

地球時代の環境制約 —脱温暖化社会をめざして—

松岡 譲

正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科・地球環境学堂 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

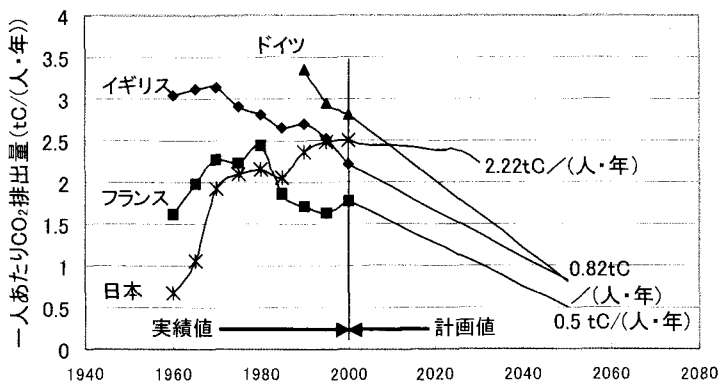
この研究では、温暖化問題に起因する環境制約条件が今後の人間活動をどの程度規定するかを検討した。まず、温室効果ガス排出・気候モデルを用いて、21世紀～22世紀における温室効果ガス排出量制約として同定した。次いで、この制約値を左右する諸要件について検討を行った上で、わが国への適用を行い、今後50年の間に必要となる排出削減量を求めた。その結果、2050年におけるわが国の必要削減量は1990年比で50%～90%の範囲にあり、年率に直すと1.4～4.5%/年の削減スピードとなる。この値は、過去のスピードに比べ極めて大きい値であり、その実現にあたっては、エネルギー需給システムのみならず、社会全体の改革が必要となる。こうした改革を行うためには、さまざまなレベルでの環境システム研究が必要となり、本報告では、幾つかその例を紹介する。

Key Words : climate-neutral society, social renovation, climate change, global warming, global environmental constraints

1. 気候変動の安定化

気候変動に関する科学は、1990年代以降急速に進み、多くの新たな知見が得られるようになった。さまざまな意見が出されていた気候変動の原因についても、人為起

源の温室効果ガスが主因であることは、ほとんど確実となり、それらの知識に基づいた将来見通しが発表された。そうした見通しに基づけば、将来世界に少なから



図一 欧州諸国の脱温暖化計画¹⁾

日本の計画は、総合資源エネルギー調査会需給部会が推計した対策組み合わせシナリオとした。フランスは温暖化対策関係省庁タスクフォース(MIES)、ドイツは議会諮問委員会、イギリスは貿易産業省(DTI)のシナリオである。

ざる悪影響を生ずる恐れがある。こうした背景を受け、イギリス、フランスなどの欧州諸国では2050年までに温室効果ガス排出量を45～80%削減する計画を発表した。京都議定書では、イギリスは12.5%削減、フランスは±0%削減といった目標であるから、それらに比べ大幅な削減目標値となっている。これらの目標を実現するには、エネルギー供給システムやエネルギー効率の大幅な変革が必要であろうし、また人々のライフスタイルも大きな変化を余儀なくされると思われる。図-1は、この計画を各国の一人当たりCO₂排出量で比較したものであるが、現在1.5tC/(人・年)～3tC/(人・年)程度の排出量を2050年には0.5tC/(人・年)程度に減少させようと企図していることがわかる。1997年の京都会議に先立ち、EUは長期的な気候安定化の目標として大気中CO₂濃度550ppm、温度上昇2℃を提案した。目標の具体的な数値には多少の変化があるが、図-1に示した欧州諸国の計画はいずれもこの流れに沿ったものであり、イギリスの場合CO₂濃度550ppm、フランスの場合には450ppmを目標とし策定したものである。その手順は、1)これらの大気濃度目標を満足する全世界排出量の軌跡を求め、2)世界の人々の一人当たり排出量の許容値を各国等しいとし、3)将来のある年以降は、この許容量を越さない、としたものである。イギリスの計画策定においては、世界の人口・経済変化をSRES A2シナリオとし、2050年以降、一人当たり排出量を世界平均許容量としている。

2. 大気安定化目標と世界排出量

それでは、こうした削減目標と気候安定化の関係はどのようなになっているのであろうか。この問題を検討するため、温室効果ガスの排出、大気・海洋中での循環と変

表-1 本報告で使用したモデルの概要

項目	説明
モデルのタイプ	動的応用一般均衡モデル。社会厚生関数の期間積分量を最大化。
対象とするガス	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ Oの他にCFC、HFC、HCFC、SF ₆ など26種のハロゲン化合物。NO ₂ 、オゾン、水蒸気、SO ₂ などの気候変化関連物質についても考慮するが、削減対象とはしない。
対象期間	1990年～2200年。気候変化部分は1750年から計算。
地域分類	世界1地域
部門分類	産業1部門、発電6部門、家計・政府部門
対象エネルギー種	石炭、石油、天然ガス、水力、原子力、新エネルギー
排出削減の表現	エネルギー消費に伴う排出削減はエネルギー代替、価格効果。その他活動に伴う排出削減は限界削減費用曲線を使用。CO ₂ 隔離は考慮しない。
人口設定	1998年国連中位推計、2100年に104億人、SRES B2シナリオと同じ。

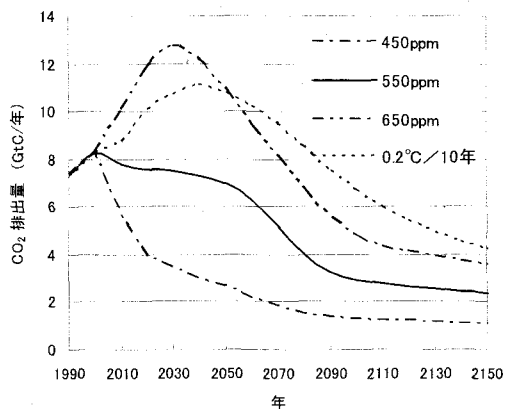


図-2 GHG 濃度目標を与えたときのCO₂排出量の軌跡

化及びそれらに伴う気候変化を計算するモデル²⁾を用い、次のような推計を行った。

検討の対象期間としては、地球の熱的応答の遅れを考慮し1990年から2200年とし、この期間内で大気濃度安定化を図るものとする。表-1に概要を示すモデルを用い、GHGの大気濃度に上限値を与えたときの排出量軌跡を算出した。このモデルは、消費量の関数である社会厚生を時間積分したものを最大化するように資源や投資の配分を行うものである。図-2は、期間内許容濃度を450ppm、550ppm及び650ppmとしたときのCO₂排出量を描いたものである。450ppm目標の場合には、即時に急速な削減(2010年で90年比24%減)を実施しなければならず、550ppmの場合、若干の減少(対90年比では7%増)、650ppmでは90年比38%増となる。650ppmの場合は、濃度制約が無い場合とほぼ同排出量で、その状態は2020年頃まで続く。なお、この目標はGHG全体の濃度であり、CO₂濃度のみで言えばこれより大体50ppm程度低く、また気温変化量では、450ppm目標で1.2℃、550ppm目標で1.7℃、650ppm目標で2.1℃程度(いずれも1990年から2150年の間の上昇値)となっている(表-2)。このように目標値により削減の厳しさは大きく変化するから、どの目標を採用するかが、まず大きな問題

表-2 GHG 目標濃度とCO₂濃度、気温変化の関係

目標濃度 (ppmCO ₂ eq)	CO ₂ 濃度 (ppm)		CO ₂ 排出量 (GtC/年)			気温変化 (℃、対1990年)	
	2100年	2150年	2050年	2100年	2150年	2100年	2150年
450	412	401	2.65	1.30	1.06	1.12	1.20
550	499	490	6.99	2.94	2.38	1.57	1.70
650	588	578	10.87	4.82	3.60	1.88	2.12

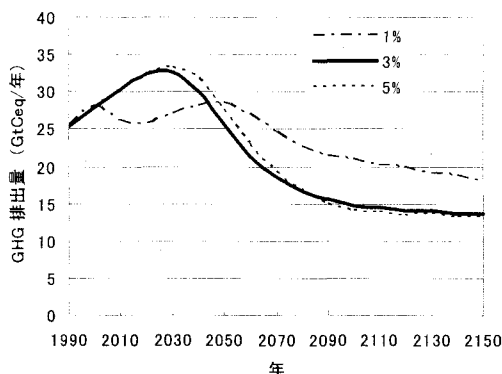


図-3 排出量軌跡の時間選好率に対する依存性
GHG 650ppm 目標の場合

となる。次に、結果を大きく左右するものに、社会厚生関数を時間積分するとき用いる時間選好率がある。これは異時点間の経済的效果を調整するパラメーターであり、直近の経済的效果に大きな比重を置く場合には大きな値とし、将来時点にも比較のおおきな比重を置く場合は小さい値とする。これに関してはこれまで極めて多くの議論が行われてきた。図-2はこの時間選好率を3%/年とした結果であり、これを650ppm目標にて1%及び5%とした場合、その違いは図-3のようになった。この図はGHG全体の排出量軌跡で、3%と5%の差は小さく2030年代まで排出量の増加が認められるが、1%のときは、すぐにでも本格的な削減体制をとらなければならない。

このように、大気安定化目標をどの程度にし、異時点間（世代間）の公平性をどのように設定するかは、地球的制約の具体的な厳しさを大きく左右するが、少なくとも、
1) 温室効果ガスの排出に関しては、遅くとも今世紀半ばまでに大幅かつ本格的な削減体制を取らなければならない、
2) 2050年には現状程度、2100年には、半分程度の排出量とする必要があることは言うことができる。

3. 持続可能な発展と気候安定化への道筋

さて、図-2に示した気候安定化にいたる排出量軌跡は、Solow³⁾らによって提唱された経済学のアプローチを根拠としている。すなわち、所得を生み出す資産（大気環境）のストックをある程度、毀損しない範囲で、得られる所得（あるいは経済的厚生）のフローを最大化すると言ったいわゆるヒックスーリンダール概念を、経済発展の基本と考えたものである。この概念では、環境は所得を生み出す資本の一部とみなされ、あくまでも経済的効率性の概念が重視されている。

こうした経済学的な概念をベースとした問題提起は、1996年の1月にWigley, Richels and Edmonds⁴⁾の共同論文として「ネイチャー」誌上に掲載されたものがある。この論文では、図-2と同様な計算を行い、将来の大気中のCO₂濃度を550ppmに安定化することを目標とした場合、人為起源のCO₂の排出量を削減する経路はいくつも存在することを示した。さらにIPCCが提唱していた早期に削減対策を開始する経路よりも、2010年あるいは2020年まで成り行きにまかせて排出し、それから一気に削減対策を導入する経路の方が、経済学的に見て費用が少なくてすむことを主張した。これは、時間選好率を比較的大きめにとって将来にコストをかけた方が安くすむこと、20年程度の期間があれば資本をスムーズに更新できること、将来、技術革新が進んで技術のコストが下がること、などの理由による。さらに、Wigleyらは、このような経路の違いによる気温変化量が大変小さいことを述べ、したがって温暖化による被害もあまり変わらないだろうと示唆した。

この主張に対する反論は、当然のことながら数多く出された。時間選好率を大きく設定しすぎていることへの批判、技術革新が自然に進むという仮定への批判、温暖化対策によって省エネが促進されるなど副次的効果を見逃したことの問題点等、いずれも本質的な反論であった。これらの反論の中で、主に自然科学の側から出された反論は、経路の違いによって温暖化の影響が違ってくるのではないかと、という点に集中した。すなわち、直ちに対策を始める場合と2030年頃まで対策開始のタイミングを遅らせる場合とでは、温度の上昇スピードに差が生じる。この温度上昇のスピードの程度が、自然生態系の適応の度合いを決めたり、海洋の循環を変えるといった突発的現象の生起確率を大きく変えるであろう。

このような、環境容量論的な視点から言えば、図-1に示したような安定化濃度のみからの議論は不十分であり、変化スピードなどにも着目しなければならない。変化スピードから許容排出量を検討する議論⁵⁾では、図-4のような気候変化速度－変化量平面上において「危険ゾーン」を定め、そこからの脱出ルートを探ることが主題となる。危険かどうかの境界は、過去の生態系の応答や、植生が気候変動に追従できる速度などの知見をもとに、気温上昇に関しては変化量で1～2℃、変化速度で0.1～0.2℃/10年程度と推測されている。これをグレーゾーンと称することにすれば、図-4で薄い網かけをした部分がその部分となる。図-4の実線は、大気濃度目標を与えたときの気温変化の軌跡である。各目標のうち650ppmでは2010年以降に速度境界を突破するものの、数十年後にはグレーゾーンに戻るが、目標を定めない軌跡（制約なし）では、危険ゾーンへ行けばなしのまま、帰ってこない。650ppm目標のとき、0.2℃/10年を越し

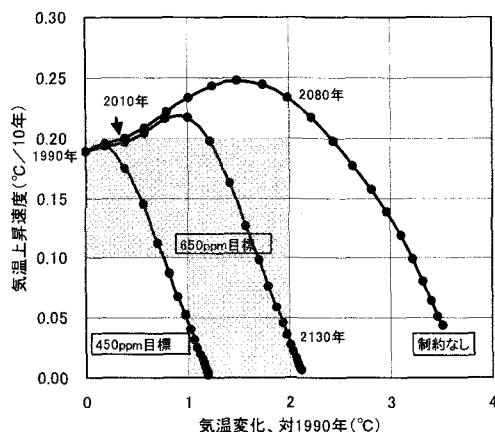


図-4 気温変化速度-変化量平面

1990年から2190年までの軌跡を示す。黒丸は10年毎の位置。右上が「危険ゾーン」に対応。

ているので、これを越さないようにするには、削減開始を早めなければならぬが、一方、先に行ってから削減量は小さくて済む。図-2の点線(0.2°C/10年)で示した軌跡がそれで、速度制約がない場合の軌跡に比べ、2030年付近のピーク排出量が小さくなり、2050年以降の排出量が大きくなっていることがわかる。

4. わが国の削減目標

今まで検討してきたのはいずれも世界全体の許容排出量であった。この世界全体の排出量を各国に割り当てるのはどのようにすればよいか。バーデン・シェアリングと称される問題であり、衡平性、排出責任、削減能力などの観点から大変活発な検討が行われている課題である。これらの中で Meyer⁶⁾が提唱する収縮&収束アプローチ(C&C)は、世界各国の一人あたり排出量を同一とするもので、衡平性において簡明であり、上で述べたイギリス

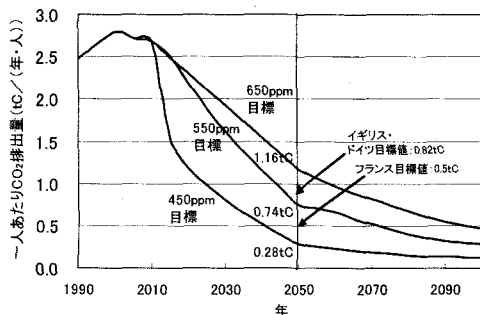


図-5 わが国のCO₂削減目標

やフランスの目標設定でも使用された。この場合、排出量を各国同一とする年(収束年)が問題となるが、イギリスに従って2050年とした場合における日本での一人あたり許容排出量の推移を図-5に示す。この図は2010年の京都議定書での許容排出量を出発点とし、2050年での全排出量と世界人口で決まる許容排出量に向け、各国の許容排出量割合の比を線形的に変化させて求めたものである。C&Cアプローチでは、収縮時期(本例の場合、2010年~2050年)の詳細を定めていない

ため、さまざまな接近法が考えられるが、どのような接近方法を取ろうと収束年である2050年では同一値となり、本例の場合、GHG濃度650ppm目標で1.16 tC/(人・年)、550ppm目標で0.74 tC/(人・年)、450ppm目標で0.28 tC/(人・年)となる。2050年以降は、人口変化及び世界全体の許容排出量の増減に沿って変化する。図-1と合わせてみるとイギリス、ドイツは、本報告の550ppm~650ppm目標の範囲であり、フランスは450ppm~550ppm目標の範囲となる。これらの数値を1990年に対する削減率で表したものを表-3に示す。2050年での削減率は、650ppm目標で60%程度、550ppm目標で70%、450ppm目標で90%程度であり、米国ではこれより10%程度厳しく、EUでは10%程度緩やかとなる。中国では550ppm以下の目標で削減に転ずるが、インドでは450ppm目標でも90年排出量の2.8倍の許容量を持つ。

表-3 GHG濃度目標のもとでの各国削減率
1990年排出量比

	2050年	2100年
650ppm目標		
日本	58	92
USA	68	87
EU	44	77
中国	(201)	(23)
インド	(1032)	(407)
550ppm目標		
日本	73	95
USA	80	92
EU	64	86
中国	(93)	25
インド	(628)	(209)
450ppm目標		
日本	90	98
USA	92	96
EU	86	94
中国	27	67
インド	(176)	(36)

()は負値を示す。

5. 脱温暖化社会の構築に向けて

以上検討してきたように、地球温暖化問題を乗り切るには、今世紀前半中にGHG排出量を50%~90%削減する必要がある。欧州諸国が、2050年にて45%~80%削減の計画を立てているのは、この線に沿ったものである。これを実現するためには、これまでの社会変化に比べ、数倍の変革スピードが必要となる。表-4は、CO₂排出量変化率(速度)を要因分解したもので、欧州諸国の計画を含め、わが国の将来推計とこれまで実績を一覧している。エネルギー集約度及び炭素集約度いずれの因子についても、改善スピードを二~三倍以上上げ、その速度

表-4 日本及び西欧諸国における CO₂削減スピード¹⁾

対象国	機関	対象期間	シナリオ名	対期首年 変化率(%)	CO ₂ 年変 化率(a) (%/y)	炭素排出要因の変化率(%/y)				
						炭素吸 収・隔離 変化率(b)	炭素集約 度変化率 (c)	エネルギー 集約度変化 率(d)	活動量 変化率 (e)	交絡項(f)
日本	過去の実績	1960-2000		375.8	3.98	-	-0.77	-0.32	5.11	-0.05
		1990-2000		10.4	0.99	-	-0.82	0.41	1.42	-0.01
	環境省地球環境局	1990-2030	B2	-6.3	-0.16	-	-0.20	-0.69	0.74	-0.01
	経済産業省総合資源エネルギー調査	1990-2030	省エネ進展 対策組み合わせ	-9.8	-0.26	-	-0.37	-1.37	1.50	-0.02
	市民エネルギー調 査会	1990-2030	いきカエル きりカエル	-9.1	-0.24	-	-0.32	-1.20	1.29	-0.01
				-42.4	-1.37	-	-0.51	-0.21	-0.66	0.01
フランス	過去の実績	1960-2000		58.6	1.16	-	-1.75	-0.30	3.29	-0.06
		1990-2000		3.0	0.30	-	-0.94	-0.61	1.87	-0.02
	MIES	2000-2050	F4 nuclear	-69.4	-2.34	-	-2.47	-1.54	1.70	-0.04
			F4 RCogN	-69.8	-2.36	-	-2.29	-1.74	1.70	-0.03
			F4 Sequestr	-69.7	-2.36	-1.43	-0.90	-1.71	1.70	-0.02
			F4 w/o N+Seq	-69.3	-2.33	-1.96	0.21	-2.26	1.70	-0.03
ドイツ	過去の実績	1990-2000		-15.4	-1.66	-	-1.29	-2.04	1.70	-0.03
	Enquete	2000-2050	UWE-WI	-75.1	-2.74	-1.35	-0.25	-2.49	1.37	-0.01
	commission		UWE-IRR	-76.2	-2.83	-1.66	-0.46	-2.07	1.37	-0.01
			RRO-WI	-75.3	-2.75	-	-1.28	-2.83	1.37	-0.02
			RRO-IRR	-76.0	-2.81	-	-1.79	-2.37	1.37	-0.02
			FNE-WI	-75.0	-2.73	-	-2.26	-1.82	1.37	-0.03
イギリス	過去の実績	1960-2000		-3.6	-0.09	-	-1.00	-1.49	2.44	-0.05
		1990-2000		-6.9	-0.72	-	-1.57	-1.41	2.30	-0.04
	DTI	2000-2050	BL60	-59.9	-1.81	-0.62	-0.80	-2.58	2.24	-0.05
			WM60	-59.9	-1.81	-0.28	-1.50	-2.93	2.99	-0.09
			CS60	-59.9	-1.81	-0.93	-0.23	-2.84	2.24	-0.05

この表では、CO₂排出量の年変化率(a)を、炭素吸収・隔離率の変化率(b)、炭素集約度変化率(c)、エネルギー集約度変化率(d)、活動量変化率(e)及び交絡項(f)に分解している。ここで、炭素吸収・隔離率とは、排出量と発生量の比、炭素集約度とは発生量と1次エネルギー量の比、エネルギー集約度とは1次エネルギーと活動量の比である。これらの量の変化率の間には、 $a=b+c+d+e+f$ の関係がある。この表の活動量は国民総生産としている。2000年から2050年の50年間に排出量を80%減少させる場合、aは-3.17%/年であるから、活動量変化率を+1%とすればa,c,d,fの総和は-4.17%/年となる必要がある。

を 50 年にわたり継続しなければならない。半世紀間に 50%~90%の削減を行うのに相当する年削減率は 1.4%/年~4.5%/年である。表-4の注にも記すように、この数値は炭素隔離・吸収率、炭素集約度、エネルギー集約度、活動量、それぞれの年変化率と解析誤差項である交絡項の和である。従って、炭素吸収・隔離についてはひとまず考慮外とし、活動量変化の代理指標としての経済成長率を 1%/年程度とすれば、炭素集約度とエネルギー集約度の変化率の和は-2.4%/年~-5.5%/年の範囲となる。表-4にて炭素集約度の低減率を 2%以上と見積もるのは、原子力に頼るのがほとんどで、それ以外は再生エネルギーを中心とするフランスの F4 RCogNのみである。また、エネルギー集約度の低減率を 2%以上と見込むのは 6 シナリオあるが、これらは住宅、工業生産、交通機関などの効率改善を積み上げたものであり、実現にあたっては、これらの工夫を、どの程度、網羅的かつ徹底して行かなくては大きく依存する。

図-6は、両指標の年変化率を縦軸及び横軸に取りプロットしたものである。1990年代の変化率を出発点とし、過去の 40 年及び将来の見通しを実線をつないだ。傾き-1の点線は経済成長率を 1%/年としたときに、50 年間の削減率が 50%~90%となる位置を示す。黒丸で示すも

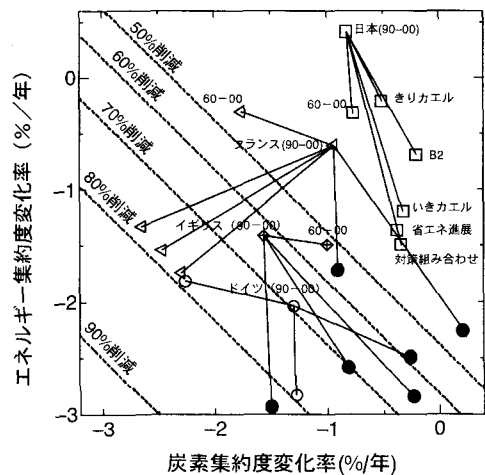


図-6 CO₂削減目標とエネルギー集約度・炭素集約度変化率の関係

60-00 とは 1960 年から 2000 年の実績を、90-00 とは 1990 年から 2000 年の実績を示す。

のは、これらの集約度削減対策に加え、さらに炭素吸収・隔離を行い、目標達成を行うシナリオである。日本の将来シナリオはいずれも、この平面の右上にかたまっており、50%削減を目指すのなら0.5~1%/年、80%削減を目指すなら2~3%/年の追加的な削減スピードの上乗せが必要である。

6. 環境システム研究に課された課題

このように、地球環境制約からみると、この半世紀は低炭素化社会に向けての変革の時代であり、大幅な改革を高スピードで行なわなければならない、この変革に関連して、さまざまなレベルの検討が必要となる。その幾つかの例を挙げるならば、以下ようになる。

1. 人口・家族構成及びライフスタイルなどの社会的トレンドと炭素効率改善方策の係わり：少子高齢化に伴う家族構成の変化、貯蓄率の減少、時間バジェットの変化、あるいは煩わしさを回避し快適性・利便性を求める傾向などは、家計や産業のエネルギーサービス効率や交通トリップパターンを大きく変える。社会全体への波及効果も大きい。社会資本、国土・都市形態、あるいは各種の制度は、こうした動きを抑制あるいは加速し、脱温暖化社会実現の成否を握る。従って、これらの因果のミクロ的メカニズムに注目しながらも、社会全体としての大略を外さない研究が早急に必要となる。
2. 好ましい未来社会に向けた関連政策の統合：温室効果ガス以外の環境負荷の削減、資源生産性の向上、生物多様性の保護などは、温暖化問題とならび今世紀の大きな課題である。また、温暖化問題に関連した懸念事項としてエネルギー安全保障問題や省エネ・再生エネルギー開発・技術競争と、この排出量削減問題をどのように関連付けるかは、脱温暖化社会の実現を大きく左右する。この観点に立ち、好ましい未来の社会に向けてこれらの政策群をどのように組み合わせれば効率的か、環境技術革新を社会全体の物質・エネルギー

循環や経済活動と整合的に配置するにはどのような手法が必要か、温暖化対策と関連諸対策はどのように組み合わせたととき、もっとも副次的便益・共便益は高まるか、などの検討は脱温暖化社会に向けた必須的な研究課題である。

3. ソフトパスかハードパスか：現在までに提案されている将来シナリオからみると、目標到達には、これらのシナリオに盛り込まれている工夫に加え、さらに数%/年の削減スピード増加が必要となる。この不足分を何で稼ぐか、エネルギーサービス効率や消費機器効率の改善で稼ぐのか、あるいは原子力、炭素吸収・隔離と言ったハードパスの方法で稼ぐかは、大変重要な選択である。選択の判断材料となる環境・技術アセスメントとその社会認知に関する調査・研究は極めて大きな社会的貢献をなす。

これらの研究分野を勢力的に開拓し、脱温暖化社会の構築に貢献することは、環境システム研究の新たな地平を開く絶好のチャンスと思われる。

文 献

- 1) 河瀬玲奈、島田幸司、松岡 譲：要因分析法を用いた中長期脱温暖化シナリオの検討、環境システム研究論文発表会講演集、32、2004。
- 2) Hijioka, Y., Masui, T., Takahashi, K.: AIM/Impact[Policy], unpublished memoir, National Institute for Environmental Science, Tsukuba, 2004.
- 3) Solow, R.: Intergenerational equity and exhaustible resources, *Review of Economic Studies*, Symposium volume, 1974.
- 4) Wigley, T.M.L., Richels, R., and Edmonds, J.A.: Economic and environmental choices in the stabilisation of atmospheric CO₂ concentrations, *Nature*, 379, pp.242-245, 1996.
- 5) 松岡 譲：気候安定化からみた数量目標の妥当性、季刊環境研究、pp.27-30, 1998.
- 6) Meyer, A.: *Contraction & Convergence, The Global Solution to Climate Change*, Green Books for the Schumacher Society, 92pp., 2000.

ENVIRONMENTAL CONSTRAINTS ON GLOBAL ERA

—TOWARD CLIMATE-NEUTRAL SOCIETY—

Yuzuru MATSUOKA

In this study, I identified required global GHG emission paths to stabilize climate change with a simplified emission-climate model. The paths were analyzed from the view point of assumed allowable global temperature changes and its changing speeds. The global emission paths were allocated country by country by “Contraction and Convergence” methodology. In case of Japan, the required emission reduction ratio in 2050 is 50% to 90% compared with 1990 emission, and in order to achieve this ratio, we have to revolve society drastically to low carbon and climate-neutral society.