衛星データを利用した流氷移動ベクトル推定手法の開発

Development of method for evaluating sea ice transport vector using satellite images

北見工業大学	○学生員	佐野史弥	(Fumiya Sano)
北見工業大学	正会員	中山恵介	(Keisuke Nakayama)
北見工業大学	正会員	舘山一孝	(Kazutaka Tateyama)
豊水設計株式会社	正会員	佐藤之信	(Yukinobu Sato)
北見工業大学	正会員	駒井克昭	(Katsuaki Komai)

1. はじめに

オホーツク海は千島列島により太平洋との海水の交換が抑制されており，陸域からの栄養が流れこむことで，太平洋と比較して栄養塩濃度の高い時期が存在し，その結果，豊かな漁場が形成されている．春先には，流氷により輸送された栄養を利用し，プランクトンが大量に発生することからも，その栄養の高さを想像することが出来る．過去の研究により，流氷は理想的な自然河川と同じ程度の窒素，リンの値を示すことが知られており，流氷がどのように輸送されるかはオホーツク海において重要な点であると考えられる [1), 2), 3)]．さらに，流氷は栄養を輸送するだけではなく，トドやオオワシの休息の場として利用されていたり，流氷下ではクリオネ等の生物が生息していたりする，生態系にとって重要な場を提供していることが知られている．

しかし近年，地球規模での環境変動により流氷の輸送量に大きな変化が現れていることが示されている．例えば，気候変動における政府間パネル（IPCC）第 5 次報告書では，今世紀末までに気温が 0.3～4.8 ℃上昇する可能性 [4)]が指摘されており，流氷の接岸量が減少する可能性がある [5), 6)]．そのため，過去から現在において流氷がどのように輸送されており，将来，どのような輸送形態になるかを検討する必用がある．過去の研究において，舘山ら（2011）[7)]は，衛星データを利用した流氷の空間分布および流氷厚さの推定手法を提案しており，推定された海氷厚を利用することで流氷の移動を推定することが可能であると考えられている．

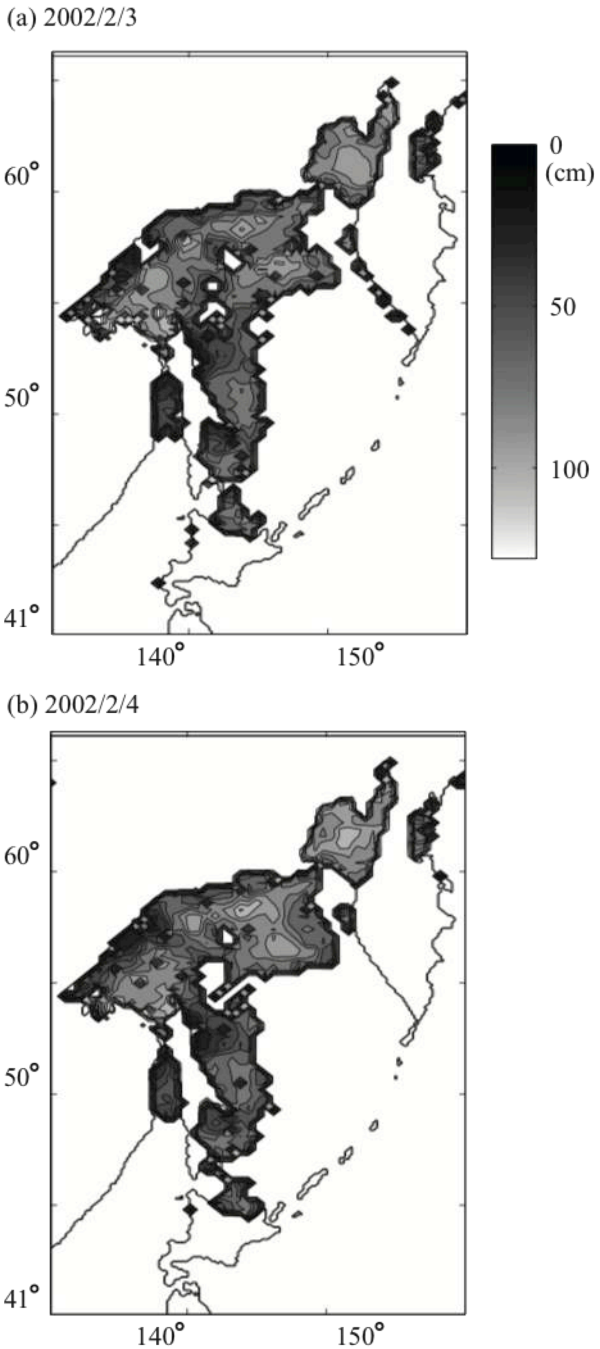
そこで本研究では，舘山ら（2011）[7)]により利用されている衛星データを利用し，流氷の動きを推定するための手法を提案することを目的とする．

2. 流氷の空間分布データ

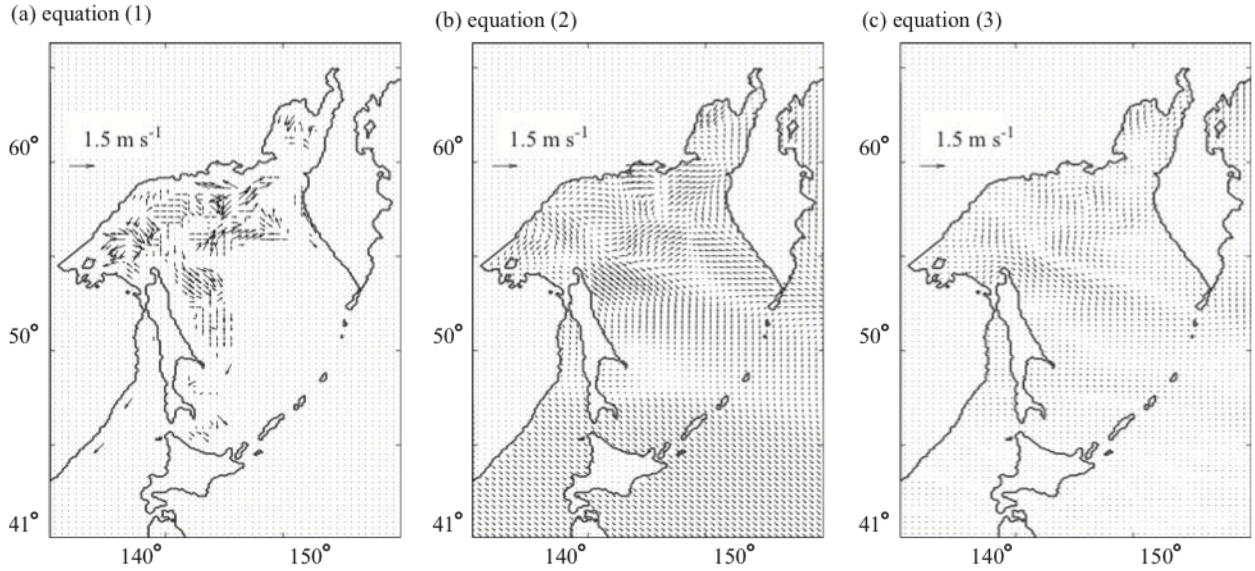
本研究では，米国の軍事気象衛星 DMSP に搭載されているマイクロ波放射計 SSM/I および SSMIS のデータを使用した [7)]．マイクロ波放射計は，地表面や大気から自然に放射される微弱なマイクロ波帯の雑音電力を受信し，受信雑音電力に比例する輝度温度 *TB* は次式で表される．

$$TB = \varepsilon T \tag{1}$$

ここで，ε は射出率，*T* は物体の温度である．射出率は周波数と偏波および誘電率の関数であり，海氷の誘電率



図−1　オホーツク海周辺における衛星による海氷厚分布図．(a) 2002 年 2 月 3 日．(b) 2002 年 2 月 4 日．



図−2　流氷の移動ベクトル推定手法の各過程における流氷移動ベクトル．(a) PIV により推定された流氷移動ベクトル．(b) 式(2)を利用して補間された流氷移動ベクトル．(c) 流れ関数を利用して推定された流氷移動ベクトル．

は塩分と温度によって支配される．つまり，輝度温度は観測周波数の浸透深さにおける塩分および温度を反映した物理量である．

3. 流氷の移動ベクトルの推定

海氷厚の空間分布図を利用し移動ベクトルを推定するために，以下の 3 種類の行程を実行する．対象とした解析データは 2002 年 2 月 3 日と 2002 年 2 月 4 日である．

① Particle Image Velocimetry（PIV）を利用して移動ベクトルを推定する．
② 未推定移動ベクトルの空間補間を実施する．
③ 流れ関数を利用して移動ベクトルを推定する．

PIV を利用した移動ベクトルの推定では，海氷厚の空間分布が 161×264 メッシュで与えられていることを考慮し，ウィンドウサイズを 5×5 メッシュ，11×11 メッシュ，15×15 メッシュ，27×27 メッシュの合計 4 種類を用意して計算を実施することとする． 以下で示される相対誤差が最も小さくなる場合を見つけ出し，1 日での移動距離として推定する．

$$Error = \frac{\sum \left| R_i - R_k \right|}{\sum R_i} \tag{2}$$

ここで，*Error*：2002 年 2 月 3 日と 2002 年 2 月 4 海氷厚データの相対誤差，R_i：2002 年 2 月 3 日の海氷厚データ，R_k：2002 年 2 月 4 日の海氷厚データである．

PIV による移動ベクトル推定では，相対誤差が 1 %以下である場合のみ有効であると判断することとした．そのため，海氷厚データの変化により推定されない空間が存在することとなる．そこで本研究では，未推定領域を補間するため，距離により指数関数的に重みが減少する関数を利用して，第 2 段階目における移動ベクトルの推定とした．代表距離は，1 メッシュ，3 メッシュ，5 メッシュ，10 メッシュの 4 種類を与えた．

$$V_m = \frac{\sum V_j \exp\left(-\left|X_0 - X_j\right| / L\right)}{\sum \exp\left(-\left|X_0 - X_j\right| / L\right)} \tag{3}$$

ここで，V_m：補間された移動ベクトル，V_j：補間に利用される移動ベクトル，X_0：対象とする移動ベクトルの位置ベクトル，X_j：補間に利用される位置ベクトル，L：代表距離である．

重み関数を利用した移動ベクトルの補間では，急激に移動の方向が変化する等の移動ベクトルが含まれるため，実際の移動ベクトルと明らかに異なる解が得られる可能性がある．そこで本研究では，そのような不自然な移動ベクトルを修正するため，流れ関数を利用した修正方法を利用することとした．速度ポテンシャルではなく，流れ関数を利用する理由は，波などの挙動と異なり，流氷は渦を持って移動していると考えられるためである．推定には以下の渦度の式を利用することとした．

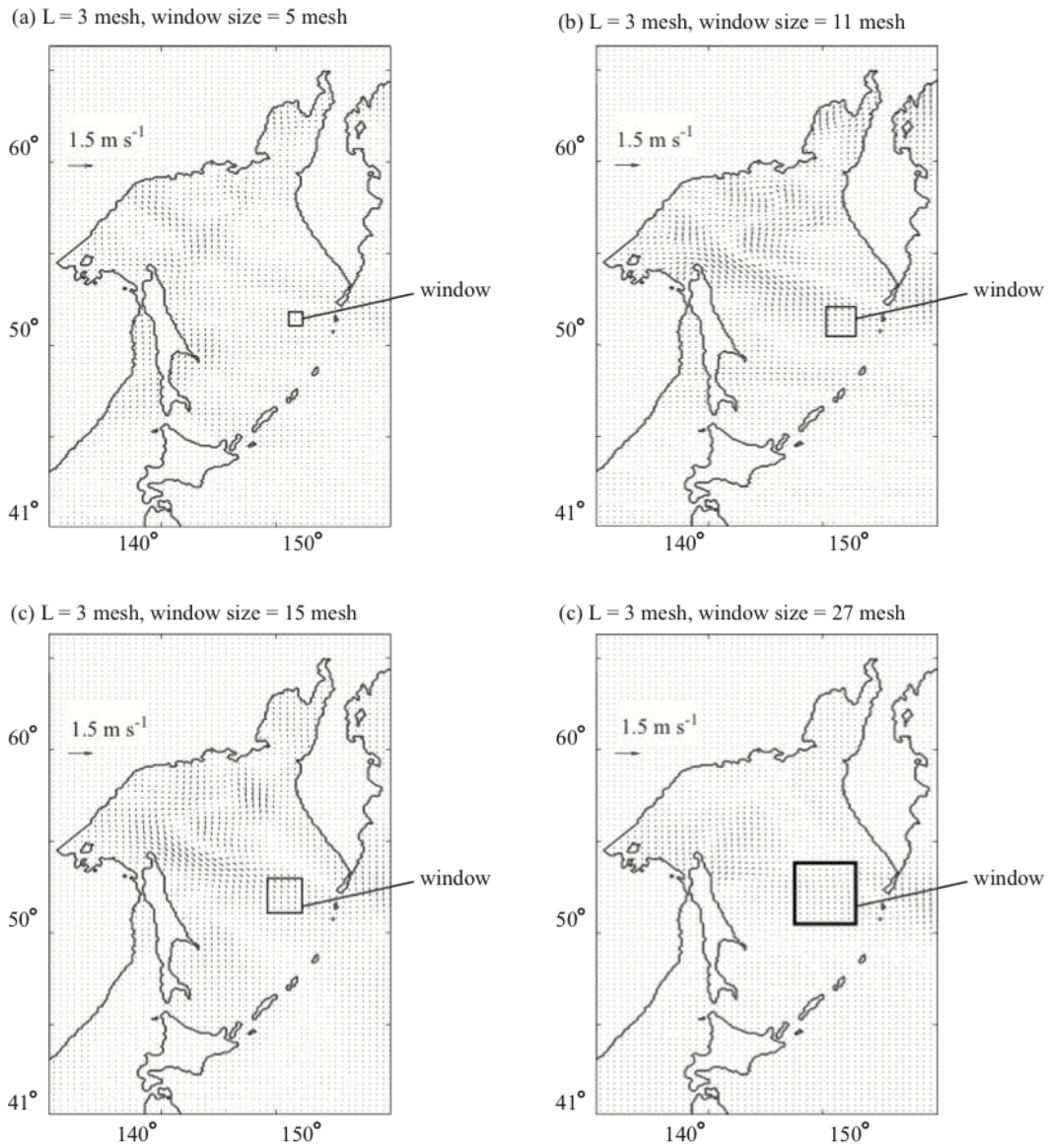
$$\omega = \mathrm{curl}\left(V_S\right) \tag{4}$$

$$V_S = -i\frac{\partial \psi}{\partial y} + j\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{5}$$

ここで，ω：渦度，V_S：最終的に得られる移動ベクトル，i：x 方向成分，j：y 方向成分，ψ：流れ関数である．

4. 推定結果の比較

本研究では，ウィンドウサイズと代表距離 L をそれぞれ変化させて流氷移動ベクトルを比較した（図−3）．ウィンドウサイズは 5 メッシュ，11 メッシュ，15 メッシュ，27 メッシュを利用した．ウィンドウサイズ 11 メッシュと 15 メッシュに比較して，ウィンドウサイズ 5



図−3　ウィンドウサイズを変化させて推定された流氷移動ベクトル．代表距離 *L* は全て 3 メッシュが利用されている．(a) ウィンドウサイズ 5 メッシュのケース．(b) ウィンドウサイズ 11 メッシュのケース．(c) ウィンドウサイズ 11 メッシュのケース．(d) ウィンドウサイズ 27 メッシュのケース．

メッシュと 27 メッシュは移動ベクトルが比較的小さかった．これだけでは判断は難しいが，ベクトルの未推定領域が少ないウィンドウサイズ 11 メッシュまたは 15 メッシュが適当ではないかと考えられた．

図−4 には代表距離 *L* を変化させ，ウィンドウサイズは全て 11 メッシュを利用した結果を示す．代表距離 *L* は 1 メッシュ，3 メッシュ，5 メッシュ，10 メッシュを利用した．代表距離 *L* が小さければ小さいほど移動ベクトルの急激な区間的な変化が顕著に現れていた．逆に，代表距離 *L* が大きければ大きいほど移動ベクトルが小さくなり，全体に空間平均をかけたような結果となった．実際に，代表距離は高周波の空間フィルタに対応するため，あまり大きいサイズを利用すべきではないと考えられた．

以上の結果からだけでは判断は難しいが，ウィンドウサイズは 11 メッシュから 15 メッシュ，代表距離は 3 メッシュから 5 メッシュが適当ではないかと考えられる．

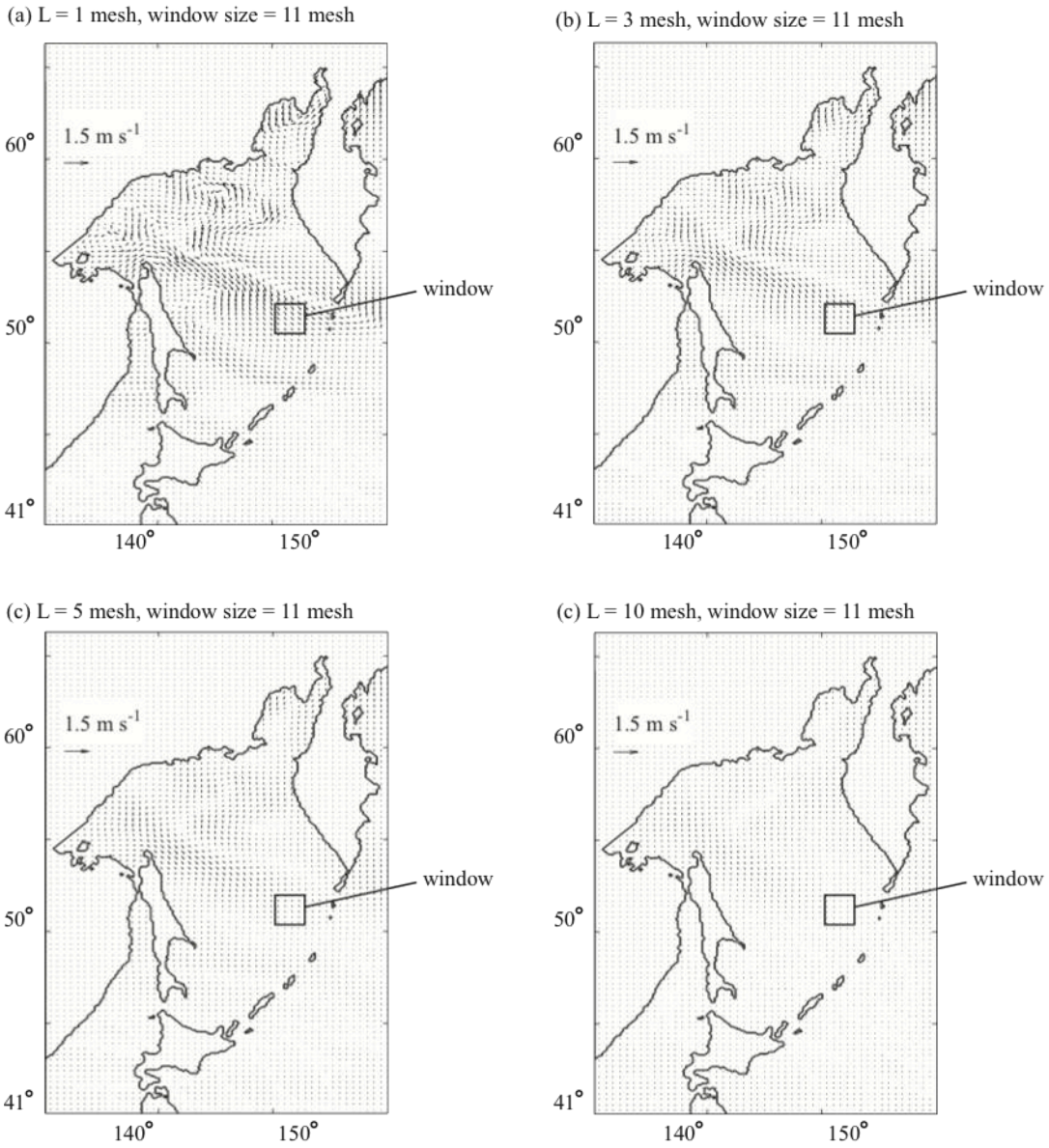
5. おわりに

本研究では，流氷の衛星画像からオホーツク海全体の流氷の移動ベクトル推定手法の開発・検討を行った．

(1) 流氷移動ベクトルを海氷厚データや空間重み関数，渦度の式を利用して推定することができた．

(2) ウィンドウサイズは 11 メッシュ〜15 メッシュ付近，代表距離 *L* は 3 メッシュ〜5 メッシュ付近を用いるべきではないかと推測された．

結果の(2)を検証するために，今後の研究において，推定されたベクトルを利用した流氷移動の再現計算を実施し，その精度検証を実施する予定である．



図−4　代表距離 L を変化させて推定された流氷移動ベクトル．ウィンドウサイズは全て 11 メッシュが利用されている．(a) 代表距離 L 1 メッシュのケース．(b) 代表距離 L 3 メッシュのケース．(c) 代表距離 L 5 メッシュのケース．(d) 代表距離 L 10 メッシュのケース．

参考文献

1) Aynur Abliz，中山恵介，丸谷靖幸，桑江朝比呂，岡田知也，石田哲也，安定同位体比による知床ラウス川を通じた海起源栄養塩の流域内分布，水工学論文集，第55巻, pp.1303-1308, 2011.
2) Aynur Abliz，中山恵介，丸谷靖幸，井上徹教，桑江朝比呂，舘山一孝，岡田知也，加藤淳子，石田哲也，知床を対象とした海陸の栄養塩循環機構の解明，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68，No.4，pp.721-726，2012.
3) Nakayama K., A. Abuliz, T. Nakaegawa and Y. Maruya, Evaluation of nutrient flux from Shiretoko into the ocean using MRI-GCM, Hydrological Research Letters, Vol.5, pp.47-51, 2011, DOI: 10.3178/HRL.5.47.
4) Twelfth Session of Working Group I : Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policymakers, 2013, http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf.
5) 小杉知史，高橋修平，堀彰，知床半島ウトロを中心としたオホーツク海南西部の海氷勢力と沿岸気象条件，北海道の雪氷，第28号，pp.77-80，2009.
6) 青田 昌秋，オホーツク海・北海道沿岸域における流氷勢力の減少傾向(1892年-2000年)，号外海洋，第30巻，pp.18-24，2002.
7) 舘山一孝，榎本浩之，衛生リモートセンシングによるオホーツク海氷厚変動の監視，土木学会論文集B3（海洋開発），67（2），I_721-I_726，2011.