

最近の温室効果ガス排出見通しとそれによる気候変動について

Recent Global GHG Emission Scenarios and their Climatic Consequences

松岡 譲[†]・森田 恒幸[‡]

Yuzuru MATSUOKA[†], Tsuneyuki MORITA[‡]

(全文審査の上、受理。1994年 7 月 25 日)

Abstract - We reviewed recent global emission scenarios on greenhouse gases, and analyzed their driving forces. As for scenarios on anthropogenic carbon dioxide emission from energy consumption, we compared their characteristics with global historical trends from the points of economic value added, energy per value added and carbon emissions per energy. Also scenarios on carbon release from land-use change were compared with the historical trends of population density and consequent deforestation in tropical Asia. With aggregate climate and sea level rise models, the climatic implication of their GHG emission scenarios was disclosed and their uncertainty was discussed.

Keywords: Global Environment, Climatic Change, Emission Scenarios

1. 論文のあらまし

この論文では、人間活動に由来する温室効果ガス排出の見通しについて、最近の数年に報告されたものを中心に取りまとめを行う。さらに、それらの気候に対する影響を気温及び海面上昇で評価する。対象は、世界全体の1990年から2100年にいたる110年間の排出量である。これらに関する1980年代後半以降に報告された推計値を中心に、今後100年間に推定される世界平均の気温・海面上昇とそのふれ幅に関する集約的な見通しを抽出すべく努力した。

このうち、中心的な役割りをなす化石燃料起源及び土地利用由来の二酸化炭素排出量に関しては、経済活動、エネルギー消費量変化の観点から、過去に人類が体験してきた時系列及び地域横断的傾向と比較した。その上で、これらの排出量の気候への影響を評価するため、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) に集約された知見などにに基づき、気温・海面変化に関する簡易モデルを用意した。このモデルに上記の排出推計量を入力することによって、これらの見通しが意味する今後100年間の気候変化を算定している。

2. 化石燃料起源の二酸化炭素排出量の見通し

1990年の化石燃料起源の二酸化炭素排出量は、59.43億tCと推計されている。これは、二酸化炭素排出全量のほぼ80%程度を占め、人間による気候変化原因のもっとも大きいものである。1950年の排出量は、16.20億tCであったから、年率3.3%で増加してきたことになる。燃料別には、石油が42%、石炭が41%、天然ガスが17%である。近代的エネルギー源としては、この他に、原子力、水力などがあるが、これらを総計したエネルギー消費量は、1990年においてほぼ329.4EJであった。このうち化石燃料分は284.7EJを占めていたから、現時点においてはエネルギー消費と二酸化炭素排出の間にはほぼ一対一の関係がある。エネルギー種には、この他、薪、木炭などの伝統的燃料があり、1990年時点にて38.9EJであった。しかし、これらの使用が土地利用改変をもたらさない程度に留まっている限り、温暖化ガス排出原因として取り上げる必要はない。従

ってこれから排出される二酸化炭素は、土地利用変化による排出部門にて計上するのを通常とする。

化石燃料起源の二酸化炭素排出量は、今後100年間にどのように変化すると推定されているであろうか。多くの社会、経済的要因がこれに関与する。通常、こうした排出量推計は、人口、経済活動、エネルギー資源量、エネルギー効率、エネルギー価格、エネルギーミックスなどの変化を総合したエネルギー経済モデルを使用して算定される。化石エネルギーの需要・供給に関する部分均衡を簡明に表現し、その時間的な推移を逐次求めていくEdmonds・Reillyモデル、石油を中心とするエネルギーの需要・供給及びそれを取りまく経済状況を将来にわたって予見可能であるとし最適な行動経路を求める動学的最適化タイプのモデルであるManne・RichelsのGlobal2100、OECDが独自モデルとして開発した逐次的一般均衡型タイプのモデルであるGREENなどはその内容が公開されている著名なモデルである。最近の地球環境問題の高まりを受けて、これらのモデルの開発は大変活発となった。経済活動、エネルギー効率の変化などの入力条件を専門家の投票で求めたり、いくつものモデルに共通の入力条件を課したときの推計値の比較から、各モデルの特性把握と推計値自体の信頼性を向上させる試みもなされている。著者らは、現時点におけるこれらの推計値の取りまとめとして、1980年代後半以降に報告されたものを中心に、排出量推計値及びその算定根拠を収集・整理した(森田・松岡・Penna・甲斐沼1994)。それらのうち、図1は、排出量抑制を行わない現状推移シナリオとして提示された排出量の時間的推移を示している。1990年の60億tCは、2050年には55億tC~359億tCに、さらに2100年には12億tC~580億tCへと変化している。この種の将来推計は、古くからしばしば行われてきた。1980年代前半以前に行われたものは、推計値間のばらつきが大きく、また、高めの数値が多い(松岡・森田・甲斐沼, 1992)。例えば、Bacastow・Keeling(1981)らの推計では、2050年に1000億tC程度、2100年では5000億tC程度にも達する。Haefeleら(1981)の推計は、大規模かつ組織的に行われたものとして名高いが、

[†] 京都大学工学部衛生工学教室, [‡] 国立環境研究所地球環境研究グループ

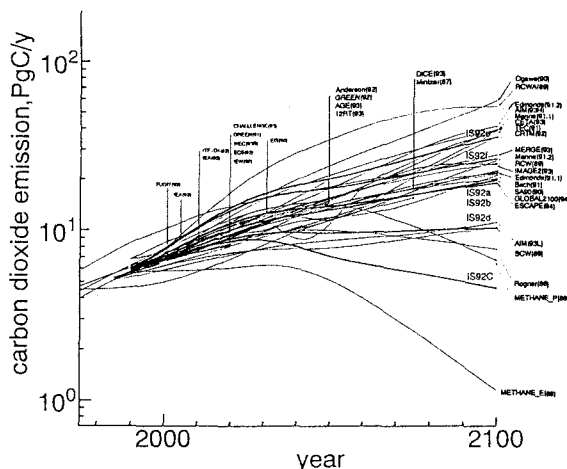


図1 今後の100年間における化石燃料起源の二酸化炭素排出量見通し

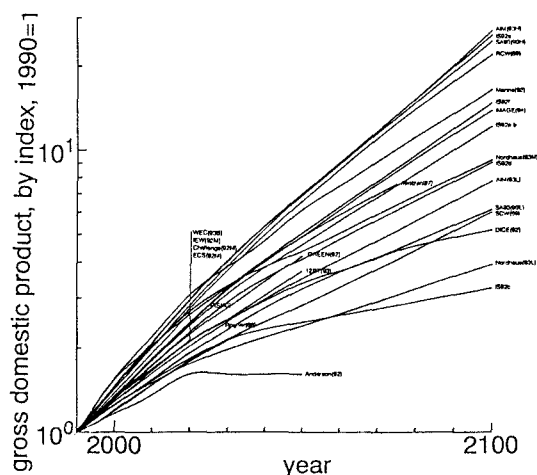


図2 最近の温室効果ガス排出推計におけるGDP変化

2030年に98～168億tCと推定しており、図1に比べて若干高めである。一方、図1での高位推計としては、米国環境保護庁 (USEPA, 1990)による社会急変化・排出加速シナリオ(RCWA)、小川(1990)、Edmondsら(1991)の第二シナリオ、AIM (松岡ら,1992)の高位シナリオなどが挙げられる。これらの多くは、経済成長率を高位に設定したり、エネルギー効率改善率を悲観的に設定したものである。

図1中の低位推計としては、Ausubelら(1987)の二つのメタンシナリオ (METHANE E、METHANE P)、IPCC(1992)によるIS92cシナリオ、Rogner(1986)によるIIASA'83の延長シナリオ、米国環境保護庁の社会緩変化シナリオ(SCW)及びAIMの低位シナリオがある。メタンシナリオとは、薪材、石炭、石油と推移してきた主要エネルギー源推移の歴史的傾向を外挿し、市場浸透モデル(Marchettiら, 1979)によって、来世紀前半には天然ガスのエネルギーシェアが70%に達すると推計するものである。また、Rognerの推計も、市場浸透モデルを基礎とするが、その主体をソーラーなどの新エネルギー源におく。一方、IS92C及びAIM低位シナリオでは、人口及び経済の成長を低位側に設定し、SCWでは人口に関しては高位側、経済成長に関しては低位側に設定する。このように、低位側シナリオには、さまざまなタイプの推計根拠が含まれている。この他、エネルギー代替を政策的に誘導したり、規範的な将来社会を想定することによって、低位のシナリオを描くものも多々ある。しかし、これらについては、施策対応シナリオとみなし取り上げないことにする。

山地・茅ら(1991)はエネルギー起源の二酸化炭素排出量変化を、人口、一人あたりGDP、エネルギー強度(エネルギー消費原単位、単位GDPあたりのエネルギー消費量)及び炭素強度(単位エネルギー消費あたりの二酸化炭素排出量)の変化に分解することによって変化要因を分析した。これらの要因のうち、人口変化と一人あたりGDP変化は高い相関をもち、

これを考慮するか否かは将来排出量を大きく左右する(松岡・森田, 1993)。従って、こうした問題为了避免のために本節では、GDP、エネルギー強度、炭素強度の3要因の変化に注目し、将来排出シナリオを分解した。図2、3及び8がそれである。これらはいずれも1990年を基準年としそれからの変化を示したものである。まず、GDP変化に関しては、2100年にて3.2倍～27倍の範囲を示す。これは年率にして1.1%から3.0%に相当する。この間の人口変化は年率0.7%程度(中位推計)であるから、一人あたりでは0.4～2.3%のGDP増加に相当する。1960年から1990年のGDP及び一人あたりのGDP変化はそれぞれ4.0%、2.1%程度であったから(WEC, 1993)、今後かなりの低下を想定していることになる。図3はエネルギー強度の変化を示したものである。多くのシナリオにて、減少度は年とともに低減し、2100年段階では、1990年の20%から60%となると想定している。これは、年率0.5～1.5%の効率改

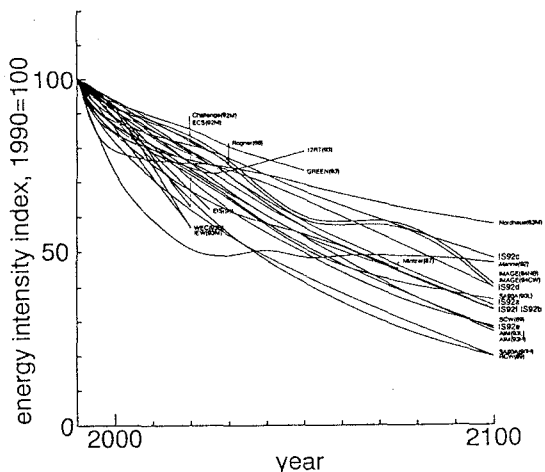


図3 最近の温室効果ガス排出推計におけるエネルギー強度の変化

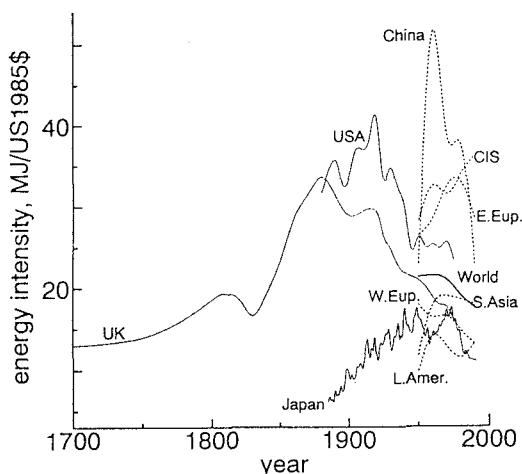


図4 エネルギー強度の歴史の変遷

Humphreyら(1979)、Schurrら(1960)、米国商務省データ、日本エネルギー経済研究所(1993)、国連エネルギー統計、世銀統計等を使用した。

善に相当する。この範囲は、1960年～1990年まで世界が体験した年率0.7%の低下に比べると高めの設定となる。エネルギー強度に関し、図4、5は、現在まで世界諸地域が体験してきた軌跡を示したものである。図4はイギリス、アメリカ及びわが国の長期データとその他の地域に関する1950年以降のデータを描いたものである。また、図5は、最近の20年間(1970～1989)における各国別のエネルギー強度を、一人当たりのGDPと関連づけて描いたものである。初期における増

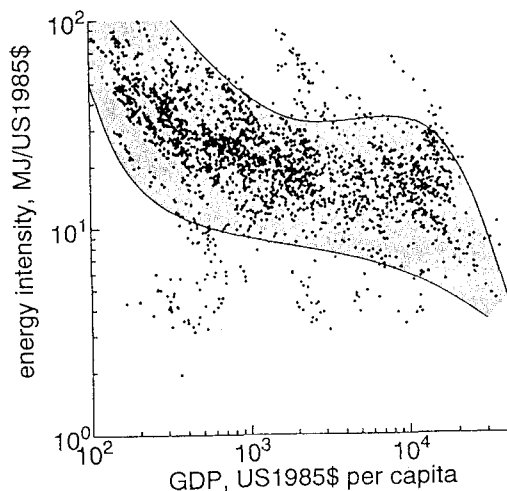


図6 エネルギー強度の各国比較

世界資源研究所統計、Penn World Table 5.5 (Summersら,1993)を使用した。トーン部は図5と同法で描いたもの。

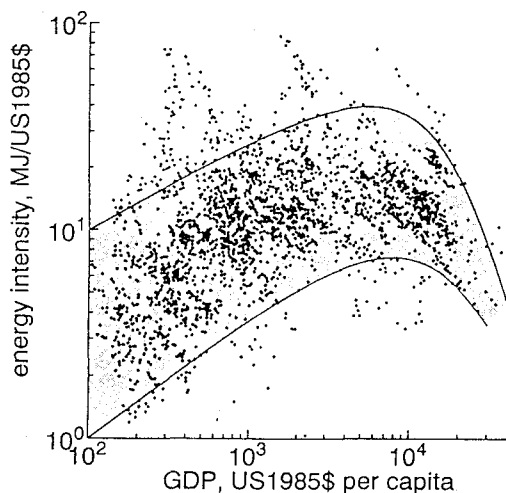


図5 エネルギー強度の各国比較

国連エネルギー統計、Penn World Table 5.5 (Summersら,1993)を使用した。トーン部はlowess(locally weighted scatterplot smoother)法で描いた90%幅である。

加傾向は、ある時点を境に減少傾向に転ずるのが見られる。図4、5は、市場にて取り扱われた近代的エネルギーを中心に描いたものであったが、図6は、図5と同じ期間・国について、薪、木炭、パガス及び動植物廃棄物からのエネルギーを含んだ値で描いたものである。図5に見られた5000～1000US\$付近のピークは観察されなくなり、低所得地域になるほどエネルギー効率が低くなる傾向を見せる。伝統的エネルギーを含む取り扱いにて、ピークが明瞭でなくなる傾向は、Nakicenovicら(1993)の解析にも表れている。伝統的エネルギー使用に見られるこの低効率性は、現在、森林劣化を通じて二酸化炭素排出の大きな要因となっている。このように、エネルギー強度の長期変化傾向については、図4に見られたピークが経済発展段階における必然であるのか、データ計測上の見かけであるか判断としない所がある。

さて、図4に示した時系列変化、図5に示した地域横断的傾向及び最近の30年間の世界集約値の傾向と図3に示した将来シナリオを重ねて見ると、図7のようになる。この図から現段階のエネルギー強度の変化は減少時期に入っていること、また提唱されている将来シナリオ(太実線)は、現在までに観測された時系列的、地域横断的傾向の範囲内に留まっていると判断してよい。

エネルギー強度に比べ炭素強度の変化シナリオは、大きなバラツキをもつ。図8は炭素強度変化を対1990年値で示したものである。2100年にて10～100の範囲を示す。高い値を示すものは、米国環境保護庁(RCW、SCW)、AIM(高位、低位)あるいはIPCC(1990)のシナリオA(SA90高位、SA90低位)であり、これらは新エネルギー等に保守的な見通しを想定している。一方、

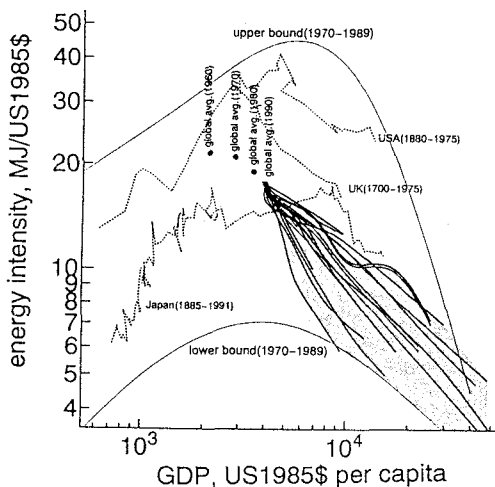


図7 エネルギー強度の過去と未来

低い値を示すものは、METHANE E、IS92d 及び IS92c、WEC シナリオ(WEC, 1993)などである。これらは、いずれも原子力、再生エネルギーに楽観的な見通しを持つ。例えば、METHANE E の2100年時点のエネルギーミックスは、原子力63%、ソーラー・核融合23%、残りのほとんどを天然ガスと推計している。また、WEC シナリオでは化石燃料分は33%まで減少し、残りを原子力・再生エネルギーでまかなう。図8に示される範囲は年率0~2%の減少率である。この低下速度は、現在までの傾向と整合しているであろうか。図9は、薪などの伝統的エネルギーからの二酸化炭素排出量を含む場合と含まない場合についての世界の炭素強度の軌跡を示したものである。同図中には、わが国の1880年以降の薪炭を込みにしたときの軌跡も描いている。このように、炭素強度は漸減してきた。しかし、その程度はせいぜい年率0.5%以下である。また、減少のうちわけも、現在までの薪炭、石炭、石油といったエネルギー代替のマクロトレンドを言い換えたにすぎないのも事実であるから、これをもって将来の、天然ガス、原子力あるいは再生エネルギーなどの低・脱炭素エネルギーへの転換に外挿できると解釈するのは誤りであろう。

図8 最近の温室効果ガス排出推計における炭素強度の変化

ここに下付き添字は評価年を示し、全シナリオの平均値を用いて算出した。この計算結果によれば、*EI*及び*CI*を1990年レベルに固定したとき、来世紀初頭（2000年）における二酸化炭素排出量は $7.1\text{PgC/y} \times 222.1\%$ の年157.7億tとなる。この値からエネルギー強度低下

year	1990	2000	2010	2025	2050	2100
GDP (billion US dollars at 1985 values)						
mean	21022.6	28140.9	-	53986.0	95232.4	283384.6
s.d.	-	2067.5	-	10721.5	31954.4	156197.9
max	-	32585.0	-	73579.1	147578.7	569712.5
min	-	24506.4	-	33846.4	33846.4	68323.4
IS92a	-	27979.5	-	57177.4	96132.0	258747.8
(number)	-	26	-	27	21	17
Energy Intensity Index (1990=100)						
mean	100.0	88.2	-	71.0	57.7	36.9
s.d.	-	4.8	-	6.4	9.5	10.1
max	-	93.9	-	80.2	18.9	57.8
min	-	73.0	-	58.2	41.5	19.8
IS92a	100.0	88.9	-	75.1	58.7	34.7
(number)	-	26	-	18	20	18
Primary Energy Consumption (EJ/y)						
mean	311.3	395.5	-	625.2	875.1	1521.1
s.d.	-	29.5	-	109.9	215.7	628.5
max	-	462.1	-	837.0	1240.0	2667.8
min	-	341.0	-	437.0	500.0	537.0
IS92a	344.0	409.0	-	708.0	934.0	1453.0
(number)	-	23	-	24	19	10
Carbon Intensity Index (1990=100)						
mean	100.0	96.5	-	94.2	89.0	73.5
s.d.	-	7.8	-	8.8	14.0	25.7
max	-	106.4	-	108.4	117.7	100.4
min	-	71.9	-	73.8	52.4	10.1
IS92a	100.0	96.1	-	86.7	81.0	78.1
(number)	-	28	-	18	20	21
Carbon Emission (PgC/y)						
mean	6.1	7.1	8.5	11.0	14.8	26.2
s.d.	-	0.5	1.1	2.6	5.7	14.2
max	-	8.1	11.8	20.6	35.9	58.0
min	-	6.2	6.3	6.3	5.5	1.2
IS92a	6.0	7.0	-	10.7	13.2	19.8
(number)	-	29	-	29	29	29
Relative contributions of changing factors on carbon dioxide emission (%)						
GDP	-	222.1	-	174.2	178.8	200.6
Energy Intensity	-	-95.2	-	-63.2	-65.0	-76.8
Carbon Intensity	-	-26.9	-	-11.0	-13.8	-23.7
Coefficient of variation(%)						
GDP	-	7.3	-	19.9	33.6	55.1
Energy Intensity	-	5.5	-	9.1	16.4	27.4
Primary Energy	-	7.4	-	17.6	24.7	41.4
Carbon Intensity	-	8.0	-	9.3	15.7	35.0
CO2 emission	-	6.7	-	23.7	38.8	54.1

以上、最近報告された化石燃料起源の二酸化炭素排出シナリオを中心に、その特性を概観した。表1は、これらのシナリオの統計値を示したものである。表中の排出量変化要因に対する相対寄与 (relative contributions of changing factors) とは、1990年値に対するGDP (GDP)、エネルギー強度 (EI) 及び炭素強度 (CI) の変化倍率が、二酸化炭素排出倍率にどれだけ寄与したかを相対表示したものであり、例えばGDPに関しては、次式で算出した値である。

$$\frac{\log\left(\frac{GDP_t}{GDP_{1990}}\right) \cdot 100}{\log\left(\frac{GDP_t}{GDP_{1990}}\right) + \log\left(\frac{EI_t}{EI_{1990}}\right) + \log\left(\frac{CI_t}{CI_{1990}}\right)}$$

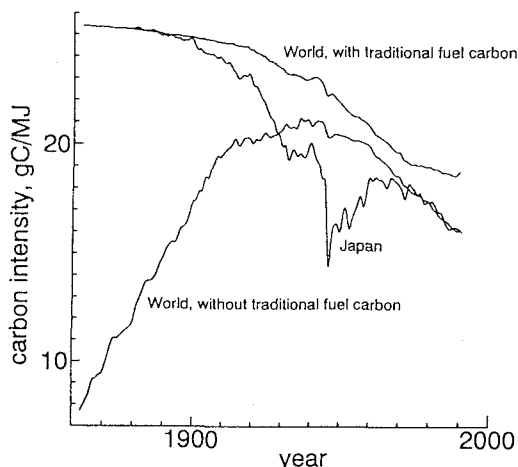


図9 炭素強度の歴史的変遷

UN(1955), Keeling(1973), 国連エネルギー統計,
日本エネルギー経済研究所(1993)を使用した。

により $7.1 \text{ PgC/y} \times 95.2\% = 67.6 \text{ 億tC}$ の、また炭素強度低下により $7.1 \text{ PgC/y} \times 26.9\% = 19.1 \text{ 億tC}$ の抑制があって、71億tCとなっていることがわかる。長期的にもこの傾向はほぼ同様であり、GDP変化のみでは、二倍程度の排出倍率の増加があるものが、エネルギー強度の低下で60~80%の抑制を、またエネルギーミックスの変化により10~25%の抑制を推計するのが標準的シナリオとされていることがわかる。

3. 土地利用変化由来の二酸化炭素排出量の見直し

熱帯林を中心とする土地利用変化に起因する二酸化炭素排出量シナリオの報告数は、化石燃料に比べはるかに少ない。図10は、それらの推計値を図示したものである。Houghton(1989)のシナリオは、米国環境保護庁及び1990年のIPCCによる見直し策定作業にも使用され、よく人口に膾炙されてきた。森林減少速度の設定を、1980年代前半での観測値に固定した場合(exp)及び人口増加に応じて変化すると想定する場合(pop)の二ケースと、面積あたりの炭素原単位を高位、低位に見積もる二ケースを組み合わせた四つのシナリオが提案されている。IPCCは、1992年の見直し作業において、四つのシナリオを策定した。このうち、IS92a,b,eとは、人口増加の影響が25年の時間遅れで森林面積減少をもたらすと想定し、ブラジル、その他中南米、アジア、アフリカについて土地利用変化を追跡し、これとOECDにより提案された消滅森林の炭素量変化算定方式を組み合わせ推計したものである。人口変化には、世界銀行1989-90年推計値(2100年に113億人)を使用している。IS92f及びIS92cとは、IS92a,b,eシナリオとほぼ同じであるが、人口設定値を1992年の国連中高位推計値(2100年に176億人)及び国連中低位推計値(2100年に64億人)とする所が異なる。さらに、IS92dとは1980年代前半に観測された森林減少速度を、年率2.5%以上で減少させた場合の推計値であ

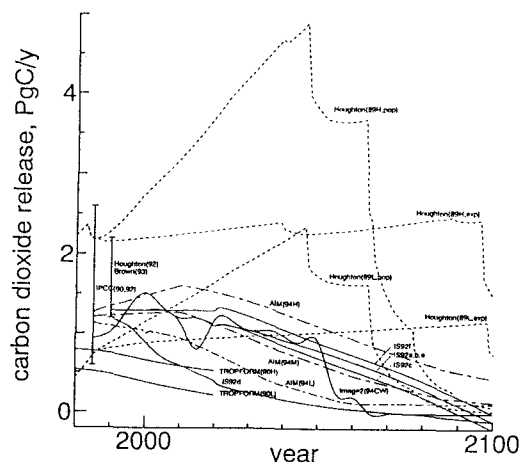


図10 土地利用変化由来の二酸化炭素排出量の見直し

る。AIMシナリオには、中位、高位、低位と三つの推計がある。これは、国連人口推計の中位推計(2100年に112億人)、中高位推計及び中低位推計に相当する出生、死亡パラメータを使用して算出した各国人口をもとに、熱帯付近の71ヶ国の森林減少を積み上げ、これとOECDによる炭素量変化算定方式を組み合わせたものである。AIMシナリオにおいては、各国別の森林面積減少速度を過去25年間の平均人口増加率と残存森林面積の積に比例すると想定し、森林面積減少に伴い消滅速度が抑制されることを仮定する。

IMAGE2(Alcamoら, 1994)のCWシナリオは他のモデルと比べ、複雑な推計方法を採用する。8種の穀物栽培、4種の家畜の飼育、薪炭需要及びバイオマスエネルギー農場などの土地需要と気候・土壌により定まる土地生産性を組み合わせる。さらにこれらと、気候、植生生態及びエネルギー・産業モデルとリンクさせながら推計を行っている。

以上の三つのシナリオ群は、現状推移シナリオとして提唱されたものであるが、Grainger(1990)のTROPFORMモデルによるシナリオでは、熱帯地域の農業生産性向上に楽観的な設定を行い、森林消滅速度が徐々に低減する見通しを推計している。但し、IPCCでは、このシナリオを政策対応シナリオと分類している。

図10からわかるように、土地利用変化部門では現状排出量の評価においてさえ、大きなバラツキがある。これには二つの不明性が寄与している。第一は森林消滅によって放出される単位面積あたりの総炭素量見積もりと時間遅れである。第二は森林面積減少速度である。これらのうち、第二の点は、最近のいくつかの稠密な調査により改善が著しい。第一の点は、破碎サンプリングによるバイオマス量計測に基づく原単位と材積量をベースとする原単位に対する解釈の違い、及び、土地利用の時間的変遷とともにそれらの炭素がどのように放出するかに関連などにより二倍以上の差

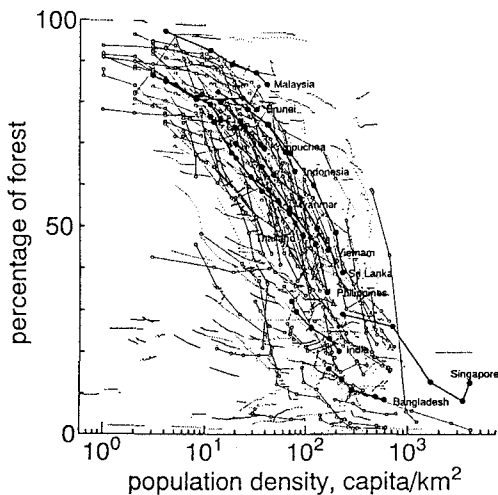


図 1.1 森林面積比と人口密度に関する歴史的変遷

を生む。図 1.0 の誤差棒は、IPCC(1990,1992)による 1980年代の排出量推定幅 16 ± 10 億tC/y及びHoughton(1992)、Brownら(1993)による 1990年排出量推定幅 17 ± 5 億tC/yを示す。さらに、Bolin(1993)は5-10億tC/yとの範囲を示唆しており、現状排出量においてすら信頼度はかなり低いと考えられる。しかし、排出原単位を共通にし長期間の排出総量を問題とする場合、こうしたバラツキはかなり少なくなる。表 2 は、各シナリオの来世紀末までの排出量を取りまとめたものであるが、Houghtonを除きほぼ800億tC程度の値となるのはこのためである。

図 1.0 に示した四つのシナリオ群のうち、Houghton、IS92、AIMでは、土地利用転換原因力を人口増とする。それでは、人口増加は土地利用転換とどの程度、結びついてきたのであろうか。図 1.1 中の細実線(—○—)は、最近、米国Duke大学のRichardsらによって収集された南、東南アジア森林データをもとに、アジア熱帯13ヶ国における105の州・省の過去100年間(1880~1980)にわたる人口密度と森林面積比(閉鎖林及び解放林)の変化の軌跡を描いたものである。○は1880年、1920年、1950年、1970年及び1980年での位置を示す。

表 2 土地利用変化由来の二酸化炭素排出量の見直し

region	cumulative amount(PgC)				annual maximum emission (Pg/y)			
	L. Amer.	Africa	Asia	World	L. Amer.	Africa	Asia	World
Houghton(1988) from 1980 to 2100								
pop high	144.7	100.1	64.9	309.6	2.19	1.42	1.06	4.91
low	69.1	29.3	37.0	135.4	1.14	0.45	0.96	2.35
exp high	140	75.8	49.9	265.8	1.41	0.69	0.56	2.49
low	65.8	21.7	28.2	115.7	0.72	0.20	0.25	1.17
AIM(1994) from 1980 to 2100								
high	55.5	43.4	30.1	128.9	0.66	0.57	0.38	1.59
medium	36.3	31.7	18.5	86.5	0.58	0.47	0.28	1.27
low	24.8	20.0	11.1	55.9	0.53	0.36	0.26	1.14
IMAGE2(1994) from 1980 to 2100								
CW	9	56	15	80	0.5	1.2	0.6	1.5
IPCC(1992) from 1990 to 2100								
IS92a,b,e				85.5				1.3
IS92f				96.8				1.3
IS92c				79.0				1.3
IS92d				29.8				1.2

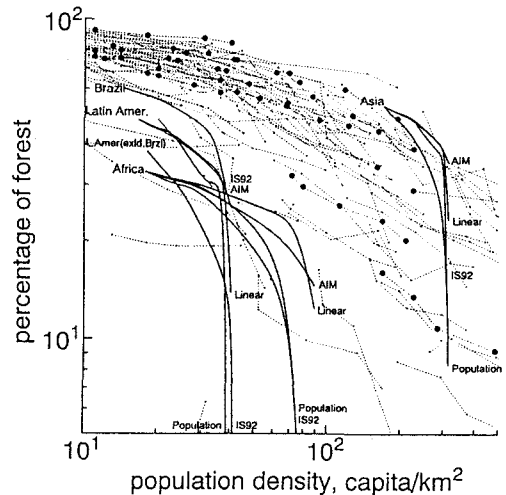


図 1.2 森林面積比と人口密度に関する過去と将来

また、太実線(—●—)は一国毎に集約した場合の軌跡である。さらに小点は、世界食糧農業機構(FAO)データから算出した国単位の森林面積比(全191地域、1961~1988の毎年値)である。これらから、アジア熱帯地域では強い関連性をもって、またその他の地域においても大勢として、人口増加は森林面積率の減少と結びついてきたことがわかる。さらに、●—●あるいは○—○の左端である1880年での位置の連なりと右端の1980年の位置の連なりの間に、系統的偏差は見られない。このことは、森林密度比と人口密度との関係は過去100年間あまり変化しなかったことを意味する。図 1.1に見られる面積比50%と1人/ha程度の人口密度の対応、その前後1オーダー範囲の人口密度幅で森林面積比の変化が発生するとの関係は、わが国三次メッシュ単位の解析(松岡,1992)によっても得られている。

さて、前述した土地利用からの二酸化炭素排出シナリオでは、土地利用変化と人口密度の関係はどのようになっているか。森林面積データの報告があるIS92及びAIMについて、それぞれの中位シナリオの示す軌跡を地域別にプロットしたものを図 1.2に示す。図中の点線及び●は上述の熱帯アジアにおける過去100年の軌跡である。また、Linear及びPopulationとは、Houghtonのexp及びpopシナリオの仮定に準じて算出した軌跡である。軌跡の左側においては、どのシナリオもほぼ同様な形状を示すが、いくつかのシナリオでは右へ移動するに従って、直立した軌跡を描くようになる。これは、AIM以外のシナリオでは、森林率が低下することによる減少速度の抑制を考慮していないためである。実際にこうした抑制が発動するかは不明である。しかし、これを考慮しない場合、従来の変遷と異なった軌跡が描かれることになる。

4. この論文で使用する気候変化モデルについて

この論文で使用する気候変化モデルは、二酸化炭

表3 二酸化炭素海洋吸収のパラメーター

t	0	1	2	3	4
a_i					
$0 < E_T < 141$	0.131	0.216	0.261	0.294	0.098
$E_T = 565$	0.142	0.230	0.335	0.198	0.095
$2500 < E_T$	0.166	0.363	0.304	0.088	0.079
τ_i (year)					
	330	80	20	1.6	

素と熱の海洋取り込み、気温上昇及び海面上昇を簡易に表現したものである。IPCCなどの評価作業と比較するため、著者らが従来から開発してきたAIMを用いず、IPCCの1992年見直し作業で使ったSTUGEモデルを参考として作成した。また、モデル中に使用した係数は、IPCC(1990)、IPCC(1992)、Wigley・Raper(1992、1993)などを参考にして定めている。まず、二酸化炭素の海洋取り込みとそれによる大気濃度の変化 Δc (ppmv)は Hamburg海洋大循環モデルでの海洋吸収計算結果の近似式(Wigley,1991)である次式を使用する。

$$\Delta c = \sum_{i=0}^4 \Delta c_i$$

$$\frac{d\Delta c_i}{dt} = \frac{a_i(E-O)}{2.13} - \left\{ \frac{1}{\tau_i} + \frac{d \ln a_i}{dt} \right\} \Delta c_i, \quad i=1,4$$

ここに E は排出量(PgC/y)、 O は海洋以外の吸収量(PgC/y)を、また τ_i 、 a_i は表3で与えられる係数である。ここに E_T (PgC)は1765年からのネットの排出量累積値であり、これが 141PgCから2500PgCの間の a_i の値は線形補間して求めた。ミッシングシンクには、大陸植生の二酸化炭素肥沃化項をあてた。この場合、1765～1990年での炭素収支を満足する CO_2 肥沃係数 (β 係数、 CO_2 濃度の純一次生産量に対する感度)は0.13となり以後この値を使用した。

大気濃度変化による放射加熱量変化 ΔQ (W/m²)は、IPCC(1990)で取りまとめられた近似式を用いて算定する。 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、CFC-11、CFC-12、CFC-113、CFC-114、CFC-115、HCFC-22、HCFC123、HCFC-124、HFC-125、HFC-134a、HCFC-141b、HCFC-142b、HFC-152a、 CCl_4 、 CH_3CCl_3 、H1301の19種のガスの直接効果は、上昇濃度値から算定した。成層圏水分量の効果は、メタン濃度から算定した。成層圏低層オゾンの減少に原因する冷却効果 ΔQ_{O_3} は、Wigleyら(1992)の次式で計算した。

$$\Delta Q_{O_3} = - \sum_{i=CFCs} 0.0762 N_i \Delta c_i$$

ここに N_i はCFC中の塩素数及び臭素数の5倍を足した数である。硫酸塩エアロゾルによる冷却効果 ΔQ_s は、Wigleyら(1992)の次式を使用して排出量から算定した。

$$\Delta Q_s = \Delta Q_{s,1990} \ln \left(\frac{E}{E_{1990}} \right)$$

ここに、 $\Delta Q_{s,1990}$ は1990年での硫酸塩による放射加熱量であり、 $-0.75 W/m^2$ とした。これらの加熱・冷却効果を加え合わせたものを ΔQ とする。

ΔQ と温度上昇値 ΔT の関係は次式で表現する。

$$C_m \frac{d\Delta T_m}{dt} = \Delta Q - \lambda \Delta T_m - (1-f) \cdot (\Delta F_{m,d} + \Delta F_p)$$

$$\Delta T_L = \frac{f\Delta Q + k\Delta T_m}{f\lambda + k}, \quad C_m = \rho_m c_m h_m \frac{(1-f)(k+\lambda f)}{k+\lambda f(1-f)}$$

ここに、 t は時刻を、添字 m は海洋上層の混合層での量を示し、 L は陸の値を示す。 C_m は、海洋混合層の見かけの熱容量を表し、 λ は気候感度である。また $\Delta F_{m,d}$ は中層海洋へ移動する熱フラックス、 ΔF_p は高緯度海域でのもぐり込みで深海へ移動する熱フラックスである。 f は陸地面積比(0.71)、 k は陸・海の熱交換係数($3W/(m^2K)$)、 h_m は混合層厚さ(90m)である。混合層から下層へ移動するフラックスなどは、一次元湧昇拡散モデルを用いて次式で表現する。

$$\frac{\partial \Delta T_d}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \Delta T_d}{\partial z^2} - \frac{\partial w \Delta T_d}{\partial z}$$

$$\Delta F_{m,d} = \left[\rho_d c_d w \Delta T_d - \rho_d c_d \kappa \frac{\partial \Delta T_d}{\partial z} \right]_{z=h_m}$$

$$\Delta F_p = -\rho_m c_m w \pi \Delta T_m$$

$$= \left[-\rho_d c_d w \Delta T_d + \rho_d c_d \kappa \frac{\partial \Delta T_d}{\partial z} \right]_{z=\text{中層底}}$$

となる。ここに z は下向きの座標軸であり、 ρ_m 、 ρ_d は海水密度($1.03g/cm^3$)、 c_m 、 c_d は比熱($4.18J/(g \cdot K)$)、 κ は熱拡散係数($1.0cm^2/s$)、 w は湧昇速度($-4m/y$)である。 π は沈み込み水と混合層の温度上昇の比であり0.2とした。また、中層海洋の深さは $3900+h_m$ mとした。

海面上昇は、海水の温度膨脹、大陸氷河の融解、グリーンランド及び南極氷床の変化から計算する。Wigleyら(1993)にならい、海洋を20度幅の緯度帯にわけ、海水温度膨脹に関しては、Bryanらの海水密度式を用い、Levitusによる塩分・温度分布を初期値として、これからの温度変化分による海水体積増加量を計算して上昇値を求めた。その際、各緯度帯の温度上昇と地球平均の温度上昇の間には、GFDL(Geophysical Fluid Dynamic Laboratory, Princeton)が算出した二酸化炭素倍増時の温度上昇パターン(R30)を持つと仮定した。その他の寄与に関しては、次式を使用した。

$$\frac{d\Delta SL}{dt} = \frac{-\Delta SL_L + (Z_{L,0} - \Delta SL_L) \beta_L \Delta T_L}{\tau_L} + \beta_g \cdot \Delta T_g + \left[(-\beta_{a,1} + \beta_{a,2}) \Delta T_a + \Delta B_{a,3} \right]$$

ここに、 ΔSL は海面上昇高さを示し、添字 L は陸地あるいは大陸氷河に関する量、 g はグリーンランドに関する量、 a は南極に関する量を示す。 $Z_{L,0}$ は大陸氷河がすべて融解したときの海面上昇高さ(0.5m)を表し、 β_L は融解の温度感度($0.25/K$)を示す。 τ_L は融解の時定数(20y)である。 β_g は、グリーンランドの寄与を示す係数で、 $0.03cm/(y \cdot K)$ とした。 $\beta_{a,1}$ 、 $\beta_{a,2}$ 及び $\Delta B_{a,3}$ は、南

5. 来世紀末までの温度上昇と海面上昇の見通し

Figure 1 is a line graph showing the projected realised temperature rise in degrees Celsius from the year 2000 to 2100. The y-axis is labeled 'realised temperature rise °C' and ranges from 0 to 6. The x-axis is labeled 'year' and shows 2000 and 2100. Multiple lines represent different scenarios, with a bracket on the right indicating a range of sensitivities from 1.5°C to 4.5°C. The lines show a general upward trend, with the highest sensitivity scenario reaching over 6°C by 2100.

図14 温度上昇の見通し

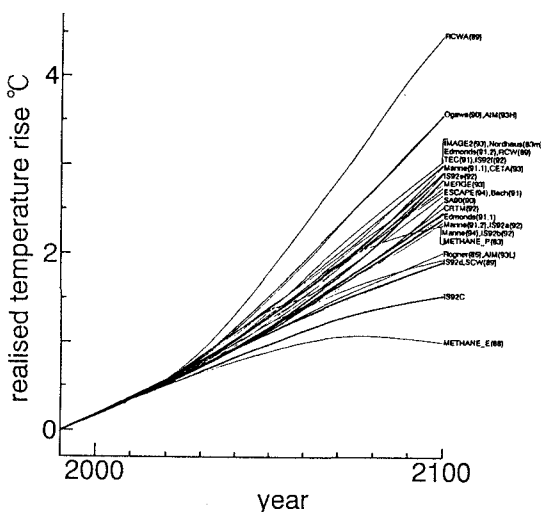


図13 各シナリオ下での温度上昇の見通し
 $\Delta T_{2 \times CO_2} = 2.5^{\circ}C$

図15には、海面上昇の推計を示す。 $\Delta T_{2 \times CO_2}$ の設定により状況は大きく異なる。2100年における上昇量は、 $\Delta T_{2 \times CO_2} = 1.5^\circ\text{C}$ にて 4~30cm、 2.5°C にて42~97cm、 4.5°C にて58~129cmとなっている。すなわち、 $\Delta T_{2 \times CO_2}$ を 1.5°C と想定するか 4.5°C と想定するかは、温

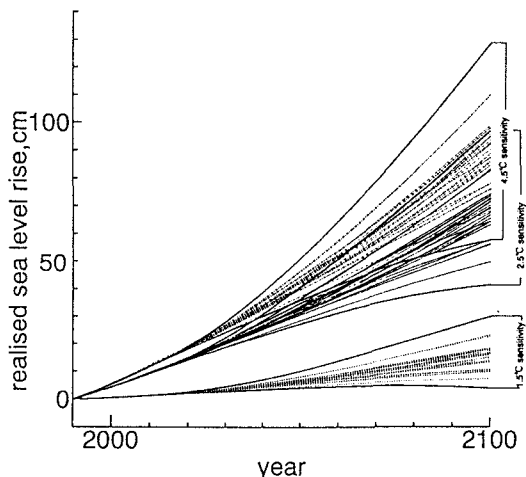


図15 海面上昇の見通し

表4 温度上昇と海面上昇の見通し

year	2000	2025	2050	2100	2000	2025	2050	2100
temperature (C)				sea level (cm)				
$\Delta T_{2\times CO_2} = 1.5 \text{ degree}$								
mean	0.117	0.444	0.846	1.737	0.58	2.90	6.41	15.57
s.d.	0.0061	0.028	0.125	0.447	0.02	0.23	1.14	4.92
max	0.133	0.507	1.248	2.981	0.82	3.521	0.21	30.06
min	0.108	0.384	0.584	0.602	0.54	2.39	4.07	4.00
$\Delta T_{2\times CO_2} = 2.5 \text{ degree}$								
mean	0.167	0.651	1.259	2.641	4.33	17.51	32.87	67.86
s.d.	0.0078	0.035	0.170	0.647	0.07	0.49	2.52	10.28
max	0.186	0.727	1.802	4.474	4.48	18.58	40.83	97.00
min	0.155	0.575	0.900	1.908	4.22	16.40	27.39	41.61
$\Delta T_{2\times CO_2} = 4.5 \text{ degree}$								
mean	0.231	0.937	1.848	4.012	5.45	22.35	42.34	90.46
s.d.	0.0096	0.043	0.223	0.920	0.08	0.54	2.88	13.05
max	0.254	1.024	2.556	6.660	5.63 + 23.44	51.35	128.59	
min	0.216	0.843	1.375	1.709	5.32	21.13	36.05	57.96

暖化影響を検討する上で全く異なった状況を呈することになる。温度変化に比べ海面上昇の方が自然科学的不明性に対する感度が高く、さらなる究明により推定幅を縮小することが期待できるのである。

6. 本論文でわかったこと

現在、地球温暖化問題は、世界の重要政治課題の一つと認識されるに至った。その規模、複雑性は、従来の環境問題に比べ一段と広くかつ深く、自然科学、社会科学、実際政治あるいは人々の日々の活動が、多くの不明さの中で絡み合う。こうした混沌の中で、現在までに得られている知見と現在までの人間活動の軌跡から、現状傾向の延長としての将来を予見し、現時点における行動指針の参考とすることは、極めて重要な作業である。この論文では1980年代後半以降に報告された温室効果ガス排出見通しのうち、現状推移シナリオについて総括し、それらに基づく気候変動を算定した。その結果、以下の諸点が明らかとなった。

- ・化石燃料起源の二酸化炭素排出量は、現状の年60億tCから、2050年には55億tC～359億tC、さらに2100年に12億tC～580億tCへと推計されている。平均値は、2050年に年148億tC、2100年に年262億tCである。最大および最小値の幅は大きく、2050年に6.5倍、2100年には50倍になる。しかし、変動係数は2050年に39%、2100年に54%であるから、大部分の推計値は平均値の付近にある。

- ・化石燃料起源の二酸化炭素排出量変化の原因を、GDP変化、エネルギー強度変化及び炭素強度変化に分離してみると、GDP成長は上記の排出量増加をさらに倍増させるように働いており、エネルギー強度低下によって6～8割の、エネルギーミックスの変化により1～2.5割の抑制を図る見込みとなっている。

- ・今後100年間のエネルギー強度変化の見通しは、世界各国が今までに経験してきたエネルギー強度変化の傾向とほぼ重なっている。また、炭素強度の減少速度は、過去に比べ、かなり大きめに見積もられているものが多い。

- ・熱帯林を中心とする土地利用変化に伴う二酸化炭素

排出量の見通しは、2100年までの累積放出量で300億tC～3100億tCと、10倍程度の差異が生じている。しかるに、排出原単位を同一にする見通しでは、800億tC程度の推計値となっている。

- ・過去100年の間、アジア熱帯林地域において森林面積減少とその地域の人口密度増加は強い相関関係を有していた。この関係は、今後100年の土地利用変化シナリオのうち、一部のものに再現されている。

- ・今後100年間の気温上昇は、二酸化炭素倍増時の平衡温度上昇を2.5℃とする場合、2050年に0.9～1.8℃、2100年には1.0～4.5℃となる。これは、IPCCの1992年での見通し幅である1.5～3.5℃より若干広く、WECの1993年時点の見通し幅である2.05～2.46℃と比べて若干高い。一方、低位値である1.5℃及び高位値である4.5℃とした場合は、2100年上昇値で0.6～3.0℃及び1.7～6.7℃となる。

- ・今後100年間の海面上昇は、二酸化炭素倍増時の平衡温度上昇を1.5℃、2.5℃及び4.5℃とする場合、2100年にそれぞれ、4～30cm、42～97cm、58～129cmとなる。

- ・ $\Delta T_{2 \times CO_2} = 2.5^\circ\text{C}$ としたときのシナリオ平均の上昇量は、2100年に2.6℃と68cmである。これは、現在、社会・生態系にとって許容範囲と推測されている10年あたり0.1℃及び2cmの上昇速度(Rijsbermanら,1990)に比べはるかに大きい。しかるに、シナリオ幅及び気候感度幅を込みにしたときの昇幅は2100年に、温度上昇で0.6～6.7℃、海面上昇で4～129cmとなっている。

このように、議論を現状推移対応に限定しても、来世紀に推測される気候変動の幅はきわめて大きい。その幅が生ずる主たる原因は、第一に今後の経済活動及びエネルギー効率の変化見通しであり、次いでエネルギーミックスの変化である。こうした社会・経済的要因による変動幅は、自然科学的不明さと相俟ってきわめて幅広い将来見通しを形成する。しかるに、現状推移にまかせておいては、地球生態系が許容できる気候変動程度を逸脱することはほぼ確かであり、そうした中で図14、15にみられるバラツキを、どのような地球観と価値観で政策に取り込んでいくかが、問われているのである。

引用文献

- Alcamo, J., G.J. van den Born, A.F. Bouman *et al.*, 1994, Modeling the global society - biosphere - climate system: Part 2: computed scenarios, *Water, Air, Soil Pollution*, 75(1-2).
- Ausubel, J.H. A. Gruebler and N. Nakicenovic, 1988, Carbon dioxide emissions in a methane economy, *Climatic Change*, 12, 245-263.
- Bacastow, R.B. and C.D. Keeling, 1981, Hemispheric airborne fractions difference and the hemispheric exchange time, (ed.) B. Bolin, Carbon Cycle Modelling, SCOPE 16, John Wiley.
- Bolin, B., 1993, In search of the "missing carbon", *Climate Change Bulletin*, 2.

Brown, S., C.A.S. Hall, W. Knabe et al., 1993, Tropical forests: their past, present, and potential future role in the terrestrial carbon budget, *Water, Air, and Soil Pollution*, 70, 71-94.

Grainger, A., 1990, Modeling future carbon emissions from deforestation in the humid tropics, in Proc. IPCC Conference on Tropical Forestry Response Options to Global Climate Change, Sao Paulo, Brazil.

Haefele, W., 1981, *Energy in a finite World*, Ballinger Pub.

Houghton, R.A., 1989, The flux of CO₂ between atmosphere and land as a result of deforestation and reforestation from 1850 to 2100, The Woods Hole Research Center.

Houghton, R.A., 1992, Tropical forests and climate, International Workshop on Ecology, Conservation, and Management of Southeast Asian Rainforests, Kuching, Sarawak.

Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990, Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, (ed.) J.T. Houghton, G.J. Jenkins and Ephraums, Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change, 1992, Climate Change 1992, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, (ed.) J.T. Houghton, B.A. Callender and S.K. Varney, Cambridge University Press.

Marchetti, C. and N. Nakicenovic, 1979, The dynamics of energy systems and the logistic substitution model, RR-79-13, IIASA, Laxenburg, Austria.

松岡 譲, 1992, 都市のエネルギー・物質代謝と都市環境の係わりに関する情報とモデル化, 物質代謝系社会基盤システムの安定性と環境影響, 1991年度研究成果報告書, 「人間環境系」研究報告集, G063-N37B-01, 130-147.

松岡 譲・森田恒幸・甲斐沼美紀子, 1992, 地球温暖化に関するシナリオとモデル解析, 土木学会論文集, 449/IV-17, 1-16.

松岡 譲・森田恒幸, 1993, 地球環境と人口変化に関する二、三の検討, 環境システム研究, 21.

Morita, T., Y. Matsuoaka, I. Penna and M. Kainuma, 1994, Global carbon dioxide emission scenarios and their basic assumptions, -1994 survey-, CGER-1011-'94, Center for Global Environmental Research, Tsukuba.

Nakicenovic, N. et al., 1993, Longterm strategies for mitigating global warming, RR-93-11, IIASA, Laxenburg, Austria.

小川芳樹, 1990, 地球温暖化問題と今後の対応, 第23回エネルギー経済シンポジウム研究報告資料Ⅲ, 日本エネルギー経済研究所.

Rijsberman, F.R. and R.J. Swart, 1990, Targets and Indicators of Climatic Change, The Stockholm Environment Institute.

U.S.EPA, 1990, Policy options for stabilizing global climate, Report to Congress, (ed.) D.A. Lashof and D.A. Tirpak, 21P-2003.1, Washington D.C.

World Energy Council, 1993, *Energy for tomorrow's world*, St. Martin's Press.

Wigley, T.M.L., 1991, A simple inverse carbon cycle model, *Global Biogeochemical Cycles*, 5(4), 373-382.

Wigley, T.M.L. and S.C.B. Raper, 1992, Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios, *Nature*, 357, 293-300.

Wigley, T.M.L. and S.C.B. Raper, 1993, Future changes in global mean temperature and sea level, (in) *Climate and Sea Level Change: Observations, Projections and implications*, (eds.) R.A. Warrick et al., 111-133, Cambridge University Press.

Yamaji, K., R. Matsushashi, Y. Nagata, and Y. Kaya, 1991, An integrated systems for CO₂/Energy/GNP analysis, Workshop on CO₂ Reduction and Removal: Measures for the Next Century, IIASA, Laxenburg, Austria.