

CO₂排出による温室効果の分析

長谷川 雄士 桑田 智幸 小藪 和之

指導教官：内山 洋司

概要

本研究では、地球温暖化のメカニズムに関する情報収集を行い、温室効果ガスのうち地球温暖化への影響が最も大きいとされているCO₂、特にその大部分を占める化石燃料の燃焼に伴い排出されるCO₂に着目した。そこで、2100年までの化石燃焼の消費パターンについて2つのシナリオを設定し、両シナリオにおいて予測されたCO₂排出量から温室効果の分析を行った。また、これらの温室効果が自然・社会に与える影響に関する考察を行っている。

1. 研究の背景と目的

現在、様々な環境問題が生じており、その一つとして地球温暖化が挙げられる。これは、CO₂やフロンなどの温室効果ガスによって引き起こされる現象であり、特に過剰なCO₂の排出が主な原因であるとされている。

CO₂は主に化石燃料の燃焼により発生するが、化石燃料は現在、人間のあらゆる分野での活動に必要な不可欠であるため、先進諸国においてはその使用量の削減が難しく、発展途上国では今後の経済発展に伴い使用量は確実に増加すると考えられている。そのため、CO₂排出量は年々増加し、今後もその傾向が続くと予測される。

温暖化により起こりうる主な事象として海面上昇、気象への影響、生態系への影響などが挙げられる。生態系への影響とは、温暖化により生物の生存可能な地域が変化してしまうことである。このように温暖化は地球環境に多大な影響を与えるとされている。

そこで、本研究では化石燃料の使用に伴うCO₂の排出量に着目した2つのシナリオを想定し、2100年までのCO₂排出による温室効果の分析を行った。

2. 温暖化のメカニズム

2.1 温室効果

地表付近の気温は、太陽から放射されたエネルギーと宇宙へ出ていく熱のバランスから決定される。太陽光により地表が温められる一方で温められた地表から熱(赤外線)が放射され、地表が冷える。この中で重要な役割を果たすのが、CO₂に代表される温室効果ガスである。温室効果ガスの存在により、地表から放出される赤外線の一部が吸収され、大気が温められる。そして温められた大気は再び宇宙空間や地表に向かって赤外線を放射し、地表を温める。

このようにして、地表付近の気温は平均で15[°C]前後に保たれ、生物にとって住みよい環境になっている。

2.2 地球のエネルギーバランス

2.2.1 放射エネルギー

絶対零度より高い温度の物体からは常にエネルギーが放射されている。以下では放射されるエネルギーの理論的な値を仮定する。放射されるエネルギーの量は物体の温度と表面の性質に依存し、エネルギーの最大量は次のステファン・ボルツマン式によって求められる。

$$Q_{\max} = \sigma AT^4$$

Q_{\max} : エネルギー放射の最大量

σ : ステファン・ボルツマン定数

A : 物体の面積

T : 物体の絶対温度

黒体と呼ばれる理想的な物体はこの最大量の放射を行うとされる。実際に存在する多くの物質からの放射量はこの理論最大値よりも小さくなるが、水などの物質は比較的この黒体に近い放射を行うことが分かっている。

放射エネルギーの実体は、光子もしくは電磁波である。光子エネルギーは周波数 ν とプランク定数 h の積により表される。

$$E = h\nu[J]$$

この式は、周波数の高い光子は大きなエネルギーを持つことを意味する。また、これを電磁波として見た場合、波長 λ が特長を決定する。波長は通常マイクロメートル程度で、周波数とは反比例の関係にある。ここで、光の速さを C とすると、波長 λ は次のように表される。

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

よって、電磁波のエネルギーは

$$E = \frac{hc}{\nu}$$

となる。すなわち波長が短いほどエネルギーが大きくなる。

また、プランクの法則から、絶対温度 T の黒体による波長 λ の放射エネルギーは次のように表すことができる。

$$E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

E_{λ} : 単位体積および単位波長あたりの黒体によるエネルギー放射量

T : 黒体の絶対温度

C_1 : プランクの第一定数

C_2 : プランクの第二定数

2.2.2 単純な地球エネルギーバランス

温室効果を考慮しない地球エネルギーバランスについて考察する。この場合、地球に入ってくる太陽エネルギーと地球から出ていく太陽エネルギーが等しいときに均衡状態となる。地球の表面温度が T_e であると仮定すると、地球から出ていく単位面積当たりの放射量 q_{earth} は次のように表される。

$$q_{earth} = \sigma T_e^4$$

単位平方メートル当たりを受ける太陽エネルギー S_0 は $342[\text{W}/\text{m}^2]$ である。電磁波の性質から、入ってきた太陽エネルギーの一部は反射して宇宙へと戻り、この反射されたエネルギーをアルベドと呼ぶ。このアルベドの量は地表の特性に依存する。氷や雪などの白く滑らかな面では反射が多く、凹凸がある暗い面では反射は少ない。地球表面でのアルベドはおよそ 31% であると考えられている。すなわち、反射されずに残る 69% の太陽エネルギーは吸収され熱となる。太陽エネルギー全体に対するアルベドの割合を a とすると、吸収される太陽エネルギーは次のように表される。

$$S_0(1-a)$$

地表が一定の温度に保たれていると考え、エネルギー吸収と地球放射の量は等しくなる。

$$S_0(1-a) = \sigma T_e^4$$

ここで、 T_e について解けば地球の表面温度を求められる。

$$T_e = \left[\frac{S_0(1-a)}{\sigma} \right]^{1/4}$$

このモデルでは、アルベドと太陽エネルギーが温度を決定するパラメータとなる。ステファン・ボルツマン定数を代入すると、 T_e は次のように表される。

$$T_e = \left[\frac{342(1-0.3)}{5.67 \times 10^{-8}} \right]^{1/4} = 254\text{K} = -19^\circ\text{C}$$

よって、温室効果が存在しない場合の地球の平均気温は -19°C と予測される。実際の平均気温は 15°C で、その差である 34°C が温室効果によって暖められた温度であると考えられる。

2.2.3 現実的な地球エネルギーバランス

大気層を考慮に入れた、より現実的な地球エネルギーバランスのモデルについて考える。まず、大気層(温度: T_a)が存在するものとする。この層は宇宙側と地球側へそれぞれ黒体と同様の放射を行い、地球からの放射の全てと太陽放射の一部を吸収する。

単位表面積あたりのエネルギーは σT^4 であり、入ってくる太陽エネルギーは $S_0 = 342[\text{W}/\text{m}^2]$ という平均値を得る。そのうち約 31% ($107[\text{W}/\text{m}^2]$) はアルベドとして宇宙へ反射される。残った総吸収量 S_a は

$$S_a = S_0 - aS_0 = 342 - 107 = 235[\text{W}/\text{m}^2]$$

このモデルでも地球表面の均衡温度 T_e を求める必要があるが、 T_a の存在により複雑になる。

$$S_a \alpha_a + \sigma T_e^4 = 2\sigma T_a^4$$

$$S_a(1-\alpha_a) + \sigma T_a^4 = \sigma T_e^4$$

これらを解くことで、地球表面温度 T_e は 17°C と求められる。実際の平均気温は 15°C なので、これは前に示したものより現実的なモデルであることが分かる。

2.2.4 厳密な放射バランスモデル

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル)による正確な放射バランスモデルを図 1 に示す。このモデルでは、地表からの上昇気流、水蒸気の潜熱、大気表面での気化熱も示されている。地球から宇宙へと出ていく放射の大部分を大気が吸収しているが、そのうち約 10% は大気窓を通して大気からの放射と共に宇宙へと放出される。また、大気中から地球へ放射されるエネルギーは、大気中から宇宙へ放射されるエネルギー

よりも大きい。したがって、大気の上部よりも下部の温度が高くなる。

また、温室効果ガスの放射量をより厳密に予測す

るためには、熱伝導、雲のふるまい、大気の構成物質などの物理的な考察が必要となる。

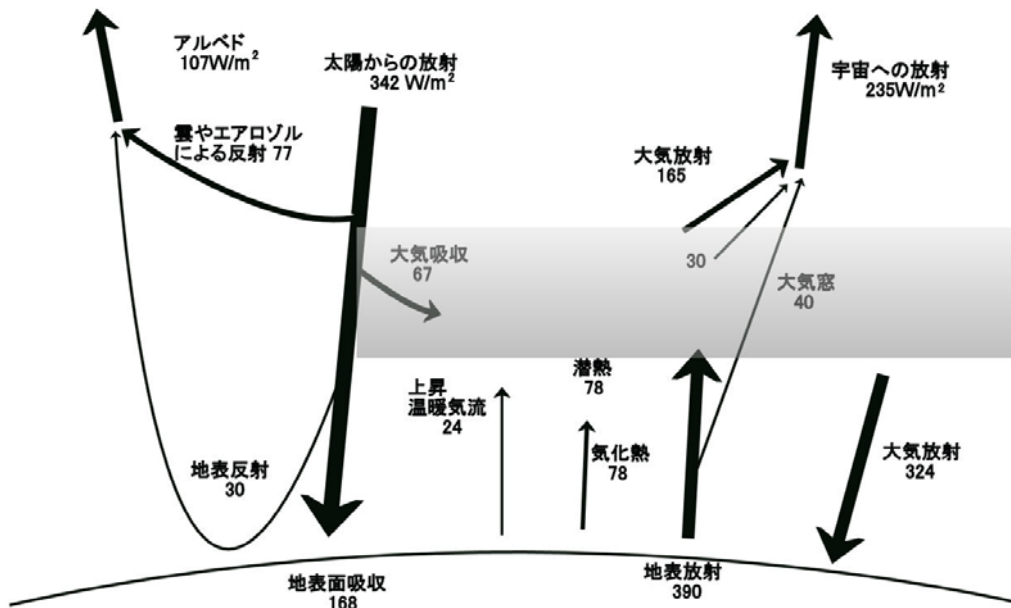


図 1. 放射バランスモデル

2.3 放射強制力

2.3.1 放射強制力発生 の 要因

温室効果ガスは地球から放射される赤外線を吸収するため、その増加により宇宙へ出ていくはずの放射の一部が吸収される。したがって、宇宙への単位面積あたりの放射量が減少する。つまり、均衡が保たれていた赤外線の放射バランスに不釣り合いが起きる。このように放射バランスを崩そうとする力を放射強制力 ΔF という。

放射強制力が引き起こされる主な原因は、温室効果ガスによる宇宙への放射量の減少である。その他の原因としては太陽活動による太陽光の変化や大気中のエアロゾルの増加などが挙げられる。エアロゾルとは、直径 $10[\mu\text{m}]$ 以下の浮遊微粒子であり、太陽エネルギーを反射させる性質を持つ。

2.3.2 放射強制力と温室効果ガス濃度

大気中に温室効果ガスを追加することで生じる放射強制力の大きさについて考察する。

追加前の大気中の温室効果ガス濃度が微少である場合、追加される温室効果ガスの影響は大きくなる。そして追加前の温室効果ガスの濃度が増えるに従って、追加される温室効果ガスの影響は小さくなる。変化する前の濃度を C_0 、変化後を C と

すると、追加前の温室効果ガスがそれぞれ低濃度・中濃度・高濃度の場合について濃度変化と放射強制力の関係は次のように表される。

低濃度

$$\Delta F = A(C - C_0)$$

中濃度

$$\Delta F = B(\sqrt{C} - \sqrt{C_0})$$

高濃度

$$\Delta F = k(\ln C - \ln C_0)$$

なお、3つの式中の A や B や k はそれぞれのガスに固有の値である。

2.4 放射強制力による気温変化

温室効果ガス濃度の上昇に伴い、放射強制力が生じる。このように生じた放射バランスの不均衡は、大気から地表への放射を増大させ、地表を温める。これにより、地球の気温が上昇する。

放射強制力 ΔF によって地表の温度が最終的に ΔT_e だけ上昇するとき、 ΔF と ΔT_e の比 γ を気候感度ファクタと呼ぶ。

$$\gamma = \frac{\Delta T_e}{\Delta F}$$

気候感度は温室効果ガスやエアロゾルによって引き起こされた放射強制力が最終的にどれだけ気温を上昇させるかに関係するため、気候のモデル化を行う上で重要なパラメータである。上式を変形すると以下の式になる。

$$\Delta T_e = \gamma(\Delta F)$$

これは、放射強制力が $1[\text{W}/\text{m}^2]$ ならば地表の平均気温は $\gamma[^\circ\text{C}]$ 上昇することを意味する。

しかし、実際に気候感度ファクタを測定するのは非常に困難である。温室効果が無い状態では地表の吸収エネルギーが $1[\text{W}/\text{m}^2]$ 増加すると、 $0.27[^\circ\text{C}]$ の温度が上昇することになるが、温室効果がある状態では様々な要因が複雑に関係し、温暖化効果と冷却効果が相互に影響している。例として、地表の温度が上昇すれば川や海より多くの水が蒸発する。水蒸気は強い温室効果を持つため、地表からの放射は妨げられ、温暖化が促進する。一方、多くの水蒸気が発生すれば大量の雲が生じ、太陽エネルギーの反射率が増大し、冷却効果も生じることになる。このように、厳密な値を計算することは不可能に近い。しかも、将来にわたって気候感度ファクタの値が一定であるという保障もなく、気温変化を予測する際の課題となっている。

3. エネルギー需要とCO₂排出

3.1 CO₂の地球温暖化への寄与度

1998年に締結された気候変動枠組条約において、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、フロン、六フッ化硫黄が排出削減を目指す対象として定められた。

これらの温室効果ガスの温暖化係数と主な排出源を表1、温室効果ガスの地球温暖化への寄与度を図2に示す。CO₂は温暖化係数が最も小さく、他の物質に比べて温室効果の程度は低いが、化石燃料の燃焼などに伴う排出量が膨大であるため、地球温暖化への寄与度が最も高いとされている^[1]。

表1. 温室効果ガスの温暖化係数と主な排出源

温室効果ガス	温暖化係数	主な排出源
二酸化炭素	1	化石燃料の燃焼
メタン	23	廃棄物の埋め立て
一酸化二窒素	296	燃料の燃焼、工業プロセス
フロン	数百~1万	冷媒、半導体の洗浄
六フッ化硫黄	22200	電気の絶縁体

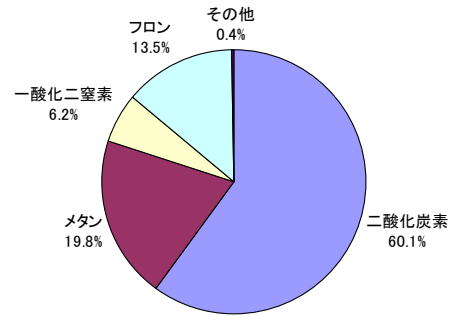


図2. 温室効果ガスの地球温暖化への寄与度

3.2 世界のエネルギー需要

世界の地域別エネルギー需要の推移を図3、世界の燃料別エネルギー需要の推移を図4に示す。

今後、世界のエネルギー需要は、経済成長に伴い増加し、2030年には152.7億トン(2000年比で66%増)に達すると予測されている^[2]。地域別に見ると、アジア地域のエネルギー需要の増大が予測されており、2000~2030年の年平均増加率は先進国の1.0%に対し、アジアを中心とする発展途上国では2.9%と約3倍の増加率が見込まれている。

また、エネルギー源別では、再生可能エネルギーやCO₂排出量が少ない天然ガスの需要増加が見込まれるが、石炭や石油などの割合も大きく、エネルギー需要の増加に伴いCO₂の年間排出量は確実に増加すると考えられる。

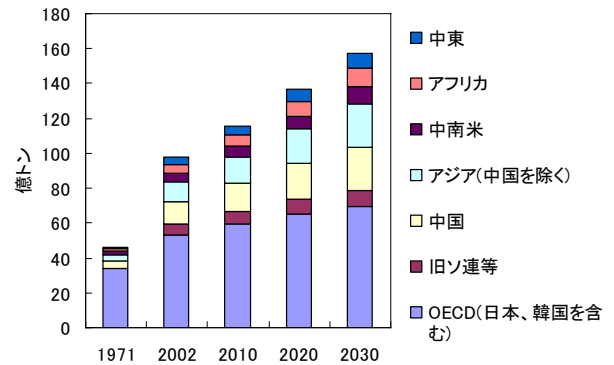


図3. 世界の地域別エネルギー需要の推移

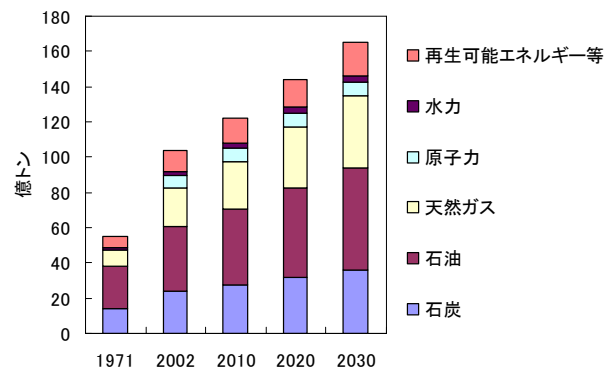


図4. 世界の燃料別エネルギー需要の推移

3.3 エネルギー消費に伴うCO₂の排出

3.3.1 エネルギー消費量の分析

本研究では、国連の予測^[3]に基づき将来の人口が100億人で飽和すると仮定した上で、世界の一人当たりのエネルギー消費量について次の2つのシナリオを設定し、2100年までのエネルギー消費量の分析を行った。ただし、2030年まではIEA(International Energy Agency：国際エネルギー機関)による予測値を適用し^[2]、2030年以降からシナリオを適用している。

シナリオAは先進国と発展途上国間の現状における経済格差を残して各国が発展した場合、シナリオBは先進国と発展途上国間の経済格差が解消され、日本型の省エネ社会を目指して各国が発展した場合を想定している。

シナリオA：

- ・ 2100年における一人当たりのエネルギー消費量が3.0[トン/人]

シナリオB：

- ・ 2100年における一人当たりのエネルギー消費量が4.1[トン/人]

途中の増加過程は直線的であるとし、2つのシナリオについて、次の関係式から年間総エネルギー消費量を算出する。

$$E(t) = e(t) \times p(t)$$

$E(t)$ ： t 年におけるエネルギー消費量[億トン]

$e(t)$ ： t 年における一人当たりのエネルギー消費量[トン/人]

$p(t)$ ： t 年における世界人口[億人]

年間総エネルギー消費量の推移を図5に示す。2100年において、シナリオAでは現在の約3倍、シナリオBでは約4倍のエネルギー消費が予測される。しかし、これらのシナリオは比較的低水準のエネルギー消費を想定しているため、人口増加や経済成長に伴い、より多くのエネルギーを消費する場合も十分に考えられる。

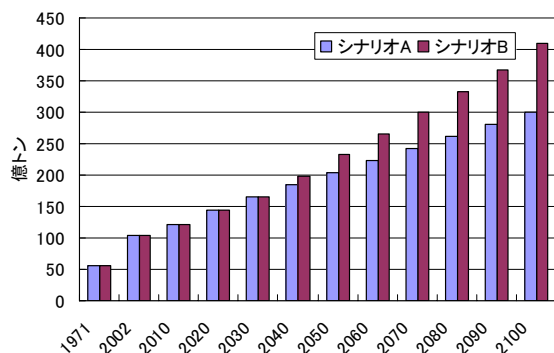


図5. 年間総エネルギー消費量の推移

3.3.2 CO₂排出量の分析

エネルギー需要の大半を占め、CO₂発生の主要因とされている石炭、石油、天然ガスによるCO₂排出量の分析を行った。

- (1) 年間総エネルギー消費量から各エネルギーの消費量を算出する。ここで、石炭、石油、天然ガスの構成比率は、2030年次の水準で推移すると仮定し、それぞれを全体の22%、35%、25%とする。

$$E_{C,o,G}(t) = R_{C,o,G}(t) \times E(t)$$

$E_{C,o,G}(t)$ ：各エネルギーの消費量[億トン]

$R_{C,o,G}(t)$ ：全エネルギーに対する各エネルギーの構成比率

$E(t)$ ： t 年におけるエネルギー消費量[億トン]

- (2) 各エネルギーの消費量とCO₂排出原単位から、CO₂排出量を算出する。CO₂排出原単位は石炭1.08、石油0.86、天然ガス0.62[tC/トン]とする^[4]。

$$A_{C,o,G}(t) = \alpha_{C,o,G} \times E_{C,o,G}(t)$$

$A_{C,o,G}(t)$ ：CO₂排出量[億tC]

$\alpha_{C,o,G}(t)$ ：CO₂排出原単位[tC/トン]

$E_{C,o,G}(t)$ ：各エネルギーの消費量[億トン]

- 2つのシナリオについて、石炭、石油、天然ガスの消費に伴うCO₂排出量の推移を図6に示す。

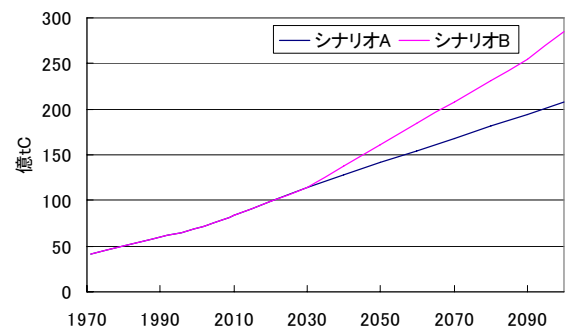


図6. CO₂排出量の推移

4. 気温上昇の予測

4.1 MAGICCについて

MAGICC(Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change)は、IPCCにおいても使用されている気候モデルの一種である。MAGICCモデルの概要を図7に示す。MAGICCモデルは、各物質により発生する放射強制力から、入力されたシナリオ下でのエネルギーバランス気候モデルを予測し、平均気温上昇値と海面上昇値を算出する。

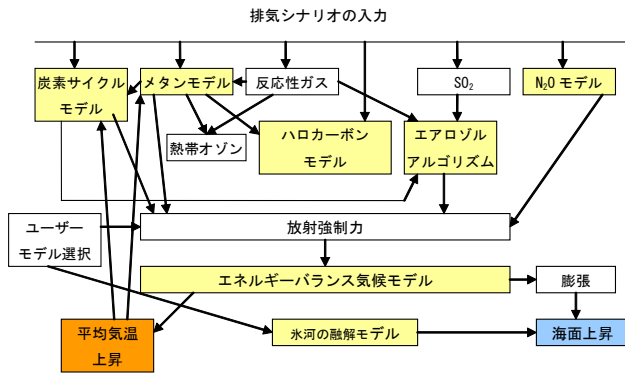


図 7. MAGICC モデルの概要

4.2 大気中のCO₂濃度の推移

作成した両シナリオ下におけるCO₂排出量に対して、MAGICCモデルを適用し、CO₂濃度の推移を予測した。大気中のCO₂濃度の推移を図 8 に示す。

両シナリオ下でのCO₂濃度は曲線を描いて上昇し、2100年には、

- ・シナリオ A・・・約 720[ppmv]
- ・シナリオ B・・・約 810[ppmv]

となり、約 90[ppmv]の差が生じる。すなわち、シナリオAに対し、シナリオBでは 1[m³]当たりの体積に対するCO₂が 90[cm³]増加することを示している。

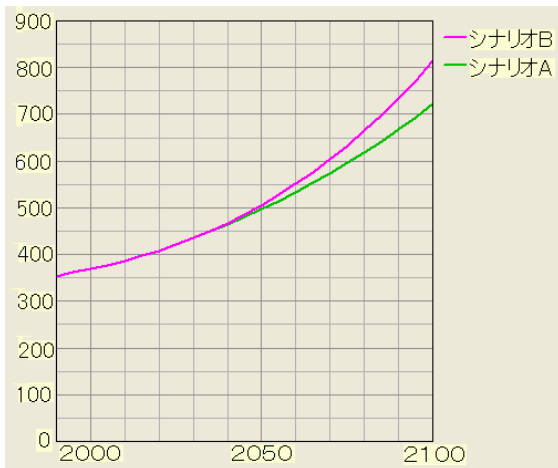


図 8. CO₂濃度の推移

4.3 気温上昇の推移

CO₂濃度の上昇により、放射強制力が引き起こされることで気温が上昇する。そこで、CO₂濃度の推移から気温上昇に対する予測を行った。気温上昇の推移を図 9 に示す。

2040 年以降、次第に差が生じ始め、2100 年には、

- ・シナリオ A・・・約 2.2[°C]
- ・シナリオ B・・・約 2.5[°C]

となり、両シナリオ間では約 0.3[°C]の差が生じる。

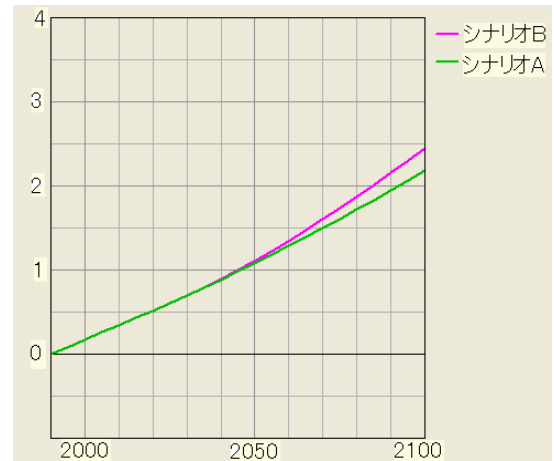


図 9. 気温上昇の推移

4.4 海面上昇の推移

両シナリオにおいて、気温の上昇に伴う海面上昇の予測を行った。海面上昇の推移を図 10 に示す。

2060 年までは、ほぼ同水準の値を示すが、それ以降は気温上昇の影響から、両シナリオ間の上昇値に差異が生じ始め、2100 年では、

- ・シナリオ A・・・約 32[cm]
- ・シナリオ B・・・約 34[cm]

と異なる値を示した。

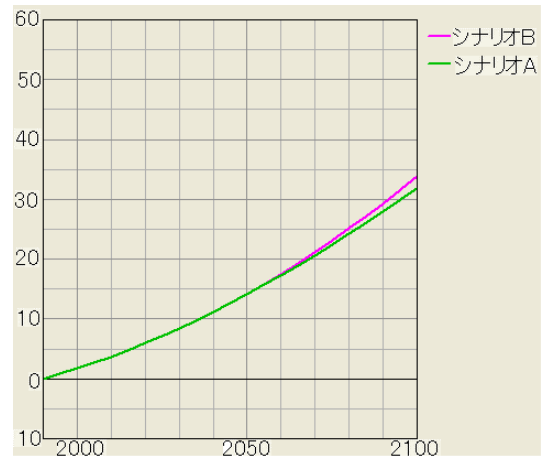


図 10. 海面上昇の推移

5. 温暖化の影響

温暖化の主な影響として、海面上昇、冷夏や大雨などの異常気象、干ばつや雪崩などの自然災害、伝染病の流行など人間の健康に対する被害が挙げられる^[1]。温暖化に伴う異常気象を表 2、自然・社会への影響を表 3 に示す。

また、エルニーニョ現象やハリケーンによる被害の増大、中緯度地域の暴風雨の増加など局所的な被害も予測されている。しかし、高緯度地域で

は、永久凍土の劣化により耕作可能な地域が増加するなど有益な影響も考えられる。このように温暖化の影響は不利益なものばかりでなく、有益な影響を生じる場合もある。

しかし、温暖化の進行に伴い、これらの影響がどれ程の規模で、どのような時期に生じるかは明らかにされていない。

表 2. 温暖化に伴う異常気象

予測される異常気象	主な影響
最高気温の上昇，熱波の増加	<ul style="list-style-type: none"> ・高齢者や貧困者の病気や死亡の増加 ・保養地，観光地の変容 ・農作物被害の増大 ・冷房による電力需要の増大
降水量の増大	<ul style="list-style-type: none"> ・洪水，地すべり，雪崩，泥流の増加 ・洪水流量の増加と灌漑への影響 ・土壌浸食の増加
夏季の乾燥と干ばつリスクの増大	<ul style="list-style-type: none"> ・農作物生産の減少 ・水資源量の減少と水質の低下 ・森林における火災リスクの増加

表 3. 温暖化に伴う自然・社会への影響

自然・社会への影響	予測される影響事例
陸上および淡水生態系（気温の上昇，土壌水分の変化）	<ul style="list-style-type: none"> ・植生変化が野生生物の分布，数，密度，行動に大きな影響を与える ・冷水性魚類の生息地を縮小させ，暖水性魚類の生息地を拡大する
沿岸域と海洋生態系（海面推移の上昇，海水面積の減少，塩分・波浪条件・海洋循環の変化）	<ul style="list-style-type: none"> ・魚の種類が変わり，漁獲量も変化する ・多くの沿岸部で洪水被害，浸食の加速化，淡水源への海水浸入が起こる
人間の健康（大気汚染の影響，季節的な気候変動による伝染病への影響）	<ul style="list-style-type: none"> ・伝染病の発生数が増え，季節での発生期間が長くなる ・熱波による湿度上昇と大気汚染が都市環境を悪化させる

6. まとめ

本研究では、エネルギー消費に伴い排出されるCO₂による温室効果の分析を行い、2100年では気温が約2.0～2.5[°C]上昇することを示した。IPCCによると、2100年の気温上昇値は1.3～5.8[°C]で推移するとされており^[4]、2100年における約2.0～2.5[°C]の気温上昇は十分に起こりうる現象であると考えられる。

シナリオ A では2100年に約2.2[°C]の気温上昇が予測されたが、シナリオ B では2090年に同水準まで達する。つまり、2100年前後の気温について、両シナリオ間で温暖化の進行度に10年の差が生じていることを示している。

現代においてエネルギーの消費を中止し、温暖化を防止するのは事実上不可能であり、温暖化は確実に進行すると考えられる。しかし、本研究で示したようにエネルギー消費量を抑制することで、温暖化の進行を遅延させることができる。そのため、実現が困難な温暖化の防止だけでなく、温暖化を抑制し、さらに温暖化後の対策を立てることが重要となる。

参考文献

- [1] IPCC : CLIMATE CHANGE 2001, 2001.
- [2] IEA : WORLD ENERGY OUTLOOK, 2004.
- [3] United Nations Population Division
: <http://esa.un.org/unpp/>.
- [4] 澤田玲真：化石燃料の枯渇と大気二酸化炭素濃度に関する長期シミュレーション分析, 1999.