

第 10 章 気候変動の検出と原因特定:地球全体から地域まで

概要

大気気温

1951 年から 2010 年の世界平均地上気温(GMST)の観測された上昇の半分以上は、温室効果ガス(GHG)濃度の観測された人為的増加に起因する**可能性が非常に高い**¹。気候システム全体の変化(例えば、大気及び海洋の昇温、海面水位の上昇、海洋酸性化、水循環・雪氷圏・気候の極端現象の変化など)に関する観測結果とモデル結果との一致は、主に人為起源の温室効果ガス濃度の増加に起因して大規模な温暖化が生じていることを示している。太陽の強制力は、この期間で気候の温暖化に働くと思われる唯一の自然起源の強制力だが、その増加量は温室効果ガスの強制力よりもはるかに少なく、観測されている長期的な対流圏の温暖化と成層圏の寒冷化のパターンは、太陽放射照度の変動に対して予測される応答と整合しない。大西洋数十年規模振動(AMO)が温暖化と区別できないような影響を与えた可能性はあるが、大西洋数十年規模振動に重要な役割を見出している研究は、大西洋数十年規模振動が 1951~2010 年の気温の変化傾向に強くは影響していないことを示している。{10.3.1、表 10.1}

1951 年から 2010 年の世界平均地上気温に観測された上昇の半分以上は、人間活動が引き起こした**可能性が極めて高い**。この評価は、異なる手法を用いた複数の研究から得た明確な証拠によって裏付けられている。観測上の不確実性は以前よりもはるかに徹底して検討されており、今や、21 世紀の初めの 10 年間の観測結果と、過去の気候を再現する能力について、第 4 次評価報告書で検討された前の世代のモデルよりも多くの点で改良された、新世代の気候モデルを用いたシミュレーションによって、評価がなされた。強制力の不確実性と個々の強制力に対する気候モデルの気温応答の不確実性、そして温室効果ガスやその他の人為起源の強制力のどちらに起因する気温応答パターンかを区別することの難しさによって、温室効果ガスに原因を求めることのできる気温変化をより正確に定量化することが妨げられている。{9.4.1、9.5.3、10.3.1、図 10.5、表 10.1}

1951 年から 2010 年の期間にわたる世界平均地上気温の上昇に対する、温室効果ガスの寄与は **0.5~1.3°C** の範囲である**可能性が高く**、それ以外の人為起源の強制力からの寄与は **-0.6~0.1°C** の範囲である**可能性が高く**、自然起源の強制力の寄与は **-0.1~0.1°C**

の範囲である**可能性が高く**、内部変動性の寄与は **-0.1~0.1°C** の範囲である**可能性が高い**。これらの評価された寄与の合計は、同じ期間に観測された約 0.6°C の昇温と整合している。{10.3.1、図 10.5}

内部変動性だけでは、1951 年以降の観測されている地球温暖化を説明することができないのは**ほぼ確実である**。1951 年以降観測されている地球規模の温暖化は、60 年の時間スケールにおける内部変動性の気候モデルによる推定値と比較して大きい。同期間における北半球(NH)の温暖化は、過去 1000 年の復元の残りの期間において、同じような長さの期間におけるどの変化傾向の範囲からも大きくはみ出している。観測されている温暖化の空間パターンは、内部変動性に関連したものとは異なる。モデルを使った内部変動性のシミュレーションは、この評価を行うことに適していると評価されている。{9.5.3、10.3.1、10.7.5、表 10.1}

主に温室効果ガスによる人為起源の強制力は、1961 年以降の対流圏の温暖化に寄与した**可能性が高く**、主にオゾン破壊物質によるオゾン層の破壊による人為起源の強制力は 1979 年以降の下部成層圏の寒冷化に寄与した**可能性が非常に高い**。対流圏の気温の推定値における観測の不確実性は、今や第 4 次評価報告書当時よりも徹底して評価されてきている。成層圏の気温の変化傾向と数年から十年規模での変動の構造は、諸モデルによってよく表現されており、物理的理解は成層圏の気温の推移についての観測結果及びモデル結果と整合している。ラジオゾンデと衛星の観測記録における不確実性のために、観測されている上部対流圏の変化傾向の原因に対する評価の信頼性は、大気気温変化全体の評価よりも低くなる。{2.4.4、9.4.1、10.3.1、表 10.1}

世界各地での気温の変化に対する人為起源の影響の検出と原因特定については、さらなる証拠が蓄積されている。南極大陸を除く全ての大陸域について、20 世紀半ば以降の地上気温の上昇には人為起源の影響が相当寄与している**可能性が高い**。大陸規模で人為的影響が明確に検出されていることは、陸域で広範に生じている温暖化の世界的な原因が人為的影響であることと整合している。過去 50 年の北極域の大幅な温暖化に対して人為起源の寄与があった**可能性が高い**。南極大陸については、観測の不確実性が大きいため、利用可能な気象観測点にわたる平均として観測された温暖化に対して人為的影響が寄与していたことについての**確信度は低い**²。人為的影響は、多くの亜大陸規模の地域におけ

¹ 本報告書では、成果あるいは結果の可能性の評価を示すために、次の用語が用いられる。「ほぼ確実」:発生確率が 99~100%、「可能性が非常に高い」:発生確率が 90~100%、「可能性が高い」:発生確率が 66~100%、「どちらも同程度」:発生確率が 33~66%、「可能性が低い」:発生確率が 0~33%、「可能性が非常に低い」:発生確率が 0~10%、「ほぼあり得ない」:発生確率が 0~1%。適切な場合には追加で以下の用語を用いることがある。「可能性が極めて高い」:発生確率が 95~100%、「どちらかと言えば」:発生確率が >50~100%、「可能性が極めて低い」:発生確率が 0~5%。可能性の評価結果は、「可能性が非常に高い」のように斜体字で記述する(詳細は 1.4 節及び Box TS.1 を参照)

² 本報告書では、利用できる証拠を記述するために、「限られた」、「中程度の」、「確実な」を、見解の一致度を記述するために、「低い」、「中程度の」、「高い」といった用語を用いる。確信度は、「非常に低い」、「低い」、「中程度の」、「高い」、「非常に高い」の 5 段階の表現を用い、「確信度が中程度」のように斜体字で記述する。ある一つの証拠と見解の一致度に対して、異なる確信度が割り当てられることがあるが、証拠と見解の一致度の増加は確信度の増加と相関している(詳細は 1.4 節及び Box TS.1 を参照)。

る気温変化に寄与した可能性が高い。{2.4.1、10.3.1、表 10.1}

地球規模の温暖化の検出と原因特定の確実さは、モデルが内部変動性を正しく再現しているかどうかにかかっている。観測記録には外部強制力の効果も含んでいる（自然起源と人為起源の強制力が混ざり合っている）ため、世界平均地上気温の数十年規模の内部変動性の推定値は観測記録から間接的に手に入れなければならないが、観測された温暖化に人為的影響がなかったとしたら、気候モデルは内部変動性の標準偏差を少なくとも 3 倍過小評価していると考えなければならないだろう。観測結果との比較では、気候モデルと観測結果との間にそのような大きな差を示唆する徴候は見られない。{9.5.3、図 9.33、図 10.2、図 10.3.1、表 10.1}

観測されている最近の温暖化の停滞（1951～2012 年の世界平均地上気温の変化傾向に比べて 1998～2012 年の変化傾向が弱まっていることと定義される）の原因は、内部変動性をもたらす寒冷化と、外部強制力の変化傾向の弱まりがおおむね同程度に寄与している（専門家の判断、中程度の確信度）。強制力の変化傾向の低下は、主に火山噴火と太陽活動が下降位相であることによる負の強制力変化傾向に起因する。しかしながら、火山由来の強制力のトレンドの大きさにおける不確実性と、エアロゾルによる強制力のトレンドの確信度が低いために、温暖化の停滞をもたらしている強制力の変化傾向の役割を定量化することについての確信度は低い。温室効果ガスに加え、対流圏及び成層圏エアロゾル、成層圏水蒸気、太陽放射の変化をはじめとする多くの因子や、内部変動の様々なモードが、世界平均地上気温の年々から十年規模の変動性に寄与している。{Box 9.2、10.3.1、図 10.6}

海水温と海面水位上昇

人為起源の強制力は、1970 年代以降に観測された海洋表層（水深 700 m 以浅）の温暖化にかなり寄与していた可能性が非常に高い。この人為起源の海洋の温暖化は、この期間の世界海面水位上昇に、熱膨張を通じて寄与している。第 4 次評価報告書以降、海水温データセットにおける測定誤差とそれらの補正について新たな知見が得られたことで、海洋の温暖化の程度に関する見積もりの一致度が高くなっている。海洋の温暖化の観測結果は、人為起源と火山起源の強制力を含む気候モデルによるシミュレーションとは整合するが、人為起源の強制力を除外したシミュレーションとは整合しない。人為起源と自然起源両方の強制力が与えられたシミュレーションにおいては、観測結果と整合する十年規模変動が見られる。これらの結果は、第 4 次評価報告書からの大きな前進である。{3.2.3、10.4.1、表 10.1}

1970 年代以降の世界平均海面水位の上昇にかなりの人為起源強制力の寄与があった可能性は非常に高い。海面水位上昇には、1990 年以降のグリーンランド氷床の融解と、1960 年代以降の氷河の質量損失による人為起源の寄与がある可能性が高い。1971 年以降の観測

結果は、高い確信度で、海洋の熱膨張と氷河（南極の氷河を除く）により、観測された海面水位上昇の 75%を説明できることを示している。{10.4.1、10.4.3、10.5.2、表 10.1、13.3.6}

海洋酸性化と酸素の変化

海洋による人為起源の二酸化炭素の吸収が、観測されている 1 年当たり 0.0014～0.0024 の pH 減少という海面付近の海水の酸性化をもたらした可能性は非常に高い。1960 年代から 1990 年代にかけて観測された海洋中の溶存酸素の地球規模での減少パターンについて、原因の一部を人為的影響に求めることができることの確信度は中程度である。{3.8.2、Box 3.2、10.4.4、表 10.1}

水循環

世界の陸域の降水量の変化、北半球高緯度域における降水量の増加、そして大気湿度の上昇に対する人為起源の影響について、新しい証拠が現れている。1973 年以降観測されている大気比湿の上昇と、1950 年以降の陸域の降水パターンにおける地球規模の変化（北半球の中・高緯度での増加を含む）に人為起源の寄与があることの確信度は中程度である。観測とモデリングに残る不確実性と、降水量における大きな内部変動性があるために、現時点ではこれ以上信頼できる評価を行うことはできない。{2.5.1、2.5.4、10.3.2、表 10.1}

1960 年代以降の海面及び海洋表層の塩分の変化に、人為起源の強制力が識別可能な寄与を果たした可能性は非常に高い。地域及び地球全体の海面及び表層の塩分に関する 40 以上の研究は、水循環と海洋循環における人為起源の変化に対する理解と一致するパターンを示している。気候モデルから得た気候学的塩分分布について予測されている人為起源の増幅パターンは、観測結果でも検出されているが、観測されている海面及び表層の塩分場の内部変動性に対する理解はまだ不完全なままである。{3.3.2、10.4.2、表 10.1}

1960 年以降の世界の水循環に人為的影響があった可能性が高い。陸域の降水量、大気湿度、降水と蒸発に関連した海面塩分の変化において人為的影響に起因する系統的な変化が観測されており、この評価はこのような大気と海洋の変化から得られる証拠を合わせたものに基づいている。これは第 4 次評価報告書からの大きな前進である。{3.3.2、10.3.2、10.4.2、表 10.1}

雪氷圏

1979 年以降の北極域の海氷の減少に人為起源強制力が寄与していた可能性は非常に高い。人為起源の強制力を含めたときだけ観測されている海氷面積の減少が再現されている、という一連の明確なシミュレーション結果がある。1979 年以降の南極域の海氷面積に増加が観測されていることの科学的理解については確信度は低い。これは、変化の原因の科学的説明が不完全か

つ互いに競合していることと、内部変動性の大きさの見積りの**確信度が低い**ためである。{10.5.1、表 10.1}

氷床と氷河が融解しており、**1993 年以降のグリーンランド氷床の表面融解と 1960 年代以降の氷河の後退に人為的影響が寄与していた可能性は高い**。2007 年以降、内部変動性は、グリーンランド氷床の融解をさらに強化した**可能性が高い**。氷河については、観測された質量損失、内部変動性、気候駆動要因への氷河の応答に関する確かな推定値から高い水準の科学的理解が得られている。科学的理解の水準が低いため、1993 年以降に観測されている南極氷床の質量損失の原因特定については、**確信度が低い**。{4.3.3、10.5.2、表 10.1}

観測されている**1970 年以降の北半球の積雪面積の減少には、人為的寄与があった可能性が高い**。大陸と地域の両方の規模において人為的影響が見いだせることについて、観測研究及び原因特定の各研究の間で一致度は高い。{10.5.3、表 10.1}

極端な気候現象

IPCC の第 4 次評価報告書及び気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書(SREX)以降、人間活動が極端な気温に影響を与えている証拠が強化され続けている。20 世紀半ば以降において日別の極端な気温の頻度や程度の変化が地球規模で観測されていることに人為起源の強制力が寄与している**可能性は非常に高い**。気温の極端現象の変化の原因を人為的影響に特定することは、異なる手法と異なるデータセットを用いた独立の分析において確実に見られている。いくつかの場所で人為的影響により熱波の発生確率が相当引き上げられた**可能性は高い**。{10.6.1、10.6.2、表 10.1}

評価する上で観測の被覆率が十分である陸域においては、**20 世紀後半にわたる地球規模での大雨の強まりに人為起源の強制力が寄与したことの確信度は中程度である**。20 世紀半ば以降の世界の陸域における干ばつの変化の原因を人為的影響に求めることは、観測の不確実性と、干ばつの十年規模の変動と長期変化傾向の区別が難しいことから**確信度は低い**。{10.6.1、表 10.1}

熱帯低気圧の活動度の変化の原因を人為的影響に求めることについては、**不十分な観測証拠、人為起源の気候駆動要因と熱帯低気圧の活動度との関連に対する物理的理解の不足、内部変動性及び人為起源と自然起源の強制力の相対的な重要性に関する研究間の一致度の低さのため、確信度は低い**。この評価は、SREX の評価と一致する。{10.6.1、表 10.1}

大気循環

人為的影響が海面気圧のパターンを地球規模で変化させた**可能性は高い**。複数の研究において、海面気圧のパターンの変化に対する検出可能な人為的影響が見出される。大気循環の変化は、特定の地域に他よりも大き

な(あるいは小さな)気候変動をもたらす可能性があるため、局所的な気候変動にとって重要である。成層圏オゾンの破壊が、南半球の夏季に観測されている南半球のハドレーセルの境界の極方向への移動に寄与したことの**確信度は中程度**である。この極方向への移動の大きさについては、大きな不確実性がある。成層圏オゾンの破壊は、20 世紀半ば以降に南半球の夏季に見られる、海面気圧の高緯度域における低下及び亜熱帯地域における上昇に対応した南半球環状モードの正の変化傾向に寄与した**可能性が高い**。南半球の夏季におけるハドレーセルの南側境界や南半球環状モードのこうした変化傾向においては、温室効果ガスも一定の役割を演じたこと**の確信度は中程度**である。{10.3.3、表 10.1}

千年から数世紀の観点

より長期的な観点に立つと、**20 世紀以前の半球規模での気候変動をもたらす要因において、人為起源及び自然起源の強制力が相当な役割を演じたことがわかる**。1400 年から 1850 年にかけての北半球の気温の変動を、内部変動性だけで説明できる**可能性は非常に低い**。850 年から 1400 年にかけての北半球の気温の変動性に外部強制力が寄与し、また最近 5 世紀間にヨーロッパの気温の変動性に外部強制力が寄与したことの**確信度は中程度**である。{10.7.2、10.7.5、表 10.1}

気候システムの特性

観測されている気候変動についての記録が拡大されたことで、**将来の温暖化に密接な関係がある気候システムの基本特性について、より適切な特徴付けが可能になっている**。21 世紀の観測から得た新たな証拠と、より幅広い研究から得たより有力な証拠は、過渡的気候応答(TCR)に対する制約を強め、TCR は $1^{\circ}\text{C}\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ の範囲である**可能性が高く**、 3°C を超える**可能性は極めて低い**と、**高い確信度**で推定されている。累積二酸化炭素排出量に対する過渡的気候応答(TCRE)は、気温がピークに達するまでの約 2000 PgC ^[訳注]未満の累積二酸化炭素排出量に対し、 1000 PgC 当たり $0.8^{\circ}\text{C}\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ の範囲である**可能性が高い**と、**高い確信度**で推定されている。観測された気候変動から得た、複数で一部は独立した証拠に基づく平衡気候感度(ECS)の推定値の示すところによれば、平衡気候感度が 1°C 以下である**可能性が極めて低い**ことについて**高い確信度**があり、平衡気候感度が $1.5^{\circ}\text{C}\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ である**可能性が高く**、 6°C を超える**可能性は非常に低い**ことについて**中程度の確信度**がある。こうした評価は、第 12 章の全般的な評価と一致している。第 12 章ではさらに証拠を追加して、評価対象となった平衡気候感度の**可能性が高い**範囲についての信頼性を高めている。{10.8.1、10.8.2、10.8.4、Box 12.2}

証拠の組み合わせ

評価対象となった気候システムの主要な構成要素において、人為的影響が検出されている。これらを基に、証拠を組み合わせることで観測された気候変動の原因特定の**確信度が高まり**、単一の気候変数に基づく評価に

関連する不確実性が低減される。この複合的な証拠から、人為的影響が地球の気候システムを温暖化していることは**ほぼ確実**である。地球の地表面、すなわち大気及び海洋の表面近くの気温の変化において、また雪氷圏、水循環及びいくつかの極端現象の変化において、人為的影響が特定されている。1950 年以降の温暖化の最も強い駆動要因として、太陽の強制力、火山、内部変動性を除外する強力な証拠がある。{10.9.2、表 10.1}

【訳注】1 PgC = 1 GtC(炭素換算で 1 ギガトン=10 億トン=1000 兆グラム)。二酸化炭素換算では 36 億 6700 万トンに相当する。