

東京大学 大学院
新領域創成科学研究科
海洋技術環境学専攻

修士論文

人工衛星データを用いたオホーツク海に おける海水移流経路の年変動の解析

平成 23 年 1 月 27 日提出

西崎大祐

指導教員 山口 一

目次

第1章 序論	5
1.1 研究背景	5
1.2 既存研究	7
1.3 研究目的	9
第2章 研究手法とオホーツク海南部の海氷の挙動	10
2.1 使用データの特徴と手法の全体像	10
2.2 衛星データの解析手法	13
2.2.1 AMSR-E	13
2.2.2 AVHRR	14
2.3 補正データ作成	18
2.3.1 補正データ作成1	18
2.3.2 補正データ作成2	19
2.4 移流経路の算出方法	23
2.5 解析手法の精度検証	27
第3章 海氷の移流経路とその由来	29
3.1 各年の海氷移流経路算出結果	29
3.2 経路の年による違い	32
3.3 各年の海氷の由来の分布	35
第4章 海氷移流経路と海氷厚さとの関係	39
4.1 海氷が厚くなる過程	39
4.2 IPSによる氷厚の変化と移流経路の関係	39
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	41
第5章 結言	48
5.1 まとめと成果	48
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	49
参考文献	51
謝辞	53

目 次

1.1	オホーツク海の海水分布	5
1.2	オホーツク海の海水	6
1.3	サハリン	7
1.4	オホーツク海の表層海流循環の模式図 [5]	8
1.5	オホーツク海流氷の漂流観測 (望月ら 1994) [6]	8
2.1	Aqua/AMSR-E[8]	10
2.2	AMSR-E(89GHz) 画像データ (例: 2005 年 2 月 26 日)	11
2.3	AVHRR 画像データ (例: 2005 年 2 月 26 日)	11
2.4	オホーツク海の海域	12
2.5	オホーツク海南部	12
2.6	輝度温度分布のパターンマッチング (例: 2005 年 3 月 1 日~3 月 2 日)	13
2.7	AMSR-E データから算出した海水漂流速度グリッドデータ (例: 2005 年 3 月 1 日)	14
2.8	ある日の氷盤の位置	14
2.9	24 時間後の氷盤の位置	14
2.10	24 時間の氷盤移動分 (例: 2005 年 3 月 1 日~3 月 2 日)	15
2.11	距離による重み付け	16
2.12	重み付け関数 f_r	17
2.13	AVHRR 画像から導出した海水漂流速度グリッドデータ (例: 2005 年 3 月 1 日)	17
2.14	AVHRR-velocity と AMSR-E-velocity の値の「差」(例: 2005 年 3 月 1 日)	19
2.15	東樺太海流に伴う移流	20
2.16	テルペニア湾南部の渦に伴う移流	20
2.17	海水密度と漂流速度ベクトルの関係	21
2.18	海水密度と U 方向漂流速度の関係	21
2.19	補正データ作成のイメージ	22
2.20	ある日の海水漂流速度グリッドデータと粒子の位置	23
2.21	重み付け関数 f_r	24
2.22	計算時の陸地の処理	24
2.23	海水の後方軌跡の算出結果の例	25

2.24	移流経路算出までの解析のフローチャート	26
2.25	移流経路算出結果と氷盤追跡結果の比較（補正なし）	27
2.26	移流経路算出結果と氷盤追跡結果の比較（補正あり）	27
3.1	海氷の後方軌跡（2003年）	29
3.2	海氷の後方軌跡（2004年）	29
3.3	海氷の後方軌跡（2005年）	30
3.4	海氷の後方軌跡（2006年）	30
3.5	海氷の後方軌跡（2007年）	30
3.6	海氷の後方軌跡（2008年）	30
3.7	海氷の後方軌跡（2009年）	31
3.8	海氷の後方軌跡（2010年）	31
3.9	沿岸ポリニアが形成される海域	32
3.10	「差」の年平均分（2003年）	33
3.11	「差」の年平均分（2004年）	33
3.12	「差」の年平均分（2005年）	34
3.13	「差」の年平均分（2006年）	34
3.14	「差」の年平均分（2007年）	34
3.15	「差」の年平均分（2008年）	34
3.16	「差」の年平均分（2009年）	35
3.17	「差」の年平均分（2010年）	35
3.18	各海域の海氷の由来 （2003年3月1日）	36
3.19	各海域の海氷の由来 （2004年3月1日）	36
3.20	各海域の海氷の由来 （2005年3月1日）	36
3.21	各海域の海氷の由来 （2006年2月25日）	36
3.22	各海域の海氷の由来 （2007年3月1日）	37
3.23	各海域の海氷の由来 （2008年3月1日）	37
3.24	各海域の海氷の由来 （2009年3月1日）	37
3.25	各海域の海氷の由来 （2010年2月20日）	37

4.1	リッジング	39
4.2	ラフティング	39
4.3	紋別沖における海氷厚さ変化	40
4.4	観測点付近に達した海氷の後方軌跡 (2003年)	40
4.5	氷厚の観測方法 [13]	41
4.6	北海道沿岸域の海氷厚さ (誤差表示は各年の標準偏差) [13]	42
4.7	区画を設定	43
4.8	2月10日における赤枠内の海氷の由来の割合	43
4.9	区画2を由来とする海氷の割合と海氷厚さの関係	44
4.10	各海域の海氷の由来 (2003年 2月10日)	45
4.11	各海域の海氷の由来 (2004年 2月10日)	45
4.12	各海域の海氷の由来 (2005年 2月10日)	46
4.13	各海域の海氷の由来 (2006年 2月10日)	46
4.14	各海域の海氷の由来 (2007年 2月10日)	46
4.15	各海域の海氷の由来 (2008年 2月10日)	46
4.16	各海域の海氷の由来 (2009年 2月10日)	47
4.17	各海域の海氷の由来 (2010年 2月10日)	47
5.1	氷盤の動き	49

第1章 序論

1.1 研究背景

オホーツク海は冬季に海水が発達する最も低緯度にある季節海水域である。海水は11月に北西部海域で生成が始まり、その後急速に南へその範囲を拡げつつ、除々に東へも拡大する。そして2月下旬から3月上旬にその面積は最大に達する。(図 1.1[1])

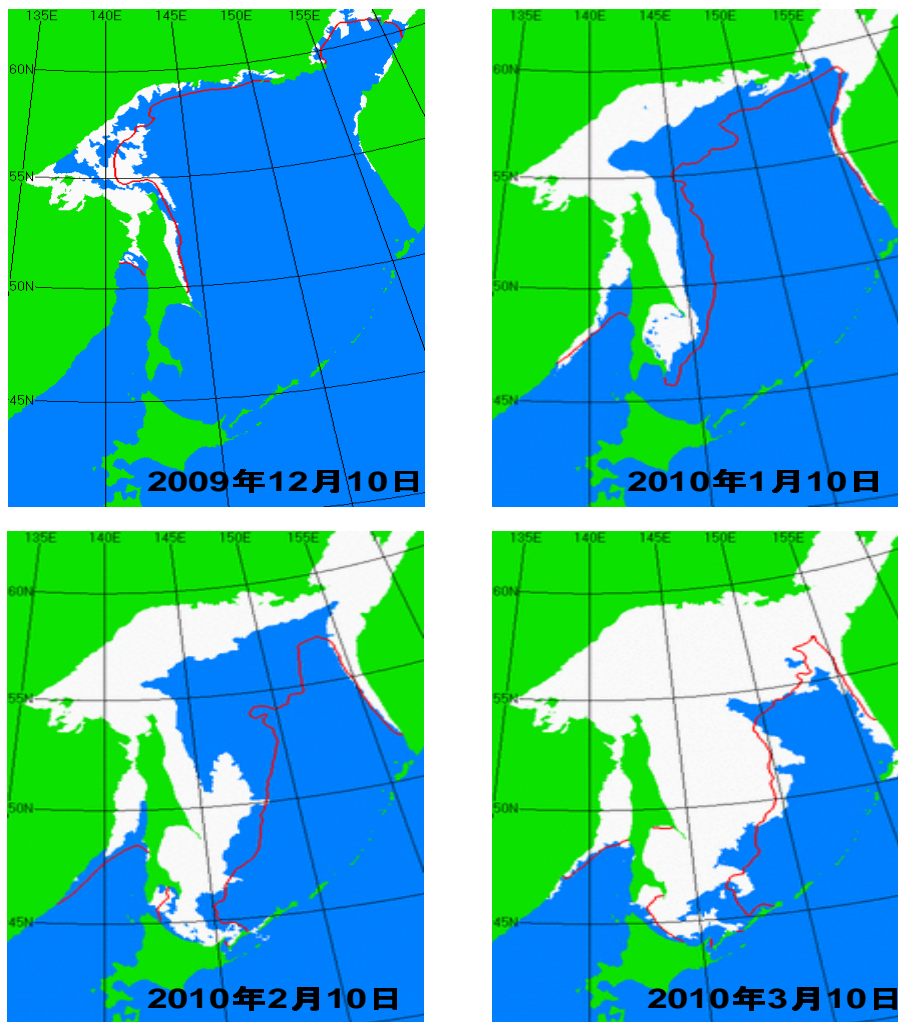


図 1.1: オホーツク海の海水分布

毎年、2月から3月になると北海道沿岸域も海氷で覆われる（図 1.2）。海氷は中に植物プランクトンや栄養分を閉じ込めて漂流してくるから、好漁場を形成するための極めて重要な存在と考えられている [2]。また、サハリン（図 1.3）での資源開発に伴い、万が一油流出事故が発生した場合、油の拡大を抑えるといった効果をもたらすことが川内ら（2010）[3]の研究で明らかになった。さらに近年では、観光資源としても重要な役割を果たしている。このように海氷は我々に様々な恩恵を与えてくれる。しかし、海氷が覆われることで、漁船や貨物船といった殆どの船舶は航行が不可能になるといった悪い面も存在する。実際、過去には海氷による海難事故が起きている。

海氷は植物プランクトンや栄養分以外にも、資源開発に伴う汚染物質や流出油といった様々な物質を運んでくる可能性がある。また、海氷の由来によって北海道沿岸域の氷況が異なると予想される。こうしたことから、北海道沿岸域に漂流して来る海氷がどこから、どのように来るのかを把握しておくことは重要なことである。しかしながら、毎年北海道沿岸域に存在する海氷の移流経路や由来については、未だ良く分かっていない。



図 1.2: オホーツク海の海氷



図 1.3: サハリン

1.2 既存研究

海氷の動きを決定づける要因は風と海流である。(Thorndike and Colony,1982[4]) オホーツク海では通常、北西風が卓越しており、海氷を北から南へ運ぶ大きな役割を果たしている。また、オホーツク海には図 1.4 に示すように、東樺太海流と呼ばれる強い海流が存在する。(Ohshima,et al.,2003[5])

しかし、北海道沿岸に達する海氷がどこで生成され、どのようにして移流してきたものなのかは未だ解明されていない。これは海氷の分布に関するデータが多く利用されてきたのに対し、海氷の動きに関する観測は殆ど行われてこなかったためである。唯一の観測として望月ら(1994)[6]による漂流ブイによる海氷移流経路の観測が挙げられる。図 1.5 は 1994 年 1 月にサハリン北部の東沿岸域に存在する氷盤上に設置した 2 台のブイの漂流軌跡を示したものである。図中の日にちはブイを設置してから経過した日数を表している。

また、kimura(2010)[7]が人工衛星データを解析することで、海氷の動きおよび移流経路を算出する方法を示した。しかし、解析した年が 2003 年のみであること、海氷漂流速度のデータセットの作成方法や移流経路算出方法が大まかであることなどから、研究を発展させる余地が大いに存在する。そこで、本研究では [7] をベースに、より厳密な手法を用いて 8 年分(2003 年~2010 年)の海氷漂流速度データセットの作成および移流経路計算の手法の改良に取り組み、より高精度な経路の算出を試みた。



図 1.4: オホーツク海の表層海流循環の模式図 [5]

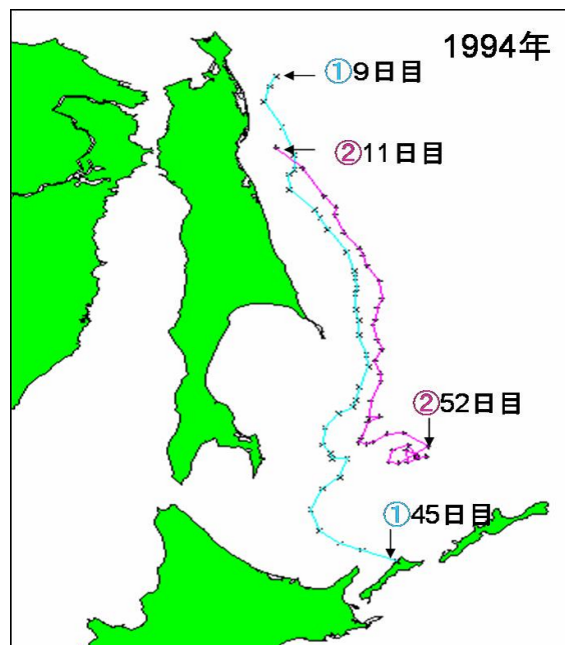


図 1.5: オホーツク海流氷の漂流観測 (望月ら 1994) [6]

1.3 研究目的

本研究では、2003年から2010年までの8年分の人工衛星データの解析を行い、オホーツク海の海水漂流速度のデータセットを作成し、北海道沿岸付近に存在する海水の移流経路および由来を算出する。これらの解析結果を用い、海水移流経路を決定する要因および北海道付近の海水の移流経路および由来と海水厚さとの関係を考察する。さらに、解析により得られた知見から、オホーツク海における海水の挙動に関する今後の研究への提言を行う。

第2章 研究手法とオホーツク海南部の海氷の挙動

2.1 使用データの特徴と手法の全体像

本研究では AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) および AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) の2つのセンサーから得られる人工衛星データを用いた解析を行った。

AMSR-E は NASA が打ち上げた地球観測衛星 Aqua に搭載された国産の改良型高性能マイクロ波放射計である (図 2.1)。地球表面および大気から放射される微弱なマイクロ波帯の電波を観測し、雲水量、海面水温、海上風速、海氷密接度など様々な物理量を推定する [8]。本解析では周波数 89GHz の垂直、水平の両偏波チャンネル画像データを海氷漂流速度の計算に使用した (図 2.2)。同データは 6.25km のグリッドデータとして米国の National Snow and Ice Data Center により配布されている。



図 2.1: Aqua/AMSR-E[8]

もう一方の AVHRR はアメリカの極軌道衛星 NOAA に搭載された可視・赤外放射計である。分解能 1.1km、観測幅は 3000km であり、受動型の走査観測を行っている。AVHRR の画像データは、同データを受信・処理している北見工業大学 雪氷研究室提供のものを使用した。(図 2.3)

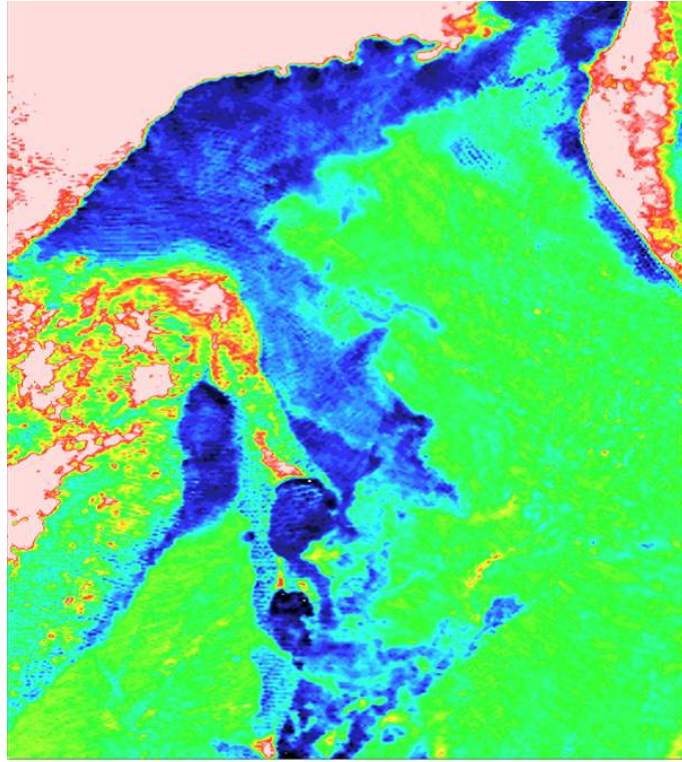


図 2.2: AMSR-E(89GHz) 画像データ (例 : 2005 年 2 月 26 日)

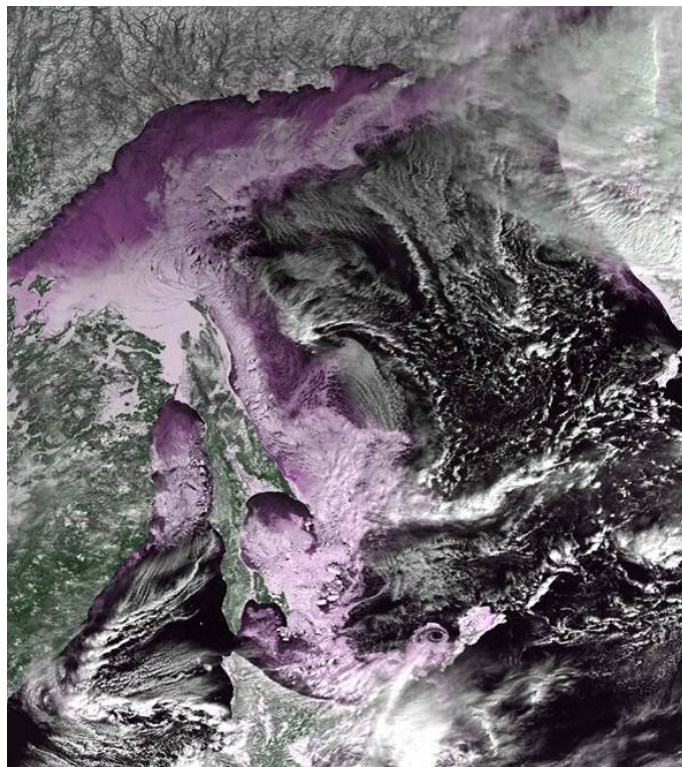


図 2.3: AVHRR 画像データ (例 : 2005 年 2 月 26 日)

各センサーにはそれぞれ長所、短所が存在する。AMSR-Eの長所は雲や日射条件の影響を殆ど受けないため、広範囲の連続した観測が可能であるという点である。しかしながら、分解能が粗いため局所的な海洋現象を捉えることができない。オホーツク海は図 2.4 に示す青線より高緯度は比較的広い空間スケールの海流が卓越した海域であるが、青線より低緯度では図 2.5 に示す局所的な南下流（A、C）や時計周りの海洋渦（B）、南北で速度差が大きい海域（D）などが存在し、局所的かつ複雑な海洋現象を有する海域となっている。D 付近の局所的な流れは非定常であるが、A の流れや B の渦は、一冬の間はほぼ定常的に存在する。C については年により異なり、ほぼ定常の年もあれば非定常の年もある。また、A～D のいずれも年ごとに流れの強さは異なる。これらの局所的な海洋現象は AMSR-E データのみの解析では捉えることができない。

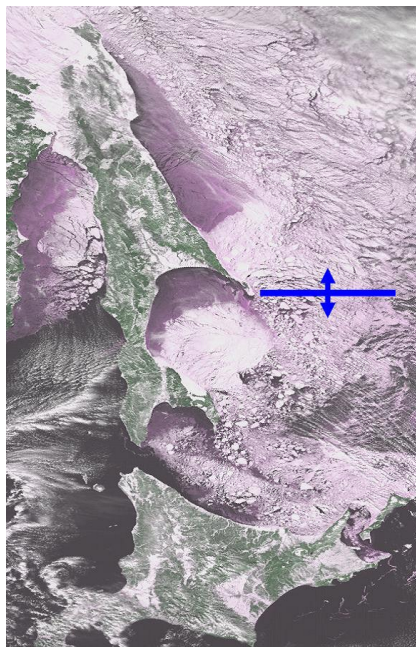


図 2.4: オホーツク海の海域

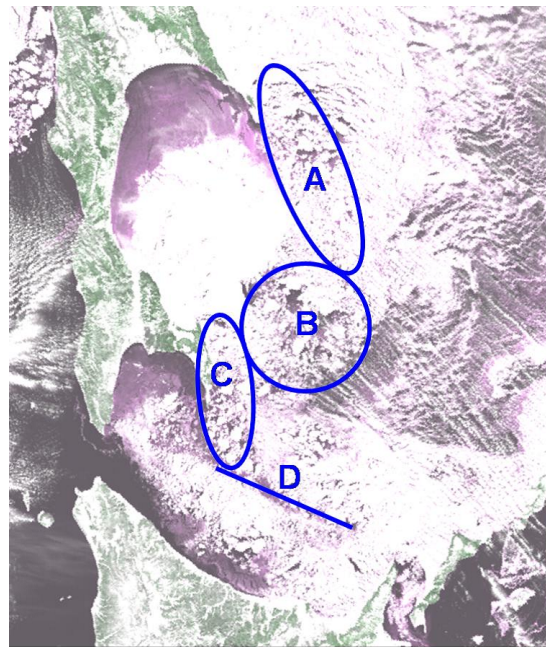


図 2.5: オホーツク海南部

それに対し、AVHRR は分解能が良く（1.1km）このような細かい空間スケールでの海洋現象に伴う海水の動きを捉えることが可能である。しかし、AVHRR は可視・赤外放射計であることから、曇っている部分の海水が目視できないという短所をもち、データの時間的、空間的な連続性に乏しい。そこで、本研究ではこれら 2 つのセンサーから得られるデータを使用し、各センサーの長所を活かし、短所を補う解析を行った。

2.2 衛星データの解析手法

2.2.1 AMSR-E

まず、AMSR-E 画像データの解析により海水漂流速度を算出する手法を説明する。尚、本研究では AMSR-E データから得られる海水漂流速度グリッドデータは、Kimura(2010)[7]によって作成されたデータを使用した。計算は面相関法を用いて行われている。この手法は図 2.6 のように、分解能 6.25km の輝度温度分布データから、37.5km × 37.5km の窓枠内の分布と最も相関の高い場所を 24 時間後のデータから探し出すものである。2 つの窓枠内の中心点の距離を、窓枠内の氷野が移動した距離とし、37.5km × 37.5km グリッドの日平均データを作成する。(Kimura and Wakatsuchi,2000[9])

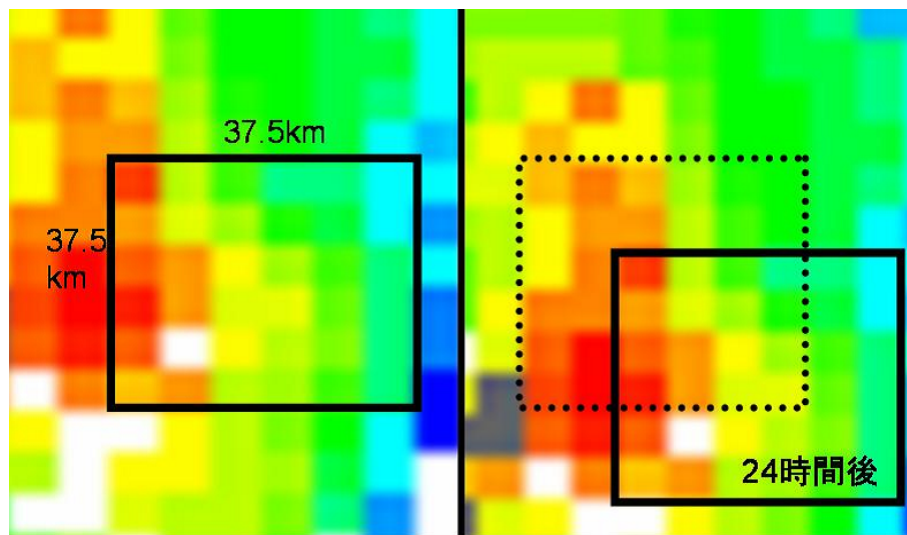


図 2.6: 輝度温度分布のパターンマッチング (例：2005 年 3 月 1 日～3 月 2 日)

図 2.7 は AMSR-E データの解析により得られる海水漂流速度を示したものである。AMSR-E データは雲の影響を殆ど受けないことから、毎日の海水漂流速度グリッドデータを作成することが可能である。

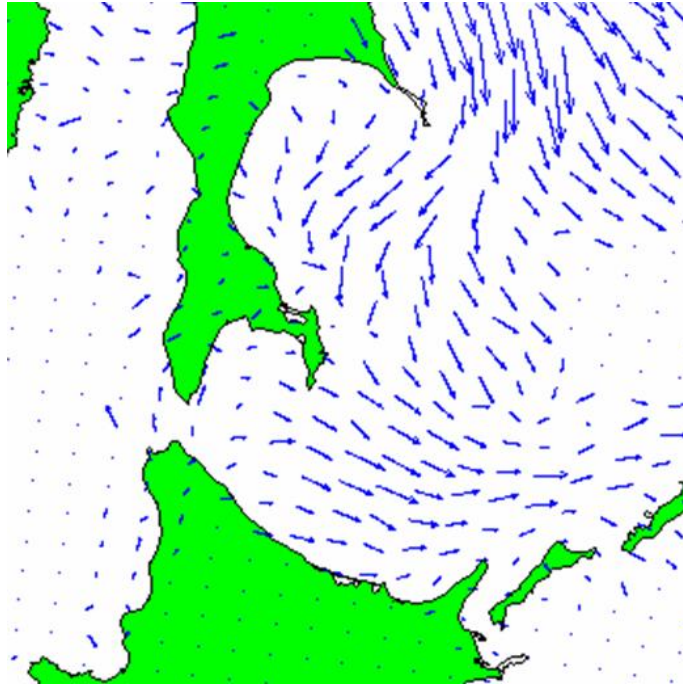


図 2.7: AMSR-E データから算出した海水漂流速度グリッドデータ (例: 2005 年 3 月 1 日)

2.2.2 AVHRR

続いて、AVHRR 画像データの解析により海水漂流速度を導出する手法を説明する。まず、晴れており、かつ氷盤が認識できる日の画像データを選び、図 2.8、図 2.9 のように日にちが連続した画像上の氷盤の移動を目で追跡する。

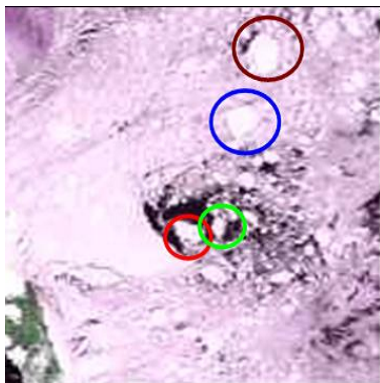


図 2.8: ある日の氷盤の位置

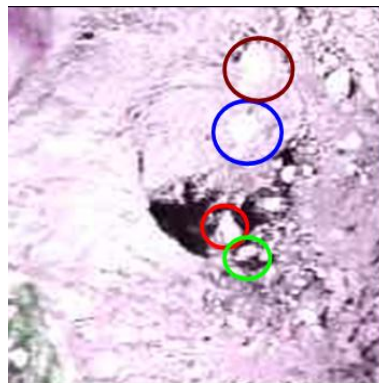


図 2.9: 24 時間後の氷盤の位置

次に、図 2.10 のように、24 時間の各氷盤の移動分を地形および $37.5\text{km} \times 37.5\text{km}$ サイズの格子が印刷された紙面上に書き込む。

そして、各氷盤の移動分から算出した漂流速度データから、海水の漂流速度グリッドデータを作成する。氷盤の漂流速度ベクトルからグリッドデータを作成する際の補間は距



図 2.10: 24 時間の氷盤移動分 (例 : 2005 年 3 月 1 日 ~ 3 月 2 日)

離による重み付けにより行った。図 2.11 に示すように青色のベクトルを各氷盤の漂流速度ベクトル、漂流速度ベクトルの始点の座標を $(x(\text{num}), y(\text{num}))$ 、そして各格子点の座標を (i, j) とする。

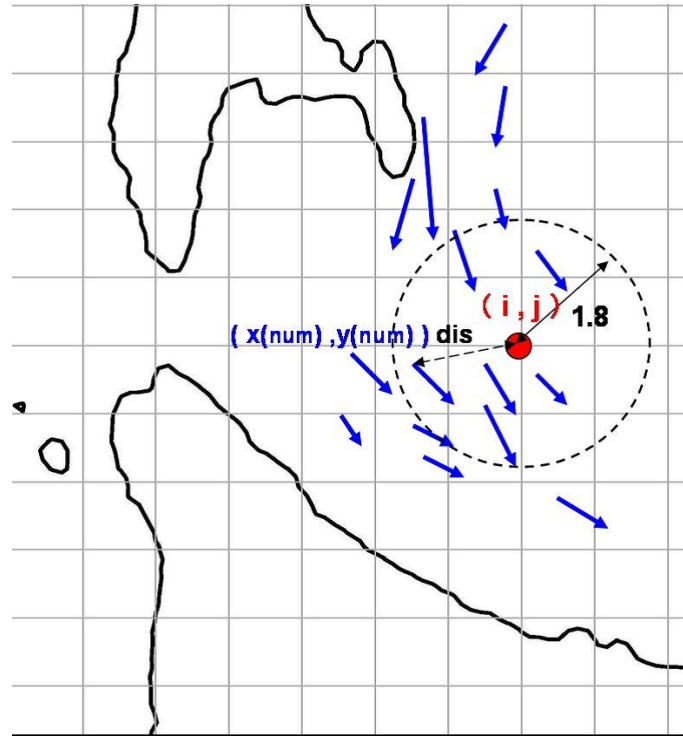


図 2.11: 距離による重み付け

格子点 (i,j) から半径 1.8 グリッド (67.5km) 以内に存在する各氷盤の漂流速度ベクトルの始点と (i,j) との距離に応じ、重み付け関数 f_r (式 2.1) を乗じることで、漂流速度グリッドデータを算出した。

$$f_r = e^{(-4.0 \times dis^2)} \quad (\text{図 2.12}) \quad (2.1)$$

図 2.13 は、補間後の海水漂流速度を示したものである。この図は図 2.7 と同じ日のものであるが、テルペニア湾南部に存在する時計回りの渦など、AMSR-E データでは捉えることのできなかつた細かいスケールの海洋現象に伴う海水の動きが捉えられている。尚、前述したとおり AVHRR 画像上の氷盤を目で追跡するには雲がないことが条件なので、AVHRR 画像から導出される海水漂流速度グリッドデータ数は限られ、各年に約 15 日程度である。

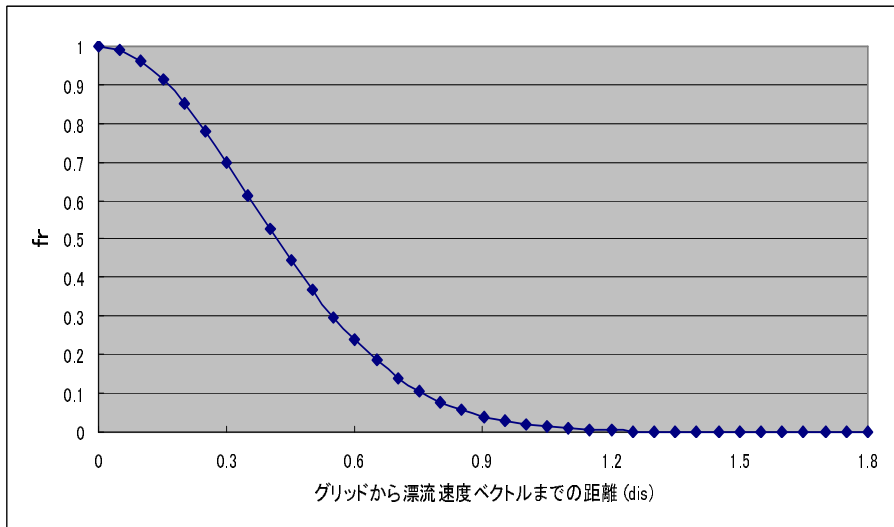


図 2.12: 重み付け関数 f_r

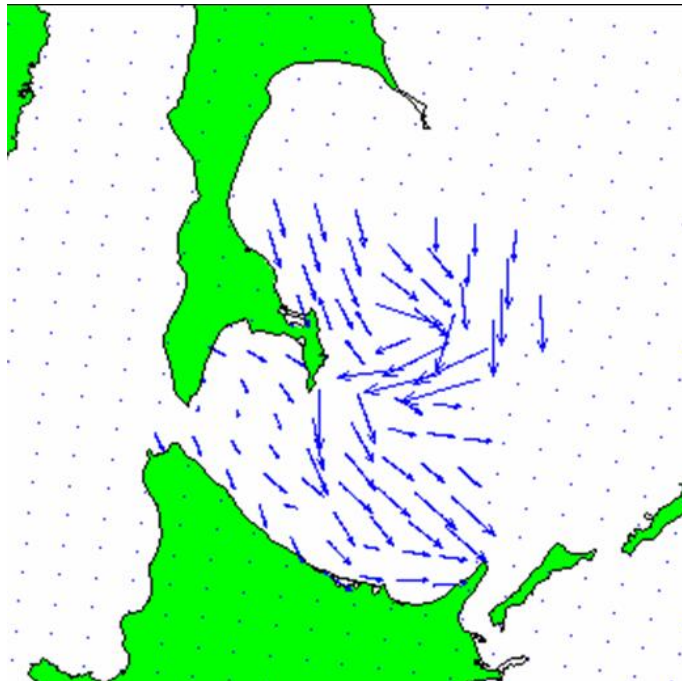


図 2.13: AVHRR 画像から導出した海水漂流速度グリッドデータ (例: 2005 年 3 月 1 日)

2.3 補正データ作成

2.3.1 補正データ作成 1

2.3.1では、2.2.1、2.2.2で述べた「AMSR-Eデータを用いた手法は局所的な海洋現象を捉えられない」及び「AVHRR画像を用いた手法はデータ数が限られる」といった短所を補うための補正の方法を説明する。以下、2.2.1のAMSR-Eデータから算出した海氷漂流速度グリッドデータ(図2.7)をAMSR-E-velocity、2.2.2のAVHRR画像から導出した海氷漂流速度グリッドデータ(図2.13)をAVHRR-velocityとする。例外は存在するが、計算は以下の前提のもとで行う。

1. AMSR-E-velocityは広い空間スケールの海氷の動きを捉えている
2. AVHRR-velocityは広い空間スケールと細かい空間スケールの双方の海氷の動きを捉えている
3. 細かい空間スケールの動きは同一冬季内で変化しない

まず、得られたAVHRR-velocityの各グリッドの値から、同じ日にちのAMSR-E-velocityの各グリッドの値を減算する。図2.14は2.2.2で示した2005年3月1日のAVHRR-velocity(図2.13)の値から2.2.1で示した同日付のAMSR-E-velocity(図2.7)の値を減算した結果を示したものである。この「差」はAMSR-Eで捉えることのできなかつた細かいスケールの海洋現象による海氷の動きを反映したものであると考えられる。以降この減算結果を「差」として表現し、生じた「差」のデータを使用して、AMSR-E-velocityを補正する。

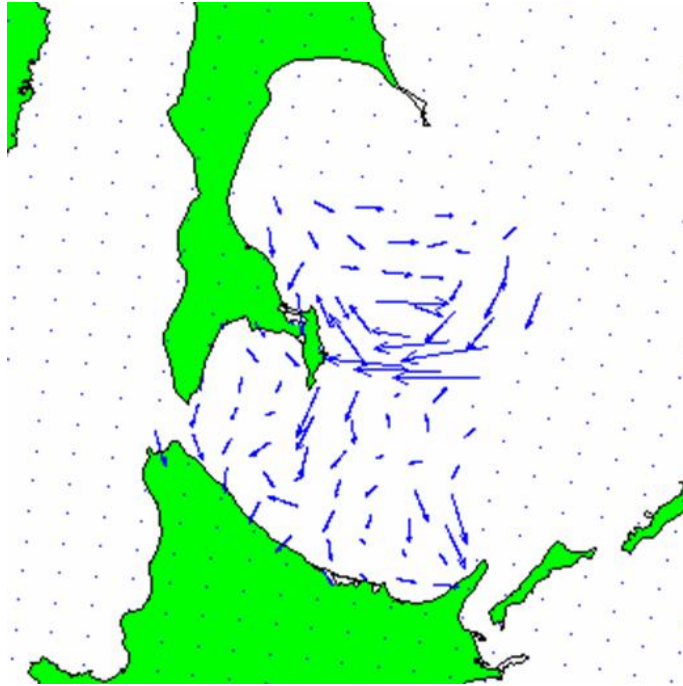


図 2.14: AVHRR-velocity と AMSR-E-velocity の値の「差」(例: 2005 年 3 月 1 日)

「差」には一冬の間定常的なものとそうでないものがある。テルペニア湾南部の渦に代表される局所的な流れの多くは一冬の間定常的に見られる。そのため、基本的に AMSR-E-velocity の補正は、「差」の各年の平均値を計算し、それを毎日の値に加算することによって行う。「差」の年平均データのグリッド (i,j) の値 $U_s(i,j)$ 、 $V_s(i,j)$ は、各日付の AVHRR-velocity のグリッド (i,j) の漂流速度を $U(i,j,day)$ 、 $V(i,j,day)$ 、グリッド (i,j) に値をもつ AVHRR-velocity の日数を n とし、次式により算出する。

$$U_s(i,j) = \frac{\sum_{day=1}^n U(i,j,day)}{n}, \quad V_s(i,j) = \frac{\sum_{day=1}^n V(i,j,day)}{n} \quad (2.2)$$

得られた年ごとの差を毎日の AMSR-E-velocity に加えることにより、AMSR-E で捉えることのできなかつた細かいスケールの海洋現象による海の動きの効果を取り入れる。しかし、「差」が一冬の間一定とみなすことが妥当でない海域が存在する。

2.3.2 補正データ作成 2

図 2.4 の青線より高緯度の海域から漂流してくる海氷の経路は図 1.4 中のテルペニア湾を通過する東樺太海流の経路が大きく影響している。(図 2.15) しかし、テルペニア湾中

中央の海域の氷況が密になると、図 2.16 のようにテルペニア湾の外側を通り、湾南部に存在する時計回りの渦を経て、北海道沿岸域に到達する。

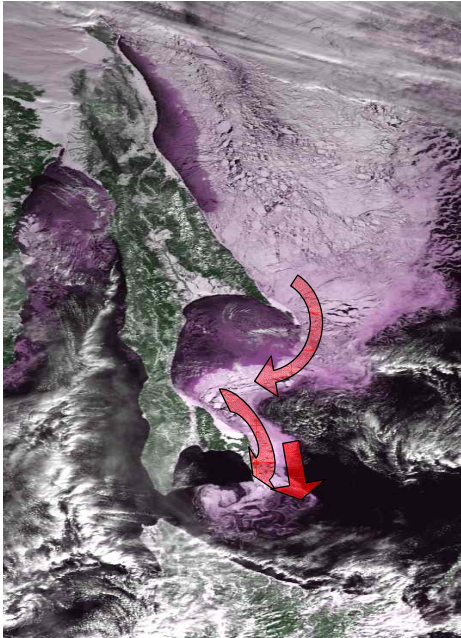


図 2.15: 東樺太海流に伴う移流

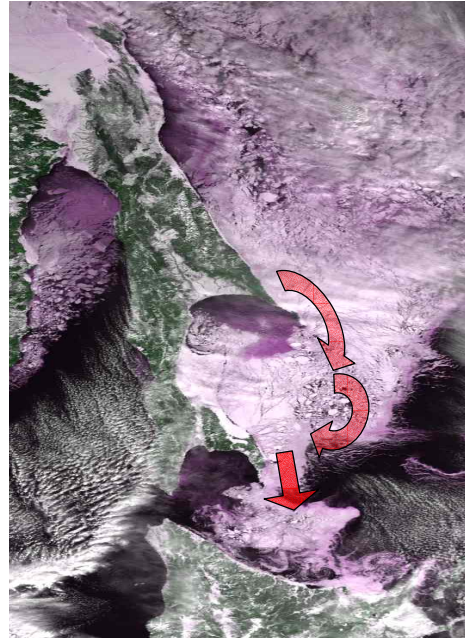


図 2.16: テルペニア湾南部の渦に伴う移流

そこで、上記の経路の違いを定量的に議論するため、図 2.17 の青枠で示すテルペニア湾中央の海域の海氷密接度と、赤色の 4 点の U 方向漂流速度との相関を調べた。

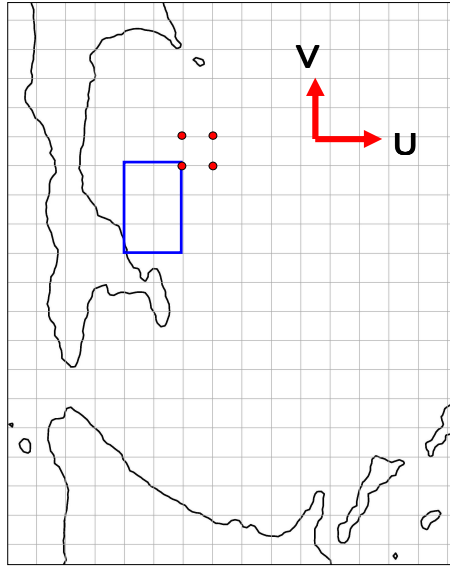


図 2.17: 海水密度と漂流速度ベクトルの関係

図 2.18 は、図 2.17 の青枠部分の海水密度と、赤色の 4 点の U 方向漂流速度の平均値との関係を示した結果である。漂流速度は AVHRR 画像の氷盤を目で追跡することにより算出した値を用いた。ただし、図 2.17 の 4 点の赤点付近の海水を追うことができた日のデータのみを使用している。また、海水密度のデータはマイクロ波放射計 SSM / I の輝度温度データから、NASA team アルゴリズムにより計算されたものを使用した。

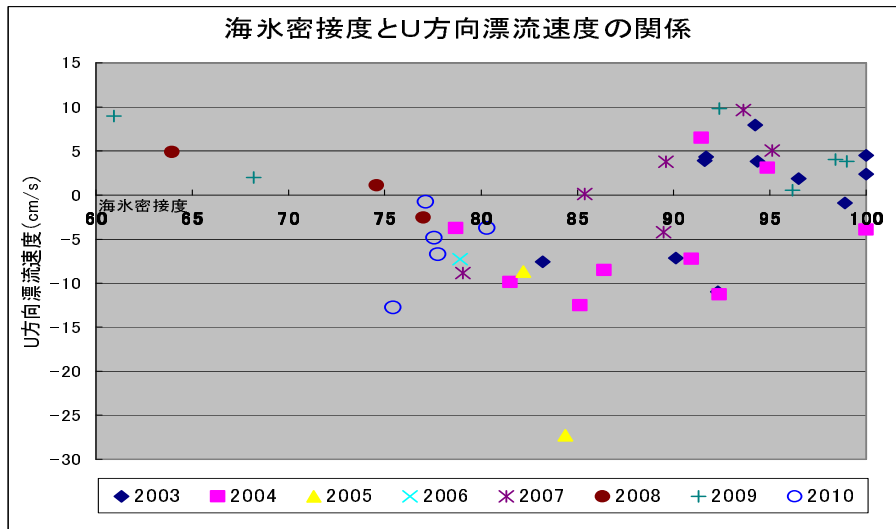


図 2.18: 海水密度とU方向漂流速度の関係

風の影響などによる例外は存在するが、海水密度の値が約 91 を越えると、U が負の値となる方向を示さなくなるという傾向がある。よって、この海域の海水の疎密によって、

海氷の移流経路が異なってくることが予想される。しかし、中には海氷密接度の値が91を越えていても、海氷どうしの中に存在する隙間によってUが負の値となる方向に動くケースも見られる。日によってこの海域の海氷密接度は変化しており、これらを補正データに反映させる必要がある。

そのため、算出した「差」の年平均データをもとに、テルペニア湾中央部の海氷の密接度の値による場合分けを行う。

海氷密接度の閾値を91とし、密接度が91以上の日に適用する「差」を「差①」、91未満の日に適用する「差」を「差②」とし、それぞれの値を毎日のAMSR-E-velocityの値に足すことで、海氷漂流速度グリッドデータの再作成を行った。(図2.19)

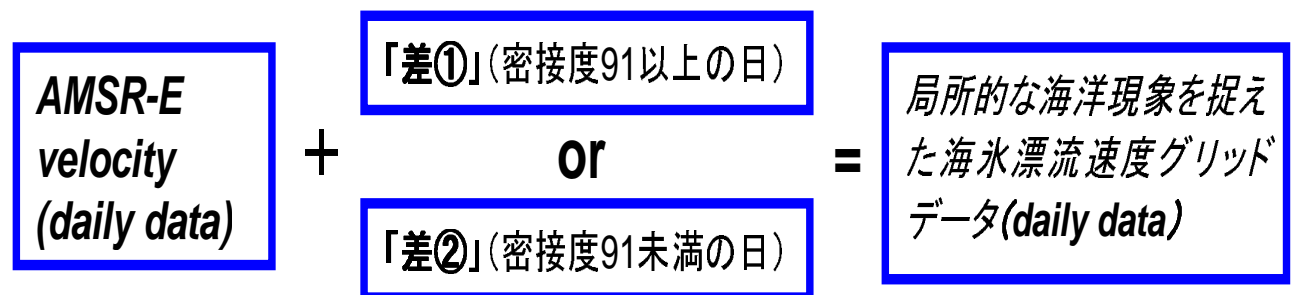


図 2.19: 補正データ作成のイメージ

2.4 移流経路の算出方法

「差」を加えることによって補正した海水漂流速度のグリッドデータを用い、海氷の後方軌跡を計算する。図 2.20 は、ある日の海水漂流速度のグリッドデータであり、粒子（赤色の点）の位置を $(x(t), y(t))$ 、 t のタイムステップは 1 日とする。

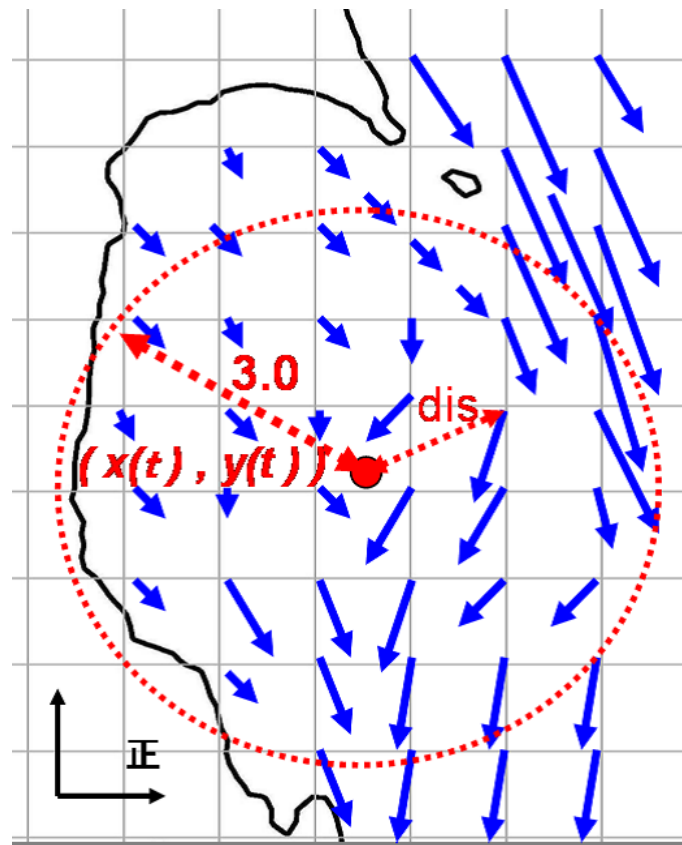


図 2.20: ある日の海水漂流速度グリッドデータと粒子の位置

この粒子の位置を追っていくことで軌跡を描く。粒子の位置 $(x(t), y(t))$ から半径 3.0 グリッド (112.5km) 以内に存在する各グリッドの漂流速度ベクトルに対し、距離 (dis) に応じた重み付け関数 f_r (式 2.3) を乗じ、積分することで粒子の移動を表現する。

$$f_r = e^{(-2.0 \times dis^2 / 1.2^2)} \quad (\text{図 2.21}) \quad (2.3)$$

これらの処理を、設定した日数分繰り返す。尚、図 2.22 に示す様に、粒子の位置から半径 3.0 グリッドの範囲内に陸地を挟む場合、「陸地を挟んだ反対側の沿岸」のグリッドの値を計算に加えないという処理をした。また、漂流速度グリッドデータを作成する際に一部、陸地内のグリッドにも値が計算されることがあるが、陸地情報を読み込み、これらの値を計算しない処理を行った。

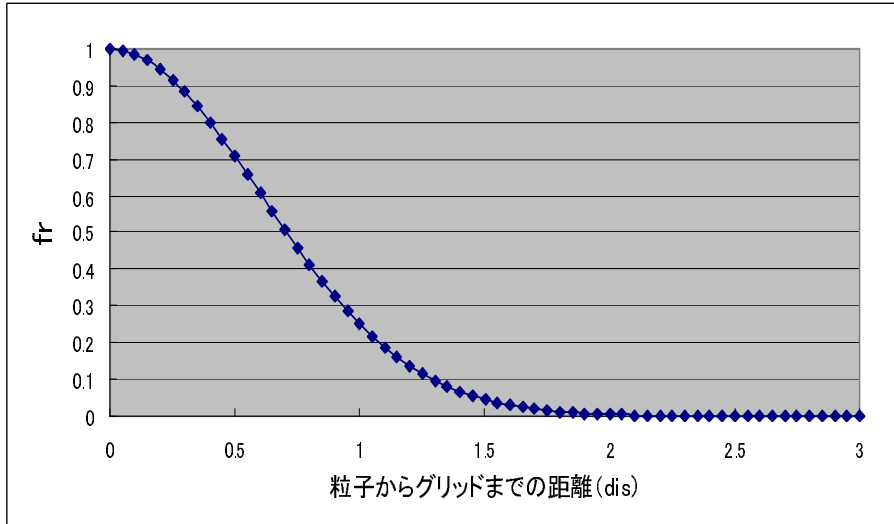


図 2.21: 重み付け関数 f_r

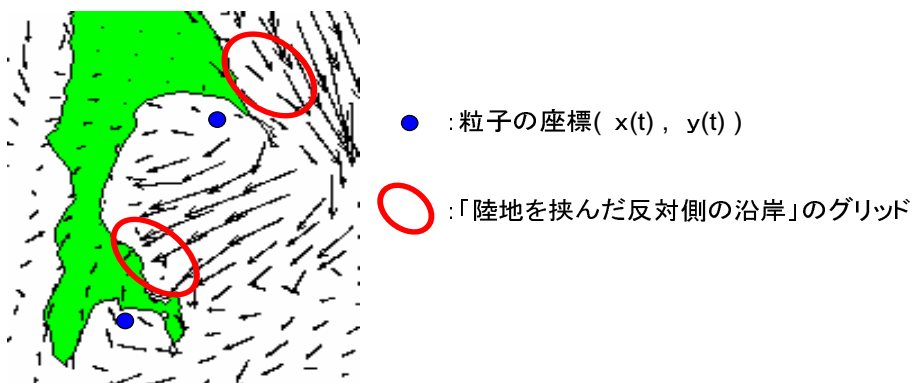


図 2.22: 計算時の陸地の処理

図 2.23 は後方軌跡の算出結果の例である。北海道沿岸に粒子を配置し、海水がどのような経路を経て漂流してきたのかを、その位置を 1 日ごとにプロットすることで示している。

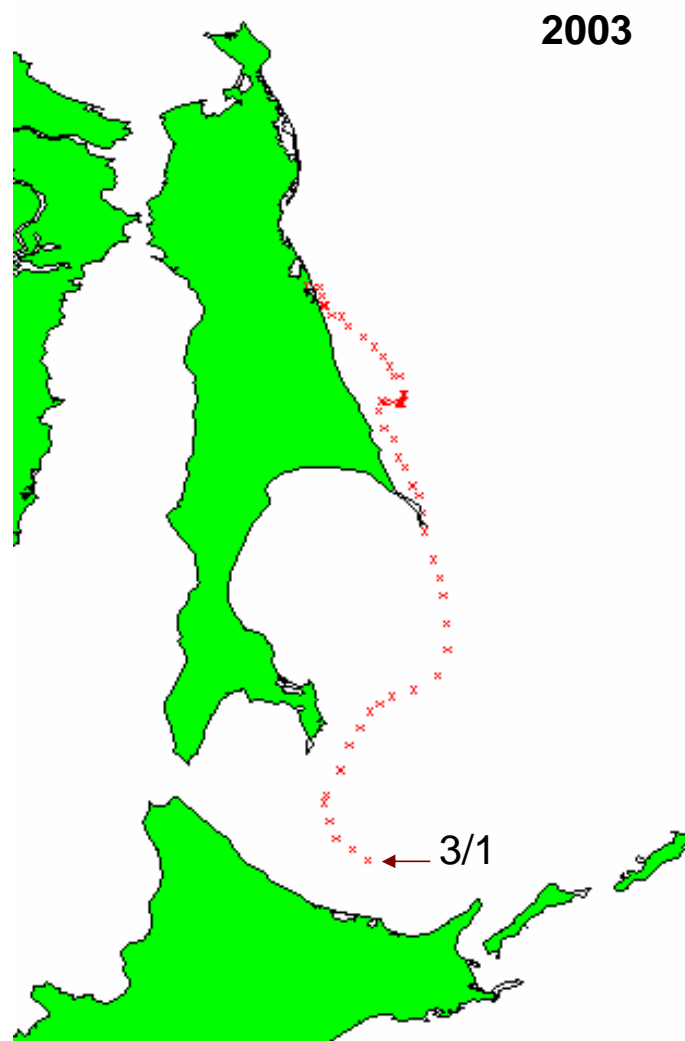


図 2.23: 海水の後方軌跡の算出結果の例

以上で述べた解析のフローチャートを図 2.24 に示す。

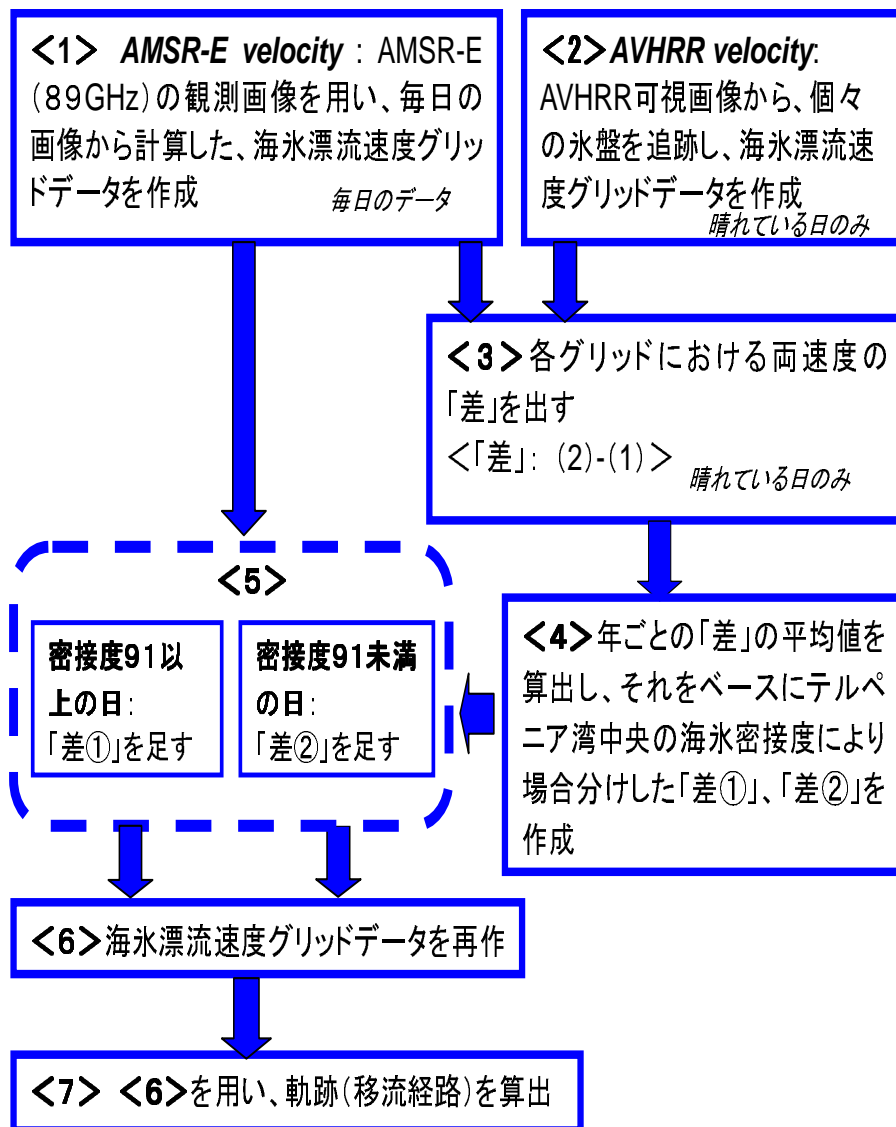


図 2.24: 移流経路算出までの解析のフローチャート

2.5 解析手法の精度検証

以上の解析で算出した後方軌跡の計算結果と、日が連続した AVHRR 画像からできる限り長期間追える一つの氷盤を選び、その位置を追跡した結果の比較を行った。図 2.25 は「差」による補正を加えず AMSR-E-velocity のデータのみで移流経路を算出した結果との比較、図 2.26 は「差」による補正を加えたデータから算出した結果との比較である。青線は AVHRR 画像を用いた氷盤追跡の結果を、赤線は後方軌跡の算出結果を示しており、各箇所で計算開始の日付と氷盤及び粒子の位置を合わせてある。表 2.1、2.2 はそれぞれの日あたりの平均移動距離を示したものである。

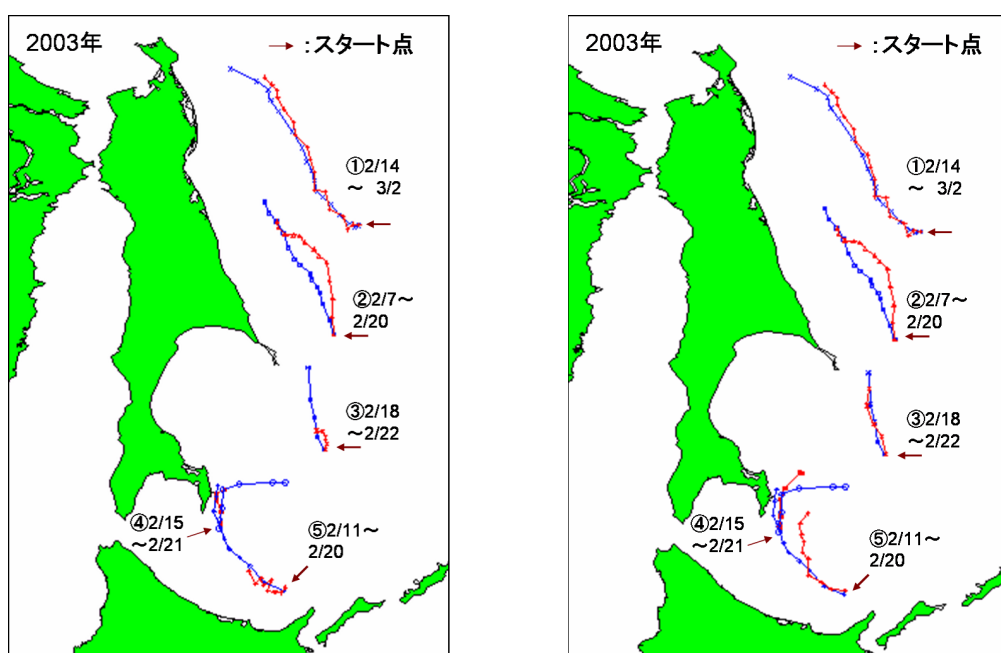


図 2.25: 移流経路算出結果と氷盤追跡結果の比較 (補正なし) 図 2.26: 移流経路算出結果と氷盤追跡結果の比較 (補正あり)

表 2.1: 一日あたりの平均移動距離 (km/day) 補正なし

	氷盤追跡	計算結果 (補正なし)
1	22.4	21.9
2	21.3	19.5
3	42.9	11.1
4	26.9	12.3
5	26.9	13.1

表 2.2: 一日あたりの平均移動距離 (km/day) 補正あり

	氷盤追跡	計算結果 (補正あり)
1	22.4	21.9
2	21.3	19.5
3	42.9	36.1
4	26.9	19.8
5	26.9	19.9

①、②のような、広い空間スケールの海流が卓越した海域では補正を行わなくてもかなり良く一致するが、③～⑤のような複雑な流れ場を形成する海域では、補正なしの場合非常に誤差が大きい。補正を加えた場合、図 2.26 の③の誤差が 15 %程度になるなど、図 2.25 に比べ精度はかなり向上した。また、④、⑤が未だ良く一致しない。これらの海域の氷盤の動きを見ると、隣接した氷盤が時間と共に大きく離れていく事例が見られた。将来的にはランダムな動きの成分を考慮し、経路を確率分布として示す方が妥当であると考えられる。

第3章 海水の移流経路とその由来

3.1 各年の海水移流経路算出結果

作成した2003年から2010年までの8年分の海水漂流速度データを用いて、各年の海水移流経路を算出した。北海道沿岸域の海水の勢力が最も強くなる時期は2月上旬から3月上旬と、年によって異なるが、ここでは3月1日の時点で北海道沿岸域に存在する海水がどこから、どのような経路で漂流してきたのかを見ていく。尚、2006年及び2010年は3月1日の時点で既に北海道沿岸域に海水が存在しないためそれぞれ2月25日及び2月20日時点の海水の移流経路を算出した。図3.1～図3.8は各年の海水の後方軌跡の算出結果である。

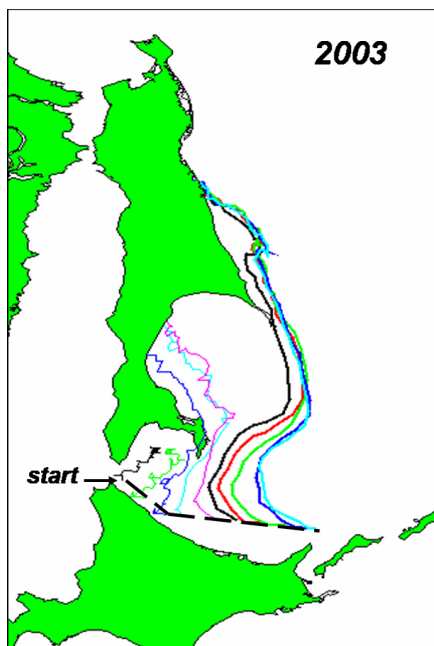


図 3.1: 海水の後方軌跡 (2003年)

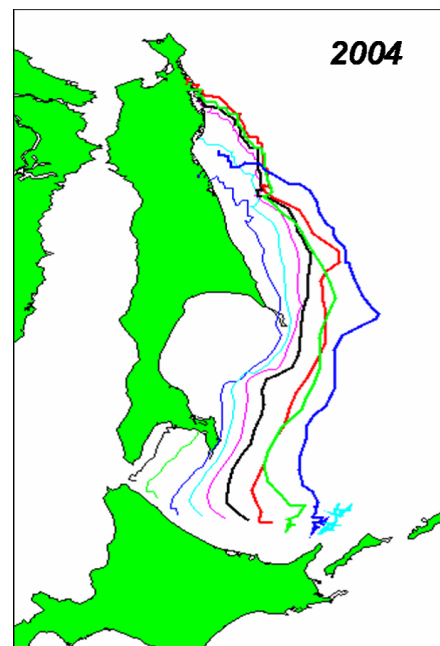


図 3.2: 海水の後方軌跡 (2004年)

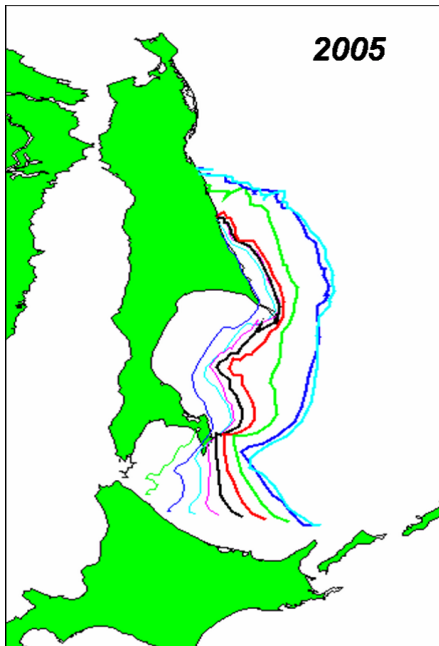


図 3.3: 海氷の後方軌跡 (2005 年)

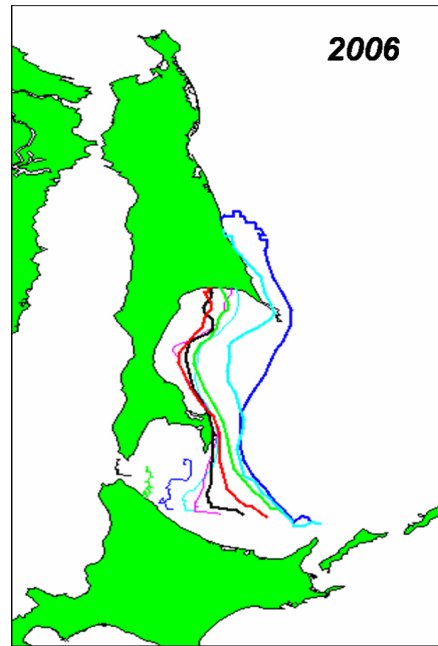


図 3.4: 海氷の後方軌跡 (2006 年)

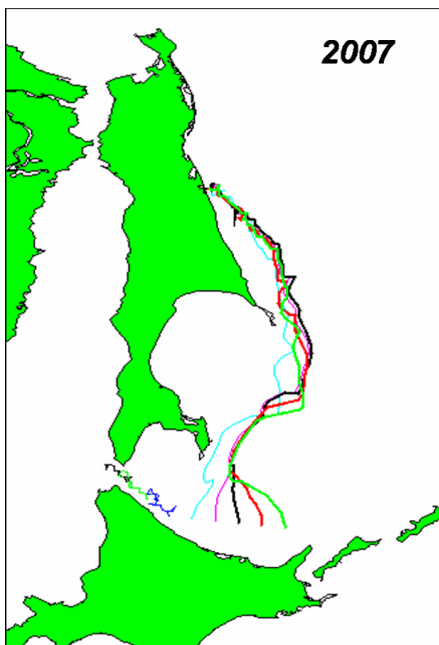


図 3.5: 海氷の後方軌跡 (2007 年)

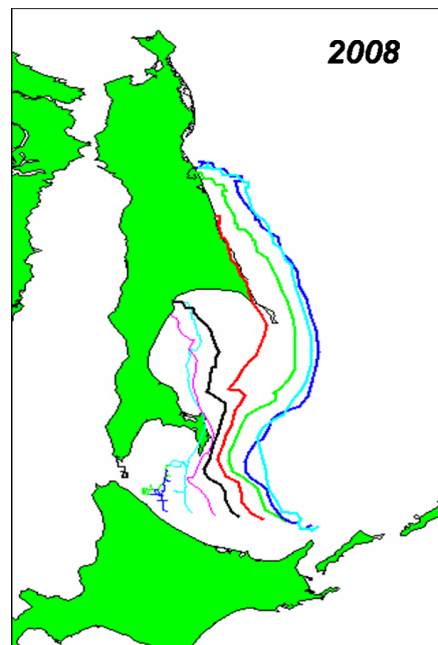


図 3.6: 海氷の後方軌跡 (2008 年)

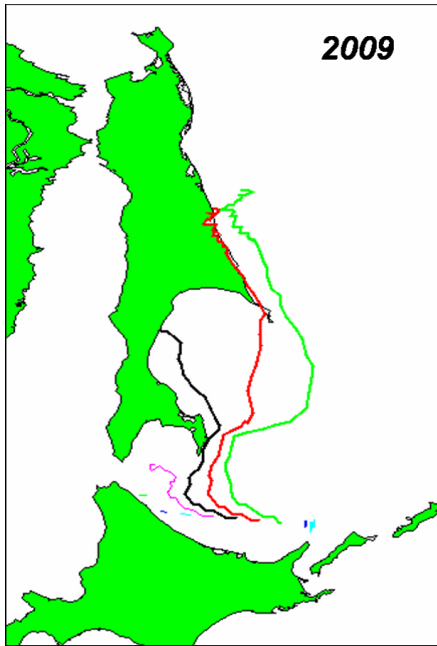


図 3.7: 海氷の後方軌跡 (2009 年)

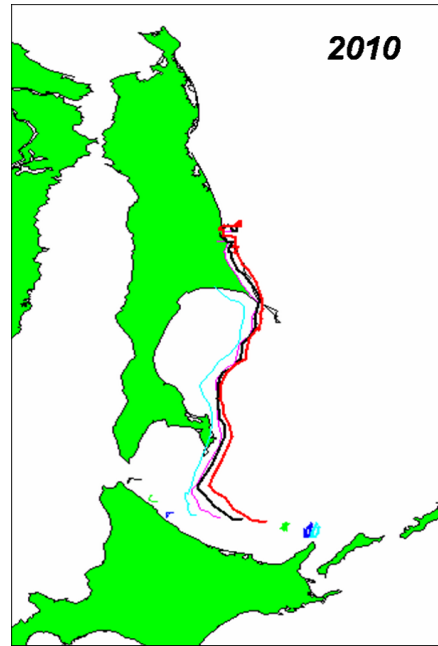


図 3.8: 海氷の後方軌跡 (2010 年)

図 3.1 のように北海道沿岸付近の 10 点に粒子を配置し、各点 3 月 1 日から前年 12 月 15 日まで (2006 年は 2 月 25 日、2010 年は 2 月 20 日から) の計算を行い、北海道沿岸に存在する各点の海氷の移流経路を示した。

これらの結果から、北海道沿岸域の海氷は各年、各点で様々な由来をもち、様々な経路で漂流してくることが分かる。また、いくつかの経路は望月ら (1994) [6] の漂流ブイによる観測結果と良く一致する。大部分は図のサハリン中～北部の東沿岸域およびテルペニア湾から漂流してくるという結果が得られた。これらの海域 (図 3.9) は沿岸ポリニアが高頻度で形成され、多くの海氷が生成されており (Ohshima et al., 2003 [11], kimura et al., 2004 [10])、そこで生まれた海氷が移流してくると考えることに矛盾は無い。沿岸ポリニアとは、風が岸から沖に向かって吹くことによって、岸に沿った部分に海面が顔を出し、そこで新たな海氷が生成される場所である。



図 3.9: 沿岸ポリニアが形成される海域

3.2 経路の年による違い

年によって海水の移流経路に顕著な違いが見られた。海水の動きは風と海流で決まるが、一般的にはその時間変化は風の変化によるところが大きいと考えられている。しかし、オホーツク海の南部においては海流が非常に重要な要素となっている。サハリン中～北部の東沿岸域で生成された海水が北海道沿岸に到達する過程は、東樺太海流に伴う経路（図 2.15）とテルペニア湾の外側から湾南部の時計回りの渦を経る経路（図 2.16）の 2 つに大別される。前述したように、この経路はテルペニア湾中央の海域の海水密接度により影響されるという結果が得られたが、そのことが 3.1 の結果（図 3.1～図 3.8）に反映されているのかを確かめる。3 月 1 日を後方軌跡の計算開始日とした場合、テルペニア湾を通過する日にちは凡そ 2 月前半あたりになる。そこでまず、2 月 1 日から 2 月 15 日までの間で、テルペニア湾中央の海域の海水密接度が 9.1 を越える日の日数を集計した。集計結果は 2003 年 = 13 日、2004 年 = 3 日、2005、2007 年 = 9 日、そして 2006、2008、2009、2010 年 = 0 日であった。密接度が 9.1 を越える日が 0 日の年や少ない 2004 年は、図 2.15 のような東樺太海流に伴う経路や、テルペニア湾を由来とする経路が多く見られた。また、密接度が 9.1 を越える日が多い 2003 年、2007 年はテルペニア湾の外側を通る経路を経ている。2005 年については、密接度が 9.1 を越える日が多いにも関わらず、東樺太海流に伴う経路を経ているが、テルペニア湾南部に差し掛かったあたりからは、渦に伴い北海道沿岸に到達するという、他の年には見られない特異な経路となっている。

また、北西風の強さによっては図 2.15 の経路から外側に外れることもあり、後に湾南部

の渦に伴い、北海道沿岸に到達する。

さらに、各年の「差」の年平均（図 3.10～図 3.17）には、テルペニア湾南部の渦の年による強さの違いが見られた。この渦は、北から来る海水を北海道沿岸に運ぶ極めて重要な役割を果たしていると言える。

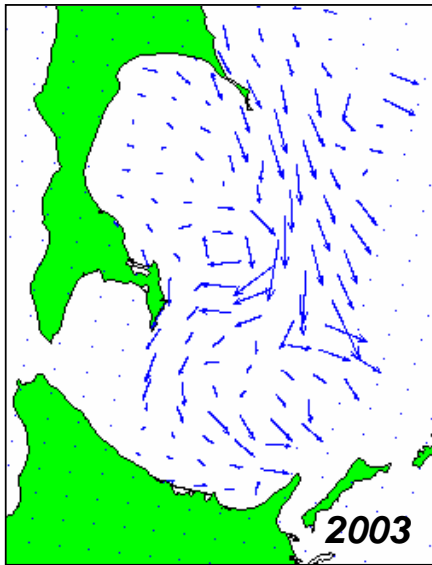


図 3.10: 「差」の年平均分（2003 年）

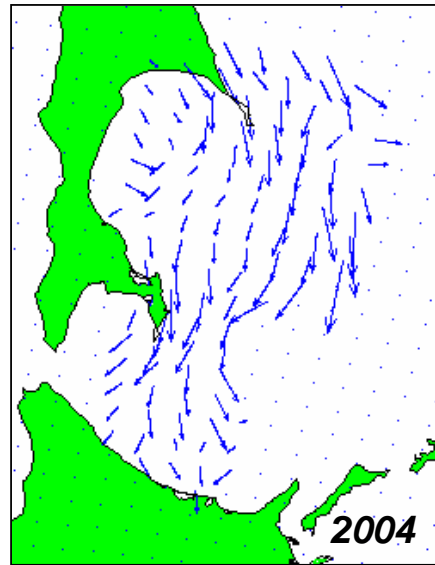


図 3.11: 「差」の年平均分（2004 年）

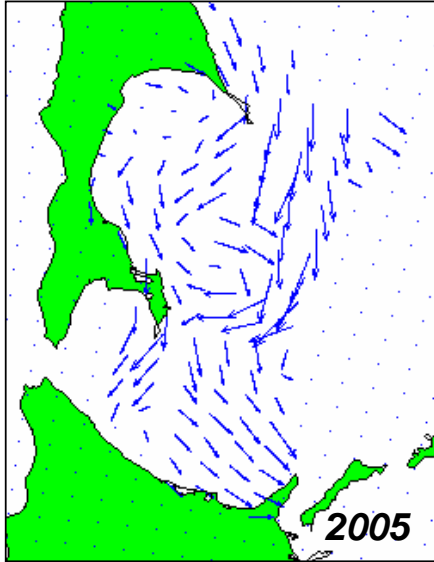


図 3.12: 「差」の年平均分 (2005 年)

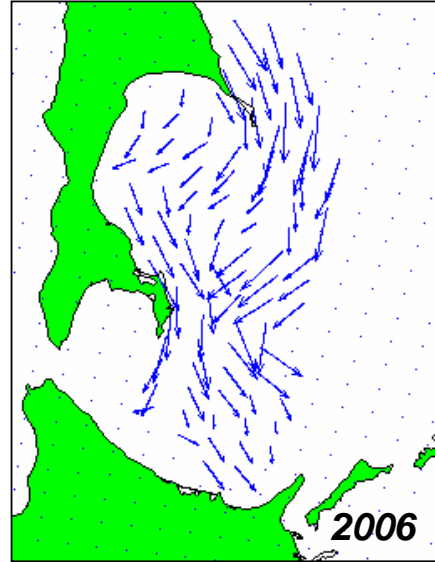


図 3.13: 「差」の年平均分 (2006 年)

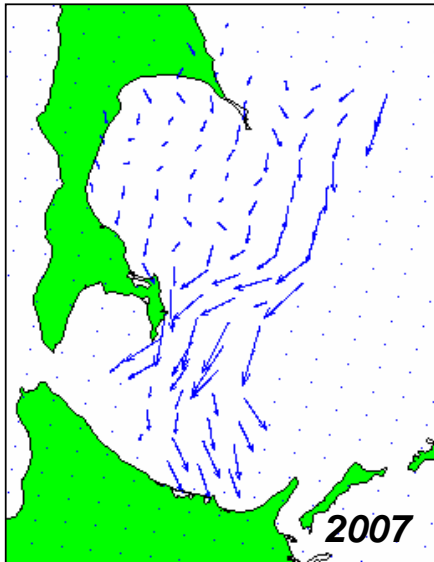


図 3.14: 「差」の年平均分 (2007 年)

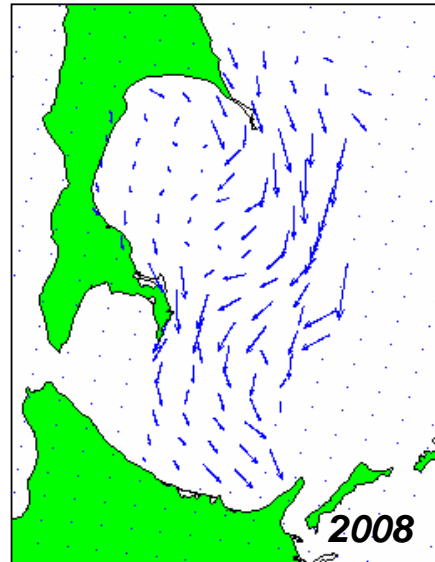


図 3.15: 「差」の年平均分 (2008 年)

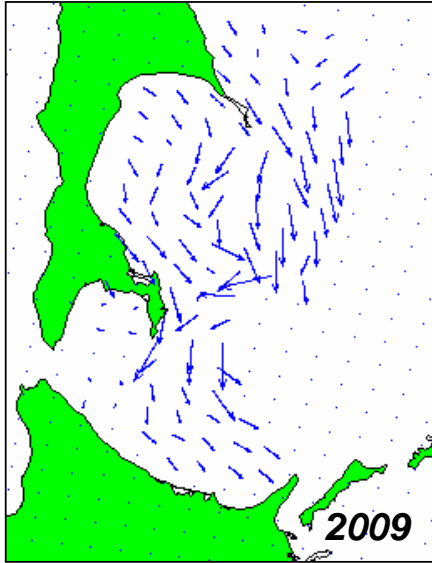


図 3.16: 「差」の年平均分 (2009 年)

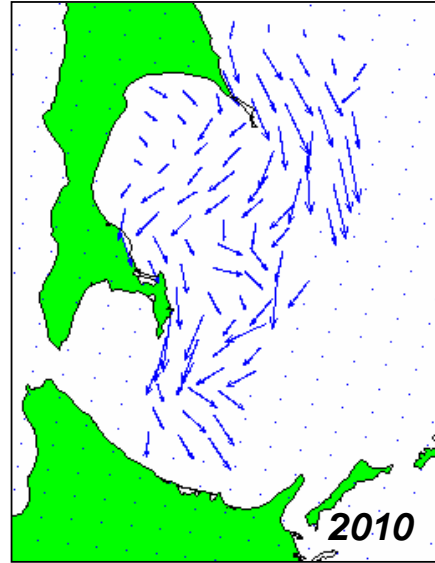


図 3.17: 「差」の年平均分 (2010 年)

2003 年、2005 年、2009 年、2010 年に対し、2004 年、2006 年、2007 年、2008 年は渦の強さが比較的弱い。2005 年のように序盤は東樺太海流に伴う経路を漂流していても、テルペニア湾南部の渦の強さが強い場合は、後に渦を通過する経路に切り替わる可能性がある。しかし、その渦の強弱が海氷の移流経路の年による違いに及ぼす影響は明瞭ではなかった。

以上のことから、移流経路の年による違いは、風、テルペニア湾中央の海域の密接度、そしてテルペニア湾南部の渦に影響されると考えられる。

3.3 各年の海氷の由来の分布

移流経路の計算から、海氷の由来の分布を把握することもできる。図 3.18～図 3.25 は、オホーツク海全域に均等に粒子を配置し、各点に存在する海氷が北緯何度を由来としているかについて示した図である。日にちは 3.1 の図 3.1～図 3.8 にそれぞれ対応している。図の横軸は経度を、縦軸は緯度を、そして各図の右側にあるカラーバーは緯度とそれに対応する色を示している。例えば、図 3.18 の北海道沖合はある位置を境目に西側は比較的濃い緑色の分布を示しているが、この海域の海氷は北緯約 49 度（テルペニア湾）を由来としている。

これらの図から様々な情報が得られる。北海道沿岸域の分布に着目すると、2004 年、2005 年の由来の殆どはサハリン中～北部、2003 年、2006 年、2008 年はテルペニア湾からも多く来ている、2009 年は約半分が北海道沿岸付近でできているといった年による違いが見てとれる。また、各海域での海氷の流路やサハリン北部で生成された海氷の拡がり方についても年による違いが見られる。2003 年や 2004 年はオホーツク海の北部で生成された

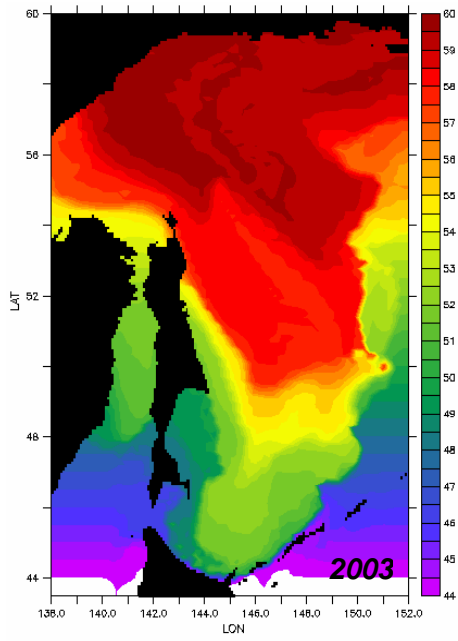


図 3.18: 各海域の海水の由来
(2003年3月1日)

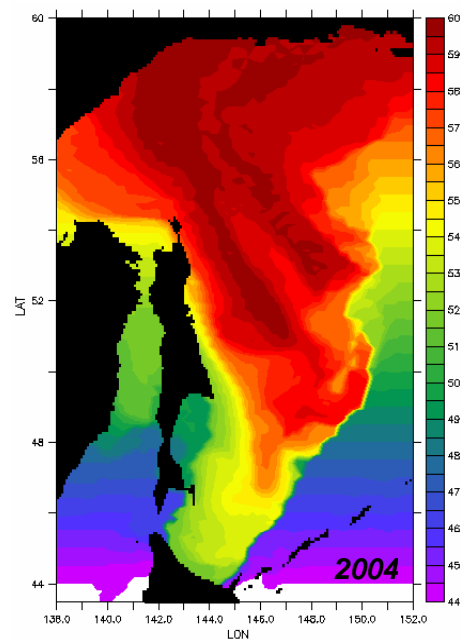


図 3.19: 各海域の海水の由来
(2004年3月1日)

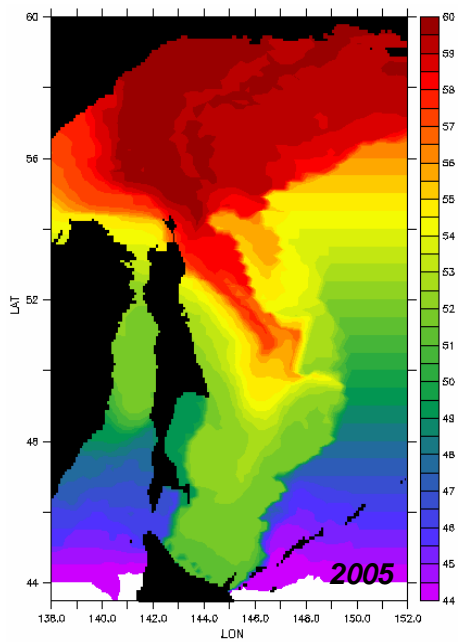


図 3.20: 各海域の海水の由来
(2005年3月1日)

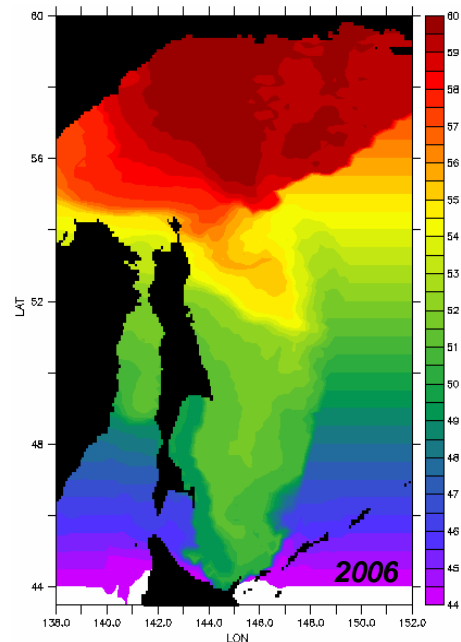


図 3.21: 各海域の海水の由来
(2006年2月25日)

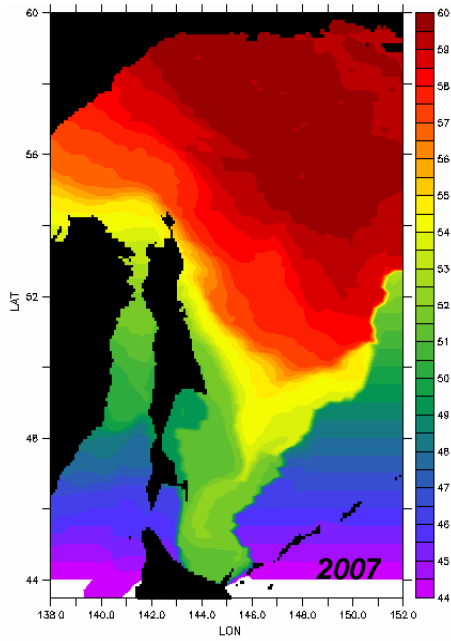


図 3.22: 各海域の海水の由来
(2007年3月1日)

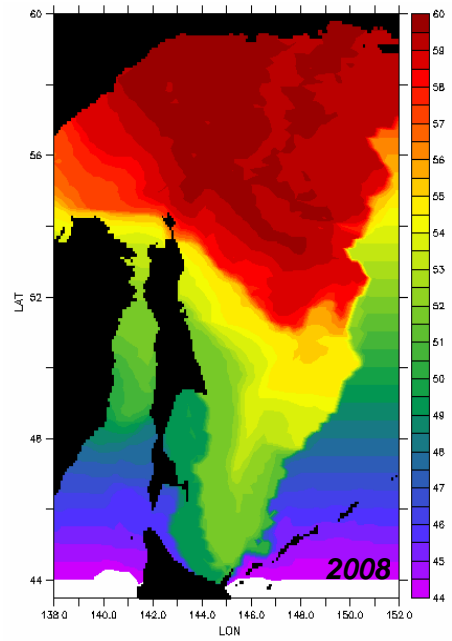


図 3.23: 各海域の海水の由来
(2008年3月1日)

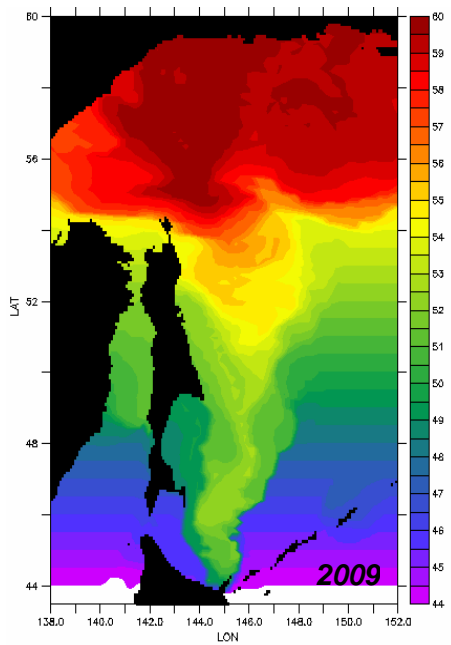


図 3.24: 各海域の海水の由来
(2009年3月1日)

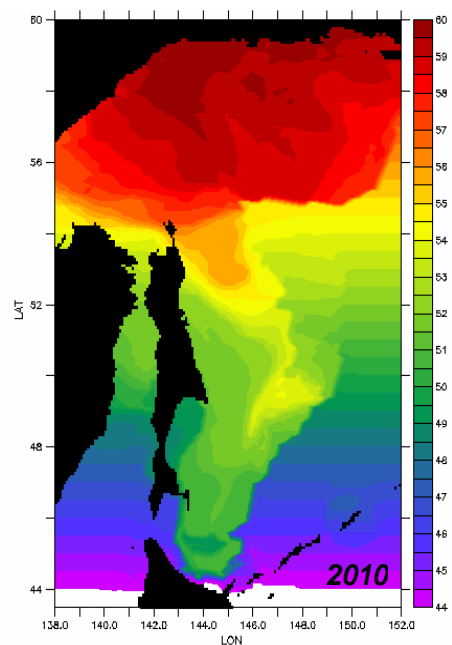


図 3.25: 各海域の海水の由来
(2010年2月20日)

海氷が、南部にまで勢力を伸ばしているが、2006年や2009年は北部で留まっている。