

第2章

地球温暖化の科学的知見と 電気事業への影響

2-1 科学的知見

2-1-1 GHG排出量と気温上昇の関係	10
2-1-2 長期目標の科学的根拠	17
コラム1：地球システムモデル	28
コラム2：海洋生態系モデル	29
コラム3：海洋酸性化	30

2-2 電気事業への影響

2-2-1 概説	31
2-2-2 影響評価のための詳細な気候予測情報	32
2-2-3 電力設備への影響と対策	40
コラム4：日本の過去の気象場の再現	45
コラム5：地球温暖化と生物多様性条約	46
コラム6：付着生物	47



2-1 科学的知見

地球温暖化の対策は、CO₂等の温室効果ガス（greenhouse gas: GHG）の排出を減らす施策と、変化しつつある気候に適応するための施策がある。前者は緩和策と呼ばれ、21世紀中およびそれ以降も見通して、長期的に取り組むべき課題である。後者は適応策と呼ばれ、近未来に予想される不可避の気候変化への対策として言及されることが多い。

どのような緩和策をいつ頃から実施するかは、関連する技術開発の動向を考慮しつつ、費用対効果の点から検討されるべき課題である。その際、気候変化が大きくなると、有効な適応策が限られ、そのための費用も増すこと、および気候変化の影響の度合いとその変化に適応する能力が、地域によって大きく異なることに留意する必要がある。したがって、緩和策と適応策は総合的に検討すべき課題である。

本章では、緩和策の前提となる将来の気候変化とその影響への適応に関する科学知見を述べる。

緩和策は、国連の気候変動枠組み条約（United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC）の下、人為的な気候変化の危険な影響が生じないように、大気中の温室効果ガス（greenhouse gas: GHG）濃度を安定化することが目標とされる。この安定化目標の目安としてしばしば言及されるのが、工業化前（1750年頃）を基準とする気温上昇を世界全体の平均で2℃以下に抑える目標である。ただし、地球温暖化の科学には様々な不確実性があり、2℃目標の根拠は必ずしも明確ではない。したがって、適応策も含めた地球温暖化対策の議論では、常に不確実な情報に基づく意思決定が求められる。ただし、科学知見も年を追う毎に充実しており、地球温暖化対策の意思決定に最新の知見を柔軟に反映させる必要がある。

このような観点から、当研究所では、適切な緩和目標の立案に資するために、独自のモデル研究を実施する傍ら、IPCCの評価報告書を始めとする多岐にわたる科学知見を総合的に俯瞰して、最新の情報を整理・分析している^{(1),(2)}。ここでは、これまでの当研究所のモデル研究と情報分析を踏まえて、緩和目標の観点で鍵となる科学知見を解説する。以下、IPCCの評価報告書（Assessment Report）は、慣例にしたがって略称（第1次 - 第5次:

FAR, SAR, TAR, AR4, AR5）で表記する。IPCCには三つの作業部会（WG1, WG2, WG3）があり、それぞれ気候科学、影響・適応、緩和の分野を扱っている。

なお、UNFCCCやIPCCの名称に含まれる「climate change」は「気候変動」と訳されるが、その意味するところは気候の平均状態や変動特性の変化である。ここでは、その原意を踏まえ、「climate variability」（気候の平均状態や各種統計量の変動）と区別するために、「気候変化」を「climate change」の意味で用いる。

2-1-1 GHG 排出量と気温上昇の関係

(1) 気候予測の不確実性

気候安定化の目標となるGHG濃度レベルや気温上昇の上限については大きな不確実性がある。ここでは、CO₂排出量と気温上昇の関係を定量化する指標に注目して、目標を大きく左右する不確実性の問題を述べる。

GHGやその他の気候変化要因は、放射強制力と呼ばれる指標で定量化される。放射強制力は、注目する要因で生じる放射的な外力のことであり、地球のエネルギー平衡における正味の変化をW/m²の単位で表す。

大気中のCO₂濃度の変化については、その放射強制力（ F_{CO_2} ）が濃度の対数にほぼ比例することが知られており、次の近似式⁽³⁾が標準的に使われる。

$$F_{CO_2} = 5.35 \ln(C/C_0) \quad (2-1-1)$$

ここで、 C はCO₂濃度、 C_0 は基準となる工業化前の濃度（約280 ppm、AR5では278 ppm）である。この式を使うと、CO₂とそれ以外の放射強制力の合計に対応する等価CO₂濃度（ C_{eq} ）が次式で表される。

$$C_{eq} = C_{exp}(F_{other}/5.35) \quad (2-1-2)$$

ここで、 C_{other} はCO₂以外の放射強制力である。通常、GHG濃度と呼ばれるのは、この式に基づく等価CO₂濃度であり、単位はppm CO₂eq、あるいはppm eqのように表記される。

放射強制力が濃度の対数に比例することから、気温上昇も濃度の対数に比例すると考えられる。この関係を図2-1-1に示す。濃度の単位ppmは体積比（モル混合比）で百万分の一を表し、1 ppmのCO₂濃度の増加は大気中の炭素の質量が2.12 GtC増加することに相当す

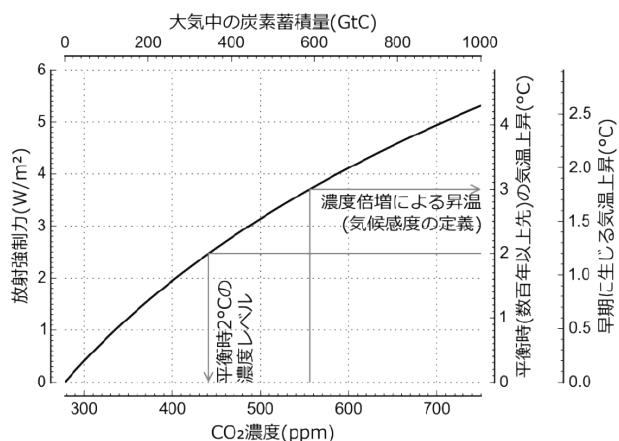


図2-1-1 CO₂濃度と気温上昇の関係

る。ここで、GtCはCO₂のC（炭素）のみの質量で10億トンを表し、CO₂全体の質量はその3.67倍（分子量の比44/12）である。図2-1-1の上側の横軸には、濃度の増加に対応する大気中の炭素の増分を示している。排出されたCO₂のうち大気に残る割合がわかれば、排出量と濃度の増分が対応づけられる。WG1 AR5⁽⁴⁾によると、この大気残留率は現在のところ40%強と推定されている。最近の世界全体のCO₂排出量は年間10 GtC程度であり⁽⁵⁾、1年当たり2 ppm程度の増加率に対応する。2013年の年平均CO₂濃度は396.0 ppmであり⁽⁶⁾、2015年頃には400 ppmに達すると予想される。ただし、大気残留率は様々な要因で変化し、不確実性も大きい。なお、CO₂以外のGHGの排出量を地球温暖化係数（global warming potential: GWP）でCO₂相当量に換算したものは、ここで述べた濃度・質量換算や大気残留率の考え方には合致しない。

気温上昇と放射強制力の比は気候感度パラメータと呼ばれ、特に、濃度倍増の放射強制力（3.7 W/m²程度）に対する気温上昇は気候感度と呼ばれる。放射強制力に対する気温の応答は、熱容量の大きい海洋のはたらきによって遅れが生じる。このため、気候感度は、気温上昇が一定となる平衡状態と、変化が続いている過渡状態で区別され、それぞれ平衡気候感度（equilibrium climate sensitivity: ECS）、および過渡的気候応答（transient climate response: TCR）と呼ばれる。TCRは、大気CO₂濃度が年率1%で増加して2倍に達する70年目の気温上昇と定義されている。

図2-1-1の右側の縦軸には、ECSとTCRが3.0℃と1.8℃として、それぞれに対応する気温上昇を示してい

る。この場合、平衡時の気温上昇が2℃となる濃度レベルは440 ppmとなる。WG1 AR4⁽⁷⁾では、ECSの最良推定値が約3℃と評価され、450 ppm程度が2℃目標に対応する濃度レベルとして注目された。ところが、気候感度の不確実性は非常に大きく、可能性が高い（66%超の確率）と評価された範囲は、表2-1-1に示すように、AR4では2℃から4.5℃、AR5では1.5℃から4.5℃におよぶ。すなわち、図2-1-1の温度の目盛は、不確実性の幅が1/3ないし1/2から1.5倍におよぶことになる。

この不確実性の幅は、実際のところ、過去30年以上の間ほとんど変わっていない。気候感度に関係するのは、雲などの変化が気温変化を増幅あるいは減衰するフィードバックと呼ばれるはたらきである⁽⁸⁾。個々のフィードバック過程の理解は着実に進んでおり、AR5では、不確実性の大部分が低層の雲のはたらきによることが特定されているが、気候感度の幅を狭めるのは依然として難しいようである。過渡応答の大きさについては、気候のフィードバックの他に、海洋の熱吸収が関係する。ECSに対するTCRの比率は、次項で述べる気候モデル計算から0.6程度と見込まれるが、この値もモデルによってばらつきがある。図2-1-1で仮定した1.8℃は多数のモデルの平均である。

AR5の気候感度の評価では、ECSの最良推定値が示されなかったことと、不確実性の幅が低い方に若干広がったことが注目される。気候感度の値は、基本的には気候モデルで評価されるが、様々な観測情報から推定する方法もある。AR5で改訂されたところは、観測情報に基づく推定で低めの値が報告された⁽⁹⁾ことが関係する。この推定は、気温変化とその変化の原因となる放射強制力の比率を観測情報から求めるものである。ただし、この推定には少なからず誤差があり、僅かな見積りの違いで結果が大きく変わる。特に、化石燃料の燃焼などに伴って大気中に放出されるエアロゾル（微小粒子）の放射強制力が大きな不確実要因である。

様々な気候変化要因について、AR5で評価された2011年時点の放射強制力（1750年基準）を図2-1-2に示す。CO₂濃度の変化による放射強制力は1.82 [1.46–2.18] W/m²（[]内は90%信頼区間）、CH₄、N₂O、ハロカーボン類を加えた長寿命GHG全体では2.83 [2.26–3.40] W/m²である。このGHG全体の等価CO₂濃度は470 ppm eq程度であり、TCRが1.8℃の場合の気温上

表 2-1-1 AR5 と AR4 による気候感度の評価

	AR5	AR4
平衡気候感度 (ECS) 可能性の高い範囲 最良推定値 低い値の限定 高い値の限定	1.5°Cから4.5°C 非提示 1°C未満: <5% 6°C超: <10%	2°Cから4.5°C 約3°C 1.5°C未満: <10% 6°C超: 排除不可
気候モデル	3.2±1.3°C	3.2±1.1°C
過渡気候応答 (TCR) 可能性の高い範囲 低い値の限定 高い値の限定	1.0°Cから2.5°C 非提示 3°C超: <5%	非提示 1°C超: >90% 3°C超: <10%
気候モデル	1.8±0.6°C	1.8±0.5°C

昇は 1.4°C 程度となる。一方、観測された気温上昇は、AR5 で評価された 1850-1900 年から 2003-2012 年にかけての変化が 0.78 [0.72-0.85] °C である。この違いは、TCR の不確実性も関係するが、GHG 以外の気候変化要因である程度説明される。中でも、エアロゾルの影響が大きく、日射を遮る効果や雲の変化を介した間接的な効果により、全体として寒冷化に寄与する。ただし、エアロゾルの放射強制力は最大の不確実要因でもある。

AR5 では、人為起源の放射強制力の合計を 2.3 [1.1-3.3] W/m² と評価している。これは、AR4 で評価された 2005 年時点の放射強制力 1.6 [0.6-2.4] W/m² と比べて 44% の増加である。この違いは、評価時点の差 (2005 年から 2011 年にかけての GHG 濃度の増加) に加え、エアロゾルの冷却効果が下方修正されたことも関係する。

このように、不確実性はあるものの、放射強制力は着実に増加している。ところが、実際の気温上昇は、1998 年頃から停滞したような状態が続いており、近年注目を集めてきた。特に、多数の気候モデルによる近未来の予測は、ほとんどが停滞することなく上昇する傾向を示したことから、その原因が精力的に調査されてきた。この問題は、気温上昇の停滞が「hiatus」(中断や休止の意味) と表現されたことから、「ハイエイタス問題」と呼ばれている⁽¹⁰⁾。

AR5 による人為起源の放射強制力 2.3 W/m² に対して、TCR を 1.8°C として見積られる気温上昇は 1.1°C であり、気候モデルの予測値も平均的にはこの値に近い。一方、観測値は上述のように 0.8°C 程度である。両者の違いには、放射強制力、気候感度、観測情報の不確実性に加え、自然変動も関係する。気候は、大気、海洋、陸面、雪氷域、生態系などから構成されるシステムと捉えられる。放射

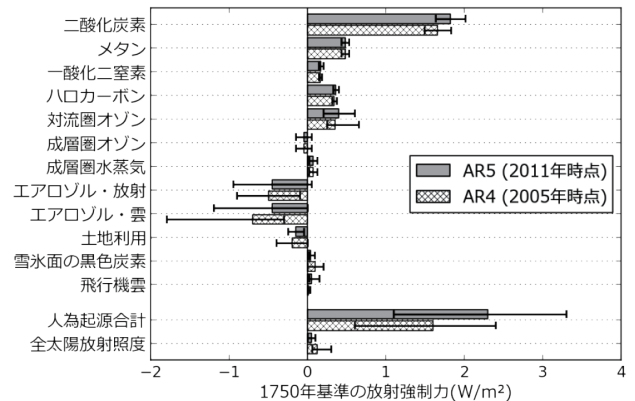


図2-1-2 AR5とAR4による放射強制力の評価

強制力は、気候システムの外部から与えられる加熱・冷却効果である。これに対して、自然変動は気候システムの内部で生じる変動である。

ハイエイタスの原因について、AR5 では放射強制力と自然変動の観点から説明されている。放射強制力については、当該期間の小規模な火山噴火や 11 年周期の太陽活動サイクルにより、GHG 濃度の増加による効果がいくらか相殺されたと考えられている。自然変動については、気候システムに蓄積される熱の配分の観点から説明されている。すなわち、当該期間は深海への貯熱が活発な時期に当たり、海洋表層の温度上昇が相対的に小さくなるという解釈である。この他、一部の気候モデルは気候感度が高過ぎる可能性にも触れている。

このうち、AR5 以降の研究では、熱帯太平洋の大気・海洋相互作用に関係する、10 年以上の自然変動を主因とする見方が主流となっている⁽¹¹⁾。ハイエイタスが熱の配分に関する自然変動の一端であるとする、地球全体の貯熱量は停滞なく増加していると考えられる。実際、海洋の貯熱量は、最近の海洋観測で得られる深海まで含めた水温データから、停滞することなく増加していることが確認されている。さらに、海水の熱膨張による海面上昇も停滞していないという裏づけ情報もある。

問題の 10 年以上の自然変動は、東部熱帯太平洋の水温変動として知られるエルニーニョ (昇温期)・ラニーニャ (降温期) の頻度と関係している。この水温変動は世界平均気温とも連動しており、ハイエイタス期間はラニーニャの傾向であった。本稿執筆時点 (2015 年 8 月) では、前年に 5 年振りに発生したエルニーニョが続いている⁽¹²⁾。このエルニーニョは、2014 年に観測史上最高の世界平均気温をもたらし、それ以前の 1998 年の記録

が更新された⁽¹³⁾。現時点では、ハイエイタスが収束するかどうかわかっていないが、いずれにしろ、ハイエイタスを契機に気候システムの理解が進んだと言える⁽¹⁴⁾。排出削減目標を左右する気候感度などの不確実性についても、今後さらに理解が深まることが期待される。

なお、太陽活動の長期的な変化による自然の放射強制力はAR5では 0.05 W/m^2 と評価されており、人為起源の放射強制力と比べて非常に小さい。また、AR4の評価は 0.1 W/m^2 であり、AR5では下方修正されている。この違いには、11年周期の太陽活動において、最も新しい極小期の活動が、それ以前と比べて弱くなっていることが反映されている。この傾向が将来どうなるかは不明であるが、いずれにしろ太陽活動の長期的な変化は、GHG濃度の増加と比べて小さいことに変わりはない。太陽活動については、雲凝結核に関わる銀河宇宙線との関係に気候変化の原因を見出す主張がある。しかしながら、AR5の評価では、宇宙線と雲量を関連づける確固たる証拠はなく、関連性があったとしても、雲凝結核を介した変化である可能性は非常に低いとされている。

(2) 気候モデル研究

地球温暖化の予測には気候モデルが使われる。気候モデルとは、大気、海洋、陸面、植生、海氷などの現象に既知の法則を当てはめて数式で表現し、地球の気候を計算機でシミュレートするものである。気候モデルには簡便なものから複雑なものまであり、目的に応じて使い分けられる。最も複雑なモデルは、空間3次元にわたって気温、風、水温、海流などの変化を計算するもので、大循環モデル (general circulation model: GCM) と呼ばれる。地球温暖化の科学知見は、GCMとその計算に用いるスーパーコンピュータの発展とともに向上してきた。これまでのIPCC WG1の評価報告書は、その時点で最新のGCMによる予測結果が基盤となっている。

地球温暖化の予測では熱容量の大きい海洋のはたらきが重要である。初期のGCMは大気のGCMに簡略化された海洋モデルを結合したものであったが、1996年のSARから、大気と海洋のGCMを結合したモデル (atmosphere-ocean general circulation model: AOGCM) が利用されるようになった。AOGCMによる長期の気候計算では、基準となる工業化前の条件で、世界平均気温などの値が一定の範囲に保たれる必要がある。初期

のAOGCMでは、気温のずれを抑えるために大気・海洋間の物理量の交換に人為的な調節が施されることがあったが、計算精度が年を追うごとに向上し、2001年のTARの頃から人為調節を不要とするモデルが主流となった。

AOGCMの発展には二つの方向性がある。一つは、空間解像度や個別の物理過程をより精緻にする方向である。物理過程は、雲や放射などの計算格子間隔より小さい規模の現象を指す。個々の物理過程の表現方式の違いは、モデルの精度 (気候の再現性) を大きく左右する。もう一つは、地球の気候形成に関わる要素をより多く取り入れる方向である。AOGCMに統合される要素には、陸面、植生、海氷、大気化学、海洋生態系、炭素循環などがある。このうち、炭素循環は、大気・海洋間、および大気・陸域間の CO_2 交換を詳細に定式化したものである。AOGCMをベースに炭素循環を実装したものは地球システムモデル (Earth system model: ESM) と呼ばれる (コラム1)。ESMは、2007年のAR4に初期の成果が引用され、2013年のAR5で本格的に扱われるようになった。AOGCMとESMでは、気候モデルの外力となる CO_2 の扱いが大きく異なる。AOGCMでは与えられた大気 CO_2 濃度に対して気候の応答が計算されるのに対し、ESMでは排出量と濃度の関係が気候応答と相互に影響する形で計算される。

このように、気候モデルは二つの面で複雑化しており、より詳細な予測情報が得られるようになる一方で、不確実要因も増える傾向にあることに注意が必要である。将来予測の妥当性の判断記述となる過去や現状の気候の再現性は、新しい世代のモデルで着実に向上しているが、モデル間の相違が大きく、将来予測の不確実性は必ずしも縮まっていない。

最近の気候モデル研究は、6-7年毎のIPCC評価報告書のサイクルと連動する形で、国際的なモデル間相互比較研究の枠組みで実施されている。相互比較の対象となる観点やモデル種別には様々なものがあるが、地球温暖化研究の観点では、AOGCMを対象とする結合モデル相互比較 (Coupled Model Intercomparison Project: CMIP) が中核となっている^{(15)~(17)}。

当研究所は、CMIPで主導的な役割を担っている米国大気研究センター (National Center for Atmospheric Research: NCAR) との共同研究を通じて、1990年代か

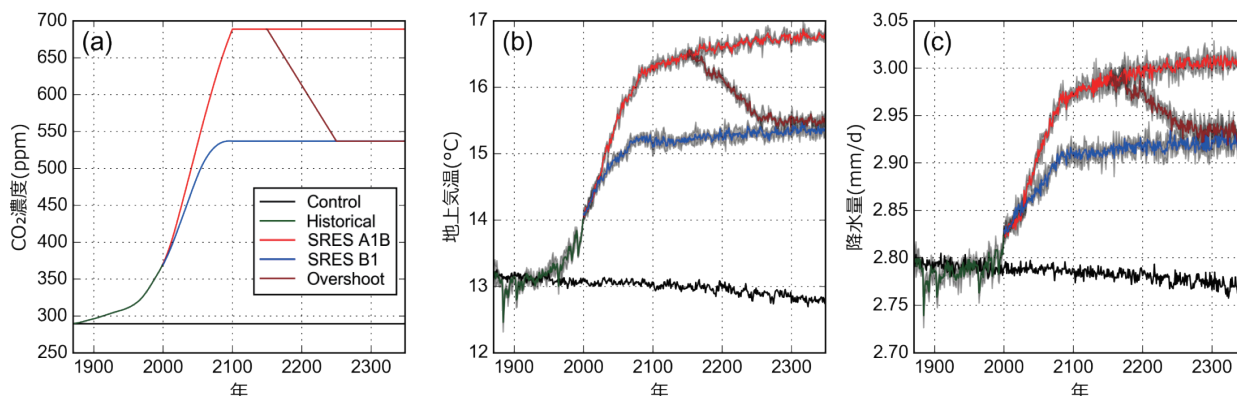


図2-1-3 SRESシナリオの気候計算: (a)大気CO₂濃度の設定、(b)全球年平均地上気温、(c)全球年平均降水強度

CO₂濃度等を18世紀半ばの状態に保つ計算（Control）から、自然変動の状態が異なる3時点を選び、それぞれを初期条件とする3メンバーのアンサンブル気候計算を実施。20世紀再現（Historical）を経て、A1BとB1のSRESシナリオを2350年まで延長して計算。灰色部分は3メンバーアンサンブルの最大・最小の範囲。

ら気候モデル研究に取り組み、2001年のTAR、および2007年のAR4に向けて、主要な成果を創出してきた。当研究所の初期の気候モデル研究については、2001年発行の電中研レビューNo.45にまとめられている。AR4に向けた研究は、「人・自然・地球共生プロジェクト」と呼ばれる文科省の研究プログラムの枠組みで2002-06年度に実施された。これは、国内の気候モデル研究を結集して、2002年に運用が開始された世界最速（2004年11月まで）のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を活用して温暖化予測を実施するという、画期的な研究プログラムであった。

共生プロジェクトと地球シミュレータは、国内の気候モデル研究のレベルを飛躍的に高め、AR4には日本の研究成果が多数引用された。この中で当研究所はオーバーシュートシナリオの気候計算を実施した⁽¹⁸⁾。オーバーシュートとは、気候安定化の目標となる大気CO₂濃度レベルを一時的に超過するという意味である。オーバーシュートは、温度についても目標レベルを一時的に超過する意味で使われるが、ここでは濃度のオーバーシュートに限定する。例えば、2°C目標の目安となる450 ppm eqの場合（ECSが3°Cの想定、図2-1-1）、この濃度レベルで早期に生じる気温上昇は1.2°C程度で（TCRが1.8°Cの想定）、2°Cに達するのは数百年以上先である。このため、450 ppm eqを超過しても、長期的にそのレベルに下がってくれば、2°Cを越えないことは十分あり得る。

AR4に引用された当研究所の成果を図2-1-3に示す。この研究では、AR4の長期予測で使われたシナリオの

うち、A1BとB1を対象に、NCARのAOGCMであるCCSM3を用いて1870年から2350年までの長期計算を実施した。シナリオについての詳細は後述する。CO₂濃度などの各種の気候変化要因は、2000年までは過去の気候を再現するための実測値、2000年以降は各シナリオにしたがった値である。A1BとB1はいずれも排出削減の政策を含まないが、社会経済的な発展の違いによって排出量が異なる。図2-1-3(a)に示すように、CO₂濃度は2100年にA1Bが約690 ppm、B1が約540 ppmに達する。シナリオで与えられるのは2100年までで、その後は2100年時点の値に固定して計算を延長している。この延長計算は、熱容量の大きい海洋のはたらきによる気候の慣性を定量的に評価する目的で、AR4に向けたCMIP3（第3期のCMIP）⁽¹⁵⁾の中で共通に実施されたものである。当研究所は、CMIP3の計算を分担するとともに、CO₂濃度などをA1BからB1のレベルに直線的に下げる計算を追加し、オーバーシュートシナリオで気候変化が回復するかどうかを調査した。

地上気温は、図2-1-3(b)に示されるように、2100年までそれぞれのシナリオに対応して上昇した後、濃度が一定の状態できつりした上昇が続く。A1BレベルからB1レベルに下げる計算は、A1Bを延長した2150年から分岐し、100年後の2250年でB1レベルの条件に一致させ、さらにその状態で100年間続けている。このオーバーシュートの結果は、B1の延長計算と比べると、濃度レベルが等しくなる2250年の時点では若干高いが、その差は徐々に縮まって、100年後には自然変動の幅と同程度になる。降水量の経年変化（図2-1-3(c)）は、

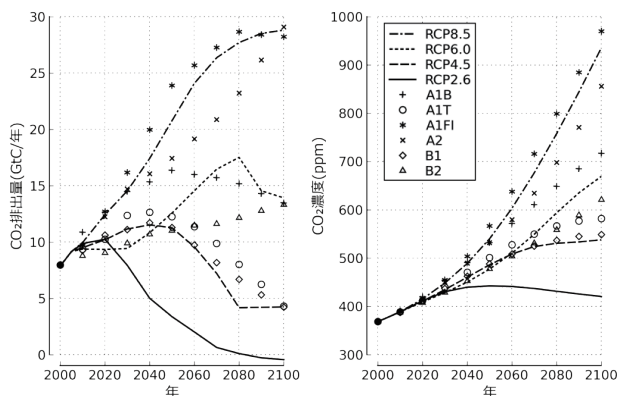


図2-1-4 SRESとRCPのCO₂排出量と大気CO₂濃度

自然変動が相対的に大きいですが、シナリオ間の違いやオーバーシュートを経た結果との差は、地上気温と同様である。このように、大気や地表面の気候要素については、濃度のオーバーシュートで生じた変化が、100年程度で回復することが確認された。また、海洋の深層の応答が関係する海面上昇などは、100年程度では大きな履歴効果が残るが、濃度の低下によって変化が軽減される効果が長期間続くことも確認された。

一連の計算で与えた2100年以降のCO₂濃度は、気候システムの振舞いを調べるための理想化された計算条件である。現実的な排出量の経年変化では、不連続的な濃度の変化は生じない。また、濃度が一定となるのは、排出量と自然の吸収量がバランスした状態であり、その状態が長期間続くのも不自然な条件である。AR4では、濃度一定の下でゆっくりと気温上昇が続くことが、気候変化のコミットメント、あるいはコミットされた気候変化と言及された。これは遅れて生じる不可避の気温上昇を意味するが、濃度一定の条件が不可避というわけではなく、それ自体不自然な条件であることに注意が必要である。2-1-2節では、より現実的な観点から検討したオーバーシュートシナリオについて述べる。

この研究で用いたCCSM3は、代表的なAOGCMであるが、数あるAOGCMのうちの一つに過ぎない。同一の条件で計算しても結果はモデルによってばらつき、他と比べて決定的に優れるモデルは存在しないため、定量的な気候予測情報は、基本的に、CMIPの枠組みで実施される多数のAOGCMの結果から評価される。文科省の研究プログラムは、「21世紀気候変動予測革新プログラム」(2007-11年度)、「気候変動リスク情報創生プログラム」(2012-16年度)と続き、この間、地球シミュ

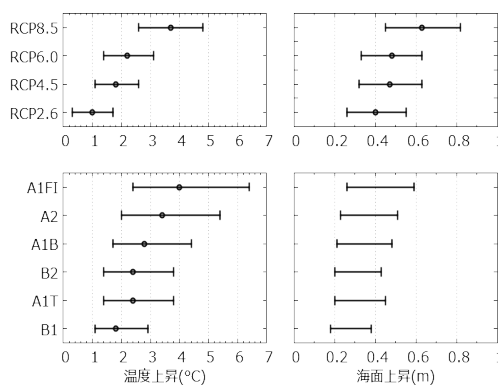


図2-1-5 AR5(上段)とAR4(下段)で評価された20世紀末から21世紀末にかけての気温上昇と海面上昇の予測

レータも2回にわたって更新されている。これらのプログラムでも、AR5に向けて実施されたCMIP5⁽¹⁶⁾や、その後のCMIP6⁽¹⁷⁾に向けた準備が重要な役割となっている。なお、CMIPは第3期の後にIPCCの評価報告書の番号と一致させることになり、第4期は欠番となっている。

(3) 21世紀の気候予測

気候予測の前提となるCO₂等の気候変化要因のシナリオは、AR4まで使われた1999年公開のSRESシナリオ⁽¹⁹⁾から、AR5では2009年公開の代表濃度パス(Representative Concentration Pathway: RCP)⁽²⁰⁾に変更された。SRESは多数のシナリオで構成されるが、AR4の気候予測ではA1B、A1FI、A1T、A2、B1、B2の6本が使われた。RCPはRCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5の4本で構成される。図2-1-4に両シナリオのCO₂の排出量と大気中濃度の推移を比較する。

現状から21世紀末にかけての気温上昇と海面上昇について、AR4とAR5の予測情報を図2-1-5に示す。予測情報は、多数の気候モデルの結果を集約した代表値と不確実性の幅で示されている。予測に使われた気候モデルは、AR4時点のCMIP3からAR5時点のCMIP5にかけて精度が向上しているが、気温上昇の大きさを左右する気候感度については、モデルの平均、ばらつきとも、大きな違いはない(表2-1-1)。したがって、気温上昇のAR4とAR5の違いは、基本的にシナリオの違いによる。不確実性の幅は、AR4と比べてAR5の方が小さくなっているが、これは評価方法の違いに起因するもので、不確実性の大きさも両者は同等と言える。

図2-1-5に示した気温上昇は現状(AR4とAR5で期

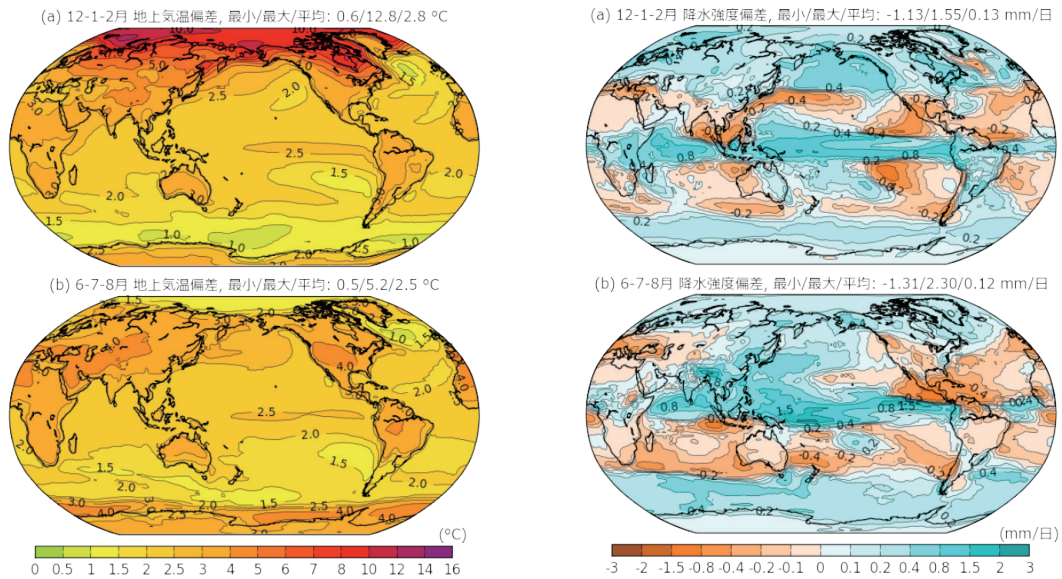


図2-1-6 12-2月(上段)と6-8月(下段)の20世紀末からA1Bシナリオの21世紀末にかけての地上気温(左)と降水量(右)の変化

間が異なる)が基準となっている。工業化前を基準とする気温上昇に換算するには、AR5の結果には0.6°Cを、AR4の結果には0.5°Cを加算する。この換算から、21世紀末の気温上昇が、不確実範囲の大半も含めて2°C以下に収まるのは、RCP2.6のみであることがわかる。AR5では、RCP2.6の気温上昇について、確信度を中程度(5段階の3番目)とした上で、2°Cを超える可能性が低い(33%未満)と評価している。また、2番目に放射強制力の小さいRCP4.5については、同じく中程度の確信度で、どちらかと言えば2°Cを上回る(50%超)と評価している。IPCCの確信度は、証拠の種類、量、質、および整合性と、見解の一致度から評価される。確信度が中程度に留められたのは、気候モデルのばらつきが大きいことに加え、気候モデルと観測情報の整合性も十分とは言えないことが背景にあると推測される。

海面上昇は、AR4以降、観測情報の精度が向上し、AR5ではより詳細に評価されるようになった。AR4では不確実性の幅のみが示されただけであったが、AR5では代表値も示された。AR5の予測値は、AR4に比べて全体的に大きくなっている。海面上昇は、海水の熱膨張、山岳氷河の変化、および氷床(グリーンランドと南極)の変化による寄与があり、氷床の寄与は、表面の質量収支(積雪と融解)と流動による変化に分けられる。このうち、氷床の流動は評価が難しく、AR4では予測値に含まれなかった。AR5の予測値が大きくなったのは、

主に氷床流動の効果が追加されたことによる。要因毎の内訳では、熱膨張が最大の寄与で(30-55%)、山岳氷河がそれに次ぐ。この点についてはAR4も同様である。

地球温暖化は文字通り地球規模の変化であるが、変化の度合いは地域によって大きく異なる。図2-1-6に、現状から21世紀末にかけての気温と降水量の変化の空間分布を示す。この分布は、AR4で使われた多数の気候モデルによるA1Bシナリオの予測結果を平均したものである。分布の特徴はAR5で使われた新しいモデルでも同様であり、シナリオや評価期間が異なる場合でも傾向は類似する。

気温上昇は、海洋より大陸、低緯度より高緯度で大きく、特に、北半球高緯度域の冬季の昇温が著しい。この違いは、主に、海洋の熱容量が大きいことと、雪氷域の変化が気温変化を増幅する効果による。降水量の変化は、地域によって大きく異なり、赤道付近の熱帯や高緯度で増加し、亜熱帯や中緯度で減少する傾向である。なお、地球全体の年間降水量は増加傾向であり、その変化率は地球全体の熱収支に規定され、気温上昇1°Cにつき1-2%となる。

日本付近の気温変化は、地球全体の平均に近く、北日本はやや大きな変化となる。また、季節による違いもあり、夏より冬の昇温が若干大きい。日本付近の降水量は、同じ緯度帯の他の地域と異なり、夏季に増加傾向となる。これは、日本が位置する東アジア域で、モンスーン(季

節風)による水蒸気輸送が増加するためである。水蒸気輸送の増加は、気温上昇とともに大気中の水蒸気量が増加することが関係する。

(4) 累積 CO₂ 排出量と気温上昇の関係

気候安定化に向けた排出削減目標の検討では、(1)で述べたように、放射強制力と気温上昇の関係(気候感度、海洋の熱吸収の度合い)、CO₂濃度と放射強制力の関係、CO₂の排出量と濃度の関係(自然のCO₂吸収、コラム2)、およびCO₂以外のGHGやエアロゾルの排出が関係する。個々のプロセスは複雑であるが、大まかに見ると、主な気候変化要因がCO₂で、その大気中濃度が累積排出量で規定されることから、所定の気温目標に累積CO₂排出量の上限が対応することになる。排出量は、年々の変化ではなく、工業化前から現在および将来に至るまでの累積量が効く点が重要である。

AR5では、気温上昇と累積CO₂排出量が近似的に比例関係にあることが初めて明記された。両者の間には様々な非線形的な要因が介在するが、それらが相殺されて直線的な関係になると理解される。実際、多くの気候モデルでこのような直線関係が確認されている。ただし、その比例定数は気候モデルによって大きく異なり、1000 GtCの排出につき0.8℃から2.5℃までが可能性の高い(66%超)範囲と評価された。この1000 GtC当たりの気温上昇は、「累積炭素排出量に対する過渡的気候応答」(transient climate response to cumulative carbon emissions: TCRE)と呼ばれる指標である。現状では不確実性の幅が広いが、TCREは気温目標を累積CO₂排出量の上限と結びつけることから、関心が高まっている^{(21),(22)}。TCREの評価値の幅には、気候感度の他に、海洋と陸域生態系によるCO₂吸収の不確実性が反映されている。

TCREは過渡状態の気温上昇を表すが、上昇した気温の不可逆的な性質により、TCREは所定の累積排出量で長期間維持される気温上昇とも見なせる。上昇した気温が不可逆的というのは、排出をゼロにしてもほぼ一定の気温上昇が数百年間続くということである。当研究所の研究でも、2種類の代表的な地球システムモデルを用いた数値実験で確認されている⁽²³⁾。

TCREを用いると、所定の気温目標と目標達成の確率に対して、累積CO₂排出量の上限が決められる。AR5では、特に2℃レベルについて、図2-1-7に示すやり方で、

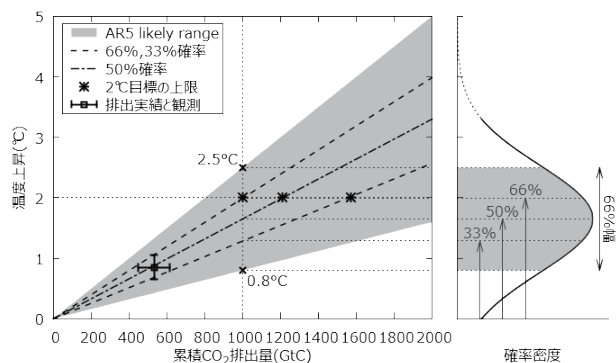


図2-1-7 TCREに基づく気温上昇と累積CO₂排出量の関係

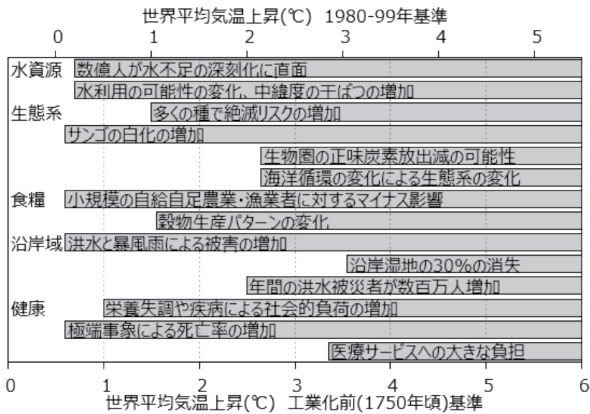
非超過確率が66%、50%、33%の場合で、累積CO₂排出量の上限を1000、1210、1570 GtCと評価している。累積の起点は1870年であり、2011年までの既排出量が515 GtC程度であることも付記されている。TCREに基づく評価はCO₂のみによる気温上昇の場合であり、CO₂以外の要因を考慮すると上記の数値は減少する。ただし、気温上昇と累積排出量の比例関係は、あくまでもCO₂の諸特性の場合に近似的に成立する関係であり、一般的なGHG排出に対応する指標はない。AR5では、CO₂以外の要因を含む複数の気候モデルによるRCPシナリオの計算結果に基づき、2℃レベルに非超過確率66%、50%、33%で適合する累積CO₂排出量の上限值を790、820、900 GtCと評価している。

上記のCO₂以外の要因を考慮した場合の評価結果は、TCREに基づく方法と比べて確率の違いによる幅が狭くなっている。AR5の説明によると、この理由は、一つのシナリオのみで、限られたモデルサンプルから評価されたこととされる。そのシナリオ(RCP8.5)では、CO₂以外の放射強制力が比較的大きく設定されているため、安全側の(より多くの排出削減を必要とする)評価となる。ただし、永久凍土層からのメタン排出といった、上記の評価で考慮されていない懸念事項もある。

2-1-2 長期目標の科学的根拠

(1) WG2 AR5⁽²⁴⁾の気候影響の評価

工業化前を基準とする世界平均の気温上昇を2℃以下に抑える(理念的な)目標は、現在のところ、事実上の国際合意である。この2℃目標は、1980年代頃から繰り返し言及され、UNFCCCの第16回締約国会議(COP16、2010年)では合意文書(カンクン合意)に盛り込まれた。



図の横棒は、左端に対応する気温で影響が顕在化し、気温上昇とともに影響が拡大することを示す。表の「温度」はティッピング・ポイントに対応する1980-99年基準の世界平均昇温、「期間」は質的变化に至るまでの遷移期間。

図2-1-8 AR4でまとめられた気温上昇と主な影響の関係

表 2-1-2 主なティッピング・エレメント

ティッピング・エレメント	限界(°C)	期間(年)	影響
北極海の海水減少	0.5-2	10	温暖化増幅、生態系変化
グリーンランド氷床消失	1-2	>300	海面上昇 2-7 m
西南極氷床の消失	3-5	>300	海面上昇 5 m
大西洋熱塩循環の弱化	3-5	100	局所的な寒冷化など
エルニーニョの振幅増大	3-6	100	東南アジアの乾燥など
西アフリカ植生の増加	3-5	10	環境収容力の増加(良い影響)
アマゾン熱帯林の減少	3-4	50	生物多様性消失、降水減少
北方林の減少	3-5	50	生物群系の遷移

ただし、2℃の根拠は必ずしも明確ではなく、目標設定には、科学的根拠の他に、価値判断も大きく関係する。

2℃目標を示唆する科学情報としては、WG2 AR4⁽²⁵⁾でまとめられた、分野・地域別の影響の度合いと気温上昇の関係が挙げられる。これは、地球温暖化の影響や脆弱性について、多くの既往研究の成果に基づき、水資源、生態系、食糧、沿岸域、健康、特異事象といった分野で整理したものである。図2-1-8にその主な内容を示す。地球温暖化の影響は、必ずしも悪い面ばかりではないが、現状(1980-99年平均)から温度が2-3℃上昇すると(工業化前の基準では「2.5-3.5℃に相当」)、全ての地域で良い面が減少するか悪い面が増加する可能性が非常に高いと評価されている。

AR5⁽²⁴⁾では、さらに多くの知見に基づいて、気候以外のリスクも考慮した分野・地域別の影響をまとめている。影響評価は、気温上昇が2℃の場合と4℃の場合(RCP2.6とRCP8.5に対応)で整理され、排出増加と

もにリスクが増大し、厳しい影響が拡大すると指摘している。

安定化目標の根拠となる情報には、ティッピング・エレメントと呼ばれる事象も含まれる。ティッピング・エレメントは、限界(ティッピング・ポイント)を超える気温上昇によって、ある有限時間が経過した後に質的な変化を引き起こす事象と定義され、多くの事象について限界温度と質的变化に至るまでの遷移期間が評価されている。表2-1-2に代表的な研究⁽²⁶⁾で挙げられた主な事象を示す。質的な変化は、元の状態と大きく異なる状態であり、多くの場合、人間社会や生態系にとって悪い影響が生じる。ティッピング・ポイントと遷移期間は事象によって様々であり、不確実性の度合いも異なる。この研究では、グリーンランド氷床の融解と北極海の海氷減少が最も大きな脅威であり、不確実性も小さいと結論づけている。

氷床融解に伴う海面上昇は、小島嶼国にとっては国土消失につながる重大な問題である。カンクン合意では、小島嶼国の主張を踏まえ、目標を1.5℃とすることにも言及されている。グリーンランド氷床(7m分の海面上昇)のティッピング・ポイントは、表2-1-2では現状から1-2℃とされている。この幅は、工業化前の基準では1.5-2.5℃に相当し、下限値は小島嶼国の主張と一致する。その後の研究も考慮されたAR5では、1-4℃の幅を示している。また、南極については、氷床の海底接地部の不安定性が懸念されるが、AR5では定量的評価は困難という見解である。

このような個別の分野や事象に注目した評価の他に、IPCC WG2では、分野・地域横断的な観点での気候変化リスクの評価も行っている。この観点はReasons For Concern(RFC)と呼ばれ、表2-1-3に示す5種類が選定されている。AR5では、リスクの概念がより体系的に整理されるとともに、RFCについての最新の評価結果が図2-1-9のように示された。評価結果を示す図は、その色合いと形からアンバーダイアグラムと呼ばれる。アンバーは燃えさし(ember)の意味で、色合いは4段階に分かれるリスクレベルに対応する。

気候変化のリスクは、物理的なハザードと社会経済的な要因が重なり、相互に影響することで生じるとされる。AR5の評価では、AR4時点の評価⁽²⁷⁾と比べて、一部を除き、気温上昇が比較的大きいところでリスクレベルが

表 2-1-3 IPCC WG2 で選定された分野・地域横断的リスクの種別 (Reasons For Concern: RFC)

RFC種別	リスクの視点(対象、ハザード、特性)
1 消滅危惧のある固有系	比較的狭い地理的範囲に限定され、将来の気候変化によって消滅する恐れのある系：海水、氷河、珊瑚礁、様々な土地固有の民族や生態系など
2 極端気象	熱波、豪雨、干ばつ、熱帯低気圧（台風）などの極端な天気事象
3 影響の偏在性	食糧や水資源の確保などで、リスクが他と比べて大きい地域や住民が存在すること
4 世界総計の影響	世界全体の影響を包括的に表す経済損失、人的影響、消滅する生物種や生態系などの数量
5 大規模な特異事象	連続的な変化の過程で生じる急激かつ重大な変化：北極の海水消失、氷床融解とそれに伴う海面上昇、生態系レジームシフトなど

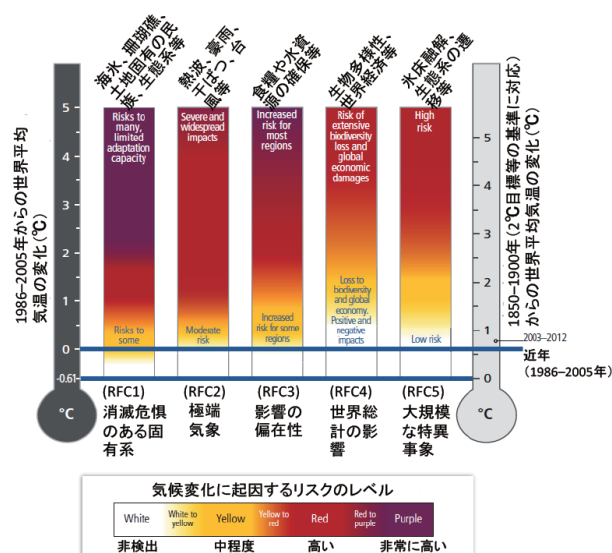


図2-1-9 AR5のアンバーダイアグラム(WG2 AR5 Figure 19.4に和文表記を記載)

高くなり、根拠となる知見の確信度も増している。リスクレベルや確信度が上がった背景には、観測や将来予測の新しい情報の獲得に加え、リスクの対象や関連する社会経済的な要因をより広範囲に扱う傾向のあることも関係している。新しい情報の中には、海洋酸性化(コラム3)のように、最近になって認識されてきた現象も含まれる。

社会経済的な要因には、気候変化の影響下に置かれているかどうか(曝露性)と、その影響を受けやすい状況かどうか(脆弱性)がある。いずれも今後の世界の発展の仕方によって大きく異なり、それによって同じ気温上昇であってもリスクレベルは異なる。ただし、このような将来の発展経路の違いは、AR5の段階の評価では明示的に扱われていない。

(2) WG3 AR5⁽²⁸⁾の排出削減シナリオの評価

地球温暖化の進行は、今後のGHG排出量に大きく左右される。排出量はエネルギー利用や土地利用の形態に依存し、さらに、これらは人間社会の発展の方向性に関

係する。このため、将来の気候変化の見通しを得て対策を検討する際には、複数の排出・濃度シナリオが使われる。シナリオとは、一貫性のある仮定に基づいて妥当性のある将来の発展を記述したものである。シナリオとして扱われる要素には、排出量や濃度の他、その前提となる社会経済の諸条件や、その結果となる気候の変化・影響も含まれる。それぞれの要素について、一定期間にわたる変化を経て到達したレベル(GHG濃度など)とそのレベルに至るまでの道筋は、pathway(以下、パス)と呼ばれる。

地球温暖化問題の検討では、このような様々なシナリオが基盤的な情報となる。特に、排出シナリオに関係する電源構成などを含む社会経済の要素は、効果的な対策を進める上で重要な示唆を与える。そこでは、気候政策を含まないベースラインシナリオと、気候政策を含む緩和シナリオ(気候変化の緩和の意味)が区別され、対策コストなどの評価が両者の差として議論される。

以下では、AR4とAR5の気候予測で使われたSRESとRCPの位置づけを説明し、IPCC WG3の緩和シナリオを気候科学の観点から分析した結果を述べる。

SRESは、気候政策を含まないベースラインの排出シナリオであり、これに関するIPCCの特別報告書「Special Report on Emissions Scenarios」⁽¹⁹⁾がシナリオの名称となっている。SRESは多くのシナリオから構成され、これらは、社会、経済、技術、環境の特徴を記述した4種類のシナリオ群に属する。この4種類は、図2-1-10に示すように、世の中の発展の方向性として、経済発展(A)と環境保全(B)の優先度と、グローバル指向(1)と地域指向(2)の優先度の違いで理解される。二つの評価軸(A-B、1-2)のそれぞれに二つの方向性があり、それらの組み合わせが4種類のシナリオ群となる。各シナリオ群は、単に「A1」、「A2」といった記号で呼ばれる。A1については、エネルギー技術の違いによる、A1FI、

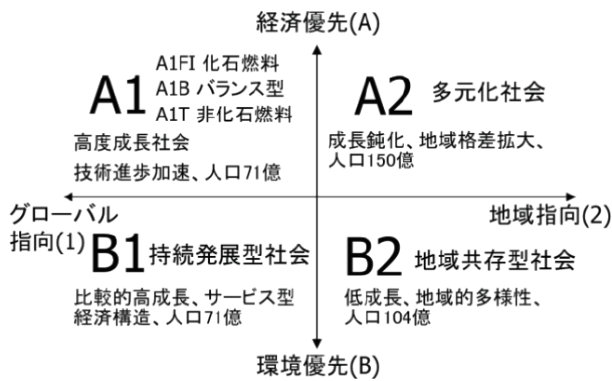


図2-1-10 SRESシナリオの概念

A1T、および A1B の区分があり、それぞれ、化石燃料、非化石燃料、および両者のバランスが重視されるシナリオである。

これら6個のシナリオ群の中では、それぞれの特徴を良く表すものとして例示シナリオが選ばれている。通常 SRES シナリオと言う場合は例示シナリオを指す。図 2-1-4 に見られるように、特段の排出削減政策をとらなくても、将来の排出量は社会経済の発展の方向性によって大きく異なることがわかる。A-B の違いは期間全体の排出量を左右し、1-2 の違いは経年変化の傾向を左右する。当研究所のオーバーシュートシナリオの計算で用いた A1B と B1 は、SRES の中では中位と低位に位置する。排出量に対応する濃度は、簡易モデル計算で推計したものが参照用に使われている。この推計値は複数あり、図 2-1-4 と当研究所の計算で用いた図 2-1-3 に示したデータでは若干の違いがある。

一方の RCP は、2009 年に公開された Representative Concentration Pathway (代表濃度パス)⁽²⁰⁾ の略称で、放射強制力のパスを濃度ベースで与えたものである。放射強制力の範囲は、SRES を含む既往シナリオの大半をカバーするように決められ、上限と下限に相当する 2 本のパスと、その間に設定された 2 本のパスで構成される。それぞれのパスは RCP を冠した数値で参照され、その数値は 2100 年以降の概ね安定化する頃の放射強制力 (CO₂ 以外の要因も含む合計、単位 W/m²) を表す。RCP の排出量の範囲は、SRES の範囲に対して、極端に低排出となる RCP2.6 を加えた形である。2-1-1 節の第(3)項で述べたように、RCP2.6 は 2℃ 目標達成の可能性が高いシナリオと目されている。

SRES や RCP の作成には、IPCC WG3 の分野で扱わ

れるエネルギー・経済・気候の相互依存を統合的に評価するモデルが使われる。統合評価モデルについては、当研究所で開発しているものも含めて、第(4)項で述べる。統合評価モデルと気候予測に使われる AOGCM とは、シナリオ情報の受渡しを通じたつながりがある。この情報の流れは必ずしも一方向ではなく、AOGCM の計算結果を統合評価モデルに反映する方向もある。気候感度に代表される気候応答のパラメータはその代表例であり、統合評価モデルに含まれる簡易的な気候計算のパラメータは、多数の AOGCM の傾向に基づいて調整される。両モデルで扱われる土地利用のモデルも、情報の流れが双方向になり得る要素である。

こうしたシナリオ情報の相互依存性は、AR4 以降、強く意識されるようになってきている。SRES は IPCC が主導して作成されたものであるが、その後のシナリオ作りでは、IPCC は触発者 (catalyst) の役割になり、作成主体は研究コミュニティになった。そこでは、シナリオ情報の重要性和ニーズが時間をかけて議論され、全体として整合性のあるシナリオ作りが指向されている⁽²⁹⁾。

実は、RCP は一連のシナリオ研究の出発点に位置している。4 本のパスはいずれも統合評価モデルで作成されているが、付随する社会経済シナリオは表に出ていない。これは、AR5 に向けて、時間のかかる気候計算を最初に実行する必要がある、その気候計算の入力条件として RCP が用意されたためである。社会経済シナリオの検討は気候計算と並行して進められ、ベースラインシナリオと緩和シナリオの作成と分析が進められた。この作業は、統合評価モデルを手がける世界中の研究機関で行われ、AR5 のシナリオとしてデータベース化されたものは 1200 本に上る。そして、AR5 の取りまとめの段階で、CMIP5 の知見を反映した簡易気候モデル⁽³⁰⁾によって、各シナリオの気候計算が実施された。

この社会経済シナリオの評価で最も注目されるのは、多数のシナリオを GHG 濃度レベルで分類した表である。この表は、WG3 AR4⁽³¹⁾ に掲載された同様のシナリオ分類表の改訂版にあたる。ここでは両者を引用して図 2-1-11 で比較する。いずれの表も、排出量や気温上昇の定量的な特徴が濃度レベルと対応づけられ、排出削減の長期目標に直結する重要な政策的示唆を与える。特に、2℃ 目標に対応する濃度レベルの数値は、報道や政策目標でしばしば取り上げられてきた。

カテゴリ	放射強制力 (W/m ²)	二酸化炭素濃度 ⁽¹⁾ (ppm)	温室効果ガス濃度 (二酸化炭素換算) ⁽²⁾ (ppm)	気候感度の“最良の推定値”を用いた平衡時の世界平均気温の上昇 ⁽³⁾ (°C)	二酸化炭素排出がピークを迎える年 ⁽⁴⁾	2050年における二酸化炭素排出量の変化 (2000年比) ⁽⁵⁾ (%)	評価されたシナリオの数
I	2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4	2000-2015	-85 ~ -50	6
II	3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8	2000-2020	-60 ~ -30	18
III	3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2	2010-2030	-30 ~ +5	21
IV	4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0	2020-2060	+10 ~ +60	118
V	5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9	2050-2080	+25 ~ +85	9
VI	6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1	2060-2090	+90 ~ +140	5

(a)AR4 時点
WG3 AR4 Table SPM.5 「ポスト TAR の安定化シナリオの特徴」(経産省訳)
排出量の変化は、シナリオ分布の 15-85 パーセンタイルの範囲。

2100年 CO ₂ 換算濃度 ⁽¹⁾ 区分ラベル (濃度幅)	細区分	RCP シナリオの相対的位置 ⁽²⁾	2010年比の CO ₂ 換算排出量変化 (%) ⁽³⁾		21世紀にわたり(1850 ~ 1900年と比べて)特定の気温水準未満にとどまる可能性 ⁽⁴⁾			
			2000年	2100年	1.5°C	2°C	3°C	4°C
< 430	430ppmCO ₂ 換算未満の水準について調査した個別のモデル研究は数が限られている ⁽⁵⁾ 。							
450 (430 ~ 480)	全体幅 ⁽⁷⁾	RCP2.6	-72 ~ -41	-118 ~ -78	どちらかといえば可能性が高い	可能性が高い		
500 (480 ~ 530)	530ppmCO ₂ 換算のオーバーシュート無		-57 ~ -42	-107 ~ -73	どちらかといえば可能性が高い			
			-55 ~ -25	-114 ~ -90	どちらかといえば可能性が高い	可能性が高い		
550 (530 ~ 580)	580ppmCO ₂ 換算のオーバーシュート無		-47 ~ -19	-81 ~ -59	可能性が高い			可能性が高い
			-16 ~ -7	-183 ~ -86	どちらかといえば可能性が高い			
(580 ~ 650)	全体幅		-38 ~ -24	-134 ~ -50				
(650 ~ 720)	全体幅	RCP4.5	-11 ~ -17	-54 ~ -21		どちらかといえば可能性が高い		
(720 ~ 1000) ⁽⁸⁾	全体幅	RCP6.0	18 ~ 54	-7 ~ 72	可能性が高い	どちらかといえば可能性が高い		
>1000 ⁽⁹⁾	全体幅	RCP8.5	52 ~ 95	74 ~ 178	可能性が高い	可能性が高い	どちらかといえば可能性が高い	

(b)AR5 時点
AR5 統合報告書 Table SPM.1 「第3作業部会第5次評価報告書で集められ、評価されたシナリオ区分の主要な特徴。全てのパラメータについて、各シナリオの 10 ~ 90 パーセンタイルで示されている。」(経産省訳)

図2-1-11 統合評価モデルで作成・分析されたシナリオの分類(上:(a)AR4時点、下:(b)AR5時点)

AR4の表では、2°C(平衡時の気温上昇)を含むカテゴリIで、2050年のCO₂排出量が2000年比で85%から50%減となっている。この数値は、AR5以降の長期目標の議論で、2050年に少なくとも半減という認識が定着したことに寄与したと考えられる。ただし、その基になったシナリオは僅か6本であり、しかも特定の研究グループによる偏った情報と見られている⁽³²⁾。

AR5のシナリオは、総数が大幅に増加した他、気温上昇の確率論的評価が導入されたことも大きな変化である。この中では、19世紀後半から2100年までの気温上昇が2°C未満に留まる可能性が高いと唯一評価されたのが450 ppm eq(2100年時点のGHG濃度)の種別であり、そのGHG排出量(GWPによるCO₂換算値)が2050年時点で2010年比41%から72%減とされた。2015年6月のG7サミット(主要国首脳会議)では、40%から70%の範囲の上端を世界全体の2050年目標とすることが首脳宣言に盛り込まれた。そこでは、IPCCの推奨という誤った表現が使われているが、450 ppm eqのシナリオ分類種別の情報が基になっているのは明らかである。なお、このシナリオについては政策面の論点を3-6-1節で議論する。

このようにAR4とAR5のシナリオ分類表が現行の長期目標に少なからず影響していることから、両者の違いに関心が持たれる。AR4とAR5のシナリオ分類を比較する場合、基準とする濃度レベルの前提条件の違いを考

慮する必要がある。

AR4のシナリオは、平衡状態の濃度で分類され、気温上昇も平衡状態の数値が記載されている。この場合、濃度と気温上昇がECSのみで関係づけられる。実際、表に示されている数値は、式(2-1-1)、および気温上昇と放射強制力の比例関係から得られる

$$\Delta T = ECS \times \ln(C/C_0) / \ln(2) \quad (2-1-3)$$

において、ECSを3°Cとして得られる値である。

一方、AR5の表に含まれる濃度や気温上昇は、平衡時ではなく、2100年時点の変化が続いている状態の値である。2100年以降の濃度の推移は、その後の排出に依存する。大気CO₂濃度の変化は、人間活動の排出率と自然の吸収率の差で決まる。ここで、率は単位時間(例えば1年間)の排出量や吸収量を意味する。一時的に両者がバランスして濃度が一定になったとしても、自然の吸収率が徐々に減少するため、そのまま排出が続けば長期的に濃度は増加する。また、排出率を自然の吸収率以下とし、その状態を続ければ濃度は低下する。AR5のシナリオには、2100年時点で排出率が負に達するものも含まれる。その状態が長期間続くと仮定すれば、AR4のカテゴリIに相当するシナリオは、AR5の濃度区分の相当広い範囲におよび、カテゴリIの濃度レベルを下回るシナリオも多数存在することになる。しかしながら、AR5のシナリオデータは基本的に2100年までであり、

平衡時の濃度レベルを特定することはできない。

AR5のシナリオの気温上昇については、気温上昇の確率論的評価⁽³³⁾の基になった多数のアンサンブル計算の結果も示されている(WG3 AR5 Table SPM.1等)。そこには、2100年時点(1850-1900年基準)の気温上昇が、濃度区分毎に、気温応答の中央値に対応する範囲と、不確実性の幅を考慮した範囲が示されている。450 ppm eqの区分では、それぞれ1.5-1.7℃、1.0-2.8℃となり、2℃未満となる可能性が高いという評価の根拠となっている。

ECSを3℃としたAR4の気温の評価は、気温応答の不確実範囲の代表値(AR4時点の最良推定値)をとったものである。AR5のシナリオに対する気温上昇の計算では、TCRの中央値が1.8℃、90%幅が1.2-2.6℃に調整されている⁽²⁸⁾。TCRとECSの比率が経験的に0.6程度であることから、TCRの代表値(1.8℃)はECSでは3℃に相当する。すなわち、平均的な気温応答は、AR4とAR5で概ね同等の扱いと言える。ただし、AR5でECSの最良推定値が決められなかったことから、評価結果の妥当性については根拠が弱まっている。

2100年以降の気温の推移は、濃度の場合と同様、その後の排出量に依存する。気温上昇と累積CO₂排出量が近似的に比例する(2-1-1節の第(4)項)ことから、2100年以降のCO₂排出がゼロであれば、CO₂以外の要因を無視して、2100年時点の気温上昇を平衡時の気温上昇と見なせる。450 ppm eqの区分は、平均的な気温上昇が1.6℃であることから、2100年以降ゼロ排出の場合はカテゴリIより相当低い気温レベルとなる。逆に、2100年以降、僅かずつでも排出が続けば、気温上昇が続き、いずれは2℃を越えることになる。

以上のように、AR4とAR5のシナリオ評価は単純に比較できないが、既に政策目標として言及された2050年の排出削減量について、基準年とパーセンタイルを揃えて比較することは参考になる。世界全体のGHG排出量は、SARの積算期間100年のGWPによるCO₂相当量では、2000年の40 GtCO₂ eqから2010年の49 GtCO₂ eqに増加している⁽²⁸⁾。したがって、AR5の2010年比41-72%減は、2000年比で28-66%減に当たる。さらに、正規分布を仮定して、AR5の10-90パーセンタイルの範囲をAR4の15-85パーセンタイルの範囲に換算すると、AR5の評価は31-62%減となる。AR4はCO₂排出

量について50-85%減とされたが、GHG排出量も同様の削減率と見なすと、AR5の評価はAR4と比べて20ポイント程度緩やかになったと言える。

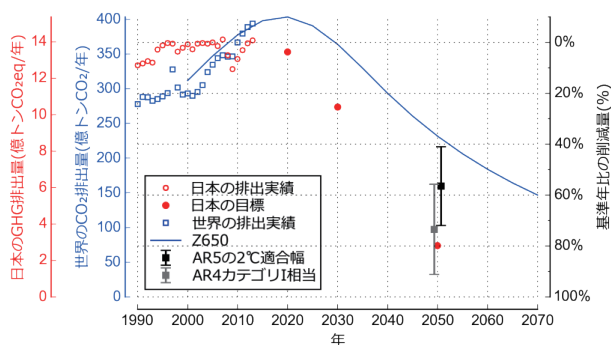
所定の濃度や気温のレベルに至る排出パスは、2050年といった特定の時点の排出量ではなく、一定期間にわたる累積排出量に制約される。多数の社会経済シナリオの気温上昇と累積CO₂排出量の関係も、基本的に、CMIP5モデル等で見出された両者の比例関係と整合することが確認されている⁽³⁴⁾。この比例関係は、温度目標の高低によらず累積CO₂排出量に上限があり、最終的にCO₂排出量をゼロにする必要性を意味する。累積値の制約は厳しい排出削減を示唆するが、所定の累積値に至る排出経路に任意性があることから、2050年といった特定の時点の排出量に柔軟性があることの根拠でもある。

早期に削減を開始して緩やかに減らすか、削減開始を遅らせて急激に減らすかは、シナリオの作成に使われる統合評価モデルで前提となる技術やコストなどの条件に依存する。AR4と比べて大幅に増加したAR5の低排出シナリオでは、オーバーシュート的な排出パスを可能にする前提がより強化されたと推測される。さらに、AR4からAR5にかけて時間が経過し、通常用いられる10年間隔の計算時点で、シナリオの開始時点が2000年から2010年になってきていることも、オーバーシュート指向の一因となる。

(3) 気候安定化の考え方

1992年に作成・採択されたUNFCCCは、その究極の目標をGHG濃度の安定化としている。従来のAOGCMによる気候計算や統合評価モデルによる社会経済シナリオの分析は、濃度安定化をベースとするものであったと考えられる。しかしながら、AR5では、累積CO₂排出量の制約やオーバーシュート型の排出パスが主流となり、濃度安定化の概念が薄れつつある。当研究所は早くからオーバーシュートの考え方に注目するとともに(2-1-1節の第(2)項)、独自の簡易気候モデルを開発して⁽³⁵⁾、長期の排出パスの検討を行ってきた。以下では、海洋研究開発機構の松野太郎博士と共同で研究した、実現可能性の高い合理的な排出パスとその基盤となる気候安定化^{(36)~(38)}について説明する。

濃度安定化のシナリオを作成する場合、2100年以降



世界のCO₂排出量と日本のGHG排出量は、それぞれ2010年と2005年を基準とする相対量でスケールアップ。世界の実績値は化石燃料起源と土地利用起源のCO₂排出の合計。AR4カテゴリは基準年等を換算。日本の実績値は温室効果ガスインベントリオフィスによる2013年までのデータ(CO₂とその他6種ガスの合計)、目標値は2015年7月時点の公表情報に基づく(2020年目標は暫定、2050年目標の基準年は未定)。

図2-1-12 Z650と世界および日本の排出実績・目標との比較

のそう遠くない時期に所定の濃度レベルに達するような前提が置かれる。しかしながら、その濃度レベルで気温が平衡状態に達するのは千年以上先となる。その間は、自然の吸収率とバランスするよう人間活動による排出が続くことになる。この排出は現在の1/10程度である。松野博士は、長期間にわたる濃度一定の前提が不自然であること、および安定化の目標には千年規模の海面上昇も関係することから、より合理的なゼロエミッション安定化という新しい概念を提案した。さらに、この概念に基づいて2℃目標を柔軟に考え、AR4で言及された2050年時点の排出削減を緩和する、Z650と称する世界全体のCO₂排出パスを提案した。

Z650の排出パスは、2020年に11 GtCでピークアウトして2040年に8 GtCとなり、そこから30年で半減するペース(年率2.3%減)で21世紀末に2 GtCまで減少し、2160年にゼロに達する。累積排出量は、21世紀中に約650 GtC、工業化前からゼロ排出に至るまでの累計で1100 GtC程度である。Z650の名称は、ゼロを意味する「Z」と21世紀中のGtC単位の累積値に由来する。650 GtCは、450 ppmで安定化する従来の排出パスから見積もられる550 GtC程度に、オーバーシュートによる上乗せを100 GtC程度見込んだことに相当する。

参考として、図2-1-12に、Z650の排出パスを世界と日本の排出実績^{(39)~(41)}ならびに目標値と比較する。直近の世界の排出実績は、Z650の排出パスに近いところで推移している。2050年の排出量は、AR5の2℃目標に適合するとされる450 ppm eqのシナリオ区分の幅より

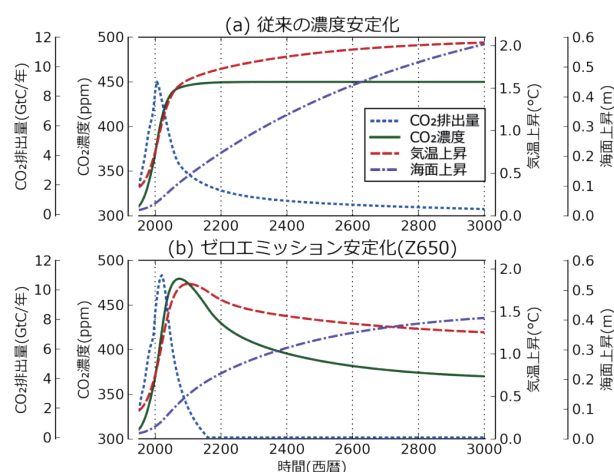


図2-1-13 従来濃度安定化(450 ppmレベル)とゼロエミッション安定化(Z650)

Matsuno et al (2012) Figure 3⁽³⁶⁾に基づいて作成。

上側に位置する。仮に、この幅の中央とZ650の差に相当する削減緩和を日本の長期目標に適用すると、2050年の80%減の目標は60%減程度に緩和される。

ゼロエミッション安定化で鍵となるのは海洋の働きである。これまでの人間活動で排出されたCO₂は、半分強が海洋と陸域生態系に吸収されている⁽⁴⁾。ただし、この割合は一定ではなく、特に海洋は長期的により高い吸収率になると期待できる。海洋は気温上昇を遅らせる働きもあり、2℃レベルに対応する濃度に達しても、気温上昇が2℃になるのは遠い先となる。ゼロエミッション安定化では、自然の吸収率より十分に低い排出率を実質的に「ゼロ」とし、その状態で気候システムがゆっくりと(千年以上かけて)平衡に向かう過程を考える。

図2-1-13に、当研究所の簡易気候モデルを用いた千年規模の気候計算から、CO₂のみの気候変化要因の条件で、従来の濃度安定化(450 ppmレベル)とZ650を比較した結果を示す。上昇した濃度が一定に保たれる濃度安定化の場合、気温は緩やかな上昇が続き、平衡時の値(この計算では2.1℃)に近づいていく。図には、海水の熱膨張による海面上昇も示している。海洋の深部に熱が伝わるのに時間がかかるため、熱膨張は数千年規模で続く。実際の海面上昇には、山岳氷河と極域氷床の融解の寄与が加わる。特に、氷床の寄与は非常に大きく(表2-1-2)、熱膨張と同様の時間規模で進行するため、気温上昇が長期間続く場合は深刻な影響が懸念される。

一方、Z650のゼロエミッション安定化では、排出ゼロの下で濃度が徐々に低下し、やがて気温も低下してく

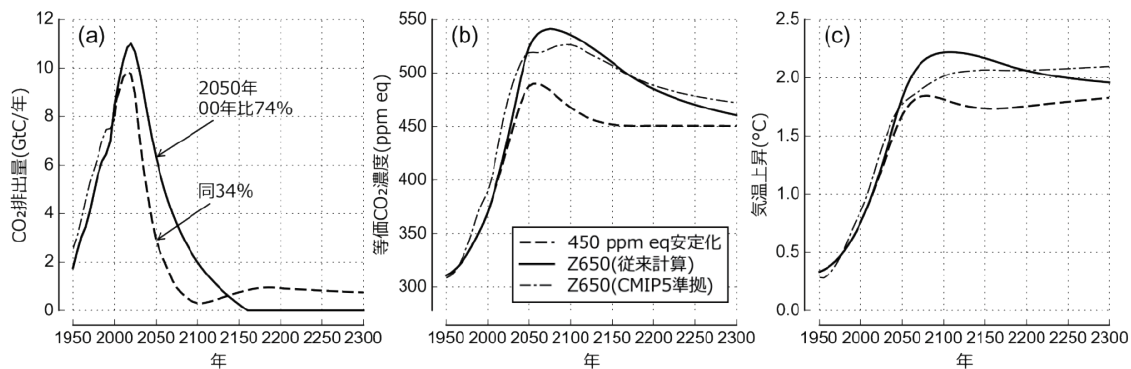


図2-1-14 非CO₂要因を含む簡易気候計算による450 ppm eq安定化とZ650の比較

450 ppm eq安定化と従来計算のZ650は、Matsuno et al (2012)⁽³⁷⁾のFigure 4, 6に基づく。CMIP5準拠のZ650では、Z650のCO₂排出パス(2005年以降)以外をCMIP5のRCP2.6の条件とし、炭素循環はCMIP5モデルのESMの平均的な傾向に、気温応答はCMIP5モデルの平均(ECS=3.1°C、TCR=1.8°C)に調整して計算。

る。海面上昇(熱膨張)は止まらないが、濃度安定化の場合より軽減される。また、長期的に気温が下がっていくため、氷床融解が起きる可能性は低くなる。この傾向は、Z650に限らずゼロ排出の下で共通に見られる特徴である。ただし、気温が低下するかどうかは複雑な要因が関係する。図に示した計算ではシンプルな仮定が置かれているが、AR5の知見によれば、気温はほぼ一定の状態でも長期間続くと見られる。

このように、従来の濃度安定化とゼロエミッション安定化では、長期的な気候の推移に本質的な違いがある。濃度安定化では、暗黙のうちに、自然の吸収とバランスする排出を何世紀も続ける状態が想定され、その結果として最終的に平衡に達した時の気温上昇が目標とされる。今世紀中は目標温度まで相当に余裕があるので、今世紀に限れば排出削減をもっと緩和できるはずである。また、来世紀以降、自然の吸収に合わせて同量の排出を続ける必然性もない。これらの点に注目して、濃度一定の前提をなくし、今世紀の排出に余裕を持たせるのがゼロエミッション安定化のねらいである。

濃度が下がる前提であれば、目標とする濃度レベルを一時的に越えた(オーバーシュートした)としても、長期(来世紀以降)の深刻な気候影響を軽減できる。特に、グリーンランド氷床融解は千年規模の現象であるので、この考え方に合致する。排出削減の長期目標は2050年時点で議論されるが、気候科学の観点では2050年は通過点に過ぎない。ゼロエミッション安定化の意義は、時間の尺度を大きく延ばして、排出パスの柔軟性を見出す点にある。AR5で検討された多数のオーバーシュート型のシナリオは、排出パスの柔軟性という点でゼロエ

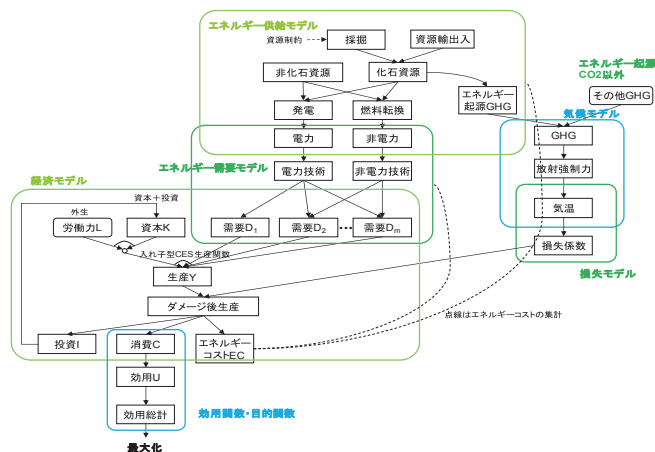
ミッション安定化と共通するが、2100年以降が無視される点が根本的に異なる。また、AR5の低排出シナリオに見られるような負の排出は、ゼロエミッション安定化では考慮されない。

CO₂以外の気候変化要因も考慮して、Z650と2°C目標に適合する濃度安定化を比較した結果を図2-1-14に示す。この図には、論文で示された結果⁽³⁷⁾と、CMIP5モデルの平均に準拠する新しい設定でZ650を計算した結果を示している。ここでは、前者を従来設定として区別する。2050年のCO₂排出量は、濃度安定化では2000年比34%、Z650では同74%で大きく異なる。この違いは21世紀末にかけて気温上昇の差をもたらすが(従来設定の計算でピーク値はそれぞれ1.8°Cと2.2°C)、その差は徐々に縮まり2300年以降に逆転する(最終的な平衡状態でそれぞれ2.1°Cと1.7°C)。非CO₂要因が加わる等価CO₂濃度は、濃度安定化の場合もピーク後減少する経路となる。Z650の濃度はさらに大きく減少するが、2100年時点の濃度に基づくAR5のシナリオ区分(図2-1-11)では、550 ppm eq(480-530 ppm eqの範囲)の区分に位置する。AR5では、21世紀中のピークと2100年時点の差が30 ppm以上の場合にオーバーシュートとしている。Z650は負の排出に至るような極端な削減を想定しないため、AR5の基準ではオーバーシュートに該当しない。

新しい設定の計算では、Z650の気温上昇は明瞭なピークがなく、長期的にほぼ一定(2.1°C程度)で推移する。この計算では、CMIP5モデルの平均を模擬するように、海洋と陸域生態系のCO₂吸収に温度依存性を導入し、さらに気温応答の特性も調整している。また、

非CO₂要因はRCP2.6のシナリオ（過去の期間含む）を用いている。上昇した気温がほぼ一定で長期間続く傾向はAR5の知見と整合するが、気温上昇の大きさや長期的な変化傾向は様々な設定条件に依存する。

様々な不確実性があるものの、Z650は、来世紀以降も含めた長期にわたり、50%程度の確率で2℃目標を達成できる排出パスと位置づけられる。当初意図したゼロエミッションの下での気候復元には相当の時間がかかると見込まれるが、従来の濃度一定の前提と比べて長期の気候影響が軽減されることに変わりはない。いずれにしても、気候感度等の不確実性は依然として大きく、Z650に限らず、気候科学の進展とともに、排出削減目標や気候リスクへの対応を柔軟に見直す必要がある。



生産を各期の消費と投資に適切に配分し、効用の割引・地域別加重後の総計を最大化。気候影響は生産の損失に含まれる。

図2-1-15 BETモデルの構成

(4) 統合評価モデルの役割

Z650は気候科学の観点から考案されたCO₂の排出パスである。排出パスに対応するエネルギー技術や電源構成等の情報は、統合評価モデルから得られる。モデルは現実の世界を極度に単純化したものであるが、その前提条件の範囲で首尾一貫した結果を出力する。その結果から、将来のエネルギー需給見通しなどの情報も含めて、政策的含意を得ることができる。Z650の検討は、これまでキャノングローバル戦略研究所の地球温暖化研究で実施されており、そこでは、エネルギー総合工学研究所の統合評価モデル（GRAPE）のエネルギーモジュールが使われた⁽⁴²⁾。その結果によると、Z650の排出パスを実現するには、特に今世紀後半から、全ての部門であらゆる技術を駆使した排出削減を世界全体で強力に推進する必要があることが示される。

一般に、統合評価モデルは、所定の前提（人口、経済、資源、エネルギー技術等の諸元）で、与えられた制約（例えばZ650の排出パス）に対する最適解を計算するツールである。モデルによって構成や最適解を得る仕組みが大きく異なり、計算結果に大きな差異が生じることも多い。このため、計算結果の理解を深め、適切な政策的含意を得るために、国際的なモデル比較研究のプログラムが多数実施されている⁽⁴³⁾。AR5の社会経済シナリオのデータベースは、このような研究プログラムの成果が集約されたものである。最近では、IPCCの要請を受ける形で、2007年に統合評価モデルコンソーシアム（Integrated Assessment Modeling Consortium: IAMC）

が結成され、統合評価モデルに関連する情報共有と意見交換の場となっている。

当研究所は、この分野では後発となるが、BETと称する独自の統合評価モデルを開発し⁽⁴⁴⁾、国際モデル比較プログラムへの参加を通じて、AR5のシナリオデータベースにも貢献した。BETは、Basic Energy systems, Economy, Environment, and End-use Technology Modelの略称である。

統合評価モデルには、対象地域、経済諸変数の均衡、時系列と最適化、経済部門やエネルギー部門の扱いなどの違いにより、いくつかの類型がある。BETは、世界13地域の経済一部門で多時点の動学的最適化を行う一般均衡モデルで、エネルギー供給部門を詳細に扱える特徴がある。さらに、他の同種のモデルにない特徴として、エンドユース技術（需要側のエネルギー利用技術）を明示的に扱う仕組みを導入している。図2-1-15および表2-1-4に、BETの構造およびエンドユースの需要区分と技術を示す。

緩和策の評価では、CO₂等の制約に対するエネルギー利用の変化やその経済影響が主な関心事である。BETモデルでは、電源構成に代表される供給側の技術だけでなく、需要側の技術も分析対象となる。計算結果の一例として、図2-1-16に、世界全体のGDPと2050年時点のエネルギーサービス需要に対するGHG濃度制約の影響を示す。この計算では、ヒートポンプ、電気自動車、ハイブリッド貨物車などを革新的エンドユース技術とし、それを含めるかどうかの違いを比較している。

表 2-1-4 BET モデルで扱われるエンドユース技術

エネルギーサービス需要	エネルギー	電力	非電力		
			固体燃料	液体燃料	気体燃料
産業	高温加熱	電熱加熱、産業用IH	石炭ボイラ	石油ボイラ	ガスボイラ
	低温加熱	電熱加熱、産業用HP	石炭ボイラ	石油ボイラ	ガスボイラ
	その他電力 ^{※1}	電力	—	—	—
	その他固体 ^{※1}	—	石炭	—	—
	その他液体 ^{※1}	—	—	石油	—
	その他気体 ^{※1}	—	—	—	ガス
業務	機器	電気機器	—	石油ランプ ^{※2}	—
	冷房	エアコン	—	—	—
	調理 ^{※3}	電気	石炭	石油	ガス
	給湯	HP給湯器	—	石油給湯器	ガス給湯器
	暖房	エアコン	石炭ストーブ	石油ストーブ	ガスストーブ
家庭	機器	電気機器	—	石油ランプ ^{※1}	—
	冷房	エアコン	—	—	—
	調理 ^{※3}	電気	石炭	石油	ガス
	給湯	HP給湯器	石炭給湯器	石油給湯器	ガス給湯器
	暖房	エアコン	石炭ストーブ	石油ストーブ	ガスストーブ
	運輸	道路貨物輸送	電気自動車	—	従来自動車
道路旅客輸送		—	—	従来自動車、ハイブリッド車	—
鉄道 ^{※3}		電力	—	石油	—
航空船舶 ^{※2}		—	—	石油	—

※1 加熱以外の需要は代替不能と考える。例えば、電気化学、モーター、原材料等。
 ※2 初期時点の実績との整合のみに採用されることを目的とした技術である。
 ※3 現状モデルでは、将来のシェアは現状レベルで固定と仮定した。

GHG 濃度制約が厳しくなるほど GDP ロスが大きくなるが、その度合いは革新的エンドユース技術によって軽減される。エネルギーサービス需要も GHG 濃度制約とともに減少するが、電力利用のサービスは増加する。この結果は、電気の利用拡大が排出削減に効果的であることを意味する。

このような排出削減におけるエネルギー技術の効果は、モデル間比較のプログラムでも多数検討されている。代表的なモデル比較の一つに、米国 Stanford 大学が主催する Energy Modeling Forum (EMF) が挙げられる。EMF では様々なテーマで多数のプログラムが実施されており、各プログラムは実施順に EMF を冠した番号がつけられている。このうち、当研究所の BET モデルも参加した EMF27 の成果⁽⁴⁵⁾ は、AR5 の緩和シナリオの評価で多数引用された。

EMF27 では、18 個の統合評価モデルが参加して、技術と気候政策の異なる条件を組み合わせた 30 程度のシナリオ計算が実施された。技術条件には、エネルギー強

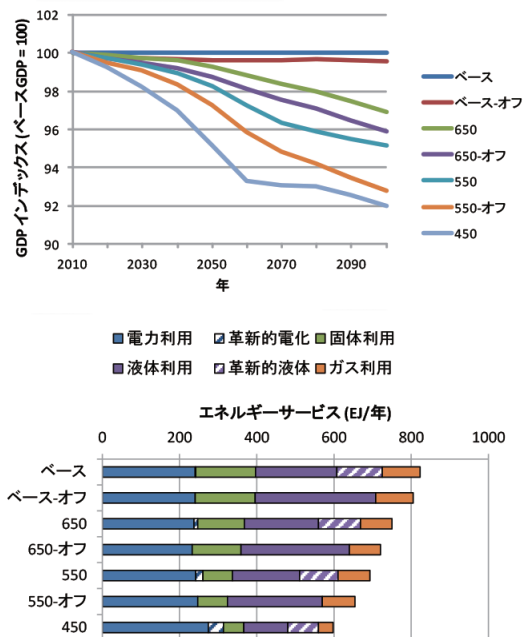


図2-1-16 GHG濃度制約に対するBETモデルの試算

GHG濃度は、「ベース」が制約なし、650、550、450が2100年時点にそれぞれのレベル(等価CO₂濃度、単位ppm eq)に達する制約を課す場合。固体、液体、ガスは2次エネルギーとして使用される燃料の形態を表す。

度の改善、CO₂ 回収・貯留 (carbon capture and storage: CCS)、原子力、太陽・風力、バイオエネルギーが含まれる。エネルギー強度は、単位経済量当たりのエネルギーで、値が小さいほど改善される (エネルギー利用効率が低い) ことを意味する。気候政策は、特段の排出削減を行わないベースラインの他、等価 CO₂ 濃度を 2100 年までに 450 ppm eq ないし 550 ppm eq に抑える条件などが設定された。分析結果は次のように集約される。

- ・世界のエネルギーシステムの脱炭素化では、エネルギー強度の改善と、電力部門の脱炭素化およびエンドユースの電化が確固たる変革となる。
- ・鍵となる技術の中では、負の排出をもたらす CCS とバイオエネルギーの組み合わせといった、効果が多方面におよぶ技術が最も重要。
- ・変革規模が大きくなる 450 ppm eq の条件では、利用可能な技術の違いによって、実現可能性 (解が得られない場合あり) やコストが大きく異なる。

AR5 の緩和シナリオの評価においても、需要側の観点から、既存のエネルギー源の低炭素化とともに、電気利用の増加などを通じた低炭素燃料の利用拡大に言及しており、そこでは当研究所の成果も根拠の一つとなっている^{(46), (47)}。当研究所では、エネルギー強度の改善にも注

目しており、EMF27の多数のモデルについて次の傾向があることを分析している⁽⁴⁸⁾。

- ・ 450 ppm eq の条件では、エネルギー強度の改善率が2010-30年の期間に1年当たり2.3%（モデルの範囲は全体で1.3-2.9%、地域別・部門別では拡大）となり、過去の実績（年率1.3%）と比べて非常に大きい。
- ・ この改善率は、CCSが利用できないといった技術的な制約があるとさらに大きくなり、省エネに過度に期待することになる。
- ・ モデル間の違いの中で、例えば、輸送部門においては、所定のエネルギー効率を達成するために、一般均衡型のモデルはサービス需要を減らす傾向があり、部分均衡型のモデルは技術の代替を指向する傾向がある。

実際のエネルギー強度の改善では、技術の普及を妨げる様々な障壁やエネルギーサービス価格の低下に伴う需要の増大（リバウンド効果）が生じる。EMF27のモデルでは、これらの効果がある程度現実的に扱われている。

450 ppm eq のような2100年時点の濃度レベルは、基本的には、その時点までの累積CO₂排出量に依存する。したがって、途中の時点（例えば2050年）の排出量の多寡によらず、2100年時点で累積排出量が同じであれば同程度の濃度レベルとなる。EMF27の異なる技術と気候政策（2100年時点の濃度レベル）を組み合わせる設定は、与えられた技術オプションで、気候政策で制約される累積CO₂排出量を満たす経済最適な排出パスを見出す問題と捉えられる。当研究所のBETモデルでは、CCSが利用できない条件では、450 ppm eq に対する最適解は得られなかった。この結果は、450 ppm eq の達成が相当困難であることに加え、技術の利用可能性によって排出パスの選択に柔軟性があることを示唆する。

CCSはバイオエネルギーと組み合わせることで原理的には負の排出を実現できる⁽⁴⁹⁾。この可能性をどの程度想定できるかによって、2050年といった途中の時点の削減量は大きく左右される。負の排出は、大気中からCO₂を除去することを意味し、その手段はcarbon dioxide removal (CDR) と総称される。その代表例がCCS付きバイオマス発電でBECCSと呼ばれる（BEはbioenergyの略）⁽⁴⁹⁾。他のCDRには大規模植林や、空気中のCO₂を直接回収・処分する技術などがある。CDRの手法は、規模によっては、従来の緩和策と区別して、気候工学（ジオエンジニアリング）^{(50),(51)}と分類されるこ

ともある。

BECCSは統合評価モデルで最も検討が進んでいるCDR手法である。当研究所のBETモデルでは、図2-1-17に示すように、バイオマス資源量の仮定の違いによって、経済最適な排出パスが大きく変わる結果が得られた⁽⁵²⁾。資源量の制約が最も厳しい場合、2050年のCO₂排出量は2000年比50%の水準を下回り、CO₂価格（排出削減の限界費用）は2100年までに1 tCO₂当たり3000ドルを越える。これに対し、土地利用競合等に楽観的な仮定をおく場合、2050年の排出量は2000年の水準を若干下回る程度となり、2080年以降の排出量が負になることで相殺される形となる。この場合、2100年時点のCO₂価格は1 tCO₂当たり1000ドルに抑えられる。

BECCS等のCDR手法は、所定の累積排出量を達成する排出パスの選択に柔軟性をもたらすが、その導入は確証されてはいない。BECCSも要素技術の開発は進められているがシステムとしては未完成である。バイオマスの大規模利用には生産性の向上や土地利用の競合などの課題もある⁽⁵³⁾。

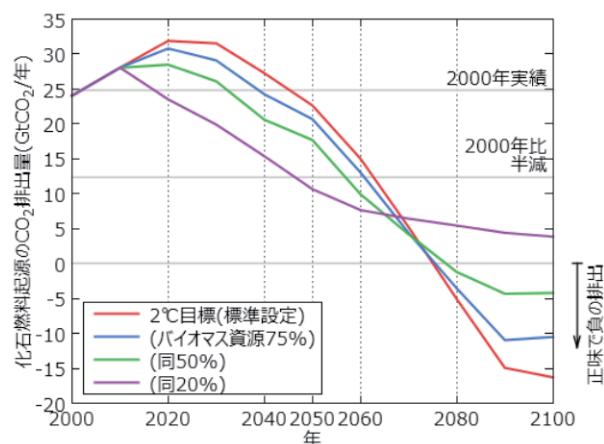


図2-1-17 所定のバイオマス資源量で450 ppm eqのGHG濃度の制約に適合するCO₂排出パス

2100年時点のバイオマス利用可能量は、標準設定では年間約460 EJ（土地利用競合等に楽観的な仮定をおく場合）、下限の20%の設定では年間100 EJ（廃棄物系バイオマスの利用に限定する場合）。

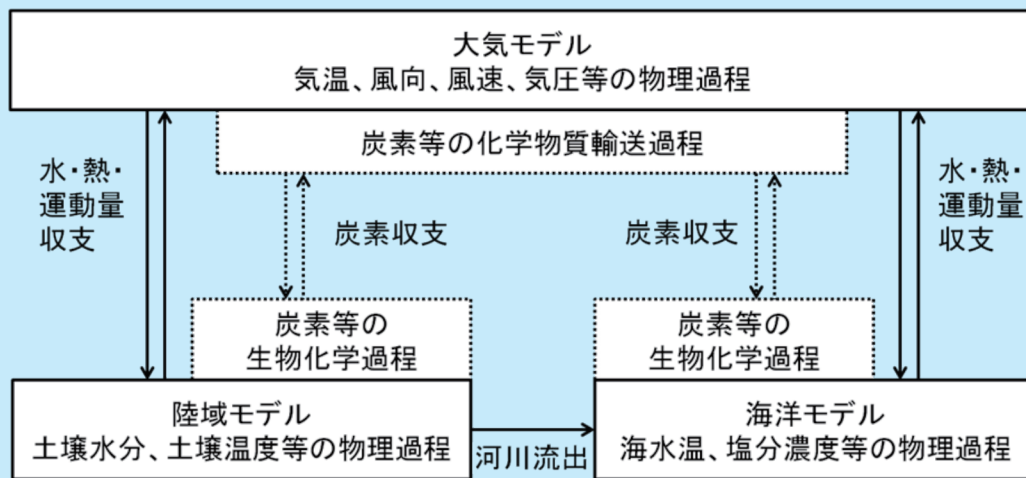
人間活動によって排出されたCO₂が海洋や陸域生態系に吸収される割合は、気温が高くなるにつれて減少する。このため、CO₂排出に起因する気温上昇は、大気に残るCO₂の割合が増加することで、さらに大きくなる。この効果は気候炭素循環フィードバックと呼ばれる⁽¹⁾。

このような気候変化と炭素循環の間の相互作用を評価するために、従来の気候予測に利用されている大気海洋結合モデルに、地球規模の炭素の循環を表す生物地球化学過程を結合した地球システムモデル(図1)の開発が進んでいる。この生物地球化学過程には、植生による生産活動、微生物による有機物の分解、海洋によるCO₂の吸収や放出、海洋生態系による有機炭素の沈降分解など、様々な過程が含まれる。地球システムモデルによって、炭素循環過程を含めた気候変化やその不確実性の要因などに対する科学的理解の向上が期待される。また、CO₂排出量から大気CO₂濃度や気候の変化を詳細に評価できるようになり、温暖化緩和策の検討で基盤となる科学情報がさらに充実してきた。

2013年に発表されたIPCC WG1 AR5⁽²⁾では、地球システムモデルを用いた一連の研究から、累積CO₂排出量と気温変化がほぼ比例関係にあることを報告している。ただし、その比例定数の不確実性は

大きく、可能性の高い(66%超)範囲が1000 GtC当たりの温度上昇で0.8℃から2.5℃の範囲と評価されている。また、気候炭素循環フィードバックの符号が正、すなわち気温上昇によって自然のCO₂吸収率が減少し、排出されたCO₂がより多く大気中に留まることが、高い確信度で評価された。

このように気候と炭素循環に関する科学的理解は深まっているが、炭素循環は温暖化予測の新たな不確定要因と認識されるようになった。当研究所では、地球システムモデルを用いて、長期の気候安定化について、特にCO₂排出がゼロになった後の気候の復元に着目して、検討してきた⁽³⁾。ゼロ排出すなわち累積排出量が一定の状態では、大気CO₂濃度は長期的に低下するが、気温は大気CO₂濃度の変化から期待されるほどには低下しない。これはCO₂濃度による放射強制力の低下と海洋の熱吸収による気候の慣性が相殺するためと理解され、その度合いは地球システムモデルの特性によって異なる⁽⁴⁾。また、長期的な気温変化の傾向は、累積CO₂排出量を一定とした場合の排出経路にほとんど依存しないことも確認している⁽⁵⁾。これらの結果は、累積CO₂排出量が長期的な気候安定化を特徴づける重要な指標であることを示唆している。



枠と矢印は要素モデルと要素モデル間の物理量の交換を表す。実線は大気海洋結合モデルの要素で、点線は地球システムモデルに組み込まれる生物地球化学過程の要素を示す。

図1 地球システムモデルの概念

コラム 2: 海洋生態系モデル

産業革命以降に大気中に放出された二酸化炭素(CO₂)の約1/3は海洋が吸収してきたと考えられている⁽¹⁾。そのため、今後、海洋が大気中のCO₂をどの程度吸収するか明らかにすることは、温暖化を予測する上で重要である。当研究所では米国大気研究センターと協力して、海洋の生物活動や化学物質の循環を計算できる数値モデル(海洋生態系モデル)を開発し、海洋のCO₂吸収量変化の予測を行っている。

海洋の表層では、光合成により植物プランクトンが海水中のCO₂を固定し(一次生産)、その死骸が有機炭素として沈降することで、海洋の深層へ炭素を輸送している。海洋の深層へ輸送された有機炭素の大部分は分解されて無機態に戻るが、深層水が表層に戻るまでには百~千年の時間を要することから、長期に渡って大気からCO₂を隔離する。この炭素の輸送過程は駆動力が一次生産であることから生物ポンプと呼ばれている。海洋のCO₂吸収量変化を予測するには、駆動力である一次生産の変化を予測することが大切になる。

海洋の一次生産量は、主に水温や光、溶存栄養物質の濃度により決まる。温暖化すると、水温の上昇や海水の融解により海面に届く光量が増え、水温や光の条件は改善すると予想される。一方、表層水温の上昇や海水融解による表層水の低塩分化は、鉛直の密度差を増加させ(成層化)、深層水との混合を減少させる。栄養物質は深層水に豊富に含まれることから、栄養物質の条件は悪化すると予想される。

将来の環境変化は、正味の影響として一次生産をどちらの方向に変化させるのであろうか? 複合的な要因を定量的に評価するため、海洋生態系モデルを用いた温暖化実験を行った^{(2),(3)}。産業革命前の状態からモデルを駆動し、高排出シナリオ(RCP8.5)の条件で2100年までの計算を行った(図1)。その結果、一次生産は低緯度域で成層化により減少、高緯度域では水温・光環境の改善により増加した。正味の影響として2090年代の一次生産量は1990年代と比べ6%減少すると予想された。このような結果は世界各国のモデルの結果からも得られており、一次生産の減少量は1-10%程度と予想されている⁽⁴⁾。温暖化に伴う環境の変化は生物ポンプの働きを弱め、他の条件が同じであれば、温暖化を加速させる可能性が高い。

海洋の一次生産量変化の予測には、多くの不確実性が残されており、さらなる研究が必要である。例えば、我々の結果では東部赤道太平洋域で一次生産が増加していたが、他のグループの結果では減少していた。この違いを調べたところ、我々の結果では、温暖化に伴う海流の変化が栄養物質の一つである鉄の供給を増加させているためであることが分かった⁽²⁾。モデル間の結果の比較による不確実要素の洗い出しと、観測データとの比較によるモデルの妥当性の検証により、海洋のCO₂吸収量の予測を精緻化することが、温暖化予測の不確実性の低減に不可欠である。

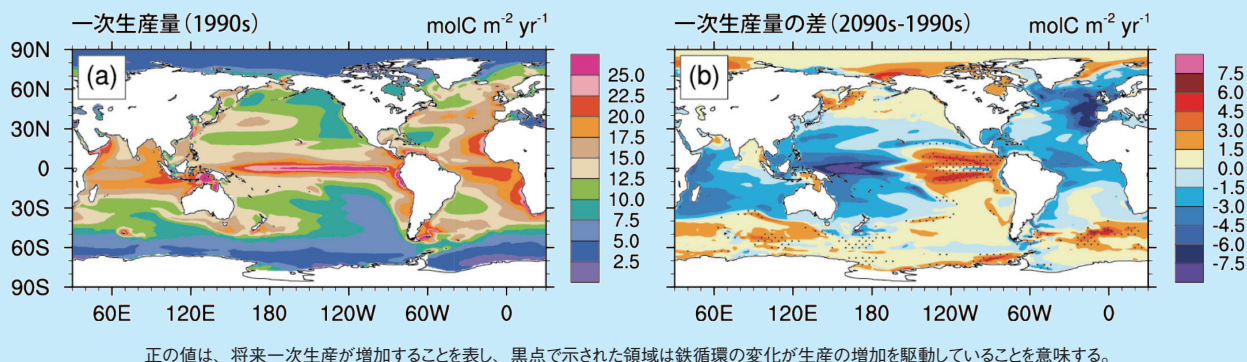


図1 海洋生態系モデルで再現された、1990年代の一次生産量の分布(a)と、高排出シナリオ(RCP8.5)における2090年代と1990年代の一次生産量の変化(b)⁽²⁾

海洋酸性化は大気 CO₂ 濃度の増加により引き起こされる新たな環境問題として認識されつつある。人為活動により大気 CO₂ 濃度が増加すると、大気と接している表層海水への CO₂ 溶解量が増加する。CO₂ は弱酸性を示す気体であるため、CO₂ 溶解量の増加は海水の pH を低下させる。外洋海域での定点観測結果から、表層海水の CO₂ 分圧は大気 CO₂ 濃度と同程度の速さで増加していることが明らかとなっている（図 1）。将来の大気 CO₂ 濃度の増加はさらなる pH の低下をもたらすことになり、CO₂ 排出シナリオによっては 2100 年時点で海水 pH が 7.7 まで低下する可能性もある（表 1）。pH とは、水中の水素イオンのモル濃度を逆数の常用対数で示したものであり、pH が現在の 8.0 から将来 7.7 まで低下したとすると、水素イオン濃度は約 2 倍に増加することを意味する。現在観測されている pH 低下速度は、過去の地球環境の変遷のなかでも極めて大きなものであり、海洋生物に種々の影響をもたらすことが懸念されている。

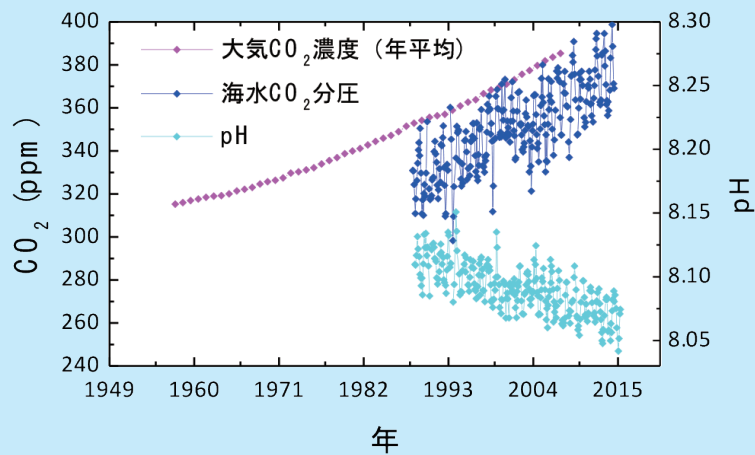
海洋酸性化の現状とその生物影響を解明するための研究は世界中で活発に進められている。例えば、最新の研究成果は 4 年毎に開催される国際シンポジウム「The Ocean in a High-CO₂ World」において発表されてきた。会議での研究発表件数は回を追うごとに飛躍的に増加しており、この分野が近年の海洋研究のトピックの一つであることを示している。

当研究所では、海洋における食物網の起点であり物質循環の駆動力となっている植物プランクトンへの海洋酸性化の影響を室内や現場での培養実験により評価し^{(1),(2)}、その成果を発表してきた。現在は、海洋酸性化と同時に進行すると考えられる水温上昇や溶存酸素濃度の減少をも加味した影響評価研究が実施されつつあり、当所でも海洋酸性化と水温上昇の複合影響評価に取り組んできた。2016 年 5 月にオーストラリアで開催される次回会議では、これらの複合影響に関する新たな知見が数多く報告されることが期待されている。

IPCC WG2 AR5⁽³⁾ では海洋酸性化の生物影響に関する最新の知見が取り纏められ、当所の成果の一部も引用され貢献したが、海洋生物への影響を総合的に理解する上では知見がまだまだ十分ではないことが示された。今後は生物や物質循環への影響の知見を充実させるだけでなく、モデルなどを活用した海洋生態系への影響評価が求められている。

表 1 水温 20℃、塩分 35、全アルカリ度 2350 μmol/kg を仮定した海水が大気成分と平衡状態にある場合の、大気 CO₂ 濃度と海水 pH の関係

大気 CO ₂ (ppm)	海水 pH (total scale)	年代
280	8.17	産業革命前
400	8.04	現在
550	7.93	2100年(RCP4.5)
650	7.86	2100年(RCP6.0)
900	7.74	2100年(RCP8.5)



米国 The Carbon Dioxide Information Analysis Center (<http://cdiac.ornl.gov/>) の公開データを使用。

図 1 ハワイ沖の観測地点における大気 CO₂ 濃度、海水 CO₂ 分圧、および海水 pH の時系列変化

2-2 電気事業への影響

2-2-1 概説

(1) 温暖化の適応策の役割

気候安定化に向けたCO₂排出削減が実現できたとしても、その効果が現れるまでには時間がかかる。したがって、今後の排出シナリオによらず、今世紀半ば頃までは同程度の温暖化が進行する。このような不可避の気候変化に対処するため、各種の適応施策が必要となる。CO₂排出削減が計画通りに進まない場合や、オーバーシュートシナリオの考え方で排出削減が遅れる場合は、適応策の役割がさらに重要になる。

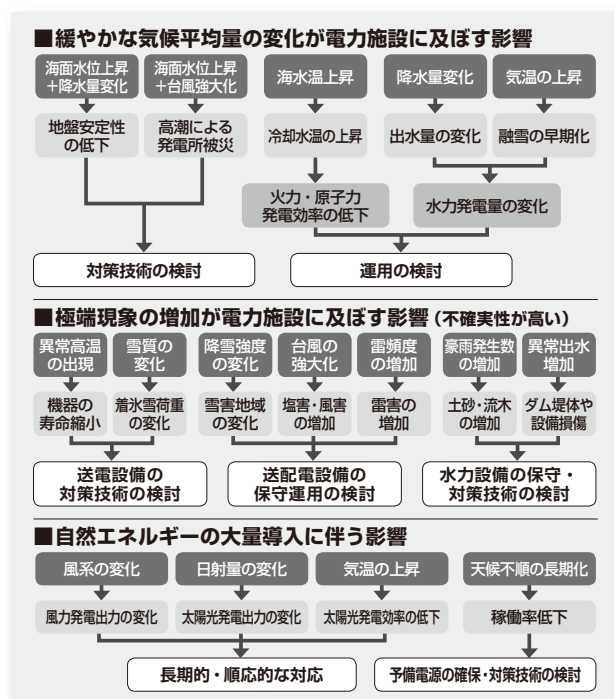
予想される気温上昇には、気候感度などの不確実性が含まれる。気候感度は長年にわたる重要な研究課題の一つであるが、現状では、気候感度が想定以上に高い場合に備えるリスク管理も求められる。

現実の気温変化には、自然起源の外的要因や、気候システム内部の変動も加わる。数十年規模の変動によって、ある時期に急激な気温上昇が生じる状況や、逆に気温上昇が抑えられる状況もあり得る。いずれにしろ、長期にわたる人為的な気候変化と自然の気候変化・変動を合わせて、気温上昇とその不確実性を定量化する必要がある。適応策は、地球温暖化のためだけの施策ではなく、既存の防災や水資源管理などの施策に統合化されるべき性質のものである。したがって、人為起源、自然起源の区別によらず、気候変化・変動に対処し適応するための施策は、同一の枠組で検討されるべきである。これは、地球温暖化対策の主流化、すなわち様々な施策の中で地球温暖化対策を一定程度位置づける考え方に通じる。

適応策の検討には、地域毎の詳細な気候予測が必要となる。また、気温や降水量などの気象要素の平均的な変化に加え、それらの変動の大きさや、極端な変動を引き起こす事象の頻度や大きさが問題となる。このような局所的な変動や極端現象に関する気候予測は、自然変動の影響が大きく、気候モデルによって定性的、かつ定量的にも異なることがあり、不確実性が大きい。地域規模の気候予測は、今後の研究の進展が期待される分野である。当研究所の取り組みについては2-2-2節で述べる。

(2) 安定供給における電力設備への影響

電気事業においては、CO₂等の排出削減を進めていく中で、地球温暖化の影響にも適切に対処することが求められる。当研究所ではこの問題に早くから注目し、地球温暖化がわが国の電気事業におよぼす影響を分析し、適応策の考え方を示してきた^{(1),(2)}。さらに、影響項目の中から電力供給設備に注目して、具体的な対応策を議論してきた⁽³⁾。以下では、文献⁽³⁾に基づいて、電力供給設備における温暖化リスクと対応戦略を概観する。



※懸念される事項を抽出したもので影響度合いが正確に予測されているものではない。

図 2-2-1 電力安定供給への潜在的な温暖化影響リスク（出典「電気の子カラ」エネルギーフォーラム 2010年4月：図Ⅱ-29より転載）

安定供給の観点では、図2-2-1に示すような潜在的なリスクがある。これは、気候影響に関する既往のイベントツリーや専門家へのヒアリングを基に、再生可能エネルギーの利用拡大も考慮して、電力設備の健全性に関わる主要なリスクを整理した結果である。個別の事案についての影響の度合いはそれぞれ異なるが、対策は既存の安定供給を確保するための施策の延長線上にあり、必ずしも特別な対応が必要となるわけではない。前述のように、既存の様々な施策の中に、地球温暖化対策の観点を取り入れる主流化の考え方が基本となる。

個々の設備に影響をおよぼす気候の要因は、気温や海

面水位などの平均値の変化と、台風、豪雨、異常高温、および雷の発生頻度といった極端現象の変化に分けられる。前者は緩やかに進行する変化であり、その影響を早い段階で検出して、計画的に影響を軽減・回避することが重要である。その際、例えば、海水温（冷却水）の上昇によって発電効率が低下する懸念については、当研究所の評価ツール⁽⁴⁾を活用できる。

一方、極端現象については、不確実性が大きく信頼できる予測結果を得ることが難しいが、自然変動の振れ幅の拡大が懸念されている。このため、現状の極端現象に伴う自然外力に対して電力設備をより強固にすることを基本に、将来想定される自然外力にも対応できる運用技術や監視・保守体制の強化に向けた取り組みが必要である。これは温暖化対策の主流化の考え方に合致するもので、その際、当研究所の保有する様々な技術（塩雪害・雷害対策、地盤安定性評価、出水解析など）が、温暖化リスクの低減や実際の被害軽減に役立つ。2-2-3節では、気候の外力が支配的となる送配電設備と水力設備、およびその周囲の生態系における影響と対策について述べる。

2-2-2 影響評価のための詳細な気候予測情報

地球温暖化の影響や適応策を検討するには、平均的な気候よりも、むしろ熱波・豪雨・強風などの極端な現象の強度や頻度の変化の予測が重要である。極端な現象には、時間的に数時間以下、空間的には数十 km 以下のスケールのものが含まれる。ところで、気候変化予測には、通常2-1節で述べたような全球気候モデルが用いられるが、その出力データの空間解像度は100 km程度、また時間的にも1日に1回程度、高頻度でも6時間毎までとなっており、そのままでは、前述のような極端現象の情報抽出は難しい。そのため、全球気候モデルの出力から時間・空間的に細かい現象に関する情報を抽出するために、様々な手法が提案されており、それらは一般に「ダウンスケーリング」と呼ばれる。

ダウンスケーリングで最もオーソドックスなのは、力学的ダウンスケーリング(力学的DS)と呼ばれるもので、全球モデルの出力を境界条件として、数十 km 以下の格子の気候モデルを用いて高解像度の気候場を推定する方法である^{(5),(6)}。当研究所では、この方法を用いて日本付

近の過去の気候場を、5 km、1時間間隔の高解像度で再現しており（コラム4参照）、さらに、気候予測モデルの出力の力学的DSを計画している。力学的DSは、現在の気候予測でも行われている手法であり、気候モデルの進歩とともに精度の向上も期待できる反面、莫大な計算量を必要とする。特に、稀にしか起こらない極端現象の頻度を精度よく推定するために見掛けのデータ期間を増やすアンサンブル手法を用いるような場合には、その計算量はさらに大きな問題となる。

力学的DSに対して、過去のデータの統計的關係に基づき、全球モデルで表現される広域場から地域的気候場を推定する手法は統計的ダウンスケーリング(統計的DS)と呼ばれる^{(7),(8)}。統計的DSでは、力学的DSに比べて極めて少ない計算量で推定結果が得られる反面、極端な値の再現は難しく、文献^{(7),(8)}でも平均的な気候の議論にとどまる。そのため、極端現象の強度や頻度の温暖化影響を予測するためには、単純な統計的手法にとどまらない経験的手法や、気象要素の物理的關係性に着目した手法が提案されている。

本小節では、そのような手法のなかから、当研究所で開発した手法やその適用結果を紹介する。

(1) 統計的DS手法による確率予測

通常の統計的DSでは、広域場(説明変量)と局所的な値(目的変量)の關係は、重回帰やその派生的な形で定式化されるが、そのほとんどは標準誤差が一定であることを暗黙のうちに仮定したものになっている。しかし、実際には標準誤差は気候場の状態に大きく依存することが経験上示唆される。当研究所では、この標準誤差の変化に着目して、推定対象(目的変量)の確率密度関数(Probability Density Function: PDF)を推定する手法を開発した⁽⁹⁾。本手法は、九州の気象官署における日降水量や同じく九州の河川の流域平均日降水量を対象として、過去のデータに基づく検証により、観測値の分布と矛盾ない気候的PDFが得られるという優れた特性を有することが示されている⁽¹⁰⁾。本項目では、本手法の概要と、これを過去の気候的PDFの推定や、気候モデルに基づく将来の豪雨強度の変化推定を行った結果を示す。

a. 確率密度関数推定手法

一般的には、統計的ダウンスケーリングは、① 大域の状態を表す説明変量と局所的な状態を表す目的変量の関係を過去のデータの組から統計的に導出する部分と、② 新たな説明変量の値に対して目的変量の値を推定する部分より構成される（図 2-2-2）。但し、ここで用いた手法では、推定対象が目的変量そのものではなく、目的変量の PDF を決定するパラメータという形になる⁽⁹⁾。例えば、目的変量 y の PDF モデルとして正規分布を用い、そのパラメータである期待値 μ と標準偏差 σ を説明変量 x の一次関数で表す形をとる。

$$P(y;x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2-2-1)$$

$$\mu = a_{10} + \sum_j a_{1j} x_j \quad (2-2-2)$$

$$\sigma = a_{20} + \sum_j a_{2j} x_j \quad (2-2-3)$$

ここで、 a_{1j} 、 a_{2j} は、超パラメータで、推定式構築の処理での推定対象である。推定は最尤推定法 (Maximum Likelihood Estimation: MLE) の原理に基づく。すなわち、全サンプルにわたる平均対数尤度

$$L = \sum_i \log [P(y_i; x_i)] \quad (2-2-4)$$

を最大化するように、係数 a_{1j} 、 a_{2j} (超パラメータ) を決定する。式 (2-2-4) より明らかなように、この最大化問題は、非線型の逆問題 ($\partial L/\partial a_{1j}, \partial L/\partial a_{2j}=0$) であるため、ニュートン法に基づく繰り返し計算を用いて解く。得られた係数 a_{1j} 、 a_{2j} と式 (2-2-1-2)、(2-2-1-3) に基づき、説明変量の値に対応する μ 、 σ の値が得られ、PDF は式 (2-2-1) の形で推定される。このようにサンプル毎に推定される PDF を対象期間平均することで、その期間の気候的 PDF が推定される。

b. 流域平均日降水量の PDF 推定

統計的ダウンスケーリングでは一般に、説明変量として過去のデータと対応のつく低解像度データを用いて推定式を構築する。ここでは、気象庁と当研究所の共同研究として実施された JRA-25 長期再解析 (JRA-25) の結果を用いた。JRA-25 での解析方法や結果の特性については文献^{(11)~(13)}に詳しい。目的変量が日降水量であることに対応して、説明変量は JRA-25 の出力のうち 1 日サンプル (1 日平均値または 1 日積算値) のものに限定した。

流域日降水量はレーダーアメダスのデータから推定し、更に AMeDAS データに基づき対象期間 1988-2008 年までの 21 年間で均質になるよう補正を行なった。

まず、説明変量 (JRA-25 データ) と流域平均日降水

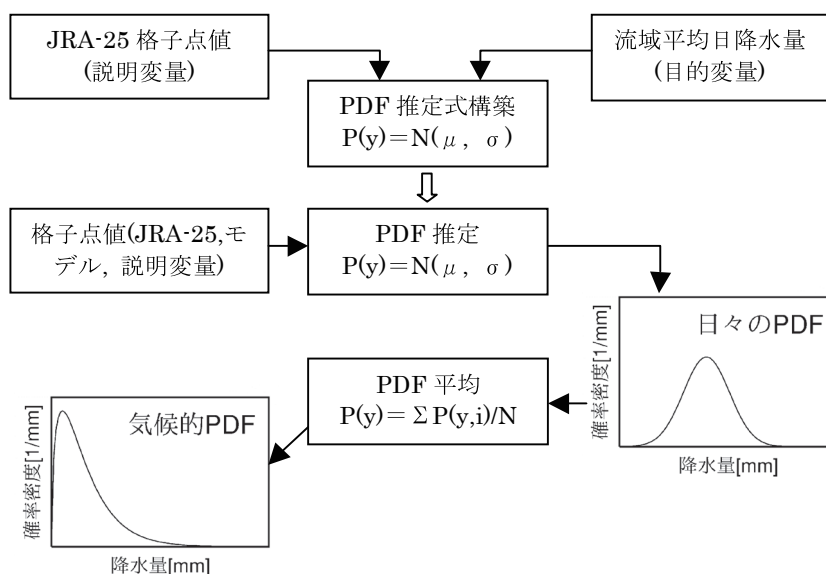


図 2-2-2 PDF 推定モデルの概念

過去のデータに基づき PDF 推定式を構築する。構築した式に、説明変量を当てはめて、日々の PDF を推定する。更にこれを平均することで気候的 PDF を得る。

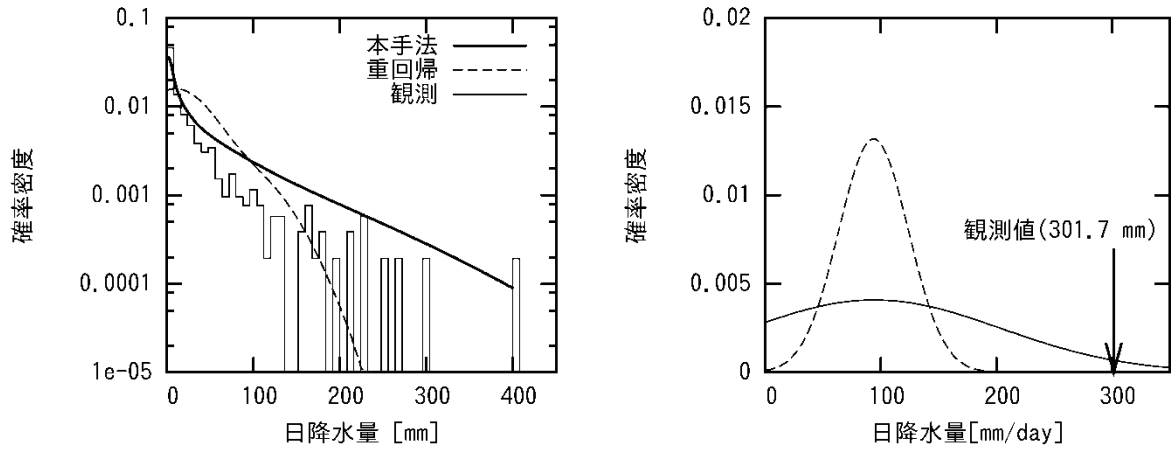


図 2-2-3 流域平均日降水量の PDF の推定例（流域 A、7 月）

左は対象期間を通じての気候的 PDF、右は観測値が 301.7 mm となった 1993 年 7 月 17 日の PDF。
 横軸は日降水量、縦軸は確率密度。実線、破線はそれぞれ本手法及び、重回帰による推定。ヒストグラムは観測の頻度を表す。

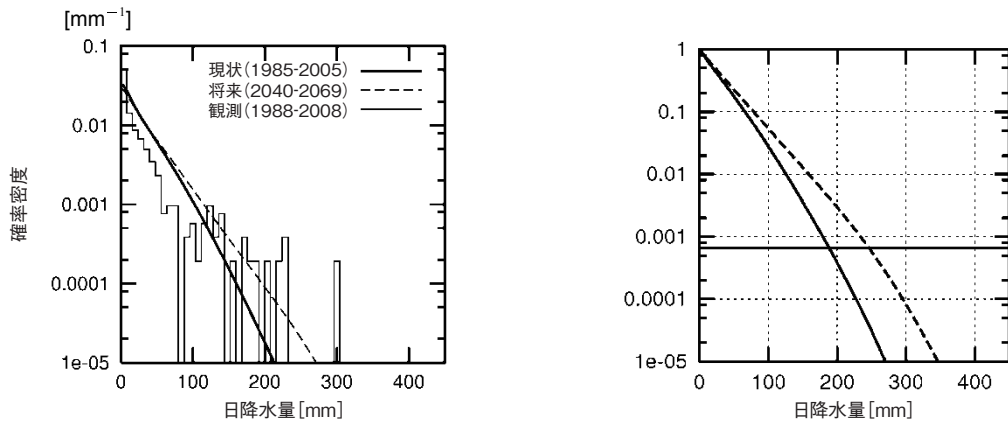


図 2-2-4 気候モデルの出力より推定した流域平均日降水量の気候的確率

流域 B (737 km²) 7 月の気候的 PDF (左) の推定結果とこれを積分することで得られる超過確率 (右) を示す。実線、破線はそれぞれ現状再現 (1985-2005 年) 及び、将来予測 (RCP4.5 シナリオによる 2040-2069 年) に対する推定、ヒストグラムは観測の頻度 (PDF のみ) を表す。超過確率について、50 年 (7 月のみ) に 1 回の頻度に相当する確率を水平線で示す。この頻度に対応する降水量の将来の増加率は、解析した 20 の流域の平均で 20% と推定された。

量の関係式を構築し、次に、その関係式に JRA-25 のデータを適用して日々の PDF 推定を行ない、更に対象期間平均により気候的 PDF を推定した。得られた PDF の例を図 2-2-3 に示す。同図右は、大きな流域平均日降水量 (301.7 mm) を記録した 1993 年 7 月 17 日の例である。本手法と重回帰手法では、期待値の推定はほぼ同じになっているが、標準偏差について、本手法では重回帰に比べ大きな値を推定しているため、観測値に対応する PDF の値、すなわち尤度が大きくなっている。これは本手法の優位性を示すものである。同図左は、個別の日の PDF を期間平均した気候的 PDF であるが、本手法では大きな降水でも PDF が極端に小さくなることはなく、

低頻度の豪雨の領域での表現に優れることがわかる。

c. 温暖化による極端降水の変化予測

気象研究所の気候モデル MRI-CGCM3⁽¹⁴⁾ による温暖化予測結果 (空間解像度約 120 km) を用いて、九州の主要河川 5 水系 20 流域における日降水量の、現状再現時と将来予測時 (全球平均気温上昇 1.1 °C) の PDF を推定した。図 2-2-4 にその例を示す⁽¹⁵⁾。左は面積 737 km² の流域の現状再現と将来予測の推定 PDF を、右はこれを積分することで得られる超過確率を示す。後者においては 50 年に一度の頻度に相当する確率を横線で示したが、これに対応する降水量 (再現期間 50 年の

確率降水量)は現状での約190 mmに対し、将来予測では約240 mmに増加することが示されている。また、推定した九州の20の流域のいずれにおいても、将来の極端降水の頻度が増加する結果が得られている。当研究所では、今後、複数の気候モデル出力について同様の解析を行い、将来変化の予測の信頼性を評価するとともに、対象を日本全国の流域に広げて、豪雨増加率のマップ化を計画している。

(2) 極端気象のパターン抽出

豪雨の長期的な変動と将来的な変化に関する情報は防災・インフラ設備の被害軽減や維持管理に有用である。特に、梅雨前線の強化等に伴って生じる豪雨・洪水は、河川周辺・ダム設備の防災・運用・保守管理などに多大な影響を与えている。設備に大きな影響を与える洪水の発生には、数日程度の広域スケールの気象場と関係していることが多い。当研究所では、自己組織化マップ(Self-Organizing Map: SOM)と呼ばれるニューラルネットワークの手法を用いて、梅雨期における広域気象場の変動パターンの分類を行い、広域気象場と降水との関連性を地域的な差異や長期的な変化傾向の観点から調査した^{(16),(17)}。

解析には全球再解析データと高解像度の日本域降水

グリッドデータを使用した。再解析データには、JRA-25の改訂拡張版として気象庁で作成されたJRA-55長期再解析⁽¹⁸⁾の日平均データを用い、降水量には雨量計観測から得た日降水量データをもとに作成されたAPHRODITE's Water Resources プロジェクトによる解像度0.25度の高空間分解能日降水量グリッドデータ⁽¹⁹⁾を使用した。気象場としてJRA-55の850-hPa 東西風、南北風、相当温位、200-hPa 気圧面高度場の4要素を入力ベクトルとし、日平均の気候値からの偏差(1958-2011年の気候値からの差)にノード数12×12のSOMを適用し、さらにその結果をクラスター解析により分類した。相当温位とは、水蒸気を含む空気塊の断熱過程で一定値となるように定義された温度で、大気の状態の不安定性を捉えるのに適している。また、上空の気圧面高度場は偏西風の蛇行などの影響を捉え、下層の水平風は気圧配置の代替になるとともに、熱帯からの影響を捉えるのに適していると考えられる。

SOMによる解析の結果、マップ上において、強い降水(日降水量150 mm)が頻繁に発生する気象場が見られた。これら豪雨イベントと比較的関連性が深いと考えられる、7つのクラスターを豪雨に関連した気象パターン(Clst1-7)として抽出した(図2-2-5)。各豪雨パター

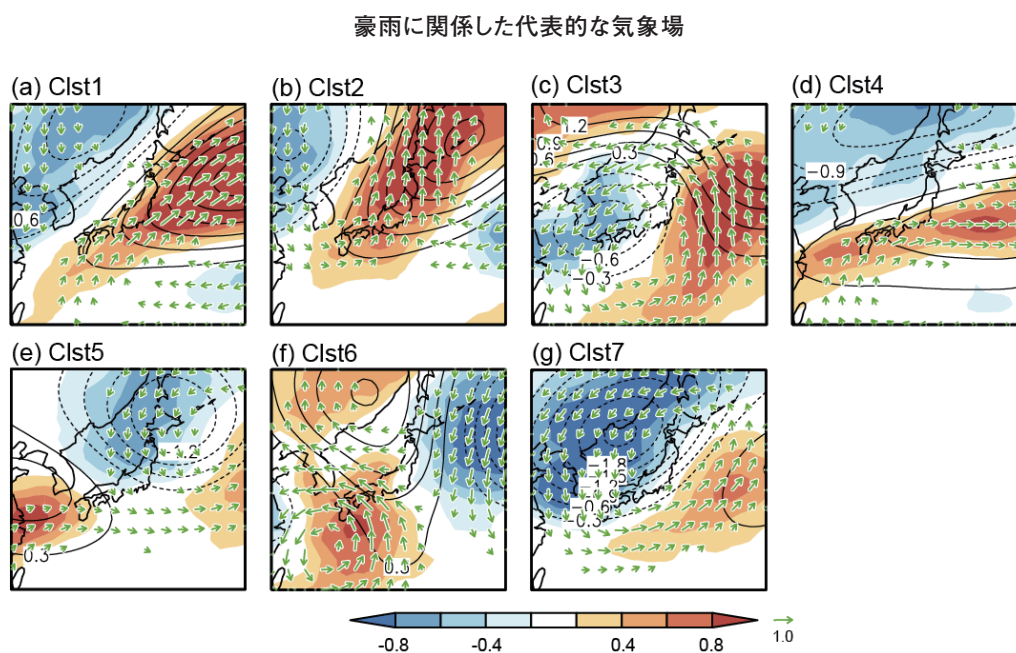
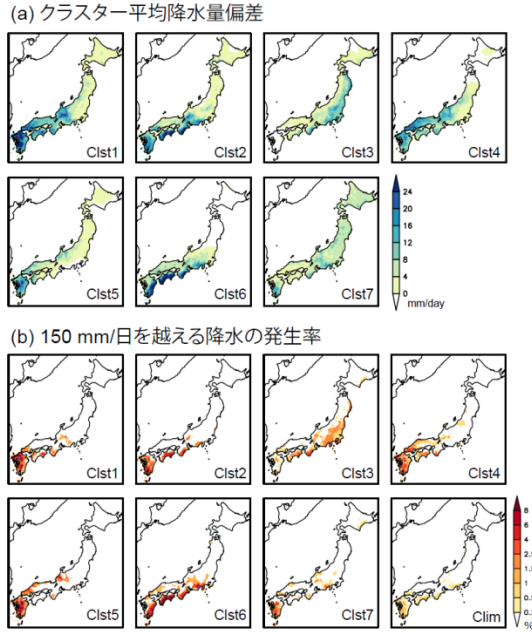


図 2-2-5 豪雨(150 mm/day)の発生と関連が深い SOM 上の気象パターンの分類

気象パターンの分類は、規格化された日平均の850-hPa相当温位(陰影)、200-hPa気圧面高度場(等値線)、および850-hPa風速(矢)の偏差による。文献⁽¹⁶⁾ Fig. 2から引用。



(文献⁽¹⁶⁾ Fig. 4 から引用。)

図 2-2-6 パターン別の平均降水量偏差 (a) と日降水量 150 mm の豪雨イベントの発生率 (b)

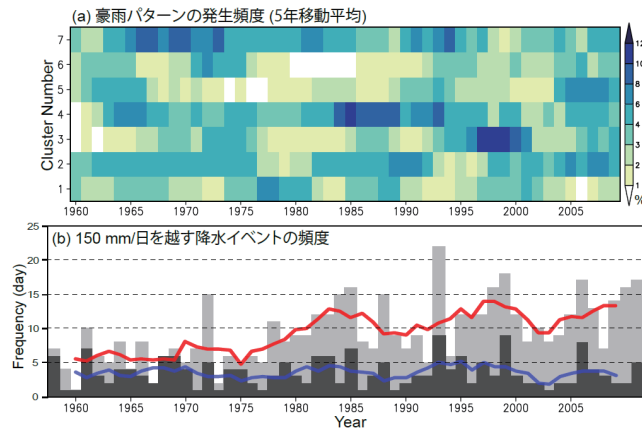


図 2-2-7 豪雨パターンの発生頻度 (a) と豪雨イベントの発生頻度 (b) の時間変化

豪雨パターンの発生頻度は、分類種別毎の 5 年移動平均、豪雨イベント (日降水量 150 mm) の発生頻度は、全データの集計と 60 地点のデータの集計から、5 年移動平均 (赤色と青色の線) および年別値 (灰色と黒色の棒) を示す。文献⁽¹⁶⁾ Fig. 8 から引用。

ンは主に湿潤空気の流入方向によって特徴付けられる。

例えば、日本の東側下層に高気圧偏差が張り出す C1st1 では、その南西部から湿潤空気が流入して、九州から四国・中国地方で豪雨の発生頻度が高くなる (図 2-2-6a)。

本豪雨パターンの長期的な変化傾向を把握するために、過去 54 年間の各パターンの発生頻度を豪雨イベントの頻度と比較する (図 2-2-7)。1970 年代後半までは C1st7 が比較的卓越していたものの、それ以後 C1st3

と C1st4 がより卓越する期間が現れている。図 2-2-7 では、豪雨イベントの増加が 10 年程度の期間に起きており、その期間に特定の気象パターンが支配的となる傾向が見られる。1980 年代の豪雨増加期は C1st2、4 が支配的である。その後の 1995-2000 年あたりは C1st3、4 が、2000 年代後半は C1st2、5 が目立っている。このような梅雨期に豪雨をもたらす場の顕著な変化は、熱帯太平洋・インド洋における海面水温変動のレジームシフトなどに関係すると考えられる。

以上のように、日-週規模の気象場の変動の中で生じる豪雨イベントの背景場として、10年規模で変動する複数の豪雨パターンが見出された。このような豪雨パターンの長期変動は、将来の豪雨イベントの頻度を予測するための重要な手掛かりとなる。

(3) 台風に伴う強風と豪雨の評価

電力設備の構造設計等で台風に伴う強風や豪雨が基準となる場合、その地球温暖化による変化を耐用年数に応じて考慮する必要がある。設計の基準となるような過去最強クラスの台風は、局所的で非常に稀な事象であり、自然の変動が大きい。このため、地球温暖化による将来の台風の変化は、ダウンスケーリング等の通常的手法で評価するのが難しい。この問題に対し、当研究所では、最大潜在強度 (Maximum Potential Intensity: MPI) と呼ばれる台風の発達限界を定量化する理論を基にして、地球温暖化による強風や豪雨の変化を評価する手法を開発してきた^{(20),(21)}。

MPI は、与えられた熱環境 (海面水温や上空の気温分布) に対し、最大風速や最低中心気圧で表される発達限界を定式化したものである。その理論的枠組みは、地球温暖化の問題が注目され始めた1980-90年代に、Emanuel^{(22),(23)}とHolland⁽²⁴⁾によって、それぞれ異なる方式が提唱された。当研究所の評価手法では、Holland

の方式を用いている。

図2-2-8に、日本近海を含む緯度帯別に、現状気候の熱環境で計算したMPIと実際の台風の最低中心気圧の年変化を比較する。ここで、現状気候の熱環境はJRA-25長期再解析の月別気候値 (1979-2004年平均)、実際の台風は気象庁の1951-2010年のベストトラックデータ (事後解析を経て最終的に確定した中心気圧等のデータ) である。実際の台風は必ずしもMPIの強度まで発達するわけではないが、その中心気圧の下限値はMPIで概ね包絡される。ただし、6-7月の台風シーズンの早い時期は、低緯度でMPIの強度に達する台風がほとんど観測されていない。この時期の熱環境は台風の発達に適しているが、他の力学的な条件 (大規模の風系) が発達を妨げていると考えられる。また、9月以降の台風シーズンの後半には、実際の台風の中心気圧がMPIの値を下回るものが見られる。これは、MPIの精度の問題の他に、台風が発達しながら北上する場合に、図に示す比較では南方の高水温域での発達が反映されず、見かけ上MPIが過小評価されることが関係する。なお、MPIでは力学的な条件が考慮されないが、気候モデル計算等のMPI以外の手法でも、その効果を地球温暖化の観点で評価するのは難しいのが現状である⁽²⁵⁾。

HollandのMPIは、与えられた海面水温と上空の環境気温に対し、台風の発達に関わる熱力学的な過程に基づ

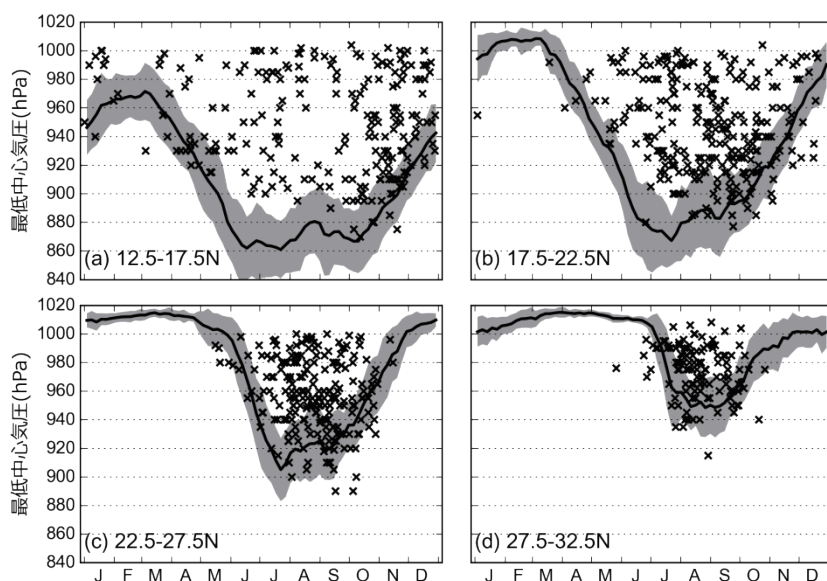


図 2-2-8 西部北太平洋の日本近海を含む緯度帯別 MPI 気候値の年サイクルと観測された台風の最低中心気圧の比較

陰影部は年々変動の標準偏差の幅 (±1 倍)。観測は気象庁の1951-2010年のベストトラックデータで、各台風の生涯最低中心気圧をそれが記録された地点の緯度帯の図にマーカーで表示している。文献⁽²⁰⁾ Fig. A1 に基づく。

いて、中心気圧の下限値を定式化したものである。海面水温が高いほど、また上空の環境気温が低いほど、MPIの指標となる中心気圧は低くなる。地球温暖化による気温上昇は、水蒸気を含む大気の大熱力学的な性質により、熱帯の対流圏では上空に向かって増加する。このため、海面水温の上昇による台風の強大化は、上空のより大きな昇温によってある程度抑制されることになる。

台風は、海面水温が26℃以上の海域で発生し、海面水温が高いほど強度が増すことが経験的に知られているが、この経験則は温暖化した環境にそのまま当てはまるわけではない。これは、上述のように、MPIが上空の環境気温に依存すること、および熱帯対流圏の昇温の特徴から理解され、**図 2-2-9**に示すMPIの計算結果から確認される。この図では、12.5-32.5N、122.5-145Eの南北2.5度間隔の東西平均場に対する月別のMPIから、現状と温暖化した気候で中心気圧と海面水温の関係を比較している。ここで、温暖化した気候は海面水温が一律1℃上昇する設定とし、対応する上空の昇温は、多数の気候モデル⁽²⁶⁾による気候予測の平均的な傾向を反映して設定している。図に示されるように、温暖化した気候での中心気圧と海面水温の関係は、現状に対して高温側に平行移動して、気圧が低い方に若干ずれることがわかる。この気圧低下が温暖化による強度の増分であり、その大きさは海面水温の上昇量とそれに相対的な上空気温の昇温量に左右される。

以下では、日本の本土に上陸する最強クラスの台風を想定して、緯度30Nに沿った領域の8-9月平均の熱環境を対象に、地球温暖化に伴うMPIの変化を評価する。現状気候のMPIは、JRA-25気候値の熱環境に対して944 hPaとなる。地球温暖化によるMPIの変化は、台風周辺の気圧と中心気圧の差を気圧深度(δp_c)として、その変化率で表す。この例では、基準となる現状気候の δp_c は65 hPaである(周辺気圧1009 hPa)。

δp_c の変化率は、現状気候の δp_c にほとんど依存しない。したがって、例えば、伊勢湾台風(1959年)や室戸台風(1934年)の事例(δp_c は80-100 hPa程度)を基準にして、より低頻度の極値の評価に適用することもできる。

δp_c は、台風域内の風速分布の特徴から、中心付近の最大風速と対応づけられ、最大風速の変化率が δp_c の変化率の0.5倍強と見積もられる。より広い範囲については、同心円状の気圧分布を与える経験式と台風の移動に

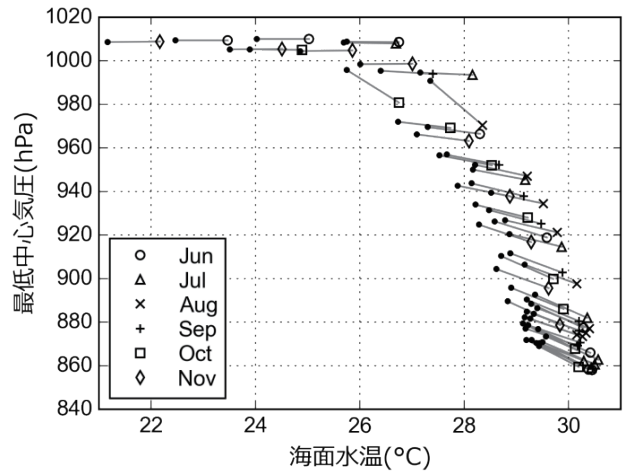


図 2-2-9 MPI (最低中心気圧)と海面水温の関係

12.5-32.5N、122.5-145Eの月別南北2.5度間隔の東西平均場で、現状と温暖化した気候のMPIを計算した結果。それぞれ黒点と月別のマークで表し、個別に線で結んでいる。温暖化した気候は、海面水温が一律1℃上昇する設定。文献⁽²⁰⁾ Fig. 5に基づく。

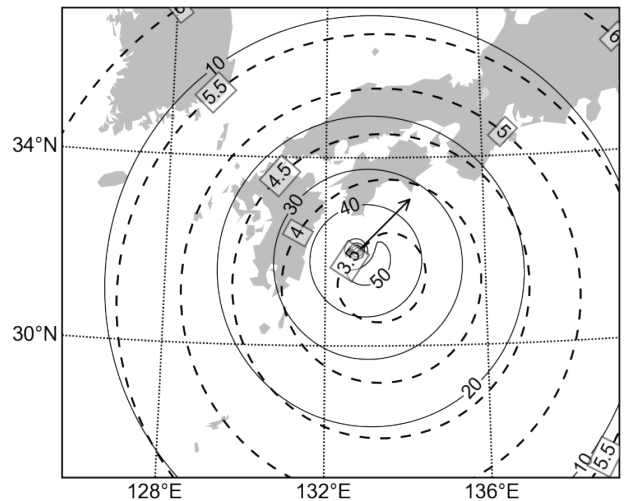


図 2-2-10 台風域内の地上風分布の例

実線コンターは風速(単位 m/s)、破線コンターは気圧深度の変化率が6.5%(全球平均で1℃の昇温に相当)の場合の風速の変化率(単位%)。

伴う風を考慮して、**図 2-2-10**に示すような風速分布が得られる。この風速分布は送電鉄塔などの設計外力の基礎となるもので、各地点の風速の変化率も δp_c の変化率と対応づけられる。さらに、降水強度を評価する理論スキーム⁽²⁷⁾を導入すると、台風中心付近の降水強度の変化率も評価できる。地球温暖化による降水強度の変化は、大気中の水蒸気量が増加することによる熱力学的効果と、上昇気流が変化することによる力学的効果に分けられる。 δp_c の変化は後者に反映される。このように δp_c の変化率は、地球温暖化による台風強度を定量化する指

標として汎用性がある。

図 2-2-11 に、 δp_c と降水強度の変化率を全球平均の地表温度偏差 (ΔT_s) の関数として評価した結果を示す。温度偏差の基準は現状気候 (20 世紀末) としている。 ΔT_s に相対的な海面水温や上空気温の変化は、将来予測のシナリオや時点にあまり依存しないことが知られている。したがって、図の評価では、日本付近の海面水温や上空気温の偏差が、 ΔT_s に比例すると仮定している (海面水温偏差は ΔT_s の 0.86 倍)。ただし、上空気温の偏差は気候予測に使われる AOGCM によってばらつきがあり、 δp_c を大きく左右する。このため、多数の AOGCM の平均を最良推定値として、昇順に並べて 25-75% に相当する範囲を不確実性の幅としている。

δp_c は ΔT_s が大きくなるにつれてやや非線形的に増加する。ただし、上空の気温偏差に関する不確実性は非常に大きく、温暖化で強度が若干弱まることを示すマイナスの値から、最良推定値の 2 倍程度の範囲におよぶ。降水強度の変化率も同様の傾向であるが、 δp_c と比べて変化率が大きくなり、不確実性の幅は相対的に小さい。これは、降水強度の変化に台風強度と関係しない熱力学的效果 (図中の一点鎖線) が含まれることによる。図には、代表的な値として ΔT_s が 1°C と 2°C の場合の変化率を明示している。最良推定値はそれぞれ δp_c が 6.5% と 14.2%、降水強度が 9.3% と 19.7% である。

ΔT_s は、地球温暖化の予測情報の中で最も基本となる変数である。様々なシナリオの任意時点における台風強度の変化は、それぞれの ΔT_s を基に定量化でき、ダウンスケーリング等の他の手法による評価結果とも、 ΔT_s を介して相互に比較できるようになる。これまでの国内の気候変化影響では、21 世紀末の ΔT_s が 2.6°C 程度の気候予測 (AIB シナリオの CMIP3 モデル平均) が基になっていることが多い。この場合、図 2-2-11 より、日本付近の豪雨強度は 27% 程度の変化率で、上昇気流の変化を考慮しない熱力学的效果のみでは 15% 程度である。この変化率は、全国 1 級水系における年最大流域平均雨量の増加率とされる約 1.1-1.3 倍⁽²⁸⁾ と概ね整合する。

なお、第 (1) 項で述べた統計的 DS では、 ΔT_s が 1.1°C の場合、50 年確率降水が平均的に 20% 程度増加する結果が得られている。この手法では台風が考慮されていないため、熱力学的效果のみの変化としてはやや大きい。統計的 DS は変化の仕組みまで踏み込んだ分析が難しい

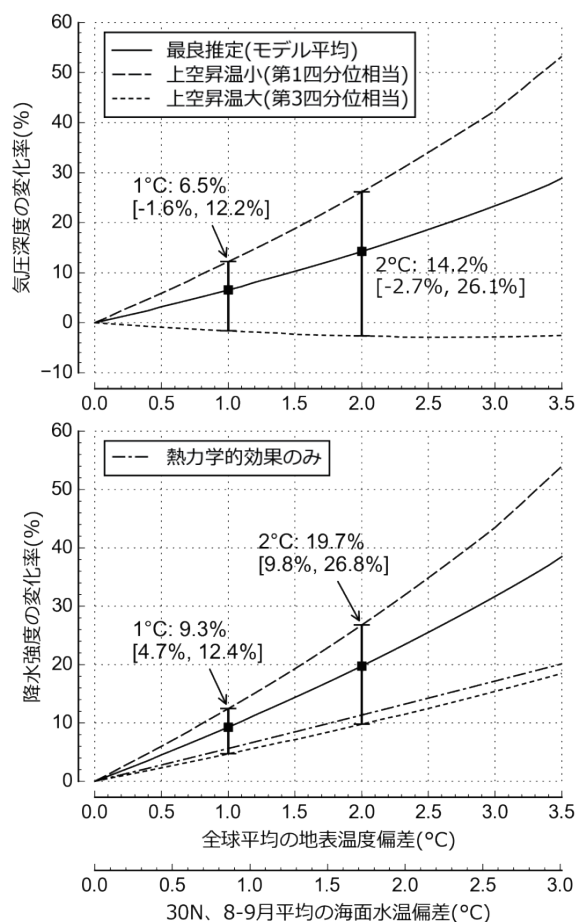


図 2-2-11 気圧深度および降水強度の変化率と全球平均の地表温度偏差の関係

評価対象は 29-31N、127-139E の 8-9 月平均の熱環境で、その海面水温偏差 (追加の横軸) は全球平均の地表温度偏差の 0.86 倍に設定。

が、ここでの理論的な手法との比較から、先の事例では豪雨の頻度が変化していることが示唆される。

MPI は熱環境のみに注目して現実の台風の発達の仕事みを単純化したものであるが、地球温暖化に対する適応策を具体的に検討するための有用な手法である。特に、注目する地域の δp_c や降水強度の変化率を ΔT_s の関数として定式化することで、様々な応用が考えられる。例えば、気候感度等の不確実性を考慮した任意のシナリオに対する ΔT_s の確率論的評価から、台風強度についても同様の評価が導出される。MPI の手法は、ダウンスケーリング等の詳細な手法と相補的な関係にある。MPI の定式化は、詳細な手法から得られる知見を基に改良されるべきものであり、詳細な手法による結果は、MPI の結果と比較することで定量的な解釈と不確実情報が補完される。

2-2-3 電力設備への影響と対策

(1) 送配電設備

常に自然環境にさらされている送配電設備は、不確定性の高い自然外力（強風、着氷雪など）、特に極端現象が安全性に大きな影響を与える。また外力に対する抵抗力（耐荷力）についても、腐食など環境の影響を強く受ける。設備固有の視点からは、外力に対する応答特性の異なる支持物と電線により構成される線状構造物であり、特に電線は揺れやすいことから、様々な振動による設備の疲労の問題が生じる。加えて、機能維持のためには絶縁性能の確保も必要であり、数が膨大であるため事故時の復旧対応も重要な課題となる。これらの特徴から、以下の3視点で地球温暖化のリスクをとらえることができる。

- ① 設計・維持管理：考慮すべき自然作用（強風、着氷雪など）の強さ・頻度の変化、構造部材・材料強度の劣化速度の変化、これら両者の関係で決まる安全性の変化
- ② 電線に関するギャロッピングなどの振動対策や着雪量の低減対策など各種対策法：風況特性や雪質の変化による各種対策法の効果の消失、対策地域の変化
- ③ 復旧対応への課題：被害規模の拡大、被害発生頻度の増加、被害発生地域の変化

上記を踏まえ、送配電設備それぞれの影響と対策について述べる。

送電設備の設計に用いられる JEC127(電気学会)では、設計風速や設計着雪量として、地域別の再現期間 50 年に対する値（以下、設計外力）を用いており、この設計外力による応答値が部材の強度を超えないように設計することで安全性のレベルを規定している。地球温暖化の対策では、これまでと同等の安全性を将来にわたって確保することが目的となる。

地球温暖化によって設計外力が大きくなるとすれば、補強や建替などの直接的な対策が求められる。対策の必要性、およびその程度や方法を定めるためには、地球温暖化のシナリオの下で再現期間 50 年の設計風速や設計着雪量を定量化する必要がある。極端現象の将来予測は、特に発現頻度の変化についての評価が難しいが、2-2-2 節で述べたように、定量的な評価のための手法はある程度整ってきている。当面の課題は、気候予測の情報を実

務的な判断材料になり得る具体的な荷重に翻訳することである。当研究所では、送電用鉄塔の耐風設計研究を実施してきている。この研究で用いた台風モデルによる設計風速評価法⁽²⁹⁾を拡張し、種々の温暖化シナリオに対する設計風速の変化の定量化検討を進める予定である。

現場での維持管理・保守のなかで、シナリオに基づく定量値（例えば、台風強度が所定の割合で増加したときの設計風速の変化量など）を参考にして補強の程度を変えるなど、少しずつ適応することが、現実的な対策と考えている。

次に、架空配電設備について述べる。わが国における架空配電設備は、電柱が約 2091 万本（2005 年現在）と報告されており、送電用鉄塔（約 25 万基）に対して圧倒的に数が多い。また、設計方法は単純化されていることから、安全性のばらつきも大きい。このため、配電設備の地球温暖化への対応として、上記送電線で述べたような設計、維持管理面でのハードな対応に加え、供給支障が発生したとき早期復旧への対応がより重要となる。

温暖化を踏まえた早期復旧を考える場合には、これまでに例のない強大な台風が襲来した場合でも、確実に早期復旧を実現できる技術が必要であり、台風接近時の被害数の事前予測、被害発生時の被害箇所の検知技術が重要となる。このためには、台風の進路や強度、降雨の予報技術、被害数の予測技術、被害箇所の検知技術などを、現在よりも高度化することが一つの対策となる。一方、台風の強度や襲来頻度が変化した場合の年間の復旧費用、資材確保といった経営的な問題や復旧戦略への対応も重要である。この場合は、送電線と同様に、事前に様々なシナリオ台風で相対的な被害規模の予測ができれば、対策の検討が可能となる。

当研究所では、図 2-2-12 に示すような配電設備の台風被害予測システム RAMPT を開発している⁽³⁰⁾。本システムは、台風進路や中心気圧の予報値を入力として、台風接近時の地上の風速や配電設備被害数を予測するものである。本システムの予測精度向上が対策の一つとなりうる。また、予報値をシナリオ台風に置き換えれば、復旧戦略の策定に寄与できると考えている。

以上、送配電設備について、設計・維持管理の視点、災害早期復旧の視点から、影響と温暖化対策について述べた。特に地球温暖化対策としては、現状の技術開発を着実に進めるとともに、意志決定の判断に必要な情報の

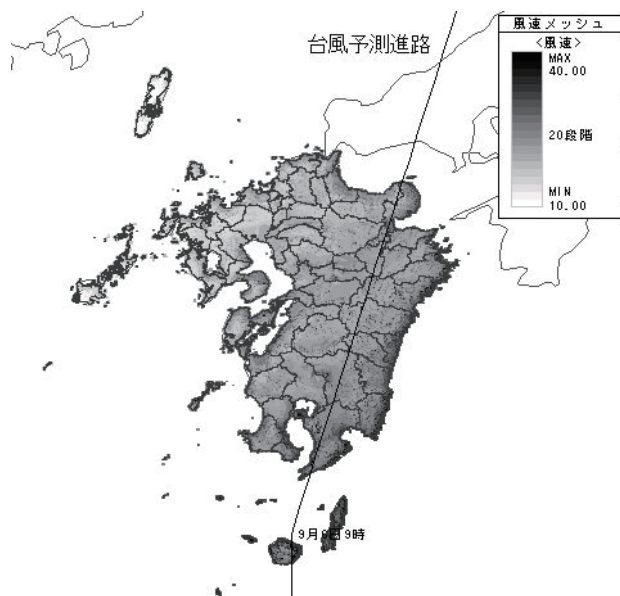


図 2-2-12 RAMPT における台風通過時の最大風速の推定値

整理、「設計風速」のような実務で使用される数値での定量化が重要であることを強調した。

(2) 水力設備

水力発電は再生可能な純国産エネルギーとして、供給安定性や経済性に優れるとともに、発電時に CO₂ を排出しないことから地球温暖化防止の面からも重要な電源と認識されている。電気の低炭素化の取り組みの一つとして、全国各地で既存のダムからの河川維持流量を利用した発電所が建設されており、2015 年度運用開始予定の出力 540 kW の発電所では、年間約 800 トンの CO₂ 排出量が削減される⁽³¹⁾。一方で、温暖化による降水量の増減は、水力発電に大きな影響を与えるものと懸念されているが、その変化の時間スケールによって、受ける影響の性質が大きく異なってくる。比較的長い時間(月、季節単位)の降水量が減少し、少雨や少雪となると発電電力量は減少する。短い時間の極端な豪雨(例えば台風や前線に伴う数日間の雨)の量やその頻度の増加は、施設の構造的安全性を脅かす。このため、洪水時のゲート操作といったダム運用の見直しを行うとともに、施設の改造などの検討も必要となってくる。上記のように、水力発電が受ける温暖化の影響としては、発電電力量への影響と施設の構造的安全性が懸念され、後者についてはその対策も議論されている。

水力発電は年間の「発電電力量」の確保が重要であ

る。電気事業連合会の電力統計情報によると、北海道から九州までの電力 9 社の水力発電による発電電力量は 1 年間に 651 億 kWh であり、その約 78% にあたる 505 億 kWh が、自流式設備によって発電されている。自流式発電はダムによる貯水を行わないため、ある一定量以上に河川水が増えても発電電力量が多くなるわけではないが、一般的には、河川水量が多くなるほど発電電力量も多くなる。毎月あるいは年度の平均流量を、過去 40 年の平均流量と比較したものを出水率という。自流式水力発電による 1 年間の発電電力量とその年の出水率の関係について、回帰式を求めたところ、出水率が 1% 増えると 1 年間に 5,000 万 kWh の電力量が増える。このように降水量が増えると出水率も増えるため発電電力量も増えることが期待されるが、台風や梅雨に伴う豪雨時の雨量が増えても、発電に利用されない無効放流が増えれば発電電力量の増加とはならないことも懸念されている。気温が上昇することにより降雪量が減少する可能性も大きい。雪から雨に変化したものも含めての降水量の増減を正しく予測することは難しいものの、融雪時期の早期化による自流式発電は大きく影響を受けることは事実であると言われている⁽³²⁾。

極端な豪雨でなくても洪水量やその頻度が増加すると、洪水を適切に処理するために今以上の高度なダムゲートの操作が求められる。また、無駄な放流を少なくし、洪水後にできるだけ多くの貯水量を確保するために、電力会社では高精度な降雨・出水予測手法を開発し実用化する検討がなされている。ダムへの水の流入量を予測する技術には、数日先の降水量を数キロメートルの高分解能で予測する気象予測モデル、ダム上流域の地質や土地利用情報を参照し、ダムに流入する洪水を精度良く予測する分布型流出モデルが開発されている。降水・出水予測が精度の高いものになれば、洪水時の無効放流を減らすことも可能になり、水資源の確保に大いに役立つこととなる。一方で、水力発電設備は常に自然環境にさらされているだけに、構造物の安全性に関わるような極端な降水量や河川流量の増大が最も懸念される事項である。また、豪雨の増加は山地の斜面崩壊を引き起こし、導水路や水圧鉄管などの発電施設の崩壊リスクを高めることになる。2011 年の台風 12 号 (Talas) が紀伊半島を通過した際には、水力発電所の下流約 1 km で斜面崩壊が生じて天然ダムが形成された。天然ダムは、河道を

閉塞させ、上流からの洪水流が反射して上流側に段波として遡上し、発電所建屋、放水路、屋外開閉設備が全損した。また、豪雨による斜面崩壊は、経年的なダムの堆砂を加速させ、貯水容量の減少や取水障害、上下流の河床変動などの問題を引き起こす。土砂により河床が高くなると、同じ流量が流れていても水位も同時高くなることから、洪水時の危険性も増し、地域の洪水リスクを高める原因となってしまう。ダムの経年堆砂の対策としては、水の力を利用して湖内を移動させる方法、堆砂を浚渫して建設材料に転用する方法、残土を埋め立てて処分する方法がとられている。しかし、浚渫土の有効利用や残土の埋め立て地には限りがあり、その輸送や埋め立てにより環境破壊を伴う。また、下流河川や海岸への土砂供給を行うべきだとの市民の声があがっている地域もあり、近年では、下流への通砂や排砂を促進させる様々な手法が検討され、実行されている。さらに、山林の荒廃も土砂発生要因の一つであると考えられ、林業の伐採放棄などによる山林の荒廃は、土砂の発生を増加させるほか、濁水の長期化や流木の原因にもなっている。このような山林荒廃は、対象とする範囲が非常に広く、電気事業者だけでは到底解決できるものではない。地元地域の方々とともに土砂流入の実態やその発生要因を明らかにしながら、森林・山地の保全に関する政策提言を行い、自然循環型エネルギーである水力発電を有効に使える体制を整えていく必要がある。森林・山地の保全は、豪雨のみならず地震による斜面崩壊リスクの低減にもつながり、土砂流出の抑制や下流への洪水の緩和、水源涵養機能の向上によって異常渇水による出水率の極端な低下にも貢献するはずである。渇水時の水資源の安定供給では、既に発電ダムが水補給に貢献している事例もある。複雑に絡み合う諸課題を、関係機関が連携して解決を図りながら、河川の最適な水利用を考えていくべきである。

(3) 生態系の反応と機能変化による影響

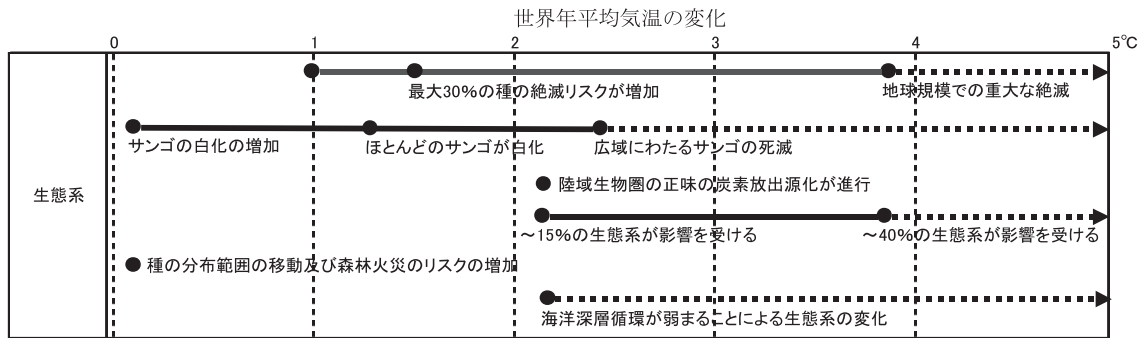
IPCCの第4次評価報告書(AR4)⁽³³⁾において、気候変化が生態系におよぼす影響が既に顕在化しており、今後、生物種の分布範囲の変化や絶滅リスクの増加、陸域生態系からのCO₂放出の進行、食糧生産への影響等が生じる恐れがあることが報告された(図2-2-13)。また、第5次評価報告書(AR5)⁽³⁴⁾においても、「陸域、淡水域及び海洋の多くの生物種は、進行中の気候変動に対応

し、その生息域、季節的活動、移動パターン、生息数及び生物種の相互作用を変異させている」とされ、既に暖かい海のサンゴ礁や北極生態系が不可逆的な構造転換(レジームシフト)を経験していることが示された。想定するCO₂排出量シナリオにより予測結果は異なるが、これまでの調査・解析結果によると、生態系影響の拡大は避けられない状況にある。ただし、生物間の相互作用、他の環境要因や人為影響との複合作用、生物の応答速度等が十分に考慮できていないこと、生物自身が気温の変化に適応する能力を有すること等から、1℃前後の気温上昇に伴う生態系の姿を予測するのは容易ではない。一方、2℃を越えるような気温上昇については様々な生態系において影響が顕在化することが指摘されている。

わが国に関しては、ブナ林等の冷温気候を好む樹種の分布適地の大幅な減少、松枯れ危険域の北進、農業生態系や海域生態系の攪乱による生物生産性の変化等が2031-2050年の近い未来に生じると予測されている⁽³⁵⁾。さらに、2081-2100年には、ハイマツやシラビソの絶滅リスクの増大、本州におけるブナの脆弱化、アカガシの分布拡大の可能性が生じることが予測されている^{(36),(37)}。

生態系影響については気候要素の変化予測以上に不確実性が高く、経時的な変化過程を考慮した影響予測は難しい。そのため、生態系の変化と電気事業との関係を考える場合には、長期的に生じうる変化を想定することになるが、気候の変化が生態系におよぼす影響は、電気事業にとって無視できないリスクを生じる可能性がある(図2-2-14)⁽³⁸⁾。リスクは、温暖化に伴う電力設備の環境適合性の変化によって新たに生じる「生態系リスク」、温暖化の生態系影響によって引き起こされる「事業リスク」に大別できる。生態系を対象としたこれらのリスクに対応するには、生態系が①環境変化に対する反応についての基本情報が曖昧な不確実な系であるとともに、②変動性の高い非定常な系であり、③明確な境界を持たない解放場の系であることから、予測がはずれる可能性がある(高い)ことを前提に管理システムを組み立て、常にモニタリングを行いながらその結果に合わせて対応を変える「順応的」な取り組みが必須となる。

電力設備に関連する重要な生態系リスクの一つとして、電力設備による環境の分断に起因する生物の適応行動の阻害が挙げられる。一例として、ダム等の河川構造物が水温上昇や猛暑や渇水などの極端現象発生時に、冷



1990年レベル（1980～1999年）の世界年平均気温に対する温度変化に対して、発現する確度が高いと考えられる影響について示されている。
●は影響やその水準の始まりを、実線は影響の増加を、点線は影響の継続を示す。IPCC（2007）⁽¹⁾ から抜粋、作成。

図 2-2-13 世界平均気温の変化に伴う生態系への影響の事例（文献⁽³³⁾ から抜粋して作成）

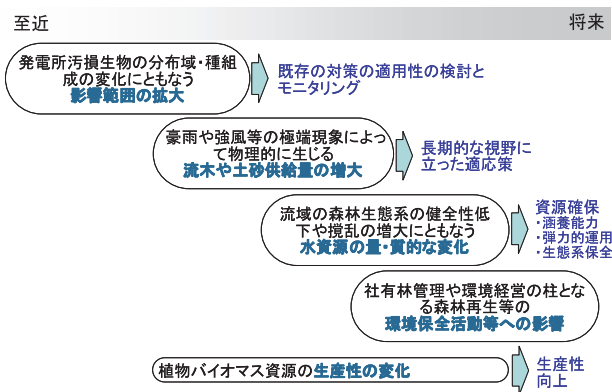


図 2-2-14 電気事業への影響が考えられる温暖化の影響（文献⁽³⁸⁾ から引用）

水を好む魚類の河川上流域（低温域）への移動を阻害し、その結果、分布域の縮小や個体数の減少を引き起こす可能性が指摘されている。生物行動の阻害例としては、気候の変化で渡り鳥の渡り経路が変わり、建設時には衝突の危険性を回避できる場所に設置された風力発電施設において衝突が増加する危険性も示唆されているが、現状では温暖化に伴うこれらの変化を予測するのは困難である。このようなリスクについては、環境の分断以外にも大小様々な可能性が考えられるが、いずれも不確実性が高いことから、個々のリスクの絞込みは困難であり、広い範囲のモニタリングに基づき運転を管理するなど順応的な対応を取る必要がある。特に、近年、生態系影響に関する生物多様性（コラム5参照）の視点の重要性が指摘されており、「第三次生物多様性国家戦略」（2007）、「生物多様性基本法」（2008年）、「生物多様性企業活動ガイドライン」等）温暖化影響との関連の中で生態系の変化のモニタリングを基盤とした「予防的順応的管理」によ

り柔軟に対応できる体制を整えることが重要と考えられる。

上記のリスクが想定される反面、電気事業の保有する自然資産の活用は、気候影響の緩和に向けた可能性を秘めていると考えられる。例えば、前出の魚類生息域の縮小について、貯水池の湖底付近に貯留される冷水が資源として注目され始めている。このような冷水資源を利用して、事前の水温予測と生態系のモニタリングに基づき放水温を順応的に管理することで、対策として冷水生物の避難場所・環境（レフュージア）を確保できる可能性もある。また、発電所緑地や社有林に関しても、かつてはCO₂吸収源としての機能が注目されることが多かったが、周辺環境の悪化に対するレフュージアとして機能する可能性を有している。このように、生態系リスクを低減するための適応についても、順応的な視点で臨むことが重要である。

一方、気候の生態系影響によって引き起こされる事業リスクとしては、温度環境の変化に伴って生じる発電所汚損生物や生物害の影響範囲の拡大が上げられる。特に、フジツボやイガイ類といった海域における汚損生物種は発電施設の維持管理に関連する（コラム6参照）。陸域においても、水力発電所の汚損生物として外来付着生物であるカワヒバリガイの生息可能域が拡大することが危惧される⁽³⁹⁾。また、蔓植物や外来植物など設備を維持する上で除去や成長抑制などを必要とする植物の生息地域の拡大、線下樹木の生長変化等、植物に関連した管理の見直しなどが必要になる可能性がある。

さらに、陸域については、温暖化に伴う植物の生育適地の変化や動物の食害等の増加による流域森林の健全

性・機能低下の影響が挙げられる。流域森林の劣化は、土砂災害防止／土壌保全機能の低下を引き起こし、極端現象である豪雨頻度・強度の増加に伴う加速的な貯水池への土砂堆積の増加を引き起こすことが予想される。加えて、洪水緩和、水資源貯留、水量調節、水質浄化等の水源涵養機能の低下にも繋がる。水資源に関しては、融雪時期の早期化による農業との共存の問題が指摘されているが、森林植生の変化が吸水・蒸散等の水収支の変化を生じさせ、森林からの流出特性を変化させる可能性にも注意する必要がある。

また、枯損木の増加は配電設備を中心とした破損事故の増加に繋がる可能性があると同時に、森林内への枯損木の貯留は、豪雨時の多量の流木の発生につながる可能性がある。対策は、温暖化に対して脆弱な森林の抽出と、モニタリングを含めた適切な管理の計画・実行であるが、管理の継続性や副次的な効果等を考えると地域と密接に協調した活動が必要となる。陸域に関しては、上記の生態系リスクとあわせて総合的な流域管理の視点で取り組む必要があるだろう。当研究所では、動物の挙動⁽⁴⁰⁾や樹木の反応の変化⁽⁴¹⁾、森林の土壌保全機能の評価^{(42)~(44)}等の流域管理に必要な技術の開発に取り組んできている。

電気事業の環境経営への影響も事業リスクとなる可能性がある。環境アセスメントは広い意味での環境経営における中心的な活動であるが、温暖化に伴い種々の見直しが必要になる可能性がある。前述の通り、定量的な不確実性は残るが、温度反応性の高い生物種においては温暖化により生息密度や分布域に変化が生じる可能性が高い。その場合、発現した変化から温暖化の影響を分離し事業の影響を評価することが必要になる。通常は、過去の調査結果の蓄積に基づく生物種のデータベースが基盤情報として利用されるが、対象地点の生物種構成の変化が生じた場合には、データベースの妥当性を見直しや補強が必要になる可能性もある。また、事後のモニタリングが必要とされる場合には、対象種の変更を含めて順応的にモニタリング基準を管理することが必要になると考えられる。これらの環境アセスメントにかかわる事項に関しては、手法的にも政策的にもほとんど知見がなく、今後の取り組みが重要となる。

一方、自主的に実施されている陸・水域の環境修復等の保全活動においては、管理コストの増大や管理手法の見直しの必要性が生じる場合があると同時に、個々の活

動の重要度が増すなどの変化が生じると予想される。例えば、生態系に配慮したダム運用は社会的に要望の高い取り組みであり、温暖化による河川生態系の脆弱化が生じる地域・地点においては、その重要性が増すと予想される。ただし、維持流量やフラッシュ放流等についても、生態系の健全性維持への効果の科学的かつ定量的な裏づけが取れていない部分が多分にあることに十分注意することが必要である。

気候の変化が生態系におよぼす影響に関しては、未だ、一部の生物種に関して地域スケールで定常的な環境に対する定量的な反応予測の成果がみられるようになってきた段階にある。さらに、気候の予測以上に、生物・生態系への影響予測の結果は不確実性を含んでいる。このように、電気事業に対する生態系機能の変化の影響を定量的に予測し対策をとることが難しいことから、順応的な視点に立って最善の適応策を選択・実行できるような体制を構築することが重要と考える。

コラム 4: 日本の過去の気象場の再現

送配電設備の耐風設計や耐氷雪設計、あるいは水力ダムの設計洪水流量の算定を行う場合、過去の観測データを極値統計解析し、数十年から百年程度の再現期待値を求める。また最近では、建設後数十年を経過した電力設備の維持管理のために、設備が今までに受けた風雨や気温等の気象要因による疲労や腐食を改めて評価することも重要となっている。気象データを解析する場合、気象官署やアメダス観測所におけるデータを用いるが、観測要素や観測時間間隔は観測所や年代により異なることがある。山間部を通る送配電設備では、付近に観測所が無い場合も多い。

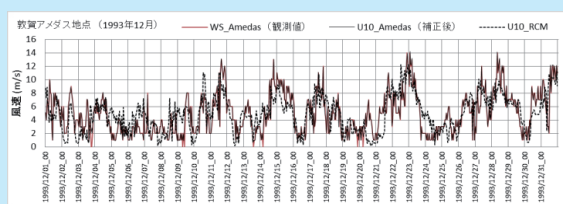
そこで当研究所では、日本の過去の気象を再現するために、領域気候モデル NuWFAS-RCM⁽¹⁾ を開発した。このモデルは、数日先の気象を予測する気象モデル NuWFAS⁽²⁾ をベースに、土壌の温度や水分量、地表の積雪量や積雪深、湖沼の水面温度⁽³⁾ などの季節・年変化も計算できるよう改良されている。

このモデルでは、過去の全球気象場（再解析値）を初期値・境界値として与え、日本周辺の気象場を水平解像度5kmで再現する⁽⁴⁾。ここに再解析値とは、最新の気象モデルやデータ解析技術を用いて、過去の全球気象場を再評価した全球格子点データ（水平解像度は約120km、時間解像度は6時間）である。

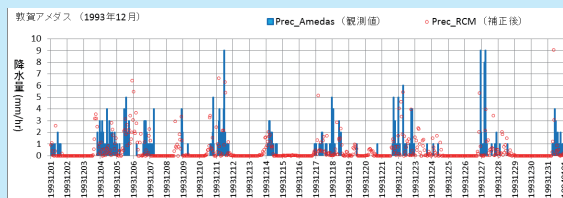
1957年9月から2013年までの気象再現結果を、長期気象・気候データベース（以下、気象・気候DB）として保存した。このDBには、風、温度、湿度、気圧、降水量など多くの気象要素が、地上から上空約20kmまでの格子点データとして1時間間隔に保存されている。

図1は、気象官署での1ヶ月間の観測値をその地点に最も近い気象・気候DBの格子点データと比較した一例である。両者は比較的良く一致していることが確認できる。

図2は、気象・気候DBの風速・風向、降水量、気温、日射量データを基に、着雪による送電線ギャロッピングが発生する可能性のある年間の時間を試算した一例である。このDBを用いる事で、観測データだけでは解析不可能な現象の評価を面的に行う事が可能となる。

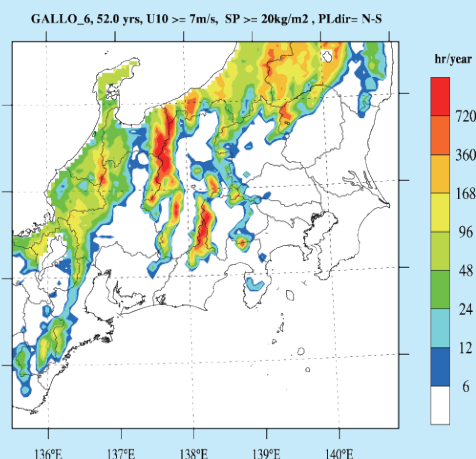


(a) 風速

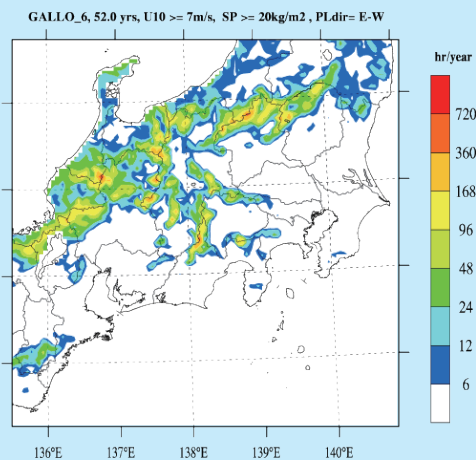


(b) 降水量

図1 長期気象・気候DBと観測値の比較



(a) 送電線走向が南北方向



(b) 送電線走向が東西方向

図2 ギャロッピング発生可能時間の試算例

地球温暖化は生物多様性に様々な影響をおよぼす。1992年に気候変動枠組み条約（UNFCCC）とともに採択された生物多様性条約（Convention on Biological Diversity: CBD）の締約国会議（COP）では、2004年のCOP7以降、UNFCCC事務局との意見交換や関連会合での広報活動等、地球温暖化対策と生物多様性保全の相乗効果を図る試みを継続的に行ってきた（図1）。2010年に名古屋で開催されたCOP10では、採択された20の国際目標（愛知目標）のうち、2つ（目標10,15）が地球温暖化に関連したものであった⁽¹⁾。

CBDの活動では、地球温暖化の個別の施策に対して、生物多様性を保全する観点から懸念が表明されることもある。そのうちの 하나가、途上国における森林減少・劣化の防止による排出量削減（REDD+）において、生物多様性への配慮を求める取り組みである。森林保全を通じた生物多様性の保全が期待される一方で、COP9（2008年）では、REDD+の活動によって生物多様性やそれによって地域住民が受ける恩恵が損なわれるという懸念の声が参加者の一部からあがった⁽²⁾。これを受けてREDD+における配慮事項をまとめた「生物多様性セーフガード」をCBDの事務局がとりまとめることとなった^{(3),(4)}。UNFCCCへの積極的な働きかけを含む規制化に向けた動きはなかったが、代わりにCOP12（2014年）では、UNFCCCで合意されたREDD+実施に関するワルシャワフレームワーク（2013年）に沿う形で、各国が生物多様性への配慮を行うことが決議された⁽⁵⁾。ちなみに、ワルシャワフレームワークに先立つUNFCCCのカンクン合意（2010年）に定められたセーフガードに、生物多様性に配慮する具体的な記

載はない⁽⁶⁾。

また、温暖化緩和策の気候工学（ジオエンジニアリング）の中でも、鉄・栄養塩の投入によって植物プランクトンによる炭素固定を促進する「海洋施肥」等、生態系への影響が懸念される手法に対して、CBDは、「懸念が科学的に払拭されない限り、（小規模な科学的実験を除き）気候工学による緩和策の実施を自粛するように要求」する決議をCOP9とCOP10で採択した^{(3),(7)}。なお、これらの決議にはいずれも法的拘束力はなく、海洋施肥については、その後、海洋汚染防止に関するロンドン条約・同議定書によって規制された⁽⁸⁾。

上記のように、CBDにおける議論が気候変動に関する国際交渉や地球温暖化対策に関する個別施策に大きな影響を与えることはなかった。これは国際条約としては後発の部類に入るCBDの影響力が大きくないことに加えて、UNFCCCの京都議定書以降の交渉が長期化する中で、CBD側からの十分な働きかけが出来なかったことも一因であったと考えられる。今後、2015年末にパリで開催されるUNFCCC COP21において2020年以降の国際枠組みが合意に至れば、具体的な地球温暖化対策に関する交渉が進み、その中で生物多様性に配慮する取り組みが加速する可能性もある。

2014年に開催されたCBD COP12では、生態系を活用した地球温暖化への適応策ならびに生態系の保全・再生を通じた防災・減災の取り組みを推進していくことが新たに強調される形で確認された⁽⁵⁾。生物多様性保全と地球温暖化対策の相乗効果を狙った新たなアプローチとして、今後の動向が注目される。

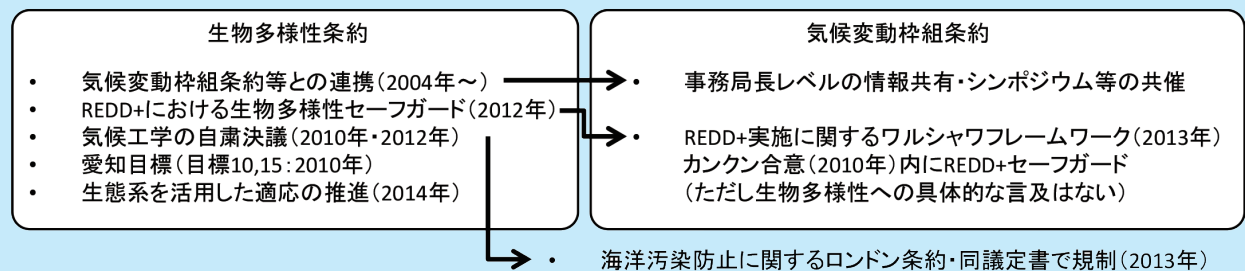


図1 生物多様性条約における気候変動関連決議と他条約の動向

