

第4章 海水移流経路と海氷厚さとの関係

4.1 海氷が厚くなる過程

海氷が厚くなる過程は2種類に分類される。一つは力学的作用によるもの、もう一つは熱力学的作用によるものである。力学的作用によるものとは氷盤どうしが互いに押し合うことで圧力がかかり、海氷が押し上げられたり押し下げられることで厚さを増すことを指す。図4.1のように、海氷の押し上げ・押し下げが起こる現象をリッジング、図4.2のように氷盤どうしが互いに重なりあう現象をラフティングと言う。

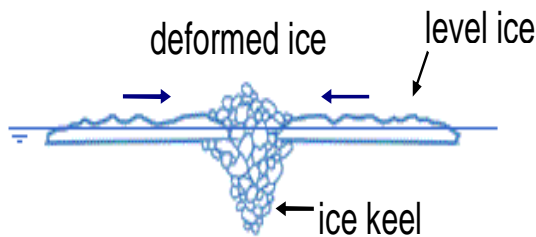


図 4.1: リッジング



図 4.2: ラフティング

北海道沿岸に達する海氷の殆どは何層かに重なり合ったものであり、海氷が力学的に厚くなる過程は非常に重要と考えられる。一方、熱力学的作用によるものとは、海氷の表面から熱が奪われることで海氷底面が新たに結氷することによる厚さの増加である。一般に気温が低い日が長く続くほど、海氷は厚くなる。

4.2 IPSによる氷厚の変化と移流経路の関係

図4.3は2003年、紋別沖においてIce Profiling Sonar(IPS)により観測された海氷厚さ変化を示したものである。(Fukamachi et al.,2006[12])

海氷は1月中旬より観測され始め、除々に厚さを増していく。3月上旬から中旬にかけて最も厚い海氷が観測されており、その厚さは最大で8 mにも達する。

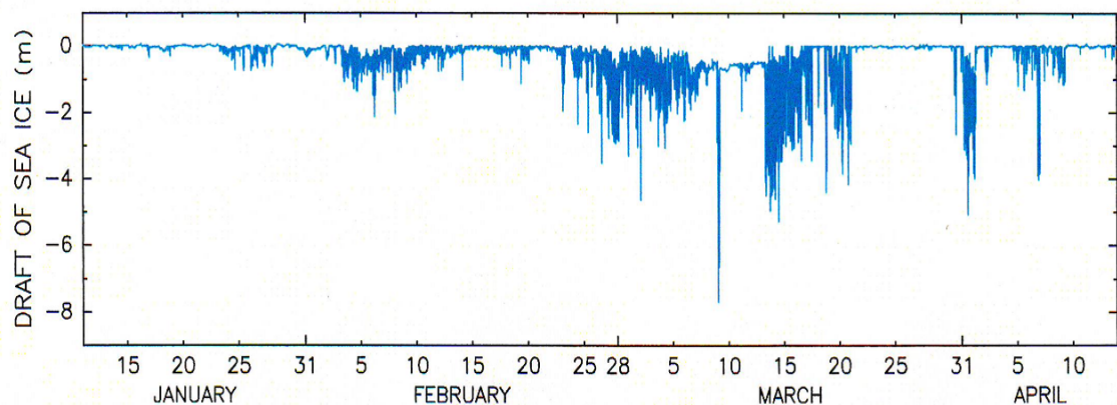


図 4.3: 紋別沖における海水厚さ変化

そこで、観測される時期による厚さの違いと移流経路の関係を調べた。IPS による観測が行われた海域に達した海水の後方軌跡を、図 4.4 に示す。図 4.4 左側の図の黒線は 2 月 10 日に、観測点付近に存在した海水の後方軌跡を示したもので、以下順に約 5 日ずつ遅い日付けを起点とした后方軌跡を示している。

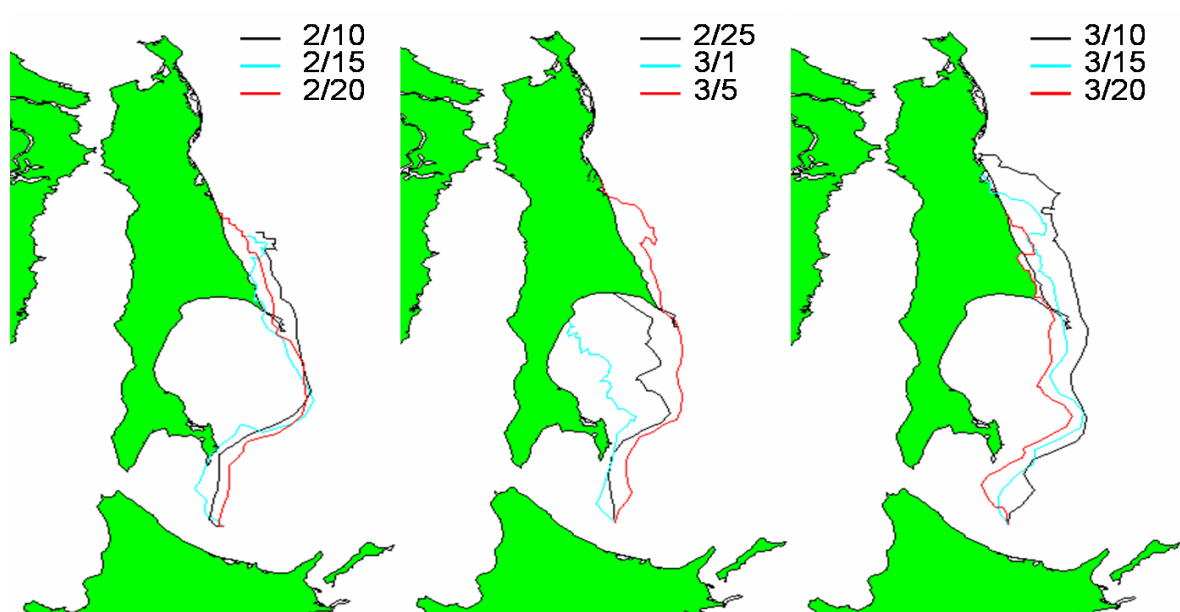


図 4.4: 観測点付近に達した海水の後方軌跡 (2003 年)

図 4.4 の各日付を起点とする後方軌跡と、対応する日付の海氷厚さを比較する。2 月 10 日から 2 3 日にかけて、海氷厚さは比較的小さい値で推移しており、以降厚さの大きい海氷が観測される日が続き、3 月 13 日前後から厚さのピークを迎える。ところが、海氷の後方軌跡は 2 月中旬、3 月中旬共にサハリン中～北部の東沿岸域を由来とする算出結果となった。このことから、力学的に厚みを増した海氷の厚さは時間や移流経路とは関係ないと考えられる。

4.3 「そうや」による氷厚の洋上観測結果と移流経路の関係

海上保安庁の巡視船「そうや」による北海道沿岸域の海氷観測では毎年氷厚のモニタリングを行っている。図 4.5 に示すように舷側にビデオカメラを下向きに取り付け、船首で割れて氷の側面が上向きになった氷盤を対象にし、ビデオ画像上の氷厚を一つ一つ計測することで氷厚を求めている。([13])

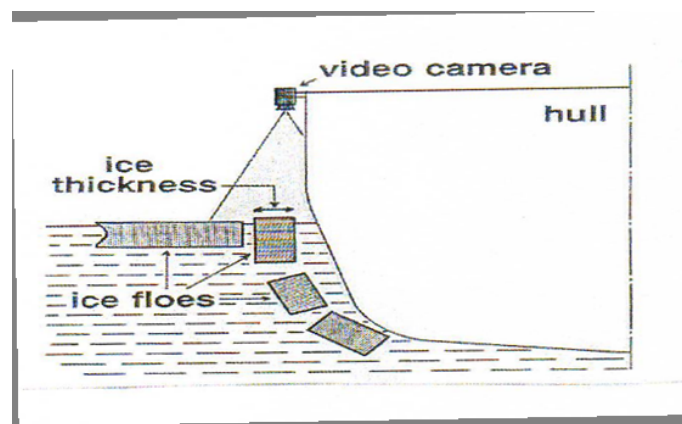


図 4.5: 氷厚の観測方法 [13]

上記の氷厚計測は、手法の性質上、平坦な海氷 (level ice) しか観測できない。長期間存在するほど level ice は厚くなるということから、より高緯度の海域で生成され、長い時間かけて漂流してきた海氷ほど厚さが大きいと予想できる。

北海道沿岸域にて計測された氷厚の経年変化を図 4.6 に示す。2003 年以降の厚さを見ると、2004 年をピークに徐々に減少していき、2009 年、2010 年は半分以下の値となっている。

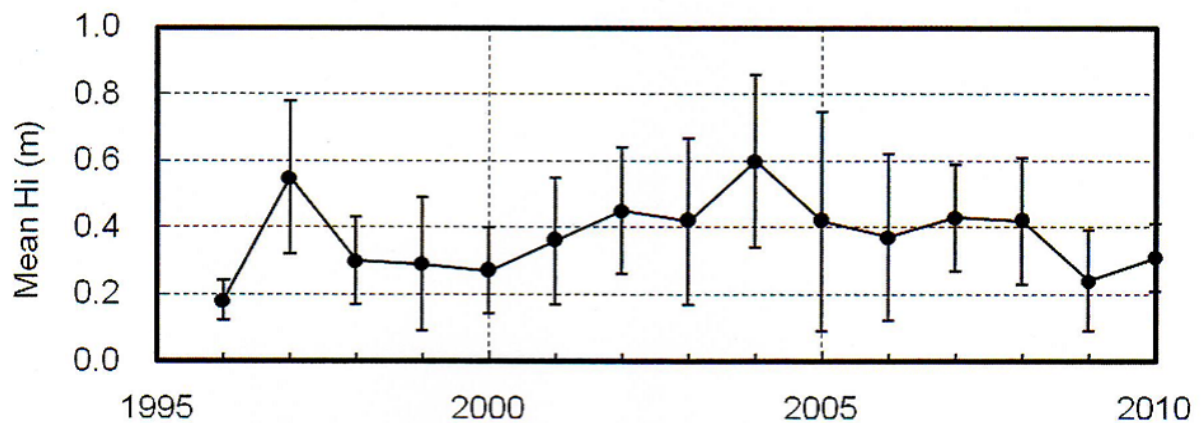


図 4.6: 北海道沿岸域の海水厚さ（誤差表示は各年の標準偏差）[13]

以下、北海道沿岸域の海水厚さとその由来との関係を考察する。図 4.7 のように区画を設定し、毎年 2 月 10 日に赤枠内に存在する海水の由来の割合を算出した。

- サハリン北部 = 1
- サハリン中～北部の東沿岸域 = 2
- テルペニア湾 = 3
- アニア湾 = 4
- 北海道沿岸付近 = 5
- その他 = 6

図 4.8 に 2 月 10 日における図 4.7 赤枠内の海水の由来の算出結果をまとめた。年により割合は様々である。2003 年から 2005 年においては、北海道沿岸付近（区画 5）を由来とする海水は非常に少なく、殆どの海水がサハリン中～北部の東沿岸域（区画 2）から来ている。それに対し、2009 年、2010 年は他の年より区画 2 から来ている海水は少なく、北海道沿岸域近くの区画 5 を由来とするものが多い。

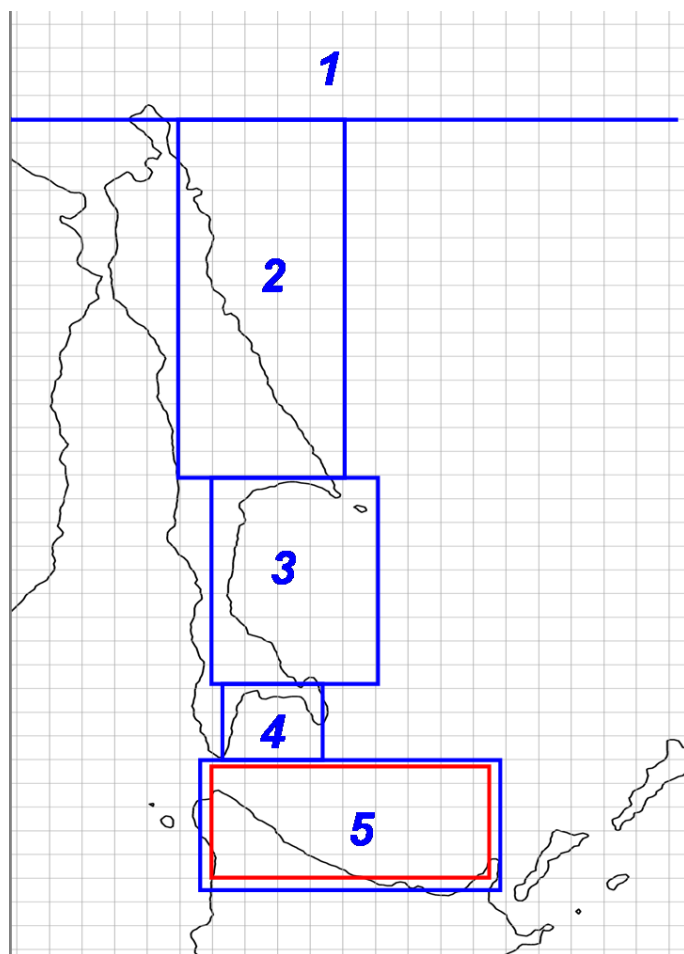


図 4.7: 区画を設定

< 2003 >		< 2004 >		< 2005 >		< 2006 >	
1: 0%	2: 75.6%	1: 0%	2: 74.8%	1: 0%	2: 81.8%	1: 0%	2: 52.2%
3: 12.2%	4: 8.7%	3: 0%	4: 11.3%	3: 0%	4: 5.2%	3: 22.6%	4: 11.3%
5: 3.5%	6: 0%	5: 4.3%	6: 9.6%	5: 5.2%	6: 7.8%	5: 13.9%	6: 0%
< 2007 >		< 2008 >		< 2009 >		< 2010 >	
1: 0%	2: 71.3%	1: 0%	2: 51.3%	1: 0%	2: 6.1%	1: 0%	2: 37.5%
3: 0%	4: 0.9%	3: 39.1%	4: 2.6%	3: 25.2%	4: 2.6%	3: 27.8%	4: 2.6%
5: 22.6%	6: 5.2%	5: 7.0%	6: 0%	5: 50.4%	6: 15.7%	5: 24.3%	6: 7.8%

図 4.8: 2 月 1 0 日における赤枠内の海氷の由来の割合

このように、観測された海氷は様々な場所で生成されたものが混ざっているが、ここでは北から移流してきた、その中でも厚い海氷に注目するため、図 4.6 の平均値に標準偏差を加えた厚さに着目し、高緯度の区画 2 を由来とする海氷の割合との関係を図 4.9 に示した。

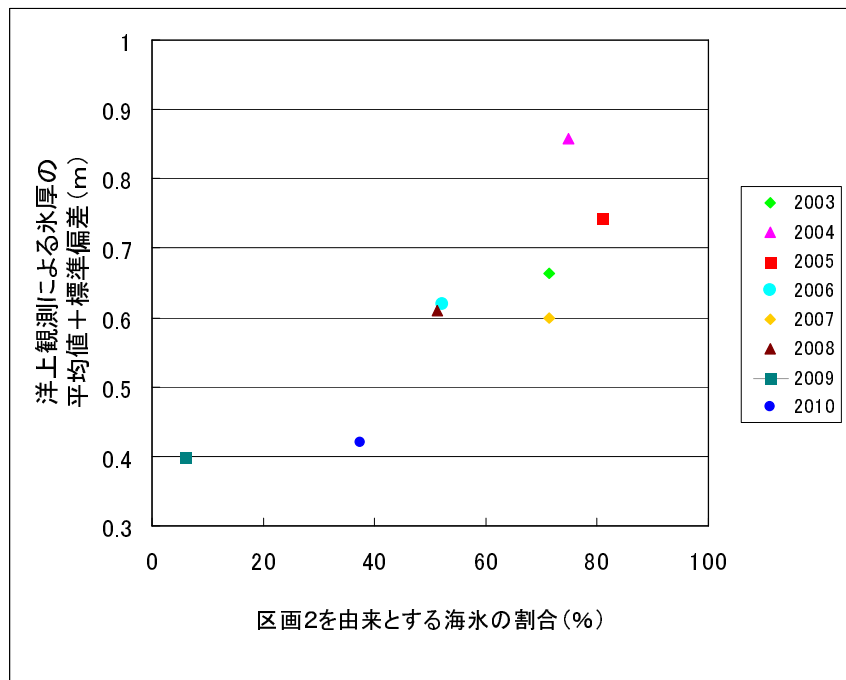


図 4.9: 区画 2 を由来とする海氷の割合と海氷厚さの関係

他の年と比べ海氷厚さの値が小さい2009年、2010年は北海道沿岸付近（５）から多く来ているということ、そして、図4.9より、海氷厚さの値が大きい2004年、2005年は高緯度のサハリン中～北部の東沿岸域（２）から多く来ているという結果が得られた。以上より、北海道付近に達する level ice の厚さは、その移動距離と関係があることが示され、高緯度の海域から来ているものほど厚く、南部で生成されるものほど薄いことが分かった。

最後に、2月10日における各海域の海氷の由来（北緯）の分布を図4.10から図4.17に示す。3.3の図3.18～図3.25と併せて見ることにより、オホーツク海中～北部で生成された海氷が南部へ拡大していく面積とその速度が確認できる。

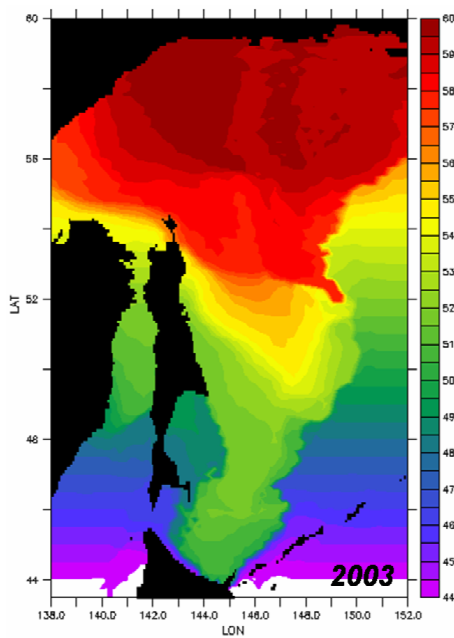


図 4.10: 各海域の海氷の由来（2003 年 2 月 10 日）

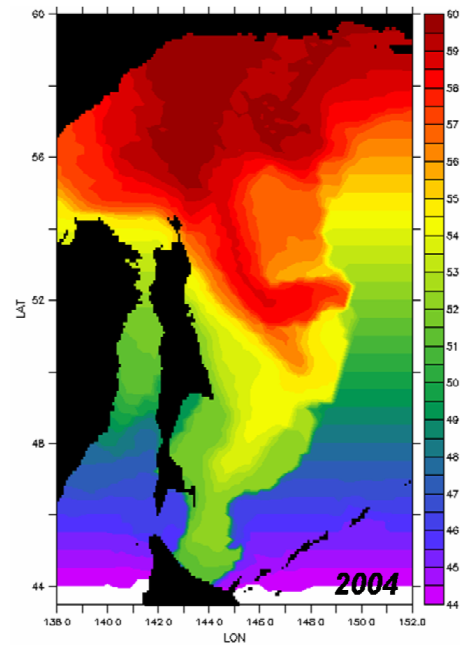


図 4.11: 各海域の海氷の由来（2004 年 2 月 10 日）

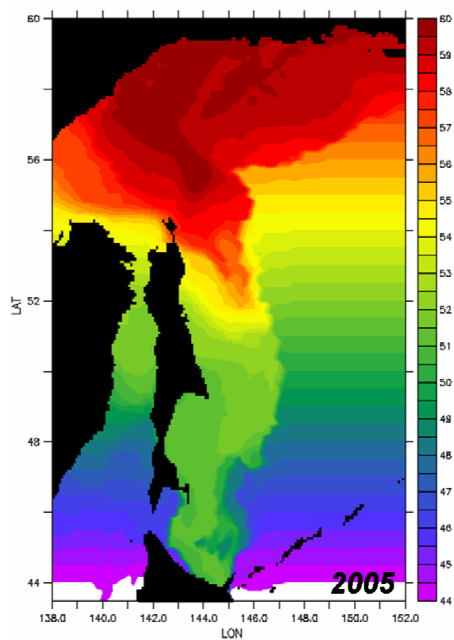


図 4.12: 各海域の海水の由来 (2005 年 2 月 10 日)

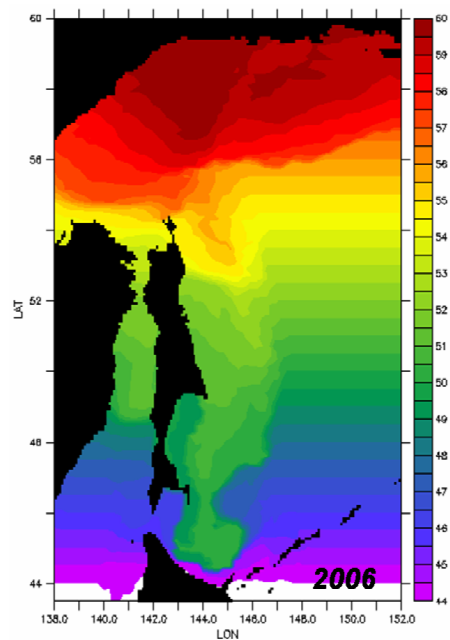


図 4.13: 各海域の海水の由来 (2006 年 2 月 10 日)

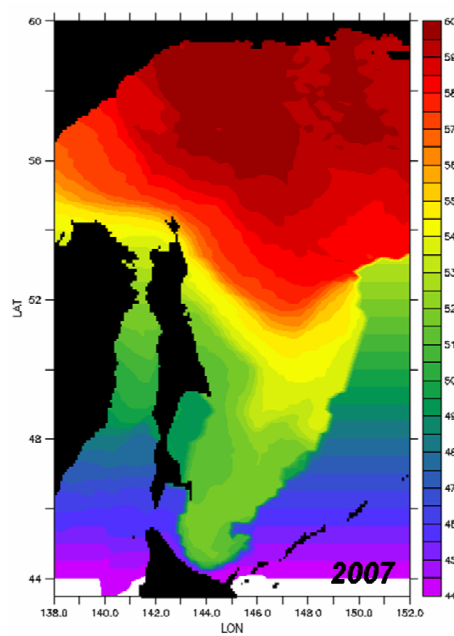


図 4.14: 各海域の海水の由来 (2007 年 2 月 10 日)

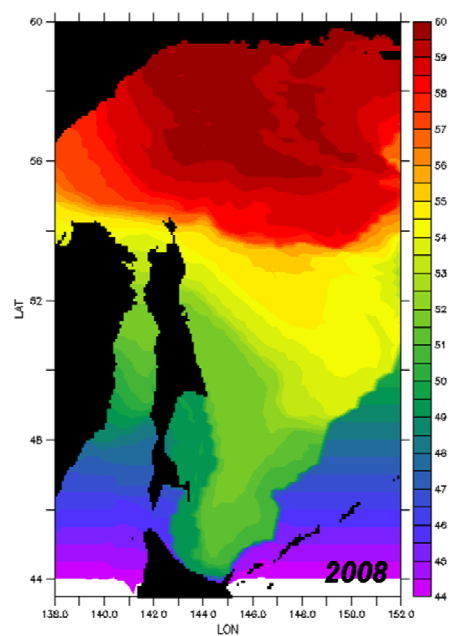


図 4.15: 各海域の海水の由来 (2008 年 2 月 10 日)

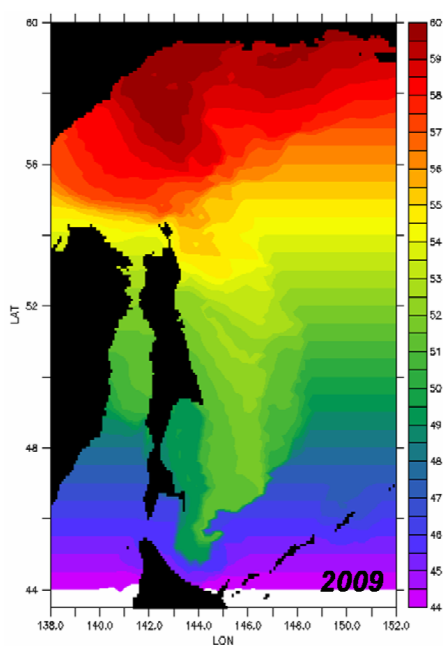


図 4.16: 各海域の海水の由来 (2009 年 2 月 10 日)

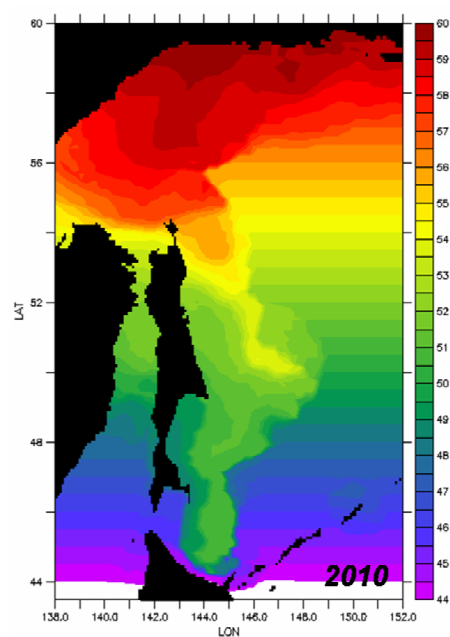


図 4.17: 各海域の海水の由来 (2010 年 2 月 10 日)

第5章 結言

5.1 まとめと成果

本研究では、2つの人工衛星データから得られるデータを解析することで、2003年から2010年までの海氷漂流速度のデータセットを作成した。これらは AVHRR 画像から8年分、計約2000個の氷盤を目で追うことにより、オホーツク海南部の細かいスケールを捉えたデータである。それらを用いてオホーツク海における海氷移流経路の算出を行った。また、年による移流経路の違いを決める要因の考察や、海氷厚さと経路との関係を調べた。解析結果により、以下の知見が得られた。

1. 北海道沿岸域の海氷は様々な由来のものが混ざっている。
 - 年により由来は異なるが、その多くはサハリン中～北部の東沿岸およびテルペニア湾で生成されたものである。
2. オホーツク海の家氷移流経路は年による違いが大きい。
 - サハリン中部より高緯度で生成された海氷が北海道沿岸域に到達するためには、オホーツク海南部の東樺太海流およびテルペニア湾南部の時計周りの渦が重要な役割を果たしている。
 - オホーツク海南部には大きく分けて2種類の移流経路があり、どちらの経路を経て漂流して来るかはテルペニア湾中央の海域の家氷密接度により影響される。
3. 北海道沿岸域で観測される海氷 (level ice) の厚さは、その移動距離と関係がある。
 - 高緯度の海域から漂流して来るものほど厚く、南部で生成されるものほど薄い。
 - リッジングやラフティングなど力学的作用により厚くなった海氷は、時間や経路に関係なく、どの海域においても厚みを増す可能性がある。

5.2 オホーツク海における海氷の挙動に関する今後の研究への提言

海氷移流予測への提言

海氷の動きの日々の変化は風速の変化によるところが大きい。そのため、海氷の移流する早さの予測には風速の予測が不可欠である。それが可能なのは長くても数日であろう。しかし、海氷の移流経路は海流や海氷の密接度によってほぼ決定されることが本研究により示された。これらは短期間で変化しないため、数週間スケールの海氷軌跡の予測は可能である。例えば、オホーツク海北部やサハリン沖で汚染物質の流出が起きた場合、それが北海道沿岸に達するかどうかは、テルペニア湾中央部の海氷密接度と湾南部の海洋渦の状態を解析すれば、予測が可能である。

データ解析への提言

本研究の結果から、オホーツク海における海氷の挙動を正しく捉えるためには、オホーツク海南部の細かいスケールの海流を考慮することが不可欠であることが示された。本研究では AVHRR 画像を用いた補正を行うことで、それら細かいスケールの海流に伴う海氷の動きを捉えたが、各日の個々の氷盤を目で追跡することは、結果の信憑性は高いものの非常に時間のかかる作業である。面相關法により、それらの海流を正確に捉えることができるようになれば、より解析の効率化が図れるものと考えられる。

また、互いが近くに存在する氷盤は常に同じ方向に移流するわけではなく、図 5.1 のように互いに離れていく場合も存在する。この現象を考慮するには、計算に適切なランダム成分を加える必要があり、それを検討することが本研究の今後の課題としても挙げられる。

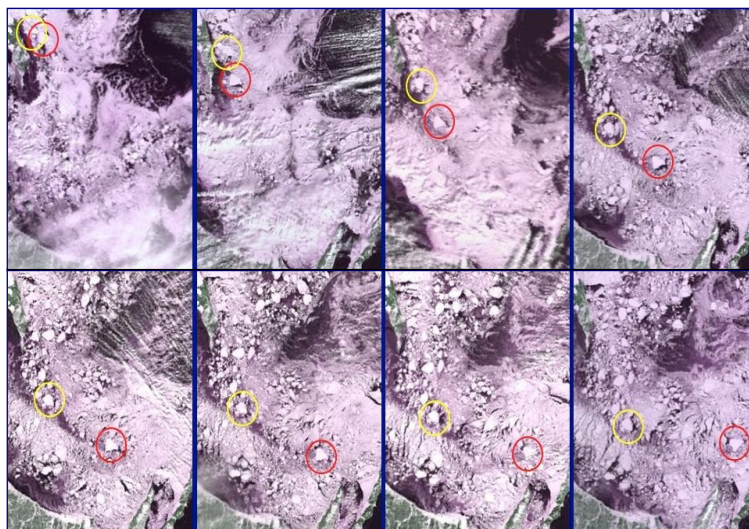


図 5.1: 氷盤の動き

数値モデルへの提言

数値モデルでオホーツク海における海氷の挙動を再現するには、テルペニア湾南部の渦を、その年々変化も含めて再現することと、海氷密接度の影響による移流経路の違いを再現することが不可欠である。その再現が可能になれば海氷分布の予測モデルの精度も大幅に向上するであろう。また、人工衛星による観測データから算出した実際の海氷の動きとの比較を行うことで、今後、数値モデルの更なる較正を図ることができると考える。

参考文献

- [1] 気象庁ホームページ 海洋の健康診断表 <http://www.data.kishou.go.jp/shindan/>
- [2] 青田昌秋,「白い海、凍る海 オホーツク海の不思議」 東海大学出版会 1993
- [3] 川内雅雄, 冬季オホーツク海における海氷と流出油の挙動予測 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 修士論文,2010
- [4] Thorndike,A.S.and Colony,R , Sea ice motion in response to geostrophic winds, Journal of Geophysical Research 87, 5845-5852, 1982.
- [5] Mizuta,G.,Fukamachi,Y.and Ohshima,K.I.,Wakatsuchi,M., "Structure and Seasonal Variability of the East Sakhalin Current ",J.Geophysical Research Vol.33 ,pp.2430-2445, 2003.
- [6] 望月直人, 高塚徹, 青田昌秋, アルゴス・ブイによるオホーツク海流氷の漂流観測 , 第10回オホーツク海と流氷/氷海の民に関する国際シンポジウム講演要旨集 1995.
- [7] Kimura,N Sea ice tracks in the Sea of Okhotsk derived from satellite images , Proceedings of the 25th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice , pp.130-133 , 2010
- [8] JAXA 高性能マイクロ波放射計/改良型高性能マイクロ波放射計 AMSR / AMSR-E 宇宙からの水惑星観測 <http://sharaku.eorc.jaxa.jp/AMSR/>
- [9] Kimura,N. and Wakatsuchi,M., Relationship between sea-ice motion and geostrophic wind in the Northern Hemisphere, Geophysical Research Letters, 27, 3735-3738, 2000.
- [10] Kimura,N and Wakatsuchi,M., Increase and decrease of sea ice area in the Sea of Okhotsk:Ice production in coastal polynyas and dynamic thickening inconvergence zones, Journal of Geophysical Reserch, Vol. 109, C09S03, 2004
- [11] Ohshima, K. I., Watanabe,T. and Nihashi,S. , Surface heat budget of the Sea of Okhotsk and the role of sea ice on it,Journal of Meteorological Society of Japan , 81,653. 677, 2003.

- [12] Fukamachi, Y., Mizuta, G., Ohshima, K. I., Toyota, N. Kimura, and M. Wakatsuchi (2006), Sea ice thickness in the southwestern Sea of Okhotsk revealed by a moored ice-profiling sonar, *J. Geophys. Res.*, 111, C09018, doi:10.1029/2005JC003327.
- [13] 北海道大学 低温科学研究所 2010 年 2 月 巡視船「そりや」海水観測速報

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導、ご協力を頂きました。この場をお借りし厚く御礼を申し上げます。

北見工業大学雪氷研究室の榎本浩之教授、舘山一孝助教には、本研究において欠かすことのできない AVHRR 可視画像をご提供頂くと共に、合同研究会の際は貴重なアドバイスや研究に対する励ましのお言葉を頂きました。

気象庁海洋気象情報室海氷グループの方々には、アイスミーティングにおいて数回にわたる発表にお付き合いいただき、数々のアドバイスを頂きました。

副指導教員の林昌奎教授には研究内容の助言のみならず、研究への取り組み姿勢、論理的に物事を考える大切さを学びました。

指導教員の山口一教授にはこの2年間のご指導を通じて本当に成長させていただきました。私にはまだまだ至らないところが多々あり、時には厳しいご指導を頂きましたが、だからこそ身についた研究姿勢、物事の考え方、ガッツは大きな自信となりました。また、私が困っているときは真摯に向き合って頂き、本当に頼りにさせていただきました。山口先生に指導を受けたいと思い立ち、修士課程から山口研に移った私ですが、その選択に間違いはありませんでした。

助教の木村さんには、本研究を進めるにあたり、文章の表現方法や計算プログラムの見方などスキルの面から研究に取り組む姿勢に至るまで、常に親身なご指導をいただきました。「自分が知りたいことを知ることが大切」という木村さんの研究姿勢には強く感化され、研究に取り組む大きな原動力となりました。また、時に辛い研究生活において、木村さんと昼食を食べに行く時間は非常に楽しい時間でした。数々のラーメン屋巡りは忘れられない大切な思い出です。そして、研究室にいらっしゃる度に明るい雰囲気をもたらしていただきました。約1年半の間、本当にありがとうございました。

先輩の高橋さんには研究生活全般において様々なアドバイスいただき、大変お世話になりました。後輩の金君は短い間でしたが、いつも慕ってくれて嬉しかったです。本郷キャンパス流体研の方々には定期的な交流会などでお世話になりました。

そして、同期の渋谷君、田中君とは公私共に非常にお世話になりました。研究生生活終盤の過酷な時期を乗り越えることができたのは、2人のおかげです。今後はそれぞれ違う分野へ進みますが、共に苦楽を共にした友としての絆を大切にしていきたいです。

研究室以外では専攻同期のメンバーや柏門空手部の部員など非常に多くの方に支えられてきました。世界中の様々なバックボーンをもつ人たちと接することで、多様な価値観に触れることができたことは大きな財産となりました。

最後に、25年間支えてくれた家族に感謝したいです。これから社会人となり、少しずつ恩返しをしていきたいと思います。

東京大学大学院で培った経験を活かし、今後も挑戦の人生を歩んでまいります。