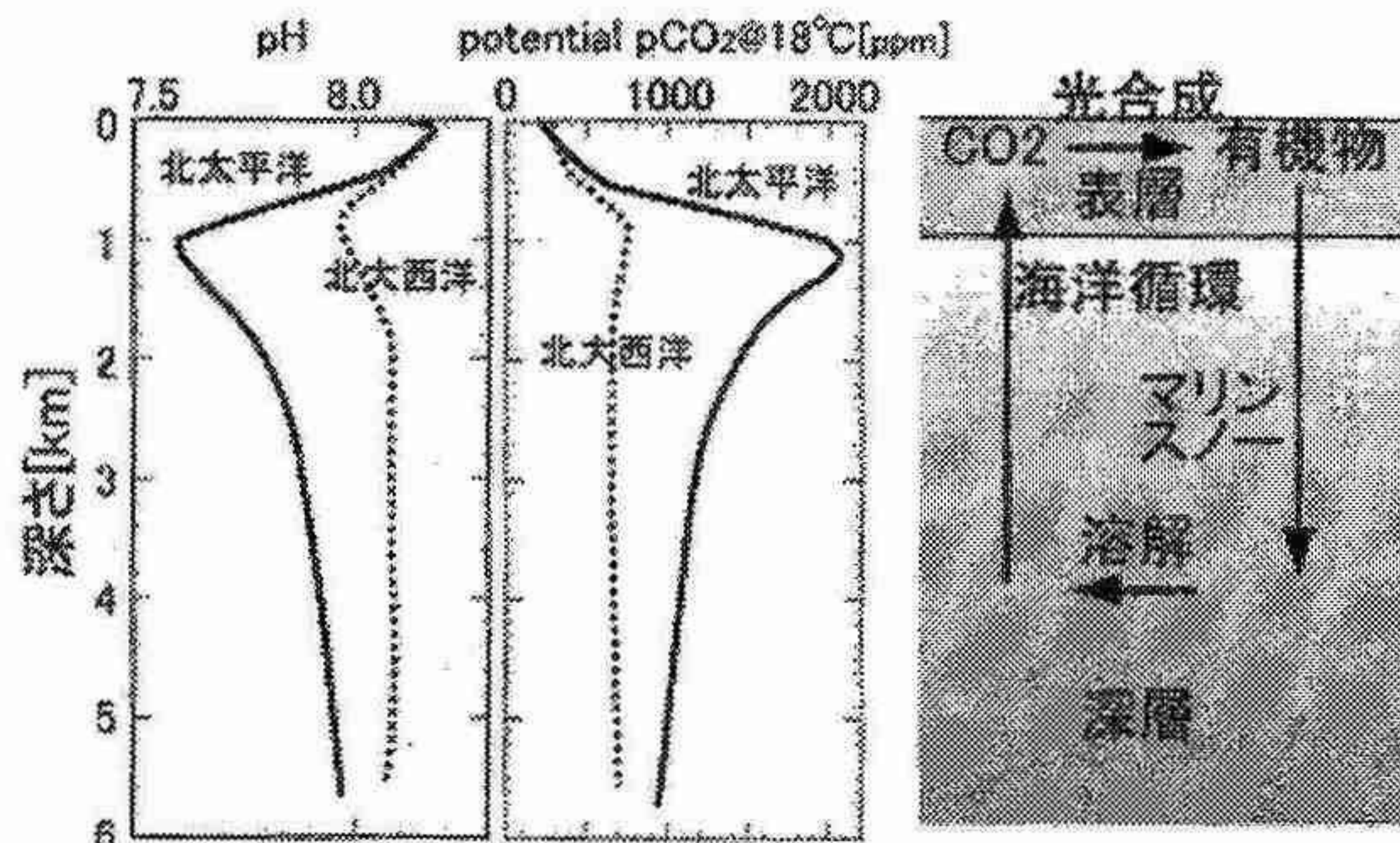
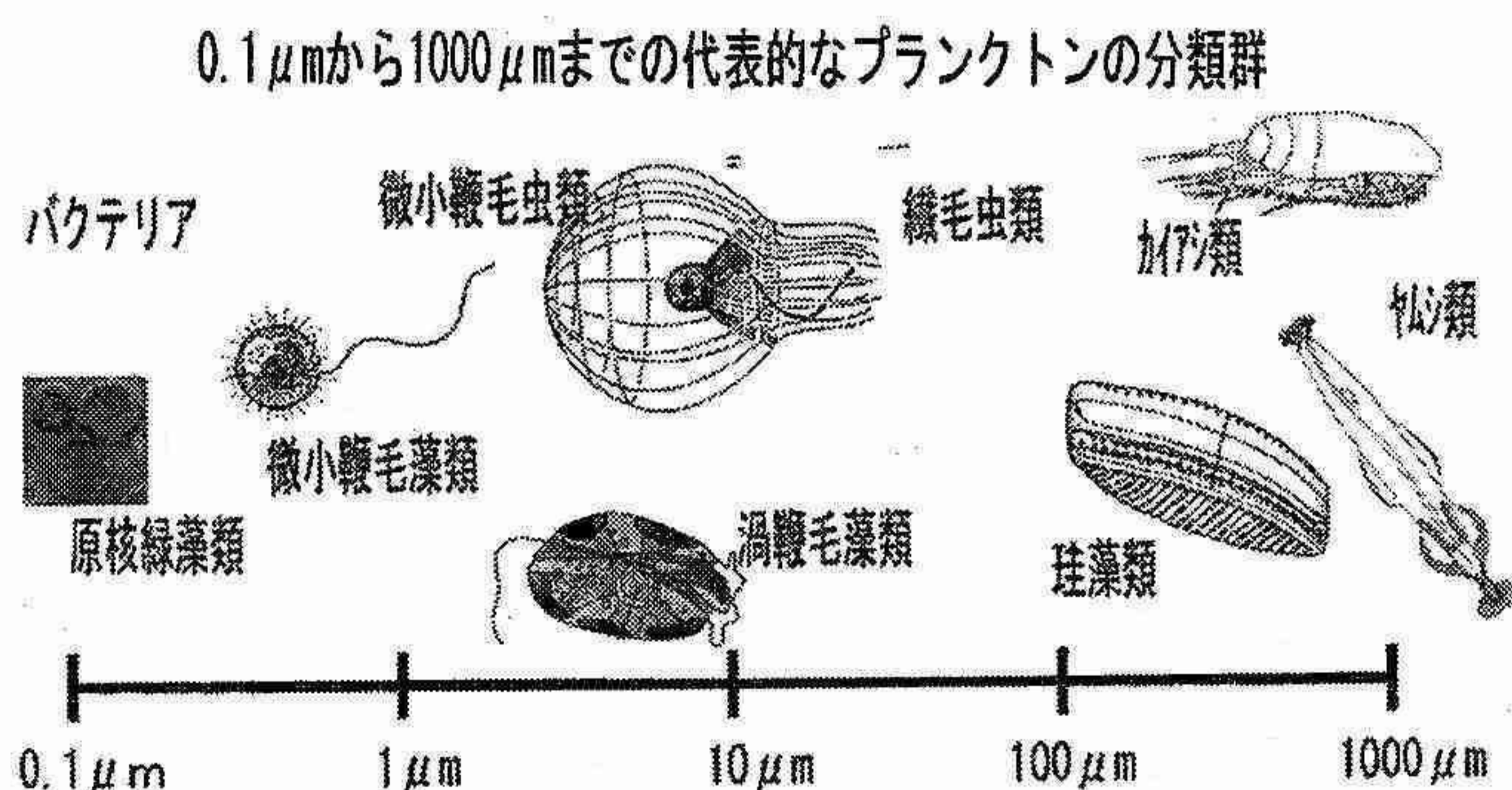


図3 マリン・スノーと海洋循環による炭素循環とpHと二酸化炭素分圧の鉛直分布。

沈降粒子は、プランクトンの死骸や糞がある程度の大きさに凝集して落ちてゆくもので、潜水艇から窓の外を見て、あたかも雪が降るように見えることから、マリン・スノー（海の雪）と呼ばれています。マリン・スノーとして深海に運ばれた有機物は、細菌によって分解され、再び海水中の二酸化炭素や栄養塩の形に戻ります（図3）。そのために、海洋表層では二酸化炭素分圧が現在の大気中二酸化炭素濃度と同じぐらい、北太平洋の深海ではおよそ2000ppmにもなっています。正しく言うと、このマリン・スノーのおかげで、海洋表層の二酸化炭素濃度は低くなり、それと同じになるように大気中二酸化炭素濃度が決まっていますのです。もし、海洋に生物が絶滅してしまったらどうなるのでしょうか？マリン・スノーによって作られていた表層で低濃度、深海で高濃度という関係がなくなり、大気中二酸化炭素濃度が600ppmぐらいに上昇すると見積もられています。これら生物生産とマリン・スノーの役割は、海洋表層の二酸化炭素を深海へ押し込めているようなものなので、生物ポンプと呼ばれています。

海洋はおよそpH8の弱アルカリ性です。海水中から弱酸である二酸化炭素が有機物となって取り除かれる表層ではややアルカリ性側により、有機物が溶ける深海では酸性側によっています（図3）。北大西洋と北太平洋を比べてみると、深層水が形成される北大西洋深海ではpHや二酸化炭素濃度はあまり表層のものとは変わりませんが、深層水の終着点である北太平洋深海では、表層のものと大きく異なります。

3. 海洋の生態系



海洋中には、数多くのプランクトンが棲んでいます。そのサイズは1mm以下で、サイズが10倍大きくなると体積は1000倍になるので、最も小さい0.1 μ mの原核緑藻類・細菌が1兆匹集まると大きなカイアシ類やヤムシ類1匹に相当します（図4）。これは雲粒と雨滴のサイズのような関係です。基本的に、動物プランクトンは少し小さな植物プランクトンや動物プランクトンを食べていますので、サイズが小さいものから大きなものへの食物連鎖が存在します。栄養塩が豊富な沿岸域・北太平洋亜寒帯域・南極海域では大きな珪藻類が生息し、食物連鎖は太く短くなっていますが、亜熱帯域のような深海からの栄養塩供給が少ない海域では、原核緑藻類・微小鞭毛藻類のような小さなプランクトンから始まる食物連鎖が細長くなっています。食物連鎖の段階が一つ増えるとそれだけ上位に食物が伝わらなくなるので、魚にとっては、元々植物プランクトンによる生物生産が少ないのに加え、餌が減ることになります。従って、沿岸域や湧昇域で魚が多く棲むようになります。逆に、海洋中の物質循環のやりとりを考える際には、魚などの高次レベルの生物に伴う物質循環の量は無視出来ることになります。

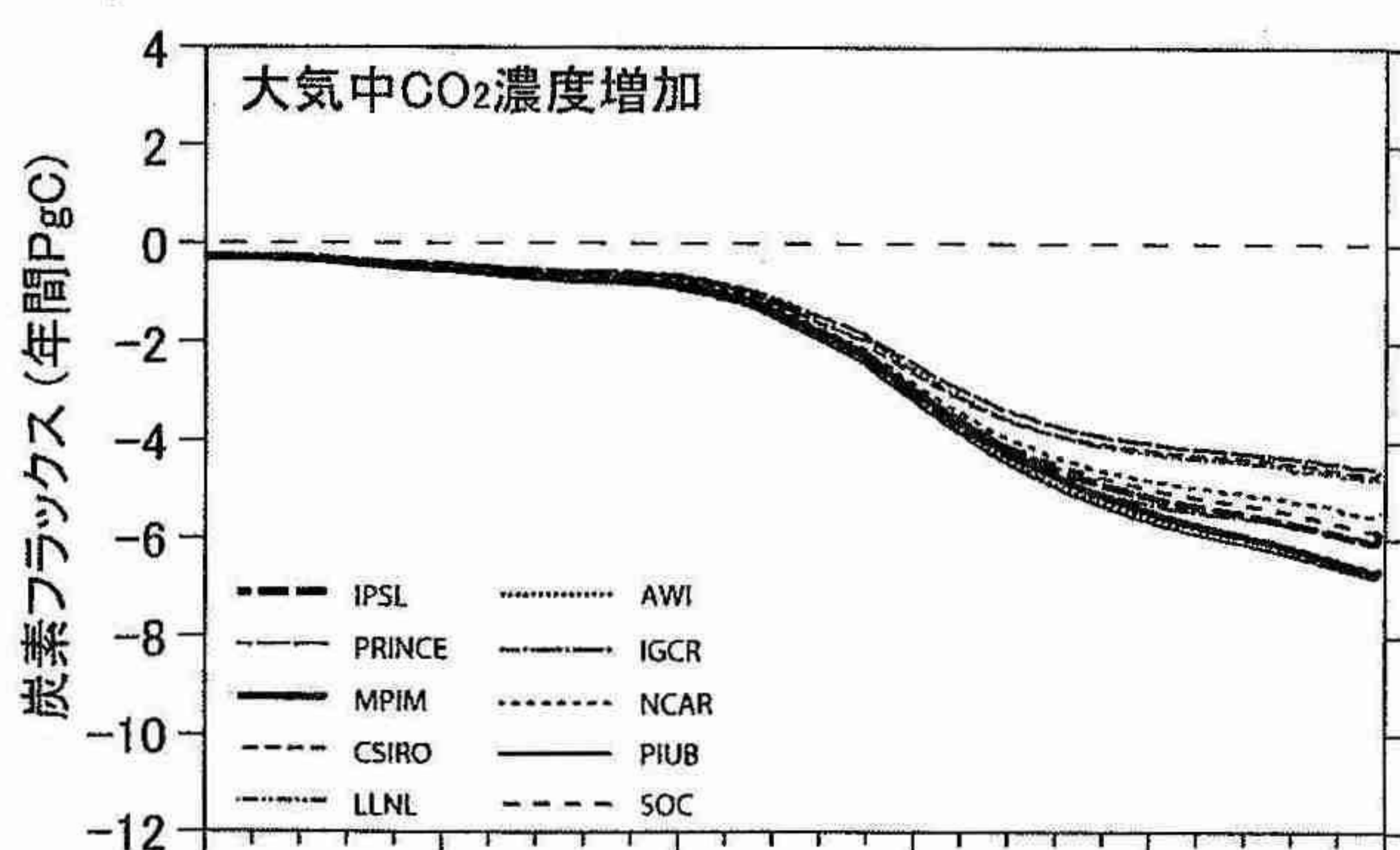


図5 海洋炭素循環モデルを用いた海洋による二酸化炭素の吸収量の見積もり [IPCC, 2001を日本語化]。IGCRが私のグループの結果。

全海洋を表現した3次元の海洋大循環モデル（簡単な説明は4.で述べます）に生物ポンプの効果を組み込み、海洋による二酸化炭素の吸収量の見積もりをするモデルが1990年代に開発されました。私が1992年に計算したのが日本で最初になります。その後、国際研究協力として、OCMIP（Ocean Carbon-cycle Model Intercomparison Project, 海洋炭素循環モデル相互比較研究）が行われ、私のグループを含めて世界10グループが計算を行いました。これらの結果は、5.で述べるIPCC報告書で、海洋による二酸化炭素の吸収量の見積もりとして採用されています（図5）。残念ながら、これらのモデルではまだ海洋生態系を十分に正しく表現しているものではありませんので、現在、より適切な生態系を表現するモデルを開発し、新たな見積もりを行おうとしているところです。

地球温暖化による海洋生態系やその生産のちょっとした変化が重大な影響を及ぼしうる可能性があります。それがどの程度の量なのか？どれくらいの時間が掛かって変化するのだろうかということが、今研究されています。

4. 地球温暖化の簡単な説明

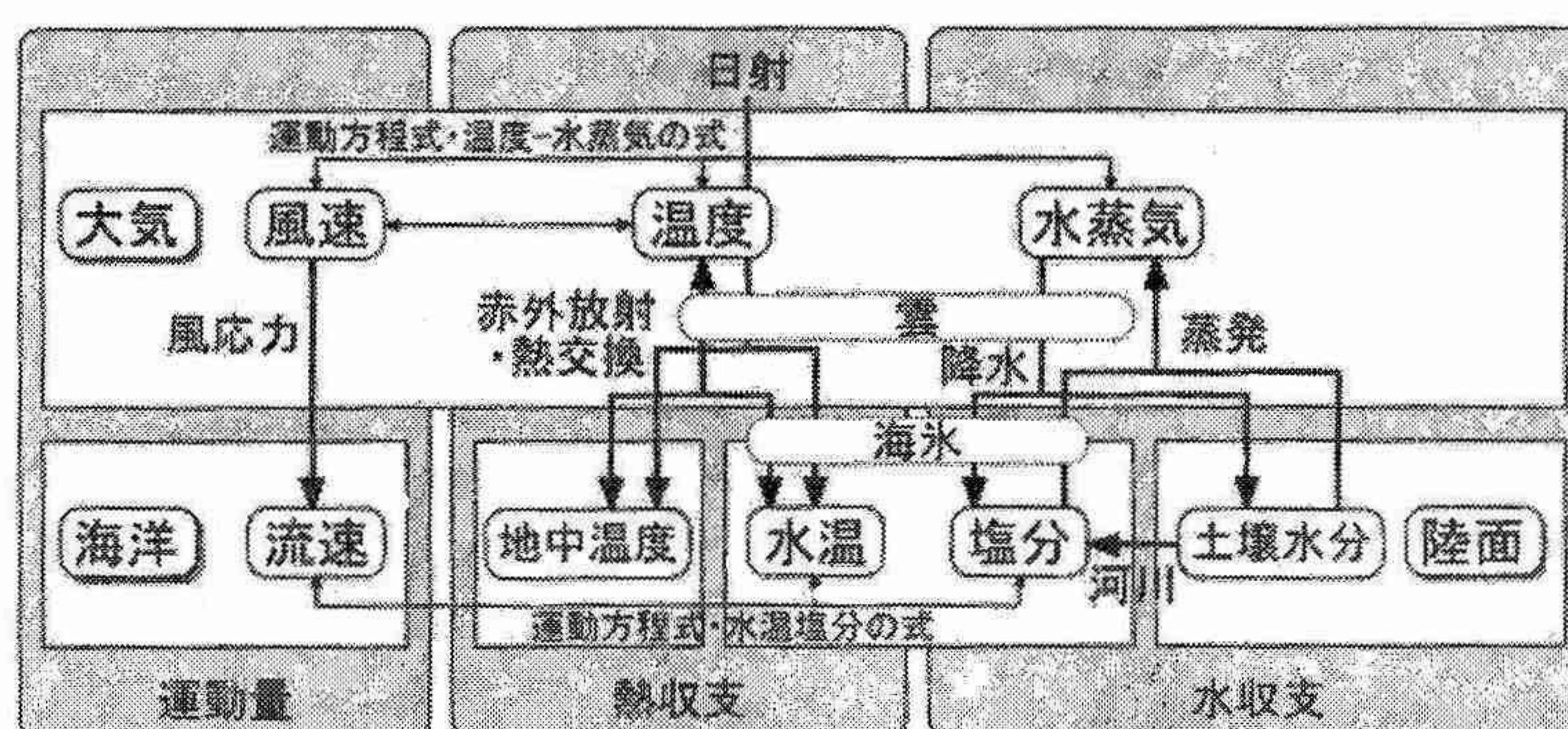


図6 大気海洋結合大循環モデルの模式図。

ここでは、大気中二酸化炭素濃度が上昇したときに、気温などの将来の気候がどうなるかを予測するモデルについて説明しましょう。大気の流れも流体力学方程式に従い、スーパーコンピュータを用いて計算

します。東西南北に数100km程度の粗い格子をとると、高気圧や低気圧、低気圧に伴う前線や降水帯などが大まかに再現できます。基本的には天気予報で用いられているモデルと同じですが、数十年から数百年間ぐらい時間積分する必要から、格子サイズは天気予報のものに比べるとかなり粗いものです。今、横浜にある地球シミュレーターという世界最高速のスーパーコンピュータを使って、天気予報と同じぐらいの細かな格子で計算が行われつつあります。図6に示すように、大気-海洋間や大気-陸面間の熱や水、運動量のやりとりを計算しながら、大気は大気で運動方程式に従った流れの計算、あるいは、日射や赤外線などによる大気中の加熱や冷却、雲の効果などを格子毎に計算し、海洋は海洋で運動方程式に従った流れの計算や水温、塩分などの分布の計算、陸面は土壌水分や地中温度、さらに積雪や融雪、河川など計算していきます。

天気予報などの短時間の予報では観測された海面水温を境界条件として計算しますが、地球温暖化の問題を考える際には海面水温の昇温がどの程度遅れるかを求める必要があります、大気や海洋、陸面を同時に解く必要があります。従って、上のような複雑な計算を行う必要があるのです。このモデルは大気大循環モデルと海洋大循環モデルを結合させたということで大気海洋結合大循環モデルと呼ばれていて、最近では気候モデルとも呼ばれています。大気大循環モデルでは観測された海面水温を境界条件として、あるいは、海洋大循環モデルでは観測された海上気温や降水、海上風を境界条件として用います。しかし、大気海洋結合大循環モデルでは、それらの観測値を用いません。そのために、観測できない将来予測が出来る一方、計算結果が実際の気候状態から時間と共に大きくずれてくることが起こりやすく、より確実な予測をするために努力しているのが現状です。

ここでは、世界の温暖化研究のパイオニアである真鍋淑郎先生の論文 (Manabe and Stouffer, 1991) に沿って、大気海洋結合大循環モデルの結果を見てみましょう。大気中二酸化炭素濃度を年1%ずつ増加させる(70年後に2倍の濃度に達する条件)と、地上気温は線形的に上昇し、70年後には、全球平均気温が約2.3°C上昇し、北半球では約2.8°C、南半球では約1.9°Cとなりました。彼の別の計算である2倍の二酸化炭素濃度にした長時間積分の最終的結果は両半球とも約4°C昇温するため、南半球では、最終的な昇温の程度が小さいのではなく、昇温が遅れていることとなります。また、北大西洋でも昇温が遅れている海域があります。

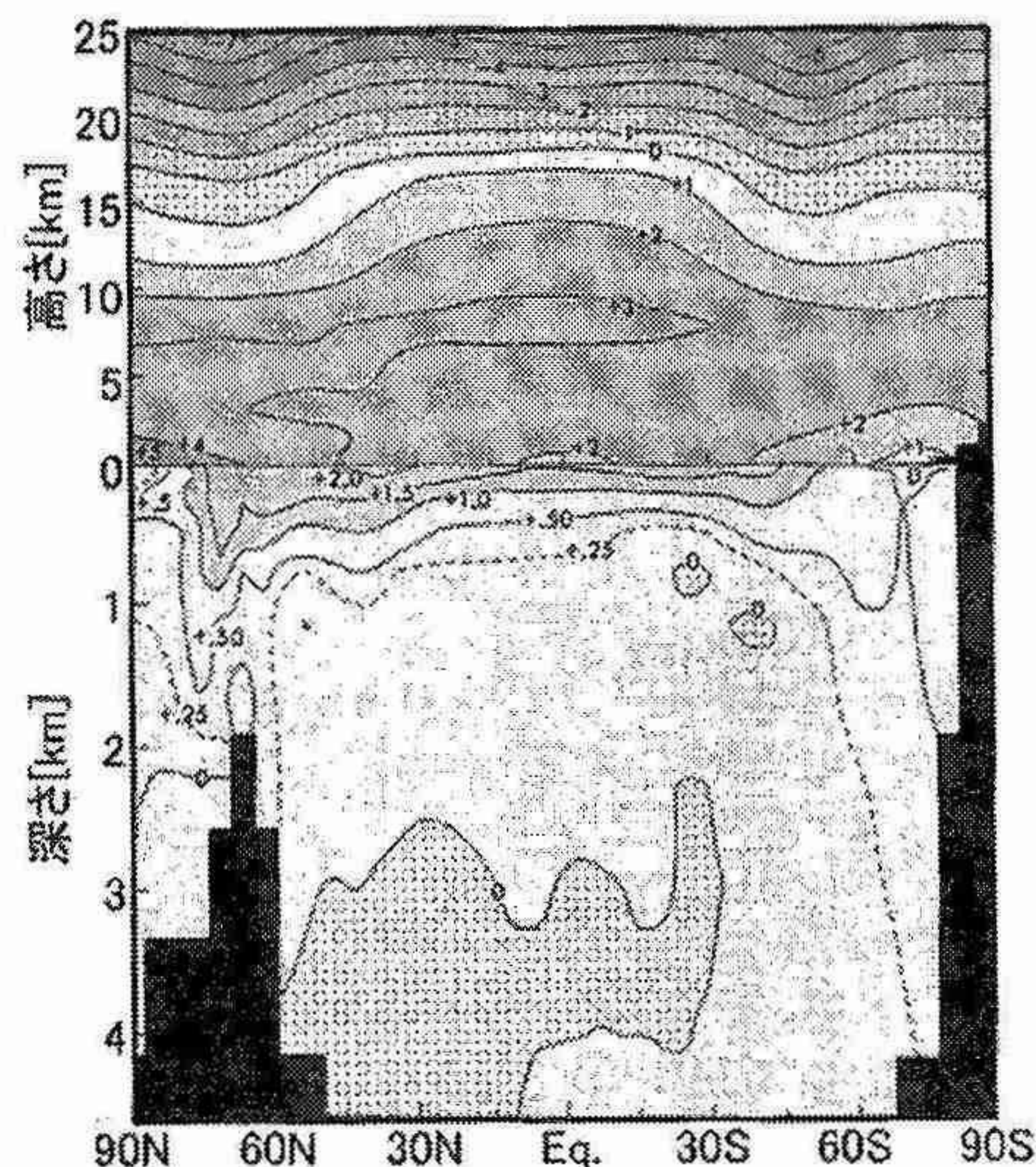


図7 大気二酸化炭素濃度が年1%で漸増し2倍になった70年後、東西平均した南北-鉛直断面大気中の気温上昇(上側)と海洋中の水温上昇(下側, Manabe and Stouffer, 1991)。単位は°C。

70年後の大気中や海洋中の昇温は、大変興味深い緯度-高度分布をしています(図7)。北半球の極域の地表面付近で大きく約5℃になっているのは、(アイスアルベド・フィードバックと呼ばれる)日射を反射しやすい積雪や海水の面積が縮小し、地表面が日射を吸収しより大きく昇温すること、および、大気の成層が強いためにごく大気の下層のみが暖まりやすいために引き起こされているためです。大気中の高緯度への水輸送の増加に伴い、高緯度では、降水が蒸発に比べ増加し、海洋表面塩分が低下し、北大西洋や南極海で海洋の成層状態が強まります。そして、北大西洋や南極海では、冬の深いところまでの混合が小さくなり、冬に冷えやすくなり、昇温が非常に小さくなっています。対流圏では、二酸化炭素濃度が上がったために、赤外放射が上空の二酸化炭素に吸収されずに地球外へ直接出来る高さが上昇するために(いわゆる温室効果)、対流圏全層にわたって2℃以上昇温しますが、地球外へ直接赤外放射出来る成層圏(高さ15km以上)では、二酸化炭素濃度が増えたために積極的に赤外放射が起こり、高くなるにつれ気温が低下しています。低緯度の海洋で深さ500mより浅いところのみが昇温しているのに対して、北緯70°付近や南極大陸に沿って、より深いところまで昇温しているのは、北大西洋や南極海における深層水や底層水の形成に伴って、温かな水がより深いところに運ばれるためです。

ひとつ注意しておきたいことがあります。今から1万年前の氷河期には北大西洋における深層水形成が止まっていたことが知られています。また、今後、地球温暖化に伴い、深層水形成が弱まることも予測されています。この2つのことを結びつけて、温暖化に伴って氷河期が始まるのではないかと主張する人がいますが、すでにサイエンスとしては、今までの大気海洋結合大循環モデルの結果から否定されています。モデルの結果では、深層水形成が弱まることにより、周辺地域に比べて昇温が遅くなり、温暖化を遅らせている効果として現れています。この効果が非現実的に強くなり、温暖化を反転させると考えるのは無理があるということです。「現状のモデルが観測された気候状態を完全には再現していないので、氷河期が始まる可能性は捨てきれない」という論法にも無理があると私は思います。

5. IPCC (気候変動に関する政府間パネル) とその報告書

| | | |
|------|----------------------------|-------------------------------|
| 1988 | IPCC設立 | |
| 1990 | 第1次評価報告書 | |
| 1992 | 第1次報告書補遺 | 条約交渉会議 UNFCCC採択 |
| 1993 | | 50カ国 UNFCCC批准 |
| 1994 | 放射強制力に関する特別報告書(WG1) | UNFCCC条約発効 |
| 1995 | 第2次評価報告書 | COP1(ベルリン) |
| 1996 | [1996発刊] | COP2(ジュネーブ) |
| 1997 | 地域的影響に関する特別報告書(WG2) | COP3(京都) 京都議定書 |
| 1998 | | COP4(ブエノスアイレス) |
| 1999 | 航空と全球大気に関する特別報告書(WG1-WG3) | COP5(ボン) |
| 2000 | 排出シナリオに関する特別報告書(SRES)(WG3) | |
| | 技術移転の方法論/技術論に関する特別報告書(WG3) | COP6(ハーグ) |
| | 二酸化炭素吸収源に関する特別報告書(総会) | |
| 2001 | 第3次評価報告書 | COP6/Part2(ボン) COP7(マラケシュ) |
| 2002 | | COP8(ニューデリー) |
| 2003 | | COP9(ミラノ) |
| 2005 | CO2回収貯留に関する特別報告書(WG3) | |
| 2007 | 第4次評価報告書 | |

COP(Conference of Parties, 締約国会議)

図8 IPCCとUNFCCCに関する年表。

地球温暖化に対する2つの国際的枠組みを紹介したいと思います。ひとつは、科学者による研究成果をまとめ、それを政治や一般の人に伝える枠組みで、国連の機関である国連環境計画（UNEP, United Nations Environment Programme）と世界気象機関（WMO, World Meteorological Organization）のもとで作られたIPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル）です。もう一つは、政府間交渉を行うUNFCCC（United Nations Framework Convention on Climate Change, 気候変動に関する国連枠組み条約）です。

IPCCは、「温暖化防ぐために二酸化炭素放出を削減すべき！」というような特定の方向性を持たずに、現在分かっていることやまだ分からないことなどを客観的に整理し科学的知見をまとめもので、1988年に設立され、第1次報告書（1990年）、第2次報告書（1995年）、第3次報告書（2001年）と特定の話題に対する特別報告が行われています。第4次報告は2007年に予定されており、その報告に反映されるように温暖化問題に関する研究が現在行われています。このIPCC報告をもとに国際政治として行われるのが、UNFCCC条約締結国による会議（COP, Conference of Parties）です。有名な京都議定書はCOP3で決められたものです。

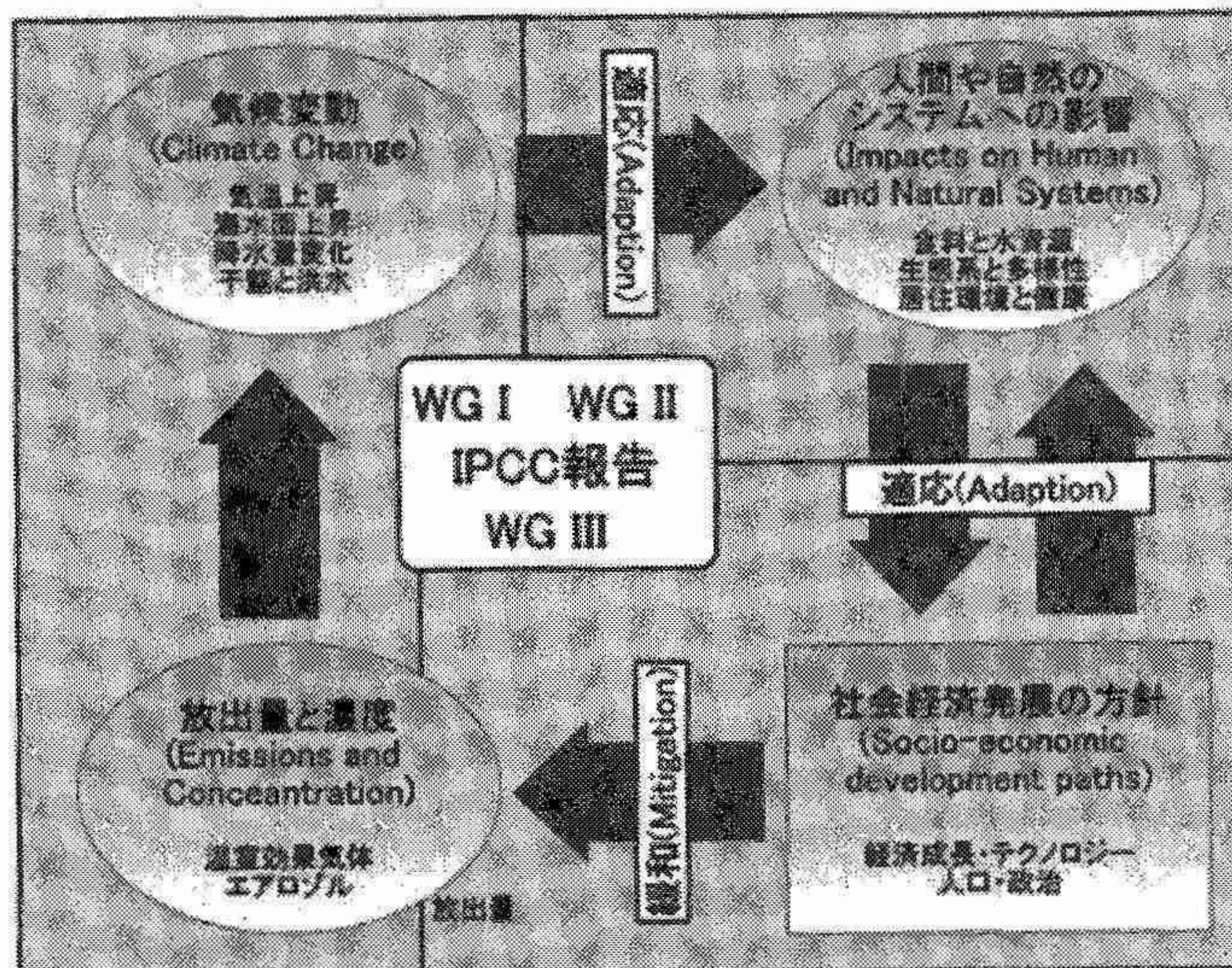


図9 IPCCの各作業部会（WG）と温暖化影響と対策の考え方 [IPCC, 2001を日本語化]。

IPCCは3つの作業部会（WG, Working Group）から成り立っています。WG1では、WG3で予測された人間活動に伴う二酸化炭素などの温暖化効果気体の放出量のもとで、それらの大気中濃度が将来的にどうなるか？そして、気候がどのように変化してゆくか？などを予測します。WG2では、WG1の予測を用いて、農業にどんな影響を及ぼすかなどの社会的影響を予測します。WG3では、将来の社会発展がどうなるか？その結果として温暖化効果ガスが放出されるか？などをいくつかのシナリオという形でまとめて予測します。

IPCCでよく用いられている2つの用語を紹介しましょう。適応（adaptation）とは、温暖化によって引き起こされた影響や問題に対して対策を取ることで、いわば対処療法と言えます。また、緩和（Mitigation）とは、温暖化しないように対策を取る根本治療と言えます。地球温暖化問題の難しいところは、緩和のための政策をとってもその効果が本当に聞いているかが分からないところです。また、他の環境問題と異なって、国際社会全ての協力が必要となることです。各作業部会の議長やメンバー、執筆したものを査読する人たちなどは、出身国や性別などを慎重に考慮して選ばれています。

6. 大気中CO₂濃度の安定化とCO₂放出削減

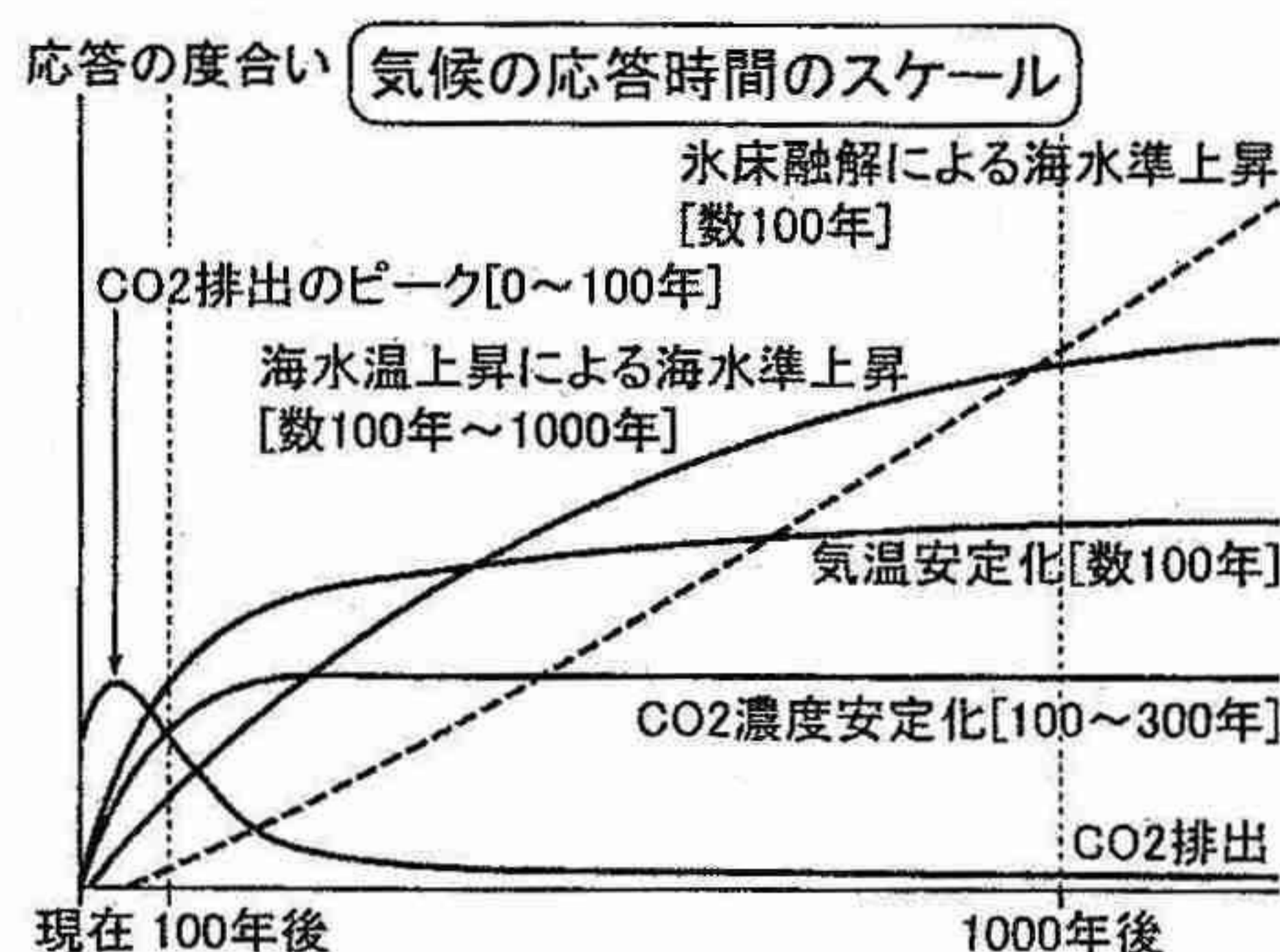


図10 気候の応答時間の時間スケールに関する概略 [IPCC, 2001を日本語化]。

地球温暖化問題の難しいところは温暖化の影響がゆっくりと現れることです。もし、国際社会が協力して二酸化炭素放出を大幅に削減したとして、その後の変化を見てみたのが図10です。放出が年間1～2 PgCまで削減されないと、大気中二酸化炭素濃度は、その増加が止まらず、数100年後にようやく一定になります。それに伴って、気温上昇も100年程度遅れて収まります。しかし、深海まで暖まるのに1000年程度かかるので、海水が膨張することにより海水準上昇が続き、さらに南極大陸やグリーンランドに存在する氷床が融けることによる海水準上昇は、緩やかな場合には1000年以上かかり融けるか、あるいは突然と大幅に融けるかすると考えられています。従って、20世紀後半から大気中二酸化炭素濃度が急速に上昇した現在は、まだまだ地球温暖化の影響が現れ始めたほんの入り口の段階なのです。

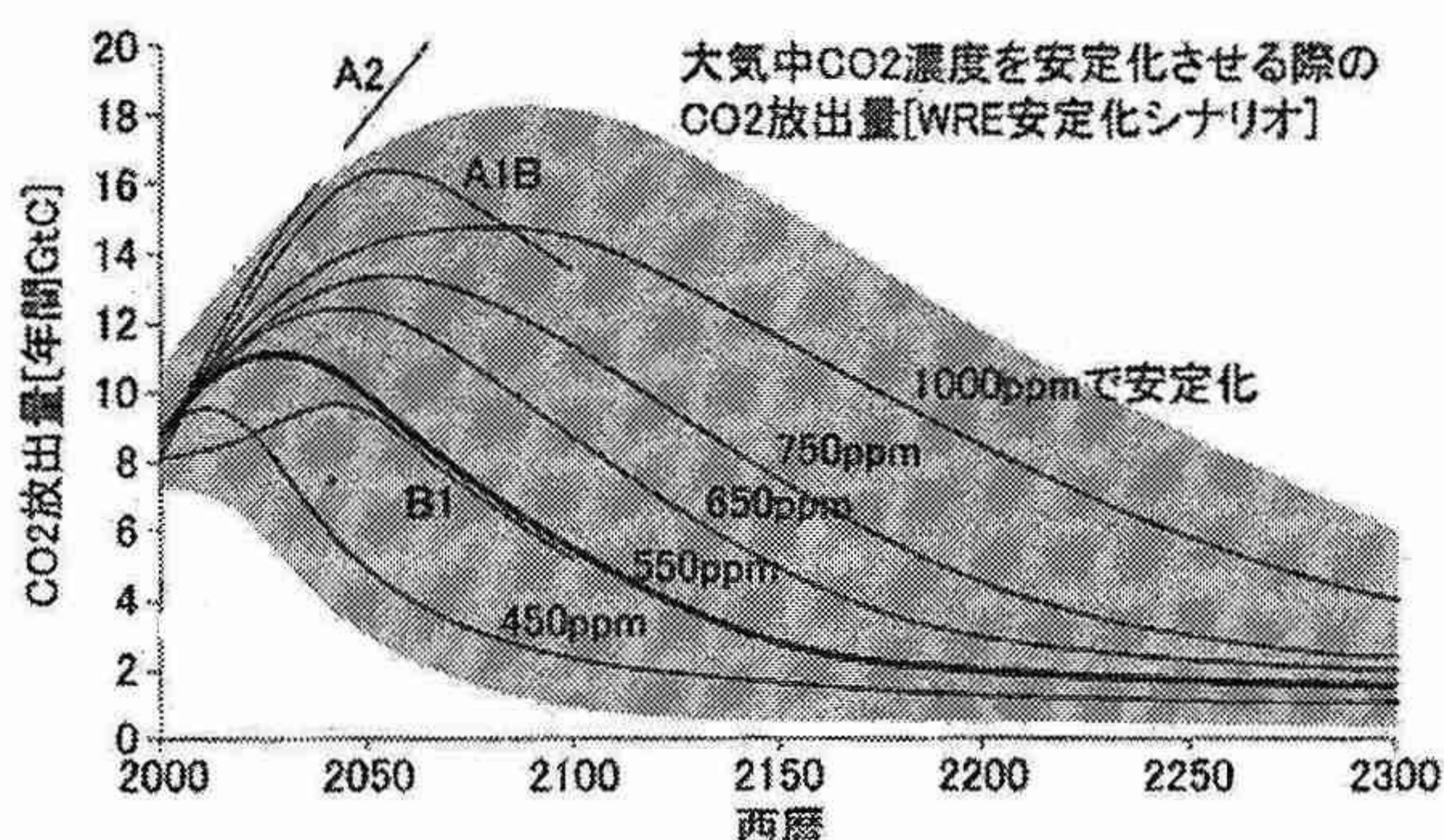


図11 IPCC各シナリオ (A2, A1B, B1) と各濃度での安定化シナリオ [IPCC, 2001を日本語化]

では、大気中二酸化炭素濃度の上昇を止めるためには、放出をどの程度削減したらよいのでしょうか？地球温暖化に関する国際的協力が行われない場合 (A2) は急速に放出量が増加することが予測されていますが、大気中二酸化炭素濃度は上昇することをやめるためには、B1のように非常に大幅に削減しなければいけなくなることも予測されています (図11)。5月にパリで行われた温暖化に伴う海洋に関する国際会議では、550ppmで安定化した場合は、それほど温暖化に伴う影響は深刻にはならないが、それを超える場合には問題が生じるだろうという報告がありました。大気中二酸化炭素濃度を550ppmに抑えようとすると、放出量を現在年間7 PgCから約年間2 PgCまで削減することが必要と予測されています。

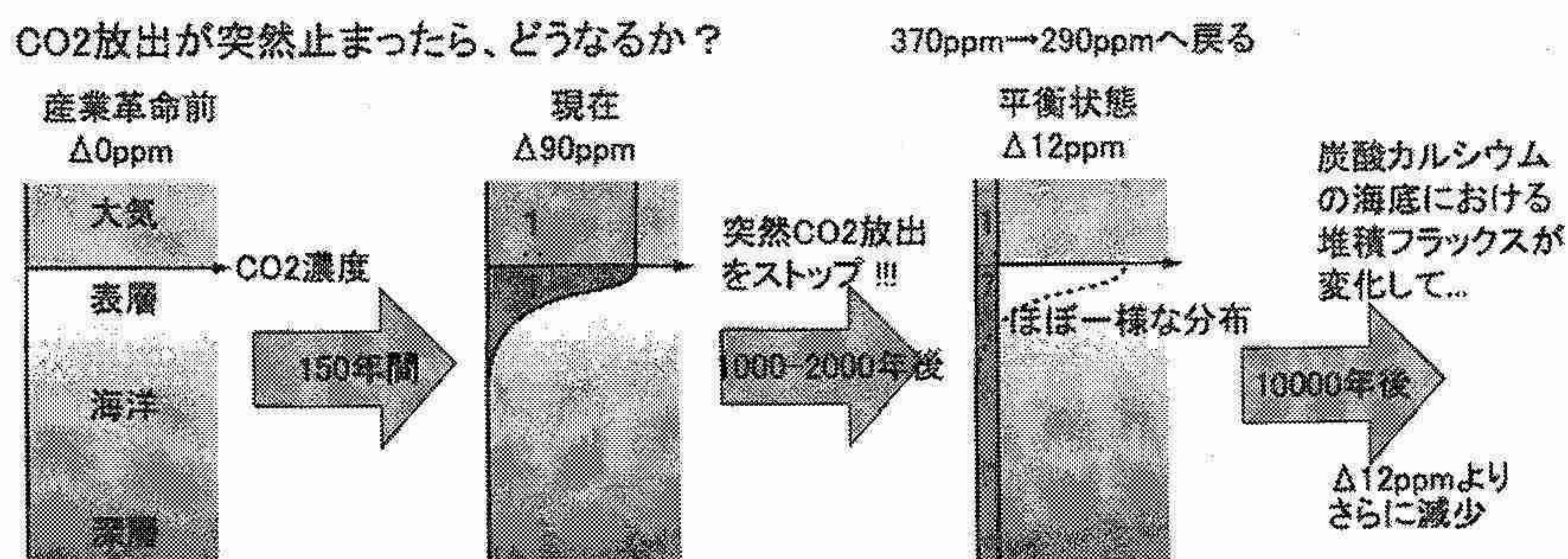


図12 海による二酸化炭素吸収量の大きな見積もり。

現在、海洋は、放出された年間7PgCのうち年間2PgCを吸収しています。海洋による吸収はのんびりと行われるので、例えば、いま二酸化炭素の放出が止まったとすると、産業革命前から90ppm上昇したうちの約78ppmまでを数1000年後には吸収してしまう能力を持つように、数1000年程度の時間スケールでは大きく貯留する能力を持っています(図12)。従って、人間活動に伴い年間2PgC放出していく場合には、海洋がそのまま年間2PgC吸収することにより、大気中二酸化炭素濃度が安定化する状態を1000年以上続けることができます(2000年ぐらいすると海洋の吸収する能力もなくなり放出量をゼロにしなければいけません)。

今見てきたように、大気中二酸化炭素濃度の上昇を止めるためには、放出量を年間2PgCまで減らす必要があります。1999年度の各国の放出量(図13)を見てみると、その削減の難しさが想像されると思います。京都議定書に調印したEUと日本が1990年度に対して各々8%、6%削減したとしても全体の1.4%削減にしかなりません。しかも、日本の放出量は、実際には増加してしまい京都議定書の約束を守ることが難しくなったことが、ニュース報道されています。先進国である米国・EU・日本が仮に半減したとしても全体の21%削減、年間1.3PgC削減で、必要となる年間4~5PgCには遙かに及びません。急速に放出量を増加させている中国は、人口一人あたりで見た放出量は米国の1/10・日本の1/4で、京都議定書の削減対象国にはなっていません。大気中二酸化炭素濃度を安定化させる程度に削減することは、将来的に発展途上国が安いエネルギーである化石燃料を使って経済成長をすることと、大きな矛盾を含んでいることが分かります。先進国における省エネルギーや自然エネルギーの活用だけでは、地球温暖化問題を解決することにつながりません。

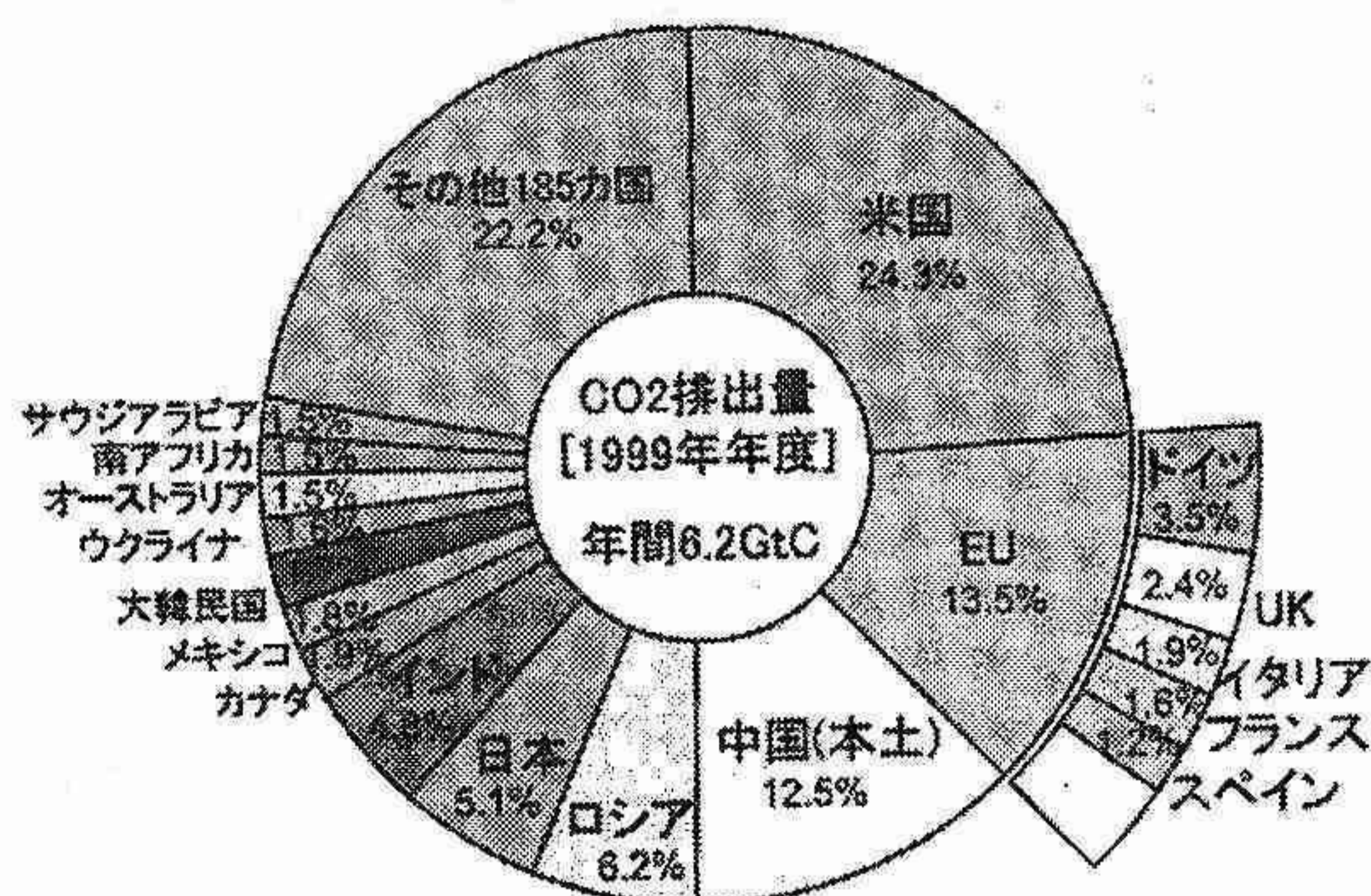


図13 1999年度の二酸化炭素放出量の各国別割合 [オークリッジ研究所提供のデータをグラフ化]。

現在、使用した化石燃料を大気中に放出するのではなく回収し、回収したものを地中や海洋深部に隔離・貯留することが検討され、IPCCでも来年度その報告書を出す予定になっています。これらは、いわば必要悪として、真剣に検討すべきと個人的には考えています。と同時に、発展途上国も含めた国際的な場で、環境に配慮した経済活動を優先するように、人々の意識を変えていく議論・教育を行っていく必要があると思います。