

NOAA/AVHRR データによる広域流動推定手法の適用性

坂 井 伸 一*・水 鳥 雅 文**

1. はじめに

衛星リモートセンシングは、広域の海面情報を瞬時にかつ定期的に観測できる技術であり、沿岸における広域環境モニタリングをはじめ、全球規模の観測など地球環境問題への適用も図られている。

本研究では、衛星によって観測された海面水温分布画像から流動を推定する手法の一つであるテンプレート法による、わが国周辺域の広域流動推定手法の適用法について検討する。

ここでは、日本周辺海域として福島沖、日本海対馬暖流域および熊野灘を対象に、テンプレート法を適用する。

2. テンプレート法

2.1 海面水温分布画像による流動推定手法

現在、海域の流動を直接観測する衛星センサーは開発されていないため、衛星データから広域的な海域流動を求める場合、以下に挙げるような海面水温分布画像から間接的に流動を求める手法が提案されている。

- (a) 黒潮など地衡流近似の成り立つ海域において、海面水温分布の単一画像から、密度を水温のみの関数と近似して地衡流計算を行い、流速を推定する（例えば香西ら, 1989）。
- (b) 連続する2つの海面水温分布画像を用いて、海面での温度の保存式から、インパース法によって移流項の流速成分を求める（Kelly, 1989）。
- (c) 連続する2つの海面水温分布画像から、水塊の水温分布パターンの移動を相関解析によって追跡し、その移動速度を算出する（例えば Emery ら, 1986）。

本研究では、衛星データを用いてわが国周辺域の広域流動を推定することを目的としているため、上記の(b)と(c)の手法が考えられるが、簡単な計算で比較的に適用できる(c)の手法を用いた。上記(c)に属

する手法にテンプレート法があり、パターン・マッチング法やMCC法(Maximum Cross-Correlation Method)などとも呼ばれている。

テンプレート法は、海面水温分布の画像上に、テンプレートと呼ばれる矩形メッシュを設定し、時間の経過とともにそのテンプレート内の水塊が、水温分布形状を保ったまま移動すると仮定して、連続した画像間の相関解析によって、その移動距離、および移動速度を算出する手法である。

2.2 NOAA/AVHRR データ

テンプレート法に用いる海面水温分布は、米国の気象衛星 NOAA/AVHRR のデータから求めた。気象衛星 NOAA は、現在稼働中の熱赤外センサーを持つ衛星の中では、広範囲（観測幅約 2,700 km）の海域を最も頻度高く（約12時間間隔）観測できるため、水温パターンの移動を追跡するテンプレート法にも最も適した衛星であると考えられる。海面水温値は、AVHRR のバンド 4 (10.3~11.3 μm) から算出した輝度温度値を用いた。テンプレート法では、水温分布パターンの相対的な移動に着目するため、ここでは大気補正は行わなかった。また、画像は幾何補正によるメルカトル図法によって表示されている。

2.3 テンプレート法の解析手順

テンプレート法における解析手順を、以下に示す。

- (1) まず、 $t=t_0$ における元画像上で、解析対象となる水塊を、 N ピクセル $\times N$ ラインの元テンプレートとして定める。
- (2) 次に、 Δt 時間後の $t=t_1$ の対象画像において、元テンプレートと同サイズの対象テンプレートを、海域流動のオーダーを基にあらかじめ定めた対象範囲内で設定する。本研究では、 Δt として、12時間と24時間を選んだ。
- (3) 元テンプレートと対象テンプレートの間で、次に示す2次元の相関係数 R を計算する。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (f_{i,j} - \bar{f})(g_{i,j} - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (f_{i,j} - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (g_{i,j} - \bar{g})^2}}$$

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{i,j}}{N^2}, \quad \bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g_{i,j}}{N^2}$$

ここに、 i, j は、テンプレート内のピクセル、ラインの座標数、 $f_{i,j}, g_{i,j}$ は、それぞれ元テンプレート、対象テンプレート内の海面水温値である。

(4) 上記(3)と同様に、対象範囲内におけるすべての対象テンプレートに対して、元テンプレートとの相関係数をそれぞれ計算する。

(5) 以上の計算結果から、相関係数の最大値を示す点を水塊(テンプレート)の移動先とみなし、その移動距離を画像間の時間差 $\Delta t (=t_1 - t_0)$ で割り、水塊の移動速度を算出する。ただし、相関係数の最大値が相関係数分布において、明らかに特異な点に現われた場合は、その値をエラーとみなし、順次その次に高い値を示す点を水塊の移動先とした。

以上、解析手順のフローをまとめたものを図-1に示す。

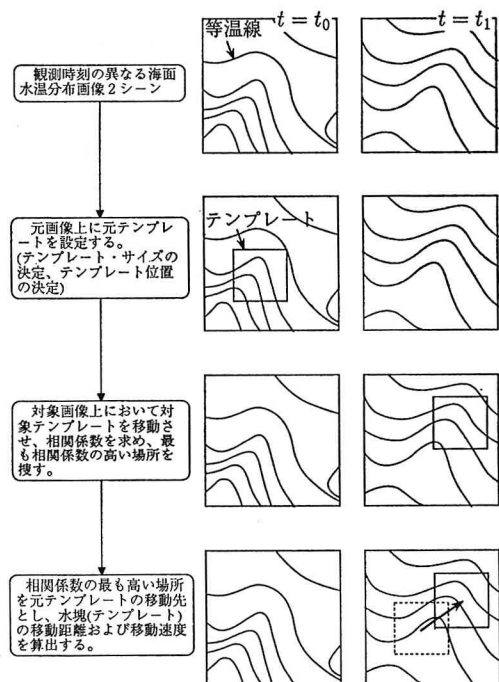


図-1 テンプレート法の解析手順のフロー

3. 福島沖への適用

福島沖は、南下する親潮系水と大きく蛇行する黒潮主流とが干渉し合う混合水域であり、水温フロントの激しい変動が見られる。一方、沿岸部では、海岸線が南北に沿ってほぼ直線上に延びており、また海底地形は、沖合い方向に 142°E 付近まで、なだらかな大陸棚が、海岸

線とはほぼ平行に発達している。

図-2～図-6 に示す1989年4月の5シーン(2日、7日、14日、21日、29日)の NOAA/AVHRR データ

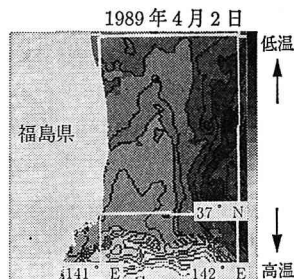


図-2



図-3

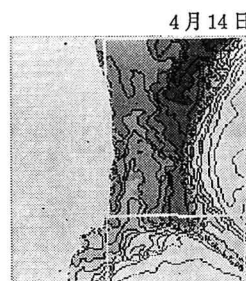


図-4

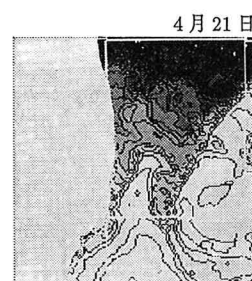


図-5



図-6

図-2～図-6 NOAA/AVHRR データによる福島沖の海面水温分布画像

表—1 衛星画像から読みとった沖合い流動と沿岸観測結果の概要

日 時	4月2日	→	4月7日	→	4月14日	→	4月21日	→	4月29日
画像から読み取った沖合水温フロント変動	暖水舌の先端部が北上し、親潮系水の前線は、暖水舌の先端部を東側に沿って南東方向に張り出してきている。		暖水舌の先端は、やや東に移動しており、親潮系水は、さらに大きく南東方向に張り出している。		暖水舌は鋭角的な形状になり、その先端は北上し、親潮系水は、前線部分が再び北へ移動している。		暖水舌の先端は丸みを帯び、やや南下している。親潮系水は、三陸沖付近から強く南下してきている。		
定点観測結果から読み取った沿岸流動	1～2日で北流と南流を繰り返している。		5日間ほど、強い南流が続いている。		14日から18日にかけて、強い北流が見られる。		前半2～3日周期の強い北流と南流があり、後半は強い南流が卓越している。		

による海面水温分布画像から沖合い水温フロントの変動を判読し、沿岸流動との応答関係について検討した。ここでは、 142°E 以西の海域を対象に、同海域で支配的に見られる鹿島灘の暖水舌と、三陸沖から南下してくる親潮系水の水温フロントの変動に着目した。まとめた結果を、表—1 に示す。

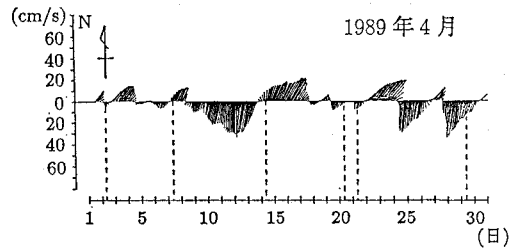
一方、同時期に福島県沖合い約 1.5 km で観測された定点連続流動結果 (24時間移動平均) の経時変化を、図—7 に示す。同海域では、1ヶ月間にわたり、1～6日周期で北流と南流が繰り返されており、その流速は最大で 30 cm/s 程度である。図中の点線で示した日時は、NOAA/AVHRR データの観測時間である。

表—1 より、4月2日～7日の期間を除き、沖合い水温フロント変動観測結果は、良い対応を示しており、水温フロントの変動から流動を推定することの妥当性が示された。

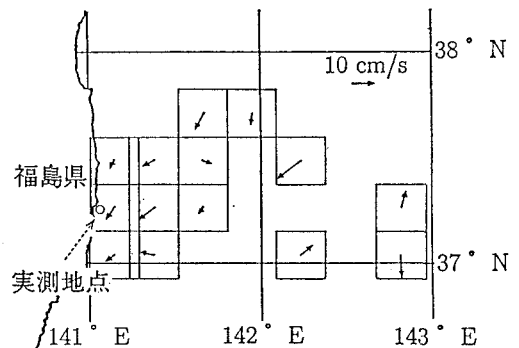
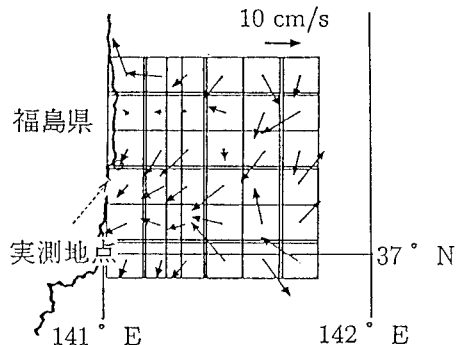
$141^{\circ}\text{E}\sim 143^{\circ}\text{E}$, $37^{\circ}\text{N}\sim 38^{\circ}\text{N}$ の福島沖を対象に、1989年4月20日 (07:35) と21日 (07:13) の約24時間間隔の画像データを用いて、テンプレート法により沖合い流動を推定した。テンプレートのサイズは、51ピクセル×51ラインと27ピクセル×27ライン (以後、ピクセル、ラインは省略する) の2通りに設定して解析した。このテンプレートは、実スケールで、 $25.4\text{ km}\times 25.4\text{ km}$ と $13.2\text{ km}\times 13.2\text{ km}$ である。

図—8 に、 51×51 の場合の解析結果による水塊 (テンプレート) の移動ベクトル図を示す。ベクトルを示していない点は、相関値が悪く、水塊の移動先を特定できなかった場所である。図中○で示した箇所は、前述の沿岸観測地点である。 $141^{\circ}30'\text{E}$ 以西では南西から南南西方向の流れが見られる。沿岸実測地点を含む水塊の移動速度は、南西方向に 8.4 cm/s である。この値を前述の観測結果による同時期の平均流速と比較してみると、24時間移動平均したもので南南東方向に 2.5 cm/s となっており、観測点が沿岸に非常に近い所に位置していることを考慮すれば、テンプレート法で推定した水塊の移動速度は、ほぼ妥当なものと考えられる。

$141^{\circ}30'\text{E}$ より沖合いでは、移動ベクトルがばらつき始める。これは、沖合いの黒潮統流、暖水塊、ストリー



図—7 24時間移動平均の沿岸観測 (流速・流向) データ

図—8 水塊の移動ベクトル図 (サイズ 51×51)図—9 水塊の移動ベクトル図 (サイズ 27×27)

マーといった大規模現象による強い混合の影響を受けているためと考えられる。

テンプレート・サイズ 27×27 のケースについては、 142°E 以西の海域を対象を絞り解析を行った。解析結果より求めた水塊の移動ベクトル図を 図—9 に示す。

141°30' 以西では、テンプレート・サイズが 51×51 の時に比べ、より細かな流動が現れている。沿岸観測地点を含む水塊の移動速度は、南南西方向に 6.0 cm/s であり、この結果は、サイズが 51×51 の場合に比べ、より沿岸観測結果に近い値となっている。141°30' より沖合では、51×51 の場合と同様、移動ベクトルは複雑な挙動を示しており、強い混合の影響を受けているためと考えられる。

以上、1989年4月の福島沖において、テンプレート法を適用した結果、得られた水塊の移動速度は、沿岸観測結果と比較して、流速・流向ともほぼ妥当な結果となった。

4. 日本海への適用

1988年4月の日本海対馬暖流域を対象に、約12時間毎に得られた連続3シーンの海面水温分布画像を用いてテンプレート法を適用し、画像間の時間間隔の影響について検討した。

この海域では、朝鮮半島に沿って北上した対馬第3分枝が大きく湾曲した後、東へ蛇行しながら流れている。その複雑な蛇行に伴い、対馬暖流の周辺域で水温フロントが変動しており、テンプレート法の適用に適した海域であると考えられる。

テンプレートは、対馬暖流および周辺域で、水温フロントが明瞭に捉えられる位置に、15×15～51×51、実スケールで 15.3 km×15.3 km～54.5 km×54.5 km の範囲で、任意に設定した。

解析結果を、図-10 に示す。点線で示したベクトルは、4月14日(19:36)と15日(07:55)の約12時間間隔の画像に対して、一点鎖線で示したベクトルは、15日(07:55)と15日(19:13)の約12時間間隔の画像に対して、それぞれテンプレート法を適用した結果である。ただし、後者の場合の元テンプレートは、前者の対

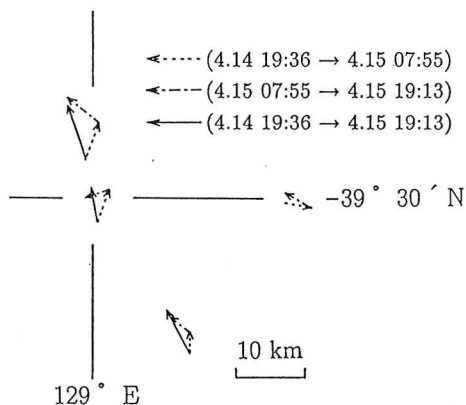


図-10 12時間間隔と24時間間隔のデータによる解析結果(日本海)

象テンプレートが移動した点をテンプレートの中心とし、同サイズのものを設定した。一方、実線で示したベクトルは、14日(19:36)と15日(19:13)の約24時間間隔の画像に対してテンプレート法を適用した結果である。この場合の元テンプレートは、前述の12時間間隔の場合と同じ位置に同サイズのものを設定した。

12時間間隔の画像から得られた各移動ベクトルの合成と、24時間間隔の画像から得られた移動ベクトルを比較してみると、ほぼ一致していることが分かる。この結果より、この海域では、テンプレート法を適用する場合、12時間と24時間の画像間隔では、水温分布パターンの変形の影響は、無視できるものと推測される。

5. 熊野灘への適用

1988年11月の画像を対象に、熊野灘においてテンプレート法を適用した。先の福島沖において、テンプレートのサイズを2通りに変えて解析を行ったが、ここではより詳細にテンプレートのサイズが解に及ぼす影響について検討するため、テンプレートのサイズを、3×3, 5×5, 7×7, 9×9, 11×11、実スケールで約 1.1 km×1.1 km (以下 km は省略)、1.8×1.8, 2.5×2.5, 3.2×3.2, 3.9×3.9 の範囲で5通りに変化させて解析した。

用いた画像は、11月7日(08:03)と8日(07:41)の約24時間間隔の画像である(図-11に、11月7日の画像を示す)。ここでは、沿岸近傍の海域を対象としたため、ニアレスト・ネイバー法により内挿された画素間の実距離約 0.35 km の画像を用いた。テンプレートの位置は、図-11 に示したように、水温フロントを明瞭に捉えられる部分に設定した。

各テンプレート・サイズにおける相関係数の分布を、図-12 に示す。図中、○で囲んだ値が最大値で、△で囲んだ値がその次に高い値である。図-12 より、3×3

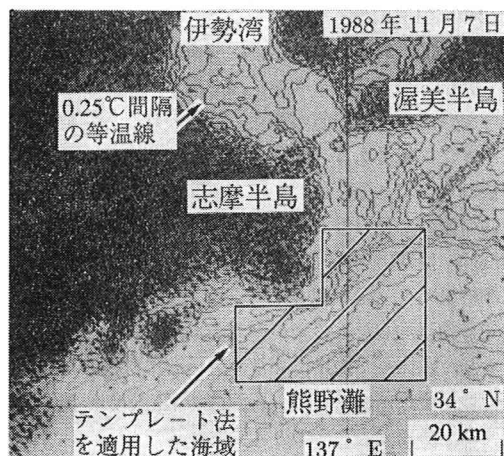


図-11 熊野灘の海面水温分布画像(テンプレート法の解析範囲)

テンプレート・サイズ 3×3 (ピクセル)												
	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276		
386	-24	-54	-69	-63	-27	32	58	88	94	93		
387	-20	-41	-64	-57	6	79	89	93	91	85		
388	-16	-29	-48	-14	83	95	93	88	82	69		
389	-18	-26	-34	52	95	92	91	80	75	46		
390	60	49	26	83	92	92	86	64	59	-1		
391	81	74	44	81	92	92	84	46	42	-1		
392	94	88	59	76	95	96	80	26	60	49		
393	73	(98)	80	79	94	93	73	40	81	71		
394	26	91	76	74	89	88	67	49	75	75		
395	4	79	73	72	81	85	52	31	53	72		
(ライン)												
テンプレート・サイズ 5×5 (ピクセル)												
	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276		
386	-34	-52	-52	-59	-31	9	82	81	89	89		
387	-29	-42	-49	-40	5	59	88	95	87	79		
388	-24	-33	-32	-7	50	89	95	93	78	65		
389	-16	-21	-5	42	82	(98)	93	84	65	53		
390	11	16	45	75	89	92	90	75	49	41		
391	65	77	74	82	87	94	86	70	51	56		
392	49	84	81	82	83	88	82	71	61	65		
393	27	79	87	85	84	89	84	79	70	73		
394	9	65	83	84	85	87	79	69	62	68		
395	1	53	76	81	82	79	63	51	45	53		
(ライン)												
テンプレート・サイズ 7×7 (ピクセル)												
	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276		
386	-26	-34	-36	-29	-9	27	59	82	87	85		
387	-18	-20	-17	-2	24	61	83	92	86	74		
388	-8	-5	3	27	57	85	92	88	73	57		
389	6	16	32	59	82	(98)	89	77	59	42		
390	23	46	64	79	88	91	80	65	47	37		
391	39	74	80	82	84	83	72	59	44	44		
392	16	60	74	76	77	76	69	61	53	57		
393	4	48	71	76	75	73	67	62	57	55		
394	-5	38	65	74	73	71	63	56	49	41		
395	-10	33	60	71	70	66	55	45	35	24		
(ライン)												
テンプレート・サイズ 9×9 (ピクセル)												
	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276		
386	-17	-17	-14	-7	9	34	59	74	81	80		
387	-4	0	7	-17	36	59	77	83	81	73		
388	10	18	30	43	62	79	92	83	72	60		
389	26	39	53	65	79	(88)	86	74	58	46		
390	41	57	69	77	82	83	75	61	46	36		
391	45	66	76	79	78	74	65	53	42	35		
392	27	51	66	71	70	66	58	49	42	37		
393	8	33	53	62	62	59	53	47	41	36		
394	-2	24	47	57	58	55	49	41	34	26		
395	-7	19	41	51	53	49	40	30	18	8		
(ライン)												
テンプレート・サイズ 11×11 (ピクセル)												
	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276		
386	-2	0	4	13	25	42	58	70	75	77		
387	11	18	24	34	47	62	73	79	78	74		
388	27	37	45	55	66	77	82	80	72	63		
389	44	55	63	71	79	(85)	92	75	63	50		
390	56	67	74	79	82	82	75	64	50	38		
391	60	69	75	78	77	73	64	53	41	30		
392	45	54	60	64	63	59	51	42	33	25		
393	24	35	44	51	52	49	43	35	28	20		
394	7	19	30	38	41	40						
395	0	12	23	30	32	31						
(ライン)												

○: 最大値
△: 第2位の値

図-12 相関係数の分布(熊野灘)

の場合を除き、テンプレートのサイズが大きくなるにつれ相関係数が小さくなるものの、どのケースも同一点で相関係数が最大となっていることが分かる。

3×3 では、相関係数の最大値が第2位の値の点と離れており、また第2位の値は他のケースと違い、多数分布している。これは、テンプレートのサイズが小さすぎたため、テンプレート内に水温分布パターンの特徴をうまく捉えることが出来ず、同様のパターンが多数存在したためと考えられる。この場合、最大値の位置が第2位以降の値が分布している場所と明らかに離れているた

め、前述したように最大値をエラーとみなして、第2位の点をテンプレートの移動先と特定した(ここでは、第2位の値が多数分布しているため、その重心点を移動先とした)。その結果、3×3 の場合のテンプレートも、他のサイズのテンプレートとほぼ同一の点に移動した。

以上の結果より、テンプレートのサイズについては、水温フロントを明瞭に捉えるように設定すれば、ほぼ同様の解が得られることが分かった。しかし、テンプレートのサイズを小さくとりすぎると、水温分布パターンをうまく捉えられず、テンプレートの移動先を特定できない場合がでてくることが分かった。

6. おわりに

気象衛星 NOAA/AVHRR のデータを用いて、わが国周辺の3つの海域を対象にテンプレート法を適用した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 福島沖では、テンプレート法より求めた沖合い流動と同時期の沿岸実測結果との間に、定量的に見て良い対応が得られた。また、テンプレートのサイズが 27×27 の場合の方が 51×51 の場合と比べ、より細かな流動が推定された。
- (2) 日本海対馬暖流域では、約12時間間隔と約24時間間隔の画像を用いて解析を行い、12時間間隔の画像による水塊の移動ベクトルを合成して得られた移動ベクトルは、24時間間隔による結果と良く一致した。これより、12時間と24時間の画像間隔では、水温分布の変形の影響は無視できるものと推測できた。
- (3) 熊野灘において、テンプレートのサイズを5通りに変化させ解析した結果、水温フロントをうまく捉えるようにテンプレートを設定すれば、サイズに関係なく、ほぼ同様の解が得られた。

以上、わが国周辺の広域流動を、NOAA/AVHRR の海面水温分布画像を用いて、テンプレート法により推定できる見通しを得た。

参考文献

- 香西克俊・土屋 清 (1989): NOAA/AVHRR 単一画像による黒潮表層流動ベクトルの評価, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 99-100.
- Emery, W. J., A. C. Thomas, M. J. Collins, W. R. Crawford and D. L. Macks (1986): An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images, J. Geophys. Res., 91, pp. 12,865-12,878.
- Kelly, A. K. (1989): An inverse model for near-surface velocity from infrared images, J. Phys. Oceanogr., 19, pp. 1,845-1,864.