

DBJ Research Center on Global Warming
Discussion Paper Series No.34 (3/2008)

地球温暖化と異常気象

細田 裕子

本論は、執筆者個人の暫定的な研究（内容、意見については執筆者個人に属するもの）であって、関心ある研究者との議論等のために作成されたものである。

地球温暖化と異常気象

細田裕子

2008年3月

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)により最新の科学的知見が徐々に明らかにされるにつれ、温暖化問題は将来世代のみならず現世代にも非常に差し迫った問題となってきた。

2007年に公表された IPCC 第4次評価報告書では、近年の気候変化における人為的原因が再確認され、今世紀末までに予測される地球の平均気温の上昇量について、6つのシナリオから1.1～6.4℃の予測幅が示された。また新たに気候システムへのエネルギー収支の変動が報告され、すでに異常気象の影響が多く地域で起こり、今後この頻度は増加するとの報告がなされている。

地球温暖化の影響は単に全球平均地表気温、太陽放射量、大気エアロゾル、温室効果ガスの変化だけにとどまらず、気候システム¹の諸過程で蒸発量の増加、海水温の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、風の分布の変化となる。従来の自然変動に人為的な温暖化が重なり、変動は激しくなっており、ハリケーン、集中豪雨、洪水、熱波、干ばつ等の異常気象の頻度や規模の増大が予測されている。そこで本章では、近年の異常気象の状況および地球温暖化の主要な現象に関するさまざまな科学的知見についての主要な現象を整理し、顕在化しつつある地球温暖化の悪影響を考察する上での情報提供を目的とする。

構成は以下の通りである。第2節では、近年大きな被害をもたらした温暖化との関係が懸念された異常気象を紹介し、続いて異常気象の長期的傾向やその背景となる自然変動、さらにその結果である自然災害の状況について解説する。第3節では気象に影響を与えるとともに気候システムの構成要素であり、温暖化により変化しつつある海洋および雪氷の長期変化について触れる。第4節は結語である。

2. 異常気象と自然災害

2.1 近年の異常気象 (2002～05年)

近年、異常気象の出現回数が増加したといわれることがある。異常気象の発生とともに温暖化との関連を指摘する論調も多く見られる。ここではまず、異常気象と温暖化との関係が議論される機会が多くなっていることを踏まえ、大きな被害をもたらしたことで世界的に注目を集めたいくつかの異常気象を取り上げ、その概要を整理する。

洪水 2002年 ヨーロッパ

2002年8月に北海から移動してきた低気圧が、スカンジナビア半島付近で停滞していたブロッキング高気圧²のためにイタリア半島まで南下して、地中海の大量の水蒸気を吸収しながら停滞し、エルベ川やドナウ川の流域で長期にわたり広範囲に降雨をもたらした。降雨

1 気温や降水量などの気候値とその変動に直接影響を及ぼすのは大気であるが、大気や水の循環の変動には海洋・陸面・雪氷の変動が深くかかわり、相互に関連する一つのシステムと捉え「気候システム」と呼ぶ。

2 ブロッキング現象については2.4節を参照。

によりドイツ、チェコスロバキア、オーストリア等の中・東欧では相次ぎ洪水、土砂崩れなどの被害に見舞われ、80人の死者が出たほか、60万人以上に被害を与え、市街地および歴史的建造物の浸水および農業の被害額は約150億ユーロに達した。9月にはフランス南部で集中豪雨があり、ニームでは1日で1年間の降水量に匹敵する雨量が記録された。

熱波 2003年 ヨーロッパ

地球温暖化による異常気象の現れではないかとして大きく報道されたのが、2003年8月にフランスを中心としヨーロッパの各地で猛威をふるった熱波³である。ヨーロッパでは6月以降広い範囲で高温が続いていた。この熱波で最も多くの犠牲者を出したフランスにおいては、8月のパリの平均最高気温は約24.5℃であるが、8月1日から5日まで急激な最高気温の上昇があり、その後15日まで35℃以上を超える日が続き、オルリー空港では40℃を記録している。気温の増加とともに死者も増え、気温のピークとなった12日には2197名の死亡が確認された(図1)。この熱波による熱中症の死者は、世界保健機関によると約2万2000人にのぼると報告されている。また、被害総額は130億ユーロとなり、森林火災による焼失面積はポルトガル(39万ha)、スペイン(12万7千ha)、フランスなどで計64万7千haに及んだ。

この極端な高温がもたらされた要因として、中高緯度偏西風帯のジェット気流が大きく南北に蛇行、分流して高気圧の移動が阻害されるブロッキング現象という大気の流れが確認されている。7月末から亜熱帯高気圧がヨーロッパ南西部で長く停滞し、影響を受けた偏西風の蛇行がちょうどヨーロッパを覆い続け、高温で乾燥した状態が長く持続した(図2)。この異常気象によりヨーロッパでは西暦1500年以降最も暑い夏となり、Schar et al. (2004)は最近の傾向と信頼度を考慮してもこの熱波は9000年に1回の出現可能性であると指摘した。またStott et al. (2004)は、人間活動の影響により熱波の発生リスクが倍増したと結論づけた。

ヨーロッパでは今後高気圧性気候が強まり、乾燥状態の発現頻度が高まって、気温上昇と降水量の減少、乾燥化というフィードバックにより熱波の発生リスクはかなり増加すると予測されている。

ハリケーン・カタリーナ 2004年 南米

南大西洋では2004年3月に観測史上初めてのハリケーンが発生し、ブラジル沖に到達したことが注目を集めた(図3)。このハリケーンはカタリーナと命名され、中心付近の最大風速は43m/sに達している。

熱帯地方の海洋上で発生する熱帯低気圧はその発生場所によって呼び名が異なる。国際的には最大風速が33m/s以上の熱帯低気圧で、北太平洋西部で発生するものをタイフーン、北東太平洋、大西洋で発生するものをハリケーン、インド洋・南太平洋で発生するものをサイクロンと呼ぶ。日本国内では最大風速17m/s以上の熱帯低気圧を台風という。

いずれも熱帯低気圧の構造を持ち、海面からの持続的な水蒸気の供給が可能な海水温27℃以上の熱帯の海洋で発生する。熱帯低気圧は海面からの水蒸気が凝結し雲粒を形成する際に放出される熱エネルギーによりエネルギーを得て増大・成長し、一方で移動の際の海面および地上との摩擦によりエネルギーを消費する。上陸後急激にその勢力が衰えるのはエネルギーとしての水蒸気供給がなくなってしまうからである。主な熱帯低気圧の発生

3 最高気温が35℃を越す日が5日以上連続する現象。

し成長するには、コリオリの力が必要であるため、この力が弱い緯度 5 度以下の赤道直下地域を除いた 5 度から 35 度までの海域において発生する。

通常、南大西洋では海面水温は約 24℃と低く、大気の上空と地上の風速の差が大きいため、ハリケーンが観測されたことはなかったが、カトリーナが発生したときの海域の水温は 26.5℃にまで上昇していたことが確認されている。非常に珍しい熱帯低気圧であるが、今後の極端な気象現象が起きる警告とみなすこともできるであろう。

ハリケーン・カトリーナ 2005 年 北米

2005 年 8 月末にはハリケーン・カトリーナが米国南部に上陸した。高い海水温はハリケーンの発生に必要な潜熱エネルギーの供給源となるが、カトリーナが発生したときのメキシコ湾海表面は平年より約 1~2℃高かったことが確認されている。また海洋上層のかなりの深さまで高温であったため湧昇による水温の低下もなく、カトリーナは強度を増して最大時にはカテゴリー5 となった。大西洋における最も強烈な過去のハリケーンのうち 10 位までに近年のハリケーンが入る⁴。大西洋北部で 2005 年に発生した熱帯暴風雨は観測史上最多の 27 個となり、このうち 14 個がハリケーンとなっている (図 4)。

カトリーナはルイジアナ州に上陸時にはカテゴリー3 となったが、低い気圧を維持したままミシシッピ川河口付近を通過し、ルイジアナ、ミシシッピ、アラバマの 3 州を中心として海拔ゼロメートルのこの地帯に 3~7m の高潮とそれに加わる高波をもたらした。この災害で多くの建物は破壊され、被害は 50 万人に及び、うち死者 1833 名、被害額は 1250 億ドルを上回るという米国史上もっとも大きな経済的損失をもたらすこととなった。ハリケーンの進路となりやすく海拔の低い地域でありながら、水の供給、洪水対策、下水処理システムの改善等の予見的政策対応を怠ったことが大きな被害につながったともいわれている⁵。今後暴風雨の強度が強まると予測される中で、沿岸域の人口および社会基盤は増加傾向にある。顕在化しつつある温暖化の影響に対する適応策はさまざまであるが、増加する沿岸域の災害に真摯に受け止める政策の重要性が各国政府に示されたといえよう。

2.2 異常気象とは

地球の表面温度は、太陽からの短波放射と地球がそれを宇宙に向けて反射する長波放射との差で決定される。低緯度地域では、太陽からの入射が宇宙への放射を上回って暖かくなり、高緯度では逆に宇宙への放射が太陽からの入射を上回って寒くなる。この温度差によって、大気と海洋に循環が生まれ、低緯度から高緯度へと熱が運ばれて気温差の平均化がなされる。このとき海洋は大気に比べ温まりにくく冷えにくいいため、タイムラグを持って熱を輸送する。陸域では、降水と蒸発を繰り返しながら熱は輸送されるが、土壌水分、雪氷・凍土、植生などがタイムラグの要因として、また時に循環を促進・緩和する作用として働く。この循環による長年の時間規模の平均状態が「気候」である。近年、この過去の平均的状态から大きく偏る異常気象の発生が増えているといわれる。

4 2005 年ウィルマ(882hPa)、リタ(897hPa)、カトリーナ(902hPa)、2004 年アイバン(910hPa)。

5 海拔 0m 以下の地帯が国土の 4 分の 1 を占めるオランダでは、1954 年に高潮による大災害を経験し、これを契機に「デルタプラン」が立てられ、予見的政策対応による取組みを続けている。海水の熱膨張による変化、季節、嵐や強風等あらゆる気象変化にも耐えうる設計により、海に面した暴風閉門の堤防は平均海面よりも 16~20m の高さに張り巡らせる一方、水吸収の目的で設けられるエリアは美しい自然を保つ国立公園として、貯水場や多種多様な動植物の保護に役立つ環境への取組みを行ってきた。加えて、今後の避けられない海面上昇に対し河川からの塩害被害に向けた取組みをしている。

異常気象は、平年の天候状態から大きくかけ離れた状態であり、気象機関では「ある場所で30年に1回程度発生する現象⁶⁾」と定義されている。異常気象の基準である30年に1回の出現頻度は、それが統計的に正規分布で表される場合、平均値から標準偏差の1.83倍以上偏った現象が出現する確率に当たり、異常気象として扱われる気象事象としては冷夏、暑夏、寒冬、暖冬、熱波、寒波や長雨、大雪、少雨、などがあげられる。またIPCCでは気象機関の定義を含めたより広範囲な現象を指して「極端な気象現象」(Extreme Weather Event)と呼び、「特定地域における気象現象の確率分布からみて稀な10%以下あるいは90%以上の現象、また一定期間の気象現象発生数の平均で、その平均自体が極端なこと」と定義しており、気象事象としては、気象機関で扱われるもののほかに熱帯低気圧、集中豪雨、干ばつ、竜巻・雹(ひょう)、エルニーニョ現象、その他局地的な激しい事象なども含まれる。

異常気象は大気循環に大きな偏りが生じたときに発生するが、この原因は、大きく外因と内因が考えられる。外因としては太陽活動の変化や火山噴火などがありこれらは異常気象の間接的要因となる。また人間活動によりもたらされる温室効果ガス濃度の増大や森林伐採、エアロゾルの増加なども気候システムに間接的に影響を及ぼし異常気象の一因となる。一方、内因には大気自身の変動や気候システムの相互作用があり異常気象の直接的原因となる。ここで異常気象を引き起こす内因となる自然変動として、代表的なものはエルニーニョ/ラニーニャ現象、インド洋ダイポールモード現象、ブロッキング現象、アジアモンスーン変動、テレコネクション⁷⁾などが知られている。

さて近年の地球温暖化は異常気象の発生頻度にどのような影響を与えるのであろうか。図5は気候変動による平均気温と偏差の変化を表したものであり、平均と偏差の一方のみあるいは両方が、新しい気候で変化した場合の気温とその出現頻度を簡略化して示している。例えば(a)気温が上昇し平均値が高まる時、新しい気候では異常高温の発生は高まり、異常低温の発生は低くなり、(b)気温の偏差が大きくなる場合には異常高温と異常低温の発生はともに増え、さらに(c)平均値と偏差がともに高まる場合には、平均値が高まっただけの場合よりも異常高温の頻度は非常に高まり、異常低温の頻度は平均値が高まる時よりやや増えることになる。このように、平均気温の上昇では熱波が増加して寒波の頻度は減少し、変動幅も増加したときは熱波の頻度は極端に増大する可能性が高くなると考えられる。

2.3 異常気象の長期的変化

過去100年の世界の主要地域における異常気温および異常降雨の変化⁸⁾が、『異常気象レポート』(気象庁、2005)により報告されている(表1)。これによると1960年までには東アジア、シベリア、ヨーロッパ、インド域と南米南部域で異常高温の出現が見られなかったが、1970年代頃からこれらの地域で異常高温の出現数が増加し、特に1990年代以降の異常高温の出現数は顕

6 一般に過去の数十年間に1回程度で発生する現象であり、「過去」の時期や期間の長さについて明確に規定しているものではないが、統計的な取り扱いの必要性和人間の平均的な活動期間を考慮し、期間の長さは30年間としている。

7 地球上の遠く隔たった場所で、地上気圧が互いに連動し変動する現象であり、中高緯度対流圏の大気で2週間から数ヶ月程度の時間スケールで現れる現象のこと。主なものは南方振動、太平洋北米パターン、北大西洋振動、北極振動などがある。

8 異常気象の求め方は次による。1901～2004年の104年間で、この間のすべての月で降水量は90%、気温は80%以上のデータが存在する観測地の各月において平均気温(降水量)の高い方、低い方から1～3位の値(異常値)をそれぞれ異常高温(多雨)・異常低温(少雨)の基準値とする。ある年の異常高温(多雨)・異常低温(少雨)の出現数は、その年に異常値を観測した地点数の年間合計を観測地点数で割り、1地点あたりの出現数としている。ある地点のある月に、月平均気温の高い方・低い方から1～3位の値が出現する割合は、それぞれ104年間に3回、つまりおよそ35年に1回(0.029回/年)となり、異常気象とされる発現頻度にほぼ相当する。(気象庁、2005)。

著である。一方、異常低温の出現数は変動しながらも次第に減少傾向にある。また、1975年以降の30年間に於いてアフリカ以外では、異常高温・異常低温出現数の長期変化傾向が見られ、さらに日較差も年々小さくなっている。

異常多雨、異常少雨傾向は特に南米南部域において見られる。またヨーロッパ域、北米域において異常多雨の出現数に有意な増加傾向が見られ、オーストラリア域では異常少雨の出現数の有意な減少傾向が見られる。

日本では異常高温の出現数は1940年代から増加し始め、1990年以降は過去100年にない頻度で出現数が増加している。異常低温の出現数は近年減少しており、1940年代に一時的に高い頻度の出現が見られたが、1990年以降はさらに低下傾向にある(図6)。この影響として、1994年頃から熱中症患者数が報告され始め、2004年には約1600人の患者が報告されている。また降水量では、20世紀中に年平均降水量がわずかに減少する一方、100mm/日以上、200mm/日以上の大雨の出現数は1901～30年と比較し、それぞれ1.19倍、1.46倍へと増加している(図7)。

2.4 異常気象と自然変動

以下では異常気象の内因となる自然変動のうち、特にエルニーニョ現象、インド洋ダイポールモード現象、ブロッキング現象と、これらの現象によって引き起こされる地域的な異常気象を紹介する。

太平洋の赤道付近では、通常は東から西へと向かう貿易風により、暖水の層は西のインドネシア沖に吹き寄せられて厚くなり、上空では積乱雲が発生し、この地域に豊かな熱帯林を育む一方、東のペルー沖では深層からの冷水の層が厚く栄養豊富な海域が広がる。数年に一度、エルニーニョ現象が発生すると、貿易風が弱まり、西へ吹き寄せられるはずの暖水の位置が6000km程東に移動し、ペルー沖の海域では暖水の層が張り出して、赤道域の日付変更線の辺りで最大3～4℃程の上昇となる。太平洋の暖かい気候が東に移動するため雨域も東に移り、通常多雨のインドネシア、フィリピン、オーストラリア北部が干ばつや森林火災に見舞われ、逆に気温が低すぎて降雨が少ない南米の西側地域が多雨、さらに漁業および海域の生態系への影響が大きくなる。

エルニーニョはその強さや持続性によって異常気象となるだけでなく経済的にも深刻な影響を与えてきた⁹。1982～83年のエルニーニョ現象に起因する世界の被害総額は130億ドルであり、20世紀最大規模といわれた1997～98年の被害は約320億ドルである。逆に、同じ海域で海面水温が平年より低い状態が続く現象はラニーニャ現象といわれ、インドネシア周辺の対流活動は平年より活発になる。日本の南で太平洋高気圧が強まるため、ラニーニャが発生すると日本では猛暑、寒冬など異常気象の原因となる。

エルニーニョ現象によく似たインド洋ダイポールモード現象は1999年に東京大学の山形俊男教授らにより発見された。通常、インド洋の海面水温は東高西低であり、東側のインドネシア域では雨が多いが、数年に一度、南東風が平年より強まり、暖水がインド洋の西側に吹き寄せられ、海面水温は西高東低となる。この東西の海水温が逆転するインド洋ダイポールモード現象が発生すると、東側に位置するインドネシアやオーストラリア西部の大気は乾燥し干ばつなどが発生す

9 1972～73年のエルニーニョ発生ではペルー沖で飼料や肥料として捕獲していたアンチョビーが最悪の不漁となり、飼料業界は代替飼料として大豆の買占めから高騰を招き、わずかな期間で多くの農家がコーヒー豆から大豆の生産への切り替えをしたため、さらに新たな農地開発によりアマゾン熱帯林の伐採が進むこととなった。大豆の収穫面積は1970～2002年の間に12倍に拡大し、大豆生産量は151万トンから4182万トンへ28倍に増加し、米国に次ぐ第2位の生産国となった。

る。また、海水温の高くなる西インド洋沿岸に位置する東アフリカ諸島では盛んな上昇気流が発生するようになり、インドの豪雨、日本や東アジアでの猛暑、東アフリカの洪水などの異常気象をもたらす。

また近年、中高緯度の上空に流れるジェット気流の異常にともなうブロッキング現象の影響により異常気象が発生しやすくなっている。本来偏西風の対流圏界面には風速が最大となるジェット気流があり、その下にある低気圧、高気圧の盛衰を支配している。偏西風は蛇行しながら中高緯度に暖気や冷気を運んでいるが、偏西風が異常に弱まることによって、蛇行がより大きくなり移動性高低気圧の経路がブロックされ切り離される現象がブロッキング現象である。大抵の場合は北に低気圧、南に高気圧となる配置が逆転して、北に高気圧、南に低気圧の配置となる。またこの配置が数日間から10日程度の長周期にわたり持続するため、切離低気圧の下の地上では集中豪雨や洪水などの被害や、切離高気圧の下では晴天が続き熱波や干ばつなどの異常気象の原因となる。2.1節で言及した2002年8月にドイツおよび中東欧地域を中心とした記録的な洪水被害や2003年の欧州熱波は、ブロッキング高気圧の長期間の停滞により被害が拡大したとみられている。

こうした自然変動、特にエルニーニョ現象は過去100年間に比べ1970年代中頃以降、発現頻度、持続期間および強度が増大していることが確認されている。多くの予測モデルでは地球温暖化にともない、エルニーニョ現象によく似た自然変動に特徴的な海面水温、また気圧の類似パターンが生じることが明らかになっている。

2.5 近年の自然災害からみた被害状況について

2.5.1 全世界の被害状況

近年の地域的な降水量や気温の変動の高まりによると見られる干ばつ、洪水、異常気温(熱波・寒波)、森林火災、暴風雨などの自然災害数は増大傾向にある(図8、図10)。全世界の災害発生状況に関する統計データを有するベルギーのルーベン・カトリック大学の災害疫学研究所(CRED)の災害データベース(EM-DAT¹⁰)からまとめた被害件数は、1970年代の67件/年から2000年代には4.7倍の315件/年であり、被害者数では1970年代の5224万人/年から1990年代に1億8528万人/年へ、被害額は1970年代の58億ドル/年から2000年代には508億ドル/年にそれぞれ急増している(図9)。この増加には異常気象自体の増加に加えて、先進国、途上国を問わず人口および資産が沿岸地域に集中していることも影響していると思われる。

2.5.2 自然災害別にみた被害状況

干ばつ(図11)

干ばつはある地域に起こる長期間の水不足の状態であり、自然火災、農作物等の収穫減少、飢饉、疫病、砂漠化などへ発展する災害である。2005年にアメリカ気象学会で発表された論文では、干ばつの被害面積が1970年代に世界の陸地面積の15%から2002年には約30%に拡大したことが報告された。1970年代以降、熱帯・亜熱帯地域でより厳しく長期化した干ばつ

10 1900年以降に世界中で発生した自然災害、人的災害についてデータの蓄積をしている。対象災害としては、死者10人以上、被災者100人以上、国際救援アピールの発生、緊急事態の宣言のいずれかを満たす災害についてのデータを蓄積している。

が観測されており、サヘル地域、地中海、南部アフリカ、および南アジアの一部では深刻な乾燥の傾向が観測されている (IPCC, 2007)。

EM-DAT データによると、1970 年以降干ばつの災害件数はアフリカ 48%、アジア 21% の順で多い。干ばつ被害における死者はアフリカが 99% を占め約 67 万 2000 人となり、被害者はアフリカ 2 億 6 千万人、アジア 14 億 4000 万人に達している。

極乾燥および乾燥地域はアフリカ大陸の 40% を占め、北アフリカ・サヘル全域、「アフリカの角」と呼ばれる大陸東端の半島地域、ナミビアからアンゴラ沿岸地域に広がる南部アフリカの西半分が含まれ、干ばつの災害に最も脆弱な地域である。

サヘルはサハラ砂漠の南縁部に位置する半乾燥地域であり、降水は不安定で 1950 年代～1980 年代中頃に降水の減少傾向は顕著となった。特に 1968 年からの大干ばつでは 100 万人が亡くなり、5000 万人が被害を受ける深刻な事態となった。この長期の干ばつの原因として、当初は人為的な過放牧により高くなったアルベドと植物からの蒸散の減少により降水量の減少がもたらされたと考えられた。しかし近年の気候の再現実験モデルにより、20 世紀後半の長期化した干ばつは世界的規模の温室効果ガスと工業および自動車からの亜硝酸ガス排出で硫酸エアロゾルが大西洋上空の大気循環を変動させた結果、モンスーンが弱体化して干ばつ被害が拡大したことが解析されている。さらに 1981 年からの干ばつによりエチオピアで 30 万人、1985 年にはモザンビークとスーダンで 25 万人が亡くなり、2003 年からアフリカの角地域で雨季に干ばつの自然災害が続いている。

南米アマゾンの熱帯雨林の面積は日本国土の 10 倍以上であり、世界の森林の約 27% 以上を占める。この地では地球の酸素の 20% が供給されるとともに多様な生物の宝庫でもある。この広大な熱帯雨林では 2005 年 10 月には川の水位が 12m も下がり観測史上最悪という干ばつに見舞われている。この地域では、大西洋上で低気圧の発生で雲が作られアマゾン上空に流れ込み、アンデス山脈にぶつかって降雨となる。熱帯雨林に降り注いだ雨は、樹木からの蒸散と地表からの蒸発によって再び降雨となり、豊かで広大な熱帯雨林を育てている。2005 年の大西洋海域では、海水温の上昇により上昇気流が盛んに発生し海上に降雨がおこり、アマゾン上空には乾燥した下降気流のみが流れ込むこととなったことが干ばつの原因と考えられている。

加えてこの地域で 1970 年代以降森林被覆率は年々減少し、2003 年までに全体の 15.8% の 6529 万 ha の森林が消失しており環境破壊は著しい。この減少は、20 世紀後半の有用木の不法伐採、牧場や大豆栽培農地への開墾と森林焼却、南北に及ぶ物資輸送道の整備、東西を横切るアマゾン横断道路、また無許可で作られた林道の開発等によるものである。この地域の熱帯雨林は炭素の大貯蔵庫として高い成長力を持つが、植物を支える土壌の層は薄くそれほど養分を含まず、水分や養分は極めて速い速度で多様な生物により分解され循環している。ひとたび植生を失うと保水力の低下から雨水はそのまま海に流れ、樹木からの蒸散も減少して循環は弱められ、降雨量の低下につながる。熱帯林の損失は、この地に蓄えられていた膨大な炭素が大気への放出と、二酸化炭素の吸収源の喪失と、さらには生物多様性の減少も含み、この影響は例えようもなく大きいといえる。このまま環境破壊が進めば 2050 年までにアマゾンの熱帯雨林の約 40% となる 200 万 km² が消失すると報告されている (Soares-Filho et al., 2006)。

オーストラリアでは、2002 年以降干ばつが続き、2006 年には 1000 年に一度という大干ばつに見舞われている。マレー・ダーリング川流域のニューサウスウェールズ州、クィーンズ

ランド州、ビクトリア州のダムは慢性的な渇水状態となって農作物および家畜飼料も減産となり、飼料を緊急輸入する事態となっている。

また中南部欧州から中央アジアの地域および米国中南部での干ばつは、農業用灌漑のため河川や地下水を使用している地域にとって深刻な問題となる可能性が高いといわれる¹¹。

洪水

1970～2006年の間、アジアでおこる洪水は世界の68%を占めている。1990年代におこった中国、インド、バングラデシュの洪水被害はきわめて深刻であり、とりわけ中国では南部長江流域の洪水が増えている。また1998年の20世紀最大のエルニーニョ現象時に、中国の被害者は約2.4億人に上り、被害額はGDPの約2.4%(308億ドル)となった。この大きな被害は1998年までに長江上流域の原生林の85%が伐採されたことが一因とされる。

多くの洪水被害のあった1990年代は10年間で10億人以上に被害が及び、被害額も926億ドルに達している。洪水災害は暴風雨や熱帯低気圧、モンスーン、融雪、エルニーニョ現象といった事象により起こるが、中国ではもともと降水量が一定しておらず、季節および年による変動が大きい。多くの山に森林が無く森林の保水作用が機能していない¹²ことと近年の異常気象の変動が大規模な水害と干ばつの発生に影響していると考えられる。

アフリカではサバンナ気候の地域で乾季に干ばつ、雨季には洪水の被害が激しくなっている。1970年代には147人/年であった洪水災害による死者は2000年代には896人/年と6倍に増えており、被害者も1970年代の約46万人/年から、2000年代に約209万人/年と4.5倍に増えている。特に2000年以降、アフリカの角(エチオピア、ソマリア、エリトリア、ジブチ)やケニアで乾季と雨季の降水パターンの変化による被害が観測されている。世界の14%の人口を抱え、世界で最も高い人口増加率(2.1%, 2005年)のアフリカは深刻な貧困問題を抱え、災害に対して極めて脆弱である。さらに降水量や温度の変化は、感染症や病原菌の媒体となる蚊の分布域を拡大させ、洪水後の感染症のマラリア、デング熱、黄熱病、西ナイル脳炎などの患者数増加に影響を与えている。

熱波・寒波

平均気温の上昇および変動幅の増大によって、これまでに経験したことのないような熱波の頻度は増えて行くことが予測されている。

インドは1980年頃から異常高温の出現頻度が高いが(表1)、1998年以降は毎年4～6月にかけて熱波被害に見舞われ、2006年までに約7330人の死者が報告されている。欧州では熱波・寒波の災害の増加が見られる。2003年の熱波により約2.2万人の死者が出たほか、この昇温でアルプスでは氷河は記録的な融解となり、中でもスイスのブルネック氷河はこの年156.9mの後退が観測された。2006年にもオランダ、ベルギーで計2000人に及ぶ死者が報告

11 中央アジアに位置しカザフスタンとウズベキスタンにまたがるアラル海はかつて琵琶湖の約100倍の面積をもつ世界で4番目に大きな湖であった。豊富な水を乾燥地帯の周辺地域に与えていたが、灌漑農業の大量取水による塩害で流域の土地の劣化が著しくなった。現在、湖の面積はかつての半分である。中国の黄河では川の上流からの流れが海まで届かない断流が1972年から断続的に起こり、1986年以降は毎年断流により特に下流域の農家で大きな被害となっている。米国の巨大な穀倉地帯で灌漑農業を支えるオガララ帯水層は、北はサウスダコタ州から南はテキサス州に存在し、総面積は45万km²、米国農耕地の20%を占める帯水層である。氷河期に長い間かけて蓄えられた「化石帯水層」のため、枯渇はこの地域のみならずの農業生産の終末を意味することになる。この半世紀で水位は平均約30m低下し特に南部乾燥地帯のテキサス州の低下が著しい。

12 中国では蒔炭材の供給や食糧増産の目的のための過剰な森林伐採と急傾斜地の農地転換により、1949年の建国当時の森林被覆率は8.6%まで減少した。その後の自然災害や生活環境悪化が顕著になる中で全国的な林業重点生態系保全事業を推進し2005年には18.2%(1.7億ha)と数値的にかなりの回復をしている。しかし、植林分布は不均衡であり、土地の砂漠化、土壌流失、湿地の退化、生物多様性の減少の問題を解決するには至っておらず、いまだ深刻な事態が続いている。世界の森林被覆率は平均29.6%、日本は64%。

されている。一方、寒波の被害として2003～04年に南米ペルーでは約400万人に被害が及んでいる。

暴風雨

暴風雨の発生数、死者、被害者数はアジアが多く、洪水とともに被害が大きい¹³。アジアの中でも熱帯低気圧の通過する地域となる中国、フィリピン、バングラデシュ、日本の被害が多く、1970年以降の被害総額ではアメリカが約3300億ドル、中国約380億ドルに次いで、日本は約340億ドルとなっている。

日本で観測史上2番目に高温を記録した2004年には、上陸台風は10個を記録し、過去30年の平均2.6個をはるかに上回った。台風の発生数は平均並みであったが、熱帯域の活発な対流活動により北緯20度付近の太平洋で高気圧の大きな張り出しができ、日本に上陸しやすい位置にあったことと、強い勢力が維持されたまま上陸できるための海水温からの十分なエネルギーが供給され続けたことも原因の一つと考えられる。この年の日本の被害額は暴風雨116億ドル、洪水136億ドルである。

暴風雨による人的被害および被害額の拡大については、世界的な沿岸人口の増加および都市化の影響も考えられる。しかし熱帯低気圧に関しては、最近30年間で海水温の昇温とともに全球のカテゴリー4以上のものが増加傾向にあることが指摘されている(Webster et al., 2005)。広範なモデル予測によれば、熱帯域の海面水温の上昇にともない、将来の熱帯低気圧の強度は強まり、発生数についてもこれまで予測されていた発生数の減少の信頼性は低いとされている。

3. 海洋と雪氷の長期変化と影響

前節で取り上げた異常気象の頻度の増加は、短期的かつ地域的な被害をもたらすことが懸念されている。

地球表面の7割を占める海洋は、熱的慣性により将来の気候システムに長期にわたって影響を与え、異常気象、気候変動の一因となる一方で、海面水位の上昇を引き起こすことが分かっている。以下では人間生活のみならず、自然の生態系に大きな影響を及ぼす海洋と雪氷の長期変化とこの影響について整理する。

3.1 海洋の長期変化

地球の貯熱量の増加は短期的に海洋温度の上昇に認められる。海水温は短期間では大気からの影響を強く受け、長期的には大気の流れに影響を与える。このため気候変動の大きな要素の一つであるといえる。

海洋の昇温は海水を膨張させ、海面水位を上昇させることに寄与する。また氷床や氷河など陸上に存在する氷の融解または蓄積にともなう海水の質量増減、ほかに永久凍土の融解、湖水・地下水などの陸水の変動、海底の土砂堆積等の影響により、海面水位は20世紀中に約17cm上昇している(図12)。海面水位の観測には従来検潮儀(潮位の観測器)が使用され、観測地点も北半球に偏るという問題があったが、1993年以降は人工衛星からの海面高度測量が可能となり、

¹³ ここで使用しているデータの windstorm は、熱帯低気圧(サイクロン、ハリケーン、タイフーン)のほかに暴風雨、竜巻、大雪を含む。

全球規模の海面水位変動に関する信頼の高い観測が可能である。この衛星からの高度測量で行われた全球の海面水位の見積もりが表2である。1961～2003年は年平均1.8 (1.3～2.3) mmの割合で上昇し、特に近年1993～2003年は年3.1 (2.4～3.8) mmと上昇率が大きく¹⁴、熱膨張と、グリーンランド、南極氷床の融解からの寄与が著しい。グリーンランドおよび南極では2003年以降に急激な氷床の融解があったが、これはIPCC第4次評価報告書の21世紀末までの海面水位上昇予測に入っていないため、21世紀末の全シナリオの予測幅18～59cmは不確実性が大きいといえる。

地球表面の7割を占める海洋の水深3000mでは、全球的な昇温が認められ、気候システムに加えられた熱の80%以上が海洋に吸収されている。Levitus et. al (2005) によれば、1955～98年の期間に海洋では 14.5×10^{22} Jの熱が貯えられ、温暖化の影響により海水温は平均0.037℃上昇したと観測されている¹⁵。海水温の変化は熱的慣性のために数十年程度遅れるが、さらに海面上昇にいたってはさらに時間スケールのずれでおこることが予想されるため、海面水位の上昇はすぐに止まらないといわれる。

3.2 海氷・氷床の融解

次に気候変動の影響が敏感に観測される海氷および氷床の融解について見てみる。図13によると、世界全体の海氷域面積は傾向的に減少している。とりわけ北極での面積縮小が顕著である。南極はほぼ横ばいのようにも見えるが、一部では大きな棚氷の崩壊なども確認されている。ここでは両極地域の海氷・氷床等の融解の状況について見てみる。

北極域

北極域はグリーンランド大陸を含む、北緯66.5度以北の太陽光の届きにくい寒冷の地である。北極海に浮かぶ海氷の面積は9月半ば（夏の高温時）に最小となり、2月末に降雪により最大となる。近年、北極域における海氷面積の縮小は特に顕著であるが、図14のように2007年9月中旬には、これまで観測史上最小の海氷面積であった2005年9月からさらに融解が進み413万Km²となった。

北極では世界の他の地域の2倍の速さで温暖化が進行しており¹⁶、この30年間で北極では平均気温の上昇幅が約1℃である。2006年に米国立大気研究センター(NCAR)は、2005年までのデータから、夏の北極海氷の消滅は、これまでの2070年の予測を大幅に早め、2040年になると予測している。

海面水位上昇に直接寄与するのは氷床・氷冠の融解であり、海氷融解が直接寄与することはない。しかし海氷域や陸上の雪氷域は、太陽放射の約80%を反射するが、海氷域・雪氷域が縮小する夏季には太陽エネルギーの吸収率は数倍となり温暖化が増幅されさらなる縮小が起こる。

また北極海氷は大陸に囲まれ、大陸からの川の淡水を得て季節や極渦¹⁷の影響を受けながら

14 1993年からの著しい海面水位上昇率については、海洋の10年規模の変動によるものなのか、温暖化のより長期的な上昇傾向の加速なのかは不明である。

15 海洋の熱容量は大気の1000倍であり、この熱で大気が暖められるとすると全球の37℃の気温上昇のエネルギーに相当する。

16 全球的な温度の上昇は地球全体の温度を一律に上昇させるわけではなく、著しい温暖化がおきると予測されるのは北半球の高緯度域である。

17 北極の海氷の増減には数年からそれ以上の周期で変動する北極の周囲を北極上空1万m付近で反時計回りに巡る西風の強さの変化(北極振動)が影響することが知られており、この西風を極渦という。極渦が強まると海氷は減少する傾向がある。

変動している。海氷は海洋表面を覆って大気への熱輸送を遮断するが、逆に海水が融解すると、海からの大量の熱が気候変動にフィードバックすることが考えられる。

グリーンランド大陸の大部分は北極圏に位置し、全島の80%が大陸を覆う氷床と雪からなる。氷床の面積は250万km²で地球上にある氷床の10%を占める。グリーンランドのイルリサット氷河（中部西岸）は過去10年で15km以上後退し、1972年まで安定していたヘルヘイム氷河は、2001年以降に4.5km後退して、ノルウェー湾に淡水が流入している。グリーンランド氷床は過去5年で3倍の速さの融解となり、2002年4月～2005年11月の衛星による観測で年間約240km³が消失し、年間0.54mmの海面上昇に寄与している¹⁸ことが明らかになった。グリーンランドの氷がすべて融解すると約7mの海面水位上昇に寄与するといわれる。

北極海域は、約1500年をかけて地球を一周する大規模な熱塩循環のスタート地点ともなっている。北極海域では高塩分と低温によって高密度化した海水が深層水として循環し、その流量はアマゾン川の約100倍といわれる。この循環現象により低緯度の熱は高緯度に輸送され、世界の気候に大きく寄与しているのである。2005年に米ウッズホール海洋学研究所は、1960年代以降北大西洋の広い範囲で大量の淡水が流れ込み、海水の塩分濃度が低下する一方、赤道付近の塩分濃度が高まっていると発表しており、この北大西洋での塩分濃度の低下が、古気候で確認されているヤンガードライアス期¹⁹のような急激で不可逆的な気候変化へと転じる可能性も示唆される。

南極

南極大陸には地球に存在する氷床の約9割が存在する。1400万km²の面積の98%は1年を通じて氷床という厚い氷体に覆われている。また氷の厚みは平均2.5kmに達しており、氷流は氷床のところどころに切れ込むようにして発達している。ロス湖とウェッデル海を結んだ線の東側に東南極大陸、西側には西南極大陸が存在し、西南極大陸にから北に延びるように南極半島がある。東南極大陸では基盤地形の大部分が海面上にあるため融解に対し安定的である一方、西南極大陸はほとんどの基盤地形が海面下にあるため不安定となっている。棚氷は氷床下に基盤が無く、海水の上に氷が棚のようにになっている部分である。融解が懸念される西南極大陸には世界の海面を約7m上昇させるだけの氷が存在する。

相対的に温暖な最北部に位置する南極半島では、1945年以降50年間で年間平均気温は2.5℃上昇し、気温上昇に反応するように、南極海に浮かぶ海氷は約20%減少し、棚氷は北から順に崩壊が進んだ。ラルセン棚氷は1995年にラルセンAが崩壊した。さらに2002年にはラルセンB（図15）が崩壊し、同年ラルセンCにも亀裂が入り始め、棚氷は以前の面積の半分以上を失っている。棚氷は氷流に対し栓となっていたと考えられており、棚氷の崩壊以降に付近の氷河は速度を上げ、最大8倍の速さで流れ始めている。

2004年には西南極大陸西側のアムンゼン海に流れ込む6つの氷河がこの15年間で流速を上げ、その中でも最も速いパインアイランド氷河は一日約5.5mの速さで流れ、その沿岸近辺の氷河の薄化率は1990年代以来2倍になっている（Thomas et al., 2004）。南極氷床からの氷山の発生が増加しており、2000年以降ロス棚氷から世界最大級の氷山（1.1万km²）の分離が確認されている。

18 テキサス大学のJ. L. Chenらの研究（Chen et al., 2006）による。

19 1万1000年程前に最終氷期が終わり、温暖化が始まった状態から数十年という短期間で気温が6℃ほど寒冷化した現象。温暖化が始まり北米にあったローレンタイド氷床が融解して、カナダ北東に巨大なアガシー湖ができたが、更なる温暖化でアガシー湖の決壊により大量の淡水が北大西洋に流入し海洋の大循環が止まった。温かいメキシコ湾流が北上せず、欧州では氷期に逆戻りし、世界的に影響が及んだとされる。

2006年3月のコロラド大学の研究において、2002～05年の南極大陸西部の氷床が152±80km³/年の速度で融解したことが報告されているが、2006年5月にはNASAによる衛星観測で、1999～2005年までに南極西部内陸高地で地球温暖化の影響と見られる過去最大規模の融雪（カリフォルニア州に匹敵する約41万km²）が確認されている。南極では温暖化により、海からの水蒸気量が増えて降雪量が増加し、氷床の拡大が予測されていたが、2005年の衛星観測からの研究では、東南極の氷床の増加より、西南極の氷床の消失のペースが上回っていることも明らかとなっている。

3.3 山岳氷河の後退

20世紀に入り世界各地の山岳氷河も縮小あるいは減少傾向にある。山岳氷河に代表される陸氷の融解は長期的な海面上昇に寄与している。

山岳氷河の動態は気候変動の鏡であり、忠実かつ敏感な反応を我々は目にすることができる。地球の平均気温は1910年ごろの寒冷化の後1945年ごろまで急激な温暖化傾向にあった。主にヨーロッパの氷河では1910年まで前進し、その後1945年頃までに後退が観測され、さらに1975年まで若干寒冷化した時期には地域的な差があるものの氷河の前進が観察されている。NASAによるとアンデス、ヒマラヤ、アルプス、ピレネーでは20世紀最後の10年間に大幅な氷河の縮小が報告されている。またヨーロッパ地域でも、アルプスなど南部で見られる融解に対して、スカンジナビア半島以北においては、冬季における夏季の融氷量を上回る降雪により前進がみられる(図16)。

以下では各地域の山岳氷河の変化と現状を整理してみる。

ヨーロッパ：スイスのローヌ氷河はこの150年の間に約2.5km後退した。スイスのユングフラウなどから流れているアルプス最大の氷河であるスイスのアレッチ氷河は後退し続け、1870～2006年の間に約2.8km後退している。1850年に1800km²あったスイス全土の氷河面積は42%減少して2000年には1050km²となってしまった。1973年頃から後退が進み1985年以降の後退のスピードはさらに進んでいる。温暖化の進行にともない、アルプス氷河は今世紀末には現在の5%程度となり、ほぼ消滅すると見られている。

南米：チリとアルゼンチンにまたがる南米の南端にあるパタゴニア氷原から流れる氷河は、世界でも5指に入る大氷河域である。1945年以降パタゴニア氷原からの融解は、海面上昇に年約0.038mm寄与していたが、最近では約0.1mmに加速している。IPCC第4次評価報告書によると1993年以降の山岳氷河に起因する海面水位上昇率の約13%に寄与している。

アジア：南極、グリーンランドに次いで世界第3位の淡水貯蔵量をもつヒマラヤの巨大な氷雪塊は後退している。中央アジアの小型氷河であるヒマラヤ・シャロンのAX010氷河は、1978～91年には4.5m/年、1991～99年には13m/年と大きく後退し、1990年代に入り縮小ペースが速くなり(写真1)、多くの小氷河の消失、氷河末端には新しい氷河湖の出現、現存氷河湖の拡大という現象が見られる。

山岳氷河は、水を凍った固体で蓄えた天然のダムである。ヒマラヤの氷河はアジアの大河（ガンジス川、インダス川、メコン川、ブラマプトラ川、サルウィン川、長江、黄河）に注ぎ、氷河を水源とする下流の地域に住む数十億の人々の水需要を満たしており、ヒマラヤ氷河の縮小は水力発電、灌漑、飲料水の供給にまで深刻な影響を与えることになる。

一方でネパール東部、エベレストの南に位置するヒマラヤ・イムジャ氷河では、1960年ごろから融けた水がたまり始め、1995年8月に決壊が起こっている。気温上昇により氷河湖は氷河

の前縁が運んだ土砂が水路をせき止め湖ができるが、大量の水が増し堤防が決壊するという氷河湖決壊洪水が生じはじめ、1990年代には頻繁に起きようになっている。現在ネパールとブータンでは40以上の氷河湖があり、下流域には数万人が生活している。

アフリカ：キリマンジャロはタンザニアに北部にある標高5895mの山であるが、山頂には赤道付近にもかかわらず巨大な氷河が存在する。オハイオ州立大学のロニー・トンプソン教授によれば1912年以降、キリマンジャロの氷冠全体の80%以上が失われ、氷河等の面積は約12km²から約2km²となった。1989年以降の消失が著しく、2000年までに氷塊の33%が消失したことが明らかにされている。最新の研究では、2020年頃までには完全に消失すると予測された(写真2)。

北米：アラスカのグレイシャーベイ国立公園にあるミュアー氷河は1941年以降12km後退し、800m上薄くなっている。かつての氷河は解けて海水と混ざり合い、氷河の先端ははるかかなたに退き、風景は一変している。山には木々が生え、かつての氷河の跡が正面の岩肌に見られる。アラスカの海拔1500m以下の高さにある2000以上の氷河では、その99%が後退している(写真3)。

3.4 海面水位上昇の影響

近年の地球の貯熱量の増加による海水の熱膨張及び氷河等の融解を起因として海面上昇の影響は、特に海拔の低い赤道近くの島々で大きくなることが予測される。平均海拔約2mのツバルは、天然資源を有せず自給自足農業及び漁業に依存しているが、近年の水位の高まりで地中から海水が湧き出し、影響は海岸線の侵食、地下水の塩化、自給の食糧生産にも及んでいる。1993年以降2006年までに5.8mm/年の海面上昇傾向にあり、これまで75.4mmの上昇が報告されている。1993年以降の世界平均海面上昇率を上回る上昇には、短期的なエルニーニョなどの海洋変動性の影響が強いと見られるため、現時点ではこの海面上昇が温暖化の影響と断定できず、より長期的な観測が必要である。1990年以降には非常に強烈なサイクロンや暴風雨と高潮の被害に見舞われるようになり、隣国のオーストラリアとニュージーランドに救済を求め、2002年以降ニュージーランドでは年間75人のツバル国民の移民受入れを開始した。しかし移住の申請には、年齢、英語の能力やニュージーランドでの収入面などの条件が付され、かつ年間75人しか受け入れないなどの問題のほか、移住できても民族の生活や文化の問題等を抱えている。

日本の半分程の国土面積に1.4億人の人口を抱えるバングラデシュでは、ヒマラヤ山脈に水源を持つ河口デルタ地帯に人口が集中している。モンスーンのほか、ほぼ毎年のように起こる洪水やサイクロンにより、土壌劣化、浸食等の影響が深刻である。2004年7月にはヒマラヤの雪解け水と絶え間なく続く降雨による洪水で約3600万人の被害者とGDPの12.5%に相当する70億ドルの被害が生じた。これは、近年ヒマラヤ上流で自然のダムとして機能していた豊かな森林の伐採が進み、保水力の低下を招いたことが大きな一因であるといわれる。今後の予測においても、1mの海面上昇で国土の17.5%が失われ、少なくとも1300万人が浸水被害を受け、水田の半分が水没するといわれている。

さらにアジア・太平洋地域では、潮汐や高潮の水位以下の面積が61.1万km²あり、ここに住む人口は2.7億人に及ぶ。今後予想される海面水位上昇によって大きな影響を受ける地域は、ベトナムのメコン川デルタ地域、ニューギニア島南部の河口デルタ地域、また中国沿岸域の長江河口付近などである。またインド、インドネシア、パキスタン、エジプト等の河口デルタ地帯や湿地を抱える地域も同様の問題を抱えている。また、日本では海に面する市町村に人口の約半分が集中しており、沿岸部に近い都市部地域では海面水位上昇で地下水の上昇がもたらされると、インフラへの影響も懸念される。最近の研究では30cm、65cm、1mの海面上昇によって、

それぞれ現存する砂浜の 56.6%, 81.7%, 90.3%が消失し、また 1m の海面上昇により平均満潮時に海拔ゼロメートルとなる地帯は現在の 861km² から 2339km² へ約 2.7 倍となり、そこに居住する人口は 200 万人から 410 万人へ、水没する資産は 54 兆円から 109 兆円に被害が拡大すると予測されている。この影響からの適応策として、海面上昇と津波高潮からの防護壁等改築費用は 12 兆円が推計されている。

4. おわりに

IPCCが最初にレポートを出した1990年の時点から比較すると、温暖化問題の深刻さは程度を増し危機感は深まり広がっている。災害被害は先進国、途上国を問わず各地域で増加し、異常気象の発生状況は近年明らかに発生頻度や強度が変化している。対策を講じなければ人間活動や社会への甚大な被害となることは明らかになってきており、地球温暖化の進行を食い止めるため温室効果ガスの大幅で迅速な排出削減と、本格的な異常気象への適応策が進められるべきだろう。

欧州では地球温暖化による甚大な被害の可能性を回避すべく長期目標として工業化前と比較した気温上昇を2℃以内、温室効果ガス濃度を450～550ppmに安定化するために、低炭素社会への実現に向け果敢な温暖化対策が始まっている。残念ながら日本では、いまだに温室効果ガス排出削減の中長期目標を設定していないが、英国では長期的には1997年比で2050年60%、ドイツは2050年までに1990年比80%、フランスも2050年までに2000年レベルから約75%の削減目標を掲げ、とりわけ英国では経済や企業の体質を地球温暖化時代に耐え得る政策により、2001年「気候変動税」、2002年には国内での「排出権取引制度」の導入など具体的な対策を講じている。また2006年10月に発表された「スターン・レビュー—気候変動と経済」では、気候変動という長期に及ぶ問題に対し本格的で大規模な温暖化抑制政策は、高い経済的合理性をもつことが示されており、気候変動による被害額はそのまま対策をとらなければ世界のGDPの5～20%以上に相当する一方、現在対策を講じて温室効果ガス濃度を500～550ppmの範囲に抑える行動にかかるコストは世界のGDPの約1%で済むと報告されている。

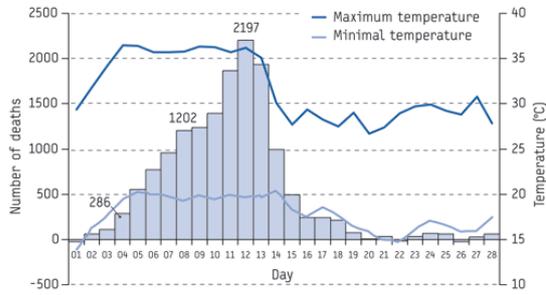
将来の豊かな地球を残すために、いまわれわれがどのように対処してゆくのが真に問われているのである。

参考文献

- 宇沢弘文(1995), 『地球温暖化の経済学』岩波書店。
- 宇沢弘文・国則守生編(1993), 『地球温暖化の経済分析』東京大学出版会。
- 環境省(1997), 『環境白書 平成9年版』, 大蔵省印刷局。
- 気象庁(2005), 『異常気象レポート2005』, 気象業務支援センター。
- 気象庁(2006), 『気候変動監視レポート2005』。
- 鬼頭昭雄(2005), 「温暖化で大雨は増えるのか」『科学』, 75, pp. 1155-1158。
- 倉賀野連(2005), 「TOPEX高度計データと検潮データから得られる全球海面水位変動」『測候時報』, 71, S101-S107。
- 田中正之(1989), 『温暖化する地球』読売新聞社。
- WWFネパール・プログラム報告(2005), 『氷河の全貌—ネパール・インド・中国におけるヒマ

- ラヤの氷河後退と忍び寄る水の脅威』
- 2002年ヨーロッパ水害調査団 (2002), 『2002年ヨーロッパ水害調査－報告書－』, 河川環境管理財団.
- 三村信夫・原沢英夫編 (2004), 『海面上昇データブック2000』 国立環境研究所地球環境研究センター.
- 山崎孝治 (2007), 「地球温暖化にともなう大気・海洋の応答と役割」 北海道大学大学院環境科学院編『地球温暖化の科学』 北海道大学出版会, pp. 79-99.
- Chen, J. L., C. R. Wilson and B. D. Tapley (2006), “Satellite Gravity Measurements Confirm Accelerated Melting of Greenland Ice Sheet,” *Science*, Vol. 313, No. 5795, pp. 1958-1960.
- IPCC (2001a), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, IPCC Third Assessment Report.
- IPCC (2001b), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, IPCC Third Assessment Report.
- IPCC (2002), *Climate Change and Biodiversity*, IPCC Technical Paper V.
- IPCC (2007), “Summary for Policy Makers: The Physical Science Basis; Impacts, Adaptation and Vulnerability; Mitigation of Climate Change,” *Climate Change 2007*, IPCC Fourth Assessment Report.
- Levitus, S., J. Antonov and T. Boyer (2005), “Warming of the world ocean, 1955-2003,” *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Schar, C., P. L. Vidale, D. Luthi, C. Frei, C. Haberli, M. A. Liniger and C. Appenzeller (2004), “The Role of Increasing Temperature Variability in European Summer Heatwaves,” *Nature*, Vol. 427, pp. 332-336.
- Schneider, S. H. (1989), *Global Warming: Are We Entering the Greenhouse Century?* Sierra Club Books.
(内藤正明・福岡克也訳 (1990) 『地球温暖化の時代－気候変化の予測と対策－』 ダイアモンド社.)
- Soares-Filho, B. S., D. C. Nepstad, L. M. Curran, G. C. Cerqueira, R. A. Garcia, C. A. Ramos, E. Voll, A. McDonald, P. Lefebvre and P. Schlesinger (2006), “Modelling Conservation in the Amazon Basin,” *Nature*, Vol. 440, pp. 520-523.
- Stott, P. A., D. A. Stone and M. R. Allen (2004), “Human Contribution to the European Heatwave of 2003,” *Nature*, Vol. 432, pp. 610-614.
- Thomas, R., E. Rignot, G. Casassa, P. Kanagaratnam, C. Acuña, T. Akins, H. Brecher, E. Frederick, P. Gogineni, W. Krabill, S. Manizade, H. Ramamoorthy, A. Rivera, R. Russell, J. Sonntag, R. Swift, J. Yungel, and J. Zwally (2004), “Accelerated Sea-Level Rise from West Antarctica,” *Science*, Vol. 306, No. 5694, pp. 255-258.
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, and H.-R. Chang (2005), “Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment,” *Science*, Vol. 309, No. 5742, pp. 1844-1846.

図1：2003年8月のフランスにおける気温と死者数



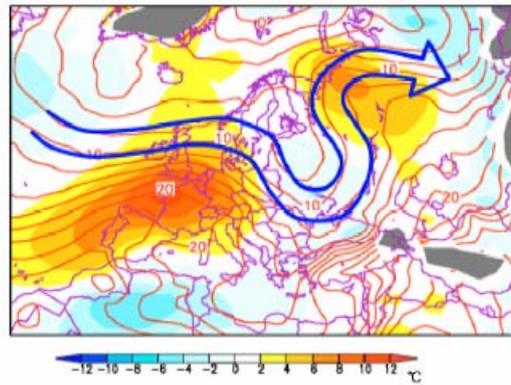
2003年欧州の熱波による死者数
(熱中症および過剰死亡による)

	世界保健機関 (推計、2004)	EPI(Earth Policy Institute 推計、2003)
フランス	14,802	14,802
ドイツ	—	7,000
スペイン	59*	4,230
イタリア	3,134	4,175
ポルトガル	2,106	1,316
英国・ウェールズ	2,045	2,045
オランダ	—	1,400
ベルギー	—	150
総計	22,146	35,118

*WHOによると6000人以上の過剰死亡がスペインの熱波時に非公式に報告されているが、59人だけが熱波が原因であると認められた。(世界災害報告2004)

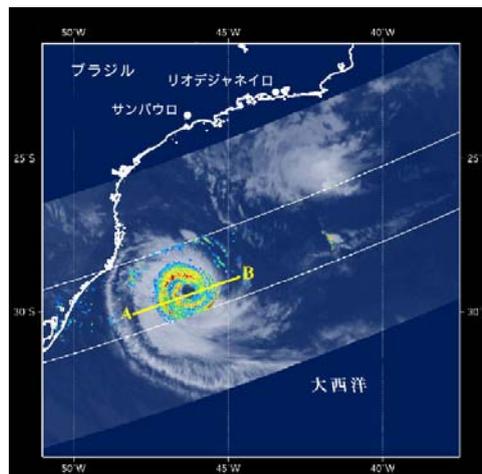
出所：<http://www.eurosurveillance.org/em/v10n07/1007-224.asp>より転載.

図2：気圧配置（偏西風の蛇行とブロッキング現象）



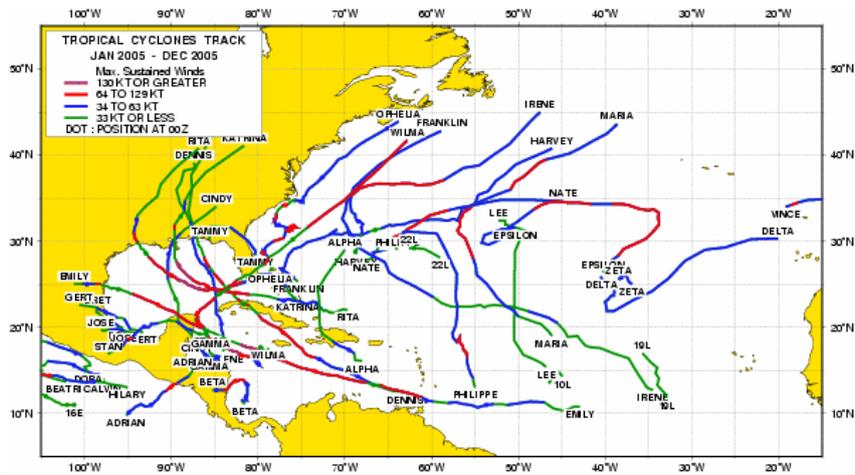
出所：気象庁（2005）.

図3：南大西洋で発生したハリケーン



出所：地球観測研究センター・ホームページより転載
(<http://www.eorc.nasda.go.jp/imgdata/topics/2004/tp040423.html>).

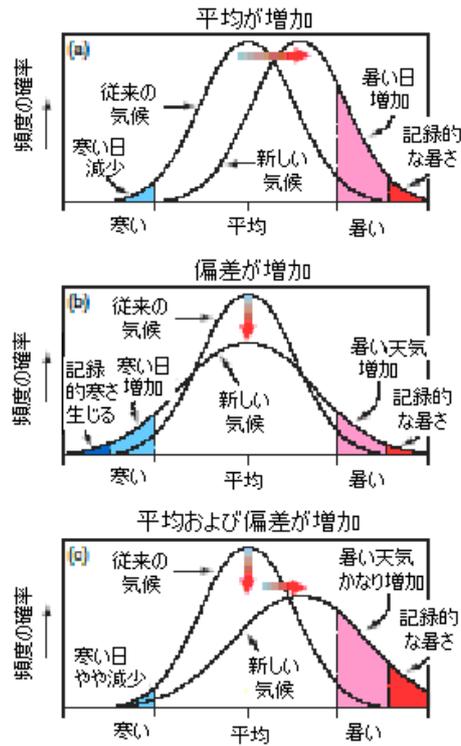
図 4：北大西洋におけるハリケーンの経路（2005 年）



出所：JAXA/EORC台風データベースより転載

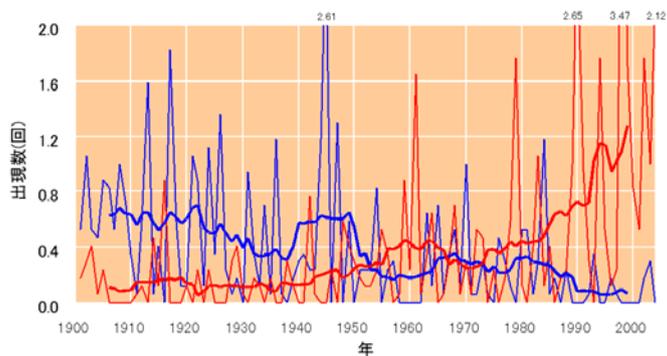
(http://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/typ_db/typ_track.cgi?lang=j&area=AT) .

図 5：気候変動時の平均気温と偏差の変化



出所：IPCC (2001b).

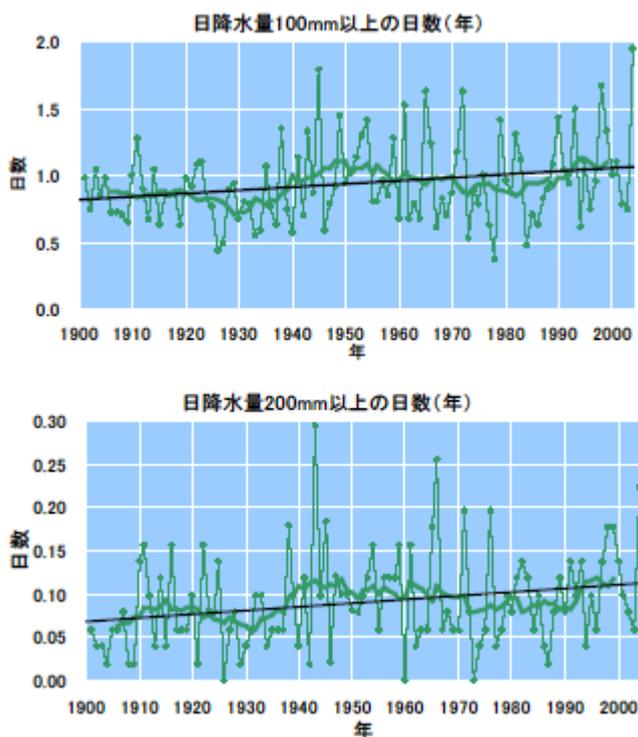
図 6: 月平均気温の異常高温・低温出現数の経年変化 (日本)



注) 異常高温・異常低温の出現回数の求め方は, 脚注 15 を参照.

出所: 気象庁 (2005) .

図 7: 日降水量 100mm 以上, 200mm 以上の日数の経年変化 (日本)



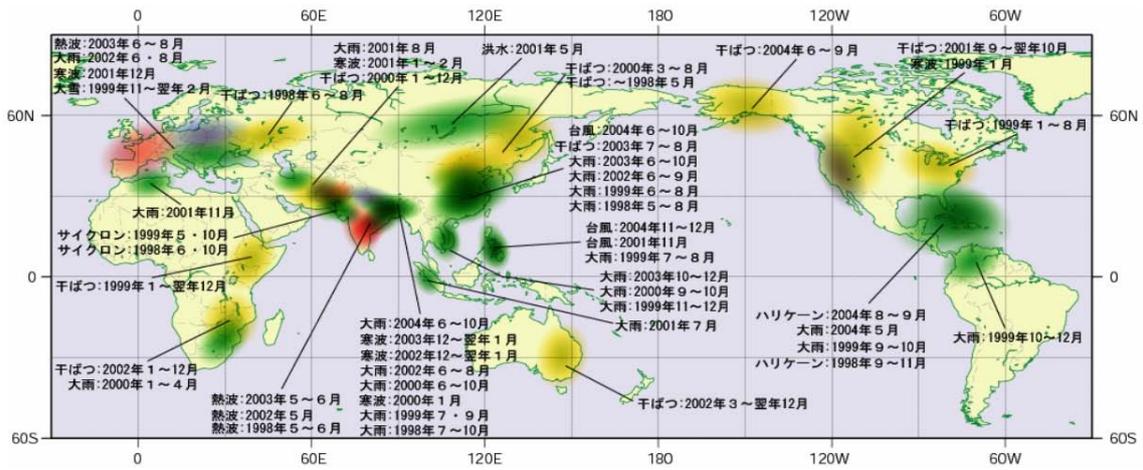
注) 1 地点あたりの年間日数.

年々の値 (細線) と 11 年移動平均値 (太線) を示す.

直線 (黒) は長期変化傾向.

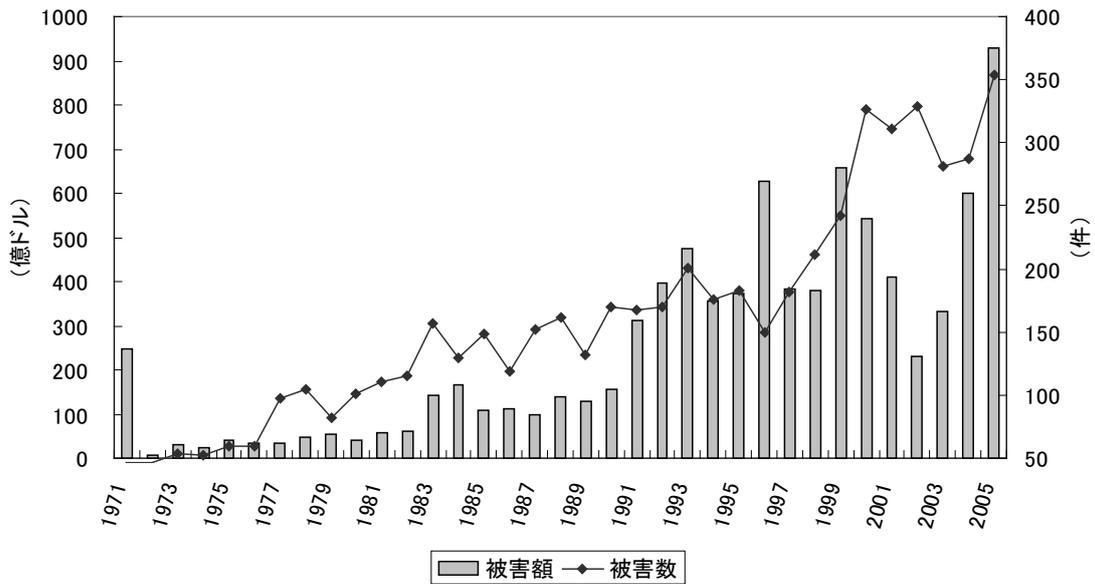
出所: 気象庁 (2005) .

図 8 : 1998～2004 年の主な気象災害



出所：気象庁（2005）.

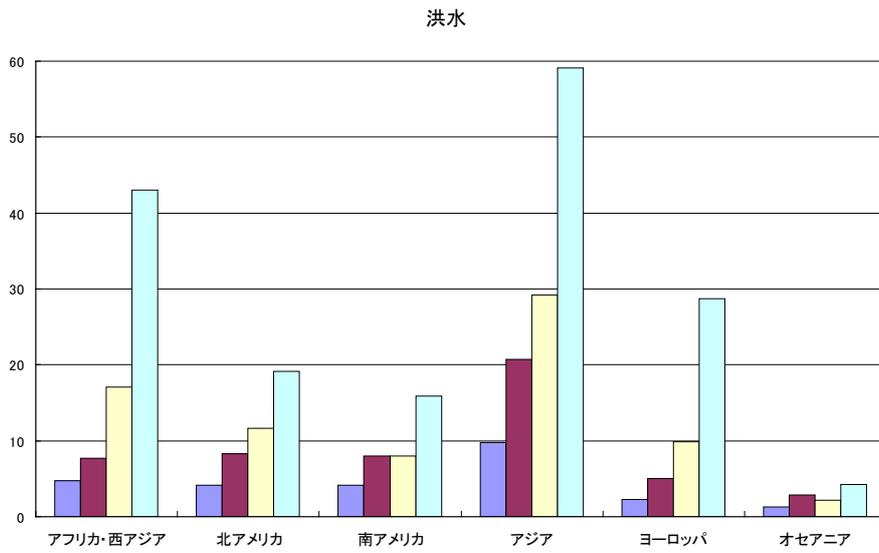
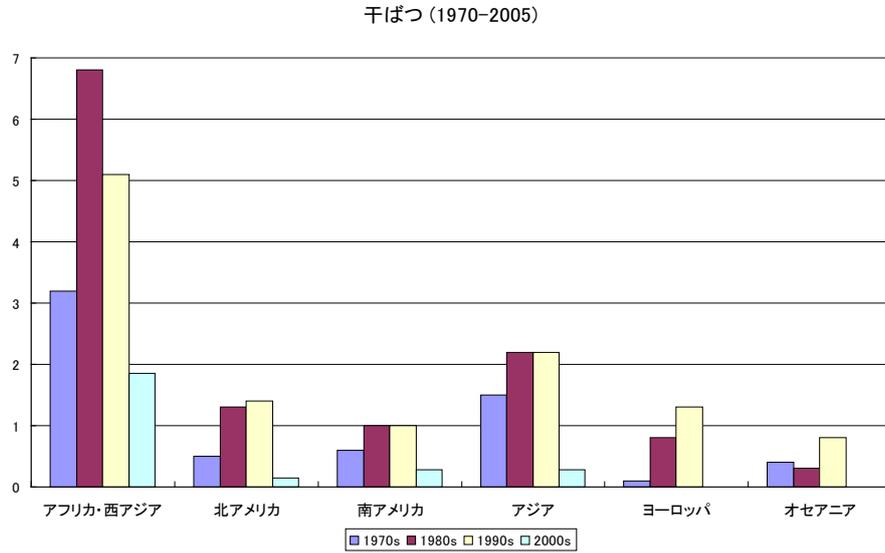
図 9 : 自然災害の被害状況 (1970～2005 年)



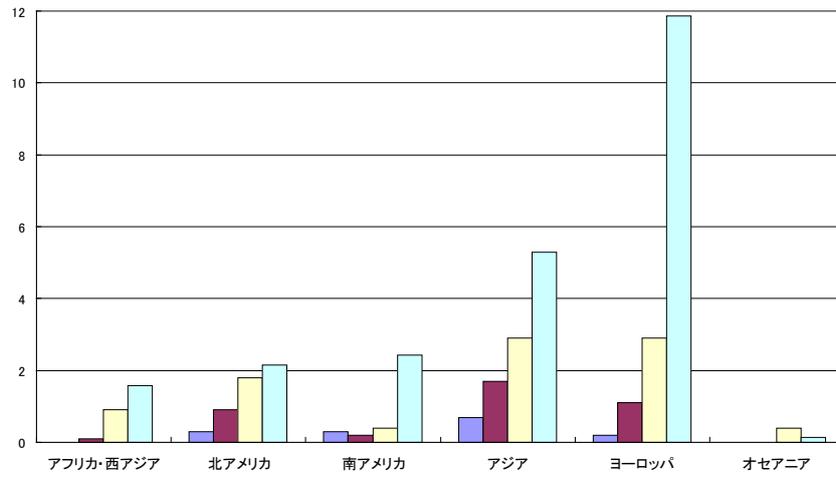
自然災害：干ばつ，異常気象，洪水，暴風雨，森林火災

資料：EM-DAT Emergency Disasters Data Base (<http://www.em-dat.net/>) より作成.

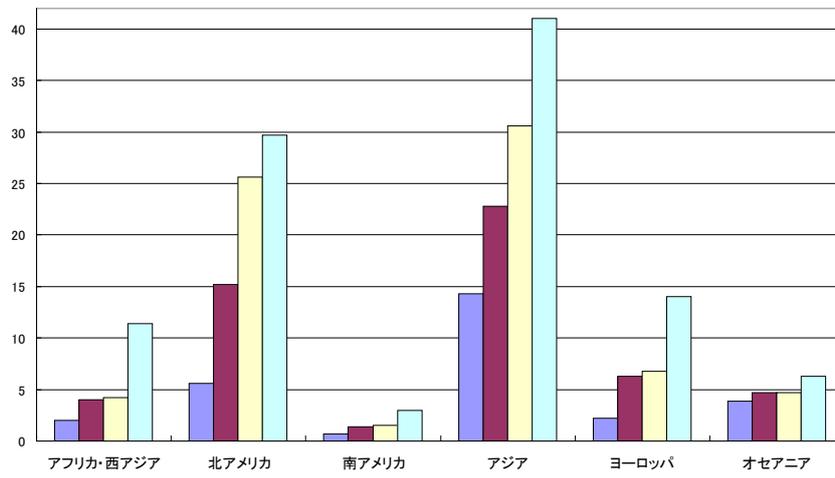
図 10 : 地域別自然災害件数 (1970 年代～2000 年代 : 年平均値)



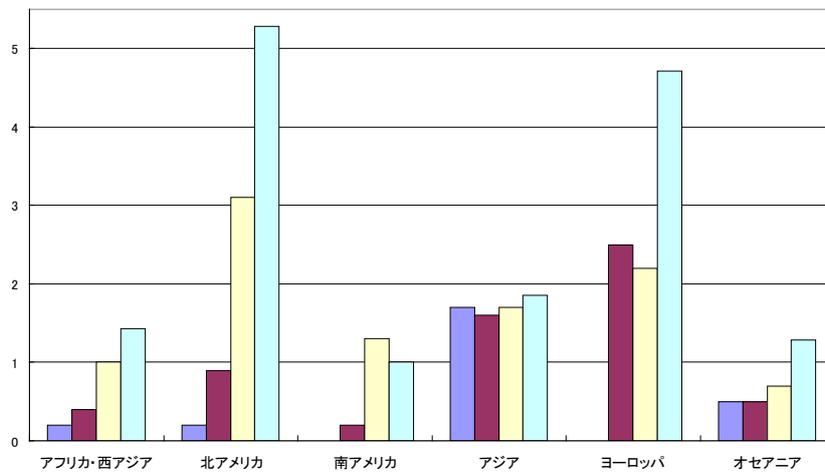
熱波・寒波



熱帯低気圧

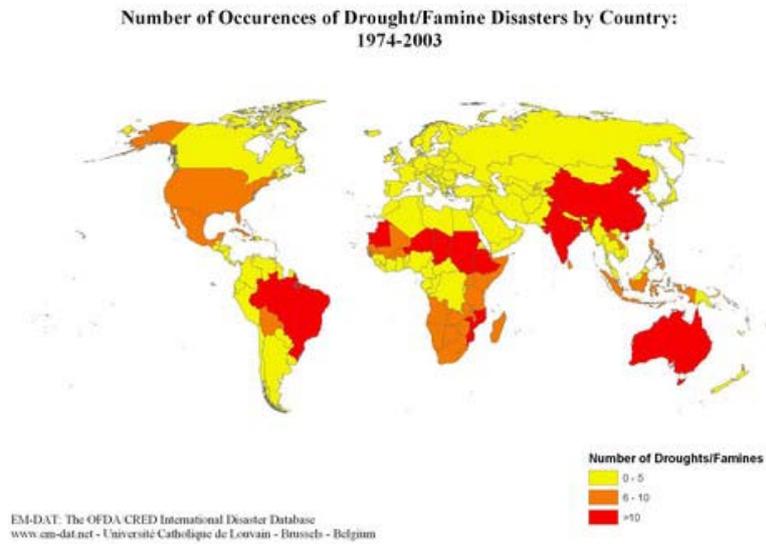


森林火災



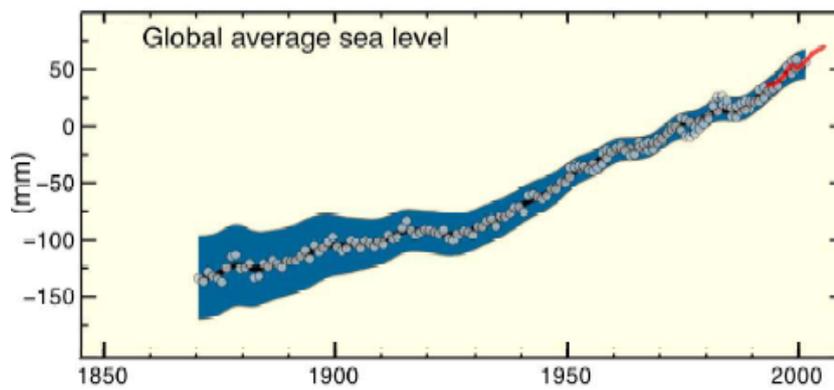
資料：EM-DAT Emergency Disasters Data Base より作成.

図 11 : 1974~2003 年における干ばつ発生地域



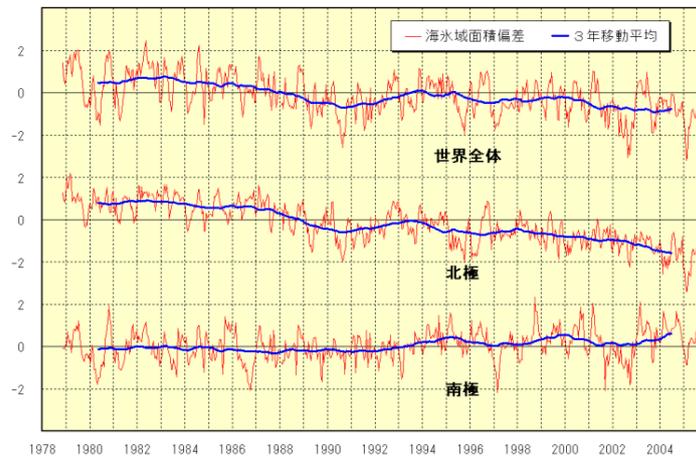
出所 : EM-DAT Emergency Disasters Data Base (<http://www.em-dat.net/disasters/maps.htm>) .

図 12 : 全球の海面水位



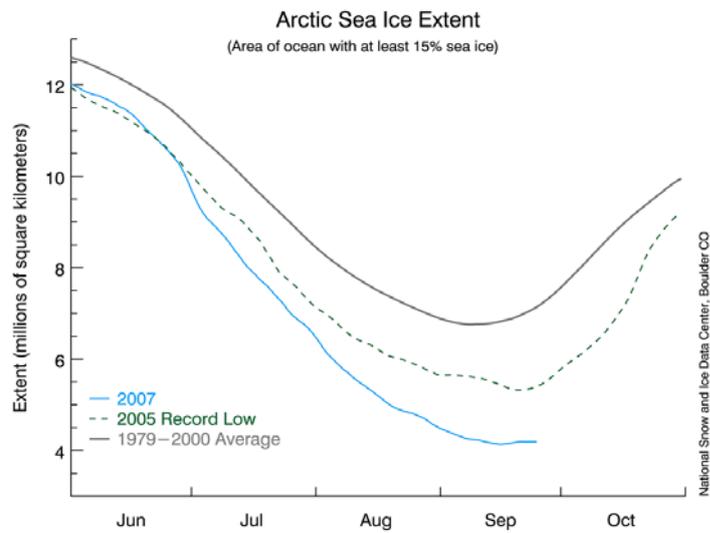
出所 : IPCC (2007) .

図13：両極域および世界全体の海水域面積の推移



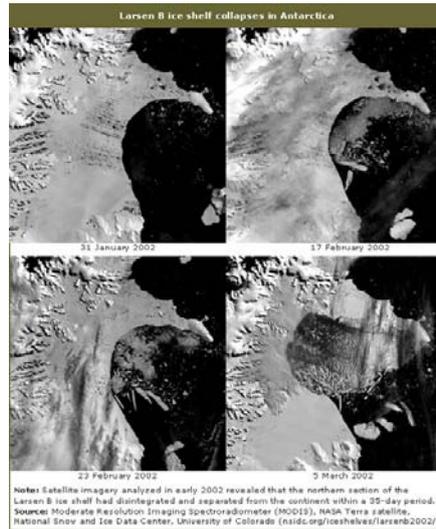
出所：気象庁（2006）より転載.

図14：北極域夏季の海水域面積



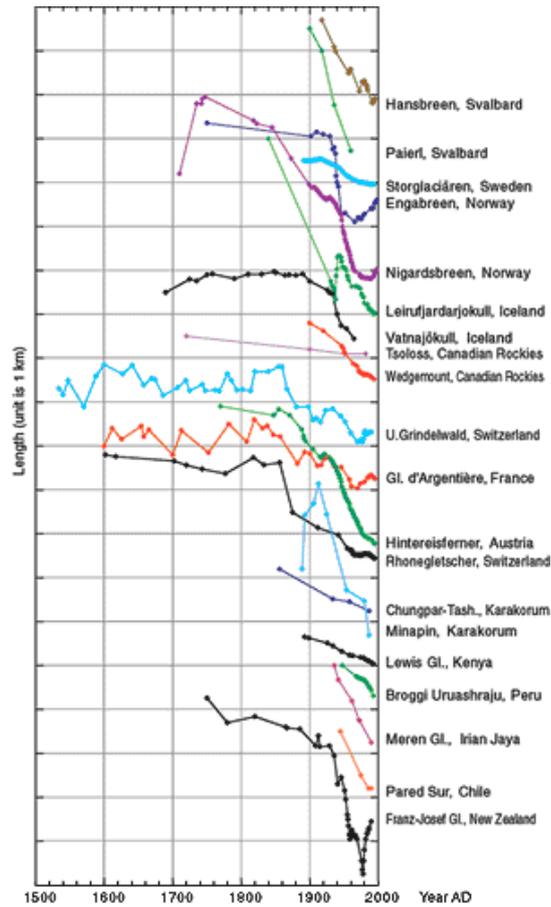
出所：National Snow and Ice Data Center.

図15：ラルセンB棚氷の崩壊



出所：National Snow and Ice Data Centerホームページより転載
 (http://nsidc.org/data/iceshelves_images/larsen.html) .

図16：主要山岳氷河の融解



出所：IPCC (2001a) .

表1：異常気象の長期変化傾向

異常高温・異常低温出現数の長期変化傾向

地域名	異常高温		異常低温			
	回/100年	(%)	回/100年	(%)		
東アジア域	0.51	*	-216	-0.4	*	-46
シベリア域	0.5	*	-269	-0.35	*	-42
インド域	0.78	*	-307	-0.51	*	-37
ヨーロッパ域	0.52	*	-253	-0.43	*	-43
アフリカ域	-0.07		-99	-0.22		-59
北米域	0.18	*	-208	-0.36	*	-52
南米南部域	0.57	*	-262	-0.68	*	-22
オーストラリア域	0.35	*	-165	-0.35	*	-48

異常多雨・異常少雨出現数の長期変化傾向

地域名	異常多雨		異常少雨			
	回/100年	(%)	回/100年	(%)		
シベリア域	0.06		-113	-0.01		-104
インド域	0.06		-119	-0.01		-92
ヨーロッパ域	0.16	*	-135	0.02		-107
北米域	0.14	*	-136	-0.04		-87
南米南部域	0.4	*	-233	-0.28	*	-60
オーストラリア東部域	0.09		-114	-0.27	*	-85

正：増加、負：減少を示す。

*は変化傾向が統計的に有意であることをあらわす。

カッコ内は1901～1930年(30年間)の出現数の合計に対する

1975～2004年(30年間)の出現数の合計の比。

出所：気象庁（2005）。

表2：観測された海面水位の上昇率とさまざまな要因による寄与の見積もり

海面水位上昇の要因	海面水位の上昇率(mm/年)	
	1961～2003	1993～2003
熱膨張	0.42±0.12	1.6±0.5
氷河と氷帽	0.50±0.18	0.77±0.22
グリーンランド氷床	0.05±0.12	0.21±0.07
南極氷床	0.14±0.41	0.21±0.35
海面水位上昇に寄与する個別要因の合計	1.1±0.5	2.8±0.7
観測された海面水位上昇	1.8±0.5 ^a	3.1±0.7 ^a
差異(観測値から気候の寄与の見積もりの総計を差し引いたもの)	0.7±0.7	0.3±1.0

表の注釈：^a 1993年以前のデータは潮位計の、1993年以降は衛星高度計の観測による

出所：IPCC（2007）。

写真 1 : シャロン・AX010, ヒマラヤ, ネパール



1978 年



2004 年

出所 : 全国地球温暖化防止活動推進センター・ホームページより転載(<http://www.jccca.org/>).

写真 2 : キリマンジャロ



1993 年 2 月 17 日



2000 年 2 月 21 日

出所 : NASA ホームページより転載.

写真 3 : グレイシャーベイ国立公園, アラスカ



Photographed in 1941



Photographed in 2004

出所 : The National Snow and Ice Data Center (NSIDC).