

「北極海の海氷減少問題と国際社会・日本の取り組みについて」



図 1：月（「かぐや」）から見た地球。 JAXA ホームページより

はじめに

地球は、水の三相が共存する稀な星です。ガガーリンの「地球は青かった」という言葉は、「地球は薄青色だった」というのが本当のようです。写真は「かぐや」からのものですが、青くもあり、白くもあり、緑もあり、褐色の大地もあり、総体的には薄青色に見えます。これほどにまで美しい地球は、月から見ればちっぽけなサイズです。地球が有限であることが良く分かります。視覚的な美しさは、生命体である人間が、生きて活かされる場所であると感じることができるからなのでしょう。

宇宙から地球を見たときの明るさの違いは、太陽からの日射を受け取るか否かを表しています。写真の地球のてっぺんは南極ですが、白いベール（氷）に覆われていることがわかります。地球が全て海に覆われる惑星なら、青色になり、緑のない大地だけなら褐色になってしまいます。青を薄く、そして美しい地球に見せているのは、脇役を担っているのは、白い世界です。

北半球の夏、一日あたりに受ける日射量は、地球上のどの場所で最大になるのでしょうか？ 実は北極です。赤道よりも大きいのです。もしも表面を覆う海氷や氷床が無かったら、現在の気候と異なる状態になることは想像がつくでしょう。何故、北極で大きな変化が進行しているのかを知るために、姿を変える水の不思議から考えてみましょう。ここで言う、水とは、特に、“流体の水である青の海水”と“固体の水である白の海水”です。

北極は温暖化に対して脆弱なだけ？

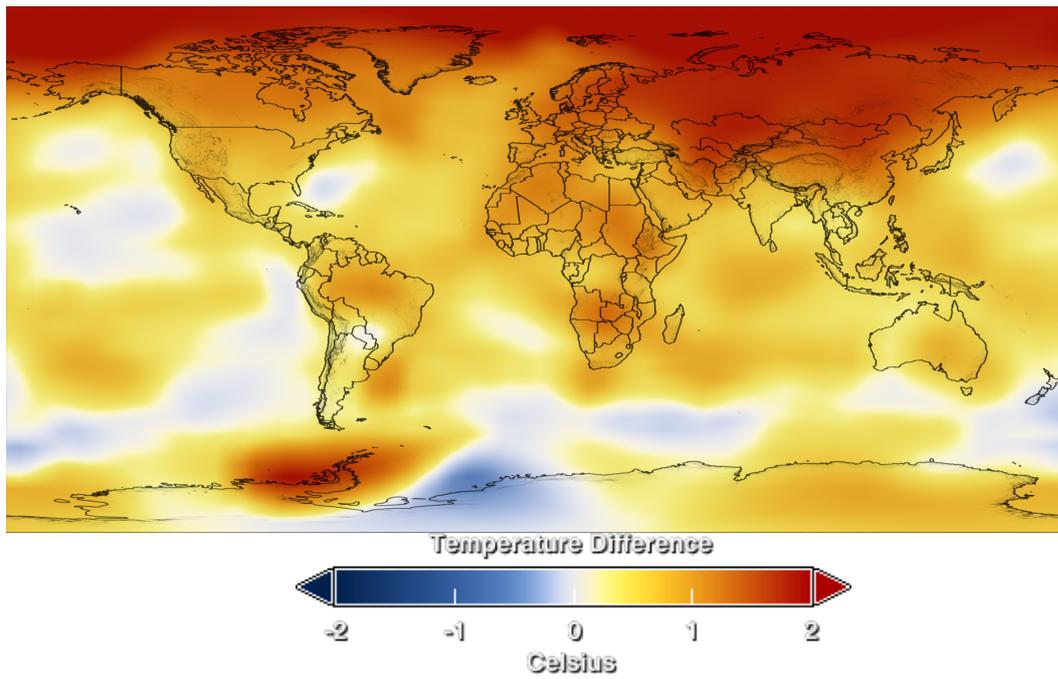


図2：1980-2008年の平均表面温度に対する2004-2008年の表面温度偏差
(NASA HPより)

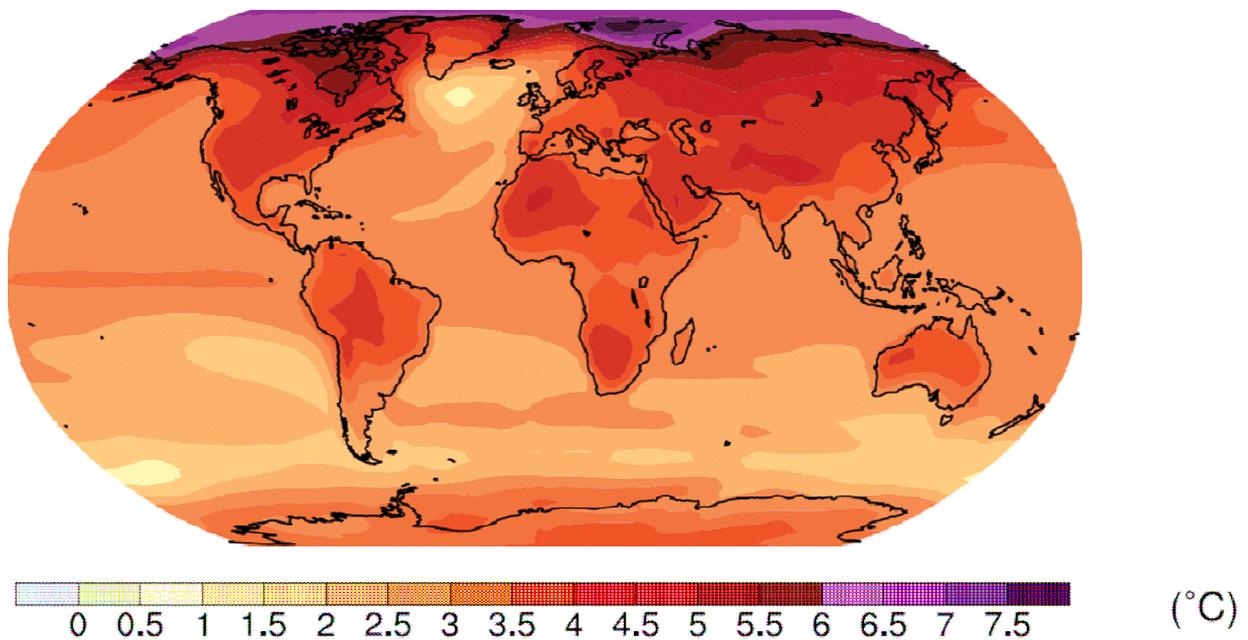


図3：今世紀末の前世紀末に対する表面温度変化予測 (A1B シナリオ)
(IPCC 第4次報告書より)

◎気温上昇が先か？ 海氷減少が先か？

北極域は温暖化の影響をもっとも受ける地域であるといわれます。その根拠は、北極域での温度上昇が最も大きいと言う観測事実（図2）や将来予測（図3）に基づいていると思われる。しかし、温度が顕著に上昇している、もしくは、上昇すると予測されている地域はどこなのかをよく“観て”見ましょう。実は、北極域というよりもむしろ北極海と考えたほうがよさそうです。最近までは、北極海は夏季でもその大部分が氷に覆われている海でした。つまり、北極海での表面温度変化はその表面を覆っていた海氷の有無によりもたらされていると考えることができます。

◎北極の温度上昇は冬に大きい？ 夏に大きい？

図2や図3の温度偏差は、年平均したときの温度偏差です。北極の氷の話題と言うと、夏の北極を連想される方が多いかと思います。しかし、特に温度偏差をもたらしているのは冬です。北極の冬とは、太陽光のない暗黒の世界です。暗黒の世界では、北極の氷が白いことには意味はありません。暗黒の冬、重要な意味を持つのは、断熱材としての氷の性質です。北極海が完全に厚い氷で覆われているのならば、南極大陸と同様、大地と等価です。つまり、放射冷却でどんどん冷えてゆきます。海氷に完全に覆われているところでは、気温はマイナス30度ぐらいになります。もしも海氷がなく海面が露出した場所では、表面気温は何度になるのでしょうか？ 海水の結氷水温である約マイナス1.8度以上になります。氷に覆われていた冬の温度と氷がなくなった冬の温度との差は、約30度にもなります。

これを、一年に均してやると、5～10℃程度の差になります。図3の予測結果を見ると、北極海の海岸線で表面温度のジャンプがあることが分かります。このジャンプは、北極海が白い“陸”の性質をもつ海から、本来の“海”の性質を持つ海に変わることが要因であることを意味しています。

◎白い海から、青白い海へ、そして青い海へ ⇒ 静的な北極海から動的な北極海へ

このような変化で、特に大事なポイントは、固体の海から、流体の海に急速に変わっていることにあります。固体と流体の違いは、宇宙空間から見たときの色の違い（反射率の違い）に加えて、形状の変化のしやすさ、動きやすさにあります。南極大陸の氷床は、過去数10万年近くに遡り、過去の気候の歴史を探ることが出来るほど、動きは緩慢です。数10万年も前の出来ことが、未だ同じ場所にある氷に封印されているのです。しかし、北極海の海氷は、数年の寿命しかなく、10年前の痕跡すら残っていません。数年の初等教育で学んだ、水の性質に関する基礎知識で、北極海の変化を紐解くことができます。

北極海の海氷減少を紐解くキーワードは
活発に氷も海も動く北極海

北極の氷は融けているから減っているのか？

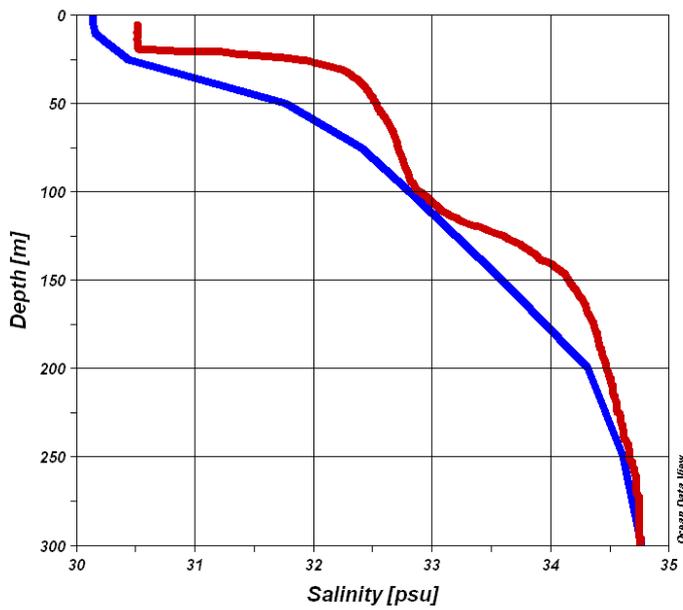
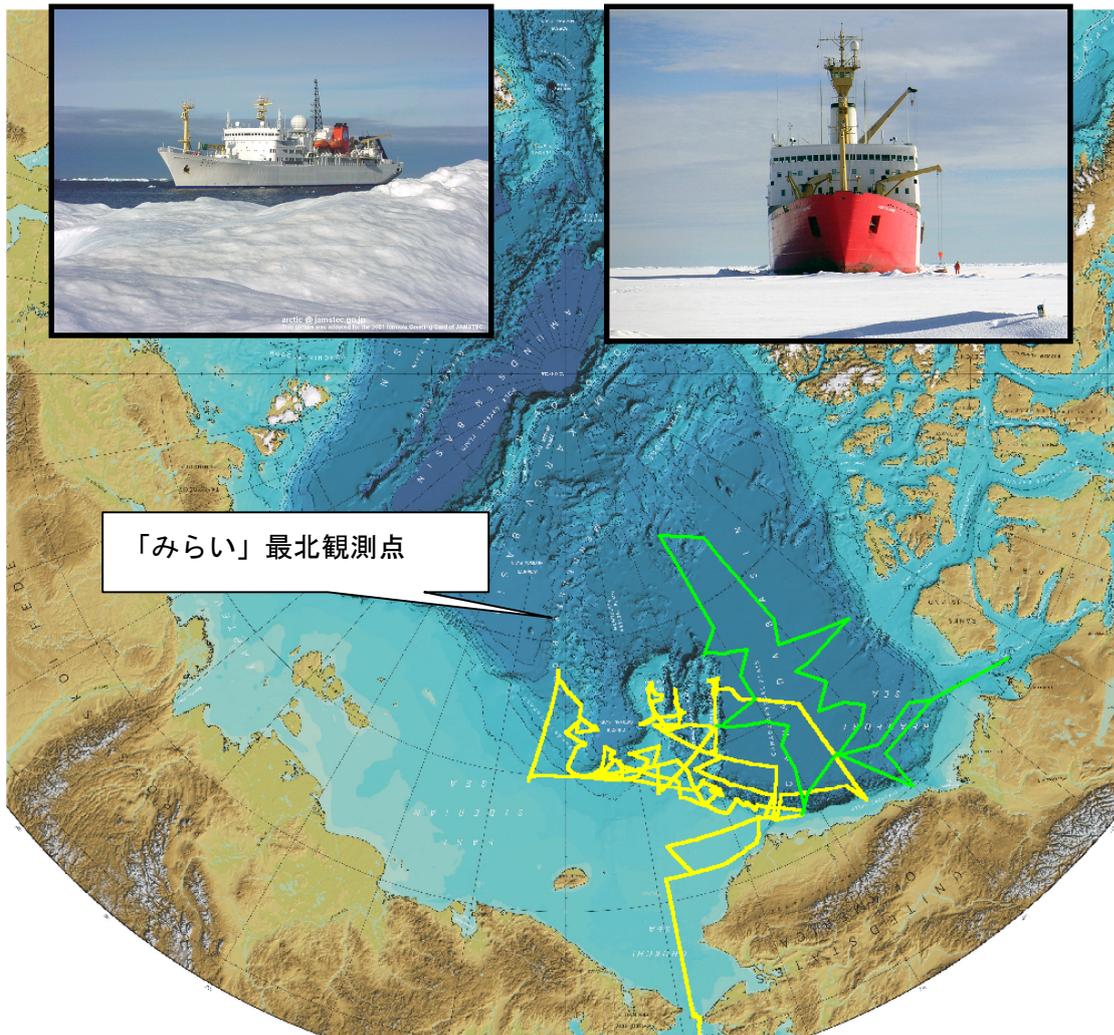


図 4 : 2008 年国際極年観測。

(上) MAP、(下) 最北観測点での塩分プロファイル[赤 : 2008 年、青 : 1948~1993 年の平均]

昨年、日本の国際極年活動としては初めて北極海内部にまで入り込む海洋観測（共同利用）を行いました。北極海内部にまで入った船は、砕氷船ではない「みらい」です。「みらい」の前進は原子力船「むつ」であり、船首側の前半分は、1969年就航の原子力船「むつ」そのものです。その証に、船体の「みらい」のネームプレートの下には、「むつ」という文字がうっすらと確認できます。2008年、本邦船最北地点での観測データをもとにお話を進めてゆきましょう。図4は、2008年の「みらい」、カナダ砕氷船「ルイサンローラン」の航跡です。カナダ最大の砕氷船ルイサンローランも、「みらい（むつ）」と同じ1969年就航の船です。昨年の「みらい」の最北点は、北緯78度53分でした。砕氷船ではありませんので、その場所は、まばらに氷があるものの、「みらい」にて航行できるような海でした。氷は融けて無くなったのでしょうか？ この素朴な疑問に、「みらい」最北点のデータは答えてくれます。もし、融けて氷が減少しているのだとすれば、ほぼ淡水からなる氷が水に変化するので、海洋上層の塩分は下がるはずですが、図4に塩分の鉛直プロファイルを示していますが、赤色が2008年に観測した結果で、青色は1948-1993年の平均データです。海洋の塩分は、低下していたのではなく、上昇していたという事実が分かります。これは、海水が消え去った「みらい」最北の海では、氷は融けて減少していたのではなかったこと意味します。

◎できないから減るということ

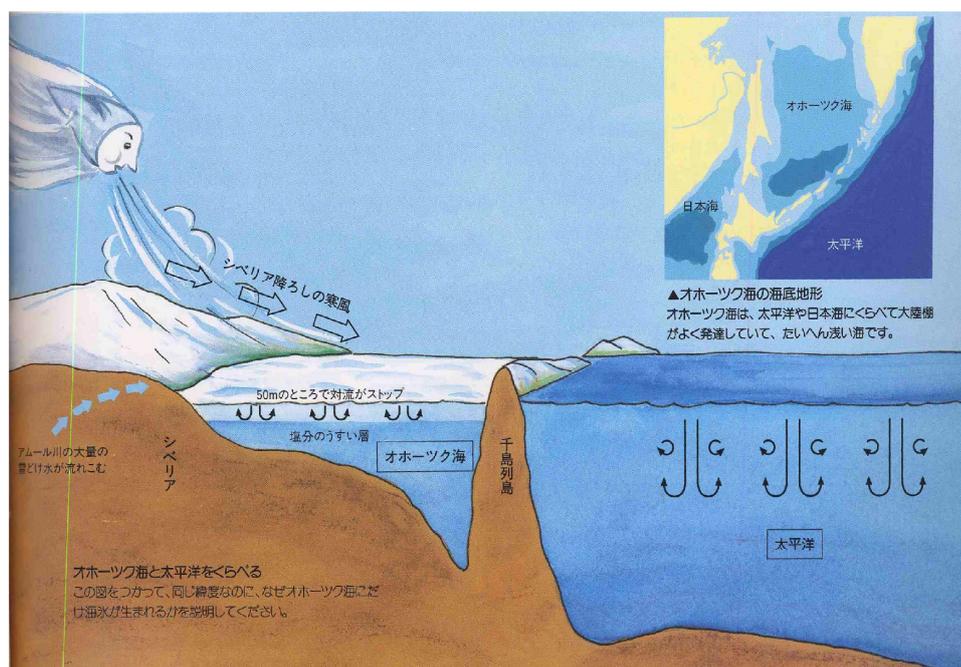


図5：海で氷が形成されるための条件。表層に塩分の薄い層が必要。同じ寒さでも、氷ができる海とできない海がある。“寒いことは”海水ができるための必要条件であるが、十分条件ではない。海洋側の条件（必要条件）が重要。（青田昌秋著「白い海、凍る海」より）

北極海の水温はどこでも、どの深さでも一定で冷たいわけではありません。大西洋側からは、湾流（教科書的にはメキシコ湾流）が流れ込み、太平洋側からは、ベーリング海峡を越えて温かい水が北極海に流れ込んでいます。このような、温かい水を冷やし、表面の水を結氷水温にまで冷やしきれないと氷はできないのです。一冬かかっても海水を結氷水温にまで冷やしきれない高緯度の海があります。グリーンランド海です。氷ができない最北の海です。何故、氷ができないのでしょうか？ それは、もともと“海が暖かい”、“海面付近の塩分が高い”からです。このような海域では、海は冷やされても、氷ができる前に春を迎えてしまいます。氷ができるかわりに、そこでは、深層水が形成されています。一旦、深層水ができてしまうと、そこに沈み込むべき水を送り込んでやる必要があります。つまり、南から水が供給され続けるようになり、持続的に深層水が形成されるのです。“氷が無い、極寒の海”でのみ、深層水ができるのです。深層水と言うと、言い過ぎかもしれません。深い対流が起こるのです。北極海の中では、深層水はできていませんが、年々、対流が及ぶ深度が増大しています。海面から対流が及ぶ深さのまでの水を結氷水温にまで下げて始めて氷ができるのです。現在の北極海では、氷ができる水温にまで下がる期間が短縮し、一冬に出来る氷の量が減少しています。冬にできる氷の量が減少すれば、薄い状態で氷は春を迎えることとなります。夏、大気側から加熱されても、これまでの北極海の海水の大部分はひと夏で融け切らなかったのですが、今や融けきってしまう海域が著しく拡大しています。図4の塩分プロファイルに見られる高塩分化は、もともと、そこにあった北極海の氷が薄かったことを物語っています。氷の厚さを観測することは容易ではありません。しかし、表面の海水の塩分を調べることで、もともと、そこにどれだけの厚さの氷があったのかを知ることができます。氷はもともとは水であるからです。

今年の春、英国の探検グループが夏を迎える前の氷の厚さを直接計測しました。計測した海域はこれまで3・4mの海水で覆われていた場所です。その計測結果は、なんと、平均で1.77mしかなかったというものでした。北極の反対側の極である南極の氷は海水ではなく氷床厚いところで約3km以上もあります。平均で、2000m程度の厚さです。今の北極の海水は、南極の1000分の1の厚さもないこととなります。これは、富士山と人間一人の違いに匹敵します。北極海に海水が浮かんでいる状態にあるというのは、奇跡の状態と言えます。南極大陸の氷床が“石鹸”であるとするならば、北極海の海水は“シャボン玉”のようなものです。石鹸は傷つきますが、その大まかな形状までは変化しません。しかし、シャボン玉はたった一箇所傷つくだけで、全てが消えてゆく儂いものです。今、私たちは、その瞬間に立ち会っているのかもしれない。

昔の北極海：「氷ができる量」＝「氷が融ける量」

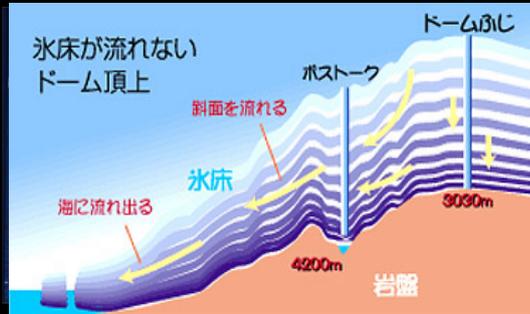
⇒ 年平均すれば変化なし

今の北極海：「氷ができる量（減少）」>「氷が融ける量（あまり変化なし）」

⇒ 年平均すれば減少

北極と南極の氷の厚さの違い

南極大陸 氷床厚分布



北極海 海水厚分布

2009年北極海横断データ(3-5月)

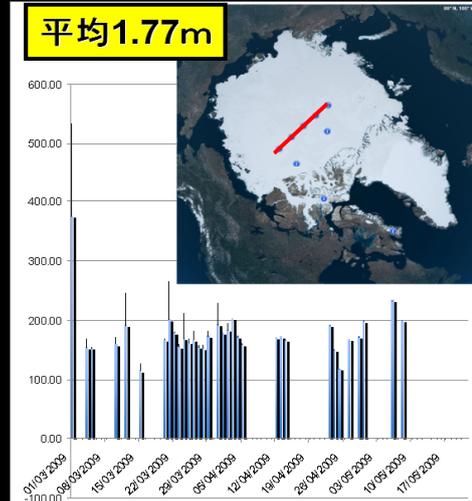


図 6：南極氷床と北極海氷の違い（左図：国立極地研究所 HP、右図：Andy Pag 氏提供）。

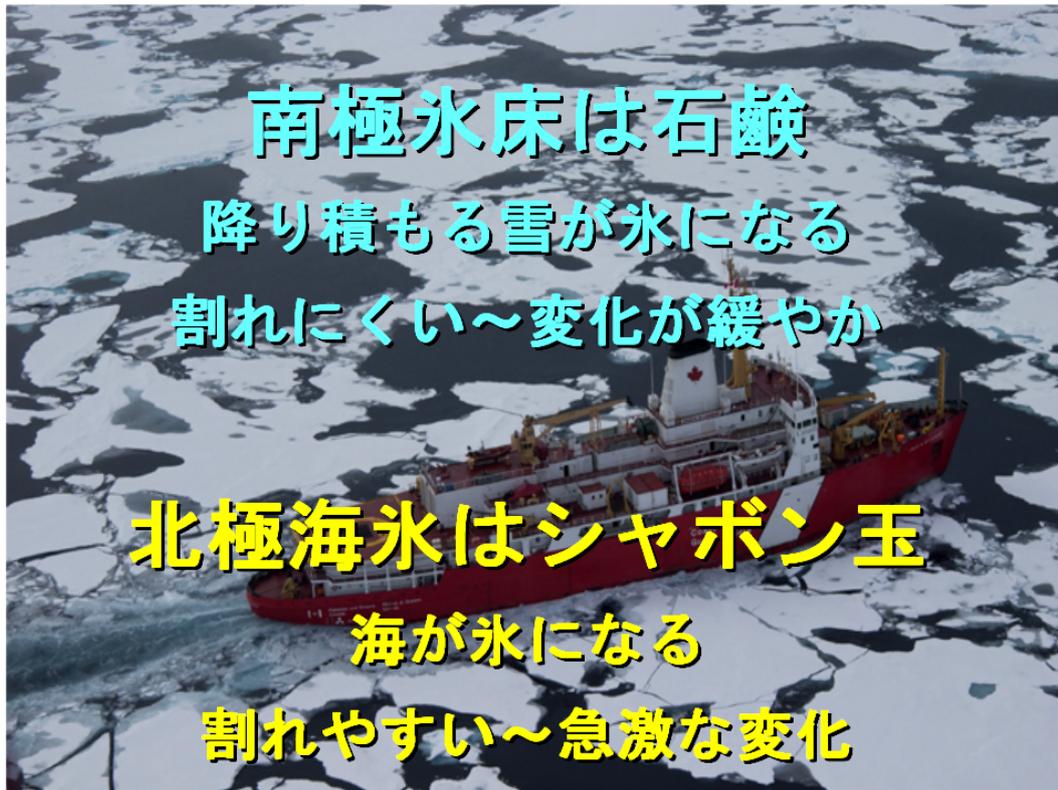


図 7：北極の氷は“シャボン玉”

氷ができないこと、海の温暖化

◎海洋循環

海が温まれば、氷はできにくくなります。海氷が減ったから、太陽光が熱を吸収する海に入り海水温が温まったのだと説明されている場合があります。これは、事実ですが、変化のきっかけを説明しません。そもそも、北極海の大部分が海氷が覆われていたときから、海の温暖化は進行していました。太陽光を反射する氷があるのに、北極海の内部の海水が温まったのは何故でしょうか？ どこかから運ばれてくる熱が増えていなければ、このようなことはおきません。考えられるのは、海流による熱輸送の増加です。今の北極海の変化の始動は、海流の強化と熱輸送の強化によるものです。

大規模の海洋表層循環理論の基礎となる観測が行われた海は、太平洋でも大西洋でもなく、北極海です。北極海というより北極“洋”と呼んだほうが本当は良いでしょう。北極海は、世界七つの洋の1つであり、他の大洋と同じメカニズムで現象を説明することができます。表層の海流が生じるメカニズムを解明した観測（北極横断漂流航海：氷に閉じ込められて）がノルウェーのナンセンらにより行われたのは、今から100年以上も前になります。その時代の北極海の氷の動きは非常にゆっくりとしたもので、北極海を横断するのに3年を要しました。海洋循環論を生み出した観測とは、氷の動きが風の方向と一致しないと言うものでした。海氷は風が吹いてゆく方向に対して、右手にずれていることが分かったのです。海面から40m深さまでの海氷の下の流れは、風が吹いてゆく方向の右手90度であることがわかったのです。海流は、風の吹いてゆく方向に流されて生じているのではないことが分かりました。大気の高気圧や低気圧と同じく、地球自転の影響を受け、圧力の高いほうを右手に見て流れていることが分かりました。海の圧力はどうやって決まるのでしょうか？ 風の吹いてゆく方向に対して右手90度の方向に水は一旦集められることとなります。身近な日本の東の海では、北側に偏西風（東向きの風）、南側には貿易風（西向きの風）が吹いています。つまり、偏西風と貿易風に挟まれた海では、その中央に水が集まってくることとなります。水が多く集まるところは、海面が盛り上がり、海面より下に潜れば、その圧力は周囲より高くなります。そうして、できているのが、太平洋の時計回りの垂熱帯循環です。

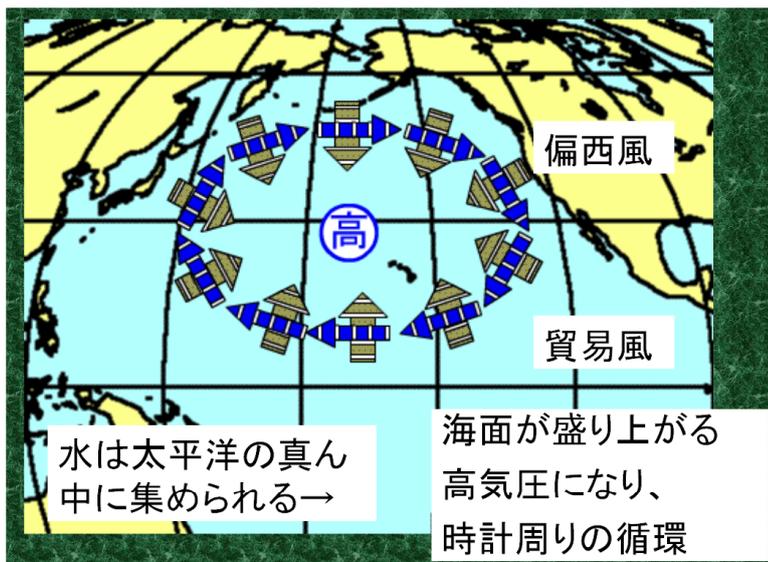


図8：海流の生成メカニズム（酒井敏著「実験室の中の空と海」，
http://www.gfd-dennou.org/arch/gfd-exp/gfd_exp/exp_j/index0.htm）



図9：海氷運動強化のメカニズム（アイスクリーム理論）

北極海の内部の海水が温暖化するためには、南からより多くの暖かい水が運ばれる必要があります。そのためには、海洋を駆動する海面を擦る力が大きくならなければなりません。氷で覆われていた時代の北極海の場合、海面と面しているものは、大気ではなく海氷であり、擦る力の主役は、風ではなく、海氷の運動になります。海の温暖化は海氷の運動の強化によって起こったのです。何故、海氷の動きは速くなったのでしょうか？ 海氷を動かす主たる駆動力は風です。風の強さは、実はあまり変化していませんでした。駆動力が変わらないのに、氷の動きが変わるのというのは不思議に思うかもしれませんが、そんなに不思議ではありません。自転車で走るとき、一生懸命、こげばこげほど、速く走れます。しかし、ブレーキを握りながら、こいだらどうでしょう？ なかなか、進みません。海氷の変化を考える際に、「できる量」と「融ける量」のバランスに注目しました。それと同じように、海氷を動かすものと、止めるものとのバランスを考えることが重要になります。海氷を止めようとするものは何か？ それは、沿岸付近で氷が陸にひっかかることです。ちょうど、自転車のブレーキのゴムが車輪と接触しているのと同じです。もう少し、分かりやすく考えて見ましょう。冷凍庫から取り出したばかりのカップアイスは縁のところまで凍り付いていて、スプーンで回そうとしても容易には回りません。しかし、縁近くのアイスクリームが緩むだけで、小さい力でも簡単に回るようになります(図9)。北極海の海氷の動きは、ちょうどカップの中のアイスクリームと同じです。温暖化の影響で、じわじわと南から氷が緩んでくれば、海岸線付近で働いていた摩擦力は一気に低下し、海氷は効率よく動けるようになるのです(図10)。

“北極の海氷はシャボン玉”というフレーズを使いました。陸近くのごくごく少しの氷が緩むだけで、全体にその影響が及んでしまうことがお分かりいただけるかと思います。ある場所での少しの変化が、全体を巻き込んでゆく変化のなっていると言えます。このことが、“北極海の海氷はシャボン玉”というフレーズを使った理由です。変動ではなく変化を議論するときに“臨界点”(Tipping point)という概念が用いられることがあります。地球気候システムの1要素である、北極海の気候システムは、“臨界点”を持つシステムであることも想像できるかと思います。

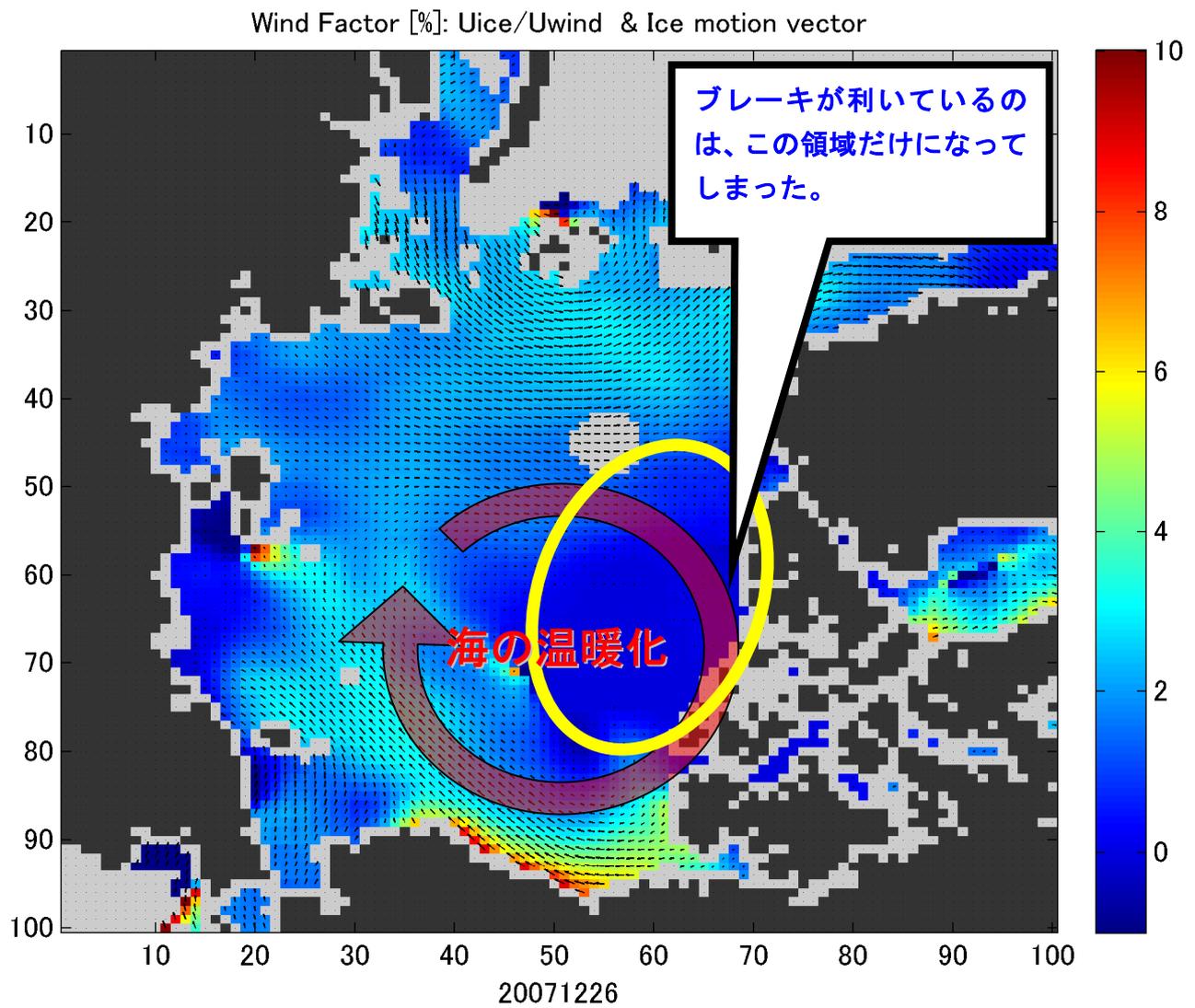


図 10 : 2007 年 12 月 26 日の海氷速度 (ベクトル) と海氷速度 / 風速 (トーン)
 氷の動きが緩慢なのは、海岸線まで密に一枚岩の氷が張り詰めているグリーンランド北部域からカナダ多島海沿岸の領域だけになってしまいました。

◎海の温暖化（温度ではなく、熱量で温暖化を考える）

海洋循環が強くなっていることについて説明してきました。実際、北極海は温暖化しているのでしょうか？ 温暖化は、“温度”で語られることが多いですが、異なる物性をもつ物質が共存するシステムに関して温暖化を議論する場合には、温度ではなく“熱量”が重要になります。同じ質量の大気と海水を比較した場合、海水の比熱は大気の約4倍です。地球上にある大気の量は、簡単に求めることができます。1気圧の世界に私たちは暮らしていますが、1気圧とは、水深10mの水圧（大気圧は除く）に相当します。1m²あたり10トンの大気が私達の頭に押し掛かっていると考えてください。充分、大きな質量が人間に掛かっているのですが、地球表面の約70%を多く海洋の平均水深は3800mもあります。このことから、地球の海水の質量は大気よりもはるかに大きなものであることが分かります。比熱を考慮すると、海水2.5m分の1℃の温暖化と全大気の1℃の温暖化が等価になります。全大気が1℃上昇するときの温暖化を“熱量”であらわすと、約10MJ/m²（MJ：メガ・ジュール）になります。北極海の温暖化をこの熱量の尺度で見ゆきましょう。図3で示した温度上昇が仮に、全大気にわたるものであるとするならば、北極海上の大気の温暖化は熱量で表すと70MJ/m²になります。かつては、夏でも海水で覆われ、砕氷船ではない「みらい」が進入されできなかったベーリング海峡の北の北極海の温暖化を熱量で考えましょう。海洋の上層150mの深さまでに蓄えられている熱量は、1992年には、270MJ/m²であったものが、2008年には、510MJ/m²にまで増加しています。その差は、240MJ/m²であり、大気温度の変化に換算すると24℃の温度上昇に相当します。熱量の尺度で見ると、IPCC第4次報告書に示されている21世紀末の温暖化予測結果を遥かに上回る温暖化が既に進行してしまったことが分かります。温度という尺度で見ると、0-150mの海水の温度変化で見るとわずか0.4℃の変化です。人間の生活観からすれば、さほどの温度変化ではありません。しかし、海氷の減少にとって重要なものは“熱量”の変化です。

◎水位変化

北極海に浮かぶ氷が融けても、水位は上昇しないという説明がされることがあります。これが事実であるためには、2つの非現実な条件が必要になります。1つは、海水の「温度変化」が無いという条件です。もう一つは、海氷や海水に動きがなく静止しているという条件です。論よりは証拠、最新の北極海のデータを見てみましょう。図11は、基準海水で満たされているときの海面の高さからずれを表しています。これまでよりも高くなっているところもあり、低くなっているところもあることが分かるかと思えます。中心部が高くなっていますが、周辺部では低くなっています。全体を、均してしまえば変化が無いように見えます。ということは、何を物語っているのでしょうか？ 周辺部にあった水が中央部に集まってきたことが分かります。図8で示した海流の生成メカニズムを振り返ってみましょう。中央部に水が集められているということは、時計回りに海面を強く擦られていることを示唆します。時計回りに海面を擦るものは、海氷の時計回りの運動です。現在、北極海の時計回りの海氷運動速度は昔の約4倍にまで強くなっています。現実の北極海の水位変化に最も寄与しているものは、海氷運動の強化による影響です。水位分布の変化は、海の圧力分布に関係します。今の北極海では、海洋の高気圧の中心部が強くなり、海洋循環が強くなっていることが分かります。2008年は、これまで観測で、過去最大の海水回転速度・海洋循環でした。最大の海洋循環になれば、当然のことながら、南から海流で運ばれる熱量も増加します。「氷が動く→海の温暖化→氷ができない→夏季に日射を受け取り温まる→氷が減少する→氷が更に動きやすくなる→海氷減少の戻らないループに入る」ことが起きてしまうのです（図13）。

Dynamic Height at 100dbar relative to 800dbar

Background: Arctic Ocean Atlas (1948-1993 mean)

Dots: 2008

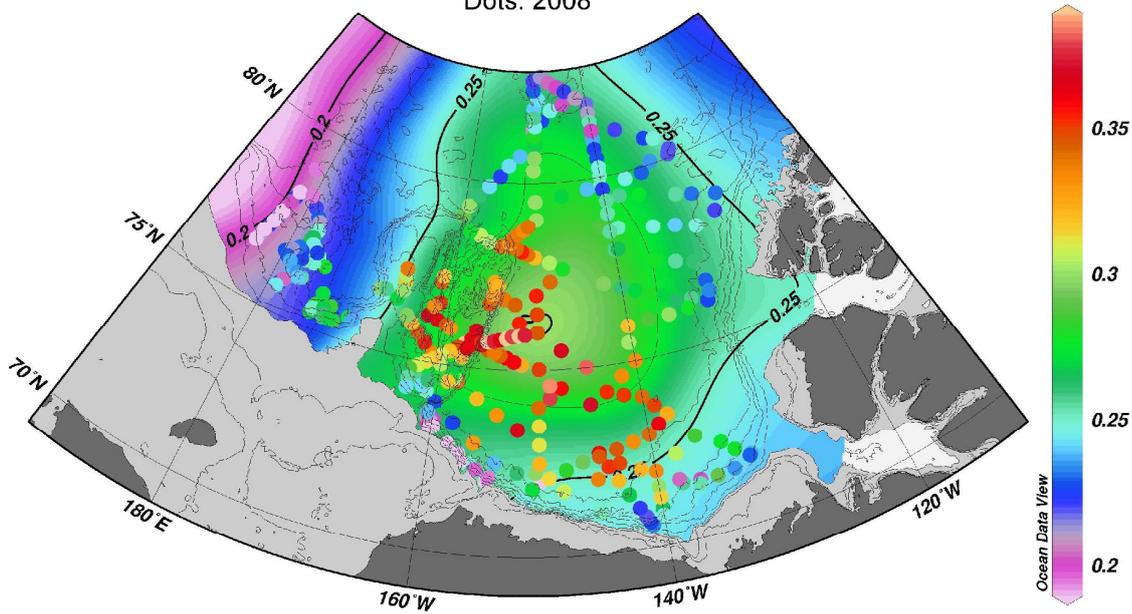
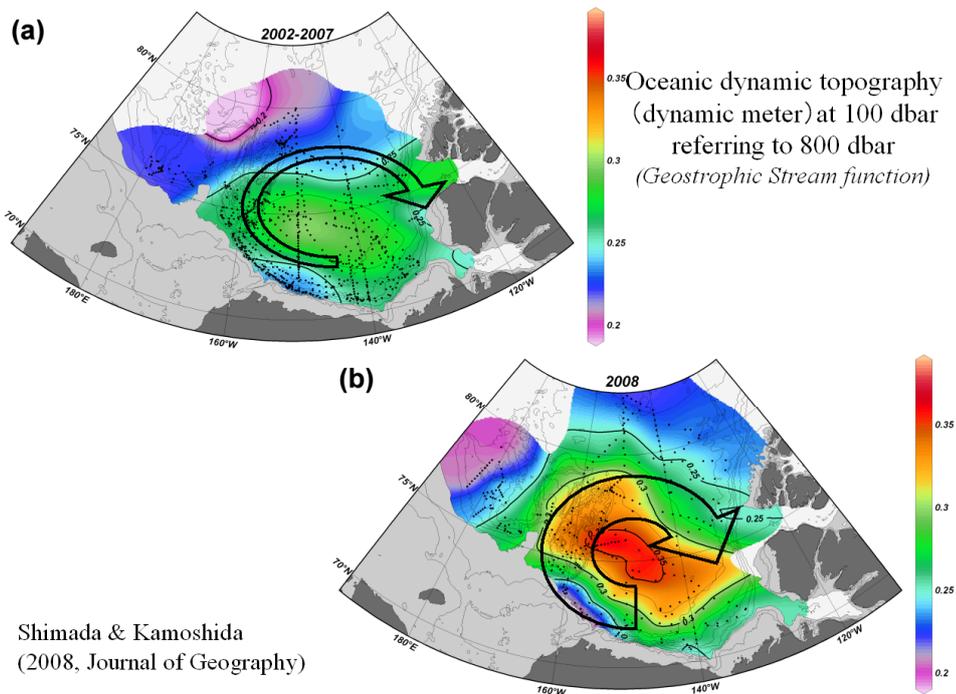


図 11 : 水位の変化を説明する図。この図は水圧 100dbar (約 100m深) の圧力偏差 (水位偏差[単位m]に直したものを) をあらわしている。背景は 1948-1993 年の平均値で、点は 2008 年の観測値。中央部では、背景よりも 0.05m高い。海面付近でも、0.05m程度高くなっている。しかし、周辺部では、逆に 0.05m程度低くなっている。



Shimada & Kamoshida
(2008, Journal of Geography)

図 12 : 海洋循環の強さの変化。(a)2002-2007 年の平均、(b)2008 年

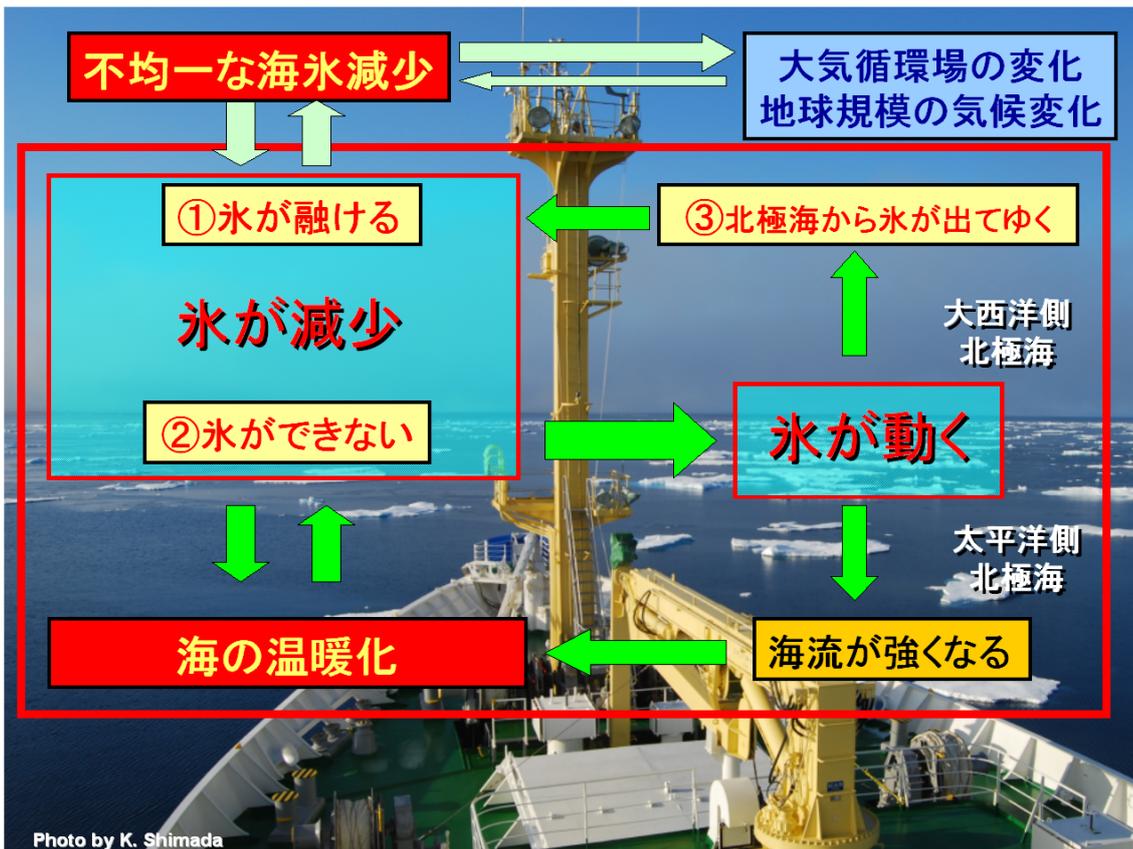


図 13 : 海氷減少のまとめ

海氷と気候

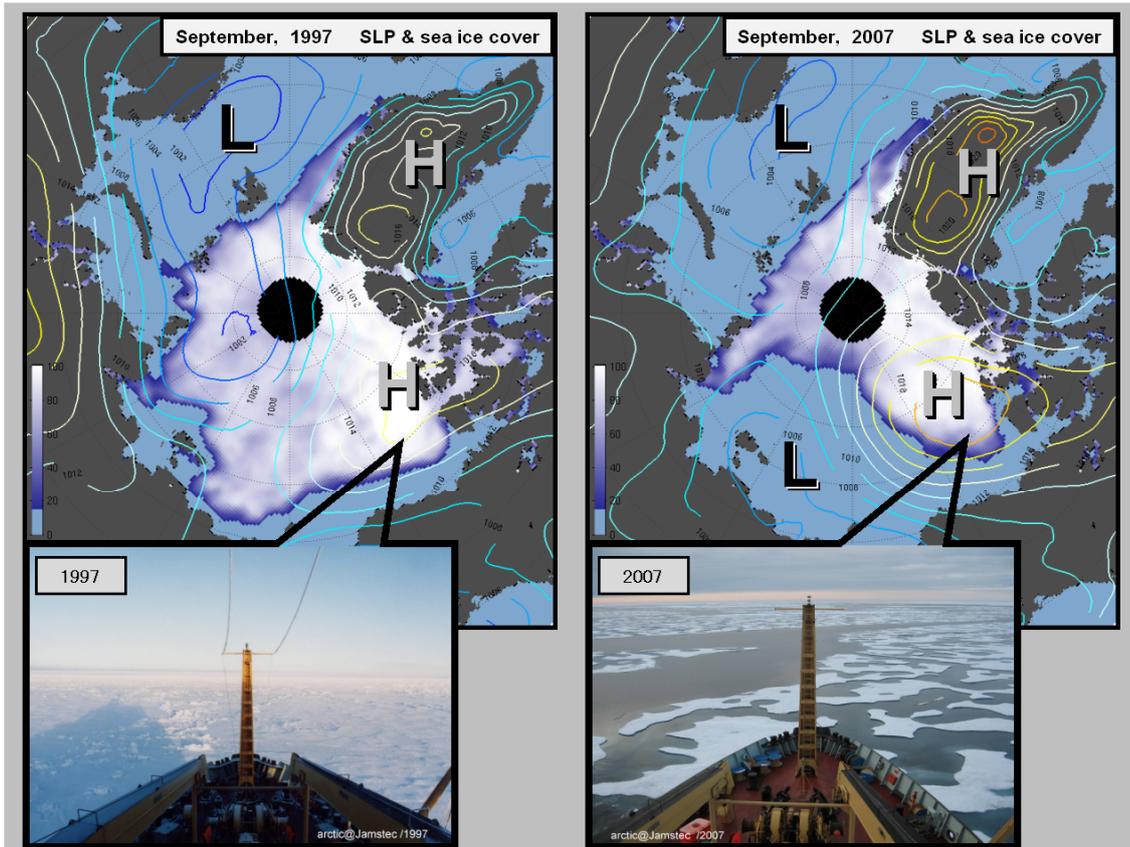


図 14 : 1997 年 9 月と 2007 年 9 月の海氷分布

◎東西のコントラストが南北循環⇒大きな気候変化をもたらす

北極海の海氷減少が報じられますが、北極海全体の海氷面積の減少ばかり注目されていて、どの場所で減少しているのかまで報じられることは、あまりありません。「今後、どれぐらいの速度で海氷面積が縮小してゆくのか?」「北極の変化は低緯度地域にどんな影響を与えるのか?」を考えるときには、“どの場所で”減少しているのかを知ることが重要になります。最近 10 年間で、どの場所で海氷面積は減少したのでしょうか?それは、太平洋側北極海です。時計回りの海氷運動・海洋循環の領域で海氷・海水とも北上する場所での減少が顕著であることが分かります。図 14 には、9 月の海面気圧を重ねて描画しています。高気圧 (H) と低気圧 (L) が横たわっているのが分かります。低気圧の領域は、よく見ると、海氷が無く海面が露出している領域であることが分かります。一方、高気圧の領域は、グリーンランド氷床や北極海でも海氷に覆われた場所に存在します。氷と水を比べれば、水のほうが温かいものです。暖かい場所では上昇気流が、冷たい場所では下降気流が起きます。上昇気流が起こっているところでは、地球表面近くの空気は持ち上げられるので薄くなり、気圧は低くなります。一方、下降気流のあるところでは、上から地球表面に空気が押し付けられるので気圧は高くなります。夏も冬も氷に覆われているグリーンランド付近の大気圧はあまり変わっていません。大きく変わっているのは、太平洋側北極海です。太平洋側北極海では、東に高気圧、西に低気圧が横たわる大気循環場になっています。これは西高東低の気圧配置と反対であることが分かります。つまり、北風の逆である南風が吹くことが分かります。このような、冬の間、温かくなった海水の影響で十分成長できなかった薄い氷は、さらにダメージを受けやすくなります。このような気圧配置が形成された要因は、夏を迎える前の海氷の厚さの分布にあります。海の温暖化の影響を受けたベーリング海峡の北方沖にある氷は薄く、

真っ先に融けきってしまいます。一方、カナダ沖には、北から運ばれてくる古く厚い氷があります。この氷はなかなか融けきることができません。その結果、西には海氷がなく東には氷が残るといった分布が形成されます。融けきって海面が露出した場所では、表面が暖かいので上昇気流が起き低気圧場になります。一方、海氷に覆われた場所では表面は冷たく高気圧場が形成されやすくなります。その結果、東高西低の気圧配置が形成され、南風が卓越するようになります。すると、薄い氷は更にダメージを受け、海氷は消滅しやすい場になります。

◎北極海の連鎖反応

2007年の海氷面積史上最小値を理解するためには、先行して起こっていた海洋の温暖化と、海氷運動の強化の理解が重要です。海洋の変化、海氷の変化が大気の変化を呼び起こし、さらに海氷自身をも減少させ、海洋循環を活発化させる大きな変化が起こったのが2007年です。2007年の海氷減少は、太平洋側北極海に形成された高気圧・低気圧が原因であるとする研究もありますが、海氷面積と気圧分布の相関が高いことが分かっただけで、何が、高気圧・低気圧を形成したのか、その原因は何であるのかまで言及できていません。将来の、北極の姿を知るには、相関だけではなく、メカニズムの理解が必要です。急激に変化するということは、連鎖反応が起こっていること意味します。1+1=2ではなく1+1=10になるような、反応です。ドミノ倒しのように連鎖反動的に加速度的に変化する北極の最初の1枚目のドミノは何であるのか？を見極めることが、将来を知るためには何よりも必要です。

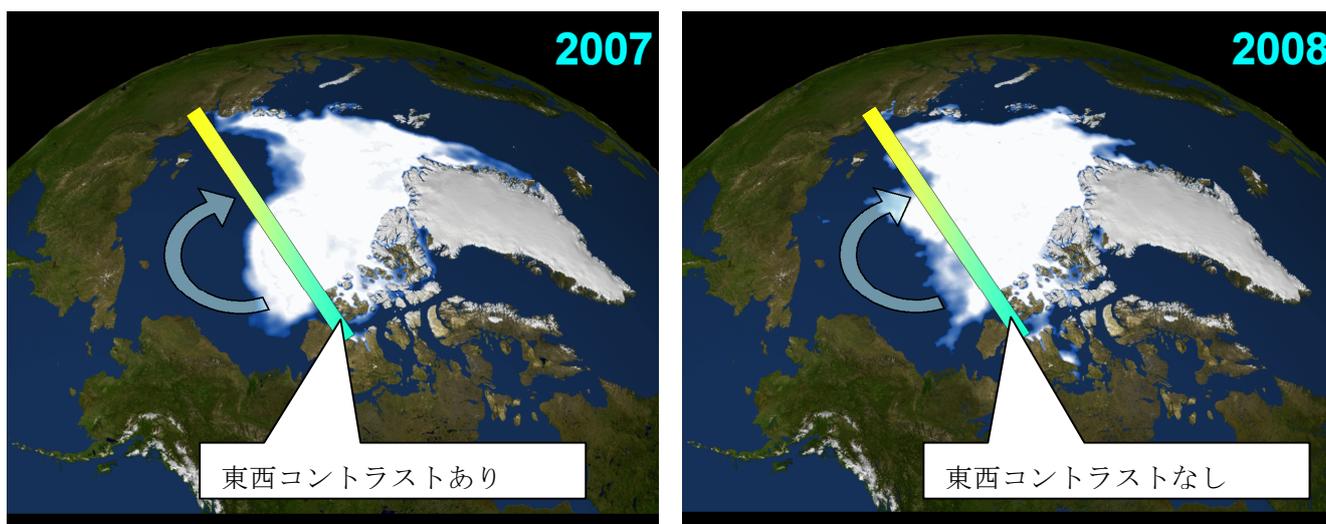
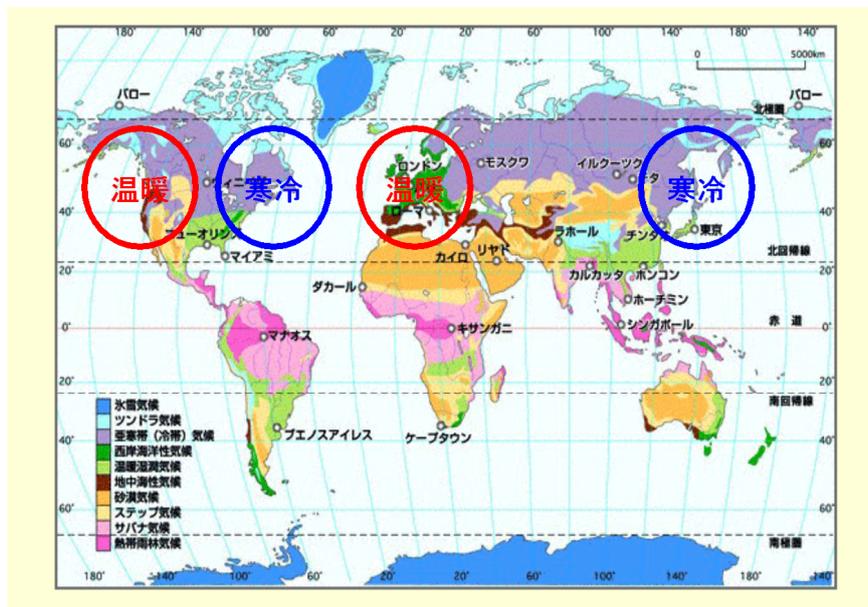


図 15 : 2007年と2008年の違い (背景図はNASA ホームページより)

今後の北極海の海氷の行方を考えるのに、2007年と2008年の海氷分布の違いと大気を含めた気候学的差異が重要になります。2008年は、2007年に肉薄したものの、2007年の最小面積を下回ることなく終わりました。その要因も、夏を迎える前の海氷分布にあります。2007年秋に、難攻不落であった、カナダ側の厚い海氷がぼろぼろになり大規模に崩壊しました。沿岸域との摩擦力が低下し、崩壊した厚い氷は、わずか3ヶ月で180度も回転し、2007年に最も沖合いまで海氷が後退した場所に運ばれました。この氷は、それなりに厚かったので、翌年2008年の夏を融け切らずに越すことができました。その結果、2008年は、2007年のように西側では海氷が無く、東側には海氷が存在するという東西コントラストの大きな海氷分布ではなく、東西には変化が無く南北方向に海氷の有無が顕著である分布となり

ました。そのため、2007 年のような、東高西低の気圧配置は形成されませんでした。つまり、南風による暖気を効果的に取り込むような大気循環場を作れなかったこととなります。2008 年は、海氷減少の更なる一押し役を担う、南風を形成できなかったことが、2007 年の海氷面積を下回らなかった要因です。しかし、海氷下の海洋は循環の強化により温暖化が進行し、厚い氷はさらに縮小していることが分かっています。宇宙から見た海氷面積は 2007 年を下回れなかったものの、面積に厚さを掛けた海氷総量は確実に 2007 年を下回っています。非一様な海氷減少が起こると、南北風が形成されることは既に述べました。これは、極域と中緯度域との間の熱交換が活発化することを意味します。海氷が減少してゆく過程で、どれだけ、東西にコントラストのある減少パターンを呈するのかが、北極以外の地域の気候を考える上でも重要になります。北極と熱帯の狭間に位置する日本の気候は、全く北極とは関係がないと呑気にしてはいられません。地球上の気候分布を見れば、地球表面状態の東西コントラストが重要であるかは、想像がつくことと思います。

○雑談 1 (気候分布は暗記しなくても、理解できる)



出典：探検しようみんなの地球
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sanka/kyouiku/kaihatsu/chikyuu/statistics/nature/graph_02.html

図 16：ケッペンの気候図。東西方向の表面状態の違いが気候を決めている。

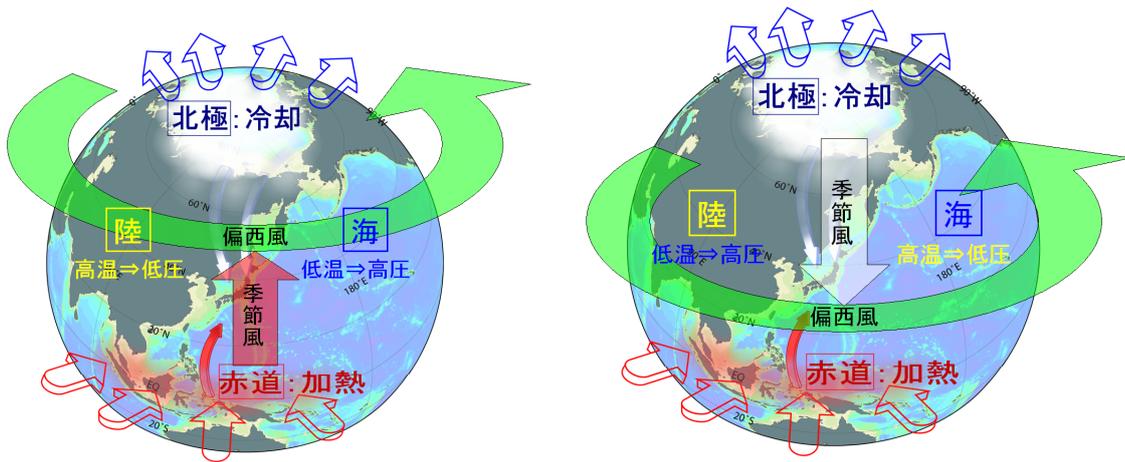


図 17：ユーラシア大陸の東端に位置する日本やアメリカ東海岸では、東高西低（夏）、西高東低（冬）の形成される。アメリカ西海岸やヨーロッパでは、東高西低（冬）、西高東低（夏）になり、季節変化が小さい。

○雑談 2

日本の四季を形成するもの、南北気候差を生み出すものとして、地球表面の東西コントラストに加えて、海流系も重要。日本など大陸の東海岸に位置するところは、暖流[黒潮、湾流]（北上流）、寒流[親潮、ラブラドル海流]（南下流）が遭遇するところ。

海面水温の気候図は？

Monthly Mean SST Normals in the Global Ocean (Mar 1971–2000)

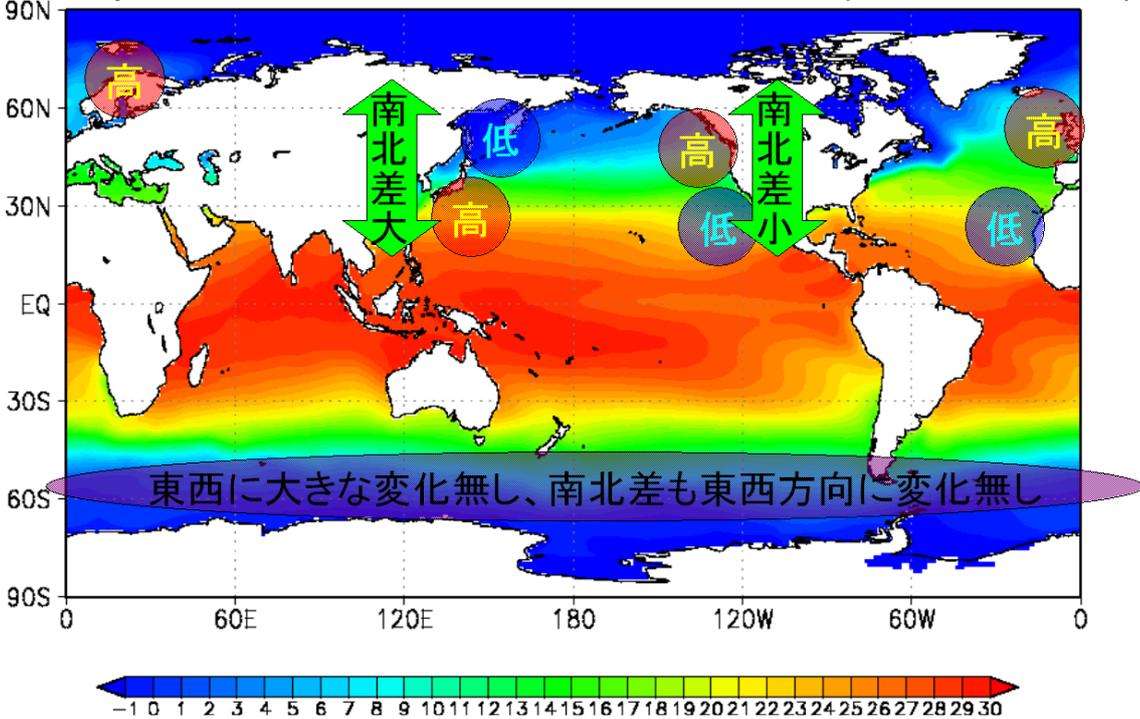


図 18：海面水温分布（海の気候図）丸印ないの高、低は、同緯度帯で見たとき相対的に高温であるか、低温であることを示しています。

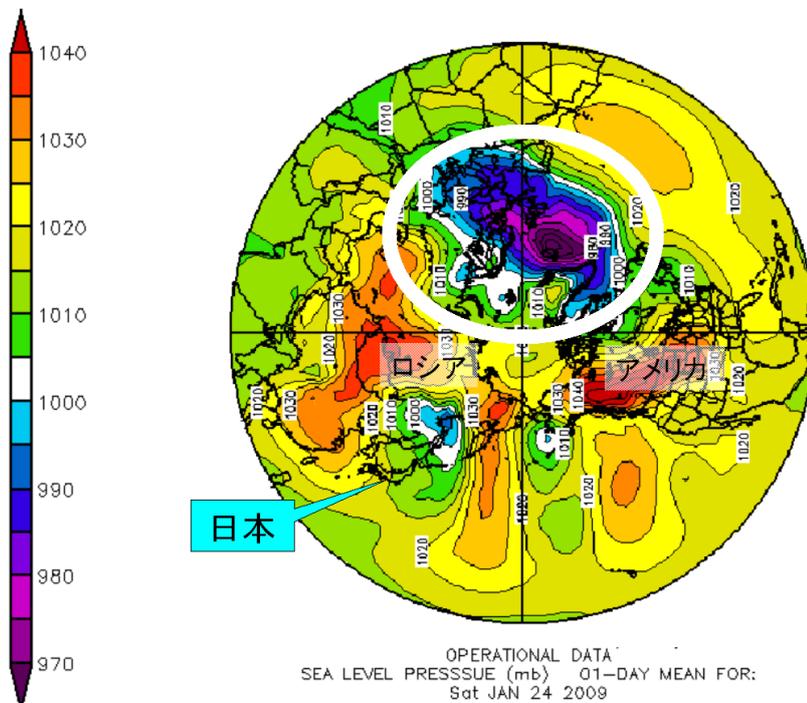
○雑談 3

図 18 を見ると、ニューギニア付近の海面水温が最も高いことが分かる。温度が高いということは、そこで上昇気流ができる。上昇する空気は水蒸気をたくさん含んでいる。上昇すると、空気は冷えて凝結する。水を水蒸気に蒸発させるのには、かなりの熱を水に加える必要がある。水蒸気から水に凝結するときはその逆で、空気にかかなりの熱が戻される。つまり、空気は乾燥し、暖められる。そしてどんどん上昇してゆくのが、赤道大気システムの特徴になります。この、上昇気流が起こる場所が変化するのが、エルニーニョです。大気と海洋が相互作用しながら、地球規模の変化をもたらします。

海水が水蒸気に、水蒸気が水滴（雲、雨）にといった具合に、水の相変化が起こるところでは、大きな変化が起きます。

○雑談 4

逆に、海面水温が最も低いところは何処でしょう。北極周辺です。その中でも、最も重い水があるところは、グリーンランド海です。ここで、深層水ができていることは有名ですが、忘れてはならないことがあります。海が冷やされるということは、大気は暖められていることを意味します。深層水が形成される冬の気はどのような状態なのでしょう？ 強い低気圧があり、低気圧が形成されている領域の表面温度は同じ緯度帯の中で最も高くなっていることが分かります。ちなみに、北緯 80 度のノルウェーの島（太陽の無い季節だというのに）と東京ではほとんど温度は同じです。周りはマイナス 30℃の環境の中に、海水温で決まってしまう 0℃領域があることがポイントです。30℃もの温度格差があれば、ものすごいことが起きます。大気上昇気流、海は深層まで沈む下降流、地球の大気海洋を血液とするならば、それを循環させる心臓部になっていることが分かります。



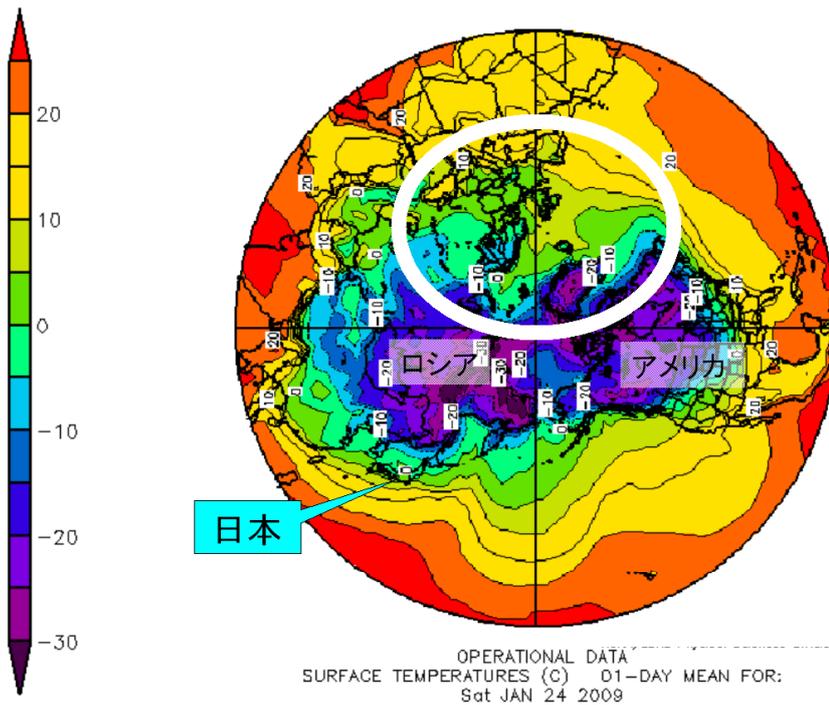


図 19：北極から見た、
2009 年 1 月 24 日の海面気圧分布と表面気温分布（NOAA ホームページ）

今後の見通し

グリーンランドとカナダ側の北極海にある動きにくい海氷がカナダ側から次々と崩壊して動きやすくなっているのが今日の姿です。図 15 のように南から徐々に崩壊し、北極海の海氷は縮小してゆくことでしょう。この部分の海氷の後退は、東西のコントラストが無くなってゆく変化ともいえます。つまり、海氷面積減少速度という点では、最近数年の減少速度ほどではないかもしれませんが。臨界点を越えて、次なるステージに向かう途中に現在はあるのではないかと思います。

グリーンランド北岸にまで崩壊が達したところで、一連の減少は収束を迎えることでしょう。そして、北極海が夏を越すことのできない氷だけで覆われるようになるかもしれません。言い換えると、オホーツク海や南極海のように、夏を越せない冬にだけ凍る海に変わることを意味します。こうなると、沿岸部の氷がすべて緩んだことになり、海氷の動きに対するブレーキが消滅します。風の強さが変化しない限り、海氷運動の速度は急激に大きくなることはありません。また、海洋循環も一気に強くなることはありません。つまり、一種の平衡状態になると考えられます。今は、北極海は“変化”の時代ですが、将来は、平衡点まわりの“変動”の時代、もしくは“緩やかな変化”の時代になるのではないかと思います。緩やかといっても、今とは違った姿の北極です。石鹸がシャボン玉になり、臨界点を越え、石鹸水に戻ってゆくようなものかもしれません。そのときの月から見た、地球の姿はどうなっていることでしょうか？

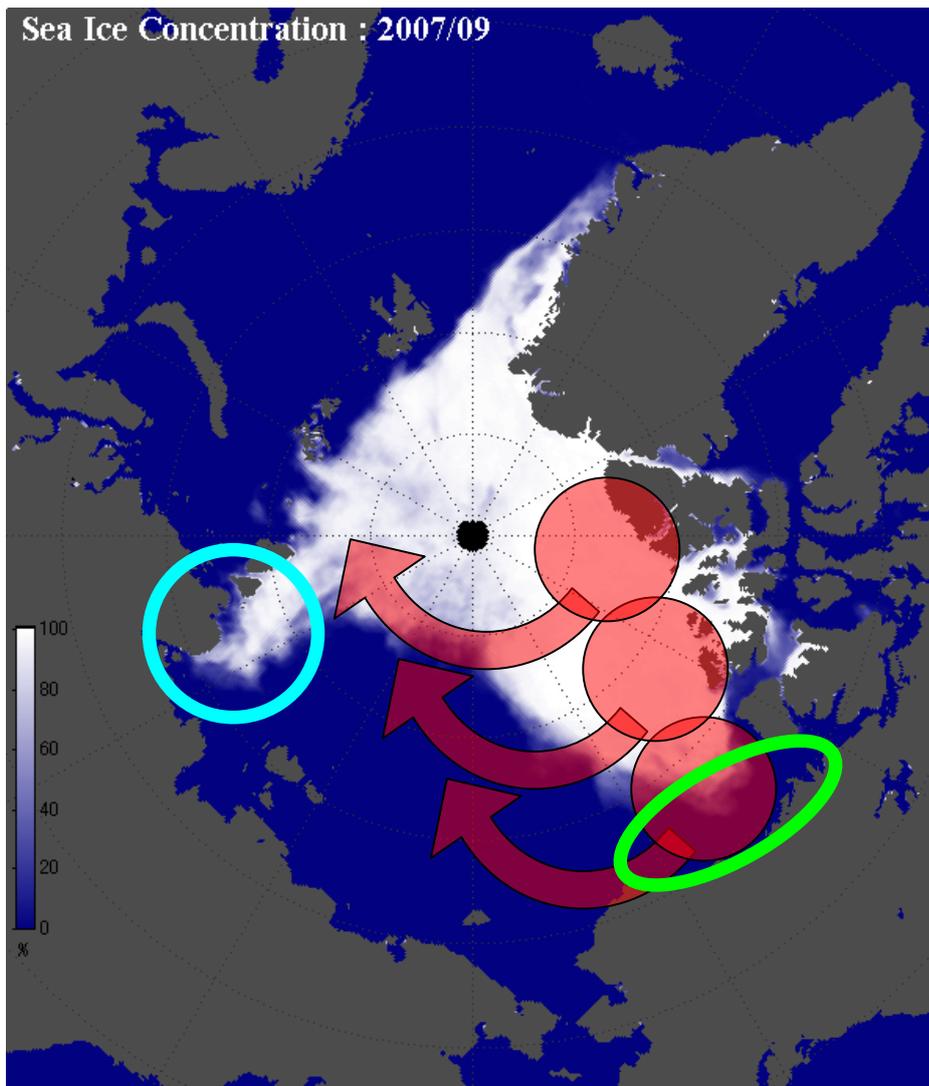


図 20：北極海氷の行方・・・(背景は、2007年9月の海氷密接度分布)

カナダ側の厚い氷、薄くなり崩壊し、夏を越すことができる海氷が減ってゆく。北米大陸カナダ沿岸域(緑領域)とシベリア沿岸タミール半島付近(水色領域)の越夏する海氷が、夏季に安定的に消滅するようになれば、北極航路(北西航路、北東航路とも)の実用性が具体化するかもしれない。