



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	「ひまわり」及び「しきさい」衛星の海面水温とクロロフィルa データに対するヒストグラム解析に基づくフロント検出法の適用 : 初期平滑化の重要性
Author(s)	石崎, 廣; ISHIZAKI, Hiroshi; 五十嵐, 弘道 他
Citation	Memoirs of the Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, 60, 1-31
Issue Date	2021-12
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/mem.fish.60.1">https://doi.org/10.14943/mem.fish.60.1</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/83712">https://hdl.handle.net/2115/83712</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	mem.fish.60.1.pdf



# 「ひまわり」及び「しきさい」衛星の海面水温とクロロフィル a データに対する ヒストグラム解析に基づくフロント検出法の適用 —— 初期平滑化の重要性 ——

石崎 廣<sup>1,2)</sup>・五十嵐 弘道<sup>1)</sup>・荒井 頼子<sup>3)</sup>・蒲地 政文<sup>1)</sup>  
石川 洋一<sup>1)</sup>・齊藤 誠一<sup>4)</sup>

(2021 年 8 月 27 日受付, 2021 年 9 月 27 日受理)

## Application of a Histogram-Based Method for Front Detection to the Sea Surface Temperature and Chlorophyll-a Data by ‘Himawari’ and ‘Shikisai’ Satellite —— Importance of initial data smoothing ——

Hiroshi ISHIZAKI<sup>1,2)</sup>, Hiromichi IGARASHI<sup>1)</sup>, Yoriko ARAI<sup>3)</sup>, Masafumi KAMACHI<sup>1)</sup>,  
Yoichi ISHIKAWA<sup>1)</sup> and Sei-Ichi SAITOH<sup>4)</sup>

### Abstract

When a histogram-based method for front detection was applied to the sea surface temperature (SST) and chlorophyll-a (CHL) data by ‘Himawari’ and ‘Shikisai’ (GCOM-C) satellite, the obtained frontal patterns were scale-selective, corresponding to the window scales ( $W$ ). On this basis, the optimum initial smoothing condition as the data preprocessing was searched for, that maximizes the frontal edge point detection rate to the given  $W$ . As the smoothing filter, the median filter (MF) and the Gaussian filter (GF) were used solely or co-used. As the result, it was found that the frontal edge point detection rate was maximized when the original data were smoothed until the scale of about a half of  $W$ , that is, when the disturbances with the scales less than about a half of  $W$  were removed, for the low-latitude SST data of ‘Himawari’ with the co-use of MF and GF. Namely, the optimum smoothing scale ( $D$ ) that maximizes the frontal edge point detection rate is roughly proportional to  $W$ . The mean values ( $Rm$ ) of the ratio of  $D$  to  $W$  ( $R=D/W$ ), averaged over the practical range of  $W$  for various data and regions, fall in a range  $0.3 < Rm < 0.5$ .

**Key words :** Front Detection, Sea Surface Temperature, Chlorophyll-a, Histogram-based Method, Scale-selective Frontal Pattern, Importance of Initial Smoothing, Scale Proportional to Window, Gaussian Filter, Median Filter

### 緒 言

海洋においては、種々のスケールの海面水温 (SST) のフロントが存在する。フロントとは比較的均質な 2 つの水塊が接する境界であり、そこでは SST の水平傾度 (gradient) が大きい。スケールの大きなものでは黒潮などの西岸境界流自体が作るものがあり、その幅は 100 km にも達する。また、海洋西岸域及び内部領域で形成される各種の渦や擾乱も多くの場合 SST フロントによって表される。

一方、沿岸付近では陸水と海水の接する潮目のように非常に小さいものがある。また、北米や北アフリカの西岸沿いの湧昇域では広く岸に沿った冷たい湧昇水と沖の暖水との間に長い SST フロントが形成される。これら各種のフロントは種々の物理現象の結果であるとともに起因にもなる。

一方、これらの SST フロントは各種魚類の生存とも深く関係している場合があり、フロントの存在と好漁場との間には何らかの相関があると考えられる。従って、比

<sup>1)</sup> 海洋研究開発機構  
(Japan Agency for Marine-Earth Science Technology (JAMSTEC))  
<sup>2)</sup> 気象研究所  
(Meteorological Research Institute (MRI))  
<sup>3)</sup> リモート・センシング技術センター  
(Remote Sensing Technology Center of Japan (RESTEC))  
<sup>4)</sup> 北海道大学・北極域研究センター  
(Arctic Research Center, Hokkaido University)

較的容易に入手可能な衛星の SST 画像を用いて各種フロントの位置を決定できれば、好漁場の推定に有用であると考えられる。

衛星の SST 画像から客観的にフロントを求める方法は主なものとして2つある。1つ目は SST の水平傾度によるもの (gradient-based method, グラディエント法) で、その強さの閾値を与えて決定する (例えば, Canny, 1986)。もう1つは、全体の場を細かな window で区切り、window 毎の場の値のヒストグラムにおいて二山分布と認められる場合にその境界値を取る物理空間の位置を連ねてフロントとみなす方法である (histogram-based method, ヒストグラム法) (例えば, Cayula and Cornillon, 1992)。

ヒストグラム法では Cayula and Cornillon (1992) (以下, C&C と略) による single-image edge detection algorithm (SIED) が最もよく使用される。オリジナルの SIED では最初に雲部分を除去し、 $3 \times 3$  の median filter (MF) でノイズを除去した後に、全体を  $32 \times 32$  の window に区切り、各 window のヒストグラムが統計的に有意に二山分布であるかどうかを検定する。有意である場合には更に、いくつかの付加条件を調べ、満たされている場合に二山の境界値 (谷) をとるピクセルをエッジ点とみなす。最終的にはエッジ点を補完しながら結んでフロント線とする。

C&C による SIED 以降、これを用いた研究は多い (Ullman and Cornillon, 1999, 2000; Belkin and Cornillon, 2003 他) が、更にこれを基にして発展させた方法論が多く展開されてきた。Cayula and Cornillon (1995) では、連続する複数の画像にそれぞれ SIED を適用し、そのフロントの小片毎に gradient の大きさや移動を考慮した上で言わばラグランジュ的に合成する multi-image edge detection algorithm (MIED) が開発された。これによりオリジナル SIED に対し、雲に隠れたフロント部分や弱いフロント等の付加情報が加えられる。Miller (2009) は、同様に複数の画像に対して SIED を適用し、そのフロントの強さを gradient の強さ、持続性、近隣にフロントの存在する可能性という三者の積で表現して重ねるといふ、言わば Euler 的な合成法 (composite front map approach (CFM)) を提案し、SST 及びクロロフィル a (CHL) 分布に適用している。一方、一画像で SIED を用いるが、window 幅 (以後  $W$  と略) を一定とせず、その中心点付近でのローカルな統計値に基づいてサイズを決めるという geographical (variable) window size approach (VW-SIED) が Diehl et al. (2002) によって提案されている。また、 $32 \times 32$  の  $W$  でずらし幅 (以後  $S$  と略) を東西・南北とも 16 とし SIED を適用し、重なった 4 つの  $16 \times 16$  window の内、最も長いフロントの segment を採用するとともに、その過程で抜けたものでも隣と結びつくものは採用するという combination of multiple window (CMW) が Nieto et al. (2012) によって提案され、エッジ点の検出に非常に効率の良いことが示された。なお、CHL 分布に対する SIED の適用は上記 Miller (2009) の他、Miller (2004) や Wall et al. (2008) でもなされている。

一方、SIED 及び関連した方法によるエッジ点検出において有益な情報を効率的に得るためには、予めノイズを除去すること (preprocessing) が必要不可欠であるが、上述の論文のほとんどでは SIED 適用以前のノイズ除去のための平滑化は、 $3 \times 3$  の MF を 1 回適用するだけであった。これに対して Rao-Pascuali et al. (2015) は、preprocessing の重要性を認識し、平滑化のタイプ (filter) として MF, 単純移動平均, 及び Gaussian filter (GF) の 3 種類、平滑化のカーネルの大きさとして  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$ , 及び  $9 \times 9$  の 4 種類、更には  $W$  として  $16 \times 16$ ,  $24 \times 24$ , 及び  $32 \times 32$  の 3 種類、計 36 ケースに対して、上記 CMW を用いて分解能 4 km の SST データに対する最適組み合わせ、すなわち、エッジ点検出率を最大とするケースを求めることを試みた。その際に、強いフロント ( $\text{gradient} > 0.042^\circ\text{C km}^{-1}$ ) と弱いフロント ( $0.02\text{--}0.042^\circ\text{C km}^{-1}$ ) に分けて最適解を求めている。その結果、どちらのフロントに対しても filter としては MF,  $W$  は  $16 \times 16$  であり、カーネルサイズは強いフロントに対しては  $5 \times 5$ 、弱いフロントに対しては  $7 \times 7$  が最適解であった。

我々の最終的な研究目標は、「ひまわり」及び「しきさい」衛星の SST 及び CHL データに対してフロントを検出して漁場推定のための資料として現業的に提供する手法を確立することである。前述したほとんどの先行研究では、ノイズ除去後の SST 及び CHL 場に対してエッジ点検出のための種々の手法を提示しているが、Rao-Pascuali et al. (2015) 等一部を除いて、preprocessing としての初期平滑化の重要性が認識されていない。SIED を用いる場合に、初期平滑化の程度によって、ヒストグラム解析における二山の判定結果が大きな影響を受ける可能性が有り得る。また、後述するように、SIED 内にもエッジ判定のための様々なパラメータが提示されているが、様々な場合に対応するエッジ抽出のための適切な設定指針が示されていない。従って、実際の漁業者が必要とする様々な海域において日々の観測から得られる SST 及び CHL 場に対して SIED 等のエッジ抽出手法を適用して海洋フロント解析情報を現業的に創出・配信するためには、適切なパラメータ調整を行うためのプロセスと指針を明確化する必要がある。

我々の一連の研究過程では、まず、解析対象であるひまわりの SST データに SIED を適用した初期解析において以下の 2 点が確認された。すなわち、①  $W$  の違いによって、エッジ点検出率が異なる (一般に  $W$  が小さいほど検出率は大 (Table 2)) だけでなく、得られたエッジ点のパターンに大きな相違がみられる:  $W$  が大きいほど、検出されるフロントの空間的変動スケールも大 (Fig. 3)。つまり、与えられた  $W$  に対応して scale-selective にフロントが検出される。②  $W = 30$ ,  $S = 3$  を固定して、preprocessing として  $3 \times 3$  の MF と、(1-2-1, 2-4-2, 1-2-1) の 2 次元 9 点加重移動平均 (RM) を掛け続けた場合、それらの回数が多いほど (つまり、平滑化率が高いほど) エッジ点検出率は高くな

る (Table 3)。

①の意味する所は、実際の SST 場においては様々のスケールのフロントが存在し、SIED を適用した場合には、与えられた  $W$  に適合したスケールのフロントのみが検出されるということであろう。従って、異なった  $W$  に対するエッジ点検出率の大小だけをもって、 $W$  の優劣はつけられない。問題はどのようなスケールのフロントを検出したいかであり、それによって  $W$  が決められるべきであろう。もし、スケールに関わりなく全てのフロントを表したいならば、様々の  $W$  で求めたフロントを重ねればよい。一方、②の意味する所は、データの品質や  $W$  にも依存するとは思われるが、少なくとも、オリジナル SIED のように  $3 \times 3$  の MF を 1 回施す程度の preprocessing では平滑化として不十分ということであろう。どの程度まで平滑化すればエッジ点検出率が最大になるかは興味あるところであり、本論考の直接的動機となった。

以上のような状況を踏まえ、本論考では SST と CHL データについて、まず、様々の  $W$  に対して、エッジ点検出率を最大にするような preprocessing としての平滑化の程度を探ることを試みる。平滑化の filter としては MF と上記の RM とし、これらを多数回掛け続けることとする。次にそのようにして求めたエッジ点検出結果を示した上で、初期解析結果も含めてひまわりとしきさい、SST と CHL のフロントを比較する。なお、RM を 1 回ないし多数回掛けることは GF を掛けることと等価であり、その回数に対応して GF の分散  $\sigma$  (空間スケールの指標) が決まる。

本論考の結果として、衛星による SST や CHL データから SIED を用いてフロント・エッジを検出するに際しての方向性が明示される。すなわち、まず、どの程度の空間スケールのフロントを求めたいかが最も基本である。それに応じて  $W$  が決まり、更に  $W$  に応じてエッジ検出率を最大にするような初期平滑化 (ノイズと擾乱の除去) の程度が決まる。このような単純な方向性を示し得ることが本論考の最大の成果である。

本論考の構成は以下の通りである。次節「SIED によるフロント検出法」では改めて SIED の方法をやや詳しく解説し、第 3 節「データ」では扱う衛星データを紹介する。その際に、ひまわりの CHL データとしきさいの SST データにノイズとして縞模様が見える場合があり、それらを除去した上でエッジ点の検出を行ったので、その除去方法を付録 A, B で紹介する。続いて第 4 節「ひまわり SST に対する SIED 初期適用結果」でひまわりの SST データに SIED を適用した初期解析結果を示す。第 5 節「SIED 適用における preprocessing としての最適平滑化」では、まずひまわり SST についてエッジ点検出率を最大にするような preprocessing としての最適平滑化 (MF と GF それぞれ単独または併用) を種々の  $W$  毎に求め、そこに見られる法則性を探った後、他種のデータについても同様の解析を行って同様な法則性を確認する。第 6 節「ひまわり-しきさい、SST-CHL 比較」では、最適平滑化を施してい

ない初期解析結果も含めて、ひまわりとしきさい、SST と CHL のフロントを比較する。最後に第 7 節を「まとめ、活用法、及び議論」とする。

なお、付録 C には RM の稼動回数に対応する Gaussian filter の分散  $\sigma$  を求めるためのパスカルの三角形を紹介する。また、出力データの一つとして、エッジではない海点における最近接エッジ点までの距離を求めているので、その方法を付録 D として記す。更に付録 E には本論考において使用されているパラメータと変数名の一覧を記す。

## SIED によるフロント検出法

### 1. オリジナル SIED

ここでは C&C の SIED (オリジナル SIED) におけるフロント検出方法について紹介する。まず、全画面を小さい window に分割して window 毎に場の値の度数分布表 (ヒストグラム) を作成する。そのヒストグラムの分布解析の結果、二山あるとみなせる場合には、その二山と間の谷は、実空間における比較的均質な二領域とそれらを隔てるフロントに対応すると考えられる (Fig. 1(a, b))。すなわち、ヒストグラムの谷の部分の値を持つ、実空間での点をフロントに対応するエッジ点とみなす。このような window を少しずつずらしながら全画面をカバーし、得られたエッジ点を総合して、フロントの全体像を構築する。この過程は以下の通りである。

1) window の選択:  $1 \sim 2$  km の分解能に対して  $32 \times 32$  程度。

C&C での例では  $1/60^\circ$  の分解能で window は  $30 \times 30$  ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ) のピクセル数、またそのずらし幅 ( $S$ ) は window 幅 ( $W$ ) の半分の 15 ピクセル。

2) ヒストグラムの刻み幅の選択: 明確ではないが、C&C では bin の数は数 10~100 程度。C&C では場の値の分解能をそのまま刻み幅に用いたと思われる。

3) ヒストグラムの分布解析

a. ヒストグラム定義域 ( $t_{\min} < t < t_{\max}$ ,  $h(t)$ : 度数) 内の任意値 ( $\tau$ ) によりヒストグラムを 2 つに分け、それぞれの領域内での平均値 ( $\mu$ ) と variance ( $V$ ) を以下のように定義する。

$$N_1 = \sum_{t < \tau} h(t), \quad N_2 = \sum_{t \geq \tau} h(t) \quad (1)$$

とすると、

$$\begin{aligned} \mu_1(\tau) &= (\sum_{t < \tau} t h(t)) / N_1, \\ \mu_2(\tau) &= (\sum_{t \geq \tau} t h(t)) / N_2, \\ V_1(\tau) &= (\sum_{t < \tau} (t - \mu_1)^2 h(t)) / N_1, \\ V_2(\tau) &= (\sum_{t \geq \tau} (t - \mu_2)^2 h(t)) / N_2. \end{aligned} \quad (2)$$

b. それらに基づいてヒストグラム全体での variance ( $V_{\text{tot}}$ ) を以下の 2 つの variance の和として表現

①  $J_e(\tau)$ : within-cluster variance

$$J_e(\tau) = \frac{N_1}{N_1 + N_2} V_1(\tau) + \frac{N_2}{N_1 + N_2} V_2(\tau), \quad (3)$$

②  $J_b(\tau)$ : between-cluster variance

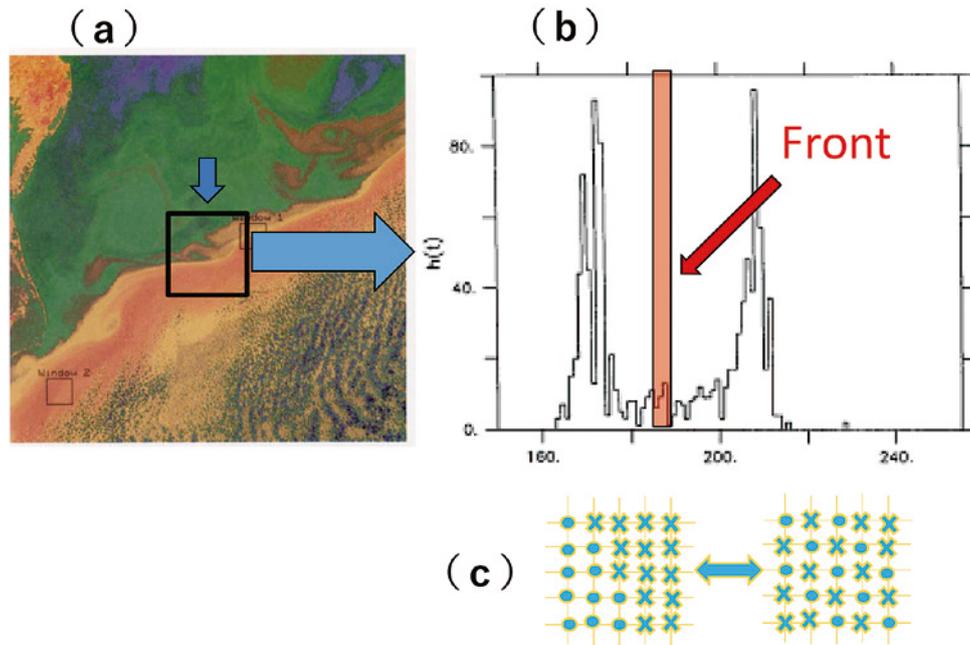


Fig. 1. Schematic figure of the single-image edge detection algorithm (SIED). (a) An example of window defined in the SST data in the Atlantic Ocean. (b) The SST histogram obtained from the window data shown in (a), with the existence of two populations and a threshold in between, corresponding to a front. (c) Contrast of two spatial distributions of the points constituting the two populations in the histogram (spatial cohesion). Panels (a) and (b) were cited from Cayula and Cornillon (1992) and modified.

$$Jb(\tau) = \frac{N_1 N_2}{(N_1 + N_2)^2} [\mu_1(\tau) - \mu_2(\tau)]^2 \quad (4)$$

$$V_{tot} = Je(\tau) + Jb(\tau) \quad (5)$$

c.  $Jb(\tau)$  を最大にする  $\tau$  を  $\tau_{opt}$  とし,  $\theta(\tau_{opt}) = Jb(\tau_{opt})/V_{tot} > 0.7$  の場合に, このヒストグラム分布は二山であり  $\tau_{opt}$  は二山の間の谷に相当する可能性あり, と認定する。

4) 更に下記 3 つの付加条件を満たす時, 実空間で  $\tau_{opt}$  の値をつなぐコンタは, ヒストグラムの 2 つの山に対応する比較的均質な二領域を隔てるフロントであるとみなす。

a. signal-to-noise 比 ( $STN$ ) が 4 以上 :

$$STN = [(\mu_1 - \mu_2)^2 / Je]^{1/2} \geq 4 \quad (6)$$

b. それぞれの山を成すピクセル数が総数の 25% 以上

c. それぞれの山に属するピクセルの空間分布が一塊を成していること (spatial cohesion)(Fig. 1(c)). 3 つの指標  $C$ ,  $CI$ ,  $C2$  に対し,  $32 \times 32$  の  $W$  で

$$C \geq 0.92, CI \geq 0.9, C2 \geq 0.9 \quad (7)$$

5) 重複を許しながら window を移動させ, 全領域をカバーする。各 window で得られたフロントを総合してその全体像を構築する。

## 2. 本論考での SIED 適用における若干の変更点

本論考においては, C&C で与えられている種々のパラ

メータの値 ( $W$  と  $S$  は除く) は一切変更せずに用いている。ただし, 方法として以下の点については変更を加えた。すなわち, C&C ではヒストグラムの刻み幅として場の量 (SST) の分解能をそのまま用いており, また, 平滑化としても MF のみを用いているので, 刻み幅に変化はない。つまり, 場の値は discrete な状態と見做せる。しかし, 本論考では後に述べるように平滑化として MF のみならず GF も用いるので, 場は連続的となり, 従って, 刻み幅は与えなければならない。その与え方として, 最小値・最大値間での bin 数が 50 を基本とし, かつ刻み幅の factor が 1, 2, ないしは 5 のどれかになるように選ぶこととする。その結果, bin 数は最小で 50, 最大で 125 となる。刻み幅の factor をこのように選ぶ理由は, フロントに対応する場の値を明瞭な数値とするためである (本論考の範囲で直接は使われなかったが, 今後のため)。また, 得られるエッジ点の定義位置はピクセル位置そのものではなく, 4 つのピクセルで構成される四角形の中心位置となる。

出力データセットとしては, 各エッジ定義位置が実際エッジであるかどうかという判定 (0 か 1 か) 以外に, 複数回の window によるスキャンにより何回エッジと認定されたかというデータ (robustness), 場の水平傾度 (後に示すように preprocessing として平滑化された場), 及び, エッジ以外の海点における最近接エッジ点までの距離 (付録 D 参照) を合わせて記すこととする。

## デ ー タ

## 1. データセット

本研究で実際にエッジ点検出の解析を行ったひまわり・しきさい衛星の SST・CHL データセットの仕様および解析期間を Table 1 に示す。本論考にて使用した「しきさい (GCOM-C) のデータ」は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) より、「ひまわり 8 号から作成したクロロフィル a 濃度および海面水温に関する研究プロダクト」は、JAXA の分野横断型プロダクト提供サービス (P-Tree) より、それぞれ提供を受けた。なお、一部、Table 1 に示す分解能と対応する図の元データの分解能が異なる場合があるが、前者が基本であり、後者は編集された結果である。

## 2. 縞模様の存在とその除去

ひまわりの CHL としきさいの SST のオリジナルデータ

Table 1. List of SST and CHL satellite data by ‘Himawari’ and ‘Shikisai’, used for the edge detection analysis in this article. Time and spatial resolutions and data periods are shown.

	Product Name	Satellite Name	Time Res.	Spatial Res.	Version	Data Period
SST	Sea Surface Temp. <sup>1)</sup>	Himawari	Daily	2 km	2.0	Jul 2015-
	Level-2-SSTD <sup>2)</sup>	Shikisai	Path	250 m	1	Jul-Nov 2018
	Sea Surface Temp. <sup>3)</sup>	Shikisai	Path	250 m	1	Aug 2018
CHL	Chlorophyll-a Concent. <sup>1)</sup>	Himawari	Daily	5 km	1.0	Jul 2015 -
	Chlorophyll-a Concent. <sup>1)</sup>	Himawari	Daily	2 km	1.0	Jul 2015 -
	Level-2-IWPR (CHLA) <sup>2)</sup>	Shikisai	Path	250 m	1	Jul-Nov 2018

<sup>1)</sup>The P-Tree System, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)  
([https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index\\_j.html](https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index_j.html))

<sup>2)</sup>The Globe Portal System, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)  
(<https://gportal.jaxa.jp/gpr/index/>)

<sup>3)</sup>SLII Near Realtime web, JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies  
([https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/sgli\\_nrt/index.cgi](https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/sgli_nrt/index.cgi))

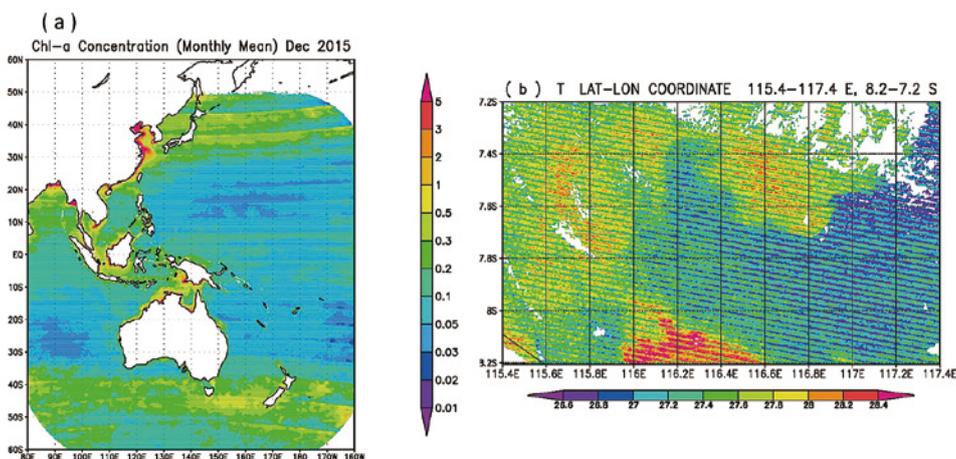


Fig. 2. (a) Stripes seen in the Himawari CHL ( $\text{mg m}^{-3}$ ) coarse data (monthly mean in December 2015 with  $1/20^\circ$  resolution). The stripes are almost parallel with the latitudinal circles, but slightly shift poleward going to the east or west from the central longitude ( $140^\circ\text{E}$ ) where the stationary satellite stands. They also seem to be meridionally symmetric about the equator. (b) Stripes seen in the Shikisai SST ( $^\circ\text{C}$ ) data (July 31, 2018,  $1/400^\circ$  resolution,  $115.4^\circ\text{E}$ - $117.4^\circ\text{E}$ ,  $8.2^\circ\text{S}$ - $7.2^\circ\text{S}$ ). The stripes go along with the satellite orbit.

ひまわり SST に対する SIED 初期適用結果

1.  $W$ スケールによるエッジ・パターンの相違

まず試験的に、分解能  $1/60^\circ$  のひまわり SST データに対して、 $W=30$  (基本) ( $0.5^\circ$ ),  $S=3$  (基本) ( $0.05^\circ$ ), 及びヒストグラムが二山分布であるために必要な最低限の  $STN$  比 (基本 4 以上) を種々に変えてフロントに対応するエッジ点を求めることを試みた (Table 2)。この場合、初期平滑化は  $3 \times 3$  の MF2 回だけである。基本 window に対して  $S$  を増やすと (Case 1, 2, 3), エッジ点数は大幅に減少する。これ

Table 2. Initial results of SIED application to the Himawari SST data ( $1/60^\circ$  resolution). The detected number of edge points and required computation time are shown for various window widths ( $W$ ), slide widths ( $S$ ), and signal-to-noise ratios ( $STN$ ). The median filter (MF) was applied twice as the initial smoothing.

Case	Window ( $W$ )	Slide ( $S$ )	$STN$	Number of Edge Points	Required Time (sec)
Case 1	$30 \times 30$	15	4	329,302	9
Case 2	$30 \times 30$	5	4	992,816	31
Case 3	$30 \times 30$	3	4	1,272,372	76
Case 4	$30 \times 30$	15	3.5	1,064,120	8
Case 5	$30 \times 30$	5	3.5	3,082,393	30
Case 6	$30 \times 30$	3	3.5	3,902,519	84
Case 7	$15 \times 15$	3	4	1,678,024	59
Case 8	$20 \times 20$	3	4	1,543,769	63
Case 9	$60 \times 60$	3	4	986,170	141
Case 10	$90 \times 90$	3	4	855,881	249
Case 11	$120 \times 120$	3	4	787,463	391

はある特定点に注目するとずらされる window によってスキャンされる回数が増えることによる。例えば Case 3 であれば一次的に 10 回 ( $30/3$ ) で二次元的には 100 回であるのに対して Case 1 では 4 回である。スキャン回数が多いほどエッジ点として採用される可能性は高まる。一方、 $STN$  の最低値を 4 から 3.5 に下げるとエッジ点数はそれぞれ 3 倍以上に増加する (Case 4, 5, 6)。C&C による 4 という値は簡単には変えられないと思われる (以後 4 に固定)。

最後に  $W$  を減らした場合 (Case 7, 8) と増やした場合 (Case 9, 10, 11) であるが、これらの場合には  $W$  が小さいほどエッジ点数は増加する。 $S=3$  は一定だからある特定点でのスキャン回数は  $W$  が大きいほど増加する (例えば Case 7, 3, 10 では  $W$  は 15, 30, 90 で、スキャン回数は 25, 100, 900 回) が、エッジ点数は逆に減少する。これは  $W$  が大きいほど対応するヒストグラムにおいて要素数が増大し、単純な二山と判定出来難くなるためと考えられる。

それぞれに要する処理時間に対しては  $W$  の大きさが最も効いている。個々のヒストグラムの要素数が多くなり、ヒストグラム解析 (前節参照) に時間を要するためである。また、 $S$  が小さい場合にもヒストグラムの処理数が増えるため処理時間も増大する。更に、 $STN$  比を下げた時にも時間が増えるが、これは  $STN$  比を下げたために二山と認識される場合が増え、その後の spatial cohesion のチェック (前節参照) に時間を要するためと思われる。

Fig. 3 には Case 10, 3, 7 に対する検出エッジ点の分布を示すが、エッジ点数の相違 ( $W$  が小さいほど多) だけでなく、パターンにも違いがみられる。大きな  $W$  の場合 ( $W=90(1.5^\circ)$ ) (Fig. 3(a)), 日本周辺海域においては、黒潮・親潮・津軽暖流水といった大規模スケールの海流に伴うはっきりとしたフロントのみが抽出されており、紀伊半島沖の

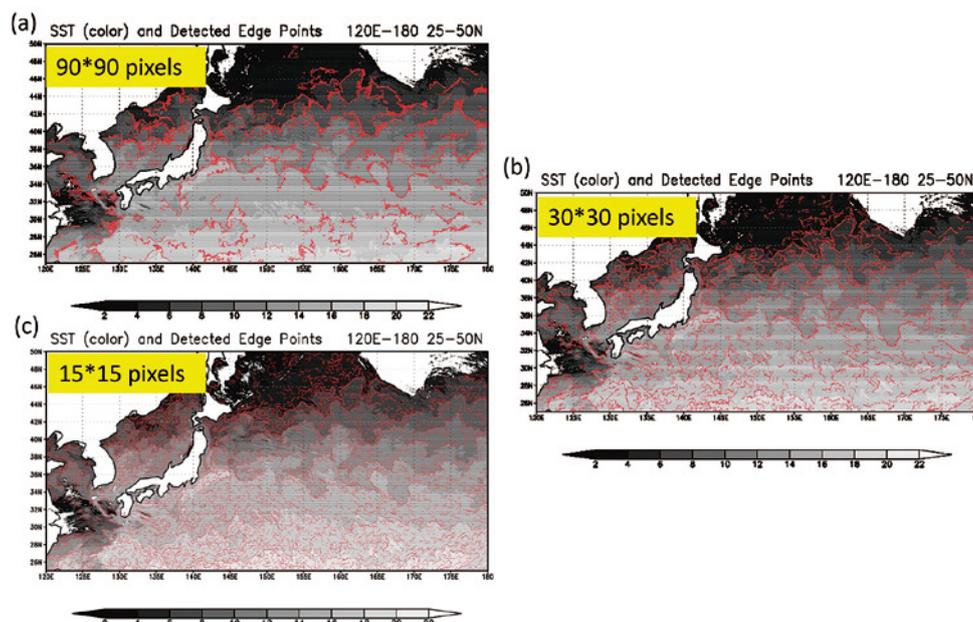


Fig. 3. Himawari SST data ( $1/60^\circ$  resolution in grey scale) and detected edge points for Cases 10, 3, and 7 shown in Table 2. (a) Case 10 with window size ( $W$ ) = 90, (b) Case 3 with  $W=30$ , and (c) Case 7 with  $W=15$ .

黒潮大蛇行や、津軽海峡を通過した津軽暖流水が東北沿岸域で親潮と接触している様子が、幅広のフロントとして捉えられている。 $W$ を小さくすることにより、小規模スケールの海況変動に対応したフロントが抽出されていく様子 (Fig. 3(b), (c)) が分かる。 $W=30$  ( $0.5^\circ$ ) では、黒潮変動に伴って形成された中規模渦が北海道東方沖や茨城県沖に存在している様子が捉えられており、 $W=15$  ( $0.25^\circ$ ) では更に細かいフロントとなる。すなわち、 $W$ が大きいと分布は粗く (スケールが大) 線も太くなり、 $W$ が小さいと分布は細かく (スケールが小) 線は細くなる。このことは選択した  $W$  によって検出されるフロントのスケールも異なってくることを示唆している。つまり  $W$  によって scale-selective にフロントが検出される。

## 2. エッジ検出率に対する初期平滑化の影響

一方、Table 3 には  $W=30$ ,  $S=3$  一定で、MF と RM を掛けた回数に対するエッジ点検出率を示す。いずれの場合にも先に MF を掛けた後に RM を掛けた。この表に示す回数の範囲 (MF 5 回, RM 6 回) では MF, RM とも掛けるほど検出率は増加し、両者ともに同じような効果を及ぼすと考えられるが、RM の方がやや効果的である。Fig. 4 には (MF, RM) 回数が (1, 0), (2, 2), (4, 4), 及び (5, 6) の場合の SST 場の分布と検出エッジ点を示すが、Table 3 に対応して、明らかに平滑化が進むほど検出エッジ点は増加している。この表の最大回数の及ぼす 2 次元空間的範囲 (MF 5 回でピクセル数 11, RM 6 回でピクセル数 13) は

Table 3. Detected edge point ratios (%) for the Himawari SST data (January 10, 2019,  $1/60^\circ$  resolution), for various times of MF (0-5 times) and RM (0-6 times) applied (totally 42 cases), with a constant window ( $W=30$ ) and a slide ( $S=3$ ) width. Firstly, MF was applied, and then RM applied in each case. The detected ratios become greater for greater times of MF and RM applications, that is, for greater initial smoothing.

		RM times						
		0	1	2	3	4	5	6
MF times	0	0.59%	2.57	3.51	4.15	4.69	5.17	5.59
	1	2.17	3.57	4.21	4.74	5.20	5.63	6.02
	2	3.06	4.16	4.69	5.15	5.57	5.94	6.28
	3	3.55	4.60	5.07	5.47	5.83	6.17	6.48
	4	3.93	4.95	5.37	5.70	6.01	6.32	6.60
	5	4.26	5.21	5.56	5.85	6.15	6.40	6.67

$W=30$  による 2 次元的な範囲よりも狭いので、このような MF・RM を掛けることは  $W$  よりも小スケールの空間的変動 (ノイズ・擾乱) を平滑化することに相当し、その度合いは掛けた回数に依存する。このことは、与えられた  $W$  に対してそれよりも小スケールの空間的変動をより強く削除した方がその  $W$  でのエッジ点検出率がより高まることを示唆している。

Fig. 5 は Fig. 4 と同じエッジ点を  $\text{grad } T$  の絶対値 (ピクセル間の  $T$  の差で定義) を背景にしてプロットしたものである。平滑化が進むにつれて全般に  $\text{grad } T$  の絶対値は減少

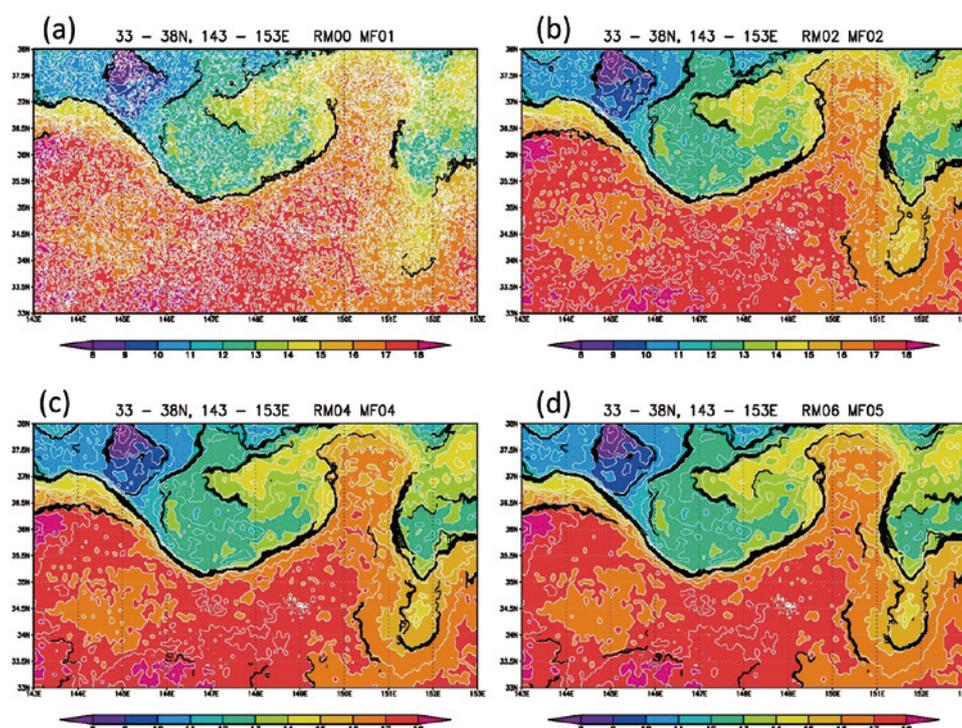


Fig. 4. Himawari SST data (January 10, 2019,  $1/60^\circ$  resolution) and detected edge points with  $W=30$  for four cases shown in Table 3 in the region ( $143^\circ$ - $153^\circ$ E,  $33^\circ$ - $38^\circ$ N). (a) (MF, RM) = (1, 0), (b) (2, 2), (c) (4, 4), and (d) (5, 6). As smoothing progresses, increase in the detected edge points can be seen visually.

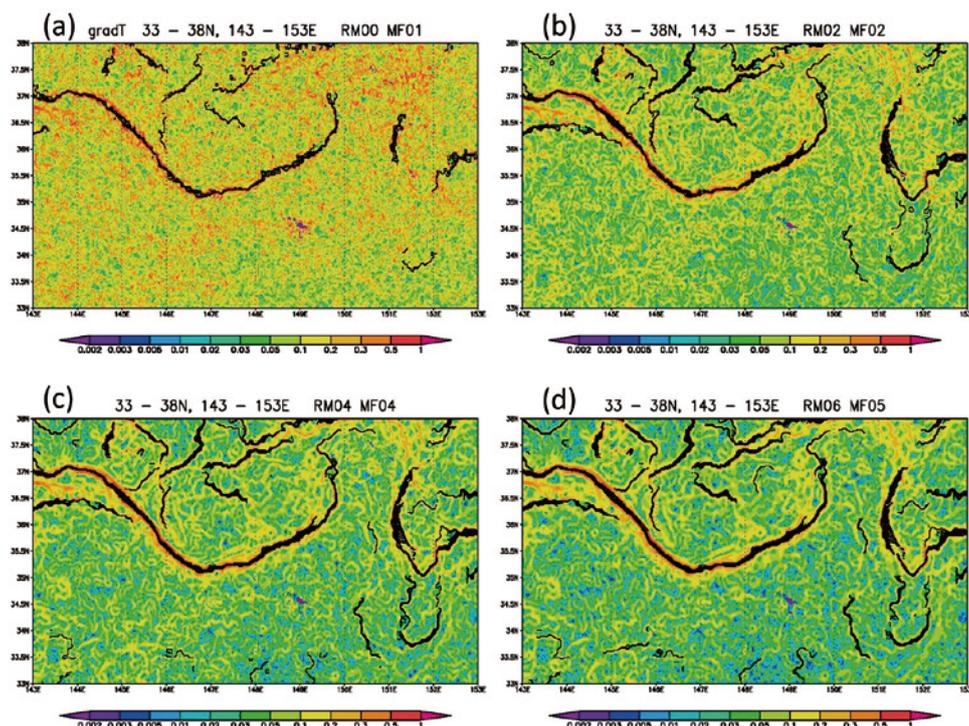


Fig. 5. Same as Fig. 4, but for the absolute values of  $\text{grad } T$  ( $|\text{grad } T|$ ) as the background factor. As smoothing progresses, the magnitude of  $|\text{grad } T|$  generally reduces, but its relative strength appears to be clearer around edge fronts.

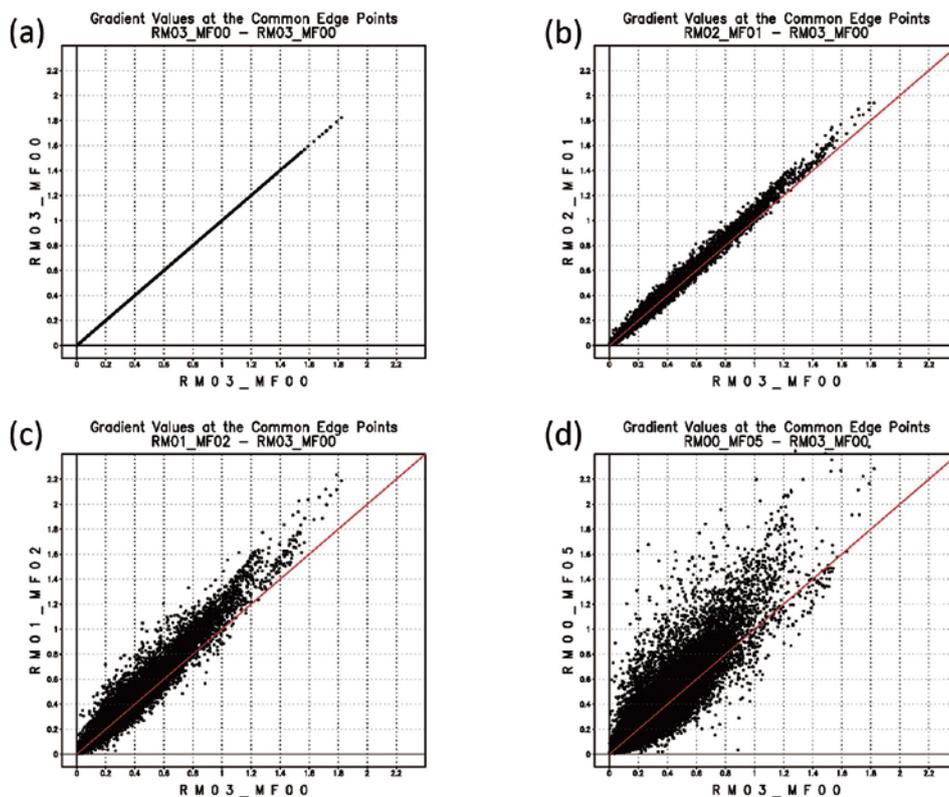


Fig. 6. Difference in influences of MF and RM on the magnitude of  $|\text{grad } T|$ . Selecting four cases in Table 3, for which the detected edge point rates are almost the same ( $(MF, RM) = (5, 0), (2, 1), (1, 2),$  and  $(0, 3)$ , with 4.26, 4.16, 4.21, and 4.15%, respectively), the scattering diagram of  $|\text{grad } T|$  in each case is shown, against that in the  $(MF, RM) = (0, 3)$  case, for the common edge points (2.59%). (a) Case  $(0, 3)$  against case  $(0, 3)$ , (b)  $(1, 2)$  against  $(0, 3)$ , (c)  $(2, 1)$  against  $(0, 3)$ , and (d)  $(5, 0)$  against  $(0, 3)$ . MF tends to conserve  $|\text{grad } T|$  rather than RM.

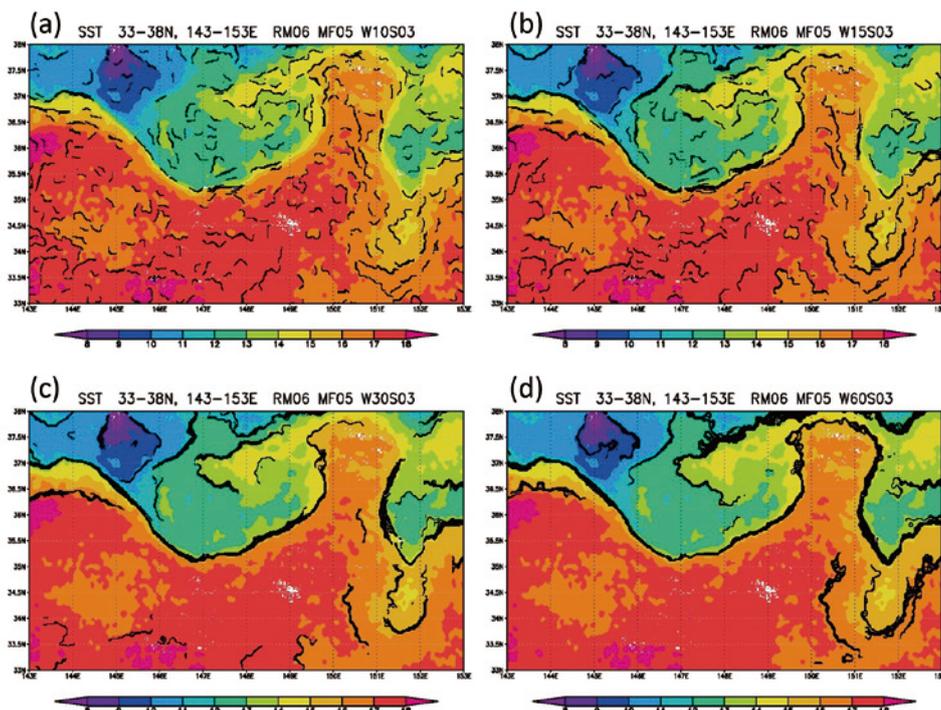


Fig. 7. Confirmation of the scale-selective patterns of the detected edge point distributions against  $W$ , as Fig. 3. (a)  $W=10$  ( $1/6^\circ$ ), (b)  $W=15$  ( $0.25^\circ$ ), (c)  $W=30$  ( $0.5^\circ$ ), and (d)  $W=60$  ( $1^\circ$ ), for  $(MF, RM) = (5, 6)$ .

するはずであるが、エッジ点のない広い空間部分で顕著であり、エッジ点での値が相対的に浮かび上がるように見える。平滑化による小スケール擾乱の削除の結果であろう。

MF と RM を掛けることは検出率を増加させる点では同じであるが、場のグラディエントに及ぼす影響は異なってくる。Table 3 で同じ程度の検出率を示す 4 ケース ( $MF, RM$ ) = (5, 0), (2, 1), (1, 2), 及び (0, 3) (検出率はそれぞれ 4.26, 4.16, 4.21, 及び 4.15%) に対し、共通にエッジ点と認識された点 (2.59%) における  $\text{grad } T$  について、 $(MF, RM) = (0, 3)$  を基準 (横軸) にして他のケース (縦軸) との散布図を示したのが Fig. 6 である。RM の回数が減り MF が増えるほど  $\text{grad } T$  の大きさが平均的に大きくなる。すなわち、検出率は同程度でも、MF の方が場の  $\text{grad}$  をよく保存していると言える。

なお、Fig. 7 には同じデータの  $(MF, RM) = (5, 6)$  に対して  $W = 10, 15, 30$ , 及び  $60$  で求めたエッジ点分布を示すが、Fig. 3 同様に scale-selective なパターンとなっている。

## SIED 適用における preprocessing としての最適平滑化

### 1. ひまわり SST データに対するエッジ点検出率最大化的ための最適初期平滑化

前節において、SIED によれば、与えられた  $W$  に応じて scale-selective にフロント分布が決まり、また、その  $W$  よりも小スケールの擾乱を平滑化することによりエッジ点検出率を高められることが示唆された。これは、平滑化

により、SIED でエッジ点であるための付加条件である  $STN$  比 4 以上と  $\text{spatial cohesion}$  が 0.9 ないし 0.92 以上という条件 (「SIED によるフロント検出法」節参照) を満たし易くなるためと考えられる。ここでは平滑化の方法として MF と、RM に等価である Gaussian Filter (GF) を取り上げ、分解能  $1/50^\circ$  のひまわり SST データに対して、それぞれ単独及び併用した場合の状況を考察する。なお、ここで「最適」なる用語は、「エッジ点検出率を最高にする」という意味で用いる。

#### 1-1. MF 単独

ここで MF とは、2 次元の  $3 \times 3$  (= 9) ピクセルの中心位置に、それら 9 個の値の中央値 (median) を据える操作を意味する。これにより、突出値を効率よく除去できる。ひまわり SST (分解能  $1/50^\circ$ ) 2018 年 12 月 3 日、 $100^\circ\text{E}$ - $165^\circ\text{W}$ ,  $15^\circ\text{S}$ - $15^\circ\text{N}$  の範囲を一例として、平滑化の状況と、エッジ点検出率の変化を見る。Table 4 には MF 1 回毎に値が変更されるピクセル数の % を示す。MF による変更点数パーセンテージは、7 回で 10% 以下、24 回で 1% 以下、36 回で 0.1% 以下、また、50 回で約 0.01% となり、25 回程度でほぼ MF に対して定常的 (一定分布に収束) とみなせる。Fig. 8 には MF 回数 0, 1, 2 の場合の SST 場を示す。広範囲で見ればほとんど見分けがつかなくとも、拡大すると 1 度目の段階で大きくノイズが消されていることが分かる。

一方、Table 5 には MF 5 回毎の、8 種類の  $W$  ( $100: 2^\circ \sim 10: 0.2^\circ$ ) に対するエッジ点検出率を示す。全般に  $W$  が小

Table 4. The ratio (%) of the modified points to the total sea points of the Himawari SST data (December 3, 2018, 1/50° resolution, 100°E-165°W, and 15°S-15°N), when the 3 × 3 MF was repeatedly applied ( $N$  times). The ratio monotonically reduces, and is about 10% at  $N=7$ , 1% at  $N=24$ , 0.1% at  $N=36$ , and 0.01% at  $N=50$ . The data converge for large numbers of  $N$ .

MF Times ( $N$ )	Modified Ratio (%)	MF Times ( $N$ )	Modified Ratio (%)	MF Times ( $N$ )	Modified Ratio (%)
1	79.09	12	3.93	32	0.21
2	49.91	14	3.24	34	0.15
3	30.64	16	2.71	36	0.10
4	21.06	18	2.19	38	0.07
5	15.54	20	1.67	40	0.05
6	11.89	22	1.25	45	0.02
7	9.13	24	0.91	50	0.01
8	7.27	26	0.64		
9	5.95	28	0.45		
10	5.05	30	0.31		

さいほど検出率が高い。また、回数が増えるほど検出率も上がるが、最終的には場が一定分布に収束すること (Table 4) に対応して、検出率はほぼ一定値となる。しかも、その一定値が最大値である。一定値への近づき方は  $W$  が大きいほど早い。つまり  $W$  が大きいほど検出率の収束は場の収束よりも早く、 $W$  が小さくなるほど場の収束速度に近づく。後に述べるように GF による平滑化では掛け過ぎると場が滑らかになり過ぎて検出率が減少するのに対して、MF では十分かけて一定分布に収束した時に検出率が最大となることは大きな相違といえる。

### 1-2. GF 単独

前述のように、1-2-1, 2-4-2, 1-2-1 という比率の 2 次元加重移動平均 (RM) を連続的に掛け続けると、その総合的な加重は 2 次元 Gaussian filter

$$G(x, y) = (1/2\pi\sigma^2) \exp(- (x^2+y^2) / 2\sigma^2) \quad (8)$$

となり、その分散  $\sigma$  は RM 回数に応じて決まる。すなわち、初期値として  $x=y=0$  でのみ 1、他では 0 と与えた場で、

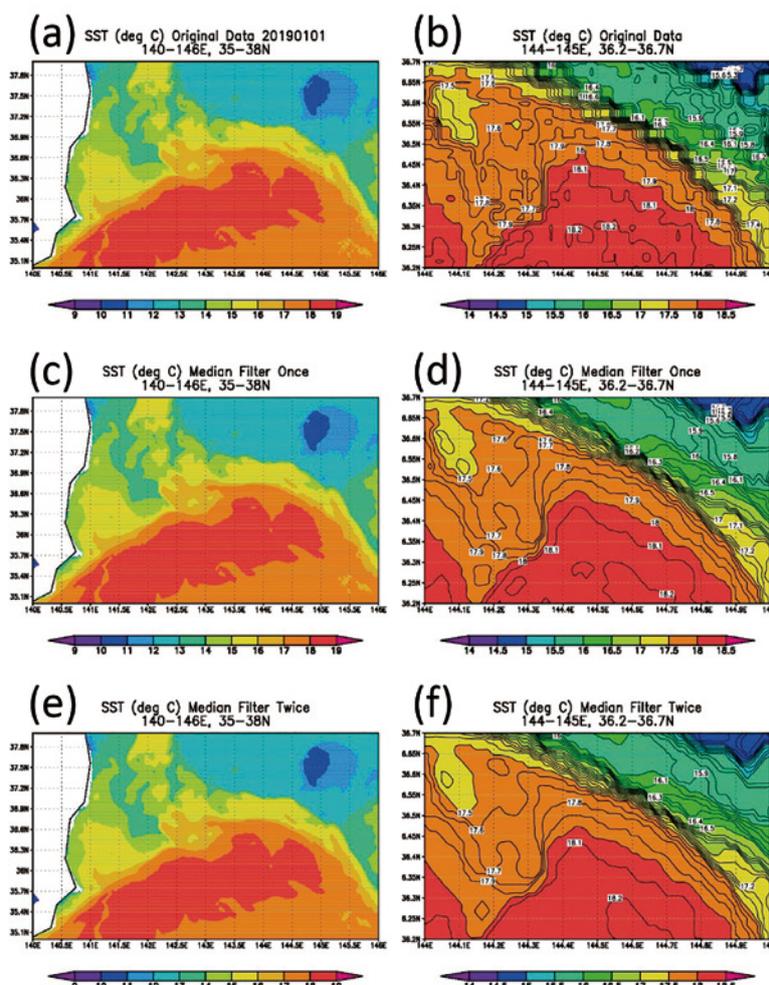


Fig. 8. An example of the Himawari SST field (December 3, 2018, 1/50° resolution) with MF application times 0 ((a), (b)), once ((c), (d)), and twice ((e), (f)). Left column ((a), (c), and (e)): 140°-146°E, 35°-38°N and Right column ((b), (d), and (f)): 144°-145°E, 36.2°-36.7°N (enlarged).

Table 5. Detected edge point ratios (%) for the same SST data as Table 4, for 8 windows ( $W$ ) with the MF application increased with every 5 times ( $N$ ). Corresponding to the convergence of the SST field for large  $N$ , the detected ratio also converges, with its maximum at that time. The convergence speed is faster for the larger  $W$ . For large  $W$  values (e.g.,  $W=100$ ), the convergence speed of the detected ratio with MF increased is faster than that of the SST field itself.

MF Times ( $N$ )	W100	W75	W50	W40	W30	W25	W20	W10
0	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02
5	0.39	0.47	0.69	0.91	1.51	2.36	3.45	6.37
10	0.46	0.55	0.84	1.20	2.16	3.52	5.25	8.60
15	0.47	0.56	0.88	1.25	2.30	3.74	5.58	8.96
20	0.47	0.57	0.88	1.26	2.32	3.81	5.66	9.02
25	0.47	0.56	0.88	1.26	2.33	3.83	5.67	9.03
30	0.47	0.57	0.88	1.26	2.33	3.83	5.68	9.04

RM を  $N$  回掛けた時の  $x=y=0$  での値を求めることで (上式右辺  $= 1/2\pi\sigma^2$ ),  $N$  に対する  $\sigma$  の値が求まる。或いは付録 C に示すように, 1次元の Gaussian filter によりパスカルの三角形を用いて求めることもできる (Table A1)。Table 6 には主な  $N$  値に対する  $\sigma$  値一覧を示す (ピクセル単位)。

RM を重ねる毎に場は滑らかになり ( $\sigma$  の増大), 与えられた  $W$  に対応して, エッジ点検出率を最大にする回数 (これを最適 RM 回数 ( $RMopt$ ) とし, 対応する Gaussian 分布の分散  $\sigma$  を最適  $\sigma$  とする) が決まる (必ずしも鮮明なピー

Table 6. Values of the standard deviation ( $\sigma$ ) of the Gaussian filter (unit in pixels), corresponding to the application times ( $N$ ) of the 2-dimensional weighted running mean (RM) with the kernel (1/16) (1-2-1, 2-4-2, 1-2-1). Given the initial condition that the field is unity only at  $x=y=0$  with zero at other pixels, the  $\sigma$  value corresponding to  $N$  can be obtained through Eq. (8) after the  $N$ -time applications of RM to the field. Otherwise, the  $\sigma$  values also can be obtained by the 1-dimensional Gaussian filter using Pascal's triangle, as shown in Appendix C.

RM ( $N$ )	$\sigma$ Value	RM ( $N$ )	$\sigma$ Value	RM ( $N$ )	$\sigma$ Value
1	0.798	10	2.264	60	5.489
2	1.064	12	2.475	80	6.334
3	1.277	14	2.669	100	7.080
4	1.459	16	2.851	150	8.667
5	1.621	18	3.021	200	10.006
6	1.768	20	3.182	250	11.186
7	1.905	30	3.889	300	12.253
8	2.031	40	4.486	350	13.233
9	2.151	50	5.013	400	14.147

クではないが (3 小節「本節のまとめ」参照)。これを超えて掛け続けると場が滑らかになり過ぎてフロントとして検出し難くなり, エッジ点検出率は低下する。この性質は MF と大きく異なる。

Table 7 には前小節と同じ SST データ (2018 年 12 月 3 日, 100°E-165°W, 15°S-15°N) について, 10 種類の  $W$  に対する,  $RMopt$ , 対応する最大エッジ点検出率, 及び最適分散  $\sigma$  を

Table 7. Results of the optimum RM analysis to the same Himawari SST data as Table 4. For each of ten  $W$  values (100-10), the optimum RM application time ( $RMopt$ ) was searched for, that maximizes the edge point detection rate. Also shown are the  $\sigma$  value corresponding to  $RMopt$ , the spatial scale of the Gaussian filter defined by the double of the e-folding scale ( $D=2\sqrt{2}\sigma$ ), and the ratio of  $D$  to  $W$  ( $R=D/W$ ). The mean value of  $R$  averaged over the  $W$  range ( $Rm$ ) and its standard deviation ( $Rstd$ ) are 0.541 and 0.091, respectively.

CASE	W100S10	W75S07	W60S06	W50S05	W40S04
Window ( $W$ )	100 (2°)	75 (1.5°)	60 (1.2°)	50 (1°)	40 (0.8°)
$RMopt$	395	295	200	140	110
Edge Ratio (%)	3.94	4.81	5.09	5.82	6.56
$\sigma$ Value	14.06	12.15	10.01	8.37	7.43
$D=2\sqrt{2}\sigma$	39.76	34.36	28.30	23.68	21.00
$R=D/W$	0.398	0.458	0.472	0.474	0.525

CASE	W30S03	W25S02	W20S02	W15S02	W10S01
Window ( $W$ )	30 (0.6°)	25 (0.5°)	20 (0.4°)	15 (0.3°)	10 (0.2°)
$RMopt$	75	50	34	22	13
Edge Ratio (%)	7.18	8.32	8.50	8.74	9.91
$\sigma$ Value	6.13	5.01	4.14	3.34	2.57
$D=2\sqrt{2}\sigma$	17.35	14.18	11.70	9.43	7.28
$R=D/W$	0.578	0.567	0.585	0.629	0.728

表す。さらに、Gaussian 分布が表す空間スケールの代表値として e-folding scale の 2 倍 ( $D=2\sqrt{2}\sigma$ ) と  $W$  に対する  $D$  の比率 ( $R=D/W$ ) を示す。 $D$  は RM による平滑化が及んでいるスケールとみなせる。このような解析を以下「最適 RM 解析」と称す。Fig. 9 には日付は異なる (2019 年 5 月 13 日) が、 $W=50$  に対する RM 回数 10, 50, 100, 及び 150 の場合のエッジ点分布を示す (この日付では 140 でなく 150 が  $RM_{opt}$ )。確かに回数が増す毎にエッジ点の増加することが見受けられる。

Table 7 では、 $W$  が大きいほど  $RM_{opt}$  は大きく、逆に最大エッジ点検出率は小さくなる。後者は MF の場合と同じである。分散  $\sigma$  は  $RM_{opt}$  に依存するので  $W$  が大きいほど大きく、 $D$  も同様である。問題は  $R=D/W$  であるが、一部例外はあるものの、全般に  $W$  が小さいほど大きくなる。しかし、その値の範囲は比較的狭く、 $W$  のごく小さい場合 ( $W=10$  及び  $15$ ) を除くと  $0.40 \leq R \leq 0.59$  程度の範囲、つまり、

$$R \approx 0.5 \pm 0.1 \quad (9)$$

である。すなわち、 $W$  のごく小さい場合以外ではどの  $W$  に対しても  $D$  はその半分程度であり、 $W$  と  $D$  (従って、最適分散  $\sigma$  も) の間にはラフではあるが比例関係が見受けられる。言い換えれば、与えられた  $W$  に対してその半分程度のスケールまで平滑化すれば最大のエッジ点検出率が

得られるということが言える。ここには示さないが、2019 年 5 月 13 日のデータに対しても (9) 式を含めて同様のことが言える。

$W$  の小さい場合 ( $W=10$  又は  $15$ ) に  $R$  が相対的に大きくなる原因については以下のように考えられる。すなわち、ピクセル 1 個だけのスケールを含むような非常に細かい擾乱の総体は相対的に強く、 $W$  が小さい場合には、 $W$  の半分程度のスケールの平滑化 (少ない移動平均回数) では十分には消去できないためと考えられる。そのためより多くの RM を必要とし、 $\sigma$  と  $D$  が増える結果、 $R$  が相対的に大きくなる。次小節で示すように、MF を併用し、最初に MF を多数回掛けておけば、 $RM_{opt}$  は減少し、 $R$  は 0.4 程度にまで下がる (Table 8)。

### 1-3. MF と GF の併用

種々の  $W$  に対して、MF と GF を併用し、種々の組合せによるエッジ点検出率を調べ、それを最大とするような最適な組合せを求めた。以下、このケースを「併用」と略す。まず MF を 5 回ずつ重ねていったデータ (0 回から 30 回まで) に対して、次に RM を重ねて掛け、前小節と同じ各  $W$  に対するエッジ点検出率が最大になる組合せを求めた (Table 8)。結果として、各  $W$  においてある MF 回数 ( $MF_{min}$ ) を超えて MF を掛けたデータに対して RM を掛け続けても、そのエッジ点検出率の変化傾向は

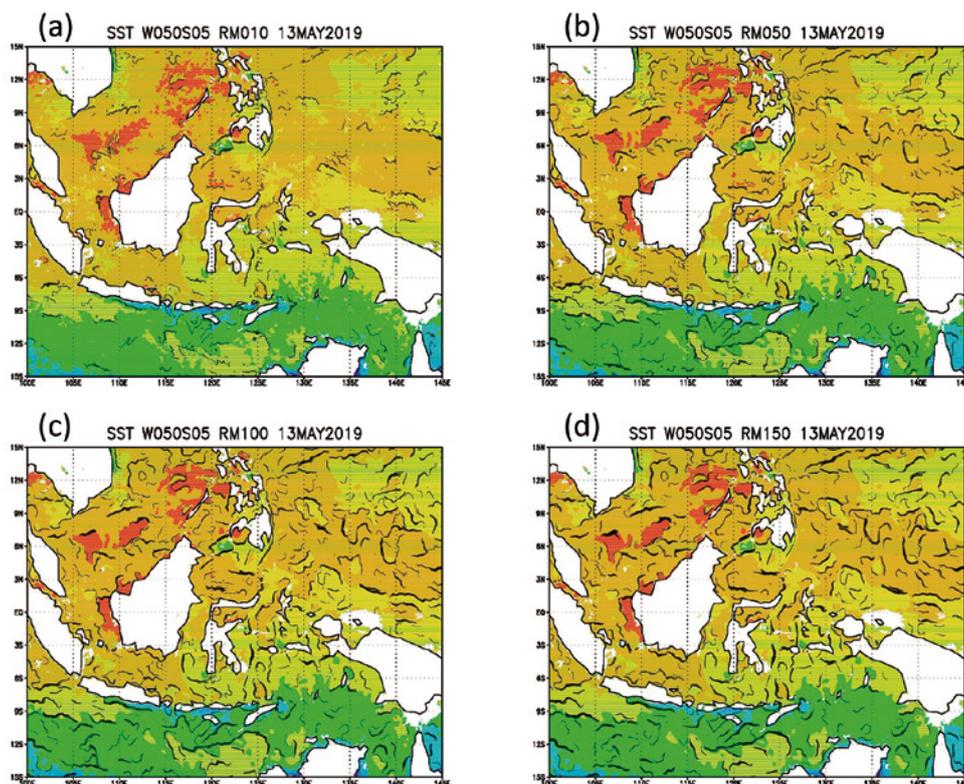


Fig. 9. Distributions of detected edge points for assigned application times of RM, with  $W=50$  and  $MF=0$  (Himawari SST, May 13, 2019, with  $1/50^\circ$  resolution). (a)  $RM=10$ , (b)  $RM=50$ , (c)  $RM=100$ , and (d)  $RM=150$ . As smoothing progresses number of detected points increases. In this case  $RM_{opt}=150$ .

Table 8. Results of the optimum RM analysis with the co-use of MF, to the same Himawari SST data as Table 4. Initially, MF was repeatedly applied with every 5 times to 30 and then RM was applied also repeatedly. For each of ten  $W$  values, the combination of MF ( $MFmin$ ) and RM ( $RMopt$ ) was searched for, that maximizes the edge point detection rate. The MF application time greater than  $MFmin$  results in almost the same distribution of the edge point detection rate against  $RM$  increased, as based on  $MFmin$ .  $Rm = 0.488$  and  $Rstd = 0.046$ . In this case  $Rm$  is nearer to 0.5 than Table 7 and  $Rstd$  is about a half of that case

CASE	W100S10	W75S07	W60S06	W50S05	W40S04
Window ( $W$ )	100 (2°)	75 (1.5°)	60 (1.2°)	50 (1°)	40 (0.8°)
$MFmin$	5	5	5	10	10
$RMopt$	400	330	225	145	95
Edge Ratio (%)	3.95	4.84	5.20	5.84	6.69
$\sigma$ Value	14.15	12.85	10.61	8.52	6.90
$D=2\sqrt{2}\sigma$	40.01	36.34	30.01	24.10	19.52
$R=D/W$	0.400	0.485	0.500	0.482	0.488

CASE	W30S03	W25S02	W20S02	W15S02	W10S01
Window ( $W$ )	30 (0.6°)	25 (0.5°)	20 (0.4°)	15 (0.3°)	10 (0.2°)
$MFmin$	15	15	20	25	25
$RMopt$	65	45	28	14	4
Edge Ratio (%)	7.33	8.52	8.81	9.40	11.58
$\sigma$ Value	5.71	4.76	3.76	2.67	1.46
$D=2\sqrt{2}\sigma$	16.15	13.45	10.63	7.55	4.13
$R=D/W$	0.538	0.538	0.532	0.503	0.413

$MFmin$  データに RM を掛け続けた場合とほぼ同等となることが分かった。この  $MFmin$  を「最適最小 MF 回数」と称する。 $MFmin$  に対して RM を掛け続けた場合の最大エッジ検出率が得られる RM 回数を  $RMopt$  とする。 $MF > MFmin$  に対する最大エッジ検出率の RM 回数は  $RMopt$  にほぼ等しい。

Table 8 によると、大きい  $W$  に対して  $MFmin$  は小さく (5 程度)、小さい  $W$  に対して  $MFmin$  は大きい (25 程度)。MF 回数 25 は、Table 4 によれば MF による変更点数パーセンテージが 1% 以下になり、場が MF に対してほぼ収束したとみなせる回数である。対応する  $RMopt$  は当然ながら、 $W$  が大きいほど大きいが、GF 単独である Table 7 ( $MF = 0$ ) と比較すると、 $W \geq 50$  に対しては併用の場合が大きく、 $W \leq 40$  では併用の場合が小さい。特に、 $W \leq 20$  に対しては差ではなく比率としてみた場合に大きな違いがある ( $W = 10$  で、GF 単独での 13 に対して併用では 4)。この時に  $MFmin$  は大きい。このことは、 $W$  が小さい場合には MF による平滑化に RM の代替効果があることを示唆する。一方、 $W$  が大きい時には MF の効果は限定的と考えられる。

一方、Table 8 によると、すべての  $W$  に対して  $MFmin \geq 5$  であり、GF 単独の場合 (Table 7) に比べてすべての  $W$  に対して最大エッジ点検出率は大きくなる。両者の差は、大きな  $W$  ( $\geq 50$ ) に対しては比較的小さいが、 $W \leq 40$  で

は  $W = 40$  の時の 0.14% から、 $W = 10$  の 1.67% へと  $W$  の減少に伴い単調増加している。このことから、比較的小さい  $W$  に対しては GF 単独に対して MF を併用することにより最大エッジ点検出率を上げられることが示された。すなわち、最初に MF によって微小擾乱を十分除去することが検出率を上げるのに貢献していると思われる。

$R=D/W$  については、GF 単独の場合のように  $W$  の減少に伴って  $R$  が増大するという傾向 (Table 7) はみられず、小さな  $W$  に対しても 0.5 に近い値となっている。 $W \leq 25$  では  $W$  の減少に伴って、 $R$  もむしろ減少している。小さな  $W$  では MF の効果によって  $RMopt$  が減った結果、 $\sigma$  と  $D$  が減少し、 $R$  も減少した。GF 単独の場合 (Table 7) の 10 個の  $R$  値についての平均 ( $Rm$ ) と標準偏差 ( $Rstd$ ) はそれぞれ 0.541 と 0.091 であるのに対して併用の場合 (Table 8) には 0.488 ( $\approx 0.5$ ) と 0.046 となり、後者でより強く平均値付近に収束している。Fig. 10 にはこの解析結果をもとに 4 つの  $W$  に対する検出エッジ点分布を示す。 $W$  サイズによる scale-selective な性質が明らかである。ここには示さないが、2019 年 5 月 13 日に対しても同様のことが言え、併用の場合は  $Rm = 0.486$  と  $Rstd = 0.055$  であり、 $Rm$  は時間的にはあまり変化しないことが示唆される。

一方、Table 9 には、領域を変えて、中緯度域 15°-45°N 100°E-165°W での 2018 年 12 月 1 日の SST に対する MF 併用最適 RM 解析結果を示す。低緯度域 (Table 8) に比べて、

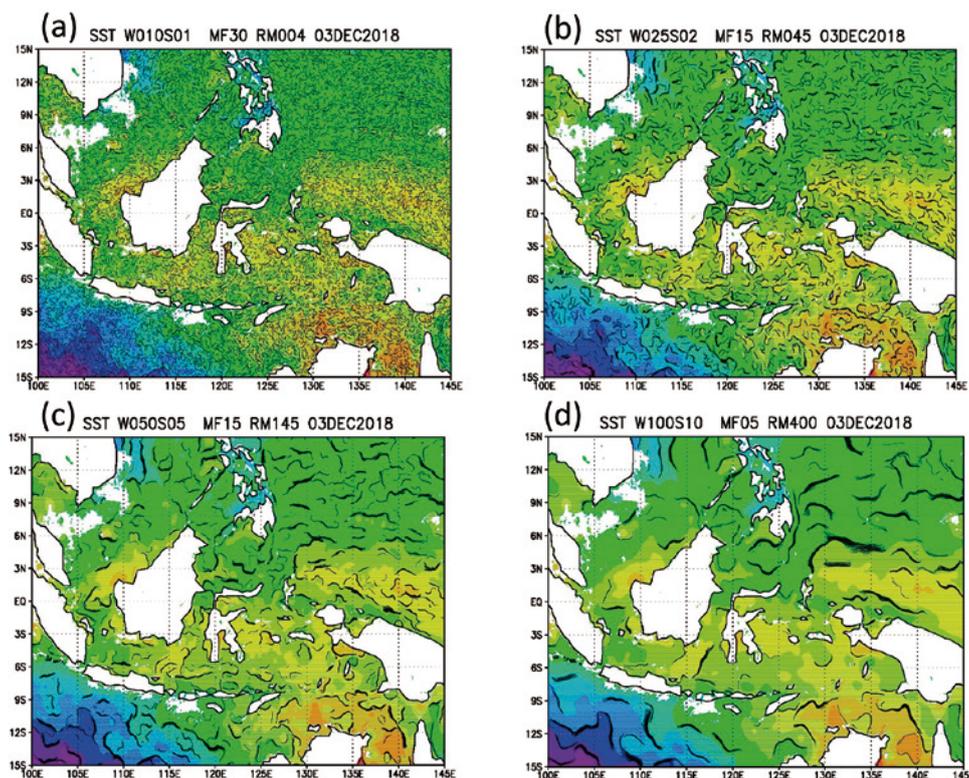


Fig. 10. Distributions of detected edge points by the optimum RM analysis with the co-use of MF (Himawari SST, December 3, 2018, with  $1/50^\circ$  resolution). (a)  $W=10$  ( $0.2^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (30, 4)$ , (b)  $W=25$  ( $0.5^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (15, 45)$ , (c)  $W=50$  ( $1^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (15, 145)$ , and (d)  $W=100$  ( $2^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (5, 400)$ . In some cases  $MF$  value is different from  $MF_{min}$  in Table 8, but the result is almost the same.

Table 9. Same as Table 8 but for the Himawari SST data in the middle latitude region (December 1, 2018,  $1/50^\circ$  resolution,  $100^\circ\text{E}-165^\circ\text{W}$ , and  $15^\circ-45^\circ\text{N}$ ). The detected edge ratio is generally greater than that in the low latitude region (Table 8).  $Rm = 0.389$  ( $\approx 0.4$ ) and  $Rstd = 0.049$ .  $Rm$  is about 0.1 less than that in the low latitudes (Table 8).

CASE	W100S10	W75S07	W60S06	W50S05	W40S04
Window ( $W$ )	100 ( $2^\circ$ )	75 ( $1.5^\circ$ )	60 ( $1.2^\circ$ )	50 ( $1^\circ$ )	40 ( $0.8^\circ$ )
$MF_{min}$	0	0	0	0	0
$RM_{opt}$	190	170	130	95	65
Edge Ratio (%)	6.19	7.27	7.56	8.02	8.46
$\sigma$ Value	9.75	9.23	8.07	6.90	5.71
$D=2\sqrt{2}\sigma$	27.58	26.09	22.82	19.52	16.15
$R=D/W$	0.276	0.348	0.380	0.390	0.404

CASE	W30S03	W25S02	W20S02	W15S02	W10S01
Window ( $W$ )	30 ( $0.6^\circ$ )	25 ( $0.5^\circ$ )	20 ( $0.4^\circ$ )	15 ( $0.3^\circ$ )	10 ( $0.2^\circ$ )
$MF_{min}$	0	30	30	30	30
$RM_{opt}$	45	30	19	9	3
Edge Ratio (%)	8.86	9.99	9.85	10.26	12.23
$\sigma$ Value	4.76	3.89	3.10	2.15	1.28
$D=2\sqrt{2}\sigma$	13.45	11.00	8.77	6.08	3.61
$R=D/W$	0.448	0.440	0.439	0.406	0.361

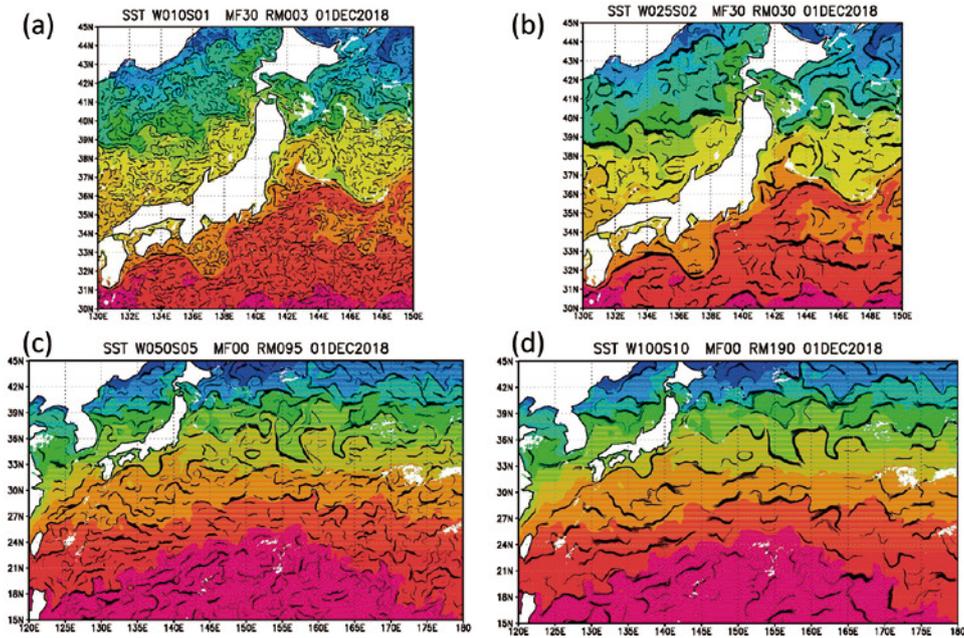


Fig. 11. Same as Fig. 10, but for middle latitude regions (December 1, 2018). (a)  $W=10$  ( $0.2^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (30, 3)$ , (b)  $W=25$  ( $0.5^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (30, 30)$ , (c)  $W=50$  ( $1^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (0, 95)$ , and (d)  $W=100$  ( $2^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (0, 190)$ . For large  $W$  values some front lines become thick.

まず、エッジ点の割合が高く、特に大きな  $W$  ( $\geq 50$ ) に対してはその差は2%以上となるが、これは大規模場の南北温度傾度が高いことを反映してフロント領域が増加した結果と思われる。また、 $RM_{opt}$  が全般に半分ないし2/3程度に減少しており、それに伴って  $\sigma$  と  $D$  も減少し、その結果、比率  $R$  も全般に0.1程度減少している。 $W$  の全10ケースに対して  $R_m = 0.389$  ( $\approx 0.4$ )、 $R_{std} = 0.049$  であり、 $R_{std}$  はほぼ等しいが、 $R_m$  の差はちょうど-0.1程度となる。このように  $R_m$  は領域的、特に緯度的には異なることが示唆される。Fig. 11にはFig. 10と同じ4種類の  $W$  に対するエッジ点分布を示す。 $W$  が大きいと  $RM_{opt}$  が増える結果平滑化が進み、エッジ点の集合としてのフロントが太ってることが見受けられる。

## 2. ひまわり SST 以外のデータについて

上述のひまわり SST 以外のデータ、すなわち、ひまわり CHL としきさい SST 及び CHL についての最適 RM 解析結果について述べる。いずれの場合も MF と GF を併用する。

### 2-1. ひまわり CHL 場

ひまわり広域 CHL データ (常用対数値) について、付録 B の (A16) 式で定義された縞模様除去後の CHL ( $C_c$ ) (分解能  $1/20^\circ$ , 2019年5月13日) に対して  $100^\circ\text{E}-165^\circ\text{W}$ ,  $15^\circ\text{S}-15^\circ\text{N}$  の範囲 (低緯度域) で解析した。CHL は SST に比べて空間変動性が大きいため、 $C_c$  を求めるまでの段階で無条件に MF を10回掛けている。その後、RM を重ね、4種類の  $W30$  ( $1.5^\circ$ )~ $W10$  ( $0.5^\circ$ ) に対して最適 RM 解析を行っ

Table 10. Results of the optimum RM analysis with the co-use of MF, to the Himawari CHL low-latitude coarse data (May 13, 2019,  $1/20^\circ$  resolution,  $100^\circ\text{E}-165^\circ\text{W}$ , and  $15^\circ\text{S}-15^\circ\text{N}$ ). The common logarithm of the CHL value (in  $\text{mg m}^{-3}$ ) is used and the data are those with the stripes removed. In this case MF was applied ten times unconditionally. The  $R_m$  averaged over four  $W$  values ( $30$  ( $1.5^\circ$ )- $10$  ( $0.5^\circ$ )) is  $0.473$  and  $R_{std} = 0.021$ .

CASE	W30S03	W20S02	W15S02	W10S01	Mean
Window ( $W$ )	30 ( $1.5^\circ$ )	20 ( $1^\circ$ )	15 ( $0.75^\circ$ )	10 ( $0.5^\circ$ )	
$RM_{opt}$	55	24	11	5	
Edge Ratio (%)	7.44	9.23	9.92	8.27	
$\sigma$ Value	5.26	3.48	2.37	1.62	
$D=2\sqrt{2}\sigma$	14.86	9.85	6.71	4.58	
$R=D/W$	0.495	0.492	0.447	0.458	0.473

た (Table 10)。各  $W$  に対する  $RM_{opt}$  は SST の場合 (Table 8) の同じ  $W$  に対するものと同程度である (もちろん分解能の違いにより実スケールは異なる)。最大エッジ点検出率も全般に  $W$  の減少とともに増加する ( $W=15$  に比べて  $W=10$  で減っているのは、後者で  $S=2$  であり  $W$  に対して  $S$  が相対的に大きいため各ピクセルのスキャン回数が減ったことによる)。 $R$  値に関しては、4 個の  $R$  値の平均が 0.473 であり、やはり 0.5 に近い。従って、低緯度域 CHL についても低緯度域 SST と同様に、与えられた  $W$  に対してその半分程度のスケールまで平滑化すれば最大のエッジ点検出率が得られる。Fig. 12 には、SST に対する Fig. 9 に対応して、CHL の  $W_{30}$  ( $1.5^\circ$ ) の場合の各  $RM$  値に対するエッジ点分布を示す。点数最大値に対応する  $RM_{55}$  に向けて分布点の増大する様子が見受けられる。また、Fig. 13 には各  $W$  に対応した  $RM_{opt}$  に対するエッジ点分布を示す (Table 10 とは一部一致しないが近傍値)。やはり大きい  $W$  に対してはフロント線が太ってくる。

一方、ひまわり CHL の日本近傍高解像度データ (分解能  $1/50^\circ$ ) に対しても同様の解析を行った (Table 11)。このデータにも縞模様が見られるが、その縞除去に際しては時間平均値を用いず、日平均値だけで行った。すなわち、しきさいの SST の縞除去と同じ方法である (付録 A)。5 種類の  $W$  ( $100$  ( $2^\circ$ )- $10$  ( $0.2^\circ$ )) に対して MF と RM を併用した。5 個の  $R$  に対して、 $R_m = 0.440$ ,  $R_{std} = 0.071$  であり、 $R_m$

は広域データ低緯度部分 (Table 10) より若干低いが、同程度と思われる。Fig. 14 には 4 種類の  $W$  に対する  $RM_{opt}$  による日本近傍のエッジ分布を示す (Table 11 とは一部一致しないが近傍値)。 $W$  に対応した scale-selective なエッジ点分布が明らかである。

## 2-2. しきさい SST 場と CHL 場

しきさい SST 及び CHL の分解能はともに  $1/400^\circ$  であり、今回の解析領域はバリ島周辺  $10.5^\circ$ - $6.5^\circ$ S,  $113^\circ$ - $117^\circ$ E の狭い領域に限られる。2018 年 9 月 25 日の SST 及び同年 7 月 16 日の CHL (常用対数値) について 7 種類の  $W$  ( $120$  ( $0.3^\circ$ )- $10$  ( $0.025^\circ$ )) に対する解析結果を Table 12 と Table 13 に示す。SST データは付録 A の (A6) 式によって縞模様を除去した補正值 ( $T_e$ ) を用いた。 $W$  と  $S$  の相対的な関係から一部例外はあるものの、やはり  $W$  が小さくなるほど、エッジ点の割合は増加する。 $R$  に関しては、SST について  $R_m = 0.365$  と  $R_{std} = 0.061$ , CHL については  $R_m = 0.326$  と  $R_{std} = 0.085$  であり、両者ともひまわりの低緯度 SST ( $R_m = 0.488$ ) と低緯度 CHL ( $R_m = 0.473$ ) に対して 0.1 以上下回る。これは、しきさいとひまわりでは分解能に大きな違いがあり、ノイズ以外の物理的に意味のある擾乱 (いずれも平滑化されるべきものではあるが) の性質に大きな差がある可能性が考えられる。Fig. 15 には SST について 6 種類の  $W$  に対してそれぞれの  $MF_{min}$  及び  $RM_{opt}$  を用いたエッジ

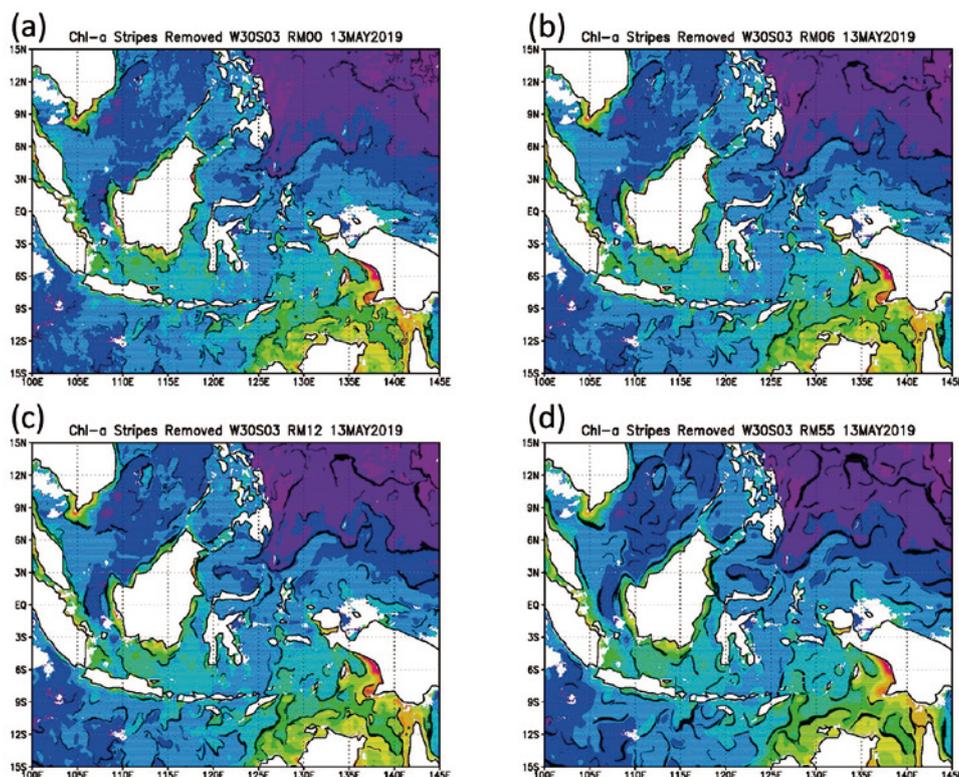


Fig. 12. Distributions of detected edge points for assigned application times of RM, with  $W=30$  ( $1.5^\circ$ ) and  $MF=10$  for the Himawari CHL coarse data (May 13, 2019, with  $1/20^\circ$  resolution). Unit is  $\text{mg m}^{-3}$  and the common logarithm is used. (a)  $RM=0$ , (b)  $RM=6$ , (c)  $RM=12$ , and (d)  $RM=55$ .

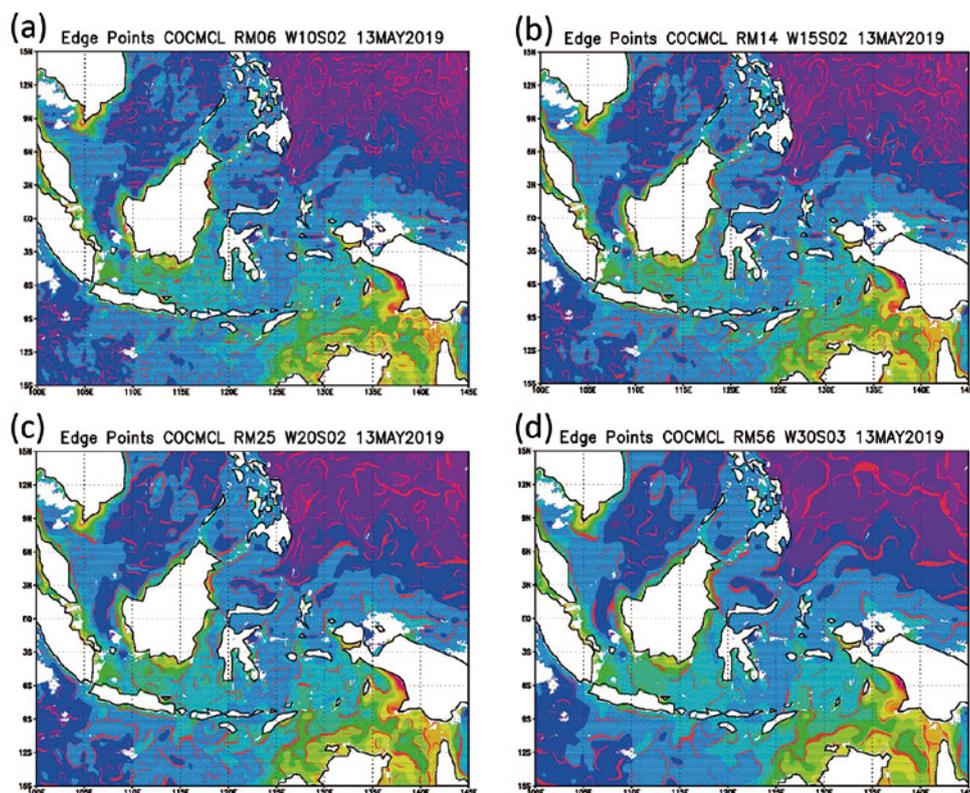


Fig. 13. Distributions of detected edge points by the optimum RM analysis with the co-use of MF for the Himawari CHL coarse data (May 13, 2019, with  $1/20^\circ$  resolution). MF was commonly applied ten times. Unit is  $\text{mg m}^{-3}$  and the common logarithm is used. (a)  $W=10$  ( $0.5^\circ$ ) and  $RM=6$ , (b)  $W=15$  ( $0.75^\circ$ ) and  $RM=14$ , (c)  $W=20$  ( $1^\circ$ ) and  $RM=25$ , and (d)  $W=30$  ( $1.5^\circ$ ) and  $RM=56$ . The  $RM$  values are different from those in Table 10, but the results are almost the same.

Table 11. Results of the optimum RM analysis with the co-use of MF, to the Himawari CHL ( $\text{mg m}^{-3}$ ) middle-latitude fine data around Japan (May 12, 2019,  $1/50^\circ$  resolution,  $100^\circ\text{E}-180^\circ$ , and  $15^\circ-45^\circ\text{N}$ ). The common logarithm of the CHL value is used and the data are those with the stripes removed. The  $R_m$  averaged over five  $W$  values ( $100$  ( $2^\circ$ )- $10$  ( $0.2^\circ$ )) is  $0.440$  and  $R_{std} = 0.071$ .

CASE	W100S10	W50S05	W30S03	W20S02	W10S02
Window ( $W$ )	100 ( $2^\circ$ )	50 ( $1^\circ$ )	30 ( $0.6^\circ$ )	20 ( $0.4^\circ$ )	10 ( $0.2^\circ$ )
$MF_{min}$	20	5	30	30	25
$RM_{opt}$	300	160	55	24	3
Edge Ratio (%)	3.60	6.66	8.26	9.89	8.80
$\sigma$ Value	12.25	8.95	5.26	3.48	1.28
$D=2\sqrt{2}\sigma$	34.65	25.31	14.86	9.85	3.61
$R=D/W$	0.347	0.506	0.495	0.492	0.361

点分布を、また、Fig. 16にはCHLについての同様の図を示す(一部対応表とは異なるが近傍値)。ひまわりの場合と同様に、得られるフロントの状態は $W$ について scale-selective である状況が明らかである。

### 3. 本節のまとめ

上述のように、ひまわりデータに比べてしきさいデータの  $R_m$  値が0.1余り小さいものの、定性的にはまったく同様に(MF併用)最適RM解析を行えることが示された。

すなわち、ひまわりかしきさいかを問わず、SSTについてもCHLについても、与えられた $W$ に対して適切に $R$ を想定して $\sigma$ を決めれば、 $RM_{opt}$ が決まり、さらに $MF_{min}$ を適当に設定することにより、SIEDに対する pre-processing としての最適平滑化とみなすことができる(あるいは、 $\sigma$ が決まった段階でRM使用の代わりに直接(8)式GFを用いてもよい)。なお、Table 14にはここまで得られた各種データの  $R_m$  値と  $R_{std}$  値の一覧を示す。ここで扱った各種データを見渡し、MF併用の場合には、 $0.3 <$

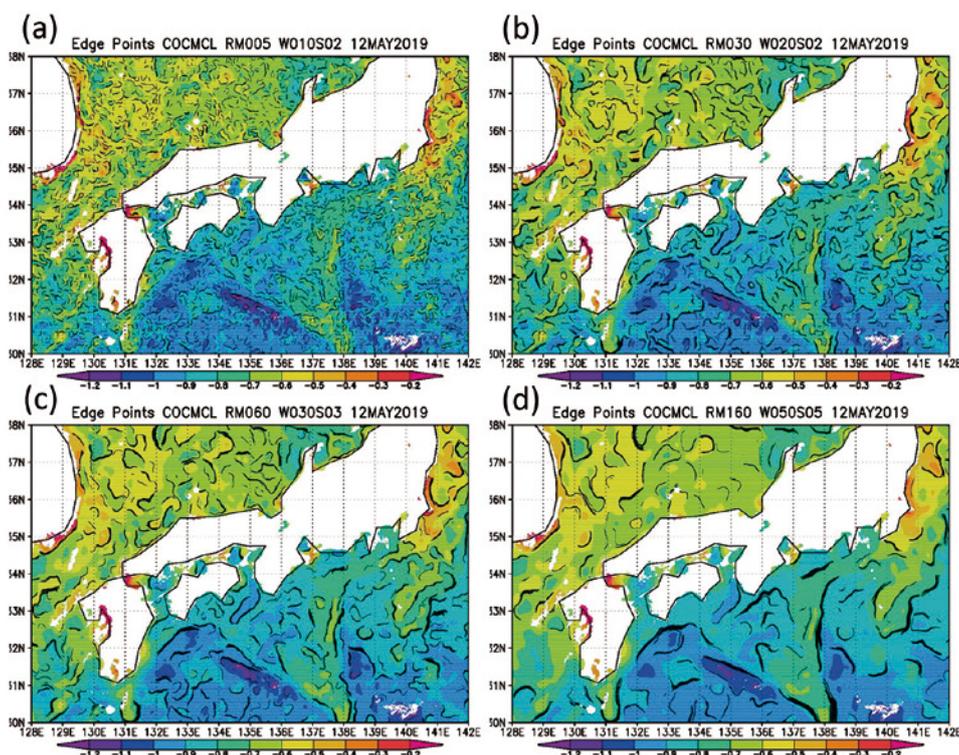


Fig. 14. Same as Fig. 13, but for the Himawari CHL fine data around Japan (May 12, 2019 with  $1/50^\circ$  resolution). Unit is  $\text{mg m}^{-3}$  and the common logarithm is used. (a)  $W=10$  ( $0.2^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (25, 5)$ , (b)  $W=20$  ( $0.4^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (30, 30)$ , (c)  $W=30$  ( $0.6^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (30, 60)$ , and (d)  $W=50$  ( $1^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (5, 160)$ . The  $MF$  and  $RM$  values are different from those in Table 11 in some cases, but the results are almost the same.

Table 12. Results of the optimum  $RM$  analysis with the co-use of  $MF$ , to the Shikisai SST data around Bali Island (September 25, 2018,  $1/400^\circ$  resolution,  $113^\circ\text{--}117^\circ\text{E}$ , and  $10.5^\circ\text{--}6.5^\circ\text{S}$ ). The data are those with the stripes removed ( $T_c$  in Eq. (A6) in Appendix A). The  $Rm$  averaged over seven  $W$  values ( $120$  ( $0.3^\circ$ )– $10$  ( $0.025^\circ$ )) is  $0.365$  and  $Rstd=0.061$ .

CASE	W120S12	W80S08	W60S06	W40S04	W30S03	W20S02	W10S02
Window ( $W$ )	120 ( $0.3^\circ$ )	80 ( $0.2^\circ$ )	60 ( $0.15^\circ$ )	40 ( $0.1^\circ$ )	30 ( $0.075^\circ$ )	20 ( $0.05^\circ$ )	10 ( $0.025^\circ$ )
$MF_{min}$	15	20	10	10	25	25	25
$RM_{opt}$	290	210	90	70	40	20	2
Edge Ratio (%)	3.44	5.79	6.89	8.60	9.78	10.55	9.33
$\sigma$ Value	12.05	10.25	6.72	5.93	4.49	3.18	1.06
$D=2\sqrt{2}\sigma$	34.07	29.00	19.00	16.76	12.69	9.00	3.01
$R=D/W$	0.284	0.362	0.317	0.419	0.423	0.450	0.301

Table 13. Same as Table 12, but for the Shikisai CHL data ( $\text{mg m}^{-3}$ ) around Bali Island (July 16, 2018,  $1/400^\circ$  resolution,  $113^\circ\text{--}117^\circ\text{E}$ , and  $10.5^\circ\text{--}6.5^\circ\text{S}$ ). The common logarithm of the CHL value is used.  $Rm=0.326$  and  $Rstd=0.085$  over seven  $W$  values ( $120$  ( $0.3^\circ$ )– $10$  ( $0.025^\circ$ )).

CASE	W120S12	W80S08	W60S06	W40S04	W30S03	W20S02	W10S02
Window ( $W$ )	120 ( $0.3^\circ$ )	80 ( $0.2^\circ$ )	60 ( $0.15^\circ$ )	40 ( $0.1^\circ$ )	30 ( $0.075^\circ$ )	20 ( $0.05^\circ$ )	10 ( $0.025^\circ$ )
$MF_{min}$	0	0	5	25	25	30	30
$RM_{opt}$	290	260	220	34	22	7	1
Edge Ratio (%)	4.61	6.71	7.10	7.93	8.98	10.55	10.31
$\sigma$ Value	12.05	11.41	10.49	4.14	3.34	1.91	0.80
$D=2\sqrt{2}\sigma$	34.07	32.26	29.68	11.70	9.43	5.39	2.26
$R=D/W$	0.284	0.403	0.495	0.293	0.314	0.269	0.226

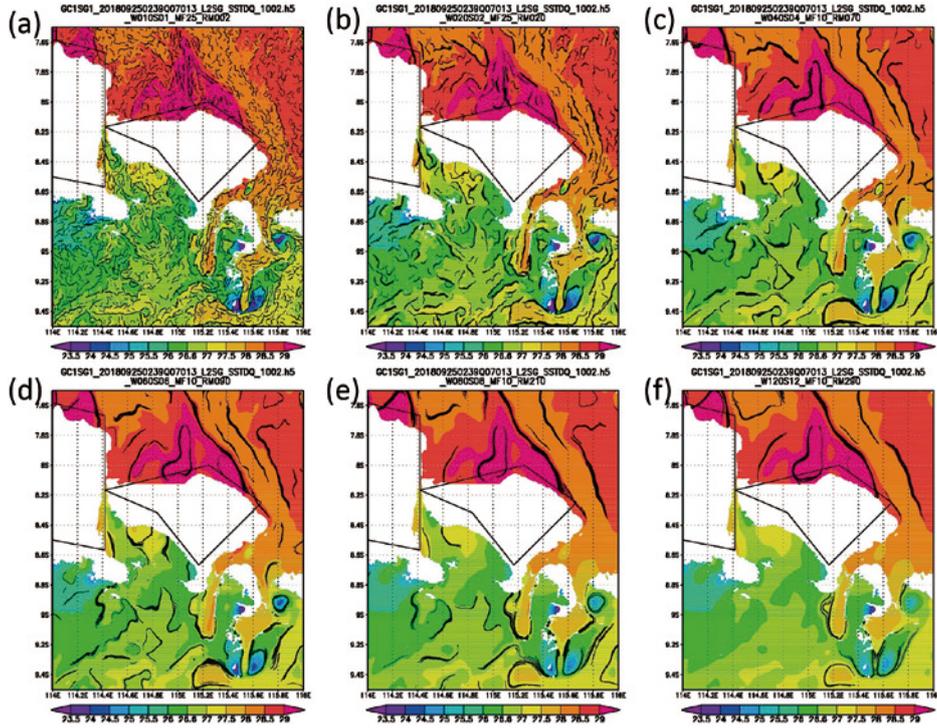


Fig. 15. Distributions of detected edge points by the optimum RM analysis with the co-use of MF for the Shikisai SST data around Bali Island (September 25, 2018,  $1/400^\circ$  resolution, and  $9.5^\circ\text{--}7.5^\circ\text{S}$ ,  $114^\circ\text{--}116^\circ\text{E}$ ). (a)  $W=10$  ( $0.025^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (25, 2)$ , (b)  $W=20$  ( $0.05^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (25, 20)$ , (c)  $W=40$  ( $0.1^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (10, 70)$ , (d)  $W=60$  ( $0.15^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (10, 90)$ , (e)  $W=80$  ( $0.2^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (10, 210)$ , and (f)  $W=120$  ( $0.3^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (10, 290)$ . The  $MF$  and  $RM$  values are different from those in Table 12 in some cases, but the results are almost the same.

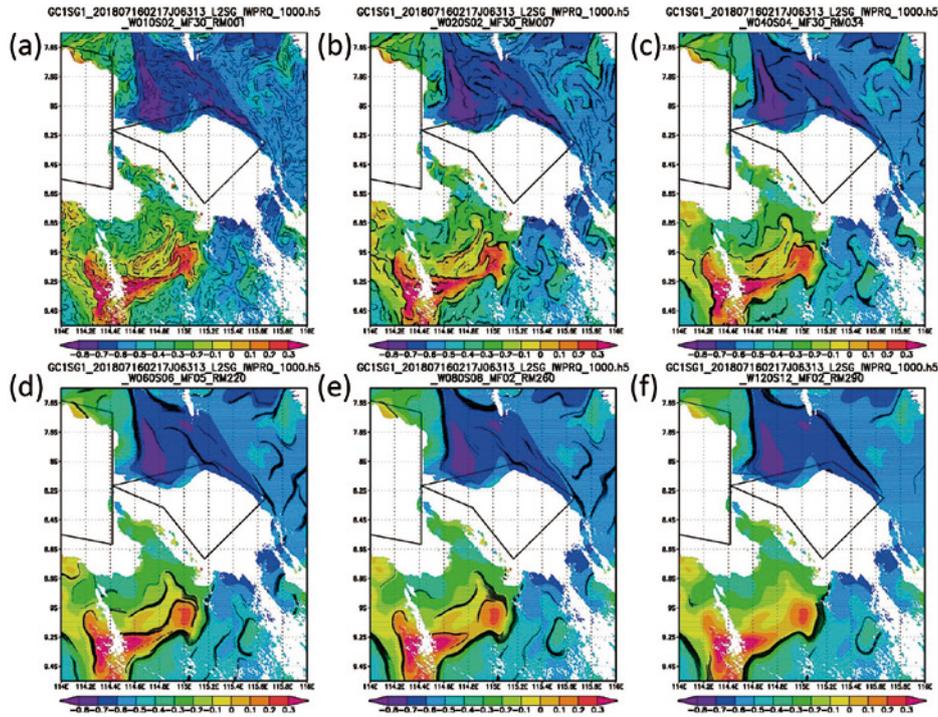


Fig. 16. Same as Fig. 15, but for the Shikisai CHL data (July 16, 2018). Unit is  $\text{mg m}^{-3}$  and the common logarithm is used. (a)  $W=10$  ( $0.025^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (30, 1)$ , (b)  $W=20$  ( $0.05^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (30, 7)$ , (c)  $W=40$  ( $0.1^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (30, 34)$ , (d)  $W=60$  ( $0.15^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (5, 220)$ , (e)  $W=80$  ( $0.2^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (2, 260)$ , and (f)  $W=120$  ( $0.3^\circ$ ) and  $(MF, RM) = (2, 290)$ . The  $MF$  and  $RM$  values are different from those in Table 13 in some cases, but the results are almost the same.

Table 14. List of  $Rm$  and  $Rstd$  so far obtained for the SST and CHL data by Himawari and Shikisai.

Date	Region	RM or Co-Use	Range of $W$	$Rm$	$Rstd$
Himawari SST Resolution 1/50°					
Dec 3, 2018	(100°E-165°W, 15°S-15°N)	RM	10	0.541	0.091
Dec 3, 2018	(100°E-165°W, 15°S-15°N)	Co-Use	10	0.488	0.046
May 13, 2019	(100°E-165°W, 15°S-15°N)	Co-Use	10	0.486	0.055
Dec 1, 2018	(100°E-165°W, 15°-45°N)	Co-Use	10	0.389	0.049
Himawari CHL Resolution 1/20°					
May 13, 2019	(100°E-165°W, 15°S-15°N)	Co-Use	4	0.473	0.021
Himawari CHL Resolution 1/50°					
May 12, 2019	(100°E-165°W, 15°-45°N)	Co-Use	5	0.440	0.071
Shikisai SST Resolution 1/400°					
Sep 25, 2018	(113°-117°E, 10.5°-6.5°S)	Co-Use	7	0.365	0.061
Shikisai CHL Resolution 1/400°					
Jul 16, 2018	(113°-117°E, 10.5°-6.5°S)	Co-Use	7	0.326	0.085

$Rm < 0.5$  程度である。

なお、これまで扱ったすべてのデータで、 $RM_{opt}$  が 100 を超えるような大きな  $W$  において、 $RM_{opt}$  近傍での RM 回数に対する検出率の分布変化は緩やかであり、緩い極大値を複数回繰り返すような場合もある。これまでの解析ではそれらの内の最大のものを  $RM_{opt}$  として選んだが、解析例数も限られており、かなりの許容範囲をもって扱ってよいものと考えられる。

### ひまわり-しきさい, SST-CHL 比較

ひまわりとしきさいは分解能が大きく異なり (1/50° と 1/400°), また、静止衛星と極軌道衛星という相違から、プロダクトとしてのデータの編集方法も異なっており、両者のデータの比較は興味ある所である。一般的な両データの比較は本論考の対象外であり、また、最適 RM 解析とも離れるが、本節では SST についてのエッジ点解析も

含めた比較事例を示す。また、ひまわりによる SST と CHL データからの検出エッジ点の比較例も示す。

#### 1. ひまわり-しきさい SST データの比較

同時同一海域での両衛星による SST データ自体、及びそれに対するエッジ点解析結果を比較するために、Fig. 17 と Fig. 18 に 2018 年 8 月 1 日、3 日の東北沖東海上での SST 及び検出エッジ点の分布を示す。ひまわりデータ (a) (分解能 1/50°) に対しては  $W=30$  (0.6°), しきさいデータ (b) (分解能 1/400°) に対しては  $W=60$  (0.15°) で、window の実スケールとしては、後者は前者の 1/4 である。これらのデータは最適 RM 解析を行ったものではなく、preprocessing としては MF を 5 回、RM を 6 回掛けたものであるが、両衛星データの本来の特質をよく表すのでここに示す。

Fig. 17, Fig. 18 の両衛星とも、黒潮の暖水が 37°N, 144°E 付近まで北上した後に南下しており、さらに東北沖合に沿って 39°N 付近までストリーマ状に回り込んでいる

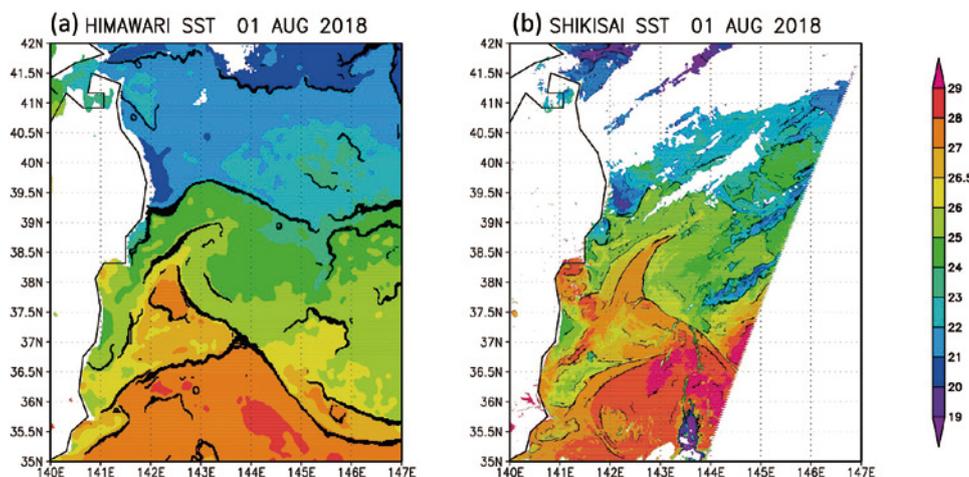


Fig. 17. (a) Himawari SST (1/50° resolution) and (b) Shikisai SST (1/400° resolution) data on the same day (August 1, 2018) with the detected edge points superposed.  $W=30$  (0.6°) for (a) and  $W=60$  (0.15°) for (b). MF was applied 5 times and RM 6 times as the initial smoothing for both cases.

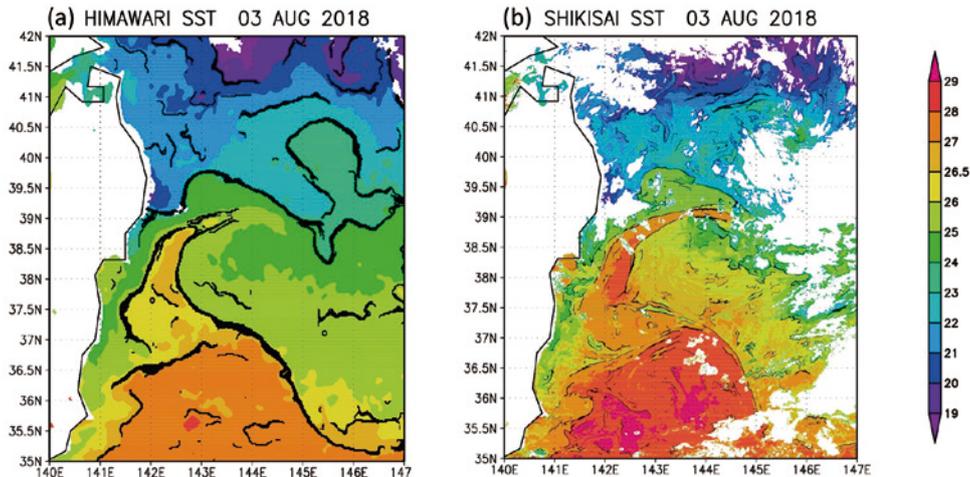


Fig. 18. Same as Fig. 17, but for August 3, 2018.

様子が捉えられている。また、両図を比較することによりストリーマの2日間の時間的発達具合も分かる。このストリーマに囲まれた領域が渦を形成しており、カツオ漁場になっていることが漁獲データから分かっている。このように、黒潮やストリーマ、メソスケール渦に伴って形成されたフロントが両衛星図について抽出されている。両者の比較で最も顕著な差は、抽出されたフロントの幅である。ひまわりデータから抽出されたフロントは黒潮、ストリーマとメソスケール渦の縁辺部の一部を捉えているが、いずれについてもある程度の幅を持った線分で示されているのに対して、しきさいデータから抽出されたフロントは、同じ現象が細かい線分で示されており、一部では二重線になる等の詳細な構造も表現されている。このような相違は window サイズの相違からだけではなく、分解能そのものに起因するものと思われる。

Fig. 19には、Fig. 18でのストリーマを形成する2つのメインフロントをまたぐ38°Nに沿ったSSTの経度分布図を両衛星について示す。図中の両矢印で示した幅は視覚的にフロントと認定される領域を模式的に、また、塗りつぶした●は検出されたエッジ点に隣接するSSTピクセル(実質的にエッジ)を示す。しきさいのフロント部分では非常に狭い領域(6-8 km程度)で大きな水温差が観測できているのに対して、ひまわりのフロント部分(15-20 km程度)ではSSTがなだらかな勾配を示しており、その差がそのままフロント幅に反映されている。検出された(実質的)エッジは、示されたフロント幅ほど太くはないが、ほぼその中心部を占め、ひまわりで半分から2/3程度、しきさいで1/3程度である。特にしきさいでは水平傾度の最も高い部分にほぼ対応している。また、しきさいではメインフロント以外にもいくつかのエッジが検出されている。ここでは最適RM解析を適用していないが、適用すれば検出される(実質的)エッジの幅をより太くすることは可能と考えられる。いずれにしても、2つの衛星観測に見られるSST分布の違いがエッジ抽出結果にも適切に反映で

きていることが、Fig. 19により確認される。

しきさいは極軌道のため、ひまわりのような高頻度観測は期待できず、雲などの影響により必ずしも必要な観測データをいつでも得られるわけではないが、上記に示した事例のように、漁場となるターゲットエリアをある程度広範囲に観測できた場合には、そのデータを導入してフロント抽出解析を行いマッピングすることで、漁海況の把握に対して有効である。

## 2. ひまわり SST-CHL データの比較

低緯度では中高緯度に比べてSSTの差が小さくないと思われるが、そのような低緯度でSSTフロントとCHLフロントがどの程度一致或いは相違しているかを見てみる。Fig. 20には2019年5月13日のSST(分解能1/50°)について

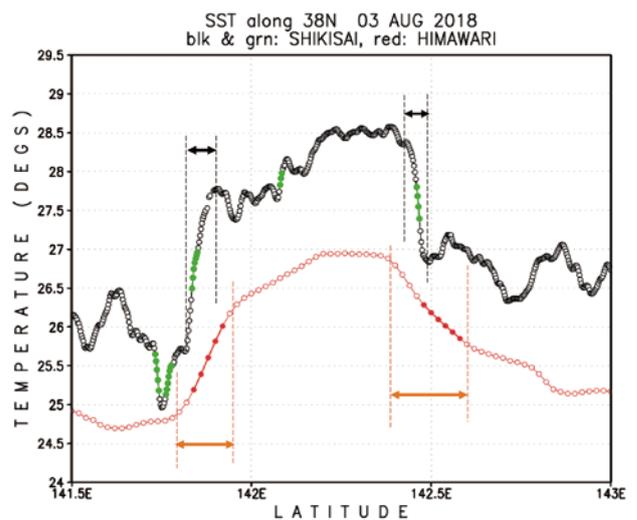


Fig. 19. Zonal SST distribution along the 38°N line in Fig. 18 with Himawari (red) and Shikisai (black and green). Two-directional arrows schematically show widths of two main fronts. Closed circles indicate SST pixels in contact with the detected edge points (substantial edge).

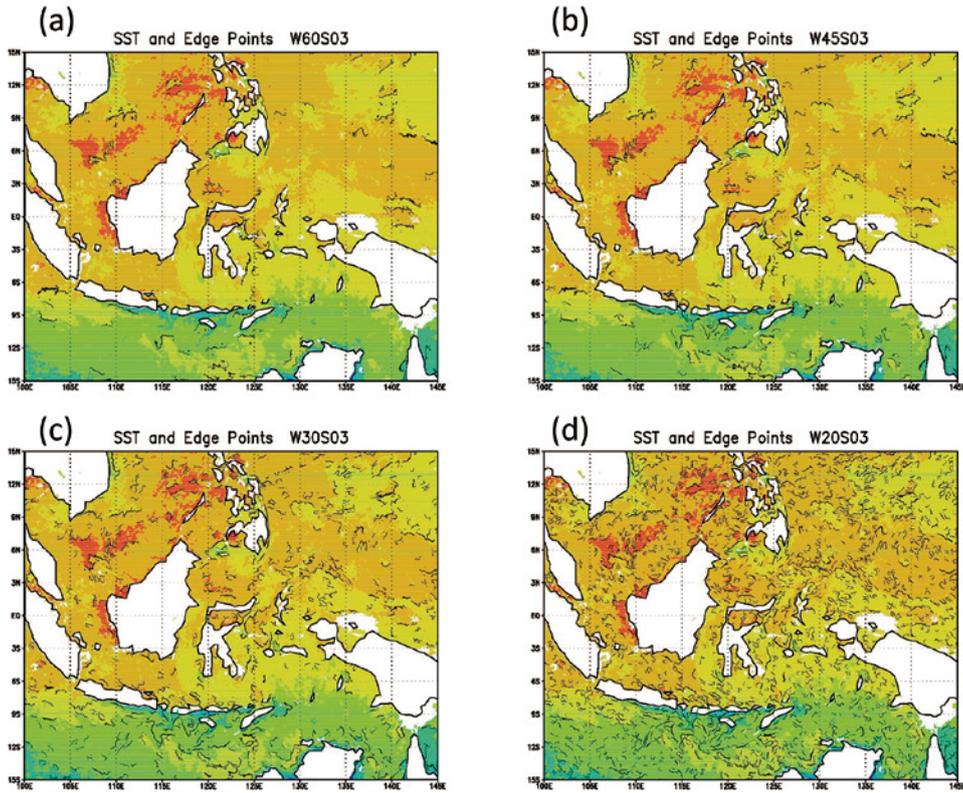


Fig. 20. Himawari SST and detected edge points around the Indonesian Seas (May 13 2019,  $1/50^\circ$  resolution). RM was applied 6 times as the initial smoothing. (a)  $W=60$  ( $1.2^\circ$ ), (b)  $W=45$  ( $0.9^\circ$ ), (c)  $W=30$  ( $0.6^\circ$ ), and (d)  $W=20$  ( $0.4^\circ$ ).

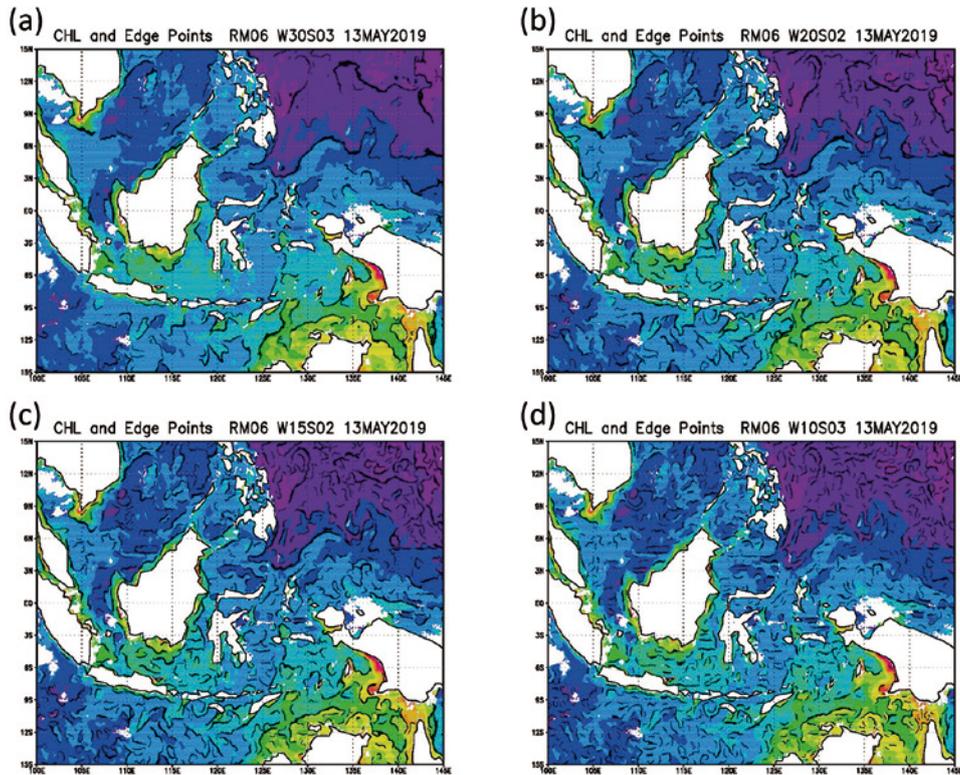


Fig. 21. Same as Fig. 20, but for the Himawari CHL coarse data (May 13, 2019,  $1/20^\circ$  resolution). MF was applied 10 times and RM 6 times as the initial smoothing. (a)  $W=30$  ( $1.5^\circ$ ), (b)  $W=20$  ( $1^\circ$ ), (c)  $W=15$  ( $0.75^\circ$ ), and (d)  $W=10$  ( $0.5^\circ$ ).

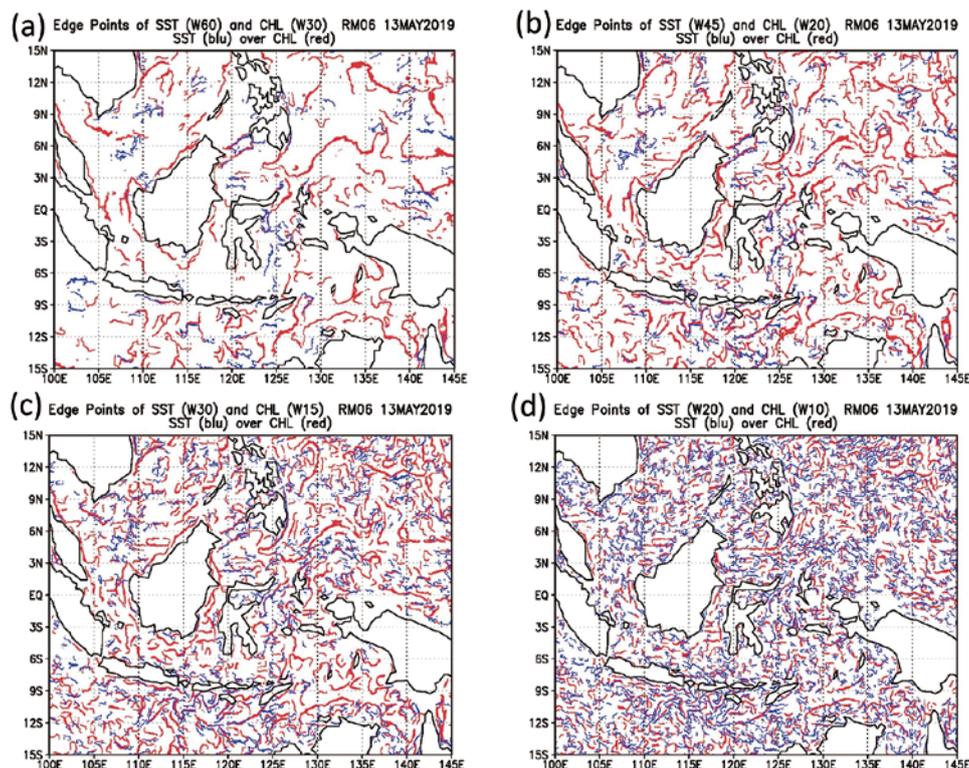


Fig. 22. Detected edge points in each panel in Fig. 20 were superposed on those in the corresponding panel in Fig. 21, with SST (blue) and CHL (red).

て  $W=60$  ( $1.2^\circ$ ),  $45$  ( $0.9^\circ$ ),  $30$  ( $0.6^\circ$ ),  $20$  ( $0.4^\circ$ ) のエッジ点分布を, Fig. 21 には同日の縞模様除去 CHL (分解能  $1/20^\circ$ ) について  $W=30$  ( $1.5^\circ$ ),  $20$  ( $1^\circ$ ),  $15$  ( $0.75^\circ$ ),  $10$  ( $0.5^\circ$ ) のエッジ点分布を示す。同じではないが, 同程度の4種の実 window サイズの結果を比較する。場の大規模な分布としては, SST では  $7-8^\circ\text{S}$  を境に北で相対的に高温, 南で低温であるのに対し (Fig. 20), CHL では図内右上の太平洋部分で低値, インドネシア海域で高値となっており (Fig. 21), 両者の場の分布はかなり異なっている。エッジ点解析のための preprocessing としては, 両方に対して RM 6 回であるが, CHL には更に MF 10 回が加わっている。相対的に SST に対する平滑化が弱いこともあって特に大きい  $W$  で CHL のエッジ点が多くなる。両者のエッジ点を重ねると (Fig. 22, 青: SST, 赤: CHL), 確かに赤線 (CHL) が多くなるが, もう一つの特徴として, 両者はほとんど重ならない。大きい  $W$  では全くと言っていいほど重ならず, 小さい  $W$  でも細かい分布がほとんど重ならない。従って, 少なくともこの領域では, CHL の繁殖のために, 水温以外の要素が限定要因になっていると思われる。

## まとめ, 活用法, 及び議論

### 1. まとめ

以上, ひまわり SST データに SIED を適用してフロントに対応するエッジ点を求める初期解析 (「ひまわり SST

に対する SIED 初期適用結果」節) において確認された2点, すなわち, ① 与えられた window 幅 ( $W$ ) に対して得られるエッジ点分布は scale-selective であること, 及び, ② preprocessing としての初期平滑化が進むほどエッジ点検出率が高いこと, を受けて, 種々の  $W$  毎にエッジ点検出率を最大にするような初期平滑化の状況・条件を求めた (「SIED 適用における preprocessing としての最適平滑化」節)。平滑化 filter としては  $3 \times 3$  の median filter (MF) と Gaussian filter (GF) をそれぞれ単独または併用して用いたが, GF を用いるに際してはそれと等価である (1-2-1, 2-4-2, 1-2-1) の2次元加重移動平均 (RM) を継続して掛けた。すなわち, RM 稼動回数と GF の分散値  $\sigma$  が 1 対 1 に対応する。

MF 単独の場合には掛け続けると場は一定状態に収束する (ひまわり低緯度 SST ( $1/50^\circ$ ) に対し, MF 25 回で変動点数は 1% 以下) が, エッジ点検出率はその場合に最大となる。ただし, 大きい  $W$  に対しては検出率の収束速度は場の収束速度より速く (つまり場が収束していなくても検出率は最大値に収束),  $W$  が小さくなるほど場の収束速度に近づく。

一方, GF 単独の場合には, ある RM 回数 (最適 RM 回数 ( $RM_{opt}$ )) で検出率は最大となり, それを超えて掛け続けると検出率は減少する。すなわち, 場が滑らかになり過ぎてエッジ点として検出し難くなる。 $RM_{opt}$  は  $W$  が大きいほど大きく, すなわち, GF の分散  $\sigma$  も大きい。GF

の空間スケールの目安として e-folding スケールの 2 倍 ( $D = 2\sqrt{2}\sigma$ ) をとり,  $W$  との比率  $R = D/W$  を見ると,  $W$  が小さい場合 ( $W \leq 15$ )  $R$  は大 ( $R > 0.6$ ) だが,  $W \geq 20$  では  $R \approx 0.5 \pm 0.1$  の範囲内にほぼ収まる。つまり, あまり小さくない  $W$  に対して  $D$  は  $W$  にラフに比例し,  $W$  の半分程度のスケールまでの擾乱を平滑化するような GF を掛ければ最大のエッジ点検出率が得られる。小さい  $W$  に対してはもう少し RM を増やし, 相対的に  $\sigma$ ,  $D$ ,  $R$  を大きくしなければならない。

MF と GF を併用する (最初に MF, その後 GF) と, 一般に MF, GF 単独の場合よりも大きな最大検出率が得られる。大きな  $W$  に対して, MF はあまり効かずほとんど RM 回数に依存するが, 小さい  $W$  に対しては MF が非常に効き, 20 回以上の MF を掛けた後に最適 RM 回数を, 単独の場合に比べて, 大幅に減らすことができる。これにより, 小さい  $W$  に対する  $R$  値も下がり, 0.5 程度以下となる。

同様の MF・GF 併用解析をひまわり CHL, しきさい SST, CHL の各データにも施した。全データを通じて, 種々の  $W$  に対する  $R$  の平均値  $R_m$  は  $0.3 < R_m < 0.5$  程度である。すなわち,  $W$  に対して  $R_m$  の比率のスケールまでの擾乱を消去すれば最大のエッジ点検出率が得られる。

## 2. 活用法

本論考の結果を活用して, 実際の SST 及び CHL の衛星データに対して効率よくエッジ点解析を行うための具体的な手順を以下に記す。これは GF として RM を複数回使用することを前提としたものである。

- ① RM の稼動回数に対応した GF の分散  $\sigma$  の一覧表の作成 (Table 6 参照)。これは前々節に示したように, 初期値として  $x=y=0$  のみ 1, 他では 0 と与えた場で, RM を  $N$  回掛けた時の  $x=y=0$  の値を求めることで, (8) 式より  $N$  に対する  $\sigma$  の値が求まる。或いは付録 C に示すように, 1 次元の Gaussian filter によりパスカルの三角形を用いて求めることもできる。
- ② 問題とする  $W$  に対し,

$$\sigma = D/2\sqrt{2} = RW/2\sqrt{2} \quad (10)$$

により  $\sigma$  を決定する。 $R$  値については Table 14 に示すように MF と RM 併用で平均的に 0.3~0.5 程度であるが, ひまわりで 0.45 程度, しきさいで 0.35 程度と思われる。ひまわりの中緯度においてはやや低く 0.35~0.4 程度であろうか。

- ③ ① で求めた RM 回数と  $\sigma$  の対応表から ② の  $\sigma$  に対応する RM 回数を求め,  $RM_{opt}$  とみなす。
- ④  $MF_{min}$  については大雑把ではあるが以下のように定める。すなわち, ある  $W$  の値を境にして大きい方では  $MF_{min} = 5$ , 小さい方では  $MF_{min} = 25$  のようにそれぞれ一定値とする。 $W$  の境界値は, ひまわりに対

しては window 幅の実スケールが  $1^\circ$ , しきさいに対しては  $0.1^\circ$  となるような  $W$  とする。ひまわり SST と中緯度高解像度 CHL データでは分解能が  $1/50^\circ$  なので  $W$  境界は  $W = 50$ , 広域 CHL データ (分解能  $1/20^\circ$ ) では  $W = 20$ , 更にしきさいでは SST・CHL 共に  $1/400^\circ$  なので  $W = 40$  を境界とする。なお,  $W$  の境界値に対しては  $MF_{min} = 5$  とする。

- ⑤ 以上求めた  $MF_{min}$  と  $RM_{opt}$  を用いて, MF, RM の順に初期平滑化を行い, 次いでエッジ点解析を行う。

なお,  $RM_{opt}$  にはかなりの許容範囲の可能性 (前々節の「3. 本節のまとめ」小節参照) が考えられるし, また, エッジフロントが太ることを考慮すると,  $RM_{opt}$  より小さな RM 回数でよい可能性 (下記「3. 議論」小節参照) も考えられる。従って, 上記活用法においても,  $MF_{min}$  及び  $RM_{opt}$  をあまり厳密に定義せずとも, 十分実用に供せられる結果は得られるものと思われる。

一方, 分散  $\sigma$  が求めた段階で 2 次元 GF として (8) 式を直接使用することも可能である。その場合には  $RM_{opt}$  の決定は必要なく, 上記の ① と ③ の過程を省略し, ② と ④ で  $\sigma$  値と  $MF_{min}$  を決めた後,  $MF_{min}$  と,  $\sigma$  値を用いた (8) 式 GF を使用して初期平滑化を行えばよい。(8) 式がサブルーチンとして整備されている場合には, この方がずっと簡便であろう。

## 3. 議論

本論考を通して, 衛星による SST や CHL データから SIED を用いてフロント・エッジを検出するに際して, どのデータに対しても適切なエッジ抽出を行うために必要なパラメータ調整方法の方向性が明示された。すなわち, まず, どの程度の空間スケールのフロントを求めたいかが最も基本である。それに応じて  $W$  が決まり, 更に  $W$  に応じてエッジ検出率を最大にするような初期平滑化の程度が決まる。このようにその方向性は単純であり, 今後漁場推定等, 広く多くのデータに活用されることが期待される。最初に述べた, 現実的に資料提供する手法を確立するという我々の最終的な研究目標に貢献するものと考えられる。

ただ, これまでの展開においては, いくつか不十分な点も残されている。今後の発展のためにそれらを以下に列記する。

- ① 本論考では SIED によるエッジ点検出率の高さを唯一の基準としてそれが最大になるケースを追求してきた。しかし, それには問題も含まれる。大きな  $W$  に対して最大検出率を得るために大きな値の  $RM_{opt}$  が必要になるが, これは必ずしもエッジフロントが長くなるとは限らず, かなりの部分エッジフロントが太くなることを意味する。平滑化の結果, 場の実際のフロント部分が太く滑らかなことに対応した結果である。これをどう評価するかが問題であろう。大きな  $W$  に対応する large-scale のエッ

ジパターンとして太さを伴うのは当然とは考えられるが、一方で、エッジフロントとして単に線分だけが必要な場合にはフロントの太さは必要ないので、RM回数を下げ、検出率を下げても実質は変わらない可能性もある。この辺りの調整も今後の課題であろう。また、大きな  $RMopt$  による強い平滑化の結果、場がかなり変形している場合もあり得る。

② 本論考ではエッジとしての判定のために場のグラディエントを直接考慮していないので、場合によればそれが低いこともあり得る。つまり、ヒストグラムで二山の間の谷の値をエッジとし、実空間でその値の点を結べば線分を成すが、必ずしもそのすべての点上でグラディエントが大きいたとは限らない。もしグラディエント法で求めればエッジとして含まれない場合もあり得る。従って、何らかの方法でグラディエントも考慮する必要性があり得る。

③ 本論考においてエッジ点検出のために作成したプログラムでは、すべての window に対する詳しいヒストグラム解析結果の出力も可能であり、そのような結果を見れば検出率の大小に対する明確な理由も分かるはずであるが、本論考の範囲では行わなかった。

④ 初期平滑化の filter としてここでは MF と GF だけを取り上げたが、もう一つ重要な filter として 2 次元的な単純移動平均が考えられる。GF よりも急激に効くと思われるが、その効果は興味ある所である。

⑤ SIED における spatial cohesion を保証するための 3 つのパラメータ ( $C, CI, C2$ ) に対して 0.92 ないし 0.9 以上なる条件が与えられている ((7) 式) が、これらは  $W$  に依存するものであり、これらの値は  $W=30$  に対するものである (C&C)。しかし、本論考では 30 以外の  $W$  に対してもこれらの値を用いた。

⑥ 雲の認識は非常に重要な要素であり、C&C でも比較的詳しく述べられているが、本論考では衛星データ内にある品質管理情報に基づいて雲と認識し、認識のための特別な作業は行わなかった。ひまわりデータについては若干考慮の余地が残った。

⑦ 縞模様の除去に関して、縞に沿った方向の移動平均値と 2 次元移動平均値の差をもって縞と定義し原因から差し引いた (付録 A, B) が、これによると縞に沿った有意な情報も軽減されてしまう。例えば、ひまわり CHL 分布では東太平洋から赤道沿いに西に延びる舌状のエルニーニョパターンが見られるが、そのような情報は上記一連の操作により削除されるべき縞に含まれてしまい、軽減される。同様に縞に沿う海岸線部分では、沿岸での有意な情報が軽減される。

#### 付録 A しきさい SST の縞模様除去

ここではしきさいの SST のオリジナルデータに見られる特徴的な縞模様の除去について述べる。縞模様よりも小さなスケールの空間的変動性は保ったうえで縞だけ除

去できるような、ラフではあるが、直感的な方法を以下に考案する。

しきさい SST のオリジナルデータ (ピクセル分解能約  $250 \text{ m} \approx 0.0025^\circ$ ) には軌道に沿って直線的に伸びる細かい縞模様がみられる (Fig. A1)。縞の間隔は  $0.1^\circ$  (ピクセル数 40) につき 2 本ないし 4 本、すなわち、ピクセル数では 20 ないし 10 程度であり、またその水温振幅は peak-to-peak で  $0.6 \sim 1.0^\circ$  程度 (Fig. A1(c)) である。軌道に沿う方向 (縞の方向) を  $x$  ( $X$ ) 軸に取り、SST の場 ( $T$ ) が次のような 3 成分からなるものと仮定する。

$$T(x, y, X, Y) = T1(y) + T2(x, y) + T3(X, Y) \quad (\text{A1})$$

ここに、 $x, y$  は小規模の座標系、 $X, Y$  は大規模の座標系で、右辺の 3 成分はそれぞれ

$$\begin{aligned} T1(y) &: \text{縞模様} \\ T2(x, y) &: \text{小規模擾乱} \\ T3(X, Y) &: \text{大規模変動場} \end{aligned}$$

である。問題は  $T1(y)$  を求めることであり、これが求めれば左辺から差引くことで補正值が求まる。ここで大規模の  $X$  方向 ( $[(\cdot)]^X$ ) 及び 2 次元的な ( $[(\cdot)]^{X,Y}$ ) 移動平均 ( $L_X, L_Y$ :  $X$  方向及び  $Y$  方向の移動平均距離) を取ることを考え、

$$\begin{aligned} [T1(y)]^X &= T1(y), \quad [T1(y)]^{X,Y} = 0, \\ [T2(x, y)]^X &\approx 0, \quad [T2(x, y)]^{X,Y} \approx 0, \\ [T3(X, Y)]^X &\approx T3(X, Y), \quad [T3(X, Y)]^{X,Y} \approx T3(X, Y), \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

とする。  $T2(x, y)$  は等方的であるとすれば、 $X$  方向でも 2 次元でも距離・広さを十分大きく取れば 0 に近づくと考えられる。また、大規模変動場  $T3(X, Y)$  は大規模に移動平均を取ってもあまり変化がないと考えられる。以上のことから、(A1) に対して  $X$  方向及び 2 次元的な移動平均を取り、それぞれ  $TM, TL$  とすると、

$$TM \equiv [T(x, y, X, Y)]^X \approx T1(y) + T3(X, Y) \quad (\text{A3})$$

$$TL \equiv [T(x, y, X, Y)]^{X,Y} \approx T3(X, Y). \quad (\text{A4})$$

(A3), (A4) より縞は

$$\begin{aligned} T1(y) &\approx [T(x, y, X, Y)]^X - T3(X, Y) \\ &\approx [T(x, y, X, Y)]^X - [T(x, y, X, Y)]^{X,Y} \\ &= TM - TL \end{aligned} \quad (\text{A5})$$

$TO \equiv T(x, y, X, Y)$  とすると、補正值 ( $Tc$ ) は

$$\begin{aligned} Tc(x, y, X, Y) &= T(x, y, X, Y) - T1(y) \\ &\approx TO - (TM - TL) \\ &= TO - TM + TL \end{aligned} \quad (\text{A6})$$

となる。すなわち、縞  $T1$  は  $X$  方向の移動平均値から 2 次元移動平均値を差引いたものとして定義でき、補正值  $Tc$  は、オリジナル値から  $X$  方向の移動平均値を差引き、2 次元移動平均値を加えることにより得られる。以上の過程では原理的に縞間隔より小さな擾乱 ( $T2$ ) も保存され、

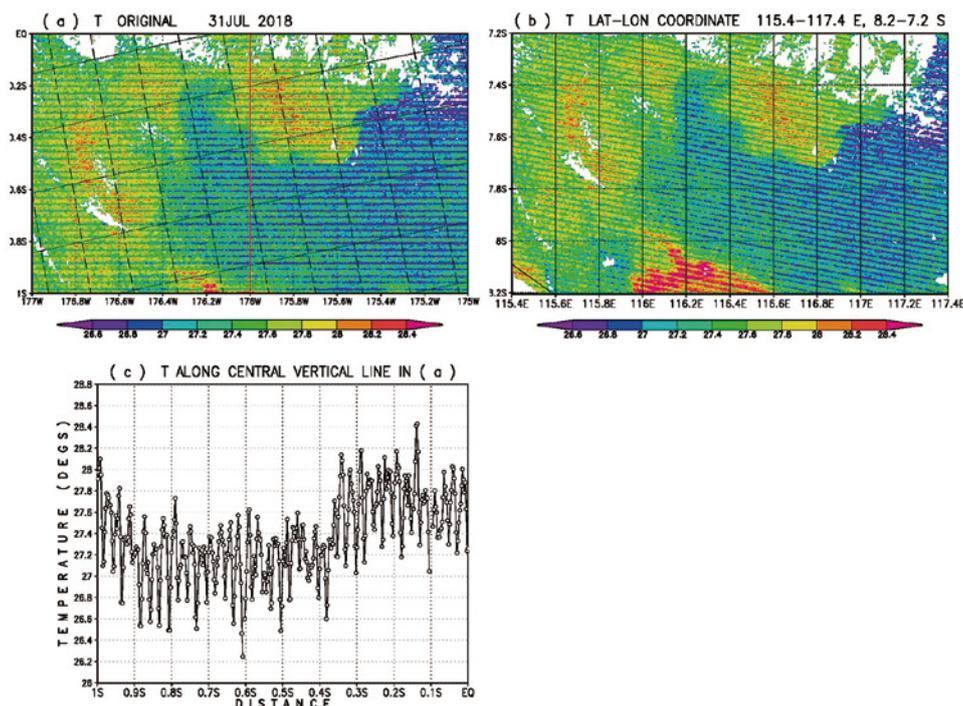


Fig. A1. Stripes seen in the Shikisai original SST data (July 31, 2018 with  $1/400^\circ$  resolution). (a) The axis of abscissas extends along the satellite orbit and values of abscissas and ordinates are arbitrary. The stripes extend along the satellite orbit. (b) SST transformed to the latitude-longitude coordinate ( $115.4^\circ\text{--}117.4^\circ\text{E}$ ,  $8.2^\circ\text{--}7.2^\circ\text{S}$ ). (c) The SST distribution along the red vertical line in the central part in panel (a).

$$\begin{aligned} T2(x, y) &= T(x, y, X, Y) - (T1(y) + T3(X, Y)) \\ &= T(x, y, X, Y) - [T(x, y, X, Y)]^X \\ &= TO - TM \end{aligned} \quad (\text{A7})$$

となる。すなわち、(A6)の右辺の前二項である。

しかし、 $L_X$ が不十分であった場合、(A2)の第3式において右辺は0でなく

$$[T2(x, y)]^X = \Delta T2(y) \quad (\text{A8})$$

となり、相対的に $y$ に強く依存する小規模擾乱の項 $\Delta T2$ が残ると予想される。この場合、(A7)の右辺によって実際に得られる量は $T2(x, y) - \Delta T2(y) = T2'(x, y)$ であり、オリジナルの等方的擾乱場から $y$ 依存性の擾乱が幾分差引かれるため、 $y$ 方向に間延びしたパターンになることが予測される。同様に(A5)の左辺は、 $T1(y) + \Delta T2(y) = T1'(y)$ となり、(A6)の $T1(y)$ は $T1'(y)$ となるため、

$$\begin{aligned} Tc(x, y, X, Y) &= T(x, y, X, Y) - T1'(y) \\ &= (T(x, y, X, Y) - \Delta T2(y)) - T1(y) \\ &= T2'(x, y) + T3(X, Y). \end{aligned} \quad (\text{A9})$$

$L_X$ ,  $L_Y$ に対して種々の値を与えて調べた所、まず、縞模様は $L_Y \geq 15$ 程度で除去できる。縞間隔がピクセル数で20ないし10程度であることを考えると妥当な結果である。また、 $T2$ の等方性は $L_X \geq 30$ 程度で確保できることが分かった。従って、以後の解析においては、 $L_Y$ は縞

を消せる最低限に近い値 $L_Y = 20$  ( $0.05^\circ \approx 5 \text{ km}$ )とし、 $L_X$ については島や雲で遮られる場合を考慮して充分大きく $L_X = 80$  ( $0.2^\circ \approx 20 \text{ km}$ )とした。Fig. A2にはFig. A1(a)に対する、 $T1(y)$ 、 $T2(x, y)$ 、 $T3(X, Y)$ 、及び $Tc(x, y, X, Y)$ を示す。

なお、移動平均は $X$ 方向でも2次元でも必ず2回取る。 $X$ 方向であれば、 $L_X$ を半幅とする三角フィルタをかけることとなる。

## 付録B ひまわりCHLの縞模様除去

ひまわりの広領域CHL(分解能 $1/20^\circ$ )の2015年12月の月平均値をFig. A3(a)線形値、(b)常用対数値)に示す。ひまわりCHLでは縞は等緯度線に近いが、衛星の経度( $140^\circ\text{E}$ )を基準に東西対称、また赤道を基準に南北対称のパターンで、基準経度から東西に遠ざかるほど縞は等緯度線から極寄りにずれる。縞の間隔は低緯度で狭く、 $5^\circ$ 程度、高緯度で広く、 $7\text{--}8^\circ$ 程度であり、それらの位置は時間的に変化しない(Fig. A4(a))。ひまわりCHLの縞模様除去についても基本的にはしきさいSSTの場合と同様な方法を用いる。ただし、ひまわりCHLは日々のデータがあり、また、Fig. A4(a)に見られるように縞の位置は時間的に一定していることから、(A1)の $T1(y)$ 及び $T3(X, Y)$ に対応する量の見積もりに対しては時間的な移動平均値を用いる。

$x(X)$ を東西方向、 $y(Y)$ を南北方向とすると、ローカル

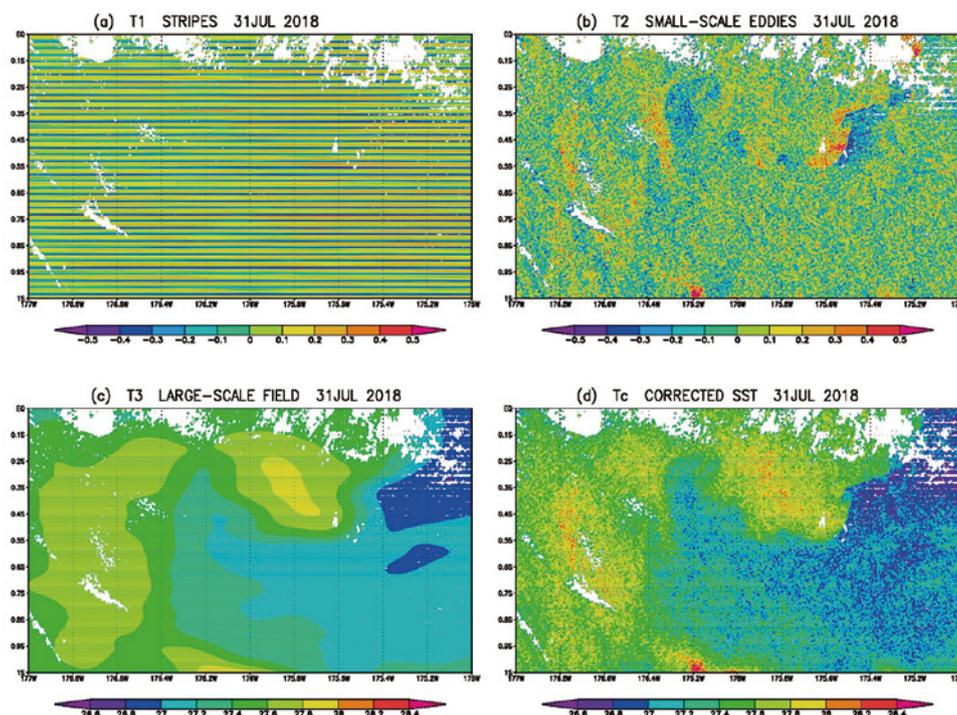


Fig. A2. Three Shikisai SST components and the corrected SST shown in Appendix A. (a) Stripes  $T1(y)$ , (b) small scale disturbances  $T2(x, y)$ , (c) large scale field  $T3(X, Y)$ , and (d) corrected SST after stripes removed  $Tc(x, y, X, Y)$ .

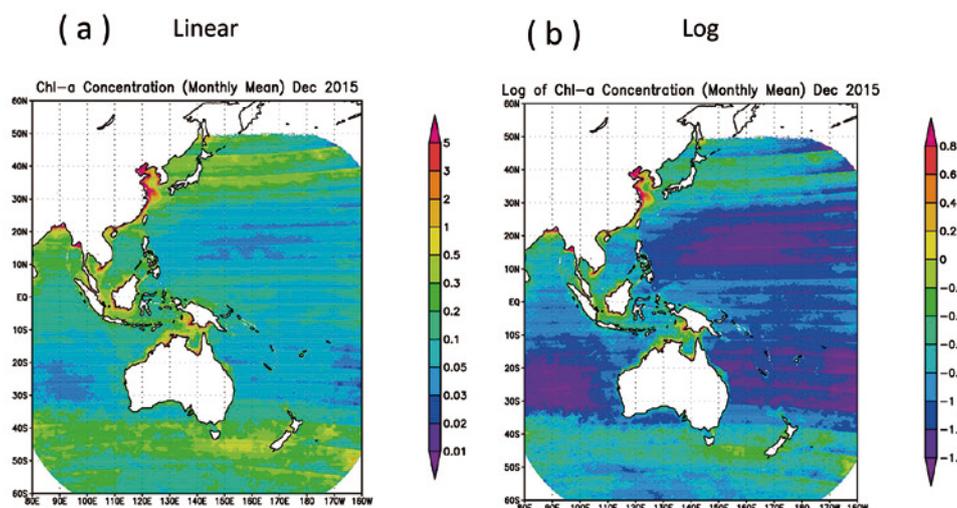


Fig. A3. Stripes seen in the Himawari original CHL coarse data (monthly mean in December 2015 with  $1/20^\circ$  resolution). Unit is  $\text{mg m}^{-3}$ . (a) Linear values, and (b) common logarithm.

に見れば、縞はやや傾くがほぼ $X$ 方向とみなせる。いま、CHLの場( $C$ )及びその時間移動平均値( $Cm$ )に対して(A1)に対応して

$$C(x, y, X, Y, t) = C1(y) + C2(x, y, t) + C3(X, Y) \quad (\text{A10})$$

$$Cm(x, y, X, Y) = Cm1(y) + Cm2(x, y) + Cm3(X, Y) \quad (\text{A11})$$

とする。ここに、 $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ はSST場と同様に、それぞれCHLの縞、小規模擾乱、及び大規模変動場であり、 $t$

は時間である。なお、時間移動平均は線型値のままで行うが、上記の $C$ 及び $Cm$ はそれらの常用対数を取ったものである。以下では常用対数値を用いる。その理由については後ほど述べる。時間移動平均期間では $C2$ だけが時間依存性を持つと仮定すると、

$$C1(y) = Cm1(y), \quad C3(X, Y) = Cm3(X, Y) \quad (\text{A12})$$

であり、(A11)に対して $X$ 方向及び2次元的な移動平均を $CMm$ 、 $CLm$ とすると、

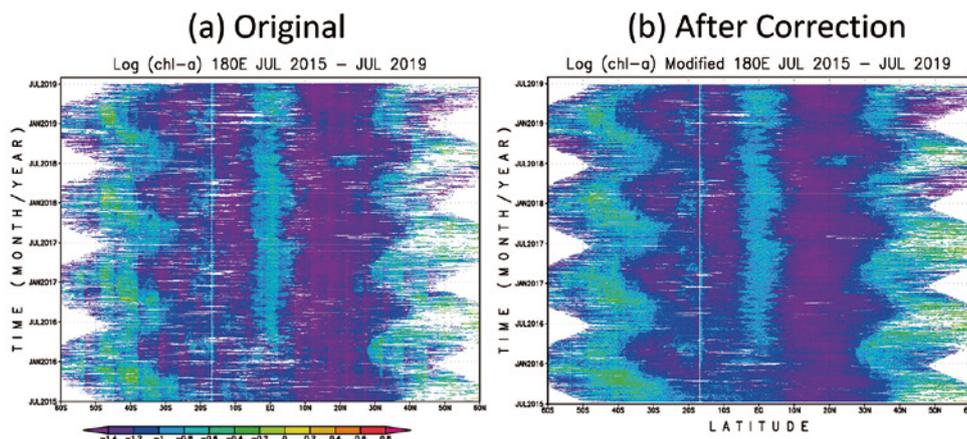


Fig. A4. Latitude-time section of the Himawari CHL coarse data along 180° with 60°S-60°N from July 2015 to July 2019. (a) Original data ( $CO$ ) and (b) corrected data without stripes ( $Cc$ ).

$$CMm \equiv [Cm(x, y, X, Y)]^X \approx Cm1(y) + Cm3(X, Y) \quad (A13)$$

$$CLm \equiv [Cm(x, y, X, Y)]^{X,Y} \approx Cm3(X, Y). \quad (A14)$$

$CO \equiv C(x, y, X, Y, t)$  とすると,  $T1$ ,  $Tc$ , 及び  $T2$  に対応して

$$\begin{aligned} C1(y) &= Cm1(y) \approx [Cm(x, y, X, Y)]^X - Cm3(X, Y) \\ &\approx CMm - CLm, \end{aligned} \quad (A15)$$

$$\begin{aligned} Cc(x, y, X, Y, t) &= C(x, y, X, Y, t) - C1(y) \\ &= C(x, y, X, Y, t) - Cm1(y) \\ &\approx CO - (CMm - CLm) \\ &= CO - CMm + CLm, \end{aligned} \quad (A16)$$

$$\begin{aligned} C2(x, y, t) &= C(x, y, X, Y, t) - (C1(y) + Cm3(X, Y)) \\ &= C(x, y, X, Y, t) - (Cm1(y) + Cm3(X, Y)) \\ &\approx CO - CMm \end{aligned} \quad (A17)$$

となる。ここに  $Cc(x, y, X, Y, t)$  は  $C(x, y, X, Y, t)$  の補正值である。

時間的移動平均としては 8 日の単純移動平均を 2 回繰り返したので, 15 日の時間的三角フィルタに相当する。空間的分解能は  $1/20^\circ$  であり, 移動平均距離  $L_x = L_y = 120$  ( $6^\circ$ ) として, これらの値を用いて  $X$  方向にも 2 次元的にも単純移動平均を 2 回繰り返した。 $X$  方向 (等緯度線方向) は  $140^\circ E$  近辺を除いて厳密には縞方向とは一致しないが, 成す角度は Fig. A3 の 4 隅の最大箇所でも  $6^\circ$  程度と見積もられるので, 無視し, 両者が一致しているものとして計算した。2016 年 1 月 10 日を例として上記各項を Fig. A5 に示す。右下の補正值 ( $Cc$ ) (Fig. A5(f)) ではほぼ完全に縞は消えている。補正值 ( $Cc$ ) に対して Fig. A4(a) に対応する時間的位相図 (Fig. A4(b)) で見ても縞はほぼ削除されていることが分かる。

しきさい SST と同様に, CHL に対しても瞬間値である (A10) を用いて同じ過程を施せるが, 時間的移動平均 (A11) を用いるメリットは 2 点ある。1 点目は, 時間平均期間内の雲のない有効点を利用することにより平均値全体として雲による無効点を減少できる。これにより空間的移動

平均値の精度が上がると期待できる。2 点目は,  $C2$  に対して  $Cm2$  はすでに時間的平均がかかっているために, 更に空間的平均を掛けた時により速く 0 に近付く。従って,  $C1 = Cm1$  と  $C3 = Cm3$  の推定値の精度が上がると考えられる。

CHL に対して常用対数を用いる理由は以下の通りである。すなわち CHL の線型値は SST に比べて空間的変動幅が大きく (数桁に及ぶ),  $Cc$  (A16) において引き算が含まれるため, 線形値のままでは負値になる場合が生じ得る。対数値を用いればその加減算は線形値の乗除算であり, 線形値に変換した時, 負値になることはあり得ない。対数値の相加平均は線形値の相乗平均である。また, 縞の値の振幅は平均値の大きさに依存するが, 対数を取ることで, 線形値の桁数が大きい部分も小さい部分も同等に扱えるようになる。

なお, ひまわり CHL の高解像度狭領域データ (分解能  $1/50^\circ$ ) にも同様な縞模様が見られるが, その除去に際しては上記のように  $Cm$  に 15 日平均を取ると他の瞬間値との間に齟齬を来し, 日平均値あるいは 3 日平均値程度を用いるのが適当であった。

### 付録 C パスカルの三角形

(1-2-1, 2-4-2, 1-2-1) の 2 次元加重移動平均 (RM) を  $N$  回掛けた場合に対応する GF(8) の分散値  $\sigma$  を求めるのに, パスカルの三角形を用いることができる。RM は 2 次元であるが, 対応する 1 次元加重移動平均 (1-2-1) でも  $\sigma$  については同等のことが言える。1 次元の GF は

$$g(x) = 1/(2\pi\sigma^2)^{1/2} \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad (A18)$$

であり,  $x=0$  において  $g(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$  より  $\sigma$  が求まるが,

$N$  回の移動平均に対する左辺  $g(0)$  を見積もるのにパスカルの三角形が使用できる。

パスカルの三角形とは, 頂点を 1 としてその左下及び右下方向に 1 を並べ, 各行における隣り合う 2 つの数の

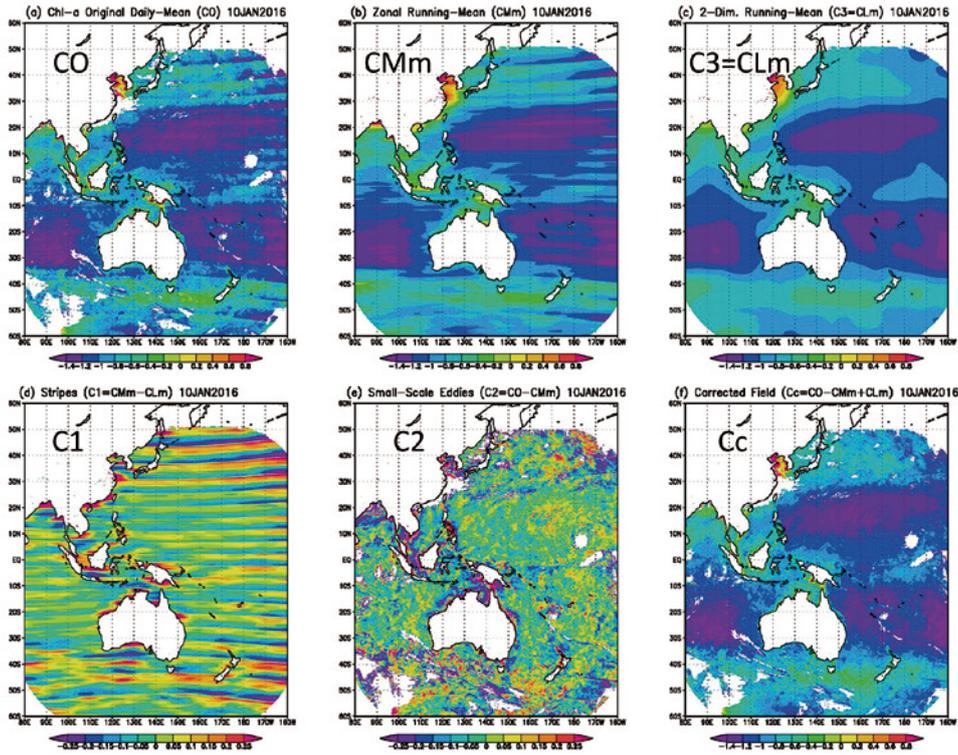


Fig. A5. Himawari CHL coarse data (January 10, 2016 with common logarithm). (a) Original data ( $CO$ ), (b) 1-dimensional ( $X$  direction) running mean of temporal running mean values ( $CMm$ ), (c) 2-dimensional running mean of temporal running mean values ( $CLm$ ), (d) stripes ( $C1$ ), (e) small scale disturbances ( $C2$ ), and corrected data without stripes ( $Cc$ ).

和をその下の行の中間の位置に書き並べてできる数列による三角形である。9行目までのものを Table A1 に示す。各行の数列は行番号  $-1(n-1)$  の次数の二項展開係数に対応すると共に、奇数行では 1-2-1 移動平均を掛けた回数 ( $N$ ) に対応する総合的加重の分布を表す。問題の  $N$  に対する  $g(0)$  の値は、 $N$  に対応する行の中央値 ( $A$ ) をその行の数の総和 ( $B$ ) で割ったものとなる。一般にパスカルの三角形の

上から  $n$  番目の行の左 (右) から  $r$  番目の数値は、 $n-1$  個のものから  $r-1$  個のものを取り出す組合せの値

$${}_{n-1}C_{r-1} = (n-1)! / (n-r)!(r-1)! \quad (A19)$$

であり、また、 $n$  行目の数の総和は  $2^{n-1}$  で表される。 $N$  は  $n$  を用いて、 $N = (n-1)/2$ 、また、中央値の順番は両端から  $(n+1)/2$  番目であるから、 $n-1=2N$ 、 $r-1=(n+1)/2-1=N$ 、

Table A1. Pascal's triangle with the first nine lines. The  $n$ 'th sequence corresponds to the  $(n-1)$ 'th order binomial coefficients, and the sequence with an odd line number ( $n=2N+1$ ,  $N=1, 2, \dots$ ) corresponds to the weights obtained when the weighted running mean (1-2-1) is applied  $N$  times. The central value of the 1-dimensional Gaussian filter (Eq. (A18) in Appendix C) at  $x=0$  ( $g(0)$ ) corresponding to  $N$  is expressed as  $g(0) = A/B$ , where  $A = {}_{2N}C_N = (2N)!/(N!)^2$ ,  $B=4^N$ , and finally  $\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\pi} g(0)}$ . The values of  $A$ ,  $B$ ,  $g(0)$ , and  $\sigma$  for  $N \leq 4$  are also shown (see Table 6).

Line No. ( $n$ )	1-2-1 Running Mean Times ( $N$ )					$A = {}_{2N}C_N = (2N)!/(N!)^2$	$B = 4^N$	$g(0) = A/B$	$\sigma$					
1				1										
2				1	1									
3	1			1	2	1	2	4	0.5000	0.7979				
4				1	3	3	1							
5	2			1	4	6	4	1	6	16	0.3750	1.0638		
6				1	5	10	10	5	1					
7	3			1	6	15	20	15	6	1	20	64	0.3125	1.2766
8				1	7	21	35	35	21	7	1			
9	4	1	8	28	56	70	56	28	8	1	70	256	0.2734	1.4590

及び  $n-r=N$  であり、

$$A = {}_{n-1}C_{r-1} = {}_{2N}C_N = (2N)! / (N!)^2, B = 2^{n-1} = 2^{2N} = 4^N. \quad (A20)$$

従って、 $g(0) = A/B$ 、 $\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\pi} g(0)}$  により  $N$  に対する  $\sigma$  が求まる。Table A1 には  $N=4$  までの  $A, B, g(0)$ 、及び  $\sigma$  を示す。

上記により、 $N$  に対する  $\sigma$  は求まるが、逆に  $\sigma$  が与えられた場合に  $N$  を直接求めることはできない。 $\sigma$  は  $N$  に対して単調増加であるので、予め  $N$  に対する  $\sigma$  の一覧表 (例えば Table 6) を作成しておき、与えられた  $\sigma$  に対する  $N$  を求めればよい。

#### 付録 D 最近接エッジ点までの距離の求め方

フロントからの距離は、好漁場であるかどうかを表す 1 つのパラメータになり得る可能性があり、出力データにも含まれるので、各ピクセルから最も近いエッジ点までの距離を求める方法を以下に記す。各ピクセル位置は緯度-経度座標系で定義されているものとする。また、ある距離  $L$  より離れている場合は一定値  $L$  かあるいは無効値とする。

なお、この節での「ピクセル」という用語は、SST が定義されている実際のピクセルではなく、エッジ点として定義されるような、4 つの SST ピクセルによる四角形の中心位置を意味するものとする。

- ① 対象とする領域の緯度幅にわたり 1 つの子午線に沿ったピクセル毎に、そのピクセルを中心として東西南北それぞれに  $L$  の範囲に入るピクセルまでの大円距離に関して、球面三角法による次式を用いて計算し、2次元配列  $A(\theta_0)$  として保存する。

$$\cos X = \sin \theta_0 \sin \theta + \cos \theta_0 \cos \theta \cos(\varphi - \varphi_0) \quad (A21)$$

ここに  $(\theta_0, \varphi_0)$  及び  $(\theta, \varphi)$  は中心ピクセル及び周りのピクセルの (緯度, 経度)、 $X$  はその 2 点が地球中心に対して張る角度 (radian) である。2 点間の大円距離 ( $d$ ) は地球半径を  $Re$  とすると  $d = Re X$  で表されるが、 $\cos X$  のまま保存すればよい。(ただし、 $X=0$  の時  $\cos X=1$  (最大) で、 $X$  すなわち距離が大きくなるほど、 $\cos X$  は減少。)

- ② エッジ点が決まれば、そのエッジ点の緯度 ( $\theta_0$ ) に対応する  $\cos X$  の配列  $A(\theta_0)$  を選び、そのエッジ点の周りの空白点 (陸地・雲でなく、エッジ点でもない点) に  $\cos X$  の値を記入する。もし、他のエッジ点からのスキャンによって既に記入されていれば、 $\cos X$  の大きい方 ( $X$  の小さい方) の値を残す。
- ③ すべてのエッジ点からのスキャンが終わったあと、最終的に得られた各ピクセルでの  $\cos X$  (最大値) を  $X$  ( $= \cos^{-1}(\cos X)$ ) に変換し、 $d = Re X$  よりエッジ点までの最短距離  $d$  が求まる。一度もスキャンされない点

や  $d > L$  の場合は、 $L$  または無効値とする。

#### 付録 E 使用パラメータと変数の一覧

SIED	single-image edge detection algorithm の略。
MF	median filter の略。3×3 のピクセルの中心点の値を、その 9 個の中央値 (median) で置き換える。また、稼働回数の変数 (MF) としても使用。
MFmin	最適最小 MF 回数。MF と RM を併用する場合、MF を最初に掛け後に RM を掛けるが、MFmin 回数を越えて MF を掛けた後に RM を掛けても、RM 回数に対するエッジ点検出率の変化は、MFmin 回数の後に RM を掛ける場合とほとんど変わらない。従って、必要な MF 回数は MFmin で十分と考えられる。
RM	2次元の 3×3 ピクセルに対する、(1/16)*(1-2-1, 2-4-2, 1-2-1) の加重移動平均。また、稼働回数の変数 (RM) としても使用。
RMopt	最適 RM 回数。与えられた window 幅 ( $W$ ) と MF 稼働回数に対して、エッジ点検出率を最大にするような RM 稼働回数
GF	Gaussian filter の略。1次元は (A18) 式、2次元は (8) 式。
$\sigma$	Gaussian filter の分散、あるいは標準偏差。
$W$	window 幅。単位はピクセル。本論考では縦横とも同じ値を採用。
$S$	window のずらし幅。本論考では縦横とも同じ値を採用。
STN	signal-to-noise 比。定義は「SIED によるフロント検出法」節、(6) 式。
$D$	Gaussian filter の表す空間スケールとして、e-folding スケールの 2 倍としたもの。すなわち、 $D=2\sqrt{2}\sigma$ 。
$R$	window 幅 ( $W$ ) に対する $D$ の比率。
$Rm, Rstd$	$R$ の、 $W$ のレンジに渡る平均値と標準偏差。
$Tc, Cc$	しきさい SST 及びびまわり CHL で縞模様を除去した補正值

#### 付録 F プログラムの利用に関して

本論考で作成したエッジ解析プログラムは国立研究開発法人海洋研究開発機構の管理するところであり、その利用に関しては下記脚注を参照のこと。

#### 参 考 文 献

- Belkin, I.M. and Cornillon, P. (2003) SST fronts of the Pacific coastal and marginal seas. *Pacific Oceanography*, **1**, 90-113.  
 Canny, J. (1986) A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **8**, 679-698.

プログラム利用のための連絡先  
 JAMSTEC 五十嵐弘道 (higarashi@jamstec.go.jp)

- Cayula, J.-F. and Cornillon, P. (1992) Edge detection algorithm for SST images. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **9**, 67-80.
- Cayula, J.-F. and Cornillon, P. (1995) Multi-image edge detection for SST images. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 821-829.
- Diehl, S.F., Budd, J.W., Ullman, D. and Cayula, J.-F. (2002) Geographic window sizes applied to remote sensing sea surface temperature front detection. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 1105-1113.
- Miller, P. (2004) Multi-spectral front maps for automatic detection of ocean colour features from SeaWiFS. *Int. J. Remote Sens.*, **25**, 1437-1442
- Miller, P. (2009) Composite front maps for improved visibility of dynamic sea-surface features on cloudy SeaWiFS and AVHRR data. *J. Mar. Syst.*, **78**, 327-336.
- Nieto, K., Demarcq, H. and McClatchie, S. (2012) Mesoscale frontal structures in the Canary Upwelling System : new front and filament detection algorithms applied to spatial and temporal patterns. *Remote Sens. Environ.*, **123**, 339-346.
- Roa-Pascual, L., Demarcq, H. and Nieblas, A.-E. (2015) Detection of mesoscale thermal fronts from 4 km data using smoothing techniques : Gradient-based fronts classification and basin scale application. *Remote Sens. Environ.*, **164**, 225-237.
- Ullman, D.S. and Cornillon, P.C. (2000) Evaluation of front detection methods for satellite-derived SST data using in situ observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 1667-1675.
- Ullman, D.S. and Cornillon, P.C. (2001) Continental shelf surface thermal fronts in winter off the northeast US coast. *Cont. Shelf Res.*, **21**, 1139-1156.
- Wall, C.C., Mulle-Karger, F.E., Roffer, M.A., Hu, C., Yao, W. and Luther, M.E. (2008) Satellite remote sensing of surface oceanic fronts in coastal waters off west-central Florida. *Remote Sens. Environ.*, **112**, 2963-2976.