

望ましい CO₂ 濃度安定化目標

小田潤一郎, 秋元 圭吾, 林 礼美, 本間 隆嗣, 佐野 史典, 友田 利正

地球温暖化は環境問題の中でも近年特に注目されつつあり, 国際関係といった意味でも重要性を増しつつある。ポスト京都議定書の議論をより有効なものとするためにも, 温室効果ガスの大気中濃度安定化といった長期目標の議論がなされつつある。IPCC 第四次報告書に見られるような科学的知見は, このような議論に欠かせない情報の一つではあるが, 「望ましい濃度安定化目標」は, 必然的に個人の価値判断に依存する。ここでは, 温暖化に関する基礎的情報, エキスパートへのアンケート調査結果について報告するとともに考察を行う。

キーワード: 地球温暖化, 安定化目標, エキスパート・ジャッジメント, 衡平性

1. はじめに

1.1 温暖化とエネルギー政策

地球温暖化は 1980 年代後半から国際的に広く注目されつつある環境問題の一つである。特に 2007 年に発行された IPCC 第四次報告書[1]では, 過去 100 年 (1906-2005 年) の間に気温は $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ 上昇し, その原因は人為起源の温室効果ガス排出である可能性が極めて高いとしている。温暖化による被害といった側面からすると, 何らかの温室効果ガス排出の抑制が求められる。

一方, 1973 年の石油危機に端を発する世界的な省エネ, 代替エネルギーの促進, 燃料や電力に対する課税強化, 各種研究開発への政府支援といった「努力」に関わらず, 世界的な化石燃料の消費量および CO₂ 排出量は上昇傾向にある。特に 2000 年以降の中国から分かる通り, 途上国の経済成長と CO₂ 排出の連関は, 依然として強固である。

また, 京都議定書といった国際枠組の有用性は当初高く評価されたものの, 米国が批准せず, またカナダが正式に達成を断念するなど, 京都議定書の限界も同時に認めざるを得ない。2013 年以降の枠組みの議論に関しても議論が紛糾することが予想される。

以上から, 温暖化の被害といった側面からは温室効果ガス排出の抑制が求められるが, 経済的, 社会的, 技術的, そして (国際, 国内) 政治上, 温室効果ガス

排出削減は容易ではない。

1.2 温暖化の長期目標の有用性と課題

こうした状況の中で, 温暖化の長期目標に関する国際的合意が仮になされた場合, あるいは合意が困難でも暫定的な長期目標を前提とすることが可能であれば, 次のような利点が期待できる。

- 1) ポスト京都議定書といった比較的短期的な国際枠組みに関する議論が噛み合うようになる
- 2) 耐用年数が数十年以上に渡る設備, 例えば発電所などへの投資動向に影響を与えうる
- 3) 民間や政府の研究開発に対しインセンティブを高める

IPCC 第四次報告書に見られるような科学的知見は, 温暖化の長期目標を議論する際に不可欠な情報ではあるが, 望ましい長期目標は, 必然的に個人の価値判断に依存する。次の項目は, 個人の価値判断に依存する要素の一部である。

- ・ 途上国 (特に最貧国) と先進国の「差異のある責任」に対する考え, 衡平性
- ・ 各種不確実性, 予見不可能性, 時間軸に対する考え方 (割引率), 世代間の衡平性
- ・ 温暖化の損害 (および便益) に関する捉え方 (例えば, 生物種の減少, 寒冷地での健康被害の低減など)
- ・ 何を危険と見なし, 何を避けたいか

1.3 目的と実施内容

このような温暖化の長期目標に関する有用性と課題の両者を共に認識しつつ, 現在得られる知見に基づく「最も望ましい CO₂ 濃度安定化目標」はどの水準かという課題に対して知見を得ることを目的とし, 著者等はエキスパート・ジャッジメント (以下 EJ と表記)

おだ じゅんいちろう, あきもと けいご, はやし あやみ, ほんま たかし, さの ふみのり, ともだ としまさ (助地球環境産業技術研究機構 (RITE) システム研究グループ)

〒619-0292 木津川市木津川台 9-2

を実施した。

このEJの特徴の一点目は、科学的知見と個人の価値判断を可能な限り区別するよう努めた点である。科学的知見と個人の価値判断を混同し議論を進めることは、議論をより複雑にする。例えば、EUは「産業革命以前比で2°Cが閾値であり、2°C未満の気温上昇に抑制すべき」と1990年代後半から主張し、時折この主張は科学的知見に基づくとの表記も見受けられるが、科学的にそういう閾値が存在しないことはTolの批判から明らかである[2]。

本EJの特徴の二点目は、どの水準の濃度安定化レベルが望ましいかを、複数の安定化レベルを相互に比較しつつ探索した点である。すなわち、行動するか、しないかという二者択一の問題設定ではなく、行動することを自明とし、具体的にどの程度の行動が良いのか（望ましい安定化レベルはどのあたりか）を探索した点である。

本報では、EJを行うに当たり事前に著者等で推定を行った各種データ、EJの結果、および考察についてまとめる。なお、詳細については文献[3]を参照されたい。

2. エキスパート・ジャッジメント (EJ) を行うにあたっての基礎情報の推定

IPCC SRES B2 (環境重視・地域志向) の人口、GDP シナリオを基準としつつ、現在得られている科学的知見に基づき、安定化レベル別の気候変動量、CO₂ 排出量低減のためのコスト増分、温暖化影響・適応策について、著者等に推定を行った。次に示すのは、これら分析の一部である。

2.1 CO₂ 排出量、大気中濃度、気温上昇の推定

IPCC SRES B2 の基準排出に対し (Ref と記載)、大気中 CO₂ 濃度を 450, 550, 650 ppmv へ安定化させるケース (それぞれ S 450, S 550, S 650 と記載) について計算を行った。世界の CO₂ 排出量、大気中 CO₂ 濃度、全球平均気温の上昇を、それぞれ図1から図3に示す。図3の全球平均気温の上昇は、産業革命以前の気温を基準とした上昇幅を示しており、気候感度は IPCC AR4 の最良推定値 3°C を用いた[1]。

これらの図から、大気中 CO₂ 濃度、全球平均気温は、極めて強い慣性が働くことが読み取れる。すなわち S 450 のように世界の CO₂ 排出を 2050 年時点で現状より低下させるような大幅な削減が早期に実現されたとしても、その後平均気温は上昇を続ける。注意と

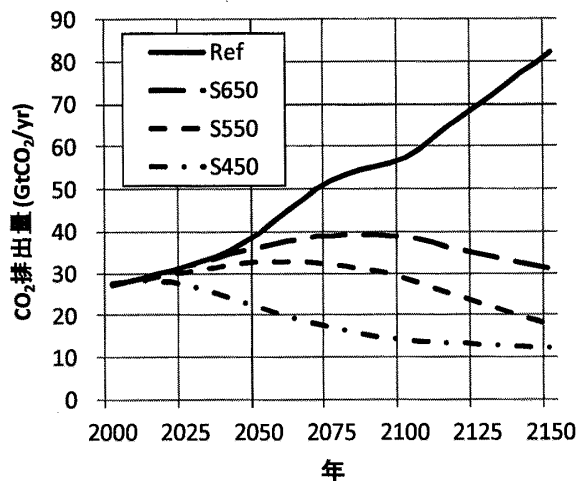


図1 世界の CO₂ 排出量

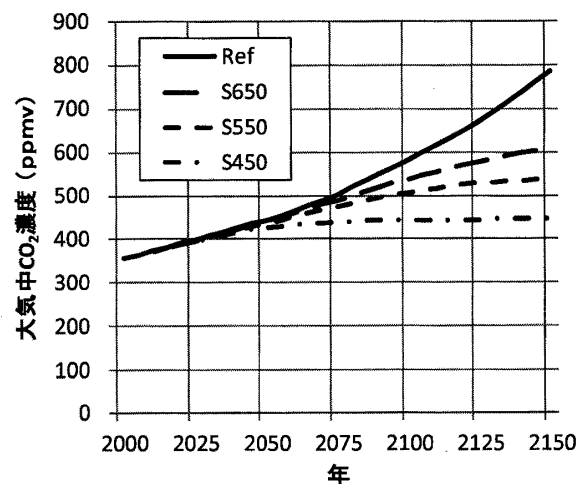


図2 大気中 CO₂ 濃度

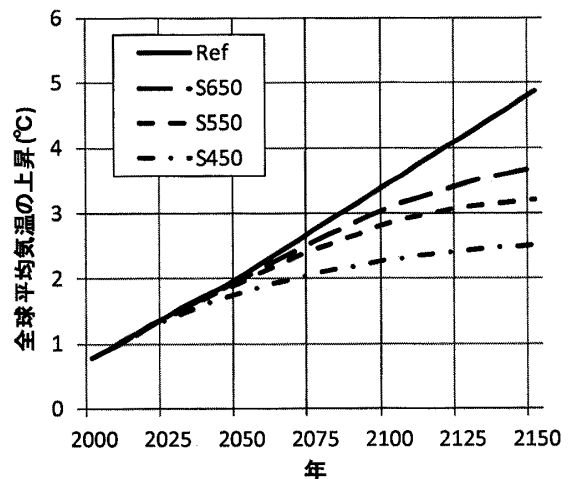


図3 産業革命以前比の全球平均気温上昇

して、図1と図2の間の不確実性は、相対的にそれほど大きくないが、図1と図3の間の不確実性は極めて大きく、例えば IPCC AR4 WG1 p.70 では、B2シ

ナリオの最良推定値を 2.4°C, likely range を 1.4 から 3.8°C としている (値は 1980-1999 年平均比の 2090-2099 年平均気温)。1980-1999 年平均気温は産業革命以前と比べ約 0.7°C 上昇したので、図 3 の Ref は IPCC の示す最良推定値 2.4°C とほぼ同水準である [1]。

なお CO₂ 以外の温室効果ガスは排出量データの信頼性が CO₂ と比べ劣るため、ここでは CO₂ 以外の温室効果ガスは安定化レベルの差異に関わらず同量排出されるものとして推定を行っている。

2.2 CO₂ 削減によるコスト増分の推定

著者等は、エネルギーシステムモデルの一つである DNE 21 モデルにより、Ref と比べ S 450, S 550, S 650 において、エネルギーシステムコストがどれだけ増加するかを算出した。DNE 21 モデルは、エネルギー供給側 (例えば発電) に関して詳細な技術区分を行った線形計画モデルであり、エネルギーシステムコストの最小化を目的関数とする。

2100 年を超える長期を扱うため、エネルギー需要側 (例えば家庭の暖房需要、給湯需要、給湯需要、各種家電による電力需要等) については、技術区分を行わず、Ref では所与のエネルギー需要があるものとして計算される。S 450, S 550, S 650 においても、その CO₂ 制約を達成するという条件の下、エネルギーシステムコストの最小化が行われ、また長期価格弾性値によりエネルギー需要量 (電力等) が増減する (DNE 21 の詳細については、文献 [4] を参照のこと)。

DNE 21 モデルを用いて、S 450, S 550, S 650 の 2100 年時点のエネルギーシステムコスト増分を算出すると、それぞれ 230, 1,180, 2,750 [billion US₁₉₉₀ \$/yr] となり、Ref 比の増加率はそれぞれ 2%, 13%, 30% となる。割引率は、年 5% として算出した。

このようなコスト上昇をどう見るかが問題であるが、例えば 2100 年時点の S 550 におけるコスト増分 1,180 [billion US₁₉₉₀ \$/yr] は、2100 年時点の人口一人あたりで見ると 120 [US₁₉₉₀ \$/capita/yr] (付属書 I 国のみですべて負担すると 1,000 [US₁₉₉₀ \$/capita/yr]) となる。

ここでのコスト増分は、世界の全地域、全部門の限界削減費用が均一化しコスト最小化が図られる理想的なケースを前提とし算出している。したがって、実際生じるであろうコスト増分は、より大きいことに注意が必要である。

2.3 温暖化影響・適応策の評価および推定

a. 海面上昇・沿岸域

MAGICC ベースの簡易気候変動モデルにより海面上昇幅を推計。熱膨張等の要因により、2100 年時点では 1990 年に比べ、Ref では 50 cm, S 550 では 43 cm の海面上昇。

b. 農作物

GIS を利用した AEZ (Agro-ecological Zones) モデルの枠組みを利用し、それを拡張したモデルを利用。Ref の場合、小麦、米の生産ポテンシャルが 1990 年比で +19%, +48% に留まるが、これに対し S 550 の場合、それぞれ +32%, +53% となる。*生産性 (t/ha) 向上のため、生産ポテンシャルはいずれも増加。

c. 健康

マラリア、デング熱といった生物媒介性感染症は、経済成長に伴い解消される見込。一方、温暖化の進行に伴い熱ストレス (呼吸器疾患、循環器疾患) による死亡者数が増加する。具体的には温暖化が存在しない仮想的な 2100 年の暑さ起因死亡者数と比べ、Ref で 490 万人/年, S 550 で 382 万人/年 それぞれ死亡者数が増加。

(温暖化の進行に伴い、同時に寒さ起因の死亡者数は減少。温暖化が存在しない仮想的な 2100 年の寒さ起因死亡者数と比べ、Ref で 789 万人/年, S 550 で 616 万人/年それぞれ死亡者数が減少。すなわち、温暖化の進行は正味で死亡者数を減少させる方向へ働く。)

d. 陸上生態系

BIOME 4 により植生の分布ポテンシャルを算出し、ミレニアム生態系評価プロジェクト [5] を参考にしつつ、温暖化に起因による種の減少を推定。2100 年時点で、温暖化に起因による種の減少は、Ref の場合 7.9% となるが、S 550 の場合 6.1% の減少に抑制される。*種の減少の最大要因は農地開拓・森林減少等の土地利用変化で、これは温暖化の影響よりも大きい。

e. 熱塩循環 (THC)

気候感度の不確実性を明示的に考慮しつつ、文献 [6] の閾値を参考に、THC の崩壊確率を推定。Ref では THC 崩壊確率が 57% から 93% であったが、S 550 では 2% から 7% と低減。*文献 [6] から概算すると THC 崩壊の時期は、2150 年から 2200 年の間と見込まれる。

f. 水資源

文献 [7] の分析手法に基づき、大気海洋結合大循環モデル MIROC 3.2 (hires) の水流出量、全球河道流路網モデル TRIP、グリッド別人口分布などに基づき、

一人当たりの年間流出量 (m³/capita/yr) を推定。温暖化の進行は、総じて世界の多くの地域で降雨量増大をもたらす水ストレスを解消させる方向に働くが、地中海沿岸から中東、南アジア (西部) において一人当たりの年間流出量を減少させる。

ただし、温暖化の進行に関係なく、そもそも降雨量の少ない地域において人口増加が著しく、温暖化による流出量変化よりも人口増加の方が結果をより左右する点に注意が必要である。

g. 氷河・氷帽

山岳氷河は河川流量や地下水を通して人間生活に深く関わっている。短期的には、氷河湖の決壊により洪水被害が発生する可能性が高い。

h. グリーンランド氷床

グリーンランド氷床に関して、数千年を超える時間スケールの分析例としては、文献[8]などがある。グリーンランド氷床融解による海面上昇の影響は、今後100年間で (1980-1999年比の2090-2099年の海面上昇幅は) 1cmから6cmとされる (B2シナリオ、ただし氷のダイナミックな移動や炭素循環フィードバックの不確実性は考慮されていない値) [1]。

i. 西部南極氷床 (WAIS)

西部南極氷床 (WAIS) の崩壊に関して、最近では、氷床のダイナミクス (これまで考えられてきた以上の氷床の移動) といったプロセスが注目されつつある [1]。

j. 異常気象 (極端な気象)

熱波の頻度が20世紀の100年間に増加しつつあり (very likely)、その原因は人為起源の温室効果ガス排出である可能性が高い (likely)。今後は、ほとんどの地域での真夏日の頻度増加 (virtually certain)、ほとんどの地域での降雨強度の増大 (very likely)、旱魃の影響を受ける面積の増大 (likely)、より激しい熱帯性低気圧の数的増加 (likely) が見込まれる (具体的に likely は66%超、very likely は90%超の尤度を示す) [1]。

k. 漁業

大気中 CO₂ 濃度の増大に伴い海洋酸性化は必然的に進行する。プランクトン生成への影響を通して、漁業等への影響が懸念される。漁業に関しては、海水温の上昇、海流の地理的变化、海洋酸性化によるプランクトン減少により、漁場の地理的变化や魚個体の小型化などが懸念される。

l. 海洋生態系

海水温上昇に伴う珊瑚の減少、海洋酸性化といった温暖化に伴う事象のみならず、汚染、乱獲といった人為的影響による生物多様性・生物種の減少が危惧される。

m. 林業

(森林火災、病虫害被害に関して仮に変化が生じない場合) 降雨量増大に伴う気温上昇、大気中 CO₂ の増大に伴い、樹木の生育が早まり、木材供給ポテンシャルは増加する。一方、温暖化により森林火災、病虫害被害がより拡大する可能性があり、温暖化による正味の影響は不明。

n. 畜産

熱ストレスにより生産性、受精率が低下する。またマダニ等の生物媒介性感染症により損失が生じる可能性がある。量的な評価は現状では困難。

o. その他産業

観光産業に関して、局所的な影響はあるが、世界全体で見ると所得向上による影響が大きい。保険、貿易、小売、エネルギーサービス (冷暖房、給湯など) にも変化が生じる。

3. EJ 第一ステップの概要および結果

3.1 はじめに

エキスパートジャッジメント (EJ) に関して、多くの先事例がある。ここでは、温暖化が広範に渡る問題であるため、緩和コストと影響事象5項目の量的なバランス (2100年時点) に注目した第一ステップと、総合的観点に注目した第二ステップの二段階とした。二段階としたことで、回答者は情報の整理や判断をしやすくなるといった便益も期待できる。

エキスパート (回答者) は、温暖化問題に関して専門的な研究実績を有する PHOENIX プロジェクト [3] の総合評価委員会、影響・適応評価 WG、緩和策評価 WG のメンバー、およびプロジェクトに携わった RITE 研究員とした (総計25名)。

3.2 EJ 第一ステップの概要

最初に Ref から S 550 とした場合の、影響緩和の便益について一対比較でその便益の相対的大きさについて質問した。具体的には2.3節で挙げた a. 海面上昇・沿岸域から e. 熱塩循環 (THC) までの5項目であり、これらは著者らにより物理量の定量化が可能で、重要度が高く、また互いに重複が比較的少ないと考えられる事項である。

Ref から S 550 とした場合の影響緩和の便益を金銭換算するため、c. 健康影響に関して、仮想的な一人当たり死亡回避価値の金銭額を質問した。この質問に対する回答として、何を基準とするかは各回答者に委ねられている。比較的低額（数千円から数百万円/人）の解答を行った回答の根拠については、気温上昇への適応可能性、寒さ起因死亡者の減少、死亡者が高齢という記述が目立つ。一方、比較的高額の解答（数千万円から数億円/人）を行った回答の根拠については、先進国の確率的生命価値（VSL）、環境規制の事例といった回答が目立つ。

なお、質問の文面上「一人当たり死亡回避価値」と表記しているが、これは確実な一人の死を意味しているのではなく、数十億人といった規模の世界人口のうち、暑さ起因により死亡する確率が微小分上昇し、その期待値を「一人当たり死亡回避価値」という単位で暫定的に表現しているので注意が必要である。

3.3 EJ 第一ステップの結果

一人当たり死亡回避価値にて上下端の解答を行った回答者を除く 23 名にて相乗平均をとった。その結果、Ref から濃度安定化させることによる温暖化影響緩和の便益は、S 650, S 550, S 450 の順に、618, 820, 1,095 [billion US₁₉₉₀\$/yr] である。つまり、ここでの結果においては、S 650 においてもある一定の緩和便益があり、S 450 にしたからといって緩和便益が S 650 比でそれほど追加されるわけではない。

図 4 に示した通り、CO₂ 低減のためのコスト増分は、S 650 では比較的小さいものの、S 450 では相対的にかなり大きくなる。緩和便益とこのコスト増分の差をとったものが総便益となるが、図 4 から S 650 が

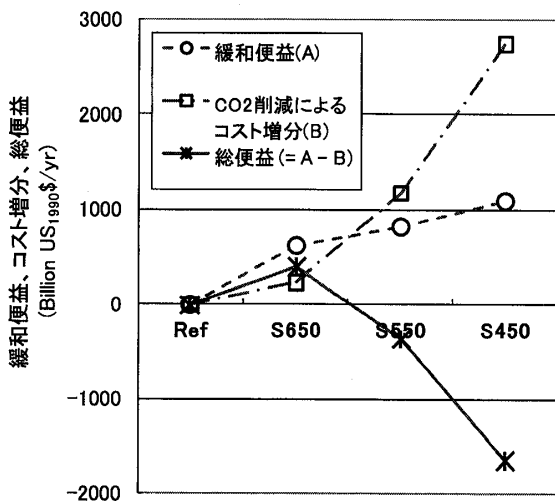


図 4 緩和便益と総便益 (EJ 第一ステップ)

一次最適となる。

ただし、S 650 が一次最適との結果は、あくまで緩和便益を回答者間で平均し、費用便益的考えに基づき算出したものであり、2100 年時点の影響事象 5 項目に絞り評価したものである。

4. EJ 第二ステップの結果

4.1 EJ 第二ステップの結果

第二ステップでは、2.1 節から 2.3 節の情報を提示するとともに、回答者本人の一次最適安定化レベルも提示した。その上で、倫理的側面等あらゆる要素も含めた上で、望ましい安定化レベルを尋ねた。結果を図 5 に示す。第一ステップの一次最適安定化レベルと比較すると、第二ステップ回答は数値の小さい側に収束する傾向にあり、第二ステップ回答の相加平均値は 550 ppmv 程度である。

次に、望ましい安定化レベルの解答に際し、重要視した項目を尋ねた。結果を図 6 に示す。重要視度が高い項目は、順に緩和コスト、異常気象、THC である。地域間の差異、時点間（世代間）の差異については、重視したくても現実的方策が存在しないとの回答も見受けられた。

4.2 EJ 第二ステップの考察

重要視度と望ましい安定化レベル回答の関連を統計的に分析した結果、陸上生態系、海洋酸性化は有意な連関が観察された。すなわち、陸上生態系を他の要素より重視する回答者はより数値の低い濃度安定化レベルを選択し（図 7 左）、海洋酸性化（CO₂ 濃度上昇とともに必然的に進む）を重要視した回答者はより数値の高い濃度安定化レベルを選択している。

一方、重要視度の高い緩和コスト、異常気象（図 7

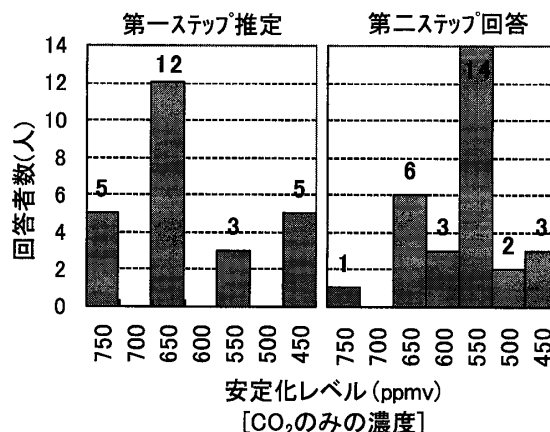


図 5 望ましい CO₂ 濃度安定化レベル

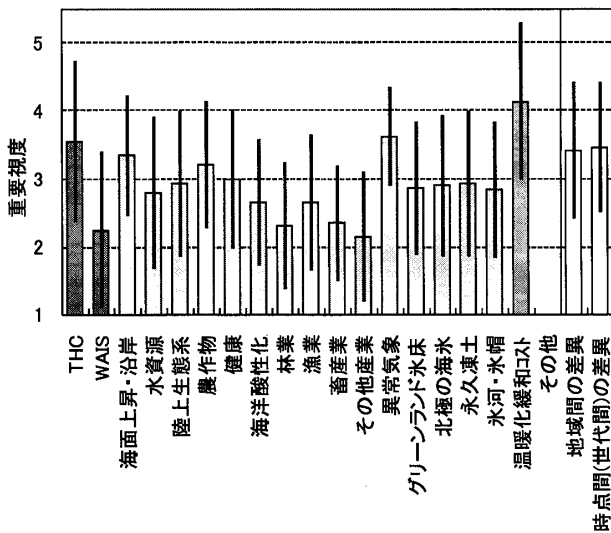


図6 項目別重要視度の相加平均，標準偏差

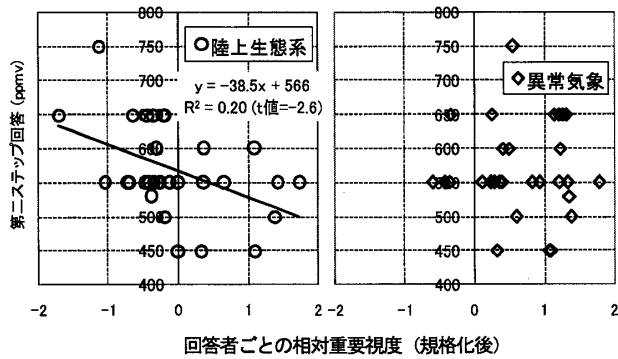


図7 項目別重要視度の相加平均，標準偏差

右), THCは, 安定化レベルの回答との連関が観察されなかった(以上, 有意水準2.5%での判定, t値絶対値は2.07以上が必要)。

5. まとめ

本報は, 科学的知見と個人の価値判断を明確に区別しつつ, エキスパート・ジャッジメント (EJ) により, 最も望ましいCO₂濃度安定化レベルについて探索したものである。影響事象, 時点を限定したEJ第一ステップでは, S 650が一次最適となり, より総合的なEJ第二ステップでは平均をとるとS 550が選択された。これは, EUが従来から主張している2°C目標(CO₂ onlyで350 ppmvに相当), 2007年のG8で真剣に検討することとなった2050年半減目標(同400 ppmvに相当)とは異なる水準である。

今回EJ対象者が限定的であり, また「専門家も分

野が違くと素人, 専門家もバイアスやヒューリスティックから逃れられない」という指摘もあるが, 550 ppmv (CO₂ only) が望ましいという結果は, 温暖化の被害と対策コストを相互に比較し得られたものである。より大幅な削減目標を掲げることは, 一見論理的に優れているように映るが, 国際的な幅広い合意が得られるかといった観点を考慮しておらず, 実質的な行動の合意, すなわちCO₂排出の低減を遅らせる可能性が高い。550 ppmvの持つ「中庸の徳」にも目を向けるべきではないだろうか。

謝辞 本研究は, METI補助事業における「国際産業経済の方向を含めた地球温暖化影響・対策技術の総合評価 (PHOENIX)」の成果の一部である。東京理科大学森俊介教授, 東京大学山地憲治教授はじめ多くの方々から貴重な指導助言をいただいた。深く感謝の意を申し上げる。

参考文献

- [1] IPCC, “Climate Change 2007, the physical science basis,” WGI, Cambridge University Press, 2007.
- [2] R. S. J. Tol, “Europe’s long-term climate target: a critical evaluation,” *Energy Policy*, 35: 424-432, 2007.
- [3] RITE, “国際産業経済の方向を含めた地球温暖化影響・対策技術の総合評価 (PHOENIX),” 平成18年度地球環境国際研究推進事業, 平成19年3月.
- [4] K. Akimoto, et al., “Assessment of global warming mitigation options with integrated assessment model DNE 21,” *Energy Economics*, 26: 635-653, 2004.
- [5] Millennium Ecosystem Assessment, “Ecosystems and Human Well-Being,” Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group, Island Press, 2005.
- [6] T. F. Stocker and A. Schmittner, “Influence of CO₂ emission rates on the stability of the thermohaline circulation,” *Nature*, 388 (28): 862-865, 1997.
- [7] N. W. Arnell, “Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios,” *Global Environmental Change*, 14: 31-52, 2003.
- [8] F. Saito and A. Abe-Ouchi, “Sensitivity of Greenland ice sheet simulation to the numerical procedure employed for ice-sheet dynamics,” *Annals of Glaciology*, 42 (1): 331-336, 2005.