

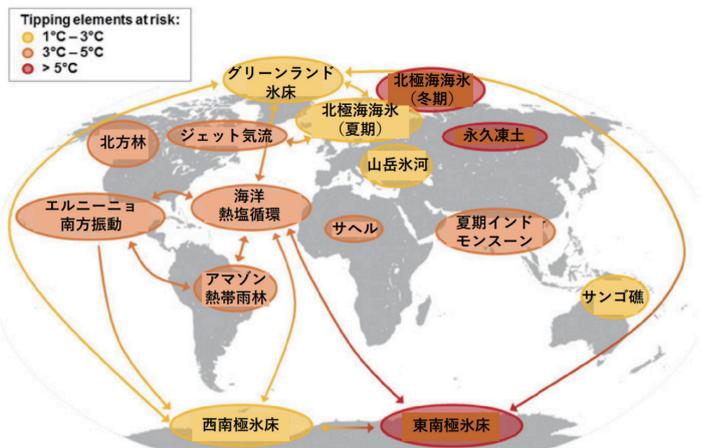
# ティッピング・ポイントを考える

## 第2回 氷床、北極海の海水

土田 道代 (CASAスタッフ)

第2回は、気候変動問題におけるティッピングエレメント(要素)のなかから、氷床と北極海の海水の融解問題を取り上げます。氷床とは、氷河の中でも面積が大きく(5×10<sup>4</sup>平方キロメートル以上)、大陸規模で陸地を覆うものを言い、地球に現存する氷床は南極氷床とグリーンランド氷床のみです。図1にあるように、グリーンランド氷床、北極海の海水(夏期)、南極の西南極氷床は、工業化前(1850年頃)からの平均気温の上昇が1~3℃でリスクにさらされると考えられています。国連気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、2017年には世界の平均気温が工業化前に比べてすでに約1℃上昇していると報告しています(「1.5℃特別報告書」、2018年)。世界気象機関(WMO)は「2020年の世界の気候 暫定報告書」で、2020年の平均気温は約1.2℃上昇であった<sup>1</sup>と報告しています。科学者は、これらのティッピングエレメントが、ティッピングポイントを超える可能性について警告を発しています。

IPCCが2019年9月に公表した「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する特別報告書(SROCC)」は、「最近数十年にわたって、地球温暖化は雪氷圏の広範に及ぶ退縮をもたらし、それは氷床及び氷河の質量の消失(確信度が非常に高い)、雪氷被覆の減少(確信度が高い)及び北極域の海水の面積や厚さの減少(確信度が非常に高い)、並びに永久凍土における温度の上昇(確信度が非常に高い)を伴う」としています(SPM, A.1)。また、「グリーンランド及び南極の氷床は、21世紀にわたって、またそれ以降も、さらに加速して質量の減少が進むと予測される(確信度が高い)。これらの雪氷圏の変化の速度及び規模は、温室効果ガスの高排出シナリオにおいて、21世紀後半にさらに増加すると予測される(確信度が高い)。今後数十年における温室効果ガスの排出量の大幅な削減によって、2050年以降のさらなる変化が低減されると予測される(確信度が高い)」としています(SPM, B1)。



Steffen et al. (2018, PNAS) より

図1 ティッピングポイントの要素とその連鎖

### 1. グリーンランド氷床

グリーンランドは北大西洋に位置する世界最大の島で、その大きさは日本の約6倍あります。島の2/3は北極圏に含まれ、約85%が氷床に覆われています<sup>2</sup>。グリーンランド氷床の質量は急速に減少しており、その減少速度は加速しています。減少の半分は融解、半分は流動によるとされています。

アメリカ航空宇宙局(NASA)による2012年7月

24日の発表によれば、グリーンランド氷床では7月8日から7月12日のわずか4日のうちに、表面の融解面積が約40%から約97%へ広がりました。島の中央部、グリーンランド氷床の頂点付近にある「サミットステーション」<sup>3</sup>においても融解がみられました。

<sup>1</sup> WMO、「Provisional Report on the State of the Global Climate 2020」、2020年12月7日、

<[https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10444](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10444)>

<sup>2</sup> JAXA、「25万年前の水を蓄える白い島：グリーンランド」、2004年8月13日掲載、

<<https://www.eorc.jaxa.jp/earthview/2004/tp040813.html>>

<sup>3</sup> グリーンランドのサミットステーションは、北極圏で唯一の高高度(海拔3,200メートル)、高緯度(北緯72度)、内陸の年間観測ステーション。一年中乾燥した雪と氷に覆われた地域で、最寄りの土地まで400キロメートル離れた場所にある。大気、雪氷圏、宇宙天気、素粒子物理学、氷床の地震学の観測を含む研究、天文学、天体物理学などの研究が行われている。

研究者によると、夏季、過去30年間に人工衛星で見られた最も広範囲の融解は約55%で、これほど突然に、そしてこれほど広範囲に氷床表面が融けたのは異常な現象でした。当時、この大規模融解の原因が自然のサイクルの一部なのか、人為的な気候変動の影響なのかが話題になりましたが、氷床コア<sup>4</sup>の研究からこのような顕著な融解は約150年に一度発生しており、前回は1889年に起こっていることが分かっているため、「今回の融解が想定外のことでないとするのも可能」との見解を示す科学者<sup>5</sup>もいました。同時期に「ヒートドーム」と呼ばれる異常に強い暖かい空気がグリーンランド上空に形成されていたことも、原因

の特定を難しくしたとされています。原因はどうか、科学者は、このときの融解スピードと範囲は「衝撃的」であり、「表面の一部が融けたときに厚い万年雪があれば、そこで再び氷結して氷床に戻ることができる。しかし、氷床の融解と氷結が繰り返されると、長期的には万年雪が薄くなり、再氷結して氷床になる体積は小さくなってしまう」と指摘<sup>6</sup>しています。

2019年7月31日にも氷床表面の60%で融解がみられ、2012年7月以来、最大の表面融解となりました。8月1日には直近24時間で融解した氷は約125億トンに達し、1日の損失としては1950年の観測開始から最大を記録しました<sup>7</sup>。同じ年の6月、氷床表面

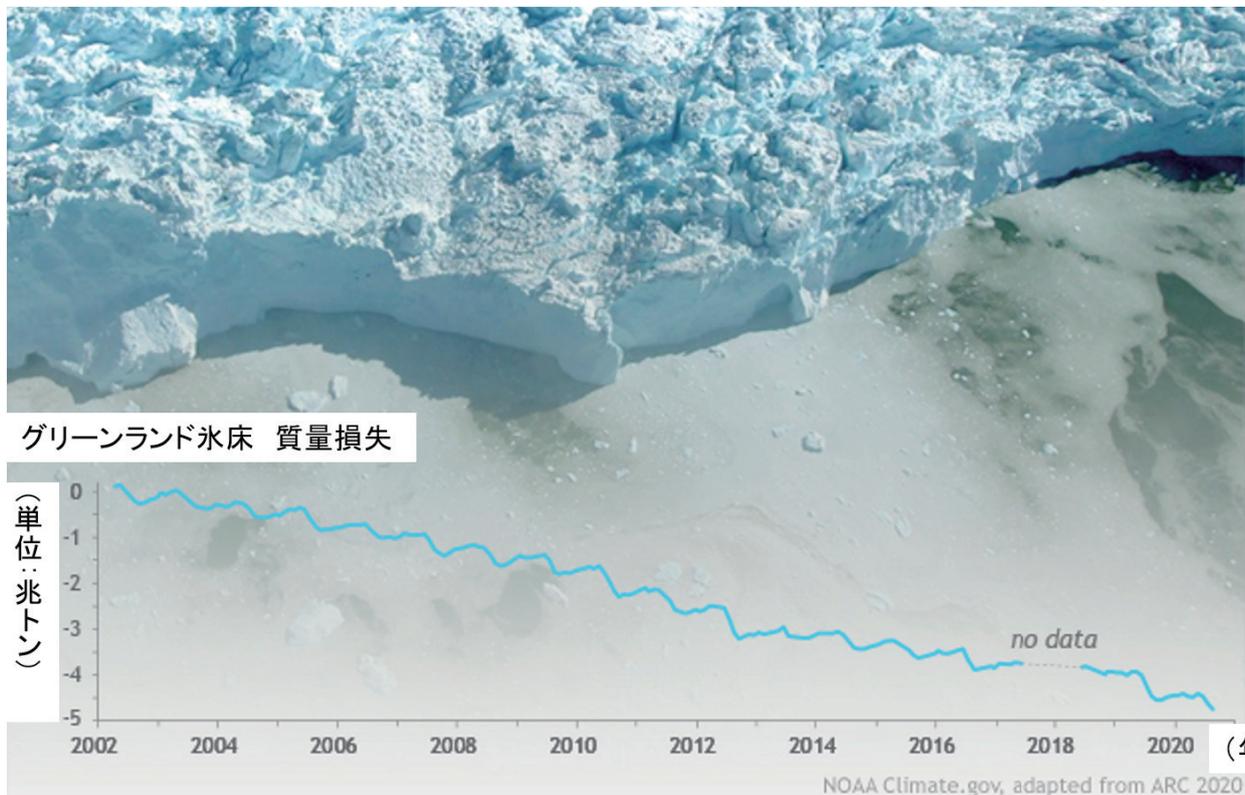


図2 グリーンランド氷床の質量損失。2002年4月から2020年4月までのグリーンランド氷床の月ごとの変化を示す(2017年～2018年はデータなし)。18年間の記録全体にわたるグリーンランドの平均氷損失は、年間2,680億トン。2019年9月～2020年8月は年間2,930億トンの減少で、2019年の記録を大幅に下回ったものの平均値を上回る値だった。(出典) NOAA、Greenland ice loss in 2020 was below the record but above average、2020年12月8日、CASA加筆、  
< <https://www.climate.gov/news-features/featured-images/greenland-ice-loss-2020-was-below-record-above-average>>

<sup>4</sup> 氷床コアとは、氷床から取り出された筒状の氷をいう。氷床コアには過去の地球の気候と環境の変化が封じ込められており、地球の変動を知る重要な科学試料となっている。

<sup>5</sup> ナショナルジオグラフィック、「グリーンランドの氷床が異常融解」、2012年7月26日、  
< <https://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/6445/>>

<sup>6</sup> 注5に同じ。

<sup>7</sup> ワシントン・ポスト、「The Greenland ice sheet poured 197 billion tons of water into the North Atlantic in July alone」、2019年8月4日、< <https://www.washingtonpost.com/weather/2019/08/01/greenland-ice-sheet-poured-billion-tons-water-into-north-atlantic-july-alone/>>

の45%で融解がみられ、これは1979年以降で最も早い記録となりました。2020年12月8日のアメリカ海洋大気庁（NOAA）の発表によると、2018年9月～2019年8月のグリーンランドの氷床融解量は5,320億トンで過去最大を記録したとのこと。研究者は、グリーンランド氷床の融解が2019年の世界の海面上昇の主要原因であったこと、これにより海面を1.5ミリ分押し上げたこと、1年間の上昇分の40%に相当することを報告して、海面上昇が速まる恐れを警告<sup>8</sup>しています。

グリーンランド氷床は、毎年夏季に融解して質量が減り、冬季に雪が降って質量を得ます。しかし、気温の上昇に伴って夏季の融解が冬季の積雪を上回り、結果として氷床の質量は減少しています（図2）。気候モデルは、グリーンランドの局所的な温暖化が今世紀中に3～9℃になると予測しています。そうなれば、何世紀にもわたる氷床の長期的な融解が始まり、氷床が完全に融解すると、世界の海面は約7メートル上昇し、この海面上昇によって世界のほとんどすべての主要な沿岸都市は浸水すると言われています。さらに、氷床から多量の淡水が海へ流入すると、海洋循環や大気循環が変化して、気候・環境が変化する可能性が指摘されています。

## 2. 北極海の海水

気象庁が毎年発表している「海水域面積の長期変化傾向（全球）」によると、北極域の夏季の海水域面積は、1979年以降明らかな減少傾向を示し、2000年代以降は激減しています。

- 2005年9月：533万300平方キロメートル（1979年の統計開始以来の最小値を更新）
- 2007年9月：425万平方キロメートル（最小値を更新）

- 2012年9月：349万平方キロメートル（最小値を更新、観測史上初めて400万平方キロメートルを下回る）
- 2020年9月13日：355万平方キロメートル（衛星観測史上2番目の小ささ）

IPCCの第4次評価報告書（AR4）によれば、20世紀の100年間で地球の平均気温は約0.74℃上昇しましたが、北極圏では2℃以上も上昇しており、多くの科学者は北極圏が世界平均の2倍以上のスピードで温暖化が進行しているという見解で一致しています。

北極域で温暖化が増幅されるメカニズム<sup>9</sup>は、図3で示されるように、①白色の積雪や氷河・氷床、海水が減少し、海面や地表が露出する、②表面が白から黒っぽい色に変わることによって太陽光反射率（アルベド）が低下して海や陸が太陽エネルギーを多く吸収するようになり気温が上昇する（水は太陽光を93%程度吸収するのに対し、雪や氷床は15%程度しか吸収しない）、③このアルベドの変化に加えて大気中の水蒸気や雲・エアロゾル、植生や炭素循環、大気や海洋の熱輸送など、さまざまな変化が複雑に絡み合っているとされています。上述の通り北極圏での温暖化の進行スピードが速いことから、このプロセスは加速す

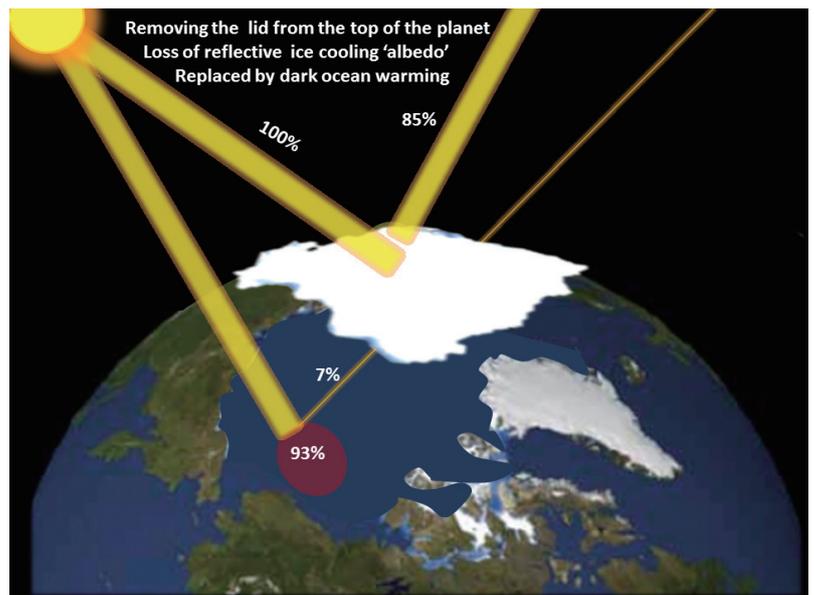


図3 北極温暖化増幅、(出典) CLIMATE EMERGENCY INSTITUTE、  
< [https://static.secure.website/wscfus/8154141/uploads/Arctic\\_albedo\\_1.png](https://static.secure.website/wscfus/8154141/uploads/Arctic_albedo_1.png) >

<sup>8</sup> AFP、「グリーンランドの氷床融解、2019年は過去最多の5320億トン」、2020年8月21日、< <https://www.afpbb.com/articles/-/3300428> >

<sup>9</sup> 日本国際問題研究所、「北極のガバナンスと日本の外交戦略」、西村六善、第5章「北極の環境問題」、2013年3月、< [http://www2.jiia.or.jp/pdf/resarch/H24\\_Arctic/05-nishimura.pdf](http://www2.jiia.or.jp/pdf/resarch/H24_Arctic/05-nishimura.pdf) >

る可能性が高いと考えられています。さらに、④夏季に海水面積が小さくなること、結果として薄い水が多くなることも融けやすさにつながります。2020年、北極圏では熱波が持続し、コペルニクス気候変動サービス (CAMS) は、3～5月の平均気温が通常より約10℃高かったと報告しています。6月には記録的な猛暑となり、シベリア北部のベルホヤンスクで38℃という異常高温を記録しました。北極圏でも森林火災が発生しますが、これは落雷や強風をきっかけに発生する自然現象であり、インフラや建物に直接的な影響を与える場合が少ないため、多くは放置され、報道もされてきませんでした。しかし2019年は火災の発生件数と焼失面積が異常で、気候変動の影響が指摘されています。温暖化した気候がより多くの落雷を引き起こしている可能性や、温暖化による乾燥化の影響が指摘されています。2020年は9月時点で、規模と強度の面で2019年の記録を上回ったと報告されています。2020年1月以降、北極圏の森林火災からのCO<sub>2</sub>排出量は、2億5,000万トンに上り、過去最高を記録したと報道されています。北極圏で進行する気候危機は、地球全体の温暖化をさらに進行させる恐れがあります。

### 3. 西南極氷床の融解<sup>10</sup>

南極は地球上で5番目に大きな大陸です。岩盤に約2,500万立方キロメートルの氷床が載っており、地球上で最大の氷の塊です。経度0の線で一方を西南極、もう一方を東南極と言います。南極氷床の損失メカニズムは、①氷床が成長して内陸から海へ押し出され、②棚氷になって、海面と接する状態になり、③海洋に広くせり出した棚氷の底面が海水中で融解することにより損失する、あるいは④氷床が水中に冰山を分離する(カービング)ことにより損失する、というもので、海洋の作用を受けて変動します。③棚氷の底面融解と④カービングが氷床損失に占める割合は、ほぼ同等もしくは前者がやや上回ることが判明しています。西南

極沿岸の一部では非常に大きな氷床の損失が観測されています。西南極では棚氷の水厚減少が進んでおり、そのような地域では比較的暖かい海水が氷床と接していることが分かっています。西南極では広い範囲で氷の底面(大陸基盤)が海水面よりも低いことから、本質的に不安定で、小さな外力によって崩壊し得るとの仮説が提唱されています。

IPCCの第5次評価報告書(AR5)では、世界平均地上気温の上昇に伴い、21世紀末に南極の海水面積と体積は減少すると予測しています。

### まとめ

現段階ですべての研究者がこれらのティッピングエレメントが「ティッピングポイントに達した」と同意しているわけではありません。しかし氷床融解が気候危機を背景に進行し、さらに重大な地球規模の問題をもたらすことに関しては研究者のあいだで意見が一致しています。北極圏には約400万人、小島しょ国には約6,500万人が住んでいますが、気候危機により氷床や北極海の海水に起こっている変化はそういった場所に暮らす人々に直接的な影響を及ぼすだけでなく、世界中の人々に間接的な影響を及ぼしています。SROCCは、南極の氷などを含む世界の氷河が融解することで、21世紀末までに海面は最大で1.1メートル上昇する(SPM, B.3.1、(可能性が高い))との予測を発表しています。仮に1メートル規模の海面上昇が起これば、高潮や洪水によって世界の10億人が危機にさらされ、2億8,000万人以上が家を失うといわれています。グリーンランドや南極の氷床及び北極海の海水の融解は、まさに気候危機の象徴です。図1の「ティッピングポイントのエレメントとその連鎖」では、グリーンランドや南極の氷床及び北極海の海水の融解が、海洋の熱塩循環やアマゾンの熱帯雨林の減少などと関連していることが示されており、地球規模の気候危機と強くつながっていることを忘れてはならないと思います。

<sup>10</sup> 参考文献：杉山慎、「南極氷床：その変動と海洋との相互作用」、2018年3月31日、北海道大学、  
<[https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/70333/1/18\\_Lowtemsci76\\_p169-177.pdf](https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/70333/1/18_Lowtemsci76_p169-177.pdf)>