

第4章 観測結果：雪氷及び凍結した地表面の変化

概要

気候システムの中で、雪氷圏（雪、河川氷、湖沼氷、海氷、氷河、氷帽、棚氷、氷床、凍結した地面から成る）は地表のエネルギー収支、水循環、海面水位変化、地表面での気体の交換と複雑にからみあっている。雪氷圏は、幅広い時間スケールにわたる気候変動を重ね合わせることで、気候の変動性の自然センサーとなるとともに、気候変化を目にみえる形で示してくれる。雪氷圏は過去に、氷河期や、ヤンガードライアス期や小氷期のようなより短期間の変動といった、多くの時間スケールの大変動を経験してきた（第6章参照）。近年の氷量減少は、地上気温の上昇と関連がある。このことは、1965年から2005年にかけて、気温が世界平均の約2倍上昇した北緯65度以北の地域に特にあてはまる。

- ・ 積雪面積はほとんどの地域で減少しており、春季と夏季に顕著である。1966～2005年の衛星観測結果によれば、北半球の積雪面積は、11月と12月を除くすべての月で減少しており、1980年代後半には年平均値が5%急激に減少した。南半球においては、わずかな長期観測データもしくは代替データをみると、過去40年以上にわたり、おおむね減少しているか変化がない。積雪の減少しているところでは、気温がしばしば支配要因である。一方、積雪が増加しているところは、ほとんど降水量の増加が要因である。例えば、北半球の4月の積雪面積は、雪と気温の間のフィードバックも反映して、北緯40度から60度の4月の気温と強い相関がある。さらに北米西部の山岳地帯とスイスアルプスにおける積雪面積の縮小は、標高が低い場所で最も大きくなる。
- ・ 河川と湖沼の結氷日及び解氷日には、かなり大きな空間的変動がみられる（正反対の傾向がみられる地域もある）。北半球で、過去150年にわたる利用可能なデータを平均すると、結氷日は100年当たり 5.8 ± 1.6 日の割合で遅くなっている。一方、解氷日は100年当たり 6.5 ± 1.2 日の割合で早くなっている。（この章において、誤差幅は5%の信頼限界を示す）。
- ・ 衛星データによれば、1978年以来、北極の年平均海氷面積は10年当たり $2.7 \pm 0.6\%$ の割合で減少し続けている。夏季の海氷面積の減少は冬季よりも大きく、1979年以降、夏季の最小海氷面積は10年当たり $7.4 \pm 2.4\%$ の割合で減少している。他のデータは、夏季の減少が1970年付近から始まったことを示している。南極大陸における同様の観測では、年々変動が大きく、長期的な変化傾向はみられない。

- 北極海中央部における潜水艦による観測によれば、1987～1997年にかけての北極域中央部の平均海氷厚の減少は、1mに達する可能性が非常に高い。モデルによる再現実験もこれを支持し、同期間に北極の全域で0.6～0.9m以上の減少を示している。1987年以前の長期間のトレンドは明瞭でない。
- 氷河と氷帽の質量欠損は、1961～2004年にかけて、海面水位の変動に換算して年 $0.50\pm 0.18\text{mm}$ 、また1991～2004年にかけては年 $0.77\pm 0.22\text{mm}$ と見積もられる。20世紀末の氷河の消耗は、1970年以前の温暖化の影響である可能性が高い。単位面積当たりで最も大きな質量欠損（負の質量収支）は、パタゴニア、アラスカ、アメリカ北西部/カナダ南西部で観測されている。面積が大きいことに対応して、アラスカ、北極域、アジア高山地域が海面水位上昇に最も寄与している。
- グリーンランドと南極の氷床が、1993～2003年にかけての海面水位上昇に寄与した可能性が非常に高い。グリーンランド中央部では氷厚が増加しているが、海岸付近の融解の増加分はそれを上回っていた。氷床内陸部を源流域とする、グリーンランドや南極の氷河（氷流とも呼ばれる）の中には、流速が増加しているものがある。加速する氷床質量の減少は、しばしば棚氷の厚さや面積の縮小を伴ったり、あるいは氷河浮氷舌の消失が引き続いて起きた。データと技術を評価した結果によれば、グリーンランド氷床の質量収支は、1961～2003年で年間 $+25\text{Gt}\sim -60\text{Gt}$ （海面水位に換算して $-0.07\sim -0.17\text{mm}$ ）で、1993～2003年では年間 $-50\text{Gt}\sim -100\text{Gt}$ （海面水位換算で $0.14\sim 0.28\text{mm}$ ）と推定され、2005年では欠損はさらに大きい。南極氷床すべての質量収支は、1961～2003年で年間 $+100\sim -200\text{Gt}$ （海面水位換算で $-0.28\sim 0.55\text{mm}$ ）で、1993～2003年で年間 $+50\sim -200\text{Gt}$ （海面水位換算で $-0.14\sim 0.55\text{mm}$ ）である。氷河の流動の最近の変化は、南極の氷量の収支不均衡のすべてまたは大部分を説明するのに十分な大きさである可能性が高い。一方、グリーンランドの氷量の収支不均衡は、氷河の流動、降雪及び融解水の流出の変化によって十分説明できる可能性が高い。
- 北極地方における永久凍土の表層部の温度は、1980年代以降最大 3°C 上昇した。永久凍土の底面は、アラスカでは1992年以降年当たり 0.04m 、また1960年代以降、チベット高原では年当たり 0.02m に達する割合で融解している。永久凍土の変化は、地表面特性や排水機構の変化を引き起こしている。
- 北半球において季節的に土壌凍結する地域の最大面積は、1901～2002年の間に約7%減少し、春季における減少は15%に達した。また、ユーラシアにおける最深の深さも20世紀半ば以降、約 0.3m 減少した。加えて、ロシアの北極域では、1956～1990

年にかけて、永久凍土上部の季節的な融解層の最大の厚さが約 0.2m 増加した。ユーラシアでは、1988～2002 年にかけて、春季に融解が始まる日と秋季に凍結が始まる日はともに 5～7 日早まった。そのため植物の生育時期が早まったが、生育期間の長さには変化はない。

- ・ まとめると、全雪氷圏は、1961～2003 年にかけて、年当たり 0.2～1.2mm の海面水位の上昇に、1993～2003 年にかけては年当たり 0.8～1.6mm の上昇にそれぞれ寄与している。1993～2003 年の上昇率の増加は、主として山岳氷河や氷帽、グリーンランド氷床の表層面の融解、並びにグリーンランド及び南極大陸氷床の部分的な流速増大に伴う質量損失の増加によるものである。氷床の変化の見積もりには、大きな不確実性があり、質量の増加・減少量に関する良い推定値はない。しかし、海面水位収支への寄与度を考慮するためだけに限れば、全雪氷圏の寄与度は、1993～2003 年に海面水位に換算して年当たり $1.2\pm 0.4\text{mm}$ (中央値平均 \pm 不確実性とガウス誤差の総和) と見積もられる。

よくある質問と回答

FAQ4.1： 地球上の雪氷の量は減っているか？

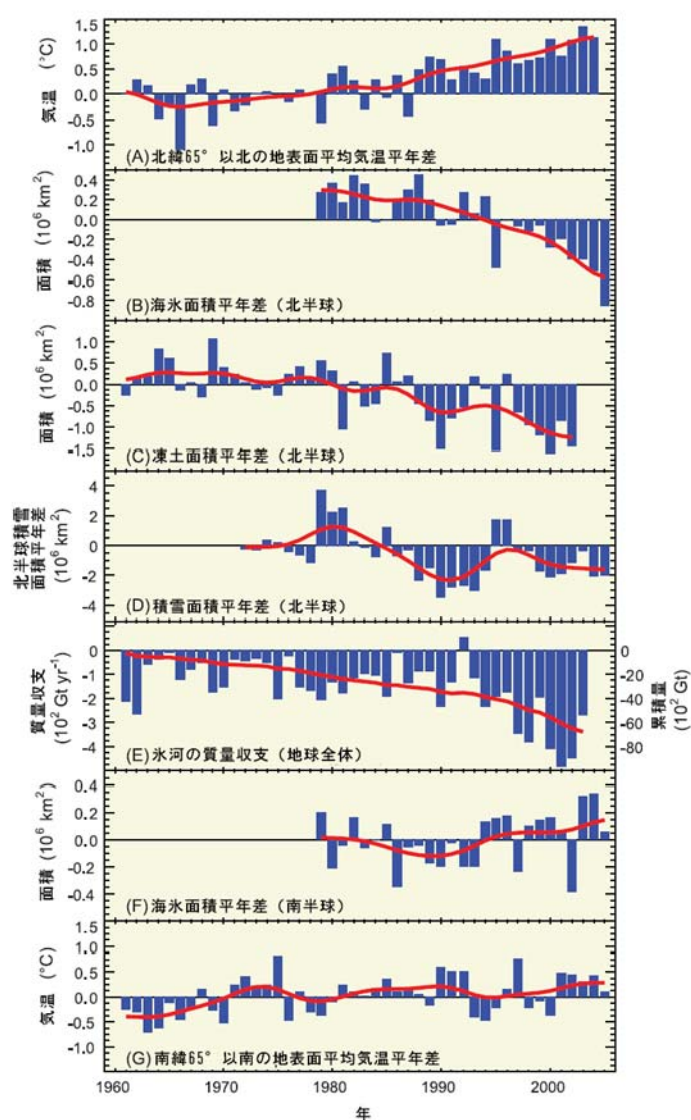
その通りである。観測結果によれば、雪氷は、一部に増大している地域やほとんど変化のない地域があるものの、世界的な規模で多年にわたり減少しており、特に 1980 年以降に顕著で、ここ 10 年はさらに大きく減少している。ほとんどの山岳氷河は縮小しつつある。春季の積雪面積の縮小は早まっている。北極域の海氷はすべての季節を通じて縮小しており、特に夏季に顕著である。永久凍土や季節的な凍土、河川、湖沼の氷の縮小が報告されている。グリーンランドや西南極の氷床の主な沿岸部、南極半島の氷河は薄くなり、このため海面水位が上昇している。氷河、氷帽、氷床が融けることによる、海面水位上昇へ及ぼす寄与度の合計は、1993～2003 年の期間で年当たり $1.2\pm 0.4\text{mm}$ と見積もられている。

衛星による連続観測によって、地球上の大部分の季節的な積雪がとらえられ、その結果、北半球春季の積雪面積が 1966 年以降 10 年当たり約 2% の割合で減少してきたことが明らかになった。しかし、秋季や初冬にはほとんど変化がない。多くの場所で、春季の減少は、降水量が増加しているにもかかわらず起こっている。

衛星データでは、湖沼や河川、あるいは季節的な凍土や永久凍土の氷の状態に関して、積雪と同程度の信頼度で測定することがまだできない。しかし、局地的あるいは地域的な報告が多く公表されており、それらは総じて、永久凍土の昇温や永久凍土表層部の夏季に

融解する層の厚さの増加、季節的に凍結する地域の冬季の凍結深の減少、永久凍土面積の減少、河川や湖沼の結氷期間の減少を示している。

1978年以降、衛星による両極地域の海氷面積の観測が継続的に行われている。北極域では、年平均海氷面積は10年当たり $2.7 \pm 0.6\%$ 減少している。一方、夏季の海氷面積は10年当たり $7.4 \pm 2.4\%$ 減少している。南極域の海氷面積に目立った変化傾向はない。氷厚については、潜水艦による観測データが北極域中央部に限って得られており、1958～1977年と比較すると1990年代には約40%薄くなった。しかし、これは北極域全体の見積もりとしては過大である可能性が高い。



FAQ4.1 図1 極域の地表付近の気温 (A, G)、北極域及び南極域の海氷面積 (B, F)、北半球の凍土面積 (C)、北半球の積雪面積 (D) 及び氷河の質量収支 (E) の年差時系列。赤線は図Eについては、地球全体の累積氷河収支を示し、その他のグラフについては、十年規模の変動を示す。

山岳氷河や氷帽のほとんどが縮小している。この傾向はおそらく 1850 年頃から始まっている。北半球の多くの氷河は、1970 年頃の数年間はほぼ平衡状態を保っていたが、その後縮小が加速した。氷河と氷帽の融解は、1991～2004 年にかけて、年当たり $0.77\pm 0.22\text{mm}$ の海面水位上昇に寄与した。

まとめると、グリーンランドと南極の氷床は縮小している可能性が非常に高く、1993～2003 年で、グリーンランドは年当たり $0.2\pm 0.1\text{mm}$ 、南極は年当たり $0.2\pm 0.35\text{mm}$ の海面水位上昇にそれぞれ寄与している。2005 年については縮小が加速していることを示す事実がある。グリーンランドや東南極の標高の高い寒冷な地域では、おそらく降雪量の増加が原因で氷厚が増しているが、氷河の流出の増大やグリーンランドでの表層の融解によるグリーンランド沿岸部や西南極の氷厚の減少分はこれを上回っている。

氷は、周囲の気候と複雑に影響しあう。そのため、特定の変化の原因は必ずしも明瞭ではない。それでもなお、その場所の気温が氷点以上であれば氷が融けることは間違いない事実である。積雪面積や山岳氷河の減少は、多くの場合、降雪量が増加しているにもかかわらず起こっており、それは気温の上昇を示唆している。同様に、積雪面積の変化は凍土や河川・湖沼の氷に影響を及ぼすが、これだけでは観測された変化を説明するのに十分ではないと思われ、これは局地的な気温変化の重要性を示している。観測された北極域の海氷の減少は、過去の循環や気温変化によって駆動されるモデルでかなりよく再現することができる。寒冷な地域の中心部にある氷床上の降雪の増加、沿岸部の表層の融解、海岸沿いの棚氷下部の融解などの観測結果はすべて温暖化と矛盾していない。これら雪氷変化が地理的に広範に起こっているという特徴は、広範囲にわたる昇温が地球全体の氷の減少の原因であることを示唆している。