

S - 3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案 手法の確立に関する総合研究プロジェクト

2. 温暖化対策の多面的評価クライテリア設定に関する研究

(2) 温暖化リスク管理の観点からのクライテリア研究

独立行政法人国立環境研究所

社会環境システム研究領域

原沢英夫

社会環境システム研究領域 環境経済研究室

亀山康子

久保田泉

社会環境システム研究領域 環境計画研究室

肱岡靖明

高橋 潔

[要旨] 温暖化を防止するために温室効果ガス削減の長期目標をどのように設定するかは、すなわち影響が危険でないレベルに大気中の温室効果ガスを安定化することであり、危険なレベルの定義や影響の閾値と安定化濃度との関係を明らかにすることが非常に重要となる。気候変動枠組条約は、その究極的な目標として「地球の気候系に対し危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準において、大気中の温室効果ガスの濃度を安定させること」を掲げている。危険なレベルを測る指標としては、気温や海面上昇の絶対値と変化速度がよく用いられる。降水量も干ばつや洪水をもたらすことから指標としてとりあげられてしかるべきであるが、まだ気候モデルによる予測が、気温ほど精度がないこと、影響研究も気温上昇や海面上昇に比べて、指標化できるほどの蓄積がないことから、気温や海面上昇が指標項目として選ばれている。気温については、全球の年平均気温が指標としてとられ、その値に対して影響被害量が示される。IPCCの第二次評価報告書(2001)の第19章では、指標として全球年平均気温をとることの理由付けがなされている。地域によって気温上昇が違うことを考えれば、温暖化の影響研究が今後地域レベルで進展することが期待できるが、全球に関わる温暖化の全体像を一つの指標に集約して、危険なレベルを考察することのメリットもあるため、本研究では、温暖化の危険なレベル検討する第一段階として、全球平均気温上昇量で見た場合の影響度について整理し、分野別の目安を示した。

[キーワード] 地球温暖化、影響閾値、タイプ 1・2、危険なレベル、安定化濃度

1. はじめに

京都議定書が2005年2月16日に発効され、今後日本をはじめとした先進国は、第一約束期間(2008年～2012年)に1990年比で温室効果ガスを5.2%削減する国際的約束を果たすべく、削減対策をより一層進めることになる。同時に、2012年以降の温暖化防止に向けた枠組み問題(Beyond Kyoto問題)についての議論が公式に始まる。2012年以降の温暖化防止の枠組みの議論においては、気候変動枠組条約や京都議定書の枠組みや実績が基本になると考えられるが、もっとも重要な点は、真の意味で深刻な影響がでないよう温暖化を防止するために温室効果ガスをどこまで削減したらよいかという長期目標を科学的に設定できるかどうかである。

削減の長期目標をどのように設定するかは、条約第2条で規定されている究極的な目標と緊密に

関連している。すなわち、第2条では、「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすことにならないレベルに大気中の温室効果ガス濃度を安定化すること」であり、「この安定化レベルは生態系が自然に適応し、食料生産が脅かされず、かつ経済開発が持続可能に進めることができるような期間内に達成できる」こととされる。この安定化濃度を達成するための排出経路、より具体的には、「危険な人為的干渉を及ぼすことにならないレベル（危険でないレベル）」で安定化させた場合の排出削減量の具体的数値目標が焦点になる。現段階で、条約の規定する危険でないレベルに大気中の温室効果ガスを安定化する際の、「危険」や「安定化」の定義をふまえた議論が必要になる。

2．研究目的

本研究の目的は、安定化濃度を考慮して、地球温暖化のもたらす危険なレベルに関する科学的知見を整理し、何がわかっているのか、その持つ意味は何かを明らかにすることである。

3．研究方法

まず安定化濃度と影響閾値等の議論の経過について整理し、温暖化抑制目標設定の基礎となった影響の危険なレベルについて明らかにする。次に、温暖化の危険なレベルを判断するために、影響の閾値をどのようなアプローチで捉えたらよいか、既存の手法を整理する。最後に、分野別影響について、全球平均気温上昇量で見た場合の影響度について定量的な目安を示す。

4．結果・考察

(1) 安定化濃度と影響閾値等の議論

気温上昇や海面上昇の危険なレベルや速度については、1980年代から議論が始まっている。当時、世界の科学者や政策決定者が一堂に会した種々の国際会合での議論を踏まえて気候変動に関する政府間パネル（IPCC）や気候変動枠組み条約に集約されていった。例えば、1988年のベラジオ会合では、海面上昇20-50cm/10年、気温上昇0.1 /10年を提案している。この会合は温室効果ガス助言者グループ（AGGG: Advisory Group on Greenhouse Gases, IPCCの前身）が開催したものであった。AGGGは、地球の平均気温の許容できる最大上昇速度は0.1 /10年、産業革命前と比べて2 の上昇を勧告している。こうした議論が条約の究極的な目標設定に繋がったと考えられる。その後の経過を表1にまとめた。

表1 安定化濃度、気温上昇、影響に関する研究動向^{1)～11)}

年	会合名	概要	備考(参考文献)
1988	ベラジオ会合	海面上昇20-50cm/年、気温上昇0.1 /10年を提案	Jager, 1988(Agrawala, 1998で引用)
	温室効果ガス助言者グループ(AGGG)	地球の平均気温の許容できる最大上昇速度は0.1 /10年、産業革命前と比べて2 の上昇を勧告	IPCC, 1996
1990	第2回世界気候会議	Vellingaらが、気温・海面上昇の限界値について報告	Vellingaら, 1991
	IPCC第一次評価報告書	1988年に設置されたIPCCが最初の報告書(第一次評価報告書)を公表	IPCC, 1990

1992	気候変動枠組み条約を締結	第2条で温暖化防止の究極的な目標として温室効果ガスの安定化を規定	
1994	IPCCフォートレザ会合	安定化濃度、影響、閾値についての議論	IPCC, 1994
1995	IPCC第二次評価報告書	現在のCO2濃度に留めるためにはすぐに50～70%の削減が必要と分析	IPCC, 1996
1996	Wigleyらが安定化濃度に関する論文発表	安定化濃度に至る排出量パスは無数あり、経済的には排出を遅らせる方が経済的と指摘	Wigleyら, 1996
1997	ドイツ、英国、EU	気温上昇2℃、安定化濃度550ppmなどをうたった報告書を公表	WBGU, 1997
	温暖化防止京都会議(COP3)	先進国が90年比で第一約束期間に5.2%温室効果ガス(CO2など6ガス)を削減することに合意	
2001	IPCC第三次評価報告書	安定化に至るシナリオを提示(Post-SRES)	IPCC, 2001
2003	IPCC危険を避ける温室効果ガスレベルの専門家会合	気候変動のもたらす危険なレベルについて種々の分野の専門家が集まり討議した。IPCCとして報告書を作成することは総会に委ねることとなったが、結局作成されなかった	IPCC, 2003
2004	IPCC 気候変動枠組み条約第2条の主要な脆弱性に関する専門家会合	気候変動枠組み条約第2条に示された究極的な目標、大気中の温室効果ガスの安定化と気温上昇、影響と排出経路について議論が行われた	IPCC, 2004
2005	気候変動の安定化に関する科学者会合	英国ハドレイセンターにおいて「危険な気候変動を回避する」シンポジウムが開催された	DEFRA, 2005

(2) 温暖化の危険なレベル、影響閾値に関するアプローチ

気温の上昇にともない影響が健在化する。影響評価の対象とする分野や地域によってその影響の発現の仕方、範囲や強度も異なる。例えば、サンゴ礁の場合、1℃の水温上昇でも白化現象が発生して、サンゴ礁が死滅することが報告されている。図1は、IPCC第三次評価報告書に引用されている5つの分野における影響の全体像を、将来の気温上昇とあわせて示したものである¹²⁾。

生態系など脆弱なシステム：わずかの気温上昇でも影響がでる。

極端な気象現象：温暖化の初期の段階でも極端な気象現象(異常気象)が発生して、影響が現れる。

悪影響の分布：2℃程度までの気温上昇では、利益を得る地域もある。例えば、北の寒い地域が温暖化で耕作が可能となるなど。しかし、2℃を越えると悪影響が卓越する。また小島嶼国や沿岸地域に位置する途上国ではわずかな海面上昇でも甚大な影響をうけることから、2℃の気温上昇ではリスクが高い。

世界経済：個々の分野の影響の総体として、世界経済を考えると温暖化の初期の段階では、好影響をえる場合もあるが、数度の上昇では、悪影響が卓越する。

破局的な事象：海洋大循環が停止するなど、大規模な気象現象の発生は、21世紀中に発生する確率は大変小さいと見積もられているが、最近の研究では、早い温暖化では、その確率・リスクは高くなっているという研究も現れている。こうした発生確率は低い、その影響は甚大な現象について関心が高まっている。

Schneider and Lane¹³⁾は、以下のように閾値のカテゴリ分けを行っている。

タイプ1の閾値(社会経済的な限界値)：ある点を越えると政策決定者が許容できないと考える被害をもたらす値と定義される。閾値の関数形は線形或いは滑らかな変化を示す。例えば、気候

変動による食料不足、水不足、健康悪化等のリスクに曝される人口に関する許容可能な上限や、許容可能な生物多様性減少の程度などが挙げられる。図1の 、 、 の領域に相当する。

タイプ2の閾値（破滅的影響に関わる限界値）：気候システム自身の主要なプロセスを安定なものとして維持するために越えてはならない値であり、地球物理学的、生物学的な限界値を表す。閾値の関数形は、非線形やジャンプする変化を示す。例えば、気候システムを不安定にする熱塩循環の停止、非可逆的な海面上昇を引き起こす西南極氷床・グリーンランド氷床の融解、急激な温室効果ガスの放出を引き起こす永久凍土の融解などが挙げられる。図1の 、 （一部）、の領域に相当する。

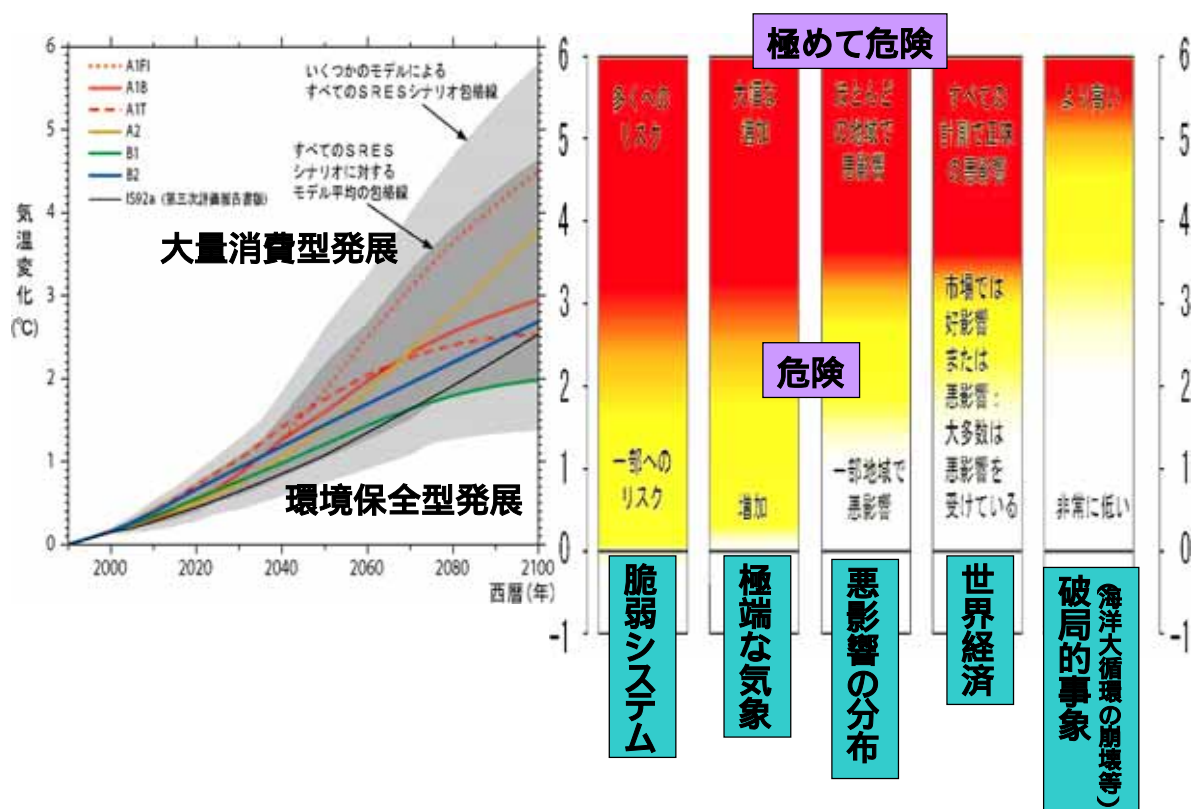


図1 温暖化の危険なレベルを判断する影響領域¹²⁾

温暖化の影響研究の成果をもとに、温暖化のもたらす危険なレベルや影響が発現する閾値についてさらなる検討が行われている。取り上げている分野としては、生態系（沿岸湿地、動物種、陸上、森林、海洋生態系）、農業、水資源、人の健康、エネルギー、経済などである。こうした分野における温暖化影響研究を危険なレベルの視点からまとめた研究も発表されている。

Smithら¹⁴⁾や Hitz and Smith¹⁵⁾は、分野別の影響研究を網羅的にレビューし、気温上昇と影響の

関数としてまとめ、総括して温暖化の影響閾値は3～4 を提案している。

Parryら¹⁶⁾は、4つの主要な分野(食料、洪水、水不足、マラリア)をとりあげ、気温上昇と影響を受けるリスク人口として両者の関係を示している(図2)。対象とする分野によって気温上昇と影響人口の関係が異なるが、水不足のリスク人口でみると、1.5～2 の気温上昇を境にリスク人口が急激に増加することから、この温度範囲を閾値の目安と考えている。

Hareら¹⁷⁾は、種々の分野の影響・リスクを濃淡で表現する方法(Burning Embers Diagram)を用いて影響や閾値を相互比較できるように工夫している。IPCCの第4次評価報告書でも影響をこうしたバーで表現することが提案されていることから、一つの表現方法として取り上げられる可能性があるだろう。

Schneider and Lane¹³⁾は、種々の分野における閾値を表として提示している。生態系の影響から、大規模な影響までを最近の事例をもとに提示している。

Leemansら¹⁸⁾は、生態系への影響研究を綿密にレビューして、EUの言う2 では、生態系の安全は確保できず、1.5 に抑えるべき、速度も0.05 /10年にすべきと提言している。

日本の事例については、地球温暖化研究イニシアティブの年次報告書¹³⁾で、影響の閾値がまとめられている。また、福原・三村²⁰⁾ は、温暖化の日本への影響2001報告書をもとに、種々の分野における影響の閾値についてまとめている。

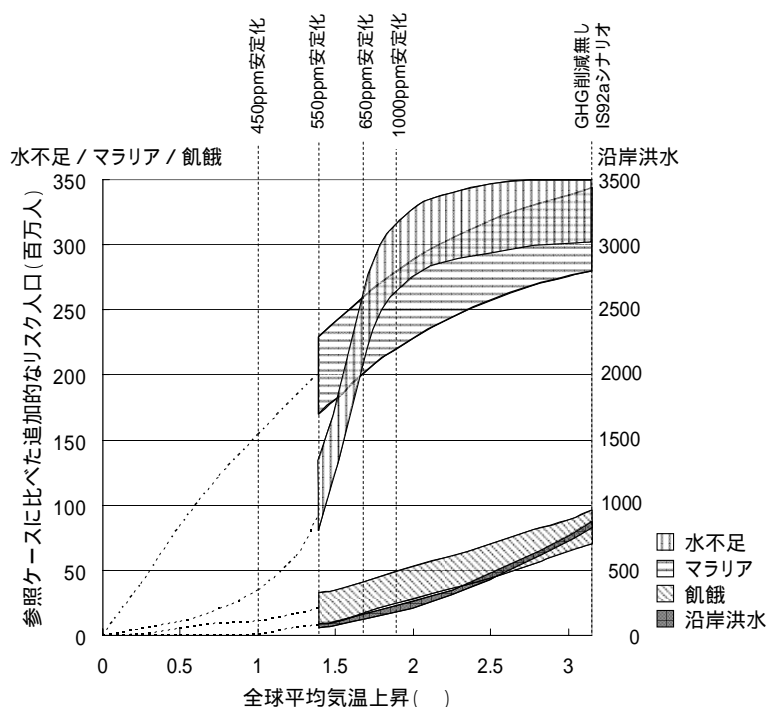


図2 平均気温と飢餓(食料)、水不足、沿岸洪水、マラリアリスク人口の関係
(3) 危険なレベル、影響閾値に関する知見の整理

これまで報告されてきた分野別の危険なレベル、影響閾値に関する定量的な知見を示す。

生態系：英国シンポジウムでは、最新の研究知見も含めて、生態系への影響等についてまとめている。例えば、サンゴ礁では1 の水温上昇で82%、2 では97%が白化することが報告されており、1 の水温上昇でも被害が甚大である。動植物の分布範囲の減少については、1 で～47%、

2 で5～66%、3 で7～74%との報告がなされている。分布範囲の減少では20～30%が危険なレベルであると指摘している場合もある。

食料生産：IPCC第三次評価報告書では、食料生産への影響については、人口増加を考慮しても穀物生産量は十分確保できるとしているが、しかし、一旦食料需給がアンバランスになると、熱帯亜熱帯の途上国では、農業生産ができなくなり、また国際市場から穀物を購入できないので、飢餓などが生じると予測されている。気温上昇で2～3 では、一部の地域で農業生産が可能となるなど、温暖化の良い影響も予測されている。表2は、IPCC等における食料生産への影響事例を平均温度との関係でまとめたものである。この表から食料生産の場合は、世界全体では、2-3の気温上昇が危険なレベルとみなすことができるが、途上国などでは、この値では、深刻な影響がでると考えられ、1～2 に限る必要がある。

水資源：同様に水資源に関する影響の知見を全球の平均気温との関係でみたものが表3である。1～1.5 で水資源への影響、水供給と需要に影響が現れる。2 以上では水供給・需要と水質への影響が拡大する。

健康影響：健康への影響では、熱波や熱ストレスなど直接的な影響と、マラリア・デング熱など間接的影響がある。前者については中緯度地方においては、気温と死亡率をとると、ある温度で死亡率が増加から、減少、さらに増加する点が存在するとされる。すなわち熱波の影響や気温と死亡率の関係からは、健康影響の閾値がある。例えば、熱波では、日最高気温が30 を越すと熱中症患者が増加しはじめ、35 を越えると急激に増加する（日本の場合）。猛暑が続くと人はだんだん暑さに慣れたり（順応）、冷房を使うなど影響を緩和できることから、健康上の危険なレベルを全球の気温上昇で取り扱うことは難しい。マラリア・デング熱などの影響については、温暖化によりマラリアの潜在的地域が拡大することにより影響人口が計算されているが、全球平均気温とほぼ比例して増加することから気温上昇が低くければ低いほど影響が低減するという特徴がある。

経済影響：経済影響については、GDP損失などで計られる場合が多いが、研究によってその気温上昇と損失の関係は大きく異なっている⁸⁾。3～5%の経済損失で社会経済が深刻な影響を受けるという見解もあるが、先進国と途上国では当然経済損失に対する体力が異なること、また気温上昇による生態系影響や人的影響などの被害評価はまだ困難な場合が多く、こうした影響被害についてはまだ研究事例が少ない。

大規模な変化：海洋大循環が停止したり、西南極やグリーンランド氷床が融解するような大規模で非可逆な現象の閾値については、まだ不確実性が高いこともあり、温暖化との関係についての研究はあまり多くない。しかし関心の高まりとともに、気候モデルの研究が進展しており、また過去の気候（古気候）から現象の理解を深めようとしている。海洋大循環では、100年で3 、西南極氷床の融解では、2 などを従来の研究から指摘している。こうした大規模な変化については、IPCCの第三次評価報告書では、21世紀中に発生する確率は大変小さいとしており、関心は低かったが、英国のシンポジウムでは、その発生リスクが高いといった報告もされている。異常気象とともに、こうした大規模な変化も影響面での研究が必要になってきた。

表2 全球気温上昇と食料生産に与える影響²¹⁾

全球気温上昇(工業化前に比べて)	影響(途上国)	影響(先進国)
1.0～1.7	<ul style="list-style-type: none"> ・ほとんどの熱帯・亜熱帯地域で穀物生産減少 ・作物の霜害減少 ・穀物・家畜の高温被害増加 	<ul style="list-style-type: none"> ・高緯度・中緯度地域で穀物生産増加 ・作物の霜害減少 ・穀物・家畜の高温被害増加
1.4～3.2	<ul style="list-style-type: none"> ・熱帯・亜熱帯で穀物が大きく減少 ・高・中緯度では好悪両影響 	<ul style="list-style-type: none"> ・高・中緯度の穀物生産は好悪両影響
1.5～2.0	<ul style="list-style-type: none"> ・貧困農家の収入減少 	
1.6～2.6		<ul style="list-style-type: none"> ・オーストラリア穀物生産量は当初増加、後減少
>2.0	<ul style="list-style-type: none"> ・小島嶼国のトウモロコシと砂糖キビ大きく減少 	<ul style="list-style-type: none"> ・欧州の穀物生産は増加。 ・米国は当初増加、後減少
2～2.5	<ul style="list-style-type: none"> ・途上国で穀物生産量減少 	
>3	<ul style="list-style-type: none"> ・途上国で穀物生産量減少。65カ国で農業GDP16%減少 	
2.0～6.4	<ul style="list-style-type: none"> ・中緯度地域で穀物生産量減少。食料価格の高騰。 	<ul style="list-style-type: none"> ・中緯度地域で穀物生産量減少。食料価格の高騰。
>2.6	<ul style="list-style-type: none"> ・アジア：米生産量の減少 	
>4.2		<ul style="list-style-type: none"> ・オーストラリア全域で生産不可

表3 全球気温上昇と水資源に与える影響²¹⁾

全球気温上昇(工業化前に比べて)	影響
1.0～1.7	<ul style="list-style-type: none"> ・水温上昇による水質悪化 ・沿岸帯水層への塩水浸入 ・かんがい水需要が気候変化に応じて変化 ・より強い降水現象により洪水被害の増加 ・干ばつ頻度の増加 ・降雪が水資源となっている流域では、河川ピーク流量が冬季にシフト
1.2～3.2	<ul style="list-style-type: none"> ・水温上昇により水質が悪化 ・水質変化は流量の変化によって変動 ・水需要の影響が拡大
>2.0	<ul style="list-style-type: none"> ・水供給・需要と水質への影響が拡大
1.5～2.0	<ul style="list-style-type: none"> ・水不足人口が約6～20億人増加、とくにアジア途上国で深刻
>1.5	<ul style="list-style-type: none"> ・水資源変動に脆弱な地域では水供給減少と水質の劣化、洪水と干ばつの増加

5. 本研究により得られた成果

本年度は、まず安定化濃度と影響閾値等の議論の経過について整理し、温暖化抑制目標設定の基礎となった影響の危険なレベルについて明らかにした。次に、温暖化の危険なレベルを判断するために、影響の閾値をどのようなアプローチで捉えたらよいか、既存の手法を整理した。さらに、気温上昇量と影響や閾値について現時点の種々の知見を基に、おおよそ以下のような危険なレベルの定量的な整理を行った。これらの値は、現段階では目安という位置づけであり、今

後さらに知見が加わることにより、より確からしい危険なレベルの定量的な評価を行うことができる。(ここで気温上昇は産業革命以降、既に約0.6 上昇していること、日本を含む北半球の中高緯度地域は、世界平均気温と比較して気温上昇幅が大きいことに留意することが必要である)

✓ 生態系への影響

- 1 ~ 1.5 生態系への影響
- ~ 1 サンゴ礁

✓ 社会経済システムへの影響

- 2 ~ 3 食料生産への影響
- ~ 2 途上国の食料生産への影響
- ~ 2 水資源への影響

✓ 地球システムへの影響

- 1 ~ 2 南極やグリーンランド氷床の融解の開始
- 3 以上 海洋大循環停止の可能性など

6 . 引用文献

- 1) Agrawala, S., 1998: Context and early origins of the intergovernmental panel on climate change, *Climate Change* , 39, 605-620.
- 2) IPCC, 1996: *Climate Change Synthesis Report*.訳は環境庁, 1996: IPCC地球温暖化第二次レポート, 中央法規、128pp.
- 3) Vellinga, P. and R.J. Swart, 1991: *The Greenhouse marthon: A proposal for a global strategy*, 18, vii-xii.
- 4) IPCC, 1990: *Climate Change The IPCC Scientific Assessment*, 365pp.
- 5) IPCC, 1994: *IPCC Special Workshop Article 2 of the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 39pp.
- 6) Wigley, T.M.L., R. Richels, and J.A. Edmonds, 1996: Economic and environmental choices in the stabilization of CO2 concentrations: choosing the right emissions pathway. *Nature*, 379, 240-243.
- 7) WBGU(German Advisory Council on Global Change), 1997: *Targets for Climate Protection*, 1997.
- 8) IPCC, 2001: *Climate Change 2001 Mitigation*, 752pp.
- 9) IPCC, 2003: *Report of the IPCC Expert Meeting, Levels of Greenhouse Gases in the Atmosphere Preventing Dangerous Anthropogenic Interference with Climate System*, Geneva, 21 ~ 22 January 2003.
- 10) IPCC, 2004: *Report of the IPCC Expert Meeting on The Science to Address UNFCCC Article 2 including Key Vulnerability Report*. Buenos Aires, Argentina 18-20 May 2004.
- 11) DEFRA(UK Department of Environment, Food and Rural Affairs), 2005: *Summary of the Science Symposium on Stabilization of Climate Change “Avoiding Dangerous Climate Change”* , UK Exeter, 1-3 February 2005.
- 12) IPCC, 2001: *Climate Change 2001 Impact, Adaptation and Vulnerability*, 1032pp.

- 13) Schneider, S. and J. Lane, 2005: An overview of dangerous climate change, 20pp.
- 14) Smith, J. and S. Hitz, 2003: Background paper: estimating global impacts from climate change, OECD Workshop on the Benefits of Climate Policy: Improving Information for Policy Makers, 101pp.
- 15) Hitz, S. and J. Smith, 2004: Estimating global impacts from climate change, Global Environmental Change, 14, 201-218.
- 16) Parry et al. (2001), Millions at risk: defining critical climate change threats and targets, Global Environmental Change, 11, 181-183.
- 17) Hare, W., 2003: Assessment of Knowledge on impacts of climate change Contribution to the specification of Art. 2 of the UNFCCC, 104pp.
- 18) Leemans, R. and A. van Vliet, 2004: Extreme Weather] does nature keep up? 56pp.
- 19) 地球環境研究イニシャティブ, 2003: 気候変動研究の戦略的推進について.
<http://www8.cao.go.jp/cstp/project/envpt/pub/jccsp.pdf>
- 20) 福原直樹・三村信男、2004: 温暖化研究データベースに基づく影響研究の現状把握、地球環境シンポジウム論文集.
- 21) WBGU (German Advisory Council on Global Change), 2003: Climate Protection Strategies for the 21st Century: Kyoto and beyond.

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

原沢英夫: 季刊環境研究、183、47-58(2005).

「地球温暖化がもたらす危険なレベルに関する考察」

原沢英夫・高橋潔・高村ゆかり・亀山康子編: 地球温暖化交渉の行方、大学図書、16-31 (2005)

「球温暖化の影響」

亀山康子: 国際問題、541号、2-15 (2005)

「京都議定書の発効と国際関係」

亀山康子: 広領域教育、No. 59、11-19 (2005)

「気候変動問題の将来枠組みにおける衡平性」

亀山康子: 高村ゆかり、亀山康子編、「地球温暖化交渉の行方」、大学図書、150-157 (2005)

「2013年以降の制度を枠づける基本的な考え方: 衡平性」

(2) 口頭発表(学会)

西本裕美、松岡謙、脇岡靖明: 環境経済・政策学会2005年大会

「京都議定書以降の気候変動対策における目標設定及び削減義務の分担に関する定量的評価」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

環境省の中央環境審議会地球環境部会「気候変動に関する国際戦略専門委員会」における気候変動対策を目的とした将来制度の検討において、本研究成果を踏まえて意見した。