

平成 31 年 1 月修士論文要旨

(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)

## 可視赤外放射計 MODIS センサを用いた海氷の挙動解析

### Sea ice motion analysis with optical-infrared sensor MODIS

学籍番号 47-166639 矢口 春吾

指導教員 山口 一 教授

(平成 31 年 1 月 30, 31 日発表予定)

Keywords: 海氷, リモートセンシング, MODIS, 漂流速度, メソスケール

Keywords: Sea ice, Remote sensing, MODIS, Drift speed, meso-scale

## 1. 序論

北極海は地球の最も北に位置する海域であり、その特徴として 1 年を通して海面が海氷に覆われることが挙げられる。近年、海氷域面積および海氷厚の減少が確認されており、海氷域の変動の把握は科学的に地球環境を捉える点だけではなく北極海航路などの社会経済的にも重要になってきている。

海氷の動きは海氷分布および海氷厚に大きく影響しており、北極域における環境の重要な要素の一つである。海氷の動きは漂流ブイなどの現場観測から観測できるが北極海全域を把握するのは難しい。近年、人工衛星データを用いて海氷の動きを捉えることができるようになってきている。Kimura et al. (2013) [1]では衛星データから算出した海氷漂流速度データを用いて、冬季の海氷同士の収束による海氷厚の変化が次の夏における海氷域分布に大きく関係していることを示した。しかしながら、人工衛星リモートセンシングにお海氷観測に主に用いられているマイクロ波放射計は、使用波長帯が長いいため大気の影響を受けにくい、そのデータから得られる海氷漂流速度データの解像度は水平 60km と荒い。近年、海氷モデルの高解像度化がめざましく発展してきている。しかしながら、現状のマイクロ波放射計から得られる海氷漂流速度データではメソスケールの現象を捉えられず、高解像度海氷モデルの検証には使用できない。そのため、メソスケールの海氷の動きを捉えられる海氷漂流速度データを人工衛星データから作成することは重要である。

金(2013) [2]では、可視赤外放射計 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)から得られる解像度 1km の海氷表面温度のデータを用いて解像度 12km の 1 日ごとの海氷漂流速度データの作成を行なった。しかしながら、海氷域と開放水面との境界である海氷縁に発達するメソスケールの海氷の動きの多くを捉えられていない。そのため、本研究では MODIS の band1 データを用いた高解像度な海氷漂流速度データの作成と作成したデータを元に捉えられるようになった海氷の動きを解析することを目的とする。

## 2. 使用データ

### ・衛星データ

本研究では、NASA から提供されている解像度 250m の可視・赤外放射計 MODIS の band1(620–670 nm)データを用いて海氷漂流速度の算出を行なった。MODIS は可視・赤外帯を用いて観測を行うため、解像度が 250m と優れているが、Fig.1 に示すように雲も観測してしまう。そのため、海氷上面が雲で覆われている際は、海氷を捉えることができない。MODIS は Terra と Aqua 2 台の衛星に搭載されており、観測幅が 2330km と広い。そのため、極域であれば 1 日に複数回同じ領域を約 1 時間から 2 時間に 1 回観測される。

MODIS センサは海氷の情報を含まない。そのため、海氷量の情報として、マイクロ波放射計 AMSR-E および AMSR2 から算出される海氷密度データを利用した。解像度は 10km であり、日々のデータが国立極地研究所から提供されている。

### ・現場海氷漂流速度データ

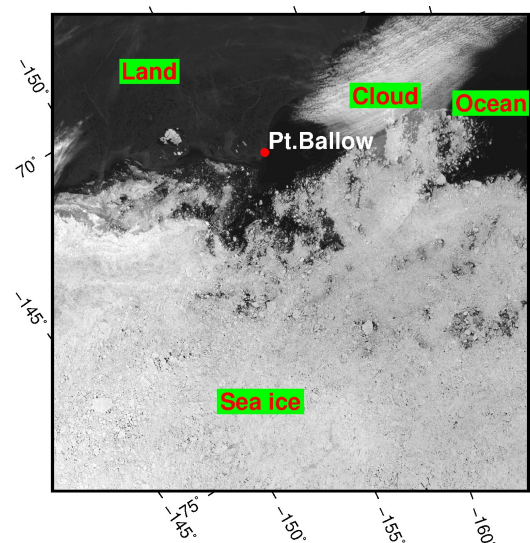


Fig. 1 Satellite image of MODIS

人工衛星データ作成した海氷漂流速度データの精度検証に 2013 年に JAMSTEC によって北極海に係留された上向き ADCP による海氷漂流速度データを利用した。ADCP による海氷漂流速度の観測は 1 時間ごとである。

・気象データ

本研究では、海氷の動きを解析する際、気象データとして ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)から配布されている再解析データ ERA-interim の海面平均気圧を用いて地衡風を計算し、使用した。

### 3. MODIS センサからの海氷漂流速度データの作成

海氷漂流速度の算出方法にはマイクロ放射計 AMSR-E および AMSR2 による輝度温度を用いた海氷漂流速度の算出に用いられている MCC(Maximum cross correlation method)を用いた。MCC はパターンマッチング手法の 1 つである。本研究においては、ある衛星データの分布パターンをテンプレート画像と設定し、同領域で観測された次の時刻の衛星データの分布の中から相互相関係数を用いて、似ている地点を見つけ出す方法である。MCC は相互相関係数を用いてパターンマッチングの正誤を判定するため、海氷だけではなく雲も追跡してしまう恐れがある。雲は海氷と異なり流動的であり、移動速度が大きいため、パターンマッチングを行う際、テンプレート画像が海氷を捉えている場合と雲を捉えている場合を探索範囲内における相関係数の分布の特徴の差から海氷のみを追跡する以下のアルゴリズムを考案した。

- 1) 探索範囲内における相関係数の最大値が 0.5 以上
- 2) 探索範囲内における相関係数の最大値と 2 番目に大きい相関係数の差が 1 以上
- 3) 相関係数の最大値とその値をとった箇所の周囲 3 ピクセル離れた相関係数の平均との差が 0.55 以上

上記の 3 つの条件を満たしたテンプレート画像が海氷を追跡しているとみなした。本研究では MODIS の輝度データに対して、テンプレート画像の大きさを  $20 \times 20$  ピクセルの大きさとして計算を行い、結果として 5km 解像度の海氷漂流速度プロダクトが作成される。

また、1 日毎に計算されることが多い海氷漂流速度であるが本研究ではメソスケールの海氷の運動を捉えることを目的としているため元の衛星データが観測された 1 から 2 時間以内に観測された衛星データを用いてデータの比較を行い海氷漂流速度の計算を行なった。

作成したプロダクトの精度検証を行なった。相関係数は水平方向、垂直方向それぞれ 0.9913, 0.9713 であった。また平均 2 乗誤差はそれぞれ 1.372cm/s, 1.549cm/s であった。この結果から MODIS センサから海氷のみを追跡し精度よく海氷漂流速度を算出していることが確認された。

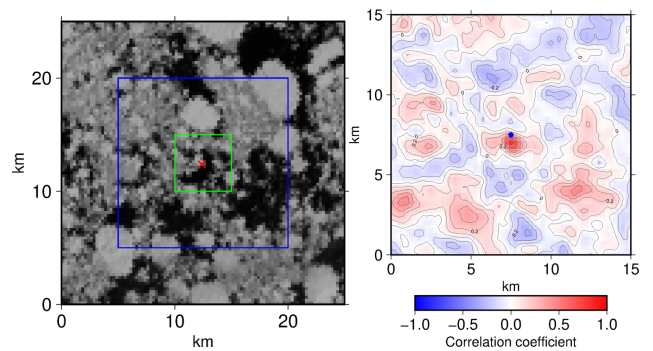


Fig. 2 Correlation coefficient distribution in search area of Sunny case(blue box : search area, green box: template image)

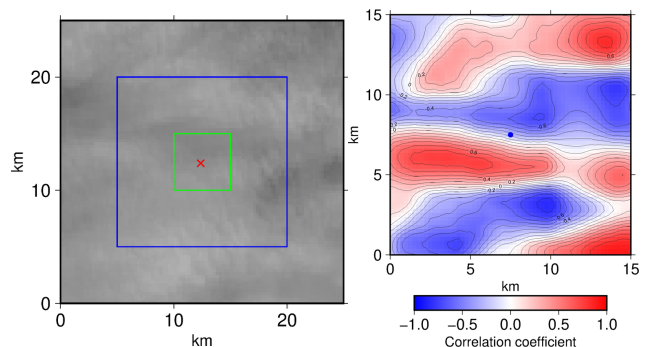


Fig. 3 Correlation coefficient distribution in search area of Cloudy case(blue box: search area, green box: template image)

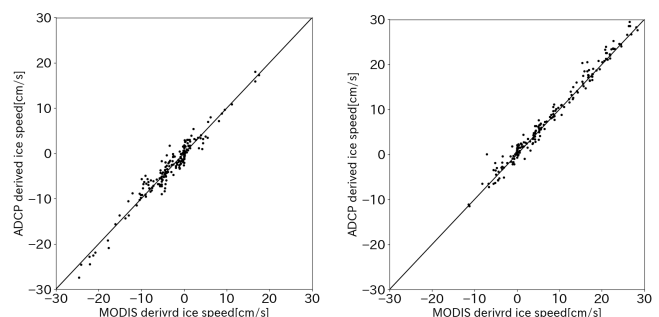


Fig. 4 Scatter plot of ice drift speed from MODIS versus ADCP (Left: vertical direction, Right: horizontal direction)

### 3. 高解像度海氷挙動解析

本研究で作成した 5km 解像度の海氷漂流速度プロダクトを用いて、捉えられるようになった海氷の動きを解析した。

解像度が向上したことにより大気・海洋・海氷の相互作用が複雑な海氷縁における海氷の動きを捉えることが可能になる。本研究では、夏季に海氷が衰退する季節海氷域であり、顕著な海流および渦が存在するチャクチ海・カナダ海盆の一部を対象領域として 2003 年から 2017 年の極夜期を除く 3 月から 9 月において解析を行なった(fig.5)。

Fig.6 に 2011 年における対象海域が海氷密接度が高い海氷に覆われている 3 月と海氷密接度が小さい海氷に覆われている 7 月の月平均海氷漂流速度を示す。3 月は海氷密接度が大きいため対象海域内の海氷漂流速度は 10cm/s 程度となっている。一方海氷密接度が小さくなった 7 月においては、大陸棚沿岸流に沿った海氷の流れが卓越していることが見られる。また、大陸棚上部では蛇行が確認される。

海氷の動きは主に風と海流で決定される。Fig6 で確認された動きが風によるものなのかを確認した。海流を一定期間定常だと仮定すると海氷の動きは地衡風に対し、線形関係が得られていることが分かっている。本研究では、Kimura and Wakatsuchi(2000)[3]で用いられている以下の式を利用し、地衡風との関係を確認した。

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_u \\ c_v \end{bmatrix}$$

$U \cdot V$ : 海氷漂流速度,  $F$ : 風力係数(減衰係数),  $\theta$ : 風向に対する海氷の移動方向の偏角,  $u \cdot v$ : 風速,  $c_u \cdot c_v$ : 平均海流

この式を最小 2 乗法を用いて解き、風力係数(風速に対す海氷漂流速度の割合)、偏角および地衡風と海氷の動きの相関係数を得る。Fig 7 に海氷の動きと地衡風の相関係数の季節変化を示す。春季から夏季に向けて相関係数が下がっている。この結果から海氷密接度が小さくなる夏季においては、定常な海流とみなすことができないと考えられる一方で、メソスケールの現象を含む海流場を海氷の動きから検出できると考えられる。

Fig8 に対象海域内の渦度の標準偏差の季節変化を示す。この結果からも、海氷の動きは夏季において地衡風に平行になるように動く春季とは異なり、複雑になることが分かる。

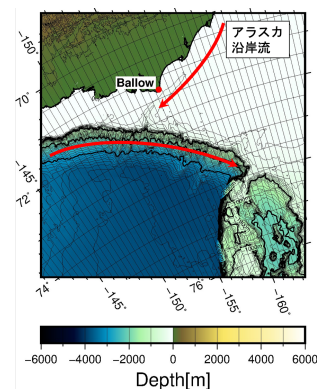


Fig. 5 Target area

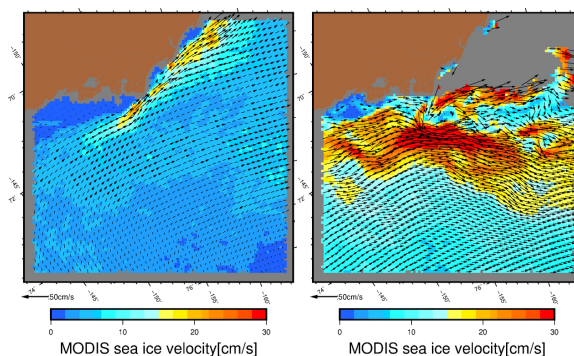


Fig. 6 Monthly average sea ice drift speed.

(Left: Mar 2011 Right: Sep 2011)

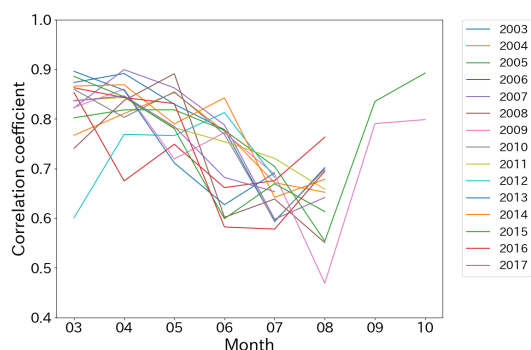


Fig.7 Seasonal variation of correlation coefficient between sea ice motion and geostrophic wind

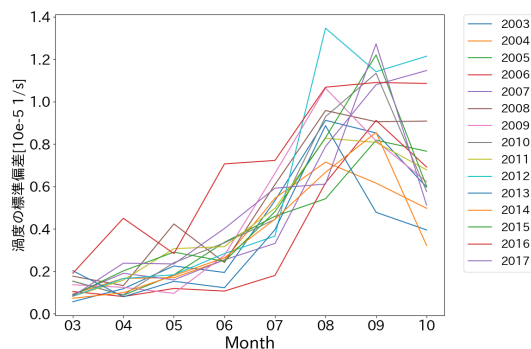


Fig. 8 Seasonal variation of standard deviation of vorticity in target region.



海氷縁において渦が形成されることはこれまでの衛星データの観測から分かっている。海氷縁に発達する渦は開放水面から暖かい海水を海氷域へ移流させ、海氷の融解を促進すると考えられており、その説明は高解像度モデルへの改善に重要である。海氷縁に発達する渦の大きさは 1-100m のメソスケール渦である。本研究のプロダクトから検出することを試みた。本研究では以下の式で表される Okubo-Weiss Parameter を用いて検出を行った。Okubo-Weiss parameter 以下の式で表され、歪み速度と渦度の相対強度を示す。その正負の値によって 2 次元の速度場を歪み卓越領域、渦度卓越領域またはどちらも卓越していない領域に区別する。

$$OW = S_s^2 + S_n^2 - \omega^2$$

$$S_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, S_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}, \omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

本研究では以下の条件を用いて渦を検出した。

- 1.対象ピクセルの OW が $-2^{-10}[1/s^2]$ 以下である。
- 2.対象ピクセルの周囲のピクセルの OW が $-0.2^{-10}[1/s^2]$ 以下である。
- 3.対象ピクセルから半径 5 ピクセル以内において OW が 0 より大きいピクセルに囲まれている。

検出結果例を fig. 8 に示す。直径 30km 程度の高気圧性の渦および低気圧性の渦が検出されていることが確認できる。Fig.9 に 1 日ごとに検出された渦の月ごとの総数を表す。この海域においては、7 月に渦が卓越することが確認された。卓越した回転方向は見られなかった。このことから、海氷縁で発生する渦は双極性のものが多い可能性が考えられる

#### 4. 結論

本研究では、以下のことが達成された。

- ・ MODIS の band1 データから MCC を用いてテンプレート画像が海氷を捉えている場合と雲を捉えている場合の特徴から区別し、海氷のみを追跡するアルゴリズムを考案した。ADCP による海氷漂流速度と比較することで精度検証を行い、5km 解像度の海氷漂流速度プロダクトを作成した。
- ・ 作成したプロダクトを用いて海氷の動きを解析した。春季に関しては、これまで漂流ブイやマイクロ波放射計から算出される 60km 解像度の海氷漂流速度と同じ傾向を示した。しかしながら、海氷密接度が小さくなる夏季においては海氷の動きは海流場の影響を強く受けるため、メソスケールの複雑な動きを捉えており、Okubo-Weiss parameter を用いることで人工衛星データからメソスケールの海氷渦を検出することを可能とした。

#### 参考文献

- [1] Kimura, N., Nishimura, A., Tanaka, Y., and Yamaguchi, H. Influence of winter sea ice motion on summer ice cover in the Arctic, Polar Research, 32:1,20193. 2013
- [2] Jin, H. (2013), High resolution analysis of sea ice variability using visible infrared satellite data, 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文. 2013
- [3] Kimura, N., Wakatsuchi, M., Relationship between sea-ice motion and geostrophic wind in the Northern Hemisphere, Geophysical Research Letters., 27, 22, 3735-3738. 2000.

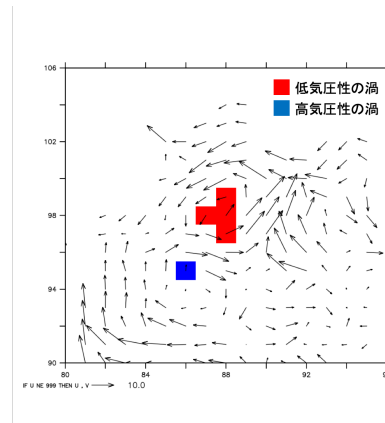


Fig. 9 Eddy detection

(red: cyclonic eddy, blue: anticyclonic eddy)

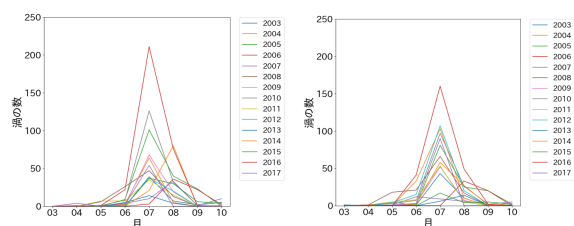


Fig. 10 Seasonal variation of eddy frequency.

(Left: Anticyclonic, Right: Cyclonic)