

気候安定化と21世紀中の温室効果ガス排出量の関わりについて

松岡 譲¹・川口 洋平²

¹正会員 工博 京都大学大学院工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²京都大学大学院工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

気候変動を抑制し安定化を達成するには温室効果ガス排出の大幅な抑制が必須である。この論文では、今後の数百年を対象として、気候安定化に到達する温室効果ガス排出経路を探索し、それらの21世紀中の経路範囲はどのようなものかを明らかにした。可能な排出量変化速度を 0.15 GtCy^{-2} 以下とする時、23世紀中に 450 ppmv 安定化を行うには1990年から2050年の累積排出量を 867 GtC 以下、2100年まででは累積排出量を 1389 GtC 以下にする必要がある。また、 1.5°C 安定化目標では2050年までの累積排出量を 918 GtC 以下、2100年まででは 1739 GtC 以下とする必要がある。

Key words: Climate change, Stabilization target, Emission scenario

1. 研究の目的と主要な結果

気候変動を抑制し安定化を達成するには温室効果ガス排出の大幅な抑制が必須であるが¹、現在見込まれている温室効果ガスの排出及びその削減見通しと、気候安定化の目標がいかに結びつくかに関しては、必ずしも十分な検討が行われたわけではなかった。現状の延長としての将来社会、あるいは社会的、技術的可能性としての将来社会が、どの程度のエネルギーを消費しその帰結として温室効果ガス排出がどのように増減していくかの検討は精力的に行われている。その結果として、21世紀中の排出量範囲に関する一定のコンセンサスが形成されつつあるが²、それらの気候変動あるいは気候安定化から見た意義は明らかではない。こうした観点から、本研究では、近年報告されている温室効果ガス排出シナリオを中心に、それらと気候モデルを組み合わせることによって、21世紀における気候変動の見通しを得る。さらに、その延長として、今後の数百年を対象として、気候安定化に到達する温室効果ガス排出経路を探索し、それらの21世紀中の経路範囲はどのようなものかを明らかにした。

すなわち、現在までに報告・公表されている259種の温室効果ガス排出シナリオに基づき21世紀中の地球平均気温及び海水位の変化量推計を行い、21世紀末にて1990年を基準として気温上昇で $0.9^\circ\text{C}\sim 4.6^\circ\text{C}$ (中位値: 2.4°C)、海面上昇で $29.7\text{cm}\sim 73.2\text{cm}$ (中位値: 48.0cm)を得た。地球温暖化抑制の目的は、こうした変化を抑え何れかのレベルで安定化することであり、その指標としては、大気中の温室効果ガス濃度、気温あるいは海水位などが挙げられている。これらのことから本論文では23世紀以降にて温室効果ガス濃度、気温あるいは海面上昇速度の安定化目標をそれぞれ $450 \text{ ppmv}\sim 750 \text{ ppmv}$ 、

$1.5^\circ\text{C}\sim 4^\circ\text{C}$ あるいは $0\sim 0.2 \text{ cm y}^{-1}$ とするときの排出経路を探索した。この経路は、2100年までは公表されている排出シナリオに従い、その後100年以上の準備期間の後、目標値に留まることが可能となる温室効果ガス排出量の時系列である。可能な排出量変化速度及び最小排出量の範囲によって排出経路範囲は変化するが、例えば前者を 0.15 GtCy^{-2} 以下とすれば、23世紀中の 450 ppmv 安定化目標は1990年から2050年の累積排出量が 867 GtC 以下、2100年では累積排出量が 1389 GtC 以下の経路で到達でき、 1.5°C 安定化目標では2050年での累積排出量は 918 GtC 以下、2100年では 1739 GtC 以下であった。また23世紀中の海水位安定化は、 450 ppmv 安定化と同程度の削減が必要であり、現在までに提案されている政策介入シナリオの大部分はこれを満足できないことが明らかとなった。

2. 排出シナリオ

気候変動の将来見通しを得るには、人口、経済、エネルギー、排出規制など関連する要因の整合性がとれた仮定に基づく排出量推計が必要となる。こうした温室効果ガス(GHG)排出シナリオについては、最近、IPCCの排出シナリオ特別報告書策定作業グループ³⁾により詳細な解析が行われ、既存の排出シナリオ報告の収集・体系化⁴⁾、それらに基づく4つのシナリオ(SRESシナリオ)の策定が行われつつある。本研究では、これらの活動で収集・整理された排出シナリオのうち、全世界を対象とし2100年頃までの推計が行われている排出シナリオを対象とする。これらは、対象とするガス種や算定の基準年、その年の排出量及び排出量推計年が異なっており、それらを横断して取り扱う場合には調整が必要となる。本計算に

表-1 排出シナリオの諸統計

全シナリオ(シナリオ数:259)						介入シナリオ(シナリオ数:89)					非介入シナリオ(シナリオ数:123)				
年	中位値	最小値	25%値	75%値	最大値	中位値	最小値	25%値	75%値	最大値	中位値	最小値	25%値	75%値	最大値
CO ₂ 排出量、GtC y ⁻¹															
1990	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
2050	12.1	2.0	9.2	15.2	36.3	9.5	2.8	6.1	11.0	18.0	14.4	3.0	12.0	16.3	36.3
2100	17.6	-1.1	6.6	23.0	57.2	6.8	-1.1	5.6	17.5	28.1	21.9	0.6	16.1	28.1	57.2
CH ₄ 排出量、TgCH ₄ y ⁻¹															
1990	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0	572.0
2050	789.0	653.4	695.0	872.0	1002.9	695.0	653.4	695.0	789.0	872.0	872.0	693.9	765.0	872.0	1002.9
2100	759.0	552.0	630.0	1164.0	1322.1	630.0	552.0	630.0	759.0	1164.0	1037.4	552.0	630.0	1164.0	1322.1
N ₂ O排出量、TgN y ⁻¹															
1990	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5
2050	19.1	16.2	17.0	22.0	24.3	19.1	16.2	19.1	19.1	22.2	21.3	16.2	17.0	22.0	24.3
2100	18.2	15.1	15.3	26.6	28.0	18.2	15.1	18.2	18.2	26.6	22.5	15.1	15.3	26.6	28.0
SO ₂ 排出量、TgS y ⁻¹															
1990	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6
2050	57.2	27.0	51.4	105.4	200.6	51.4	27.0	51.4	57.2	105.4	102.6	51.4	64.3	105.4	200.6
2100	47.3	6.0	28.6	60.3	278.1	28.6	6.0	28.6	47.3	72.6	60.3	11.5	28.6	60.3	278.1
CO ₂ 濃度、ppmv															
1990	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9	354.9
2050	486.1	408.4	461.1	507.6	663.0	464.5	410.7	431.4	474.4	527.4	498.9	408.4	481.0	515.5	663.0
2100	638.6	377.1	524.6	731.0	1452.8	526.7	377.1	469.1	623.6	814.7	709.6	413.4	644.3	788.1	1452.8
CH ₄ 濃度、ppbv															
1990	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0	1694.0
2050	2668.1	2205.3	2247.1	2855.7	3498.1	2247.1	2205.3	2247.1	2668.1	2937.7	2855.7	2247.1	2668.1	2855.7	3498.1
2100	2707.4	1876.2	2210.9	4308.4	5100.8	2210.9	1876.2	2210.9	2707.4	4308.4	3872.9	1911.0	2210.9	4308.4	5100.8
N ₂ O濃度、ppbv															
1990	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0	310.0
2050	366.1	353.9	358.8	380.8	396.3	366.1	353.9	366.1	366.1	388.3	379.8	353.9	358.8	380.8	396.3
2100	400.6	366.3	371.4	459.6	485.8	400.6	366.3	400.6	400.6	459.6	435.1	366.3	371.4	459.6	485.8
気温上昇、°C															
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2050	1.3	0.9	1.2	1.4	1.8	1.2	0.9	1.1	1.3	1.5	1.3	0.9	1.2	1.4	1.8
2100	2.4	0.9	2.0	2.9	4.6	2.0	0.9	1.7	2.4	3.2	2.7	1.4	2.4	3.1	4.6
海水位上昇、cm															
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2050	22.8	19.4	21.8	23.4	28.3	22.8	19.4	21.4	23.2	24.8	22.4	19.5	21.7	23.3	28.3
2100	48.0	29.7	43.6	52.4	73.2	43.7	29.7	39.8	47.3	56.5	51.3	35.3	47.4	54.8	73.2
放射強制力、Wm ⁻²															
1990	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
2050	3.8	2.8	3.6	4.1	5.3	3.7	2.8	3.4	3.8	4.3	3.9	3.0	3.7	4.1	5.3
2100	6.0	2.5	4.8	7.3	11.0	4.9	2.5	4.3	5.8	8.0	6.5	3.6	6.0	7.7	11.0
累積CO ₂ 排出量、GtC															
1990	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2050	626.8	371.0	548.4	698.9	1175.5	556.3	375.8	447.9	590.2	764.0	668.8	371.0	612.4	722.8	1175.5
2100	1326.5	385.5	976.9	1638.1	3626.3	980.0	385.5	736.4	1295.9	1901.8	1554.5	517.5	1366.6	1821.5	3626.3

においては以下に示す方法でこれを行った。

1. 排出量入力年は、1990年をスタートとし5年間隔で2100年までの23時点とし、公表されている排出シナリオデータから幾何的内挿(対数値の線形内挿)によって算出した。与えられている排出量の何れかが負の場合は線形内挿とした。
2. 入力排出量は、全世界を対象とした1)人為起源のCO₂排出量、2)全起源(人為起源+自然起源)のCH₄及びN₂O排出量、3)ハロカーボン類26種の排出量、4)人為起源SO₂排出量である。多くのシナリオでは、これらすべては与えられていない。その場合には次の手順により補完した。1)化石燃料・産業起源あるいは人為起源のCO₂排出量が1990年以前から2095年に降にわたりと与えられているシナリオのみを対象とする。2100年の排出量と与えられていない場合は、最終年排出量と同一値とした。
- 2)土地利用変化起源のCO₂排出量、CH₄排出量、N₂O排出量あるいは人為起源SO₂排出量のいずれかが欠けるシ

- ナリオの場合は、欠けているガス種排出量についてSRESの四マーカーシナリオ³⁾のうち、人為起源CO₂排出量あるいは化石燃料・産業起源CO₂排出量の1990年～2100年中の排出総量をもっとも近い値となるシナリオによって補完した。また、ハロカーボン類については、シナリオで排出量が与えられている場合もWMO98A1シナリオ³⁾及びSRESシナリオ排出量³⁾(HFC、PFC及びSF6など13種)で代替した。
3. CH₄、N₂OあるいはSO₂の自然起源排出量と与えられていない場合は、それぞれ251TgCH₄y⁻¹、10.2TgNy⁻¹及び36.5TgSy⁻¹とし、この値が継続すると仮定した。
 4. 1990年排出量をシナリオ間で同一にするため、次式(1)の基準化を行った。

$$E(t) = E_{\text{scenario}}(t) \cdot \frac{E_{1990}}{E_{\text{scenario}}(1990)} \quad (1)$$

ここにE(t)は年tの入力排出量、E_{scenario}(t)はシナリオで与

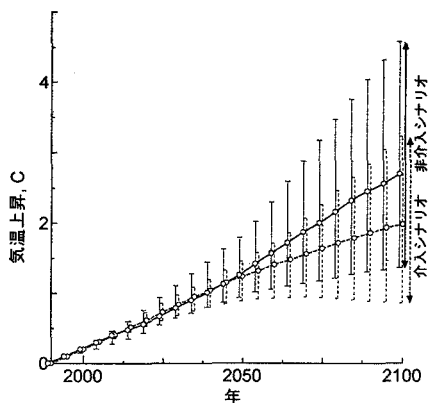


図-1 気温の変化

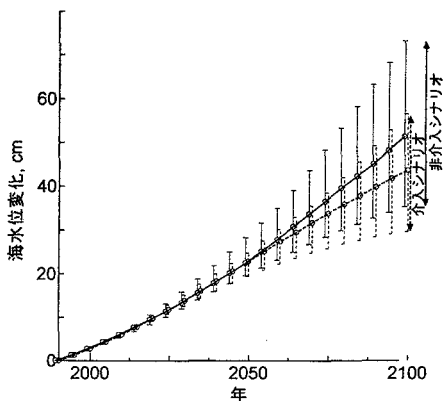


図-2 海水位の変化

えられた排出量, E_{1990} は 1990 年での基準排出量であり, CO_2 で 7.3 GtCy^{-1} , CH_4 で $573 \text{ TgCH}_4\text{y}^{-1}$ (内自然起源が $251 \text{ TgCH}_4\text{y}^{-1}$), N_2O で 16.5 TgNy^{-1} (内自然起源が 10.2 TgNy^{-1}), 人為起源 SO_2 で 72.6 TgSy^{-1} とした。

SRES シナリオデータベース⁴⁾に以上の操作によるスクリーニングを行った結果, 計算対象となったシナリオは 259 ケース (政策介入ケース: 89, 政策非介入ケース: 123, その他ケース: 77) であった。これらに関し, 上記の補完を行い計算入力としたものの諸統計を表 1 に一覧する。2100 年時点にて CO_2 排出量は $1.1 \sim 57.2 \text{ GtCy}^{-1}$ と 1990 年の $0.15 \sim 7.8$ 倍 (中位値: 2.4 倍) になった。これは同じデータベースを用いて解析を行った Nakicenovic ら⁶⁾の結果である $0.16 \sim 9.1$ 倍 (中位値: 2.6 倍) と異なるが, 彼らの解析は全シナリオ対象であること, 本解析は上記の基準化を行っており, 特に土地利用変化起源の排出量の補完を行っていることなどの違いによるものと考えられる。

3. 1990 年～2100 年の気候変動

上記の 259 ケースについて, 著者らが開発した気候変動簡易推計モデル⁷⁾を用い, 1990 年～2100 年における気温, 海水位を算出した。モデル計算にあたっては中位的な推計値を出力するパラメーター標準値を使用した。気温上昇は, 全シナリオにて 2100 年時点で $0.9 \sim 4.6^\circ\text{C}$ (中位値: 2.4°C), 海面上昇は $29.7 \sim 73.2 \text{ cm}$ (中位値: 48.0 cm) であった。政策介入ケースではこの範囲が下方側に絞られ, 気温上昇で $0.9 \sim 3.2^\circ\text{C}$ (中位値: 2.0°C), 海面上昇で $29.7 \sim 56.5 \text{ cm}$ (中位値: 43.7 cm) となっている (表 1)。図 1 及び図 2 はこれらの変化を図示したものである。

4. 気候安定化への道筋

図 1, 2 をみてもわかるように, 多くのシナリオで 21

世紀中に気候は安定化しない。大半のシナリオで正の大きい変化速度を有しており, これらのシナリオを前提にする限り 22 世紀以降の温室効果ガス削減が重要となってくる。2100 年以降の排出量に関しては研究もほとんどなく, また現時点において 100 年以上先の将来を一定の確信性をもつ推測を行うことはほとんど不可能と考えられるが, 一方, 気候安定化の面から検討するならば, 排出シナリオの取り得なければならない範囲を限定することは可能であろう。すなわち, 大気濃度, 気温あるいは海水位変化量などの気候変動パラメーターを規定しその条件に当てはまる排出経路を探索してみる。その際, 21 世紀中については 2 で説明した既往の研究による排出シナリオを使用し, それ以降はそれまでの排出傾向を大きく変えない範囲で目標気候変動パラメーター値に漸近するように排出シナリオを外挿する。

(1) 排出シナリオの外挿方法

以下の方法で排出シナリオを将来に外挿する。与えられた排出シナリオの最終年 T_0 以降について, 人為起源の温室効果ガス排出量 $E(t)$ は T_0 年でのガス間の排出量比率を保ち変化すると仮定する。さらにその排出量に基づいて算定される大気濃度, 気温あるいは海水位など (以下, $Y(t)$ で表す) は期間 $[T_1, T_2]$ にて目標値 Y_{target} に下式の意味で近接するもの考える。

$$\Phi_0(E) = \int_{T_1}^{T_2} (Y(t) - Y_{\text{target}})^2 dt \rightarrow \text{minimum} \quad (2)$$

ここで, 排出量 $E(t)$ は期間 $[T_0, T_2]$ 内の n 個の節点 (t_0, E_0), (t_1, E_1), ..., (t_{n-1}, E_{n-1}) を通過し, なるべく変化が小さい関数とする。この条件を次式 (3) で表現する。

$$\Phi_1(E) = \int_{T_0}^{T_2} \left[\left(\frac{dY}{dt} \right)^2 + \sigma^2 \left(\frac{d^2Y}{dt^2} \right)^2 \right] dt \rightarrow \text{minimum} \quad (3)$$

ここに σ (≥ 0) は $[Y]$ の次元を持つ係数である。さらに, $E(t)$ は時刻 T_0 (=2100 年) にて排出シナリオと滑らかに接

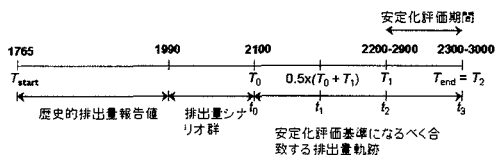


図-3 外挿, 安定化評価期間の概念

続すると仮定する.

$$E(T_0) = E_{\text{scenario}}(T_0) \quad , \quad \frac{dE(t)}{dt} \Big|_{t=T_0} = \frac{dE_{\text{scenario}}(t)}{dt} \Big|_{t=T_0} \quad (4)$$

ここに $E_{\text{scenario}}(t)$ ($t \leq T_0$) は排出シナリオにもとづく排出量である. また, 安定化の評価期間の右端 ($= T_2$) 以降にて期間 $[T_1, T_2]$ での変化傾向の持続を期待し次の条件を課す.

$$\frac{dE(t)}{dt} \Big|_{t=T_2} = \text{安定化期間内の平均排出量変化率} = \frac{[E(t)]_{t=T_1}^{t=T_2}}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

左端の節点 (t_0, E_0) を外挿曲線の左端 T_0 に取ることとする

$$t_0 = T_0 \quad \text{及び} \quad E_0 = E_{\text{scenario}}(T_0) \quad (6)$$

となる. 外挿期間の右端と安定化評価期間の右端を一致させると $T_2 = t_{n-1}$ となる. 特に理由のない限り, 外挿曲線を規定する点数 n はなるべく小さいことが望ましい. しかしに (T_0, T_2) 内に少なくとも 2 点以上設置しないと安定化評価指標である式(2)を満足に操作できない. これらの理由から端の 2 点を含め $n=4$ とし, 区間内部に取る 2 点のうち 1 点は安定化評価期間の左端 T_1 に, もう 1 点は T_0 と T_2 の中点に置くこととした. また, 安定化評価期間は 2100 年以降, 100 年以上の準備期間を経た後の 100 年間とし, 特に本論文ではその内で最も近々の期間である $T_1=2200, T_2=2300$ の場合を取り上げた. T_1, T_2 をより長期に取った場合の解析については Matsuoka⁸⁾ を参照されたい. 図 3 に外挿及び安定化評価期間の概念を図示する.

式(3)中の σ は $E(t)$ の滑らかさを制御するパラメーターである. σ が大きいときには滑らかさが増大するが, 区分点付近での行き過ぎが起りやすくなる. σ が小さくなれば, 区分点での曲率が大きくなる. いずれも排出シナリオとして望ましくない. 21 世紀中の排出量が大きく, 強い加熱効果が与えられている場合には, 目標値の大小及び準備期間の長短によっては, 温室効果ガスの純吸収を行う必要が生ずるが, その吸収期間及び吸収量の程度は上記のオーバーシュートの程度に左右されるところが大きい. どの程度の σ 値が妥当であるか検討を行ったところ, σ 値の大小により排出量軌跡は変化するが, その程度は $\sigma=0.01 \sim \infty$ 程度の範囲においては大きいものではなく, 本研究では $\sigma=0.33$ を標準値としている.

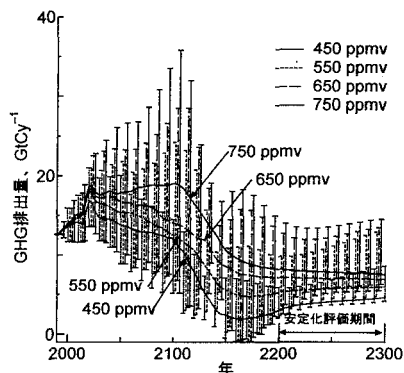


図-4 濃度安定化を目標とする排出経路

気候安定化の目標としては, 温室効果ガス濃度, 気温上昇量, あるいは海面上昇速度とし, それらのいずれかが 2200 年以降に設定された 100 年の安定化評価期間中目標値付近で留まるような排出経路を算出した. 温室効果ガス(GHG)の濃度及び排出量は $\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$ 及びハロカーボン類の効果を一括するため, 次式で示す等価的表現を採用する.

$$C_{\text{GHG}}(t) = \text{CO}_{2,0} 2^{\left\{ \sum_{i=\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}, \text{HC}} \frac{\overline{\Delta Q_i(t)}}{Q_{2x}} \right\}}, \quad E_{\text{GHG}}(t) = \sum_{i=\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}, \text{HC}} E_i \cdot \text{GWP}_{100,i} \quad (7)$$

ここに, $\overline{\Delta Q_i(t)}$ は温室効果ガス i による全球平均放射強制力, Q_{2x} 及び $\text{CO}_{2,0}$ はそれぞれ CO_2 濃度 2 倍時の放射強制力 (3.0776 Wm^{-2}) 及び CO_2 濃度基準値 (278 ppmv) であり, $\text{GWP}_{100,i}$ は温室効果ガス i の 100 年 GWP (地球温暖化係数) 値で, CH_4 では 24, N_2O では 360 などの値を使用した. 式(2)の求解はシンプレックス法⁹⁾を使用した. 気候計算は 1765 年を開始点とし 2100 年までは松岡・川口⁷⁾で述べた歴史的排出量及び SRES データベース排出シナリオに基づいて行い, 以後は本論文の方法で外挿される排出量を用いた. さらに, 以上に述べた方法で外挿を行った結果, 1) 経路途中にて過大な負値 (標準値: -1.0 GtCyr^{-1}) となったり, 2) 計算手法が想定する範囲外の濃度値 (負, あるいは CO_2 濃度が 1320 ppmv 以上) となる場合, 3) 安定化評価期間中の目標値からの乖離が一定幅 (濃度目標: $\pm 10 \text{ ppmv}$, 気温目標: $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 海水位変化速度目標: $\pm 0.001 \text{ cm yr}^{-1}$) を超えた場合は可能排出経路から排除した.

図 4 は 2200 年～2300 年を安定化評価期間とし, GHG 濃度 450～750 ppmv を目標として排出シナリオを外挿した場合に可能排出経路となるものの範囲を示したものである. 図中のヒゲ付き鉛直線は, 上ヒゲによって可能経路の最大値位置を, 下ヒゲによって最小値位置を示したものであり, 点線, 破線, 鎖線及び実線はそれぞれ 450, 550, 650 及び 750 ppmv 目標の別を示したものである. また, 4 本の曲線は中位値(メディアン)の軌跡を描いたものである. また, 4 本の曲線は中位値(メディアン)の軌跡を描い

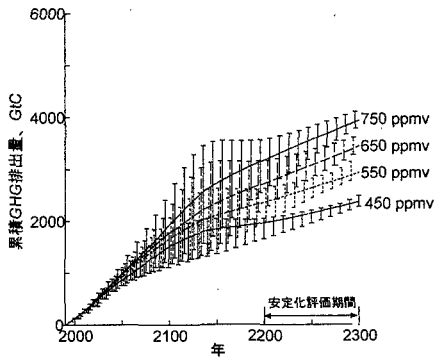


図-5 濃度安定化を目標とする排出経路の累積排出量

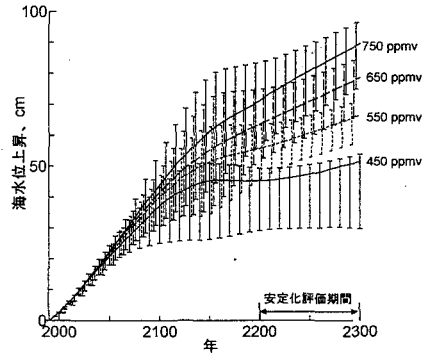


図-7 濃度安定化を目標とする時の海水位変化の軌跡

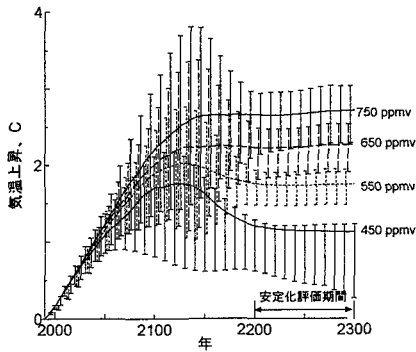


図-6 濃度安定化を目標とする時の気温変化の軌跡

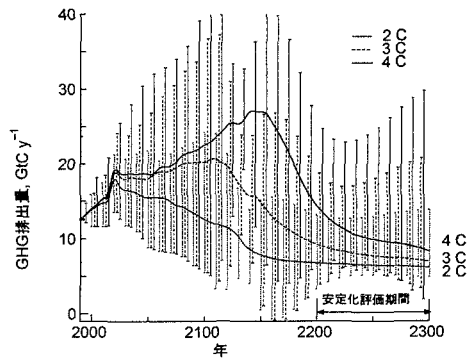


図-8 気温安定化を目標とする排出経路

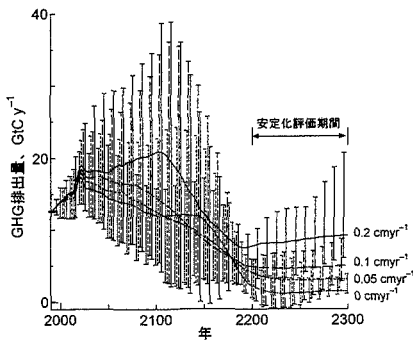


図-9 海水位上昇速度安定化を目標とする排出経路

たものである。450 ppmv 目標の場合、1990 年時点に 13 GtC y^{-1} 程度あった排出量は、その後若干の増加はあるものの、中位値は 2070 年頃、最大値では 2100 年頃に 1990 年排出レベルにまで戻り、22 世紀には急速な削減レートをとる。その傾向は 22 世紀半ばまで続くが、その後、23 世紀には 2～8 GtC y^{-1} の範囲の漸増的軌跡をたどる。

目標濃度を上げていった場合は最大、中位及び最小排出量はいずれも増大する。その分離は 2020 年頃から顕著となる。図 4 に見られる目標濃度と排出量の関連性は、これを累積排出量で表現するとより明瞭になり、図 5 のように分離してくることが判る。一方、こうした GHG 濃度を安定化目標とする軌跡はどのような気温、海水位上昇をもたらすか。図 6、7 はその様子を示したものである。気温については 450 ppmv 目標で 1°C、550 ppmv で 2°C、650 ppmv で 2.5°C、750 ppmv で 3.0°C 付近の上昇値が得られており、海水位については 550 ppmv～750 ppmv 目標の場合 2200 年時点で 50～70 cm、2300 年にて 55～90 cm の上昇量となる。気温上昇でいったん上昇した後、下降する軌跡が見られるが、これは例えば後述するような 0.15 GtC y^{-2} などの排出量変化速度制限を課したときにはほとんど生じなくなる。以上は、GHG 濃度を目標として与えた場合であったが、気温上昇量あるいは海水位上昇速度を目標値として与えた場合はどのようなになるか。図 8、9 はそれらの状況を示したものであり、GHG 目標と類似の挙動を示す。

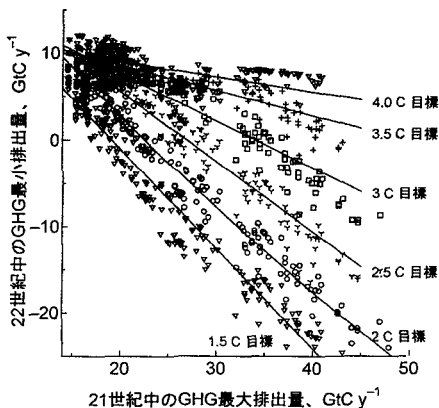


図-10 21世紀中のGHG最大排出量と22世紀中のGHG最小排出量の関係

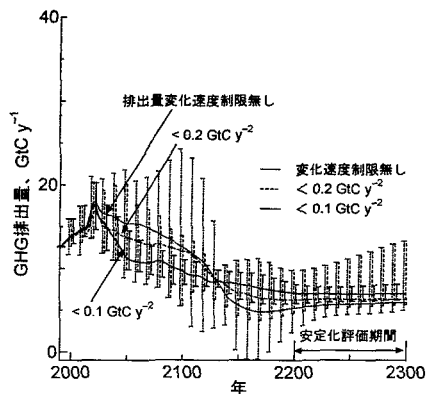


図-11 排出経路の排出量変化速度制限に対する依存性、550ppmv目標の場合

(2) 安定化目標及び排出シナリオの制約条件と排出量の中間目標値

図4に示した目標濃度を一定とする排出量軌跡群は、(1)で述べた排除基準では排除されなかった軌跡の集合である。しかし、こうした排除基準が将来排出シナリオの実現可能性にどの程度関連しているかは不明な点も多々ある。次の二点はその代表的なものである。その一は上述の基準ではGHG排出量最小値を -1 GtC y^{-1} としている。こうしたGHGの純吸収の仮定はどの程度現実性を持つか。その二は排出量変化速度に関する制約である。排出量変化はエネルギーシステム及び土地利用の改変を余儀なくするが、その可能範囲はどの程度か。以下、これらの検討を行ってみる。

a) GHG排出量の許容最小値

SRESシナリオA1では2100年の土地利用起源排出量を -0.6 GtC y^{-1} とし、WorldScan Ecosystemシナリオでは2100年のバイオマスファームの積極的活用を含めたエネルギー生産・消費関連の排出量を -0.43 GtC y^{-1} と算定している。また CO_2 の海洋・地下貯蔵などによる数 GtC y^{-1} 程度の吸収可能性も考える必要があるかもしれない。許容最小値を制限するにつれ2100年頃に発現する最大排出量は顕著に減少する。図10は23世紀に気温安定化する排出量軌跡の、21世紀中のGHG最大排出量と22世紀中のGHG最小排出量の関係を描いたものであり、上に述べた関係が明瞭に現れている。例えば、この図から 2°C 安定化を吸収なし（最小排出量 ≥ 0 、人為起源排出量としては自然起源排出量をオフセットする排出量である -3.3 GtC y^{-1} 以上）で実現する軌跡は、21世紀中の最大排出量が 23 GtC y^{-1} 以下であることがわかる。

b) 排出量変化速度の制限

21世紀中に大量の排出をしても、22世紀中に急速な削減が可能ならば安定化目標に到達できるかもしれない。図11は550ppmv安定化目標に対し、排出量変化速度に制約を与えた時の軌跡範囲である。削減速度制約に応じ範囲幅は狭まる。どの程度の排出量変化速度（削減速度）が可能であるかは将来の技術、社会・経済状況の変化速度

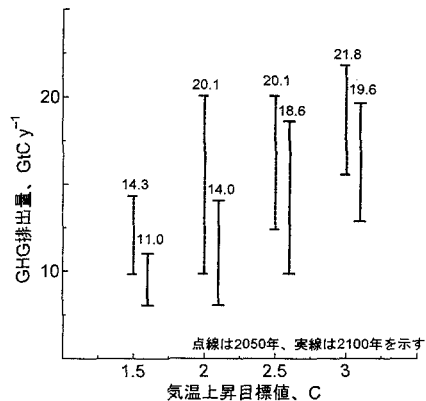


図-12 排出量変化速度を 0.15 GtC y^{-1} 以下とし、23世紀での気温安定化を目標とする排出経路の範囲

に依存するが、前述の21世紀中の排出シナリオ群では、多くのシナリオで 0.1 GtC y^{-2} 程度の削減速度を可能とし、いくつかは 0.2 GtC y^{-2} 程度の削減速度も想定している。

5. 気候安定化から見た21世紀中の排出量

気温、海水位などの短期間の変化は、自然環境や社会システムに影響を及ぼす。どの程度の変化がどの程度の影響を及ぼすかは、依然として不明な点が多々あるが、全球平均で $1\sim 2^\circ\text{C}$ 程度の上昇は、希少種を絶滅させたり有用な生態システムを破損する可能性があるとして推定され、 $2\sim 3^\circ\text{C}$ 程度の上昇で広域あるいは全球的な損害が発生すると推測されている¹⁰⁾。これらのことから、気候安定化のとり合えずの目標値を、1990年に対する気温上昇値として $1.5\sim 2^\circ\text{C}$ 上昇と考えてみる。2050年及び2100年の

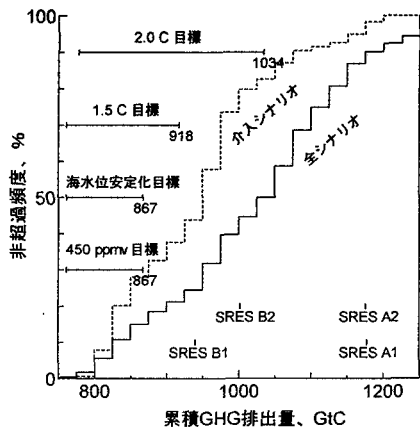


図-13 23 世紀における気候安定化が可能な排出経路の 2050 年排出量範囲（横ヒゲバー及び SRES のプロット縦位置は意味を持たない）

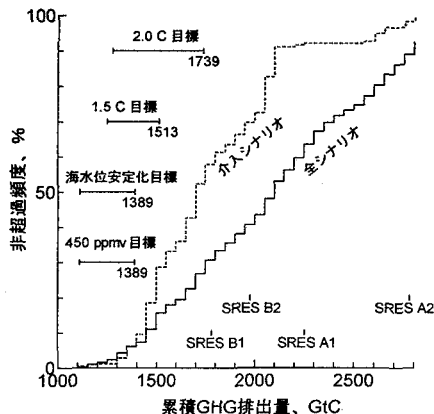


図-14 23 世紀における気候安定化が可能な排出経路の 2100 年排出量範囲（横ヒゲバー及び SRES のプロット縦位置は意味を持たない）

最大排出量は、22 世紀以降の最小可能排出量を $-1\text{Gt} \cdot \text{y}^{-1}$ とした場合、それぞれ $21.8\text{Gt} \cdot \text{Cy}^{-1}$ 及び $19.6 \sim 24.2\text{Gt} \cdot \text{Cy}^{-1}$ であり 1990 年排出量の約 2 倍であった。一方、削減速度に $0.15\text{Gt} \cdot \text{Cy}^{-2}$ の上限を設けるとときには、2050 年に 1.5°C 目標で最大 $14.3\text{Gt} \cdot \text{y}^{-1}$ 、 2.0°C 目標で $20.1\text{Gt} \cdot \text{y}^{-1}$ であり、2100 年に最大 $11.0\text{Gt} \cdot \text{y}^{-1}$ および $14.0\text{Gt} \cdot \text{y}^{-1}$ と 1990 年排出量とほぼ同程度の排出であった（図 12）。図 5 で見たように目標値との対応は、任意年の排出量より累積排出量の方が明瞭に現れる。図 13 は 23 世紀中の安定化目標に対応し $0.15\text{Gt} \cdot \text{y}^{-2}$ 以下の排出量変化を持つ排出シナリオの 1990 年～2050 年の累積排出量範囲を描いたものである。併記している階段曲線は、安定化目標に達し得なかったシナリオを含めたシナリオ群の同期間の累積排出量の累積頻度を描いたものであり、実線は全シナリオ、点線は介入シナリオを示す。この図から 23 世紀の 450 ppmv 安定化あるいは海水位安定化に到達したシナリオは 2050 年には累積排出量 $867\text{Gt} \cdot \text{Cy}^{-1}$ 以下となっており、この条件を満たすシナリオは全シナリオ中 15%、介入シナリオではほぼ 30% 存在したことがわかる。 1.5°C 安定化目標 ($918\text{Gt} \cdot \text{C}^{-1}$ 以下) ではこれらの割合は、全シナリオ中約 20%、介入シナリオ中では 40% となり、 2.0°C 安定化目標 ($1034\text{Gt} \cdot \text{C}^{-1}$ 以下) となると全シナリオ中 50%、介入シナリオ中 80% となる。図 14 は 2100 年時点の累積排出量範囲を描いたものである。450 ppmv 目標及び海水位安定化 ($1389\text{Gt} \cdot \text{C}^{-1}$ 以下) の場合、全シナリオあるいは介入シナリオで 10% 弱が、 1.5°C 安定化目標 ($1513\text{Gt} \cdot \text{C}^{-1}$ 以下) 及び 2.0°C 安定化目標 ($1739\text{Gt} \cdot \text{C}^{-1}$ 以下) のとき介入シナリオで 30% 及び 50% に相当する範囲であった。

SRES シナリオ³⁾ は政策非介入シナリオの典型例として IPCC により作成されたものであるが、累積排出量は A1, A2, B1 及び B2 のマーカーシナリオで 2050 年に $940 \sim 1178\text{Gt} \cdot \text{C}$ 、2100 年に $1782 \sim 2780\text{Gt} \cdot \text{C}$ の範囲にある。経済指向社会シナリオである A シナリオでは 2050 年時点にて既に 2.0°C 安定化目標の範囲外となっているが、環

境指向社会シナリオである B シナリオでは 2.0°C 安定化目標の範囲内である。しかし、2100 年時点にはいずれのシナリオでもこの安定化目標範囲から外れてしまうことになる。但し、2100 年以降の排出量変化速度に制限を考慮しない場合には、安定化を果たす軌跡の累積排出量は 2100 GtC 程度であるから、B シナリオでも依然として 2°C 安定化の可能性をもつことになる。

以上をまとめると、23 世紀の気候安定化について海水位安定化のためには 450 ppmv 安定化目標とほぼ同じ厳しさの削減を行わなければならない、現在までに提案されている政策介入シナリオ排出量の大部分もこれを満足できないが、 1.5°C あるいは 2.0°C 目標についてはある程度可能な範囲であることがわかる。

文献

- 1) IPCC, Climate Change : The IPCC Scientific Assessment, (eds) J.T.Houghton, B.A. Callander and S.K. Varney, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- 2) Alcamo, J. and N.Nakicenovic, (eds.): Long-term greenhouse gas emission scenarios and their driving forces, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 3(2-4), 466p, 1998.
- 3) IPCC, Special Report on Emissions Scenarios (SRES) : Open Process, IPCC Working Group III, <http://sres.ciesin.org>, 1999.
- 4) Morita T., and H. Lee : IPCC emissions scenarios database. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 3, 121-131, 1998.
- 5) WMO, 1999, Scientific Assessment of Ozone Depletion : Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 44, Geneva, 1998.
- 6) Nakicenovic, N., N. Victor, and T. Morita : Emissions scenarios database and reviews of scenarios, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 3(2-4), 95-120, 1998.
- 7) 松岡 譲・川口洋平 : 温室効果ガス排出に伴う気温・海水位上昇の簡易推計モデルについて, 環境システム研究, 28, 2000.
- 8) Matsuoka, Y : Extrapolation of carbon dioxide emission scenarios to meet long-term atmospheric stabilization targets, *Environmental Economics and Policy Studies* (in printing), 2000.
- 9) Nelder J.A. and R. Mead : A Simplex method for function

- minimization. *Computer J.*, 7, 308-318., 1965.
- 10) IPCC, Climate Change 1995, The Science of Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, (eds.) J.T. Houghton *et al.*, Cambridge U. Press., 1996.

ON THE RELATION BETWEEN CLIMATE STABILIZATION AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE 21ST CENTURY

Yuzuru MATSUOKA and Yohei KAWAGUCHI

We projected global mean temperature and sea level change during the 21st century based on published 259 emission scenarios, and estimated their rises are within 0.9-4.6C and 30-73 cm by the end of the 21st century. Most of the scenarios cannot accomplish "climatic stabilization" from view points of the greenhouse gas concentrations, the global temperature rise or the sea level rise within the next century. We extrapolated the emission scenarios in order to approach stabilization targets during the 23rd century. The allowable emission routes which reach the targets depend on the assumptions such as minimum emissions and maximum reduction rate of emissions. In case of the maximum reduction rate is 0.15 GtC y⁻² and the stabilization target is 450 ppmv in the 23rd century, the cumulative GHG emissions during 1990-2050 and 1990-2100 are less than 867 GtC and 1389 GtC respectively.