

5 各地域の二酸化炭素排出量

1997年の世界でのエネルギーの生産、消費によって排出されたCO₂の排出量は6.2GtC/yrである。図3は、国ごとに示された、10大排出国である。1位がアメリカでその後に中国、ロシア、が続いている。図4は、一人あたりの排出量の多い順であり、アメリカ、カナダ、ロシアという順である。中国や、インドは国としては排出量が多いが、人口も多いので、一人あたりの排出量は少なくなる。

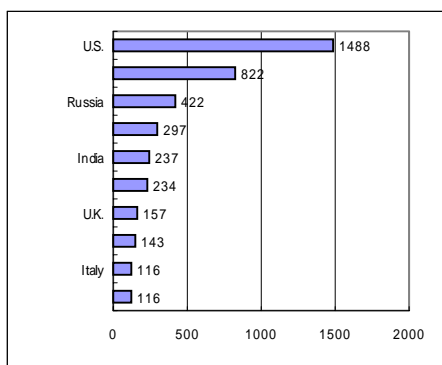


図3 10大CO₂排出国(Mt-C/yr)(1997)

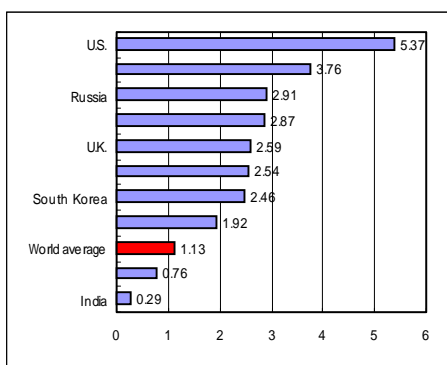
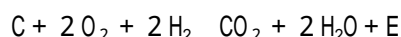


図4 一人当たりのCO₂排出量 (t-C/person)(1997)

6. 二酸化炭素排出と燃料消費

6.1 二酸化炭素含有燃料

化石燃料は、液体(石油)、気体(天然ガス)、固体(石炭)によって、それぞれ割合は変わるが、炭素と水素を含んでいる。化石燃料を燃焼させると以下のように、CO₂とエネルギーが発生する。



炭素の原子量は12であり、CO₂の分子量は44である。よって1単位の炭素から、3.677倍の二酸化炭素が発生する。

6.2 炭素強度

燃料に含まれる炭素と、エネルギーによって定義される炭素強度は以下のような式で表される。

$$\text{炭素強度} = \text{燃料炭素質量} / \text{燃料エネルギー}$$

燃料発熱量が決まっていると、炭素強度は以下のように計算される。

$$\text{炭素強度} = \text{燃料中の炭素比} / \text{燃料発熱量}$$

また各エネルギー源の炭素強度がわかれば、全エネルギーと炭素強度をかけることによって、全炭素放出量が計算できる。

$$\text{炭素排出量} = \text{エネルギー消費量} \times \text{炭素強度}$$

6.3 二酸化炭素排出量の要因

全エネルギー消費量は 3 つの項目の積で表される：

$$\text{エネルギー消費量} = \text{人口} \times (\text{GDP} / \text{人口}) \\ \times (\text{エネルギー消費量} / \text{GDP})$$

この式に、平均炭素強度をかけることによって、1年ごとの二酸化炭素排出量が計算できる。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量} = \text{人口} \times (\text{GDP} / \text{人口}) \\ \times (\text{エネルギー消費量} / \text{GDP}) \times (\text{炭素強度})$$

右辺の 4 つの項目が、国単位での CO₂ 排出量を決定する鍵となる。

(人口)

第 1 項目である人口が増加することにより、二酸化炭素排出量は増加する。人口増加に伴って、食料、衣類、家やその他の必要なものがでてくるからであり、その結果、エネルギー消費やその他の活動によって温室効果ガスの増加につながる。20 世紀末、世界の人口は 60 億強である。これが 21 世紀の末には、約 2 倍の 100 億人以上に達する。

(一人あたりの GDP)

第 2 項目は、平均的な豊かさを示している。この項目の値の増加というのは、個人の物や、サービスに対する需要の増加である。生活水準が高くなると、温室効果ガスの排出量の増加の可能性がある。しかし、一人あたりの GDP は人口増加の割合にリンクして変化するかどうか、または、お互い

に独立しているかどうかという問題が生じるが、これには様々な意見や相反する研究がある。このようにまだ分からないことがたくさんあり、将来の二酸化炭素排出量の予想の制限の 1 つになっている。

(エネルギー強度)

第 3 項目は技術と技術進歩に密接に関連している。一次エネルギーの GDP に対する消費量は、経済活動においてどのくらい社会がエネルギーを使うかを示している。この比率はしばしばエネルギー強度といわれる。図 5 は、エネルギー強度を国ごとに比較したものである。7 つの工業先進国では、カナダとアメリカはエネルギー強度が高く、日本は低い。この違いは、交通でのエネルギーの使用量がかぎとなっている。工業後進国でのエネルギー強度は非常に高い。例えばロシアは日本の 11 倍である。これには、GDP を計算するときの為替レートが大きく影響している。

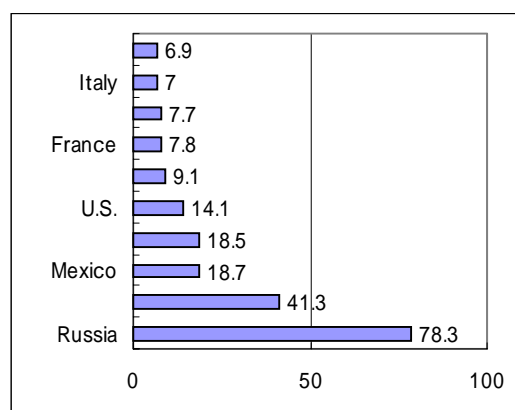


図 5 1998 年のエネルギー強度の比較 (MJ/1990\$)

7 人為的に排出された温室効果ガスの崩壊

人間活動による温室効果ガスの排出量と、大気中に存在する温室効果ガスの崩壊量が釣り合えば、大気の構成は安定したものとなる。過大な水蒸気は、降水により定期的に大気中から取り除かれるので、大気中の水蒸気の濃度は一定に保たれる。エアロゾルは降水に溶け込んで地面に降り注ぐので、大気寿命は降水のサイクルと同じく非常に短い。その他 CO₂ 以外の温室効果ガスの崩壊は、崩壊曲線によって表される。時刻 0 において質量 m_0 の温室効果ガスが排出されたとき、 t 年後の残量 m は大気寿命 τ を用いて次のように計算される。

$$m = m_0 e^{-t/\tau}$$

CO₂ の崩壊は、炭素循環モデルを用いて表される。様々なパスを通じて様々なレートで CO₂ が崩壊していくため、大気寿命を一つにしぼることはできない。以下に示す Exponential モデル (Enting and Newsan, 1990) では、2 種類の τ を用いて CO₂ の崩壊を表している。

$$\frac{m_c}{m_{c,0}} = 0.375 \exp\left(-\frac{t}{10.43}\right) + 0.625 \exp\left(-\frac{t}{291.5}\right)$$

また、5 種類の τ を用いたより精密なモデル式 (E. Mailer-Reimaer & K. Hasselmann, 1987) も提案されている。

8 人為的に排出された温室効果ガスの削減技術

8.1 代替エネルギー

電力の生産のために、今日魅力的な選択の 1 つとして、複合サイクル火力発電所で天然ガスを用いる方法である。これは、天然ガスの低炭素強度と、高効率のエネルギー生成を組み合わせた選択である。この結果、CO₂ 排出量/kW-h は、石炭による火力発電に比べて 80% 減少させることができる。アメリカやその他の国で、ガス燃料による複合サイクル火力発電所が、新しい電力生成施設としてもっとも経済的な選択としている。

炭素排出量ゼロを達成する 1 つの選択肢として、原子力エネルギーがある。これは、全世界のエネルギー需要の増加に対して技術的に有力で、二酸化炭素排出量ゼロのエネルギーである。しかし原子力に対する重大事故に対する不安、核拡散、放射性廃棄物処理処分、原子力発電所の制限などの懸念に加え、高額な資本コストがかかる。アメリカでは、原子力発電の計画は下降気味である。

風力、太陽、バイオマスといったような再生可能なエネルギー技術は、電力生産で炭素ゼロの最も有効なものである。バイオマスの場合は、電力生成の際の炭素排出とバイオマスの成長段階での炭素の吸収で相殺することにより、炭素排出量ゼロを達成する。しかしながら、多くの再生可能なエネルギー技術は、化石燃料にくらべて、まだ経済的でない。資金的な誘導策、あるいは CO₂ 排出の制限のような政策措置が、数 10 年後、再生可能なエネルギーに大きくシ

フトを促進させるのに必要である。

8.2 炭素隔離

エネルギー使用による炭素強度削減の可能性のある方法としては、CO₂が大気に放出される前に捕獲、隔離する方法である。工業プロセスの排ガスから CO₂ を取り除くことは現在すでに可能である。このような技術は、コストが非常にかかるが発電所にも適用できる。また取り除いた CO₂ を処理する方法に、問題が残っている。いくつかのプロジェクトで、油田や炭鉱といった、地質の構造で CO₂ を貯蓄できると実証されている。また、海もまた貯蔵可能である。しかし、恒久的に大規模な CO₂ 隔離する能力があるかは、まだ継続的に調査の必要が残っている。もしこの調査が安全であるとするならば、公的に受け入れられ、低コストな隔離の選択肢として、CO₂ を大気に放出せずにする。

8.3 人為的に排出された温室効果ガス削減

埋立地や石炭層からもれたメタンガスを捕らえる。これは大気にメタンが放たれるのを未然に防ぐだけでなく、天然ガスの補充ソースにも備える。天然ガスのパイプラインからのメタンの漏れは、漏れている箇所を検出とパイプラインの検査の技術改善によって減らすことができる。

人為的に発生された亜酸化窒素の主な理由は、農業やそれに関する活動による窒素肥料の使用である。また燃焼も亜酸化窒素を生成する原因である。地球温暖化を助長する CFCs とその他ハロカーボンの放出は、成層圏のオゾン層の破壊を防ぐために、すでに減少している。モントリオール議定書

では、ペルフルオロカーボンや六フッ化硫黄といった工業化学薬品に及ぶ CHC 製品の規制を行った。これらの化学製品を規制することによって、大気中の濃度を安定することができる。

9 地球温暖化に対する世界の動向

9.1 IPCC による歴史的な気候変化の

推定

近年の気候変動及び予想される気候変動がどれほどの重要性を持つものかを知るためには、過去数万年にわたって気候がどのように変化してきたのかを知る必要がある。

過去の気候を推測する手法には次のようなものがある

- ・ 地層内の花粉や海底堆積物から植生等を調べることにより、当時の気候状態を推定する。
- ・ 南極の氷芯に含まれる気泡を用いて過去の大気構成を調べる。
- ・ 氷芯や海底堆積物に含まれる酸素同位体(気温に対して高感度)を用いて当時の気温を推定する。

こうした手法によって、過去の気候をかなり正確に知ることが出来る。IPCC によって測定された過去の気温変動と幾つかの温室効果ガスの濃度変化のグラフを図 6 に示す。(IPCC, 1996)

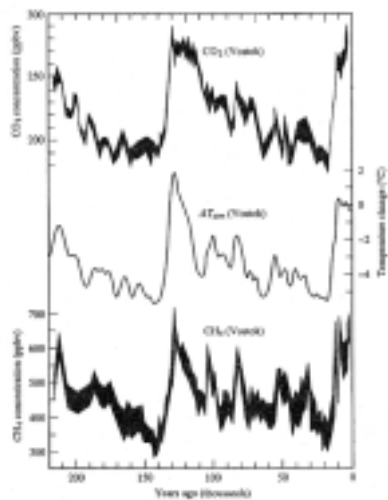


Figure 12.19 Temperature and greenhouse gas trends from the Vostok, Antarctica, ice core. The record shows that historical changes in atmospheric carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) concentrations correlate well with changes in Antarctic air temperature throughout the record. (Source: Adapted from IPCC, 1996a)

図6 .過去 20 万年にわたる CO₂ 及びメタンの濃度変化と気温変動

着目点

歴史的に見ても、大気中のCO₂濃度と気温は非常に高い相関を持っている。ただし、どちらが鶏でどちらが卵かという問題は残る。(CO₂の濃度変化に引きずられて気温が変化したのか、気温変化に引きずられてCO₂濃度が変化したのか、はっきりと分かっていない。)

9.2 IPCC による将来の気候変動予測

IPCC は 1990~2100 における CO₂ の排出に関して 6 つのシナリオを示し、シナリオに基づいて気温の変動を予測した。シナリオと予測の結果を図7に示す。

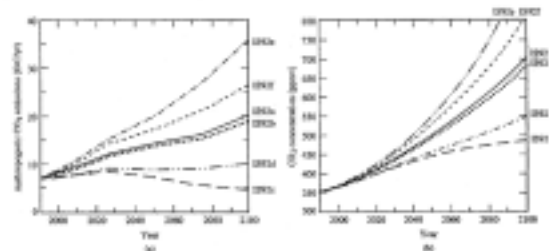


Figure 12.17 IPCC scenarios for global warming 1990-2100: (a) CO₂ emissions; (b) atmospheric CO₂ concentration; (c) total relative forcing; (d) global average temperature change. (Source: IPCC, 1996a)

図7 .(a) CO₂ 排出に関する 6 つのシナリオ (b)各シナリオに基づく CO₂ 濃度変化の予測 (IPCC , 1996)

このシナリオの中で CO₂ の排出を最も大きく見積もっているのは IS92e、逆に最も小さく見積もっているのは IS92c である。また、諸研究において最も多く参照されるのは、IS92a である。

IS92a、IS92c、IS92e に基づいて放射強制力と気温の変動を予測した IPCC のデータを図8に示す。

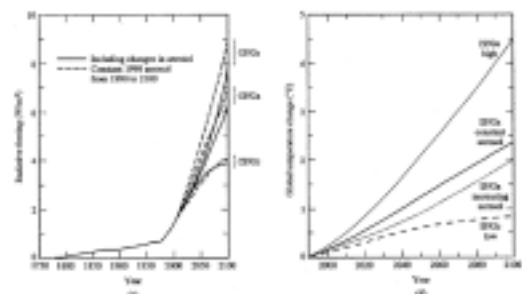


Figure 12.17 IPCC scenarios for global warming 1990-2100: (c) radiative forcing; (d) global average temperature change. (Source: IPCC, 1996a)

図8 . IS92a、IS92c、IS92e に基づく (c)放射強制力の変動の予測 (d)気温変動の予測

(IPCC , 1996)

着目点

それぞれのシナリオにおける CO₂ の予想排出量には大きなばらつきがある。これは、将来の CO₂ 排出量の予想が非常に困難であることの表れである。全てのシナリオを考慮すると、気温の変動は 0.8~4.5 の

範囲に収まる。この中で他研究等において最も頻繁に参照されるのは IS92a である。IS92a によれば、2100 年の CO₂ 排出量は 1990 年の排出量の約 3 倍になる。これにより、大気中の CO₂ 濃度は 700ppmv となり、2.0～2.4 の気温上昇が起こると予想される。

9.3 大気構成が危険でないレベルで安定する CO₂ 排出シナリオ

IPCC はまた、将来において CO₂ 濃度が安定するためにはどのように CO₂ 濃度が推移すればよいかについてシナリオを示し、そのときの CO₂ 排出量の推移を推定した。

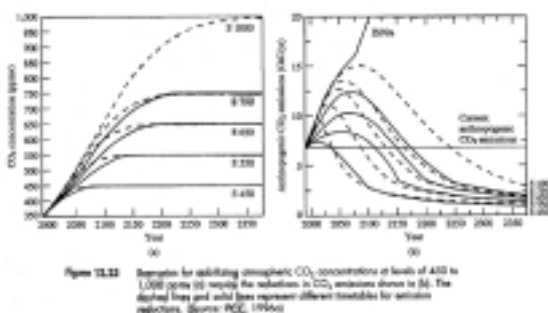


図 9 . 将来において CO₂ 濃度が安定する場合の (a) CO₂ 濃度の推移 (b) CO₂ 排出量の推移 (IPCC , 1996)

図 9 の実線は 2000 年から削減が実施された場合の推移を示し、破線はそれより後の時点から削減が実施された場合の推移を示している。これらは実際に実施・予定されている削減計画を反映したものではない。

着目点

CO₂ 濃度を安全なレベルで安定させるためには、最終的な CO₂ 年間排出量は 1990 年現在における年間排出量の 20～40% にまで削減されなければならない。

9.4 京都議定書

京都議定書として知られる 1997 年の協定において、主要工業国のリーダーは、CO₂、CH₄、N₂O の排出を 2008 から 2012 の期間に、1990 年を基準とし 5.2% を削減することに合意した。同時に、ペルフルオロカーボン (PFCs)、ヒドルフルオロカーボン (HFCs)、六フッ化硫黄 (SF₆) は 1995 年を基準とする。平均 5.2% にたいして、国によって削減目標値が設定された。制限範囲は、8% 減から 10% 増までである。問題を解決する方法として、さまざまな排出削減の効率のいいメカニズムや刺激策が提案された。その中には、CO₂ の削減コストを最小にするために提案された CO₂ 取引市場もある。しかしながら依然として問題も残っている。それは、京都議定書には、中国やインドのような発展途上国が参加していない。また、2001 年にはアメリカが議定書から脱退することを表明した。アメリカは世界の CO₂ 排出量の 25% を占める CO₂ を排出している CO₂ 排出超大国であるため、その脱退は議定書の意義に大きな波紋を投げかけた。2002 年、イギリスはアメリカ抜きで CO₂ 取引市場をスタートさせた。CO₂ 取引市場を魅力的な市場へと発展させることによってアメリカの議定書参加を促すねらいがあると考えられる。

第 章 数値計算

2100 年の大気中の二酸化炭素濃度を求め、その時まで世界平均気温がどのくらい上昇するかを計算する。濃度を計算する際、いくつかの仮定が必要である。

仮定

世界人口はアジア人口・開発協会によると、約 104 億人になるとしている。これを参考に 2100 年で約 100 億人になるようなロジスティック曲線を用いて、人口増加過程を定めた。現在、一人当たりの年間エネルギー消費量の 1.47[t/人]であり、2100 年においてシナリオ 1 では 1 倍、シナリオ 2 では 2 倍、シナリオ 3 では 3 倍になったとしそれぞれ計算する。途中の増加過程は指数的であるとした。2100 年において、石炭・石油・天然ガスの消費割合は、全体エネルギーの 24%、38%、28%であるとする。残りの割合は、多数の微量な要素で構成されていて計算が困難であり、大きな影響も及ぼしていないため無視するとする。

これらの仮定を元に 2100 年までの二酸化炭素排出量および、崩壊残存量を求め、大気中の二酸化炭素量を計算し、濃度を求めることにした。

計算方法

- ・ 設定した仮定から CO₂ の排出量を推定する。
- 1. 人口と一人当たりの年間エネルギー消費量から、年間総エネルギー消費量を算出する。
- 2. 年間総エネルギー消費量の中でどれだけのエネルギーが石炭、石油、天然ガスによって供給されるかを計算する。
- 3. 結果としてどれだけの CO₂ が排出されるかを計算する。

t 年の人口を $p(t)$ [人]、一人当たりの年間エネルギー消費量を $e(t)$ [TOE] とおくと、 t 年の年間総エネルギー消費量

$E(t)$ [TOE] は次のように表される。

$$E(t) = e(t) \times p(t) \text{ [TOE]}$$

このうち、石炭でまかなわれる割合を $R_C(t)$ 、石油でまかなわれる割合を $R_O(t)$ 、天然ガスでまかなわれる割合を $R_G(t)$ とおくと、石炭によるエネルギー供給量 $E_C(t)$ [TOE]、石油によるエネルギー供給量 $E_O(t)$ [TOE]、天然ガスによるエネルギー供給量 $E_G(t)$ [TOE] は次のように表される。

$$E_C(t) = E(t) \times R_C(t) \text{ [TOE]}$$

$$E_O(t) = E(t) \times R_O(t) \text{ [TOE]}$$

$$E_G(t) = E(t) \times R_G(t) \text{ [TOE]}$$

石炭の CO₂ 排出係数は 1.0062 [Gt - C / 10⁹ TOE]、石油の CO₂ 排出係数は 0.7811 [Gt - C / 10⁹ TOE]、天然ガスの CO₂ 排出係数は 0.56391 [Gt - C / 10⁹ TOE] なので、CO₂ の排出量 $m_C(t)$ は次式で求まる。

$$m_C(t) = \left(\begin{array}{l} E_C(t) \times 1.0062 + E_O(t) \times 0.7811 \\ + E_G(t) \times 0.56391 \end{array} \right) \times 10^{-9} \text{ [Gt - C]}$$

CO₂ の排出量から大気中の CO₂ 濃度を推定する。

CO₂ の崩壊曲線を $D(t)$ で表す。

k 年に排出された CO₂ が $m_C(k)$ [Gt - C] である場合、 t 年における $m_C(k)$ の残量は

$$m_C(k) \times D(t - k) \text{ [Gt - C]}$$

と表される。

t 年までに人為的に排出された CO₂ の大気中総量を $M_C(t)$ とする。

第二次産業革命以降の人為的な CO₂ 排出が大気中の CO₂ 濃度を変化させたと

すると、 $M_c(t)$ は次のように求められる。

$$M_c(t) = \sum_{k=1900}^t m_c(k) \times D(t-k) [\text{Gt} \cdot \text{C}]$$

$D(t)$ は CO_2 の崩壊曲線である。今回は $D(t)$ に以下の式 (E.Mailer-Reimaer & K.Hasselmann , 1987) を利用した。

$$D(t) = \sum_{j=1}^5 a_j e^{-t/\tau_j}$$

J	1	2	3	4	5
a_j	0.131	0.201	0.321	0.249	0.098
τ_j		362.9	73.6	17.3	1.9

結果

現在の(2000年)の二酸化炭素濃度は357ppmであり、100年後の二酸化炭素濃度は各シナリオにより異なるが、約575~820ppmになると予想される(図10、図11)。この予想結果は、近年のIPCCの予想結果である約500~1200ppmに近いことから、それなりに妥当であると考えられる。この結果をもとに将来の地球の気温を考える。気候感度ファクターを $0.6 \text{ /W} \cdot \text{m}^{-2}$ とした。表3は2100年の過放射と地表の気温の均衡の上昇をまとめたものである。しかしこの温度は、実際2100年になった瞬間の均衡温度ではなく、その後 CO_2 が排出されなければ、ある程度のタイムラグをもって、その温度に均衡するという値である。そこで、そのタイムラグを計算する方法なのだが、今回参考にした資料には大気中の二酸化炭素濃度が2倍になった場合の計算方法しか説明しておらず、それ以上細かい計算を調べるに至らなかったため、約2倍になった年を基準に考えることにする。その方法は二酸

化炭素濃度が倍増した場合、地表気温の実現増加は平衡値の変化の62%となるというものである。それを元に計算すると、モデル2ではちょうど2100年あたり、シナリオ3ではそれより少し早く2084年で約2倍になり、その時点で現在に比べて約1.9地表気温が増加している。その後も二酸化炭素は排出されているので、2100年の気温はシナリオ2で1.9、モデル3で1.9~3.1上昇すると予想される。シナリオ1では2100年まででは濃度が2倍にならなかったが、遅かれ早かれ現状のまま二酸化炭素を排出し続ければ、地球の温度は上昇していく。今回の予想結果は、ごく簡単なデータと計算によるものだが、IPCCでは、地球の平均表面気温は2100年には1.4~5.8上昇すると予想しているため、妥当な結果であると考えられる。

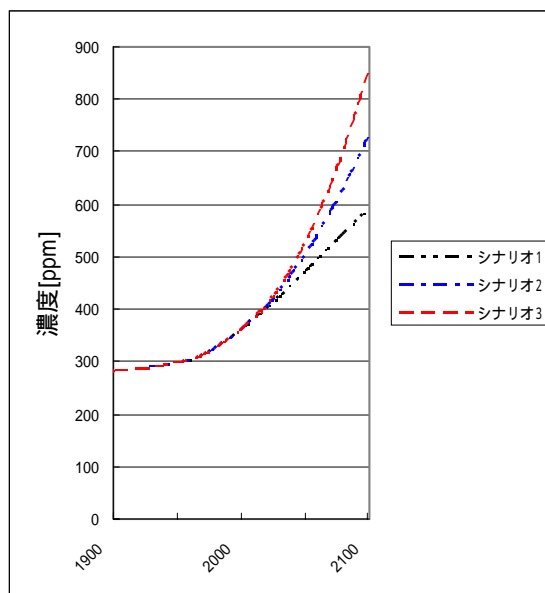


図10．大気中二酸化炭素濃度の推移
(2係数崩壊曲線)

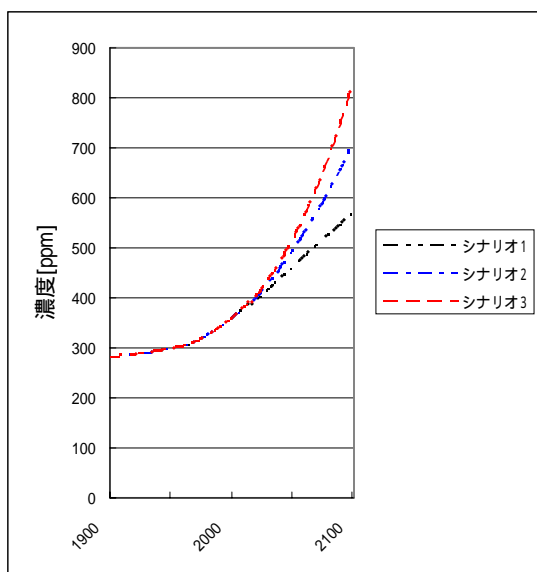


図 11 . 大気中二酸化炭素濃度の推移
(5 係数崩壊曲線)

表 3 . 各シナリオにおける最終的な気温変化。1) 2 係数崩壊曲線を用いた場合

2 係数	2000(ppm)	2100(ppm)	T
シナリオ 1	357.40	587.10	1.88
シナリオ 2	357.40	726.70	2.68
シナリオ 3	357.40	849.66	3.27

2) 5 係数崩壊曲線を用いた場合

5 係数	2000(ppm)	2100(ppm)	T ()
シナリオ 1	357.40	575.20	1.80
シナリオ 2	357.40	696.11	2.52
シナリオ 3	357.40	819.77	3.14

まとめ

本レポートでは、地球温暖化のメカニズムを調べ、簡単なシナリオを立てて、将来の地球の気温の予想を行った。その結果、2100 年には約 2~3 上がる事がわかった。IPCC の研究によれば、1.4~5.8 の気温上昇によって海水面が 0.09~0.88m 上昇する。

海面が 40cm 上昇すると、高潮によって 7500 万~2 億人の人が浸水の被害を受ける。また海面が 1m 上昇した場合は、マーシャル諸島の一部の島の 80%が、バングラディッシュの国土の 17%が海に沈む。そして日本の砂浜の約 9 割が喪失する。また、PCC では冷夏や大雨などの異常気象も温暖化の影響であると報告している。このような異常気象による被害としてあげられるのが、農作物や家畜などへの被害、干ばつ、雪崩や洪水などによる自然災害、伝染病の流行、冷房の電力需要の増大による電力不足などである。地球の温暖化という問題は、地球規模、国家規模の大きな問題でありながら、徐々に進行するので気づきにくい現象の 1 つである。しかし、長年かけて暖まった地球は、すぐに冷やすことはできないので、温暖化進行の影響が出てから対応しては遅い。最終的には地球に住む一人一人がこの問題を意識し、その対策を心がけなければ、この問題を解決することはできない。

参考資料 :

Edward S. Rubin, Introduction to engineering and the environment, McGraw-HILL INTERNATIONAL (2001)

内山洋司「エネルギー工学と社会」
放送大学教育振興会 (2003)

web-site「原子力のページ」
<http://www.atom.meti.go.jp>