

### 第3章 観測結果：地表面及び大気中の気候変化

#### 概要

世界の平均地上気温は、過去100年間（1906～2005年）で線形の長期変化傾向（トレンド）を推定すると、 $0.74 \pm 0.18^\circ\text{C}$ 上昇した。最近50年間の昇温率は、過去100年間の約2倍となっている（10年当たり  $0.13 \pm 0.03^\circ\text{C}$  対 10年当たり  $0.07 \pm 0.02^\circ\text{C}$ ）。陸上と海上で平均した世界の平均気温は、さまざまな均一性の問題を、それぞれ独自に補正している三つの異なる推定値から求められている。1901～2005年の期間について、これらの推定は不確実性の範囲で一致しており、最近の上昇率も同様の値を示している。トレンドは線形ではなく、測器による観測が始まった最初の50年（1850～1899年）から最近の5年（2001～2005年）までの昇温は、 $0.76 \pm 0.19^\circ\text{C}$ だった。

2005年は観測史上最も気温の高い2年のうちのひとつであった。測器による観測が始まって以来、世界の平均地上気温が最も高かったのは、1998年と2005年である。一つの推定では1998年が最も気温が高く、残りの二つの推定では2005年の方がわずかに高かった。2002～2004年の3年は、1850年以降で、3番目、4番目、5番目に気温の高い年だった。最近12年間（1995～2006年）のうち、1996年を除く11年は、1850年以降の記録で、高い方から12位の記録に入っている。1998年は大規模な1997～1998年エルニーニョ現象の影響で地上気温が高くなったが、2005年はこのような強い偏差はなかった。2006年の気温は過去5年の平均と同程度である。

陸域は海洋よりも速く昇温している。陸域も海洋域も昇温しており、海洋では海面水温も夜間の海上気温も昇温している。しかし、世界全体でみると、陸上の地上気温は、1979年以後、海洋の2倍の速さで上昇している（陸上：10年当たり  $0.27^\circ\text{C}$ 以上 対 海洋：10年当たり  $0.13^\circ\text{C}$ ）。また、北半球の気温は、冬（12～2月）から春（3～5月）にかけて大きく上昇している。

気候の温暖化に伴って極端な気温の発生も変化している。データのある陸域の70～75%で、中緯度では広く霜の降りる日が減少するとともに、極端な高温の増加や極端に寒い日の減少がみられる。最も特徴的な変化は、寒い夜（1961～1990年を基準として最も低温の10%）の出現頻度が、1951年から2003年にかけて減少していることである。暑い夜（1961～1990年を基準として最も高温の10%）はより頻発している。日較差は、1950年から2004年にかけて、平均で10年当たり  $0.07^\circ\text{C}$ の割合で減少している。しかし、1979～2004年の期間は、最高気温と最低気温が同様の割合で上昇しているため、日較差はほとんど変化していない。2003年夏のヨーロッパ西部・中部における記録破りの熱波は、近年

のひときわ顕著な極端現象の例である。その夏（6～8月）は、1780年頃に比較可能な形で測器観測が始まって以来最も暑く（以前の記録である1807年よりも1.4℃高い）、少なくとも1500年以降で最も暑かった可能性が非常に高い。

**近年、各海洋の海面水温は、すべての緯度で非常に明瞭に昇温している。**大西洋では、両半球で昇温に違いがある。太平洋では、エルニーニョ現象や、赤道対称の太平洋十年規模変動による中断がある。一方、インド洋では着実に昇温している。これらの特徴が、海面水温の地域的な昇温率の違いをもたらし、ひいては大気循環に影響が及ぶ。

**都市のヒートアイランドの効果は実際にあるものの、局地的であり、大規模スケールのトレンドには影響しない。**最近の多くの研究が示すように、半球規模や大陸規模でみる限り、（1950年以降の）陸上気温の記録に、都市化や土地利用の変化が及ぼす効果は無視できる。なぜならば、実際にあるとはいえ局地的な効果は、用いられるデータセットの中で無効となるか補正の対象となってしまふからである。いずれの場合でも、これらの効果は、海面水温の記録には現れない。都市のヒートアイランドの効果が、降水量や雲や日較差にも変化をもたらすことを示唆する証拠が増えている。それは、汚染物質の濃度が低くなるなどの週末に現れる効果のために、「週末効果」として検出される。

**北極域の平均気温は、過去100年の世界の平均気温の上昇率のおよそ2倍の速さで昇温している。**北極域の気温には大きな十年規模の変動がみられる。1920年代の後半から1950年代の前半にかけては、現在と同程度の温暖期が比較的長く続いたが、空間分布は近年の温暖化とは異なっていた。

**1958～2005年における下部対流圏の昇温率は、地上気温の昇温率よりわずかに大きい。**高層気象観測用ラジオゾンデの記録は、地上の観測記録に比べると空間的に極めて不十分である。特に熱帯では、多数の記録に負のバイアスが含まれている可能性が非常に高いことを多くの証拠が示唆している。1979年以降の衛星マイクロ波探査計（MSUや改良型マイクロ波探査計（AMSU））の測定から推定された対流圏の気温トレンドには、手法によって相違がみられる他、説明のつかない誤差が含まれている可能性が高いものの、気温トレンドの推定値は、衛星の交代、軌道縮小、（日射の効果に伴う）現地通過時刻のドリフトの修正を通じて改善され（データセット間の違いが少なくなり）つつある。MSUチャンネル2データへの成層圏の影響を考慮すれば、衛星による対流圏の気温の記録は地上気温のトレンドとおおむね一致する。1979年以降の世界の地上気温の昇温の（データセットの違いによる）幅は、10年当たり0.16～0.18℃で、MSUによって推定された対流圏気温の上昇率である10年当たり0.12～0.19℃とほぼ匹敵する。しかし、対流圏の昇温は地上より少し大きく、また成層圏のはっきりした寒冷化の影響もあって、圏界面高度も上昇した可

能性が高い。

**下部成層圏は1979年以來、寒冷化している。**高層観測用ラジオゾンデや衛星(MSUチャンネル4)や再解析による推定は量的にほぼ一致して、1979年以降、下部成層圏が10年当たり0.3~0.6°Cの割合で寒冷化していることを示唆している。1958年にさかのぼる、より長期の高層観測用ラジオゾンデの記録でも寒冷化がみられるが、気温の低下率は、1958年から1978年にかけてよりも1979年以降の方がかなり大きい。ラジオゾンデの記録は、まだ考慮できていないラジオゾンデの変化のため、成層圏の寒冷化を過剰に見積もっている**可能性が高い**。大きな火山噴火に続いて成層圏の昇温が起こったため、成層圏の気温トレンドは直線的ではない。

**1900~2005年の降水量は、一般的に北緯30度以北の陸上で増加した。**しかし、**熱帯では1970年代以降、減少傾向が卓越している。**北緯10~30度では、降水量が1900年から1950年代にかけて顕著に増加したが、1970年頃以後は減少している。北緯10度から南緯10度にかけての熱帯地方では、特に1976/1977年以後、降水量が減少する傾向がみられる。熱帯の値が世界平均を支配している。北米東部と南米東部、ヨーロッパ北部、北・中央アジアでは、かなり湿潤化の傾向がみられ、サヘル、地中海、アフリカ南部、南アジアの一部では、乾燥化の傾向がみられる。降水量変化の分布は、気温変化に比べて場所や季節的による変動が大きい。しかし、降水量が著しく変化する場所では、測定された気流の変化とよく合う。

**大雨の頻度は大いに増加した。**大雨の頻度(例えば95%パーセンタイル)は、多くの陸域で、総降水量が減少している地域でも、増加している**可能性が高く**、気候の温暖化や観測された水蒸気量の増大とよく合う。(再現期間が50年に1回の)よりまれな現象もまた増加している。しかし、このようなトレンドが信頼できるか検証するほど十分なデータが存在する地域は、ほんのわずかしかない。

**干ばつは、1970年代以降、特に熱帯や亜熱帯でより一般的になっている。**広い範囲で干ばつを表すしきい値を超えたのに伴い、より厳しく、より長期間にわたる干ばつが観測された地域が過去30年で拡大した。Palmer Drought Severity Index (PDSI)の形で定量化される、陸上の降水の減少と蒸発散を増大させる昇温や乾燥が、干ばつの発生地域拡大に寄与する重要な因子である。干ばつが発生した地域は、特に熱帯の海面水温の変化とそれに関連した大気循環及び降水の変化に主に決定付けられるように見える。米国西部では、雪塊氷原が消えたことに続く土壌水分量の減少も干ばつに寄与する因子の一つのようである。オーストラリアやヨーロッパの最近の干ばつについては、異常高温や熱波に伴って発生していることから、地球温暖化と直接的に関連していることが推測される。

**対流圏の水蒸気は増加している。**陸上や海上の高温に深く関連して、1976年以後、地上の比湿は次第に増加している。世界の海上における気柱内の総水蒸気量は、海面水温の分布の変化や量の変化、そして相対湿度がほぼ一定であることと一致して、1988年から2004年にかけて10年当たり $1.2\pm 0.3\%$ の割合で上昇した。海面水温と強い相関があることから、気柱内の総水蒸気量が1970年以降に4%増加したことが示唆される。対流圏上部の比湿にも、1982年から2004年にかけて同様の上昇トレンドが検出され、これにより温室効果がかなり強まった。

**「地球薄暮化」は世界全体でみられる現象ではなく、1990年以後は収束してきた。**報告されてきた、1970年から1990年にかけての、地球表面に到達する太陽放射の減少は、都市に偏っており、符号は反転してきた。観測記録はまばらであるが、多くの場所では、雲量の増加、雲の性質の変化、及び大気汚染（エアロゾル）の増加に伴い、特に1970年から1990年にかけて蒸発計の蒸発量が減少した。しかし、そのような場所の多くでは、実際の蒸発散量が蒸発計で測定された蒸発位に近くなるにつれて、降水量の増加で土壌の水分量が増えるのに伴い、地表面の水バランスから推測される実際の蒸発散量は増加する。ゆえに、蒸発散量を決定するにあたっては、太陽放射の減少と地上降水量の増加がトレードオフの関係にあるが、一般的には後者の方が卓越する。

**雲はエルニーニョ南方振動（ENSO）の影響を受けて変化し、陸と海では逆の変化がみられる。**1950年代以降、広い範囲で（しかし遍在的ではない）、雲量の増加と同時に、陸上の日較差が減少している。海上における全雲量や下層雲の変化は、地上観測と衛星観測とでは結果が一致しない。しかし、1980年代から1990年代にかけての大気の上端における放射の変化は、一部はエルニーニョ現象に関連し、熱帯の上層雲量の減少と関連しているようにみえる。また、この放射の変化は、地上のエネルギー収支と観測された海洋貯熱量の変化と関連している。

**大規模な大気循環は明らかに変化している。**大気循環の変動性や変化は、比較的少数の大規模なパターンによっておよそ説明される。ENSOは、明瞭でないときもあるものの、世界規模の年々変動において卓越するモードである。太平洋十年規模振動（PDO）の位相の変化に関連した1976/77年の気候シフトや、より頻繁に起こるエルニーニョ現象は、多くの地域、特に熱帯モンスーンに最も影響を与えてきた。例えば、北米大陸では、ENSOや太平洋・北大西洋パターン（PNA）に関連した変化のため、東部で雲が多く湿潤になる一方、西部では東部よりも温暖になるような、大陸規模の対照的な変化がみられた。20世紀に太平洋域では、循環が弱まる時期（1900～1924年、1947～1976年）と、循環が強まる時期（1925～1946年、1976～2005年）の数十年周期変動が明瞭だった。大西洋の数十

年周期の変動は、大西洋数十年周期振動（AMO）として、大気と海洋のいずれにおいても明らかである。

**中緯度の偏西風は両半球でおおむね強まっている。**大気循環の変化は、主に中緯度の偏西風の緯度帯平均に関連する「環状モード」として観測される。偏西風は、大西洋や南半球の極前線ジェット気流の極方向への移動と、低気圧経路の活動の強まりを伴い、ほとんどの季節で1960年代から少なくとも1990年代の半ばまで強まった。これらは対流圏や成層圏下部における冬季の極渦の強化傾向を伴っている。月の時間規模では、南半球環状モードや北半球環状モード（それぞれSAMとNAMと呼ぶ）及び北大西洋振動（NAO）は、温帯の変動で卓越するパターンである。NAMとNAOは密接に関連している。北半球の偏西風は、NAOやNAMの変化の一部として、1960年代から1990年代に強まったものの、その後は平年並に戻った。北半球の、海洋から大陸への偏西風は変化し、特にヨーロッパでは、冬季に観測された低気圧の経路の変化や、それに関連した降水量や気温偏差のパターンの変化の主な原因となる。南半球では、SAMが1960年代から現在まで強化しており、南極半島での強い昇温やいくらかは南極大陸の一部の寒冷化に関連している。風や有義波高の解析により、再解析に基づいて明らかになった、1990年代後半までの北半球の温帯における低気圧の活動度の増加が裏付けられる。

**1970年代以降、熱帯低気圧は強まった可能性が高い。**熱帯低気圧についての変動は、ある海域における増加がしばしば別の海域での減少を補うような形の、数や経路の変化として現れる。そのような熱帯低気圧、ハリケーンや台風の変動では、ENSOや十年規模の変動が卓越している。熱帯の雷雨や熱帯低気圧の発達に影響を与える海面水温等の重要な変数には明瞭なトレンドがある。世界的にみて、ハリケーンの寿命がより長くなるとともに強度が増すにつれ、その潜在的な脅威に、1970年代中期以降かなりの上昇傾向があると推定されている。そして、その傾向は熱帯の海面水温と非常に強い相関がある。ほとんどの地域でわずかに熱帯低気圧の数や活動日数が減っているにもかかわらず、カテゴリ4と5に達するハリケーンの数と割合が、1970年代以降に全世界的に大幅に増加したことで、この関係は、さらに強力に裏付けられた。最も増加の大きい地域は、北太平洋、インド洋及び太平洋南西部であった。しかしながら、2005年の空前の記録を頂点として、北大西洋のハリケーン数についても、最近11年のうち9年で平年（1981～2000年の平均値に基づく）以上になっている。さらに、ブラジル沖で2004年3月に南大西洋で初めての熱帯低気圧が発生した。

**気温の上昇と、観測された雪氷圏や海洋の変化はよく一致している。**20世紀には、氷河や小さい氷帽（南極やグリーンランドは含まない）の質量や面積の減少が、ほぼ世界的にみられ、これは観測された地上気温の変化と一致していた。積雪面積は北半球の多くの地

域で減少し、海氷面積は北極域の特に春と夏に減少し（第4章）、海洋が昇温し、海面水位が上昇している（第5章）。

## よくある質問と回答

### FAQ3.1： 地球の気温はどのように変化しているのか？

過去157年間の測器による観測結果によれば、地上気温は、重要な地域的変動を伴いつつ、世界的に上昇している。世界平均すると、20世紀の昇温は、1910年代から1940年代にかけて(0.35℃)と、1970年代から現在まで(0.55℃)のより強い昇温の2段階で起こっている。ここ25年で昇温率が増加しており、記録上の最も暖かい12年のうちの11が、過去12年間で起こった。上層については、1950年代の後半以来の世界的な観測結果によれば、対流圏(高度約10km以下)が地表よりわずかに大きな割合で昇温している一方、成層圏(高度約10~30km)が1979年以来著しく降温している。これは物理的な予想やほとんどのモデル結果と一致する。海洋の昇温、海面水位の上昇、氷河の融解、北極地方での海氷後退及び北半球における積雪面積の減少から、地球温暖化が起こっていることは明白である。

一つの温度計で世界の気温を測定することはできない。代わりに、毎月の世界平均気温を算出するために、世界の陸域の数千の観測点での毎日の気温の測定値と、海上を移動する船からの、数千以上の海面水温の測定値が結合される。時間とともに一貫した変化を得るために、実際は、利用できるデータ数の変化に対して影響を受けにくい偏差(おのおのの観測点の気候値からのずれ)で主に解析を行う。現在では、1850年から現在までの記録を使うことができる。しかし、データの被覆率は19世紀の後半には全世界というにはあまりに少なく、南極大陸で観測が始まった1957年以後にかなり改善され、1980年頃に衛星観測が始まって以後は最良の状態となった。

世界平均として表したとき、地上気温は過去100年間(1906~2005年)に約0.74℃上昇した(FAQ3.1 図1参照)。しかしながら、昇温の割合は常に一定ではないし、季節や場所によっても異なっている。1850年から1915年頃にかけては、自然変動に起因する上昇や下降(一部は貧弱なサンプリングにも起因する変化もある)の他に、大きな世界的な変化はみられなかった。世界平均気温は、1910年代から1940年代にかけて(0.35℃)上昇し、その後は1970年代にかけて幾分(0.1℃)低下した後は、2006年末までは急激に(0.55℃)上昇した(FAQ 3.1 図1)。この期間中最も気温が高かったのは1998年と2005年である(統計的には区別がつかない)。最も暖かい12年のうちの11が、過去12年間(1995~2006年)で起こった。特に1970年代以降、一般に海上よりも陸上で昇温が大きい。季節的には、冬半球の方がわずかに昇温は大きい。都市や市街地域では、(都市のヒートアイランドの効果と呼ばれる)さらなる昇温が起こっているが、空間的には限られている。世

界の気温データから影響を受けている観測点をできるだけ多く除去し、誤差幅（図の淡灰色のバンド）を広げることによって、都市のヒートアイランドの効果を考慮に入れることができる。

1901年以降、一部の地域で寒冷化がみられた。最も顕著なのは、グリーンランド南部付近の北大西洋北部である。この期間の昇温は、アジアや北米大陸の北部の内陸部で最も著しい。しかし、それらの地域は年々変動が大きいため、昇温のシグナルが最も明瞭なのは中・低緯度の一部、特に熱帯の海洋である。1979年以降の気温のトレンドを示している

**FAQ 3.1** 図1の左下図では、太平洋にエルニーニョに関連する温暖化と寒冷化の分布がみられる。

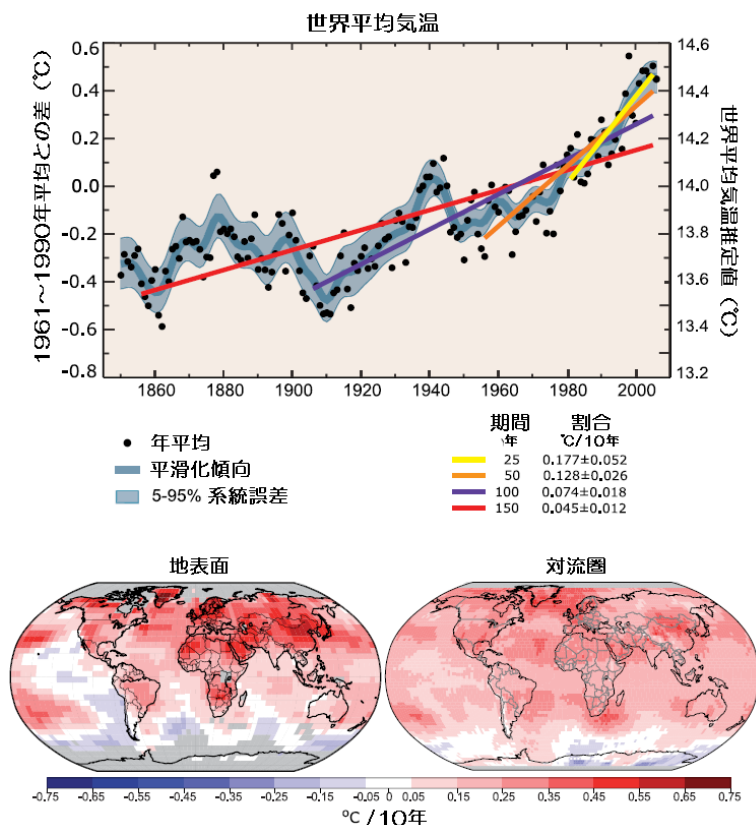
世界の多くの地域（北米大陸の一部、南米大陸南部、ヨーロッパ、アジア北部及び東部、アフリカ南部、オーストラリア）では、最近、日別気温の極値の長期変化の解析が可能となった。特に1950年以降、これらの記録は、非常に寒い昼や夜の数が次第に減少し、極端に暑い昼や夜の数が増加していることを示している（FAQ 3.3 参照）。両半球の中・高緯度のほとんどの地域で霜のない期間が長くなっている。北半球では春の訪れがかなり顕著に早まっている。

上記で述べた地上データに加え、1958年以降は陸上でかなりの被覆率となったラジオゾンデと、1979年以降は衛星データから、上空の気温の測定記録が作られている。すべてのデータは、必要に応じて、観測手法や測器の変化の影響を補正している。マイクロ波の衛星データを用いて、対流圏（地上から約10km上空まで）と下部成層圏（約10~30km）を含む厚い大気の“衛星気温記録”が作成されてきた。1979年以降のさまざまな衛星に搭載された13の測器の相互校正手法を改良するとともに、衛星高度や観測時間の変化を補正した新しい解析結果が幾つか得られたものの、トレンドにはいくらかの不確実性が残っている。

1950年代後半以降の世界的な観測について利用可能なすべてのデータの最新版によると、対流圏の昇温の割合は、地上に比べて幾分か大きい。一方、1979年以降、成層圏は顕著に寒冷化している。これは、温室効果ガスの増加に伴い、対流圏の昇温と成層圏の降温が引き起こされるとするモデル実験の結果や物理学的な予想と一致する。また、オゾン層破壊もまた、成層圏の降温にかなり寄与する。

観測された地上気温の上昇と一致して、川や湖が結氷する期間が短くなった。加えて、20世紀は、氷河の質量や面積がほぼ世界的に減少した。グリーンランドの氷床の融解が最近明らかになり、北半球の多くの地域では雪氷面積が減少してきた。北極では、すべての

季節で海氷の厚さや面積が減少し、特に春や夏には激減している。海洋は昇温し、海水の熱膨張や陸氷の融解のため、海面水位が上昇している。



FAQ3.1 図1 上段：観測された年間の世界平均気温（黒点）（Had CRUT3 データセットより）及びデータの単純な近似。左縦軸は1961～1990年平均からの偏差を、右縦軸は気温の推定値（°C）を示す。直線近似は過去25年（黄）、過去50年（橙）、過去100年（紫）、過去150年（赤）の値を与えており、それぞれ1981～2005年、1956～2005年、1906～2005年、1856～2005年の期間である。近年の、より短い期間の方が傾きが急で、気温上昇の加速を示していることに注意。青い曲線は、十年規模の変動をみるために平滑化された曲線である。変動に意味があるかどうかを考慮するため、10年間で5～95%の誤差幅（淡灰色）を示している（従って、年ごとの値はこれらの幅を超越する）。20世紀における放射強制力を推定することによって得られた気候モデルの結果（第9章）によれば、1915年ころまでの期間はほとんど変化がなく、20世紀初頭の変化のほとんどは、太陽放射の変化、火山活動などの自然の変化が大きく寄与していることが示唆される。1940年頃から1970年頃までは、第二次世界大戦に続く工業化によって増加した北半球の大気汚染によって寒冷化し、1970年代中頃以降、二酸化炭素等の他温室効果ガスの増加に伴う気温の上昇が観測されている。

下段：地表（左）及び対流圏（地上から高度10kmまでの範囲。衛星による観測。）（右）において推定された、1979～2005年の直線的な気温上昇傾向の分布。灰色の区域は、データが不完全な地域。衛星による対流圏の記録では、空間的に均一な気温上昇を示している。一方、地表付近では、陸上と海洋の関係により明確に表れていることに注意。

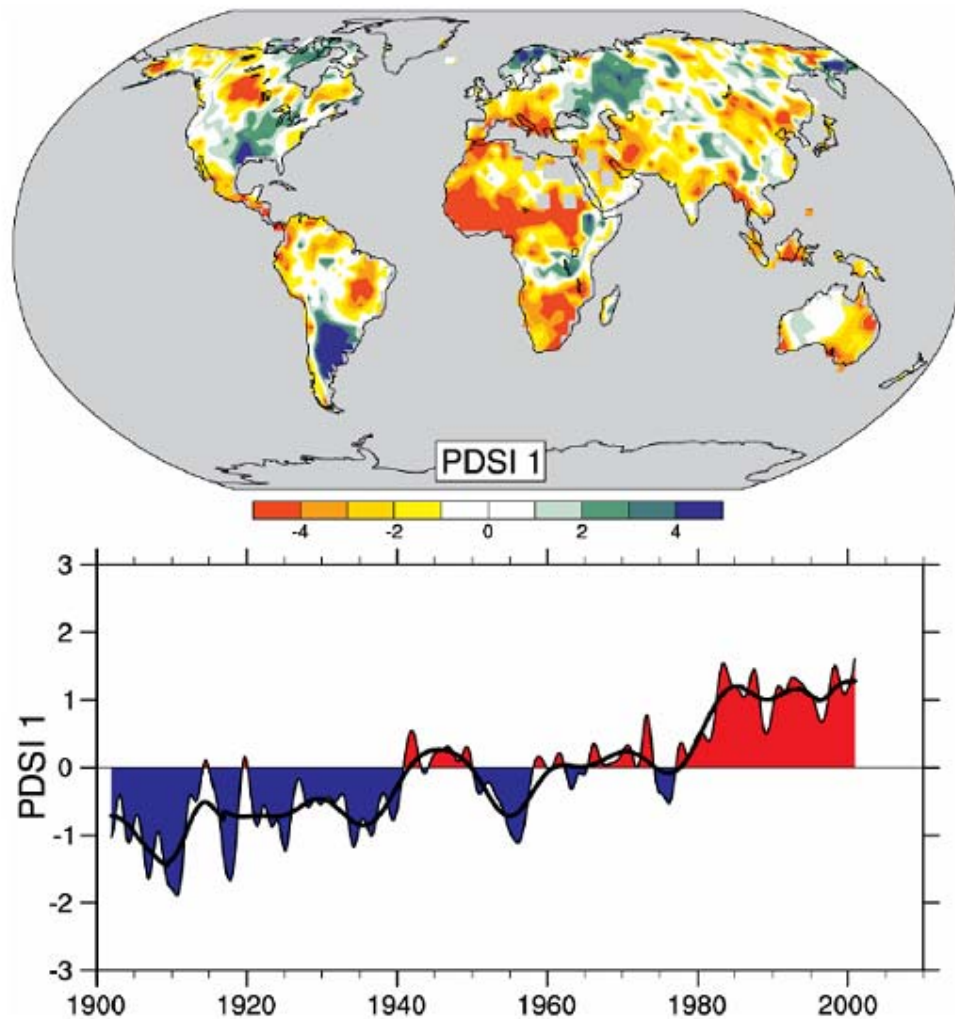


### FAQ3.2： 降水量はどのように変化しているのか。

観測結果によると、降水の量、強さ、頻度とタイプが変化している。降水のこれらの特徴は、一般的に大きな自然変動の現れであり、エルニーニョ現象と、北大西洋振動 (NAO) のような大気循環のパターンの変化がこれらの変動に相当な影響を及ぼす。1900年から2005年にかけて、降水量にはっきりした長期傾向がみられたのは以下の地域である：北米東部と南米東部、ヨーロッパ北部、北/中央アジアではかなり湿潤化し、サヘル、アフリカ南部、地中海、南アジアでは乾燥化の傾向がみられる。北部地域では今や、降水量のうち、雪よりむしろ雨として降る量が増えている。降水量の総量が減少した場所でさえ、大雨現象が広範囲にわたり増加している。これらの変化は、特に低緯度の世界の海洋の昇温に起因する大気中の水蒸気の増加に関連する。干ばつと洪水の両方の発生が増加している地域も幾つかある。

降水は、雨や雪等の、雲から降る液体あるいは固体の水の総称である。降水は断続的で、降水が起きたときの特徴は、温度と天気状況に強く依存する。天気状況により、風と地表面からの蒸発を通じた水蒸気の供給と、その水蒸気がいかに低気圧内で集まり、雲を形成するのかが決まる。上昇した空気は膨張して冷却されるため、水蒸気が凝結して降水が形成される。上昇気流ができるのは、山で上昇する場合、暖かい空気が冷たい空気に乗り上げる（温暖前線）場合、冷たい空気が暖かい空気の下に潜りこむ（寒冷前線）場合、地表面の局地的な加熱によって対流が起きる場合、その他の天気や雲システムから生じる場合がある。それゆえに、これらのいずれかが変化すれば、降水量は変化する。降水量観測の分布はまばらな傾向があるので、蒸発の変化のおおまかな推定値と降水量を用いて計算した、土壌水分量の指標である Palmer Drought Severity Index (FAQ 3.2 図 1 を参照) によって、降水量の全体的なトレンドを示す。

人為起源で増大した温室効果のために加熱が増えた結果、(洋上及び湿った地面の上がいっつもそうであるように) 地表面に適度な水分があれば蒸発は増加する。蒸発熱は、空気を暖めるよりむしろ空気を湿らせるために働くため、地表面の水分は「エアコン」として効果的に機能する。この結果、夏に温暖で乾燥か、冷涼で湿潤のどちらかになるという傾向がしばしば観測される。従って、北米東部及び南米東部が湿潤化した場合 (FAQ3.2 図 1)、他の場所よりも気温上昇は小さかった (FAQ3.3 図 1 の暖かい日の変化を参照)。しかし、冬の大陸北部では、より暖かくなることによって大気の水蒸気量を保持する能力が高まるため、気温が高くなるにつれて降水量が多くなる。しかし、一般に、降水量が幾分増加したこれらの地域では、FAQ3.2 図 1 のように、降水量の変化がそれほど明白でなかったために、温度の上昇 (FAQ3.1) で乾燥化が進んだ。



FAQ3.2 図1 1900~2002年の、月ごとのPalmer Drought Severity Index (PDSI)の空間分布の第一主成分(上段)。PDSIは、有名な干ばつの指標で、以前の降水量と、(気温に基づいて推定された)大気中の水分移動量を水文収支システムに組み込むことで算出される、(各地点における平均状態からの)表面水分の累積欠如量である。下段の図は、1900年以降、この分布の符号と強さがどのように変化したかを示したものである。下段のグラフの値が正(負)のときに、上段の図の赤やオレンジの区域は平均より乾燥化(湿潤化)、青や緑の区域は平均より湿潤化(乾燥化)する。時系列は、おおまかには長期変化傾向と一致しており、この分布及び分散で、1900~2002年のPDSIの直線的傾向の67%の要因となっている。従って、例えば特にサヘル地域などのアフリカの広範囲の干ばつの強化をよく示している。また、特に北米及び南米の東部、ユーラシア北部で湿潤化していることに注意。Daiら(2004b)から転載。

気候が変動するにつれて、幾つかの直接的な影響のため、降水の量、強さ、頻度とタイプが変化する。昇温によって地面は乾燥し、世界中の多くの場所（FAQ 3.2 図 1）で観測されるように、干ばつの潜在的な発生率と深刻さが増した。しかし、確立した物理法則（クラウジウス-クラペイロンの関係）によれば、気温が 1°C 上昇するごとに大気が水蒸気量を保持できる能力はおよそ 7% 増加する。相対湿度の観測結果のトレンドは不明だが、相対湿度が地表から対流圏で全体的にほぼ一定であることから、気温の上昇に伴い水蒸気が増加したことが示唆される。海面温度の変化に基づく推定によれば、20 世紀中に洋上大気中の水蒸気がおおよそ 5% 増加した。降水は主に、大気に含まれる水蒸気を供給する気象システムにより生じるので、水蒸気の増加のために、降水強度の増加と大雨や大雪の危険性が一般的に増加する。温暖化に伴い水蒸気が増加することによって、年間総降水量がわずかに減少するときでもより強い降水現象が起き、全体的な降水量が増加する場合はさらに強い降水現象が予想されることは、基本的な理論、気候モデルシミュレーション及び経験的な証拠で確認されている。従って、気候の温暖化に伴い、雨が降っていないところでは干ばつの、降っているところでは洪水の両方の危険性が増加するが、発生する場所や時刻はそれぞれ異なっている。例えば、ヨーロッパでは 2002 年夏に、広範囲にわたる洪水が起こったが、1 年後の 2003 年には、記録破りの熱波と干ばつに見舞われた。洪水と干ばつの分布とタイミングは、特に熱帯や環太平洋の中緯度の多くの国々で、エルニーニョ現象の周期に最も大きな影響を受ける。

エアロゾルによる汚染が地表面を覆い、直射日光が遮られる地域では、蒸発の減少によって大気への全体的な水分の供給が抑制される。従って、水蒸気量の増加に伴い、より強い降水が起きる可能性が増加するとしても、大気の水蒸気を再び蓄えるのに時間がかかるので、強雨の持続時間と頻度は減少するかもしれない。

降水の特徴の局地的・地域的な変化は、エルニーニョ現象や北大西洋振動（NAO：冬の北大西洋上空の偏西風の強さの指標）によって決まる大気循環のパターンやその他の変動のパターンにかなり依存する。これらの観察された循環の変化の中には、気候変動と関係しているものもある。低気圧の経路の変化に伴って、湿潤化する地方もあれば、しばしば隣接する地域では乾燥化も起き、変化は複雑なパターンを示す。例えば、ヨーロッパ地方では、1990 年代には正の NAO が明瞭だったので、ヨーロッパ北部で湿潤化し、地中海とアフリカの北部では乾燥化した（FAQ 3.2 図 1）。1960 年代後半から 1980 年代後半に明瞭だったサヘルにおける長期間の干ばつ（FAQ 3.2 図 1）は、当時ほど顕著ではないものの、現在も続いており、大気循環の変化を通して、太平洋、インド洋及び大西洋の熱帯の海面水温パターンの変化に関連している。干ばつは、アフリカで広範囲にわたって発生し、熱帯地方と亜熱帯地方でよく起こるようになった。

気温が上昇すると、特に雪シーズンの初めと終わりである秋と春、また気温が 0℃に近い地域で、降水が雪よりもむしろ雨となる可能性が高まる。このような変化は、特に北半球の中・高緯度の多くの場所でみられ、雨は増えたものの、雪塊氷原が減少したため、結果的に、最も必要とされる夏の水資源が減少した。それでも、降水には、分布がまばらで、断続的という性質があり、このため観測された変化のパターンは複雑である。長期的な記録によれば、降水のパターンが年々変動することや、例えばエルニーニョ現象の影響があると、複数年続く干ばつでさえ大雨の年のため中断されることがはっきり分かる。米国南西部では、干ばつと平年よりも少ない降雪量が 6 年間観測された後、2004 /2005 年に湿潤な冬となったことがその例になるかもしれない。

### FAQ3.3： 熱波、干ばつ、洪水そしてハリケーンのような極端現象に変化があったか？

1950 年以來、熱波の発生数は増加し、そして高温の夜の数が広範囲に増加してきた。より温暖な環境になるにつれて、蒸発量が増加してきた一方で、陸上の降水量がわずかに減り、干ばつの影響を受ける地域の範囲も増加した。概して洪水をもたらすような日単位での大雨の数は増加したが、すべての地域で増加したというわけではない。熱帯低気圧やハリケーンの頻度は年ごとに著しく変化するが、1970 年代以降、強度と持続期間ともに著しく増加した形跡がみられる。温帯での低気圧の進路と強度の変動は、北大西洋振動のような大気循環特性の変動を反映している。

世界の中では、さまざまな種類の極端現象の変化の兆候がみついている地域がある。「異常」については一般的に発生頻度の値が 1%、5%そして 10%未満となる場合（一方の極端について）、もしくは 90%、95%、そして 99%を超過した場合（もう一方の極端について）とみなされている。高温の夜もしくは暑い日については気温の 90 パーセンタイルを超過した場合とされている（次に議論）。一方で低温の夜、もしくは寒い日は、10 パーセンタイル以下になったときを指す。大雨については日降水量が 95 パーセンタイル（豪雨は 99 パーセンタイル）のときと定義される。

サンプルとして抽出されている陸域では、最近 50 年で、低温の夜の年発生数は著しく減少、高温の夜の年発生数は著しく増加してきた（FAQ 3.3 図 1）。寒い日の日数の減少と高温の日の日数の増加については、現象の広がり大きい一方で概してあまり顕著ではない。最低、最高気温分布については、世界的な温暖化と一致して、値がより高くなっているだけでなく、最近 50 年の異常高温と比較して、寒い方の極値の方がより昇温している（FAQ 3.3 図 1）。異常高温がより多く発生していることから、熱波の発生数が増加していることがうかがえる。さらに裏付けとなる兆候として、中緯度地域で平均的に温暖化が進むことに伴い、霜の降る日がほとんどなくなったという傾向が観測されている。

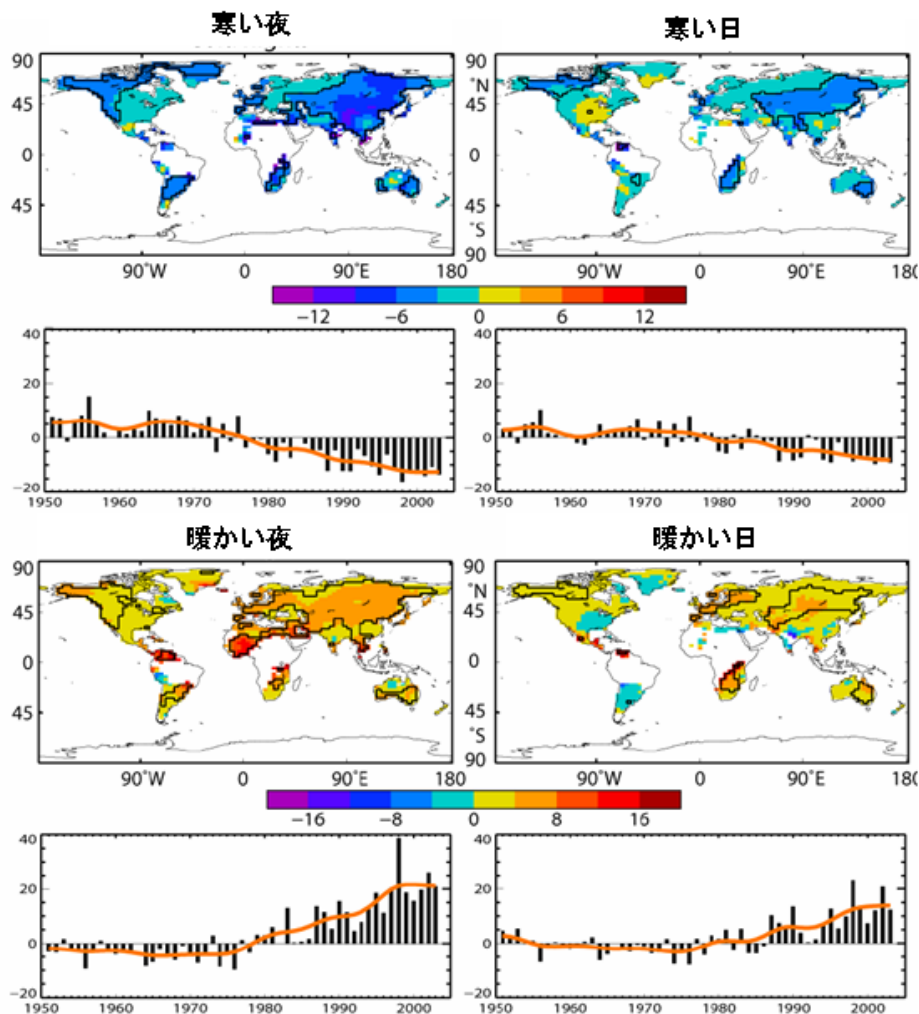
極端な現象の変化を著しく示すものとして、平均降水量が増えていない場所においても、最近 50 年で中緯度帯での大雨頻度が増加したことがある（FAQ 3.2 参照）。豪雨については、同様に増加している傾向にあると報告されているが、調査結果が得られた地域は少ない。

干ばつは、それが長期的な現象のため、比較的検知しやすい。干ばつに関する指数、指標は多くあるが、多くの調査では、月総降水量や平均気温を組み合わせた、Palmer Drought Severity Index（PDSI）と呼ばれる指標を使用している。PDSI は 20 世紀半ばから計算されており、この指標から 1950 年中頃以降多くの北半球の陸域で乾燥傾向が進んでいることが分かる。特に、ユーラシア南部、アフリカ北部、カナダ、アラスカの多くの地域で広く乾燥しており（FAQ 3.2 図 1）、北米東部及び南米東部では逆の傾向が広がっている。南半球の陸域については、1970 年代が湿潤である一方、1960 年代、1990 年代は比較的乾燥していた。そして 1974 年から 1998 年までは乾燥傾向にあった。ヨーロッパでの長期にわたる記録からは、20 世紀全体について重要な傾向はほとんど読み取れない。1950 年代以降陸面で降水が減少していることがこの乾燥傾向の主要な原因となっているようであるが、ここ 20～30 年の地表面気温上昇も寄与しているようである。ある調査によると、エルニーニョ南方振動に伴う陸域での降水の減少や、主として地表面の昇温の結果として乾燥域が増加することにより、地球全体で（PDSI が -3.0 以下の地域と定義される）非常に乾燥した陸域の面積が、1970 年代以降で 2 倍になった。

熱帯低気圧とハリケーンの発生頻度と強度の変化については、大きな自然変動の中にまぎれてしまっている。ENSO は世界中の熱帯低気圧の位置と活動に大きな影響を与えている。世界的にみて、1970 年代中期以降に低気圧の持続期間がより長くなり、またその強度が強まるにつれ、ハリケーンの潜在的な脅威はかなりの上昇傾向にあると評価されている。そして、その指標は熱帯の海面水温と非常に強い相関がある。ほとんどの海盆で低気圧の数や活動日数がわずかに減っているにもかかわらず、1970 年代以降、低気圧の数と割合が世界的に増加したことによって、この関係はさらに強力に裏付けられてきた。具体的には、カテゴリ 4 と 5 のハリケーンの数が増加した。最も増加の大きい地域は北太平洋、インド洋、そして南西太平洋であった。しかしながら、2005 年の記録破りを頂点として、北大西洋のハリケーンの数も、最近 11 年のうち 9 年について平年以上だった。

地表面と対流圏上部でのさまざまな観測から判断すると、20 世紀後半に、北半球冬の低気圧の進路の極方向への移動及び活動度の増加があった可能性が高い。これらの変化は北大西洋振動と関連して起こっている変動の一部である。ジェット気流の極方向への移動と

低気圧活動の強化に伴い、対流圏及び成層圏下部の、12～2月周極偏西大気循環が強まっていることが、1979年から1990年中頃までの観測によって明らかになった。小規模の激しい気象現象（竜巻、雹、雷雨など）に関する観測事実はほとんど局地的かつ散在しており、一般的な結論を引き出すことはできない。また、これらの現象に対する一般の知識が深まり、報告を集める努力も改善されたことで多くの地域でこれらの現象が増加しているようにみえる。



FAQ3.3 図1 1951～2003年に観測された極端な気温の頻度の傾向（10年当たりの日数）。1961～1990年の値を基に、10パーセンタイルを（a）寒い夜、（b）寒い日、90パーセンタイルを（c）暖かい夜、（d）暖かい日とそれぞれ定義する。少なくとも1999年までのデータがあり、データ期間が40年以上存在する格子についてのみ傾向を計算している。黒線は、5%の危険率で有意である地域を囲んでいる。また、それぞれの地図の下に示している図は、地球全体の年平均差（1961～1990年を基準）を年ごとの時系列として表したものの。赤い線は、十年規模の変化を表しており、長期変化傾向は、示された地球全体のすべての項目で5%の危険率で有意である。Alexanderら（2006）より転載。