

第9章 気候変化の理解と要因評価

概要

気候システムに、外部要因が影響を及ぼしていることを示す事実が、第3次評価報告書以降も集まり続けている。現在得られている証拠はこれまでよりはるかに強力なもので、気候システム全体にわたる広範な温度上昇などの気候変数の変化の解析に基づいている。

人間活動による気候系の温暖化は広範囲に及ぶ。 地表面や対流圏、海洋の温度観測を通じて、人為起源の気候システムの温暖化を検出することができる。多様なシグナルの検出作業や原因特定分析により、観測された変化に対する自然及び人為的な放射強制力の寄与を定量化することができるが、過去半世紀の間の温室効果ガスによる放射強制力だけによる昇温は、エアロゾル等の放射強制力が昇温を打ち消す効果がなかったとしたら、観測された温暖化よりも大きかった*可能性が高い*ことが明らかになった。

過去半世紀の温暖化の世界的なパターンを、外部放射強制力なしで説明できる*可能性は極めて低く* (5%以下)、また既知の自然起源の外部放射強制力のみによる*可能性も非常に低い*。温暖化は、海洋及び大気両方で現れ、しかも、自然起源の外部放射強制力因子が寒冷化を引き起こしたかもしれないときに起きた。

温室効果ガスによる放射強制力は、過去50年にわたって、観測された昇温の原因の大部分を占める*可能性が非常に高い*。この結論は、観測結果や放射強制力の不確実性を考慮しているとともに、気候モデルが太陽の放射強制力に対する応答を過小評価している可能性を考慮している。気候モデルや外部放射強制力に対する応答を見積もる手法や、解析技術が異なっても、同じ結論が得られている。

ラジオゾンデや人工衛星による観測から、自由大気的气温に人為起源の影響が及んでいることを示す証拠が蓄積されてきた。対流圏の昇温と成層圏の降温というパターンが観測されており、これは、人為起源の放射強制力、特に温室効果ガスと成層圏オゾン破壊の影響による*可能性が非常に高い*。対流圏の昇温と成層圏の降温という組み合わせが、対流圏界面高度の上昇をもたらした*可能性が高い*。人為起源の放射強制力が、20世紀後半に観測された、海洋上部数百メートルの全般的な昇温に寄与してきた*可能性が高い*。人為起源の放射強制力は、海洋の昇温による熱膨張や氷河の質量損失をもたらし、20世紀後半の海面水位上昇に寄与した*可能性が非常に高い*。これまでの、検出や原因特定に関する研究では、海洋貯熱量の増加と氷河の融解への人為起源の放射強制力の寄与を定量化することは困難である。

20世紀半ば以降、南極を除くすべての大陸における地上気温の上昇にかなりの人為起源の寄与があった可能性が高い。人為起源の影響は、南極を除くすべての大陸（南極は、評価するに十分な観測がない）と幾つかの亜大陸規模の陸域で検出されている。結合気候モデルを用いると、大陸規模の温度変化と六大陸おのおのに対する人為的効果の検出を再現することができ、その結果、世界の気候に人為的影響が及んでいることが、第3次評価報告書のときよりも明白に示される。自然起源の放射強制力のみを考慮した気候モデルで、20世紀後半の、観測された世界平均の温暖化傾向や南極を除く個々の大陸における大陸平均の温暖化傾向を再現しているものはない。

大陸より小さい規模で、50年以下の時間スケールの気温変化の原因特定はいまだに困難である。これらの規模では、限られた例外を除いて、原因はいまだに特定されていない。小さい地域で平均すると、大きな地域で平均するときと比べて自然の変動を取り除きにくく、その結果、異なる外部放射強制力から予想される変化を識別したり、外部放射強制力と自然の変動を分離することが難しくなる。また、地域や季節によっては、自然の変動の何らかのモードと連関している気温変化は、モデルでよく再現されない。さらにその上、小さな規模での詳細な外部放射強制力やモデルで再現された応答は、大きな規模の場合より信頼性が低い。

地上気温の極端な現象は、人為起源の放射強制力に影響されている可能性が高い。霜が降りる日、暑い日や寒い日・夜の年間日数など、極端な気候や変動を表す指標の多くは、温暖化と一致した変化を示している。これらの指標の中には、人為起源の影響が検出されたものもあり、また、人為起源の放射強制力が、2003年のヨーロッパの熱波のように、極端に暑い夏をもたらす危険性を地域的にかなり増加させた可能性があることを示す証拠がある。

気候システムの他の部分で人為起源の影響を示す証拠がある。最近の北極の海氷域の減少や氷河の後退に、人為起源の放射強制力が寄与している可能性が高い。観測されている世界的な積雪面積の減少や氷河の広範囲の後退は、温暖化と一致しており、これらの融解が海面水位の上昇に寄与している可能性が高いことを示す証拠がある。

極域の海面気圧の低下と対応している南半球・北半球環状モードの最近数十年の傾向は、人間活動と部分的に関係する可能性が高く、両半球における低気圧経路、風、気温のパターンに影響を及ぼしている。モデルでは、北半球環状モードの変化傾向の向きを再現できるが、再現された応答は観測結果よりも小さい。温室効果ガスと成層圏オゾンの変化を取り入れたモデルを使うと、南半球環状モードの現実的な傾向を再現することができ、世界の海面気圧パターンに検出可能な人為的影響があることを示している。

20 世紀後半における全世界の陸域の年平均降水から、幾つかのモデルによって再現されている火山起源の放射強制力に対する応答が検出できる。20 世紀における、陸域の降水の緯度方向の変化パターン及び観測された大雨の増加は、人為起源の放射強制力に対する応答として予測されているものと一致しているようにみえる。人為起源の影響が、強い熱帯低気圧の頻度の増加に、寄与している可能性がどちらかといえはる。人為起源の要素をこれ以上明確に原因として特定することは現状では不可能である。なぜなら、観測されている強い熱帯低気圧の増加は、理論的研究やモデル研究で示されているよりも大きく、また過程に関する知見や自然変動に対する理解の不足、強い熱帯低気圧のモデリングにおける不確実性、過去の熱帯低気圧データの不確実性などがあるからである。

古気候データの解析により、気候に対する外部影響の役割に関する信頼性が高まった。 未来の気候を予測するために用いられる結合気候モデルが、最終氷期極大期及び完新世中期という過去の気候状況を理解するために使われた。これら過去の気候には、多くの面でまだ不確実な部分があるものの、主な特徴は、これらの時代に対する境界条件と放射強制力を気候モデルに適用することで再現された。1950 年以前の 7 世紀間の北半球の数十年規模の温度変動が再現されたが、そのかなりの部分は自然起源の外部放射強制力によるものである可能性が非常に高く、また、人為起源の強制力が、これらの記録で明らかな 20 世紀初めの昇温に寄与している可能性が高い。

現在では、気候感度の推定値は、観測結果によってさらに狭められた。 観測結果に基づく見積もりでは、平衡気候感度は、 1.5°C 以上である可能性が非常に高く、 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ の範囲に入る可能性が最も高い。上位 95% 限界を観測結果から決めることは依然困難である。このことは、平衡気候感度は $2\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ の可能性が高く、およそ 3°C である可能性が最も高いという、モデル実験及び観測研究に基づく総合的な評価を支持している (第 10 章、Box10.2)。観測結果から決まる過渡的な気候の応答は、 1°C より大きい可能性が非常に高く、また二酸化炭素が年率 1% で増加したときの二酸化炭素倍増時に 3.5°C 以上である可能性は非常に低い。これは、過渡的な応答は 3°C より大きくなる可能性は非常に低いという総合的な評価を支持している (第 10 章)。

証拠の全体的な一貫性。 20 世紀における、地表面及び自由大気の温度、海洋の温度と海氷面積の変化に関する多くの観測結果や大気大循環の変化の幾つかは、内部変動とは別のもので、人為起源の放射強制力に対する応答として予測されるものと一致する。気候システムのすべての主要な要素のエネルギー量が同時に増加していることに加えて、気候システムのそれぞれ異なる要素及び要素間にわたる温暖化の規模やパターンは、温暖化の原因は内部過程の結果である可能性が極めて低い (5% 以下) という結論を支持する。積雪、氷河後退、大雨など、その他の観測でも定性的には一致している。

残された不確実性。第3次評価報告書以降、モデルや解析技術のさらなる改善により、外部放射強制力が気候に及ぼす影響の理解についての信頼性が増した。しかしながら、放射強制力の中には、エアロゾルの放射強制力や太陽の放射強制力の数十年規模変動など、見積もりがいまだ不確実なものがある。観測された温暖化に基づき、逆解析法を用いて推定した、20世紀のエアロゾルによる正味の放射強制力は、 $-1.7\sim-0.1\text{ W/m}^2$ である可能性が高い。この結果が、総エアロゾルによる放射強制力の、順解析法による見積もり（第2章）と一致していることは、不確実性は残されているものの、総エアロゾルによる放射強制力の推定の信頼性を高めている。それにも関わらず、地表気温の原因特定の結果が、放射強制力や応答の不確実性にも揺らぐことなく信頼できるものか、さまざまなモデル、放射強制力の表現及び解析手順を用いて見積もられてきた。残された不確実性の潜在的な影響は、上に挙げた証拠をすべて総合的に評価するときに、できる限り考慮されてきた。地上気圧や降水など他の変動因子に関する、放射強制力による変化及び空間規模がより小さな変化に関する理解の信頼性はそれほど高くない。

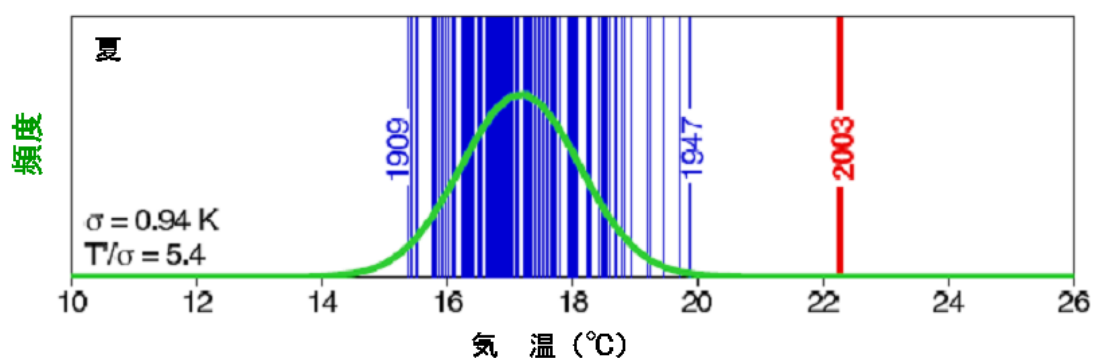
測器及び代替気候記録の理解の改善と気候モデルの改良により、気候モデルで再現される内部変動の信頼性が増してきた。しかしながら、不確実性は残ったままである。例えば、海洋貯熱量の変動の推定値について、モデルと観測では明らかに相違があった。ラジオゾンデと衛星の記録の不確実性は、第3次評価報告書のときと比べて減少してはいるが、なお対流圏の気温変化に対する人為起源の寄与の見積もりの信頼性に影響を与える。極端現象の強度、頻度及び危険性の変化に関する理解には改善がみられたものの、地球規模のデータセットの不完全性とモデルに残っている不確実性により、極端な現象の変化や変化の原因特定に関する我々の理解はなお限られている。

よくある質問と回答

FAQ9.1： 個々の極端な現象は、温室効果ガスによる温暖化で説明できるか？

化石燃料の使用といった人間活動から出る温室効果ガスの増加に応答した気候の温暖化に伴って、極端現象に気候的な変化が現れると予測される。しかしながら、ある特定の極端現象が、温室効果ガスの増加のような特定の原因の結果であるかどうかを決めることは、以下の二つの理由により、不可能とはいわないまでも、困難である。第一に、極端現象は、通常、幾つかの要因が複合して起きる。第二に、さまざまな極端現象は、変化しない気候においてさえ通常起こるものである。しかしながら、前世紀に観測された温暖化の解析では、極端現象の中には、温室効果ガスによる温暖化により、例えば熱波のように、起こりやすくなってきたものや、例えば霜あるいは極端に寒い夜のように起こりにくくなったものがあることが示唆される。例えば、最近の研究によれば、人類の影響により、2003年のようなヨーロッパの非常に暑い夏が起こる危険性は倍以上になったという推定もある。

極端な気象現象の影響を受けた人はしばしば、人類が気候に及ぼす影響が、ある程度は極端現象の原因であるといえるのか尋ねる。近年、極端な現象が発生すると、温室効果ガスの増加と結びつけてコメントされることが多くみられる。これらの現象には、オーストラリアの長期の干ばつ、2003年のヨーロッパの極端に暑い夏（FAQ9.1 図1 参照）、北大西洋における2004年及び2005年の強いハリケーンのシーズン、インドのムンバイにおける2005年7月の極端な降雨現象などがある。大気中の温室効果ガス濃度の増加のような人類による影響は、これらの現象の原因たり得るのだろうか？



FAQ9.1 図1 スイスの1864年から2003年の夏の気温は、緑色の線で示されるように平均で約17°Cである。2003年の極端に高温だった夏では、平均気温は赤い線で示すように22°Cを超えた。（縦の線は、137年間の年々の記録を示す。ガウス分布近似を緑色の線で示す。記録的な年であった1909年、1947年及び2003年を特に記す。左下隅の値は、標準偏差（ σ ）と、1864～2000年の標準偏差で規格化した2003年の偏差（ T'/σ ））。Schär et al.（2004）による。

極端な現象は、通常、さまざまな要因が複合した結果発生する。例えば、2003年夏のヨーロッパの極端に暑い夏は、晴天と土壌の乾燥（土壌水分の蒸発に使われるエネルギーが少なくなるので、太陽エネルギーが土壌を暖める方により多く振り向けられる）をもたらした持続的な高気圧システムを含む幾つかの要因が寄与していた。同様に、ハリケーンの形成には、海面水温が高いことに加えて、大気循環がある決まった条件を満たしている必要がある。海面水温のように、人間の活動に強く影響される可能性のある要因がある一方、そうでないものもあり、ある特定の極端現象から人為的影響を検出するのは簡単ではない。

しかしながら、人為的影響により、ある種の極端現象の発生しやすさが変わったかどうかを明らかにするために気候モデルを使うことは可能かもしれない。例えば、2003年のヨーロッパの熱波の場合、火山活動及び太陽放射の変動のような、気候に影響を与える自然の要因の時間的変化のみを含む気候モデルが実行された。次に、人間及び自然の要因の両方を含めて再度モデルが実行され、その結果、現実には起きた気候にはるかに近いヨーロッ

パリの気候が再現された。これらの実験に基づいて、人為的影響により、ヨーロッパの夏が2003年程度に高温になる危険性が倍以上になり、しかも、人為的影響がなければ、この危険性はおそらく数百年に一度程度のものであったことが推測された。パリのような都市域で非常に暑い夜が続くといった、具体的で強いインパクトを持つ現象の危険性の変化を見積もるため、さらに詳細なモデル研究が必要となる。

「人為的影響によって、ある現象の起こりやすさが変わるのか？」といった、確率に基づいて議論を進めることの利点は、温室効果ガスの増加のような外部要因が、熱波や霜のような特定の種類の現象の発生頻度に及ぼす影響を評価するときに利用できるということである。しかしながら、遅霜のような個々の極端現象の起こりやすさは、平均的な気候状態の変化ばかりでなく、気候の変動性の変化によっても変化し得るので、注意深い統計解析を行う必要がある。このような解析は、気候モデルによる気候の変動性の見積もりに頼っているため、気候モデルは、そのような変動性を適切に表現できなければならない。

大雨や洪水の頻度の変化を調べるためにも、同様の起こりやすさに基づく手法を使うことができる。気候モデルは、人為的影響により、大雨を含むさまざまな極端現象が増加することを予測している。最近数十年において、地域によっては大雨が増加しており、洪水の増加をもたらしていることを示す証拠がある。

FAQ9.2： 20世紀の温暖化は自然の変動で説明できるか

20世紀の温暖化を自然の原因によって説明できる可能性は非常に低い。20世紀の終わりは、異例に高温だった。再構築した古気候によれば、20世紀後半の北半球は、50年の期間としては、最近1300年で最も高温だった可能性が高い。この急速な温暖化は、前世紀に起きたような温室効果ガスの急速な増加に対して起こるべき気候の応答として科学的に理解されているものと一致し、かつ、太陽放射や火山活動の変動のような、自然起源の外部要因に対して、科学的に起こるべきと理解されている気候の応答とは一致していない。気候モデルは、地球の気候に及ぼすさまざまな影響の研究に適切な道具である。自然の外部要因に加えて温室効果ガスの水準が増加している効果がモデルに組み込まれた場合、前世紀で起きた温暖化がモデルで良く再現される。自然要因しか用いないと、モデルは観測された温暖化を再現することはできない。人為起源の要因を取り入れると、最近数十年に起きた地球全体の気温変化の地理的パターンに類似したパターンもモデルで再現される。この空間パターンには、北半球高緯度で、より顕著に昇温するといった特徴があり、エルニーニョのような、内的な気候過程と関係して起こる自然の気候変動の最も主要なパターンとは違っている。

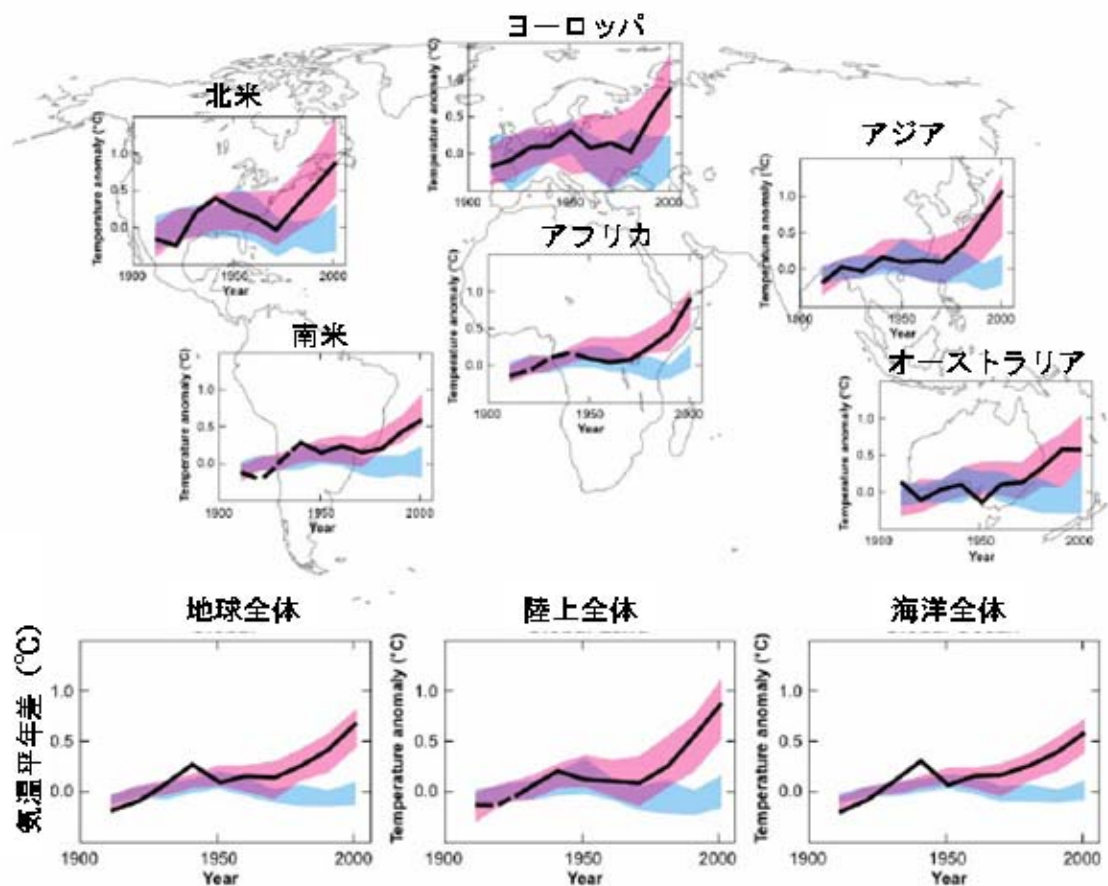
地球の気候の時間変動は、外部影響の変化のみならず、エルニーニョのような自然の内

部変動によっても引き起こされる。これらの外部影響には、火山活動及び太陽放射変動のような自然起源のものもあり、また、温室効果ガス排出、人為起源のエーロゾル、オゾン層破壊、土地利用変化のような人類の活動によってもたらされるものもあり得る。気候の変動性の観測結果を研究するとともに、気候に影響する外部要因を一定に保ちつつ気候モデルを実行することによって、自然の内部過程の役割を評価することができる。外部の影響を評価するためには、モデルでこれらの要因を変化させるとともに、そのような過程に関する物理的知見をモデルに組み入れれば良い。自然の内部変動と外部要因が合わさった効果は、工業化時代より前では、年輪、氷床コア等の天然の「温度計」に記録されている気候情報から評価することができる。

気候に影響を与える自然の外部要因には、火山活動や太陽放射変動などがある。爆発的な火山噴火は、ときに大量のちりや硫酸塩エーロゾルを大気中に排出して、一時的に地球を覆い、太陽光を宇宙に反射する。太陽放射には 11 年周期があり、さらに長い周期の変動もあり得る。過去 100 年間の人類の活動、特に化石燃料の燃焼は、二酸化炭素など大気中の温室効果ガスの急増をもたらした。産業時代前、これらのガスは、数千年間、ほぼ安定した濃度を保ってきた。人類の活動は、特に 1950 年代～1960 年代の間、大気中の微小な反射粒子である「エーロゾル」の濃度の増加をももたらしてきた。

エルニーニョのような自然の内部変動過程は、比較的短い期間にわたって、地球の平均温度の変動をもたらすものの、解析によれば、20 世紀の地球の平均気温の変化の大部分は外部要因によってもたらされた。1991 年のピナトゥボ山のような大規模な火山噴火のあとに、短期間の世界的な寒冷化が起こった。20 世紀初めに世界平均の気温は上昇したが、その間に温室効果ガス濃度は上昇し始め、太陽放射はおそらく増加し、火山活動はほとんどなかった。1950 年代から 60 年代にかけては、化石燃料その他の排出源から出るエーロゾルの増加が地球を冷却し、世界平均気温は横ばいとなった。1963 年のアグン山の噴火でも、大気上層に反射性のちりが大量に排出された。1970 年代以降に観測された急速な温暖化は、他のすべての要因に卓越して温室効果ガスが増加した時期に起きた。

20 世紀の気候変化の原因を明らかにするために、気候モデルを使った数値実験が数多く行われてきた。これらの実験では、太陽放射や火山活動の変動を考慮しただけでは、最近数十年に観測された急速な温暖化を、モデルでは再現できないことが示される。しかしながら、FAQ9.2 図 1 に示すように、温室効果ガス等を原因とする人為起源の影響や自然の外部要因といった、最も重要な外部要因をすべて組み込めば、モデルは観測された 20 世紀の気温変化を再現することができる。モデルで見積もったこれらの外部要因に対する応



FAQ9.2 図1 各大陸、地球全体、陸域、海洋それぞれにおける前世紀の10年単位の気温(摂氏)の変化。黒い線は、観測された気温変化を示す。色の付いた帯は、最近のモデルによる再現結果の9割をカバーする範囲を示す。赤は自然及び人為起源の要因を含むシミュレーション、青は自然の要因のみを含むシミュレーションの結果を示す。黒い破線は、観測がかなり少ない地域、期間を示す。この図の詳しい説明及びこの図の作成に用いた手法は付録9.Cで説明する。

答は、20世紀の気候において、地球規模でも、観測が不十分な南極を除くそれぞれの大陸でも検出可能である。気候に及ぼす人為起源の影響は、過去半世紀の間の世界平均の地上気温の変化の原因として、他のすべての原因を凌駕している可能性が非常に高い。

人為起源のエロゾルのように、理解が不十分な外部要因があることが、不確実性が生じる大きな理由の一つである。また、気候モデル自身も不完全である。しかしながら、モデルが再現した、人間活動による温室効果ガス増加に対する応答のパターンはどれも、海洋よりも陸の方が昇温量が大きいことなど、観測された変化パターンと類似している。この変化パターンは、エルニーニョのような自然の内部変動に伴う温度変化の主要なパター

ンとは異なっており、温室効果ガスに対する応答と自然の外部要因の応答を識別する一助となる。もう一つの例は、モデルと観測の両方が大気下層（対流圏）の温暖化と、それより上層の成層圏の寒冷化を示していることである。これは、人類の気候への影響の効果を示す、もう一つの変化の証拠である。もし、例えば、太陽活動の活発化が最近の気候の温暖化の原因だったとすると、対流圏と成層圏の両方が昇温していただろう。加えて、人為起源の影響と自然の外部影響のタイミングの違いが、これらの要因に対する気候の応答を識別するのに役立つ。このような考察により、自然要因よりは人為的な要因の方が、過去 50 年間に観測された地球温暖化の支配的要因であったという説の信頼性が高まっている。

過去 1000~2000 年の北半球の気温は、気温の変化に伴って幅や密度が変化する年輪のような天然の「温度計」及び歴史的な気象の記録に基づいて推定される。これらの記録は、20 世紀の温暖化が、自然の内部変動と自然の外部放射強制力だけでは説明できないとの推測を裏付ける追加的な事実となる。工業時代以前の北半球平均気温の変動は、火山の大噴火によって発生した一時的な寒冷化や太陽放射の変化によっておおむね説明できるため、これらの気温推定の信頼性は高い。残りの変動は、気候モデルで、自然及び人為起源の外部要因を除いたときに再現される変動とおおむね一致している。過去の気温の推定値には不確実性があるが、そのような推定によれば、20 世紀後半は、過去 1300 年で最も暖かい 50 年であった可能性が高い。20 世紀の顕著な温暖化に比べると、自然の要因によって起こる気候変動は小さいと見積もられている。