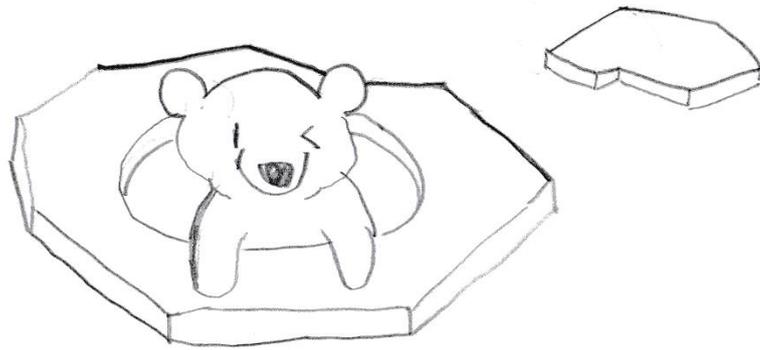


# 北極の氷どうやって溶ける？

～実験と衛星データから北極の海氷を知る～



相模台小学校 6年

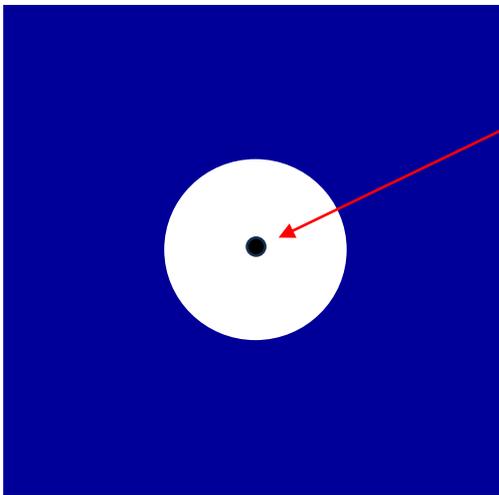
# 目次

1. 研究の動機	1
2. 研究のめあて	1
3. 事前調査	2
3-1. 文献から調べる	2
3-1-1. 北極とは	2
3-1-2. 北極海とは	2
3-1-3. 白夜がある	2
3-1-4. 北極の氷	3
3-1-5. 気温	4
3-1-6. 人間との関わり	4
3-2. 今日時点の北極を衛星データ（2024年8月10日時点）から見る	5
3-2-1. 海氷密接度から見る	5
3-2-2. 海氷厚とメルトポンド割合から見る	6
4. 氷を作り溶かす実験	8
4-1. 氷を作って塩分濃度を調べる	8
4-1-1. 1回目（ガラスの器で氷を作る）	8
4-1-2. 2回目（発泡スチロールの器で氷を作る）	12
4-2. 氷の溶け方の実験	15
4-2-1. 形の違う氷の溶け方の実験	15
4-2-2. 上から溶けるか下から溶けるかの実験	19
4-2-3. 浮かぶ氷の密集具合の違いによる実験	24
4-2-4. 溶かす実験のまとめ	29
5. 衛星データの変化から考える	31
5-1. 1980年以降の海氷の年代ごとの変化を見る	31
5-2. 2023年（去年）の春から夏の変化を見る	34
6. 追加の実験	39
6-1. 氷のでき方の実験（塩分濃度の違う氷を作る）	39
7. 研究の考察・まとめ	42
8. 感想と反省	45

## 1. 研究の動機

北極にある氷は温暖化により年々溶けて小さくなっているという。北極点を中心にまわりから溶けていったら、丸く小さくなっていくと思うのに、衛星データから今の北極海の氷の形を見ると、いびつで「丸い形」というわけではない。なぜ、こんな形をしているのか不思議に思った。ちょうど北極の衛星データを自分で使えるサイトがあることを JAXA の情報で知ったところで、見ていたらこの疑問がわいた。

想像した氷の形



※どちらも中央の黒い点は北極点  
白いところが氷  
青いところは海

今の北極海の氷の形



出典：(1) 国立極地研究所 準リアルタイム  
極域環境監視モニター VISHOP より

## 2. 研究のめあて

氷を溶かす実験を行ったり、衛星データを使ったりして、北極の氷はどのように溶けていくのかを明らかにしたい。(北極には陸にも氷があるが、今回は海の氷を調べる。)

### 3. 事前調査

まず、研究の前に北極について基本的な情報を調べた。

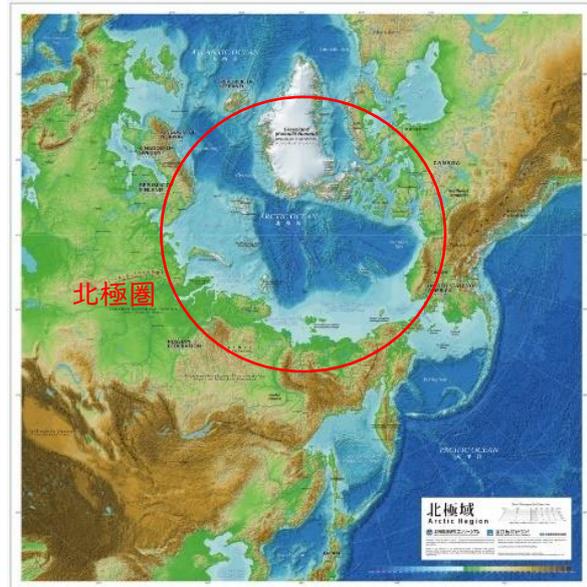
調べるにあたり参考文献(2)～(10)を参考にした。(巻末を参照)

#### 3-1. 文献から調べる

##### 3-1-1. 北極とは

どこまでを北極と呼ぶかは明確に決まっていない。南極は氷の下に陸がある「大陸」なのに対して北極は「海」の上に氷が浮かんでいる。北極の中心は北極点。「地球儀の軸(地軸)になっているところ、北緯90度が北極点」であり、北極点は北極海に位置している。大陸のようにはっきりした境が無いので北極のとりえ方も人によって違ってしまふとのこと。

一般的に北極圏と呼ばれているのは「北極点を中心に北緯66.5度より北のエリア」のことである。



出典:(9) 北極環境研究コンソーシアムおよび国立極地研究所 北極域地図(地名入り):通常版に補記

(図 3-1)

##### 3-1-2. 北極海とは

北極海は北極圏の中央に広がり、その3分の2を占める。ユーラシア大陸と北アメリカ大陸、グリーンランドに囲まれている。その面積は南極大陸とほぼ同じで、どちらも約1,400万km<sup>2</sup>ほどの大きさである。(だいたい日本列島の37倍の大きさである。)

北極海の海水には1リットルあたり約30gの塩が含まれている。(海水の塩分の濃さは太平洋やインド洋では1リットルあたり約35g、大西洋では1リットルあたり約37gと場所により異なる。)

##### 3-1-3. 白夜がある

夏には一日中太陽が沈むことなく、太陽は地平線の上を転がるように動く。これを白夜という。反対に冬は日中でも太陽が昇ることがなく、暗い状態が続く。これを極夜という。地球の地軸は太陽に対して少し傾いている。そのため、地球と太陽の位置関係によって北極では一日中太陽の光が当たり続けたり、逆にまったく当たらなかったりする時期がある。

### 3-1-4. 北極の氷

北極圏にある氷には陸の氷と海の氷の2種類の氷がある。陸に降り積もった雪は固まって「氷床」になる。海水が凍ってできた海に浮かぶ氷は「海氷」とよばれる。海氷の厚さは平均数メートル程度である。今回の研究では、海氷のほうを調べたいと思う。

※「陸でできた氷」と「海でできた氷」の種類が勘違いしやすいので参考文献(7)より一部引用してまとめる。

#### 陸でできた氷

<p><b>「氷河」</b> 陸地をおおい、低い方に流れる氷のかたまり。ヒマラヤやアルプスなど山岳地域では、谷にできる。南極・グリーンランドでは、氷床の中で特に流れの早い部分を言う。</p>	<p><b>「氷床」</b> 大陸規模の広大な地表をおおう氷河(氷のかたまり)。南極大陸とグリーンランドにある。</p>
<p><b>「冰山」</b> 氷河や氷床の氷が海におし出されて割れた氷のかたまりで、水面上の高さが5mを超えるもの。 <u>海にただよっているが、海氷とは異なる。</u> 水面上には約10%出ているだけで、大部分は水面下にある。</p>	<p><b>「棚氷」</b> 氷床はゆっくり海に向かって移動しており、やがて海岸から海に押し出された氷は、平らで大きな棚氷となる。南極氷床の面積の約11%がこの棚氷で占められている。</p>

#### 海でできた氷

<p><b>「海氷」</b> 海の水がこおってできた氷。 海面がおよそマイナス2℃に冷やされるとでき始め、小さなものが集まり大きく成長していく。何年もかけて厚さ4~5mに達する。季節によって変化する。</p>
<p><b>「流水」</b> 海面をただよう海氷。</p>
<p><b>「定着氷」</b> 何年にもわたって厚くなり、動かなくなった海氷。</p>

### 3-1-5. 気温

観測する場所により気候が異なる。日本よりもずっと広いので場所による気温差も大きい。平均すると約 $-18^{\circ}\text{C}$ である。北極点では、夏の7月はほぼ $0^{\circ}\text{C}$ 、冬の1月はほぼ $-30^{\circ}\text{C}$ である。(北極圏の陸上だと夏は $30^{\circ}\text{C}$ まで上がることもあり、冬は $-80^{\circ}\text{C}$ まで下がることもある。海上よりも陸上のほうが気温差がはげしい。)

### 3-1-6. 人間との関わり

北極と南極の大きな違いは、北極は人間の生活圏にとっても近いことである。北極に領土を持つ国は、8カ国もある。

### 3-2. 今日時点の北極を衛星データ（2024年8月10日時点）から見る

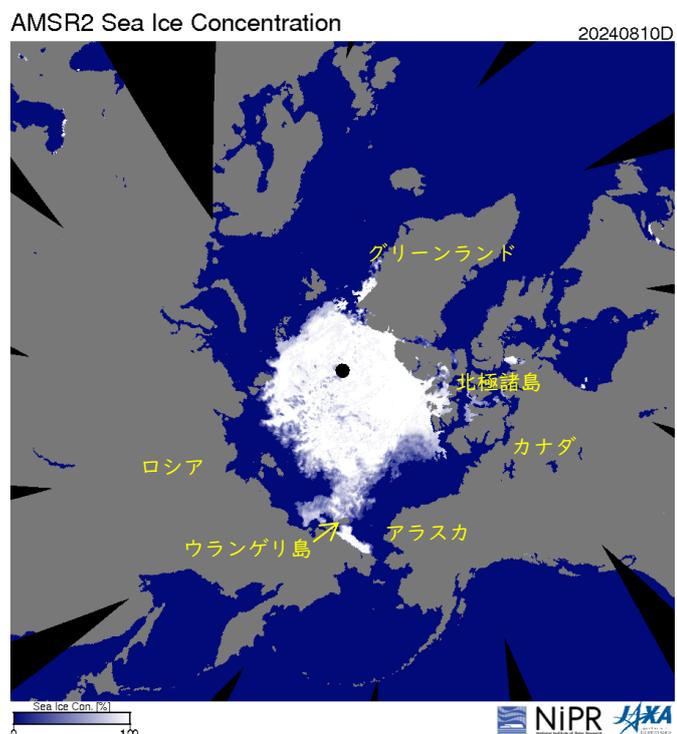
国立極地研究所の準リアルタイム極域監視モニター(VISHOP)を使う。

『VISHOPで公開しているプロダクトは、JAXA等の人工衛星に搭載されている高性能マイクロ波放射計によって取得されたデータを、極域データアーカイブシステム(ADS)において、JAXA提供の処理プログラムを用いて様々な物理量に変換し、可視化したもの』(引用文献(1))である。

#### 3-2-1. 海氷密接度から見る

(図3-2)は海氷密接度を可視化したもの。

『海氷密接度は、海面のある範囲内に含まれる海氷の割合。海氷密接度が0%の場合はその範囲内に海氷がまったく存在せず、100%の場合はその範囲全体が海氷に覆われている状態を示す。』(引用文献(1))つまり、画像の白い部分は白いほど海氷が密になっている。(北極点の黒い点はデータが取得できていないところ。)



VISHOPより2024年8月10日 海氷密接度に補記

(図 3-2)

#### <データから考えたこと>

- ・氷のある部分は丸くなくて、いびつ。綺麗なひとつのかたまりではない。
- ・濃いところ（海氷が密なところ）と薄いところ（海氷が密でないところ）があり、綿あめのように見える。薄いところから溶けているように見える。
- ・氷のかたまりの中心が北極点ではないようだ。
- ・北極点の近くでも氷が少ないところがありそう。中心ほど氷がたくさんあるわけではなさそう。
- ・グリーンランドとカナダの北極諸島の付近は海氷が陸に接していて、海面のほとんどが海氷に覆われている。
- ・アジア大陸側とアラスカ側の海は海氷がほとんどない。ロシアの東の端の北の海（ウラ

- ンゲリ島付近)には海氷がある。その方角に氷が流れてきたようにも見える。
- ・全体的に陸に接しているところは海氷が密になっていて、海に囲われているところから溶けているように見える。

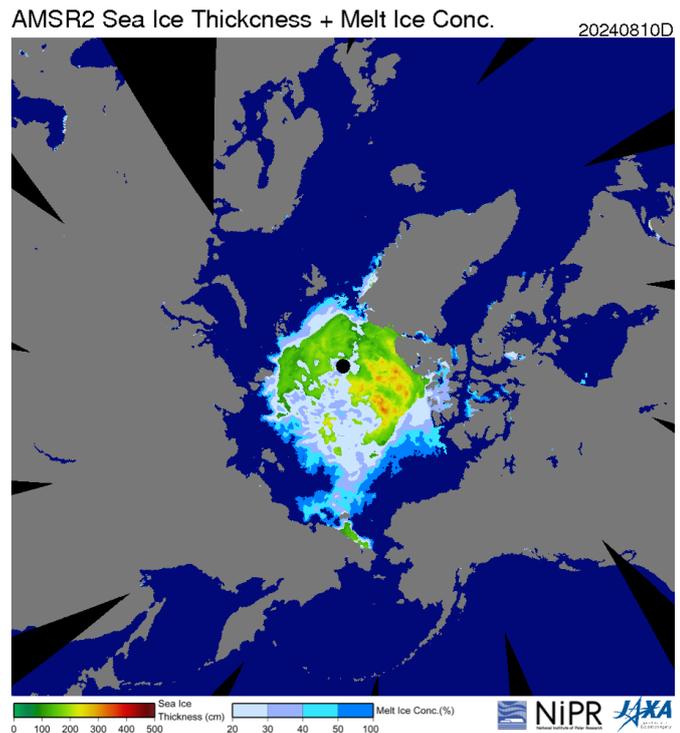
### 3-2-2. 海氷厚とメルトポンド割合から見る

(図 3-3) は海氷の厚さとメルトポンド割合を可視化したもの。

『海氷厚とは、経験的な統計モデルによって計算された海氷の厚さのこと。メルトポンドとは海氷の表面が解けてできた池のことで、メルトポンド割合とは、その割合を 10 分比で表したものだ。ただし、これらは研究プロダクトのため精度検証が終了していない。』(引用文献(1))によって参考程度とした。

#### <データから考えたこと>

- ・全体的に、外側から溶けて海氷の厚さは薄くなっているように見える。しかし、中央にも薄くなっているところがあり、くびれがある。
- ・北極諸島と北極点の間の付近の海氷の、3~4メートルの厚さがあるところを除いて、ほとんどが2メートル以下の薄さしかない。
- ・海氷の厚さが厚いところは、3-1-4. で調べたように、溶けにくく、何年もかかってできた海氷なのだと思う。ここは海氷密接度のデータでは海氷が密なところとなっていた。
- ・逆に、海氷密接度のデータで密でなかったところは、すでに溶けていてメルトポンドが多くできている。
- ・北極点のまわりでもメルトポンドがあり、表面が溶けていることがわかる。また、海氷の厚さも薄いところがある。
- ・北極諸島の付近は、海氷の割合は高かったが、メルトポンドができている。



VISHOP より 2024 年 8 月 10 日 海氷厚+メルトポンド割合 (図 3-3)

以上のことから、今日のデータを見ると、北極海の海氷はまわりから均一に溶けているわけではないことがわかった。また、中央（北極点）が一番氷の厚い場所ではないことがわかった。

海氷が密でないところは、表面にメルトポンドができていて、氷が溶けやすいように見え、逆に、海氷が密なところは、氷が厚いので溶けにくいのではないかと考えた。

## 4. 氷を作り溶かす実験

### 4-1. 氷を作って塩分濃度を調べる

#### <目的>

海氷は海の水が凍ってできた氷である（3-1-4. 参照）。しかし、同じ海氷の仲間である「北海道の流氷」は塩分が押し出されてしょっぱくないと聞いたことがある。北極の海水の塩分濃度は約3%である（3-1-2. 参照）。その海水が凍ってできるのに、北極の海氷もしょっぱくないのだろうか。いろいろと調べたが、しょっぱくないと書いてあるもの、ほんのりしょっぱいと書いてあるものいろいろあった。

また、これから北極の海氷がどう溶けるのかを実験するために、北極の氷をたくさん用意したいが、本物は用意できないので、できるだけ本物に近い氷を作りたい。でも、上に書いたように、北極の海氷はどのくらいの塩分濃度（しょっぱさ）か、調べてもわからなかった。なので、どのくらいの塩分濃度の氷を用意すべきなのかを自分で実験して調べてみる。

#### <やり方>

北極の海水も用意できないので、北極海に近い成分の塩水（※）を用意して、冷凍庫で途中まで凍らせてみる。途中まで凍らせれば、海氷ができる状態と近い塩分濃度の氷ができるのではないかと考えた。そして、できかけの氷を溶かして塩分濃度を調べてみる。

※ 今回の研究では、全ての実験で浄水器を通した水道水を使う。また、塩は原材料名が「海水」のみの塩を用意して、塩水を作る。

#### 4-1-1. 1回目（ガラスの器で氷を作る）

##### <材料・道具>

ガラスの器

キッチンスケール

塩分濃度計

水 194g（図 4-1）

塩 6g（図 4-2）



（図 4-1）



（図 4-2）

<手順>

(1) 水と食塩を混ぜ、3%の食塩水を作る。(図 4-3、  
図 4-4)

(2) 冷凍庫に入れて凍らせる。(図 4-5)

(冷凍庫の温度について。冷凍庫の取扱説明書によると『周囲温度 30℃で、食品を入れずにドアを閉じ、温度が安定した状態の温度が、約-17℃~約-20℃』とのこと。実験では、他の場所に冷凍食品があったり、ドアを開けたりしているのもっと温度は高いはず。)

(3) こまめに様子を見て、氷ができる様子を確認する。

(4) 凍ったところで取り出して観察する。

(5) 氷とまだ凍っていない水を分ける。氷を溶かしてから、それぞれの塩分濃度を調べる。



(図 4-3)



(図 4-4)

<予想>

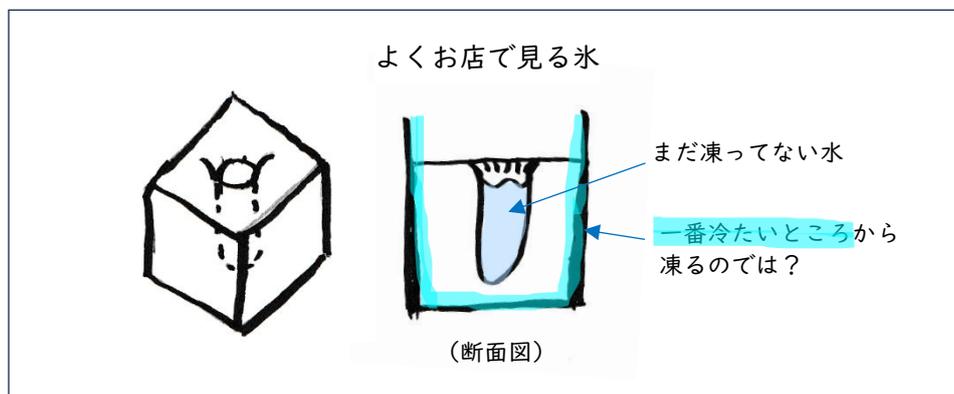
- ・海と冷凍庫の中では氷のでき方は違うと思う。
- ・北極海は気温がとても冷たいので、海では一番冷たい海面のところから凍ると思う。

でも、喫茶店などで出される水の氷は断面が凹のようになっている(図 4-6)。それは、一番冷たい温度になっている製氷皿にくっついていての面のところから中の方へ向かって凍っていくからなのだと思う。水は凍っていくときに体積が増える。製氷皿の表面は狭いから、表面のほうは、まだ凍っていない水が押されて凍りにくいのだと思った。だから、今回も、ガラスの器が冷やされて、一番冷たくなって、ガラスの器に接しているところから、凹の形のまま外側から内側へむかって凍っていくと思う。

- ・できる氷はしょっぱくない(塩分濃度は0%に近い)と思う。なぜなら、氷の中の水分子は規則正しく並んでいると本で読んだことがあるので、塩は邪魔なのではないか?だから、氷ができるときには、塩は入ってこれないのではないか?



(図 4-5)



(図 4-6)

<結果>

30分後 表面に薄い氷が浮き始めた。(図 4-7)

1時間20分後 表面はすべて凍っているので冷凍庫から取り出し観察した。(図 4-8～  
図 4-12)

氷と残った塩水に分けて、氷が完全に溶けたところで、塩分濃度を測った。(図 4-13～図  
4-15、表 4-1)



(図 4-7)



(図 4-8)



(図 4-9)



(図 4-10)



(図 4-11)



(図 4-12)



(図 4-13)



(図 4-14)



(図 4-15)

表 4-1 ガラスの器で凍らせたときの塩分濃度 (%)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
氷	<del>1.9</del>	1.9	1.9	<del>2.0</del>	2.0	1.93
残った塩水	<del>3.1</del>	3.4	<del>3.7</del>	3.7	3.7	3.6

(一番小さい値と一番大きい値を取り除いて平均を出した。)

<考察>

- ・予想と違って、水の表面から氷ができていた（図 4-7、図 4-8、図 4-9）。ガラスの器よりも表面からあたる空気のほうが冷えていてそこから凍っていったのだと思う。
- ・できた氷は白っぽい。表面はざらざらとしていて、星のような形に広がる筋も見える。（図 4-8）
- ・氷を取り出す前に、器を横から見ると、表面に氷がはっているのがわかる。厚いところと薄いところがあるように見えた。（図 4-9）
- ・スプーンを入れてみると簡単にくずれた。シャリシャリしてとてももろかった。かき氷のような感じ。まだ完全に凍っていなかったのだろうか。（図 4-10）
- ・取り出してみると表面から器のかべにそってまわりこむように氷ができていた。冷たい空気にあたりやすい水の表面が一番冷やされるのだろうけれど、やはり、うすいガラスの器だと、冷凍庫の冷たい温度で、器のかべの外からもどんどん冷やされるのだと思った。（図 4-11、図 4-12）
- ・できた氷の塩分濃度は下がっていた（表 4-1、図 4-14）。でも、真水にはならなかった。なめてみるとしょっぱかった。逆に、残った塩水の塩分濃度は上がっていた（表 4-1、図 4-15）。とてもしょっぱかった。氷が完全に凍ってなかったかもしれないので、もっとしっかりした氷ができてから測定したら、しょっぱさもかわっていたのだろうか。
- ・つららのように、かべに沿って凍る部分ができたが、北極の海では壁がないから、もっと外側の温度の影響を受けない器で実験した方が良いのではないかと思った。

#### 4-1-2. 2回目（発泡スチロールの器で氷を作る）

4-1-1. の考察から、もっと外からの温度の影響を受けない、発泡スチロールの器でやり直してみることにした。また、凍らせる時間も少し長くすることにした。

##### <材料・道具>

発砲スチロールの器

キッチンスケール

塩分濃度計

ざる（しっかり水をきるため）

水 339.5 g（図 4-16）

塩 10.5g（図 4-17）



（図 4-16）



（図 4-17）

##### <手順>

(1) 水と食塩を混ぜ、3%の食塩水を作る。（図 4-18）

(2) 冷凍庫に入れて凍らせる。

(3) こまめに様子を見て、氷ができる様子を確認する。

今度は4-1-1. の実験よりも長く凍らせる。

(4) しっかり凍ったところで取り出して観察する。

(5) 氷とまだ凍っていない水を分ける。氷を溶かしてから、それぞれの塩分濃度を調べる。



（図 4-18）

##### <予想>

・4-1-1. の実験より長く凍らせるのでしっかり塩分が押し出されて、氷はもっとしょっぱくなると思う。（氷の塩分濃度が4-1-1. のときより下がると思う。）

##### <結果>

1時間30分後 表面が凍り始めている。いろんな方向に束になった筋が見える。斜めからみると少し盛り上がっている。（図 4-19）

2時間後 傾けると全体がずるずる動いた。まだシャリシャリしている感じに見える。（図 4-20）



（図 4-19）



（図 4-20）

2時間30分後 表面が完全に固まった。(図4-21)

2時間40分後 冷凍庫から取り出して観察した。(図4-22、図4-23)

氷と残った塩水に分けて、氷が完全に溶けたところで、塩分濃度を測った。(図4-24、図4-25、表4-2)



(図4-21)



(図4-22)



(図4-23)



(図4-24)



(図4-25)

表4-2 発泡スチロールの器で凍らせたときの塩分濃度 (%)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
氷	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
残った塩水	3.8	3.8	3.9	3.9	3.8	3.83

(一番小さい値と一番大きい値を取り除いて平均を出した。)

#### <考察>

- ・できた氷は、ガラスの器の時よりは固く、少し厚みがでて、手で持てるくらいだった。しかし、やはり、色は白っぽくて、くずれやすい感じは変わらなかった。(図4-22)
- ・今回は壁際のほうは少し厚くなっているけれど、表面のみに氷ができていた。たぶん、発泡スチロールは外からの冷たさが伝わりにくくて、壁の内側があまり冷えなかったのので壁の方には氷ができなかったのだと思う。(図4-23)
- ・ガラスの器の時より、氷はもっと厚くなると思ったが、少し厚くなっただけだった(図4-22、図4-23)。ガラスの器のときより冷えにくくて、凍るための時間がもっとたくさん必要になるから、ただ時間を長くするだけでなく、表面が凍ってからもっと長く冷やさないと、厚みはでないのだろうと思う。

- ・氷の塩分濃度は4-1-1. のときより下がると思ったが、思ったよりも下がらなかった（表 4-2、図 4-24）。でも 0.1%は下がっていたし、残った塩水のほうは、0.2%くらい上がっていた（表 4-2、図 4-25）ので、もっともっと長い時間凍らせておいたらもっと氷から塩が出て行くのかもしれない。
- ・実験と同じように、北極海で海氷ができたら、塩分が押し出されると氷の下の海の水は塩分が濃くなってしまうと思う。でも、実験では器があるけれど、海は広くて深い。だから、濃い塩水は薄い塩水より重いから底へ落ちて濃さはもどに戻るのか、それとも流れて混ぜていくのか、どうやってもとの塩分濃度に戻るのか気になった。
- ・調べたときは、北極の氷はしょっぱくないと書いてあったほうが多かったが、実験でできた氷の塩分濃度は 1.8%で、しょっぱかった。上で書いたように、凍る時間で塩分濃度が変わるかもしれないなら、海氷もできたてはこれくらいの濃度かもしれない。一度、これで実験を続けることにする。

## 4-2. 氷の溶け方の実験

### <目的>

3-2. で調べてみて、今の北極海の氷がなぜいびつな形になってしまったのかは、氷の溶け方に原因があるのではないかと考えた。まず、「氷はどのように溶けるのか」を知るために実験をする。

### <やり方>

海氷の代わりに、4-1. で調べた塩分濃度（1.8%）の氷を作る。その氷を北極の海水の代わりに、北極海と同じ塩分濃度の塩水（※）に浮かべる。そして溶け方を観察する。

※4-1. の時と同じ作り方で3%の塩水を作る

### 4-2-1. 形の違う氷の溶け方の実験

#### <この実験の目的>

上から見たときの氷の形が違うとき、溶け方にどのような違いがあるかを知る。

#### <材料・道具>

- 1.8%の塩水（事前に用意しておく）
- 3%の塩水（事前に用意して冷蔵庫で冷やしておく）
- クリアケース
- 製氷皿（星型とハート型の2種類）
- 針金
- ストロー
- 温度計
- 塩分濃度計
- 発泡スチロールの板

#### <手順>

- (1) 1.8%の塩水をそれぞれの製氷皿に入れて（図 4-26）、冷凍庫で完全に凍らせる。（図 4-27）



（図 4-26）



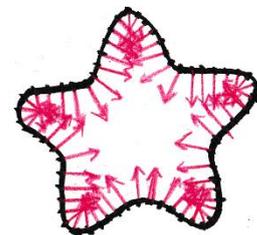
（図 4-27）

- (2) クリアケースの幅に合わせて、ストローを通した針金を折り曲げて、仕切りを作る。水面にギリギリ着くぐらいにする。(ストローは氷がくっつかないように、クッションのために通した。)
- (3) 冷やしておいた 3%の塩水をクリアケースに入れる。クリアケースのまわりは発泡スチロールの板で囲って、室温の影響が出ないようにする。
- (4) 室温、水温を測る。
- (5) (1) で凍らせた氷をハートと星それぞれ 2 個ずつ、そっと浮かべる。
- (6) 溶ける様子を観察する。

<予想>

星は、とがっているところから先に溶けていくと思った。右の絵のように、星のとがっているところは、外からの熱が集まりやすいから、そこから溶けていくし、逆に星の形の凹んでいるところは、ゆっくり溶けていくと思う。

ハートも、同じように二つの山のふくらんでいるところと、先のほうは溶けやすいと思う。でも、星と比べると、山はゆるやかだし、とがったところの数が少ないので、星よりは溶けにくいと思う。



赤の矢印は外からの熱が伝わっているイメージ

(図 4-28)

<結果>

水に浮かべてからの経過時間とその時の様子

0分 気温 27℃。水温 15.4℃。

水に氷をそっと浮かべると、氷は水面の上にはほんの少し出ているけれど、ほとんどは水の下に入っている状態で浮いた。(図 4-29)



(図 4-29)

2分 星のとがっているところが透明になってきて、中の白いところが丸っぽくなってきた。

(図 4-30)

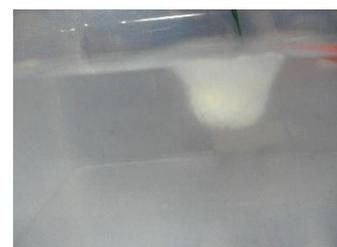
3分 横から見ると、逆さまの台形(上底が下底より長い台形)になって溶けてきているのがわかる。(図 4-31、図 4-32)



(図 4-30)



(図 4-31)

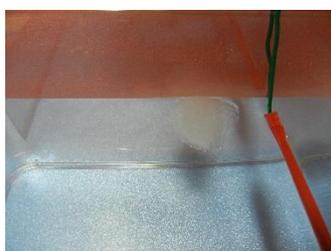


(図 4-32)

- 5分 それぞれの氷の外側はかなり透明になってきた。真ん中は白っぽくて泡が入っている感じ。(図 4-33、図 4-34)
- 星は角がとれて丸っこい五角形になってきた(図 4-33)。ハートは出っ張っている部分がなくなり、おにぎりのようになった(図 4-34)。横から見ると逆三角形になった(図 4-35)。
- 6分 氷の中から空気の泡がぷつぷつ出てきて、氷のまわりにくっついている(図 4-36)。
- 7分 どれもケースの端に寄ってしまった。くっついている泡がたくさん増えた。
- 8分 大きさの違いがはっきりしてきた。ハートのほうが大きくて星のほうが小さい。(図 4-37)
- 10分 星のほうは、もう五角形ですらない。丸でもない。大きさも明らかに違いが出てきた。(図 4-38、図 4-39)
- 10分 30秒 氷の真ん中のほうも透明になってきた(図 4-40)。横から見ると薄い板のようになった(図 4-41)。
- 14分 27秒 星が1個溶けてなくなった。
- 15分 30秒 星がもう1個溶けてなくなった。
- 17分 10秒 ハートが1個溶けてなくなった。
- 17分 15秒 ハートがもう1個も溶けてなくなった。
- 実験終了



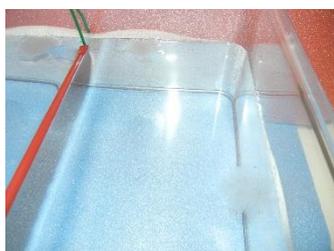
(図 4-33)



(図 4-34)



(図 4-35)



(図 4-36)



(図 4-37)



(図 4-38)



(図 4-39)



(図 4-40)



(図 4-41)

<考察>

- ・予想通り、星はとがっているところから先に溶けていった。やはり、とがっているところは外からの熱が集まりやすく溶けやすいのではないか。
- ・また、ハートより星のほうが先に溶けたので、とがっているところが多い形の方が早く溶けやすいのではないか。
- ・氷の中から空気の泡がぷつぷつ出てきたが、凍らせるときにたくさん空気が入っていたのだろうか。

#### 4-2-2. 上から溶けるか下から溶けるかの実験

##### <この実験の目的>

4-2-1.の実験では横方向からどう溶けるか分かったが、氷の上からか下からか、どっちから溶けるのかがよくわからなかった。なので、もっとわかりやすくするため、大きな氷を使って、比べられるように真ん中に目印をつけて、上下どっちから溶けるかを調べる。

##### <材料・道具>

- 1.8%の塩水（事前に用意しておく）
- 3%の塩水（事前に用意して冷蔵庫で冷やしておく）
- クリアケース
- 金属のケーキ型（丸形）
- 色画用紙（真ん中の目印用）
- 割り箸（定規代わりにするため目盛りをつける）
- 温度計
- 塩分濃度計
- 発泡スチロールの板

##### <手順>

- (1) 1.8%の塩水をケーキ型の半分（300g）まで入れ、冷凍庫で完全に凍らせる。  
（図 4-42）
- (2) (1) で凍った氷の表面に、丸く切った色画用紙を中央にのせ、しっかり平らに押し付けてくっつける。画用紙は溶け方に影響が出ないようにケーキ型の直径より小さめにした。（図 4-43）
- (3) 画用紙の上から 1.8%の塩水をまた 300g 入れて、冷凍庫で完全に凍らせる。  
（図 4-44）
- (4) 冷やしておいた 3%の塩水をクリアケースに入れる。クリアケースのまわりは発泡スチロールの板で囲って、室温の影響が出ないようにする。
- (5) 室温、水温を測る。
- (6) (1) ~ (3) で凍らせた氷を、そっと浮かべる（図 4-45）。
- (7) 溶ける様子を観察する。



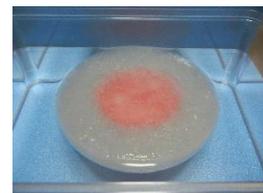
（図 4-42）



（図 4-43）



（図 4-44）



（図 4-45）

<予想>

気温の方が水中よりも温度が高いから、氷の上のほうから溶けていく。溶けた水はまわりへ流れていく。

表面から溶けるので、目印の真ん中の赤い紙はどんどん水面に近づいていくと思う。

<結果>

水に浮かべてからの経過時間とその時の様子

0分 気温 26.5℃。水温 13.5℃。

水面にそっと浮かべると、水面の上に1~2ミリ出ている状態で浮いた。

(図 4-46)

5分 横から見ると氷の底の角がとれて丸くなってきた。

氷の底のほうから泡が出てきた。(図 4-47)

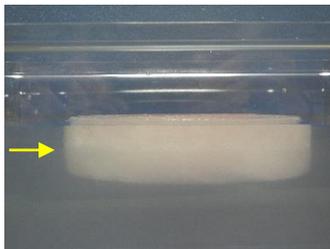
10分 上から見るとまわりから透明になってきている(図 4-48)。

写真では赤い紙の印がはっきりみえないが、目で見ると印のある境より下の方が多く溶けていることがわかる(図 4-49)。

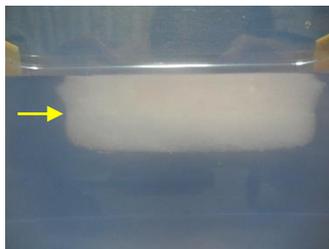
12分30秒 定規で測ると氷の表面の直径は14.8cm。もとの直径は15.2cmなので、4mmほど小さくなった。横から見ると、氷の底のほうはもっと小さくなっている。

15分 お皿のような形になってきた。水温は9.2℃。(図 4-50)

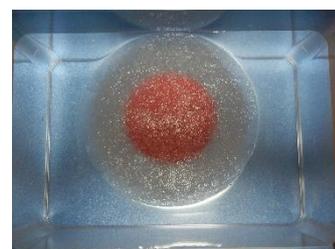
氷はもう水面より上には、ほとんど出ていない。ふちの部分は表面張力で、まわりの塩水側がへこんでいる。(図 4-51)



(図 4-46)



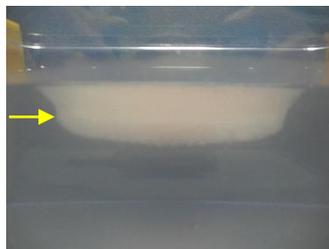
(図 4-47)



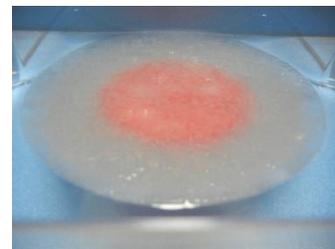
(図 4-48)



(図 4-49)



(図 4-50)



(図 4-51)

※黄色い矢印は真ん中の印の赤い紙の場所

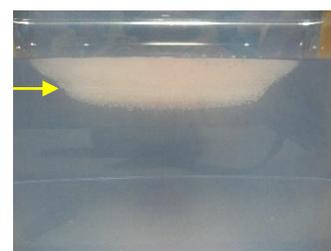
- 18分30秒 上から見ると厚みがある部分ほど白く見える。
- 20分 上から見ると、外側はもうかなり透明になった (図 4-52)。  
横から見ると、真ん中の印のある境より下は泡がたくさん出て、かなり溶けているのがわかる。ゆるやかなカーブの逆さまなドーム状になっている。  
(図 4-53)
- 25分 真ん中の印より上と下の厚みの比は、2:1くらい。水温は 8°C。(図 4-54)
- 26分 氷のふちが崩れた (図 4-55)。
- 30分 氷のふちがどんどん崩れてきた (図 4-56)。  
横から見ると真ん中の印の紙が透けてよくわかるようになった (図 4-57)。
- 35分 氷の端のほうは、少し水面より沈んでいるように見える (図 4-58)。  
上から見るとほとんど透けている。表面はでこぼこして、溶けた水がいっぱいある。(図 4-59)
- 40分 あと少しで真ん中の印の紙が出てきそうな状態 (図 4-60)。
- 45分 現在の気温は 26.6°C、水温は 7.2°C。



(図 4-52)



(図 4-53)



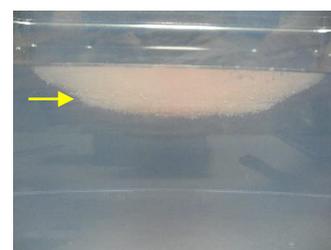
(図 4-54)



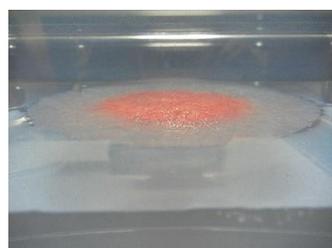
(図 4-55)



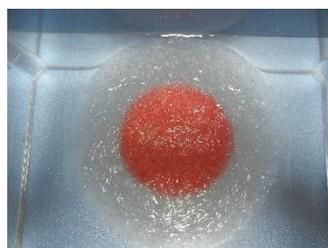
(図 4-56)



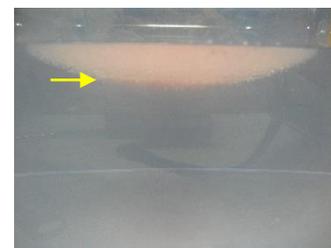
(図 4-57)



(図 4-58)



(図 4-59)



(図 4-60)

※黄色い矢印は真ん中の印の赤い紙の場所

- 48分 真ん中の印の紙の端が出てきた (図 4-61)。  
 49分 氷の直径は 14cm になった。最初から比べて 1.2 cm 小さくなった。  
 53分 厚さ 1.5cm になった。真ん中の印の紙がもう完全に出てきている。(図 4-62)  
 55分 実験終了
- 氷を取り出して(図 4-63)、氷の大きさを測定した(図 4-64)。直径は 13.8cm、厚さは 1.5cm だった。実験の初めは真ん中より上の厚さは 1.75 cm。2.5mm しか上の部分の厚さは減っていない。  
 氷はジャリジャリとしている。氷を裏返して氷を指で押して崩してみたら、真ん中は堅かったが周りはおろくろくポロボロ崩れた (図 4-65)。



(図 4-61)



(図 4-62)



(図 4-63)



(図 4-64)



(図 4-65)

#### <考察>

- ・予想と違って、氷は下から溶けていくことがわかり、びっくりした。上の方からは、ほとんど溶けていなかった。特に水面に近いところほど溶けていなかった。つまり、温度の影響よりも、塩水の中にいるということの影響のほうが大きいのかもかもしれない。

仮説を立ててみた。

- ① 氷が下から溶ける理由として、水圧も関係しているのではないかな。  
 なぜなら、前に、氷は押されると溶けると聞いたことがある。(針金で押しつけると氷の中にのめりこんでいく。)なので、水に押されていると、溶けるのではないかな。  
 そして、水圧は深いほど高い。だから、水圧の高い下の方ほど溶けやすいのではないかな。
- ② 氷の性質が、水に接していると、水に戻りやすいという性質なのではないかな。
- ③ 氷の塩分濃度より塩分濃度が高い塩水の中なので、浸透圧のような塩の動きがあって、それが溶けやすさに関係しているのではないかな。

- ・泡が氷からでてきたのは、氷の中に空気を含んでいたのだと思う。4-2-1. でも泡がたくさん出てきたし、凍らせたときに白っぽくなっていたので、塩が入った氷は、真水で凍らせた氷より、氷の中に空気を多く含んでいるのかもしれないと思った。
- ・溶かし始めは、水面の上に氷が少し出ていたけれど、氷が溶けてだんだん小さくなるにつれて、水面から出ている氷の高さは下がってきた。氷は凍るときに氷の状態よりも体積が大きくなる。体積が大きくなることで氷は水に浮くと4年生で習った。なので、だんだん溶けて体積が小さくなるにつれて、浮かぶ力が弱くなってきたのだと思う。

また、氷の表面の縁のまわりの水が凹んでいるようになったのは、3年前に表面張力の研究をしたときにやった実験と同じ状態だった。
- ・氷は上のほうからはあまり溶けていなかったが、表面をよく見ると筋ようになって溶けていて、水がたくさんたまっていた。この部分が溶けているのは、空気であたためられて溶けたのだと思う。北極の海氷のメルトポンドのような状態なのかもしれない。
- ・氷の表面の縁が崩れ始めたとき、何が原因で崩れ始めたのだろうと思った。縁はかなり薄くなったし、氷にはたくさんの筋が入っているから崩れやすいのだろうと思うが、ケースをゆらしてしまったときの波のせいかもしれないし、縁に近いところの、中に入っている空気の泡が出て行ったときにその外にいた氷と一緒に外れていくのかもしれないと思った。

### 4-2-3. 浮かぶ氷の密集具合の違いによる実験

#### <この実験の目的>

3-2. で、衛星データから今の北極を見た時に、海氷は、密集している方が溶けにくいと思ったので、実際に密集させた氷と密集させない氷の状態をつくり、どちらが溶けやすいかを調べる。

#### <この実験のやり方>

水面の位置に仕切りを作って、2つに分けて、様々な形の氷を同じ数ずつ浮かべる。片方は仕切りを壁に寄せて密集させて、もう片方は密集させないで浮かべる。密集させない方は、氷同士があまり寄ってしまわないように、さらに水面に仕切りを作って氷が散らばるように浮かべる。

#### <材料・道具>

- 1.8%の塩水（事前に用意しておく）
- 3%の塩水（事前に用意して冷蔵庫で冷やしておく）
- クリアケース
- 製氷皿（小さい立方体と星型とハート型の3種類）
- 針金
- ストロー
- 温度計
- 塩分濃度計
- 発泡スチロールの板

#### <手順>

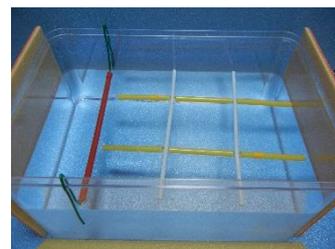
- (1) 1.8%の塩水を3種類の製氷皿に入れて、冷凍庫で完全に凍らせる（図4-66、図4-67）。
- (2) クリアケースを2つに分けるための仕切りをケースの横幅の端から4分の1のあたりに取り付ける。4-2-1.の実験で作ったものを使う（図4-68）。
- (3) 氷を密集させないための仕切りを用意する。ケースの幅に合わせたストローに切れ込みを入れて、「#」の形に組み合わせる（図4-68）。



(図 4-66)



(図 4-67)



(図 4-68)

- (4) 冷やしておいた 3%の塩水をクリアケースに入れる。クリアケースのまわりは発泡スチロールの板で囲って、室温の影響が出ないようにする。(図 4-68)
- (5) (3) で作ったストローの仕切りを (2) で仕切られている水面の広いほうへ浮かべる(図 4-68)。
- (6) 室温、水温を測る。
- (7) (1) で凍らせた氷を、ハート型 2個、星型 2個、小さい立方体 24個ずつ、(2) で仕切った水面のそれぞれへ、同時に入れる。氷を密集させない方は、「#」で区切られた部屋に、小さい立方体のみ 4個×5部屋、小さい立方体 1個とハート型 1個×2部屋、小さい立方体 1個と星型 1個×2部屋となるようにした。
- (8) 溶ける様子を観察する。

<予想>

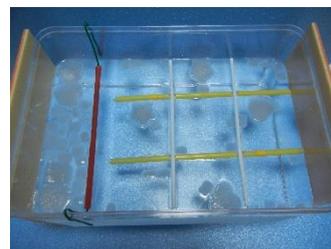
氷が密集している方が密集していない方に比べ、溶けにくいと思う。先に溶けて無くなっていくのは密集していない方の氷だと思う。

<結果>

水に浮かべてからの経過時間とその時の様子

0分 気温 26℃、水温 10.5℃。

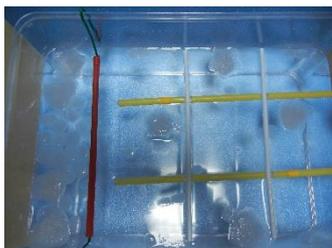
3分 (写真の撮影開始) もうすでに密集していない方の小さい氷は溶け始めている(図 4-69)。仕切りを調整したら、密集している方の小さい立方体の氷が 2個仕切りをくぐって密集していない方へ流れてしまったが、実験を続ける。



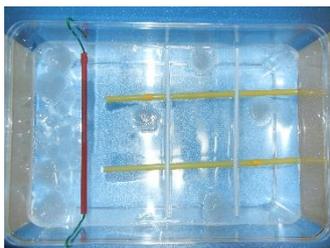
(図 4-69)

6分 密集していない方の真ん中の枠の小さい氷たちはほとんど残っていない(図 4-70)。

8分 密集していない方の、小さい立方体の氷はみんな消えかかっている。しかし、密集している方の小さい立方体の氷は、まだ四角く、長持ちしている。ハートや星の大きい氷も密集していない方はまわりが透明になってきて、大きさも密集している方と比べると小さくなってきた。(図 4-71、図 4-72)



(図 4-70)

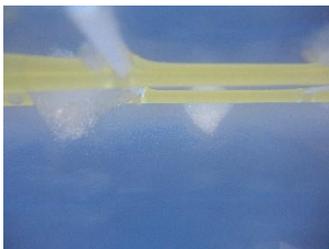


(図 4-71)

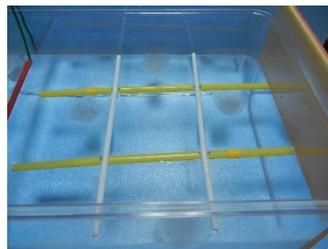


(図 4-72)

- 10分 密集していない方の真ん中の枠の小さい立方体の氷はみんな溶けた。  
横から見ると、密集していない方の大きい氷は、ハートも星も逆三角形の形にまで溶けている。密集している方の大きい氷は、まだ逆さの台形で、小さい氷も薄くなってきたがしっかり残っている。(図 4-73、図 4-74、図 4-75)
- 12分 密集していない方の小さい氷のみを入れた5枠のうち、さらに3枠氷がすべて溶けた(図 4-76)。
- 13分 密集していない方の小さい氷のみを入れたのこり1枠の中の氷もすべて溶けた。
- 17分 水面に近いところの水温…密集していない方の水温は 8.5℃、密集している方の水温は 8.3℃だった(図 4-77、図 4-78)。  
底に近いところの水温…密集していない方の水温は 8.1℃、密集している方の水温は 7.9℃だった(図 4-79、図 4-80)。
- 19分 密集していない方でも、ハートは意外と長持ちしている(図 4-81)。



(図 4-73)



(図 4-74)



(図 4-75)



(図 4-76)



(図 4-77)



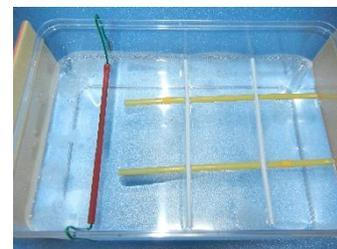
(図 4-78)



(図 4-79)



(図 4-80)



(図 4-81)

24分 密集していない方は、壁にくっついている星と、壁にくっついているハートのそれぞれ1つずつしか残っていない。星はもう浮かんでいるのがわからないくらい透明。(図 4-82)

密集している方も、小さい立方体の氷はすべて溶けた(図 4-83)。

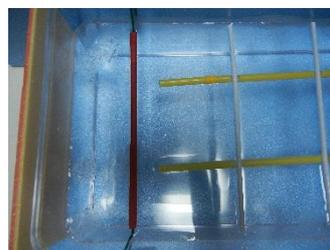
27分 水面に近いところの水温…密集していない方の水温 9℃、密集している方の水温 8.6℃だった。

底に近いところの水温…密集していない方の水温 8.5℃、密集している方の水温 8.3℃だった。

実験終了。



(図 4-82)



(図 4-83)

#### <考察>

- ・予定に無かったが、気になったので実験中の水温を測った。場所により水温が違っていたので、密集していない方、密集している方のそれぞれで、水面に近いところ、底に近いところと、4カ所に分けて測定してみた。

実験の途中(17分後)のケースの中の水温は、すべての場所で、実験前より下がっていた。氷を入れたことにより、ケースの中の塩水が冷やされていったのだと思う。しかし、氷が溶け終わった時点の水温は、すべての場所で、実験中の水温より上がっていた。塩水を冷やすもの、つまり、氷の量が溶けて減ってしまったからだと思う。きっと途中から、気温によって塩水を温めるほうが、氷が塩水を冷やすよりも勝ってきたのだと思う。

また、実験の途中でも、氷が溶け終わった時点でも、水面に近いところより、底に近いところのほうが、水温が低かった。お風呂の水では、冷たい水は温かい水より重くなって沈むように、氷が溶けて冷たくなった水が底の方へ落ちていくからなのだと思う。

- ・密集している方は予想通り、密集していない方より氷が溶けにくかった。なぜなら、密集している方は氷と氷の間の塩水の温度が低い温度で保たれるからではないか。つまり、密集している氷は、「4-2-2.の実験の時に、溶ける時間がかかった大きな氷」のような状態になったと考えられるのではないか。実際に温度を測ってみると、実験の途中でも、氷が溶け終わった時点でも、密集している方は密集していない方より温度が低かったのはそのためではないか。

- ・壁にくっついていて氷は溶けにくかった。それは、氷が動いて壁の方へ集まりやすくて、他の氷がくっついて、先ほど書いた氷の大きさが大きくなったような状態になったからではないか。
- ・密集していない方の真ん中の枠の中の氷の溶け方が早かったが、小さい氷だけだったからだと思うが、それだけでなく、壁から遠くて、さらに、大きい氷が近くにない状態だったからなのもあるのではないか。  
壁の近くだと、他の氷とくっついてしまうので溶けにくくなるが、くっつかない状態のままだったので、溶けやすかったのではないか。  
また、大きい氷の近くだと、冷たい温度が保たれやすいので溶けにくいと思うが、まわりに冷やすものがない状態だと冷たい温度が保たれにくく溶けやすいのではないか。
- ・氷の準備が悪かったので、すべての氷を浮かべるために時間がかかってしまった。そのため、写真の撮影も遅れてしまった。密集している方と密集していない方と、同時に一つ一つ浮かべていったが、入れているところから次々に溶けて行ってしまった。もう少し大きい氷を使えば良かったかもしれない。だが、小さい氷のおかげで早く溶けるので、比較しやすかった。

#### 4-2-4. 溶かす実験のまとめ

- ・ 4-2-1. では、形によって溶けやすさが違うことがわかった。とがっているところから先に溶け、また、とがっている部分が多い形の氷の方が溶けやすかった。

事前調査で調べたように、実際の北極の海氷は、北極海に一枚の大きな氷の塊が浮いているわけではなく、様々な大きさや厚さの海氷が浮かんでいる。小さい海氷や薄い海氷は溶けやすいと思うが、形についても、とがっている部分や、とがった部分の多い海氷は、溶けやすいのだろうと思う。

- ・ 4-2-2. で、氷は上と下とどちらから溶けていくか実験したが、下から溶けていくことがわかった。4-2-1. の実験をみると、下からも溶けていたが、横方向からも溶けていた。4-2-2. では、あまり横方向から溶けていないようにもみえるが、氷が大きいのでわかりづらいけれど、表面に近いところ以外の部分は、横方向からも溶けていることがわかる。つまり、4-2-1. も4-2-2. も大きさは違うけれど、同じように溶けていることがわかる。

4-2-1. で、とがった部分は温まりやすいから溶けやすいのではないかと考察したが、もしかしたら、4-2-2. の考察で①～③の仮説をたてたように、とがった部分は塩水の中にいることによる溶けやすさの影響を受けやすいから、という理由もあるかもしれない。

また、北極の海氷も、下の方ほど溶けやすいのではないか。そして、溶けやすさは、温度の影響もあるけれど、海水による溶けやすさの影響も受けやすいのではないか。

- ・ 4-2-2. で、氷の表面の観察から、氷の表面は、あたためられた空気で溶けたのだと思った。これは、北極の海氷のメルトポンドにあたると思う。北極の海氷は、白夜があって夏にずっと日に当たってあたたまるから、メルトポンドが大きくなるのだと思う。

- ・ 4-2-3. では、氷が密集している方が、密集していない方より溶けにくかった。考察では、密集している方は、氷と氷の間の塩水の温度が低い温度で保たれるからではないかと考えた。

実際に北極海でも、海氷密接度の高いところほど、海水の温度が低く保たれて、海氷は溶けにくいのだと思う。

- ・ 4-2-3. の実験の水温は、すべての場所で、実験前より下がっていた。しかし、氷が溶け終わった時点の水温は、すべての場所で、実験中の水温より上がっていた。それは、塩水を冷やすもの、つまり、氷が溶けて氷の量が減ってしまったからだと考えた。

北極海でも、たくさんあった海氷が減ってきたら水温が上がるのだろうか。

- ・ 実験の途中で、氷が溶け終わった時点でも、水面に近いところより、底に近いところのほうが、水温が低かった。氷が溶けて冷たく重くなった水が底の方へ落ちていくからなの

だと考えた。

北極海でも、海氷によって冷やされた冷たい水は、底の方へ下がると思う。

- ・どの実験でも、塩水で作った氷を溶かすと、氷の中から泡がでてきた。塩水で作った氷は、白っぽくてもろかったが、氷の中に多く空気が入っているのではないかと思った。北極の海氷も、空気を含んでいるのだろうか。それとも、冷凍庫で冷やした氷なのでそうなっただけなのだろうか。
- ・氷が溶けると、その溶けた水によって、溶けたまわりの塩水の塩分濃度は下がると思う。そうすると、その近くのまだ溶けていない氷の溶け方に影響があるのだろうか。今回海水の代わりに3%の塩水で溶ける実験を行ったが、他の濃度の水の中で氷はどう溶けるのか実験して調べてみたい。  
また、実際の北極海でも海氷の溶けたところの近くの海の塩分濃度は下がるのだろうか。そのあと、塩分濃度の低い水は、高い水より軽いから、溶けた水は近くの海面のあたりにいるままで、その場所の塩分濃度は下がったまま上がらないのだろうか。それとも、4-2-3.の実験で考察したように、溶けた氷の水の温度がまわりの海水の温度よりも低いなら、下の方へ落ちて行って混ざるのだろうか。実際の北極海の塩分濃度が、氷が溶けた後、どのように変わっていくのか、もとに戻るのかなども調べてみたい。

## 5. 衛星データの変化から考える

国立極地研究所の準リアルタイム極域監視モニター(VISHOP)の様々な機能を使って、北極の海氷の変化をみる。

### 5-1. 1980年以降の海氷の年代ごとの変化を見る

<目的>

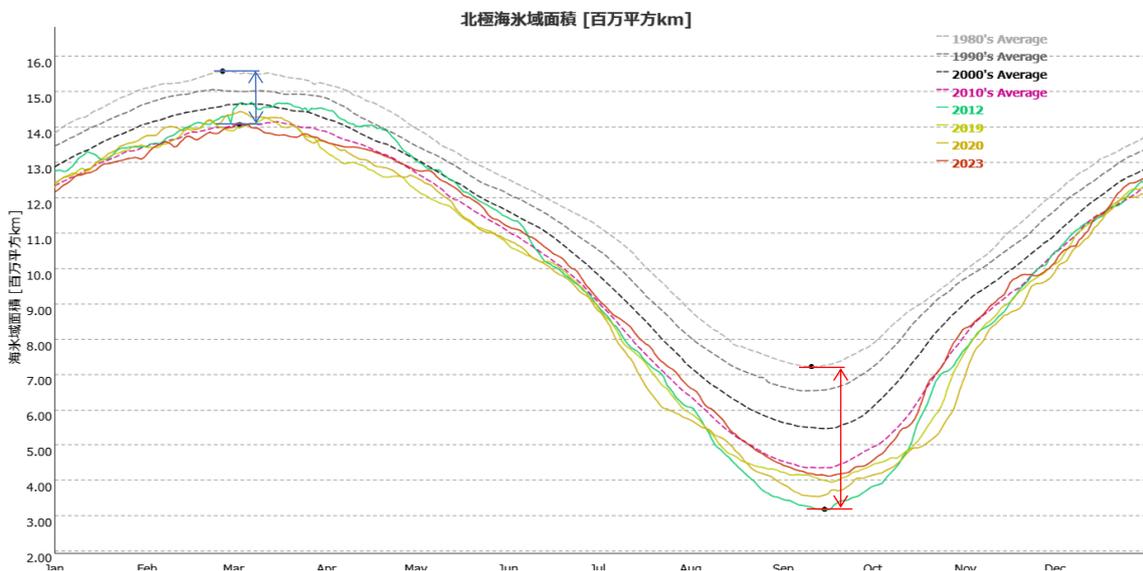
北極海の海氷の面積について、過去の年代ごとや最近の海氷面積が少なかった年の年間グラフを1つの図にまとめて作成し、今までにどのように変化してきたかを知る。

<やり方>

VISHOP を使って「北極海氷域面積」の年変化グラフを作成する。

1980年代の平均、1990年代の平均、2000年代の平均、2010年代の平均と、観測史上、北極海氷域面積の1番小さかった2012年、2番目に小さかった2020年、3番目に小さかった2019年、そして去年の2023年を選び、北極海氷域面積の1年間の変化をグラフに表した。

【北極海氷域面積の1980年代の平均、1990年代の平均、2000年代の平均、2010年代の平均、2012年、2020年、2019年、2023年における年変化グラフ】



(図 5-1)

引用：ADSより海氷域面積算出方法について(参考文献(1))

『公開されている海氷域面積は、年代ごとにそれぞれ以下の衛星搭載マイクロ波放射計が観測した海氷密度(SIC)データをもとに算出しています。

- ・1980年1月～1987年7月 : SMMR
- ・1987年7月～2002年6月 : SSM/I
- ・2002年6月～2011年10月 : AMSR-E
- ・2011年10月～2012年7月 : WindSat
- ・2012年7月～現在 : AMSR2

海氷密度アルゴリズムは、JAXA/NASAの協力関係のもと、米国航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター(NASA/GSFC)のComiso博士が開発したものを採用しています。』

## <考察>

VISHOP の画面では、グラフ上の調べたい 1 点を指すと、その点の日付や海氷域面積の値がわかるので、操作しながら考察する。

- ・まず、グラフを見ると、海氷域面積が、一年間の間で冬に大きくなり、夏に小さくなることを繰り返しながら、年が経つにつれ、だんだん小さくなっていることがわかる。2012 年 9 月 16 日に海氷域面積が一番小さくなった。それからの夏は 2012 年ほど小さくならなかったが、最近また小さくなってきている。
- ・北極の海氷域面積は、どの年も、春から夏（3 月の初めから 9 月の中頃）にかけて減っていき、秋から冬（9 月の中頃から 3 月の初め）にかけて増えている。

1980 年代の平均で海氷域面積が一番大きかった時は、15.6 百万平方メートル。  
1980 年代の平均で海氷域面積が一番小さかった時は、7.23 百万平方メートル。  
1980 年代の平均では冬から夏にかけて 8.37 百万平方メートル海氷が溶けた。  
つまり、約 5 割も減ったことがわかった。

2023 年の海氷域面積が一番大きかった時は、14.12 百万平方メートル。  
2023 年の海氷域面積が一番小さかった時は、4.14 百万平方メートル。  
2023 年は冬から夏にかけて、9.98 百万平方メートルも海氷が溶けた。  
つまり、約 7 割も減ったことがわかった。

以上より、1 年の中で冬から夏の海氷の面積は、もとの面積の半分以上と、とても大きく減っていることがわかる。

また、1980 年代と、2023 年を比較して、2023 年は 1980 年代より冬から夏の海氷の面積の変化が大きくなっていることがわかった。

- ・2012 年、2019 年、2020 年、2023 年のグラフをよく見ると、「夏の海氷域面積が小さい（最小値）」順に 2012 年、2019 年、2020 年、2023 年だが、「冬の海氷域面積が大きい（最大値）」順に 2012 年、2019 年、2020 年、2023 年となっている。つまり、夏の氷の溶け方が大きい年ほど、冬に作られる氷の量も多くなっていた。これはどういうことだろうかと疑問に思った。
- ・1980 年代→1990 年代→2000 年代→2010 年代と 30 年間、年々北極の海氷域面積が減ってきている。  
冬に海氷面積が一番大きく発達したのは、1980 年代平均で 15.6 百万平方メートル。  
冬に海氷面積が一番大きく発達しなかったのは、2023 年で 14.12 百万平方メートル。  
その差は、1.48 百万平方メートルだった。（図 5-1 の青い矢印）  
夏に海氷面積が一番減らなかったのは、1980 年代平均で 7.23 百万平方メートル。  
夏に海氷面積が一番減ったのは、2012 年で 3.18 百万平方メートル。

その差は、4.05 百万平方メートルだった。(図 5-1 の赤い矢印)

- ・「夏の海氷域面積が一番小さかった時」の差は大きい、「冬の海氷域面積が一番大きかった時」の差は小さい。これは、夏の氷の減り方は増しているが、冬の減り方は夏に比べるとゆるやかであるといえる。

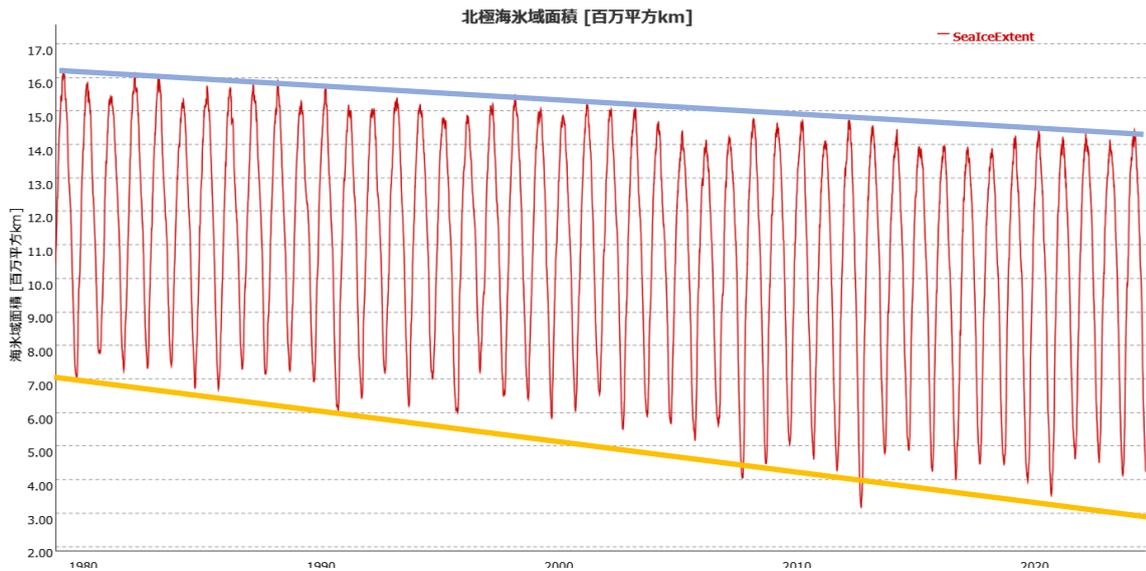
わかりやすいように、以下のようにグラフを作り直してみた。

上記のグラフの横軸を日ごとの変化にしてみた。

このグラフからも、「冬の海氷域面積が一番大きかった時」の変化(青い線)のほうが「夏の海氷域面積が一番小さかった時」の変化(黄色い線)よりも変化がゆるやかであることがわかった。つまり青い線と黄色い線の間が開いてきている。

それは、年々、夏の氷の溶け方が激しくなっているけれど、冬にも作られる氷の量が多いということがわかる。

【北極海氷域面積の過去の日別変化グラフ】



(図 5-2)

## 5-2. 2023年（去年）の春から夏の変化を見る

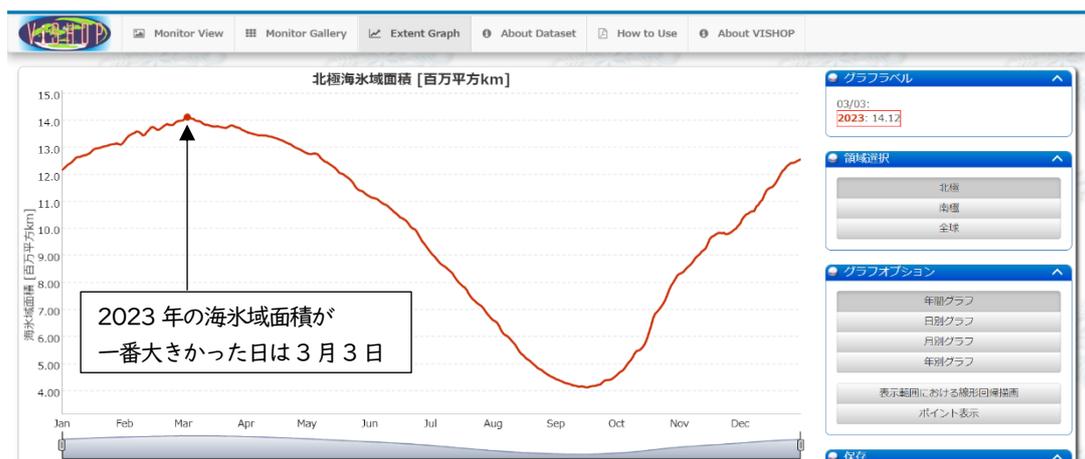
### <目的>

5-1. で、北極の海氷は年々減って、その大きさは小さくなっているが、ずっと減り続けているわけではなく、毎年夏にたくさん溶けて、冬にたくさん作られるのを繰り返しながら、減っていることがわかった。

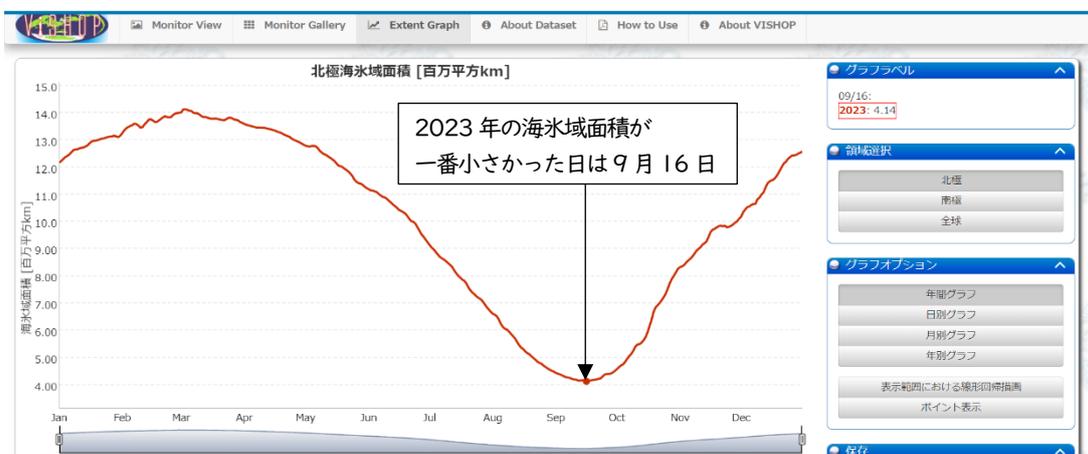
では、1年の中で、どのような海氷の変化があるのか、日々取得された「海氷密接度」の画像データを連続して見ることにより調べてみる。今回の研究では春から夏の変化を見ることにした。

### <やり方>

2023年の「海氷密接度」の画像データを使う。まず、2023年の「北極海氷域面積」の年変化グラフから、海氷域面積が一番大きかった日と一番小さかった日を調べる。（図5-3、図5-4）



(図 5-3)

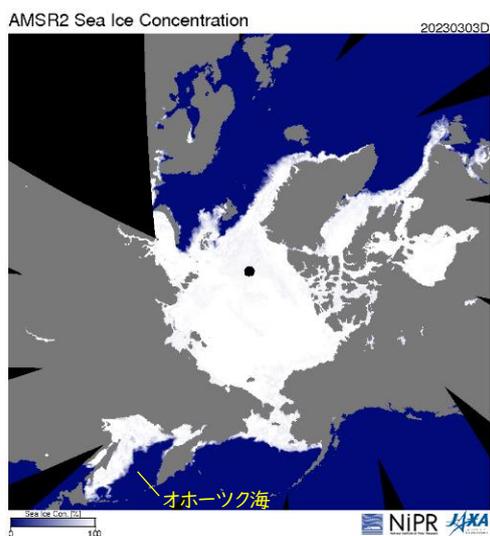


(図 5-4)

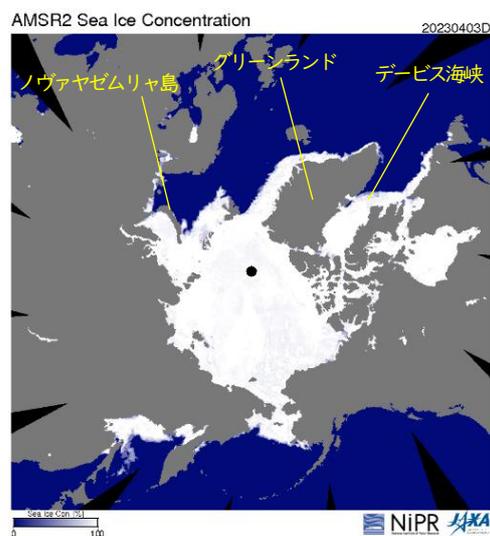
そして、海氷域面積が一番大きかった日から一番小さかった日まで、毎日の「海氷密度」の画像データを連続して日付を動かしてみても観察する。気になった変化は、その日の前後を繰り返して見たり、地図と比較してみたりする。

<使用した画像の一部>

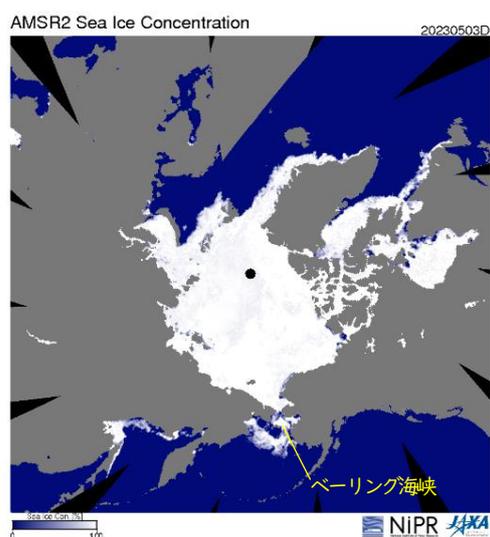
論文に動画を貼り付けることはできないので、変化がわかるように2023年の海氷域面積が一番大きかった3月3日から一ヶ月ごと、また、気になった画像の日付の部分のみ貼り付けることにする。



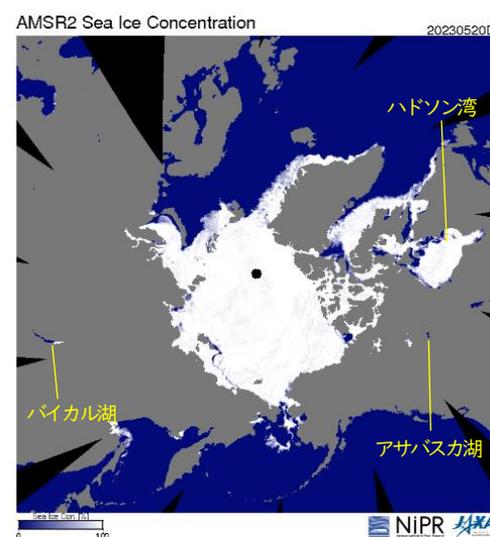
(図 5-5 2023/3/3)



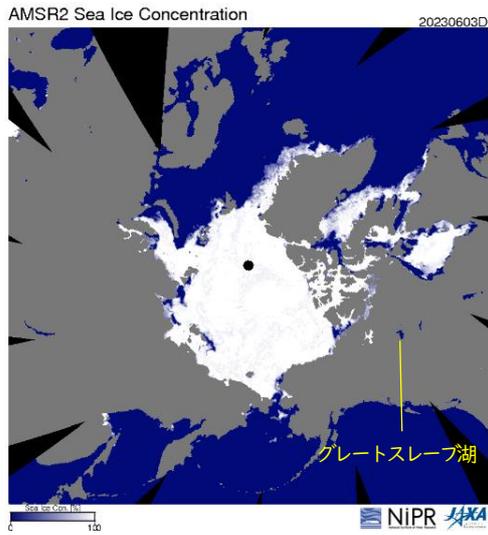
(図 5-6 2023/4/3)



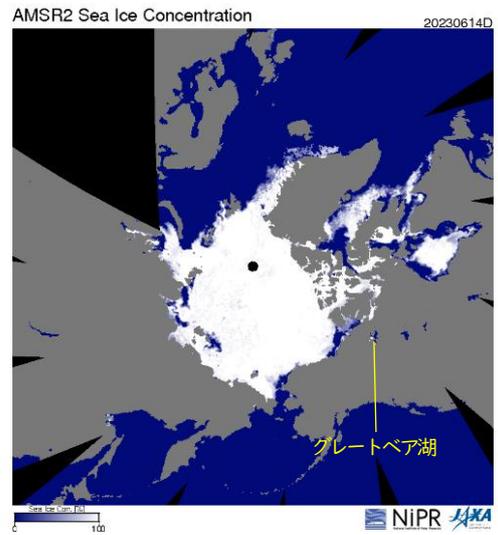
(図 5-7 2023/5/3)



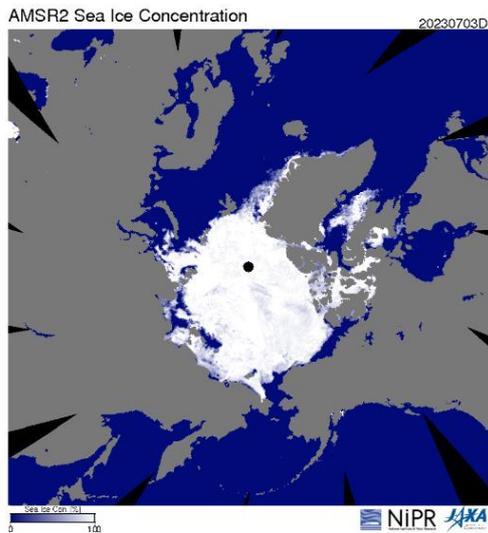
(図 5-8 2023/5/20)



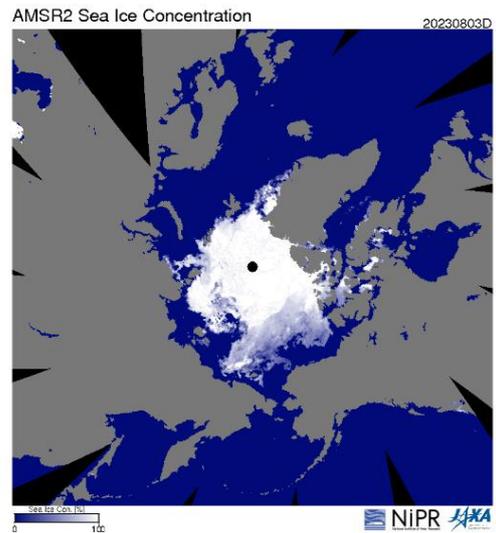
(図 5-9 2023/6/3)



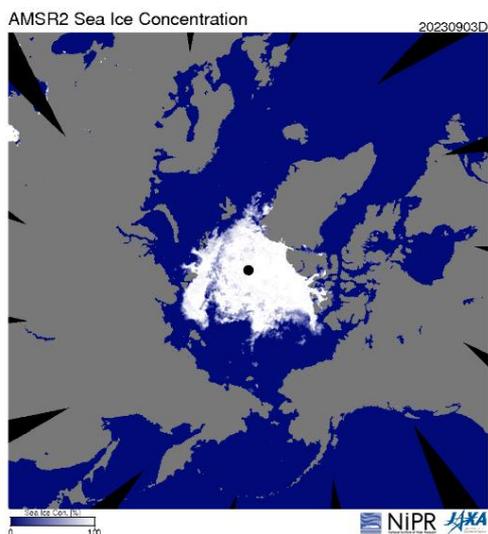
(図 5-10 2023/6/14)



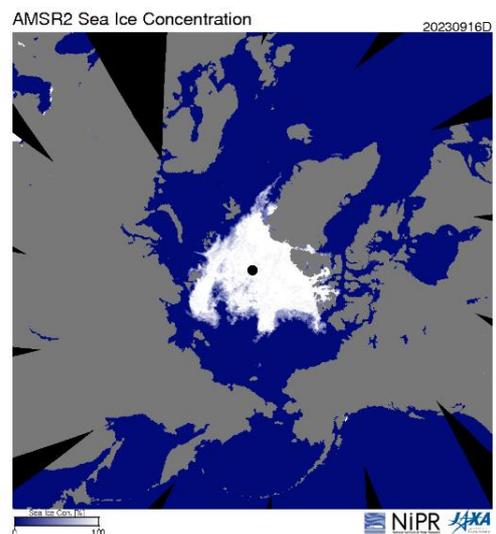
(図 5-11 2023/7/3)



(図 5-12 2023/8/3)



(図 5-13 2023/9/3)



(図 5-14 2023/9/16)

<考察>

- ・3月3日の一番海氷が多い「海氷密接度」の画像データから見ていく。  
北極海の外の海氷は、すでに、オホーツク海の辺りから溶けていっている。そのあたりは北極海と比較して、もう暖かいのだと思う。(図 5-5)
- ・3月～4月後半、グリーンランドの東側や、西側にあるデービス海峡のカナダ側など、北極点の方から南の方へ流れがあるように見える。海氷が激しく動いているように思った。その後も、それらの地域は流れがあるように見え続けている。  
ロシアのノヴァヤゼムリヤ島付近では、氷は流れながら小さくなっているように見える。以上のことから、海流の流れが、氷の溶け方に関係があるのではないかと考えた。(図 5-6)
- ・北極海の中が海氷にすべて覆われている状態でも、その中の海氷は全く動いていないわけではなく、動いている場所があるように見えた。
- ・5月の初め、ロシアとアラスカの間へのベーリング海峡の付近も溶け始めてきた。(5月までもさかんに流れがある動きが見えた。)(図 5-7)
- ・ロシアの北部の島や陸の近くでは、5月後半あたりから、陸の方から海氷の中に穴が開いてきて、その穴がどんどん大きくなって溶けてきていた。  
また、陸地に囲まれた湾など(例えばカナダのハドソン湾)にある氷は溶けるのが早いことがわかる。陸が近くにあることが溶けるのに関係しているのではないかと考えた。(図 5-8)
- ・5月20日にカナダのアサバスカ湖の氷が溶けて無くなり、続いて5月28日にその下流のグレートスレーブ湖の氷が溶けて無くなり、その後しばらくして、その下流の先にある河口の付近の氷が溶け出した(図 5-8、図 5-9)。  
北極海の氷が溶けるのも山から流れる川の水が関係していそうだと考えた。  
同じように、6月14日にグレートベア湖の氷が無くなり、その下流の先にあるさきほどと同じ河口付近の氷の溶け方が加速しているように見える(図 5-10)。  
同時期に、ロシアのバイカル湖とその河口でも同じような現象が見られていた。
- ・8月中旬になると、北極海にある残った海氷の集まりの真ん中にひびが入ったようになってきた。大きな力が加わっているように見える(図 5-12)。海流のせいなのだろうか。それとも、北極圏は人の生活圏に近いので、夏になったので、薄い氷を人間の船などが壊して通っているのだろうか。
- ・一番氷が少ない時期が9月なのは、気温が一番上がっている時期とずれていると思うが、気温が上がってから水が暖められるまでの時間差のせいだと思う。
- ・全体を見て、海氷密接度が低いところから溶けていくと言えるが、密接度が高いところも

そのまま海氷が密の状態からいきなり溶けるのではなく、海氷密接度が低い状態になってから溶けていた。

## 6. 追加の実験

### 6-1. 氷のでき方の実験（塩分濃度の違う氷を作る）

#### <目的>

4. の実験で、氷が溶けることや作られることで、その近くの塩分濃度が変わってしまうのではないかと考えた。それなら、北極海でも氷が溶けやすいところ、溶けにくいところで、塩分濃度が違うと思う。それ以外にも、北極海は広いので、塩分の少ない河口に近いところ、海流の流れが速いところ、逆に遅いところなど、場所によって塩分濃度が違うと思う。

4. の実験では北極海の海水を 3%としてすべての実験をしたが、海水の塩分濃度の違いで海氷の作られ方や溶け方に差が出るのか気になった。

そこで、実際に塩分濃度の違う塩水を使って、氷を作ったり、溶かしたりする実験をして、違いを調べたいと考えた。なお、今回は氷を作る実験のみ実施した。

#### <やり方>

真水、1.8%の塩水、3%の塩水をそれぞれ発泡スチロールの器に入れて、冷凍庫で同時に凍らせる。そして塩分濃度による凍り方の違いを観察する。

#### <材料・道具>

発泡スチロールの器

キッチンスケール

塩分濃度計

ざる（しっかり水をきるため）

真水（浄水器を通した水道水）

1.8%の塩水（事前に用意しておく）

3%の塩水（事前に用意しておく）

#### <手順>

- (1) あらかじめ冷蔵庫で同じ温度に冷やしておいた真水、1.8%の塩水、3%の塩水をそれぞれ 350g ずつ発泡スチロールの器に入れる。
- (2) 冷凍庫に入れて凍らせる。（図 6-1）
- (3) こまめに様子を見て、氷ができる様子を確認する。
- (4) 凍ったところで取り出して観察する。



（図 6-1）

<予想>

真水、1.8%の塩水、3%の塩水の順番で凍っていく。なぜなら、前に理科の実験で普通の水を凍らせたことがあり、その際に冷やすために使った塩を入れた氷水は凍らなかったの、今回も凍りにくいのではないかと思った。

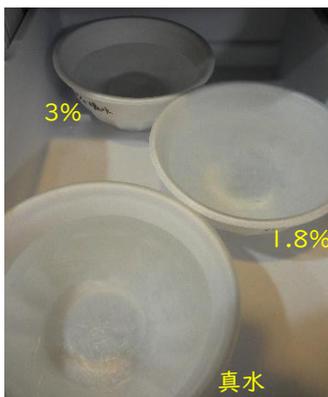
<結果>

- 1 時間 15 分後 真水は表面全体に薄い氷ができ始めた。1.8%塩水はさまざまな形の板が表面に浮かんでいる。3%塩水は凍っていない。(図 6-2)
- 2 時間後 真水は全面が凍っていて動かない。1.8%塩水も表面全体に薄い氷ができているが、少し動く。3%塩水にも表面に少しずつ氷ができている。(図 6-3)
- 2 時間 30 分後 1.8%塩水も全面が凍っていて動かない。3%塩水も全面が凍ってきたが、厚さが薄くて氷の下は水っばい。
- 3 時間 30 分後 3%塩水も全て凍って動かなくなったので、冷凍庫から取り出し観察した。

真水でできた氷は、表面がツルツルしていて平らだった。器から取り出したら中は空洞になっていた。裏側も触るとつるつるしていて気持ちがいい。(図 6-4)

1.8%塩水でできた氷は、細かい板が重なったような感じに見えた。器から取り出したら瓶の王冠みたいで、太い筋や線がたくさん入っていた。裏側はザラザラが重なった感じで、針のようにトゲトゲしている。(図 6-5、図 6-6)

3%塩水でできた氷は、シャーベットのように、4-1.の実験のときと同じように、器から取り出すときにもろくて崩れた(図 6-7)。



(図 6-2)



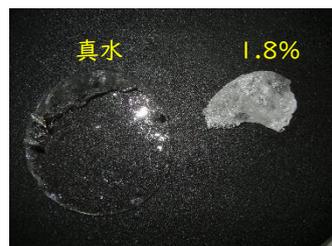
(図 6-3)



(図 6-4)



(図 6-5)



(図 6-6)



(図 6-7)

1.8%塩水と3%塩水について、氷とまだ凍っていない水を分け、氷をとかしてからそれぞれの塩分濃度を調べた。

3%塩水では、4-1.の実験結果と同じように氷は約1.8%、残った塩水は約3.8%だった。

1.8%塩水では、氷は約1.1%、残った塩水は約2.2%だった。

#### <考察>

- ・真水、1.8%、3%の順で塩分濃度が低い方から凍っていくことがわかった。やはり、予想と同じで、塩を入れた氷の方は凍りにくいのだと思う。北極海の氷は他の海より塩分濃度が低いので凍りやすいのだと思う。
- ・塩を入れた氷の表面は筋がたくさん入ってザラザラしていた。裏面はもっとザラザラしてトゲのようなものも生えるようにできていた。塩を入れた氷は透明度も違った。しかし、塩を入れない氷は裏面も表面もザラザラしていなくてツルツルしていることがわかった。塩を入れると塩によってざらざらしてしまうのだろうか。また、調べたところ氷の中の白いものや溶かしたときの泡は、空気の泡や不純物だとわかった(参考文献(11)より)。塩もその中の不純物に入るのだろうか。
- ・やはり1.8%塩水でも氷より残った水の塩分濃度の方が高くなった。濃度は変わっていても氷から塩が押し出されるという性質は同じだと思う。

## 7. 研究の考察・まとめ

- ・家の冷凍庫で凍らせた塩水は白っぽい。真水を凍らせた氷の表面はつるつるしていて透明なので、白っぽいところはやはり塩や空気なのではないか。また、空気や塩を含むせいで真水を凍らせた場合と違い、塩や空気がじゃまをして壊れやすかったり、ジャリジャリとした質感になったりするのではないか。
- ・冷やされやすいところから凍っていく。冷凍庫では器の表面から凍っていった。
- ・作られた氷の塩分濃度は下がり、残った塩水の塩分濃度は上がる。実験では氷の塩分濃度はゼロにまではならず、なめてみてもしょっぱかった。もっと長い時間凍らせてみたら塩分濃度は下がるかもしれない。
- ・北極海で海氷ができたなら、塩分が押し出され氷の下の海水の塩分濃度は上がると思う。そして、その海水は重いので底の方へ落ちていくはずである。そうすると、海表面に近い海水の塩分濃度は元に戻るのだろうか。濃度の違いで水が動いたら水の流れができるのではないか。
- ・実験から氷の形によって溶けやすさが違うことがわかった。とがっているところから先に溶け、また、とがっている部分が多い形の氷の方が溶けやすかった。北極の海氷についても同じことがいえると思う。
- ・実験から氷は下から溶けていくことがわかったが、その理由に以下の仮説を立てた。
  - ① 氷が下から溶ける理由として、水圧も関係しているのではないか。だから、水圧の高い下の方ほど溶けやすいのではないか。
  - ② 氷の性質が、水に接していると、水に戻りやすいという性質なのではないか。
  - ③ 氷の塩分濃度より塩分濃度が高い塩水の中なので、浸透圧のような塩の動きがあって、それが溶けやすさに関係しているのではないか。北極の海氷にはメルトポンドという池が日光や空気に温められてできることがわかっている。それが溶けやすさに影響しているはずだが、実験から考えられるように、塩水の性質による影響や、または、水圧なども海氷の溶けやすさも関係しているのではないか。
- ・実験では、氷が密集している方が、密集していない方より溶けにくかった。実際に衛星データからの画像を見ると、北極海でも、海氷密接度の高いところほど溶けにくいことがわかった。逆に、氷が密集していない海氷密接度の低いところから溶けているとも言える。海氷密接度の高いところも、徐々に溶けていくと、海氷密接度の低い状態になるので、そうなる溶けやすくなるということだろう。
- ・実験では、氷が溶ける時に水温が下がった。そして、水面に近いところより、底に近いと

ころのほうが、水温が低くなった。北極海でも、海氷によって冷やされた冷たい水は、底の方へ下がると思う。それによって海水の流れもできるのではないか。

- ・氷が溶けると、その溶けた水によって、溶けたまわりの塩水の塩分濃度は下がると考えた。北極海でも海氷が溶けて近くの海の塩分濃度が下がった場合、塩分濃度の低い水は、高い水より軽いから、溶けた水は近くの海面のあたりにいるままで、その場所の塩分濃度は下がったまま上がらないのかもしれないと考えた。しかし、海には流れがあるので、しばらくすれば混ぜてもとの塩分濃度にもどるのではないか。
- ・追加の実験で塩分濃度が低い方が凍りやすいことがわかった。北極海の海も他の海より塩分濃度が低いので海氷ができやすいといえるのではないか。また、溶けた氷によって塩分濃度が下がるなら、それでもっと凍りやすいのではないか。
- ・北極の海氷域面積は、一年間の間で冬に大きくなり、夏に小さくなることを繰り返しながら、年が経つにつれ、過去 30 年間でだんだん小さくなっている。
- ・どの年も、春から夏（3月の初めから9月の中頃）にかけて減っていき、秋から冬（9月の中頃から3月の初め）にかけて増えている。
- ・夏の氷の溶け方が大きい年ほど、冬に作られる氷の量も多くなっていた。
- ・年々、夏の溶け方が激しくなっているけれど冬に作られる氷の量も多いといこといえることがわかった。
- ・緯度の低い方の海氷は早くから溶け始める。
- ・海氷は海流によって流されていた。春になると北極海から外の海へ流されている海氷があった。また、流されながら溶けていった。
- ・海峡などの狭いところではとくに流れがあり海氷が流されていた。
- ・海流の流れが、北極海の海氷の溶け方に大きく関係しているように考えられた。
- ・陸に囲まれた湾になっているところ、川から陸地の水が流れてきているところ、島の近くなどは、他の場所よりも早く溶けやすいように考えられた。
- ・一見、氷がまったく溶けていないところでも、場所により海氷は動いているように見えた。密集していても流れがあることがわかる。
- ・もしかしたら、北極圏は人間の生活圏に近いので、船が行き来するなど、人間によって海氷が壊されることもあるかもしれない。

以上の実験や衛星データの考察から、北極の海氷の溶け方には、気温、日光（天気）、水

温、緯度、塩分濃度、海流などの影響があるのではないかと考えられた。また、他にも、海の中の火山や、風などの影響もあるかもしれないと思った。

VISHOPの他の機能や、本でいろいろと調査したら、もっとわからなかったことが、わかるかもしれない。

## 8. 感想と反省

今回の研究を通して、北極の海氷の溶け方が、まわりから同じように解けていくのではないことがよくわかった。北極の海氷が、年々小さくなっていくことは知っていた。しかし、温かい時期に徐々に氷が減っているイメージで、実は、1年の間に、夏にたくさん氷が減って、冬にもたくさん作られながら、減っているのだと知って驚いた。

実験から、氷が下から溶けることや、調査から知らないことがよくわかって楽しかったし、面白い自由研究になったと思う。でも、いろんなことをやってみたかったのに時間が足りなくなってしまうことは残念だった。

とくに、北極海の氷に近い氷の作り方を考えたり、氷の目印には氷に色をつけるか紙を使うかとかを考えたり、密集させないように氷を浮かべるにはどうすればよいかを考えたり、参考文献の書き方を調べたり、溶かす実験を始める前のところで時間がかかりすぎた。

氷が溶ける実験は、

- ・ 同じ条件の海水でも、氷の塩分濃度の違いで溶け方に違いが出るのか
  - ・ 同じ条件の氷でも、海水の塩分濃度の違いで溶け方に違いが出るのか
- も考えて氷や塩水を用意したが、時間が足りずにできなかった。

また、実験の途中や、北極について調べていく途中で、海の中のことを調べる実験もやってみたくなった。

- ・ 冬の北極の海の中の実験

もっと深い容器で海水を凍らせたなら、氷ができる途中、海水の塩分濃度はどのように変わっていくのか。容器の場所（浅いところや深いところなど）で塩分濃度は変わるのか。

4-1-2. の実験で濃くなった海水がどうなるか気になったから。

- ・ 夏の北極の海の中の実験①

もっと深い容器で氷を溶かしたら、海水の塩分濃度はどのように変わっていくのか、容器の場所（浅いところや深いところなど）で塩分濃度は変わるのか。

4-2-3. の実験で塩分濃度を測っておけば良かったと思ったから。

- ・ 夏の北極の海の中の実験②

もっと深い容器で氷を溶かしたら、海水の温度はどのように変わっていくか、容器の場所（浅いところや深いところなど）で温度は変わるのか。

4-2-3. の実験で測ったけれど、思いつきで測ったので、ちゃんと計画してもっと細かく測れば良かったと思ったから。

これらのできなかった実験は、続きをやってみたい。

衛星データを使って考察するのも、氷ができる秋～冬についてもやりたかった。氷が溶ける春～夏しかできなかったのが残念だった。実験をしたり、衛星データをみたりして、北極

の海氷の変化を知るには、氷が溶け方を調べるだけでなく、氷の作られ方も調べないといけないと思ったから、余計にやったほうがよかったと思った。

また、VISHOP の機能には、他にも海面水温、海氷流水速度、海氷齢など他にもたくさんあって、少しやってみたが、海氷の溶け方のヒントがたくさんあると思った。ぜひ、また他の面から考えてみたい。

あと、年々北極海の氷が減る様子も、触って比較しやすいように立体の模型を作ってみたかったのにできなかった。(等高線みたいに10年ごとのデータを積み重ねて見られる模型を作りたかった。)

実験は好きなのに、文字を書くことがとても苦手でつらさを感じてしまうので、3年前までの研究のときは全部手書きでつらくなってしまい、その後の年から研究ができなくなってしまった。なので、今回はパソコンを使って書くことにした。まだキーボード入力が遅いので、文章のところだけ、スマートフォンの音声入力を使ってみた。でも、結局たくさん直さなくてはいけなくて、もっと夏休みの前からキーボード入力を練習しておくべきだった。あと、文書作成アプリも学校で使うのとは違ってなれなくて、手伝ってもらいながらまとめる作業に時間がかかりすぎた。それが、一番時間が足りなくなってしまった原因だった。

少し欲張りすぎて、やるが多くなってしまった研究だったかもしれない。でも、まとめるのがすごく大変だったけれど、実験や北極の海を調べることは楽しかった。調べるほど、いろいろなことがからんで原因になっているのがわかっていくのが面白かったし、知らないことがたくさん学べて、勉強となった研究となった。

もう研究が終わるころに、2年前のNHKの「コズミック フロント」の北極の特集の番組が家に録画してあったことに気がついた。家族と見たら、北極のすべてのことがまとめられていて、最新の北極の研究の話もたくさん出てきた。

たくさん調べたことも、わからなかったことも、実験結果から考えたことも、ほとんどそこに全部あってショックだった。

今回は時間がなくてあきらめたが、今回やった実験や衛星データからみた考察と、番組でやっていた内容を比較するところから継続研究をやってみたい。

最後に、以下に「コズミック フロント」の番組中で話されていた内容と今回の研究と関係がありそうなところを聞き取っておいたので引用しておく。(引用文献(12))これで、今回の研究を終わりにする。

『海氷は1日平均10 km動く。』

『温暖化によって海にも熱がため込まれているのです。海はこれまで温暖化による熱をたくわえ気温の上昇を抑えてくれていました。』

『北極は地球規模の海流の循環にも大きな役割を果たしています。』

『氷の中に含まれる高濃度の塩水「ブライン」が海流循環の鍵となります。』

『海の中に含まれるいろんな成分、塩と呼ばれる塩みみたいなものが氷の中にも含まれる「ブライン」という。ものが凍る時には、純粋な、ピュアな水の部分からどンドン凍っていくということで、不純物である塩とかそういうものは氷の下にどンドン排出されていきます。』

『海水が凍るとき、塩分の濃い液体「ブライン」が氷の下に徐々に排出されていきます。周囲の海水より重い「ブライン」が沈み込むことで海流が生まれ、それが地球規模の循環の始まりとなっていきます。』

『温暖化によって北極の氷が減り、地球規模の物質循環が弱まることが懸念されているのです。』

『北極の氷が二酸化炭素を吸収したり放出したりしているというのです。』

『測定には二酸化炭素濃度測定器チャンバーを用いる。赤外線を使って二酸化炭素の濃度変化を測定できる。寒い時期には氷の中に含まれているブラインの中に、二酸化炭素が濃縮して高くなるということで、海氷から大気の方に二酸化炭素が放出して濃度が高くなるということを明らかにできました。』

『海水は真水の部分から凍るため溶けている二酸化炭素は氷から押し出され、隙間のブラインの中にたまっていきます。そして、濃縮されたブラインから大気中に二酸化炭素が放出されるのです。』

『地球温暖化に北極がどう関わっているか注目されている。』

『夏へと移り変わる中で氷の表面に大きな変化が起き始めていました。雪や氷の表面が溶けてできる池「メルトポンド」です。海氷が崩壊していく前兆です。』

『夏の氷は数分で変化していく。』

『メルトポンドは（氷の）表面の30 cmが溶けているだけで、その下は氷、なめてみても塩分を含まないような非常に綺麗な水の時もあります。氷がとけるという現象によって、二酸化炭素が薄められて、大気に対して二酸化炭素の濃度が減ります。

そうすると大気から海氷のほうに二酸化炭素が吸収される。というようなデータも得られました。』

『さらに氷が溶けて海面が露出した場合、二酸化炭素の吸収量が増えることもわかってきました。』

『地球の二酸化炭素の循環を考える際、北極が重要であることがわかってきました。』

『2020年は氷の衰退が急速に進行していました。北極圏を熱波が襲い、シベリアでは山火事が発生し、氷はこれまでにない速さで溶けていました。』

『グリーンランドの氷の融解が加速して海面上昇につながっていることがわかりました。陸地の分厚い氷が溶けると劇的な影響を及ぼします。』

『今世紀末に1~3メートルの海面上昇が起きる可能性があります。』

以 上

## 参考・引用文献

1. 国立極地研究所 ADS 推進室.” 北極域データアーカイブシステム (ADS) VISHOP” .ADS.2016年07月12日[VISHOP バージョン2 リリース].  
<https://ads.nipr.ac.jp/vishop>
2. 葛西臨海水族園 北極・南極の海 (2024年8月13日揭示物閲覧)
3. 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所. “北極のひみつ” . 北極観測センター.2023年2月16日.  
[https://www.nipr.ac.jp/pr/PDF/hokkoku\\_kids\\_2023.pdf](https://www.nipr.ac.jp/pr/PDF/hokkoku_kids_2023.pdf).  
(2024年8月10日閲覧)
4. 公益財団法人 日本極地研究振興会. “南極と北極とは?” . 公益財団法人 日本極地研究振興会ホームページ.2024年.  
<https://kyokuchi.or.jp/learn/base>.(2024年8月10日閲覧)
5. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所.” 極地50のなぜ” .ISEE 宇宙地球環境研究所. 2017年.<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/50naze/kyokuchi/>.  
(2024年8月10日閲覧)
6. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所.” 海洋50のなぜ” .ISEE 宇宙地球環境研究所. 2024年4月19日. <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/50naze/oceanography/>.  
(2024年8月10日閲覧)
7. 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所 “夏の企画展示 2018 雪と氷の大冒険～雪と氷のひみつ～” .国立極地研究所 南極・北極科学館.2018.
8. 北海道大学 北方生物圏フィールド科学センター 野村大樹. “海氷は地球の環境を左右する” .北海道大学のLASBOS.  
<https://repun-app.fish.hokudai.ac.jp/course/view.php?id=916>,  
(2024年8月12日閲覧)
9. 北極環境研究コンソーシアムおよび国立極地研究所. “北極域地図ダウンロード 北極域地図 (地名入り) 通常版” . 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所 北極観測センター 北極観測.  
<https://www.nipr.ac.jp/aerc/map.html>, (2024年8月25日ダウンロード)
10. JAMSTEC. “北極” .JAMSTEC 50TH ANNIVERSARY.2021年.  
<https://www.jamstec.go.jp/50th/jamstec-pochama/arctic/>,  
(2024年8月11日閲覧)
11. ホシザキ株式会社.(2021年,5月1日). “製氷機のヒミツ” [動画].YouTube.  
<https://www.youtube.com/watch?v=bKUFfzISzts>.(2024年8月25日閲覧)
12. コズミック フロント. “北極大漂流 氷の中の1年” .NHK.2022年4月7日放送 (BSプレミアム テレビ番組録画)