

## 衛星熱赤外面像による黒潮流路変動の解析手法

戸田 孝\*

### **A method for analysis of the variation of the Kuroshio path using satellite thermal imagery**

By

**Takashi Toda\***

#### **Abstract**

In order to describe the variability of the Kuroshio based on satellite thermal observation, a methodology to find out the sharp front at the coastal-side edge of the warmest area along the Kuroshio in each thermal image (the "Kuroshio surface front") which is useful for quantitatively and statistically analysis is presented. A system to analyze an NOAA satellite thermal image offered in the form of magnetic tapes based on the above mentioned methodology was also developed on a workstation installed for image processing. By using this system with the images observed from February, 1990 to March, 1991, we successfully recognized the transition of the pattern of the paths of the Kuroshio in the summer of 1990. We also found that the path in the regions south of Shikoku Island and off the Bōsō Peninsula is more stable than those in other regions. There are two major remaining problems: One is that a subjective selection is required to select the Kuroshio surface front from the amount of fronts found in imagery, and the other is that only a slight portion of the data is useful because of the weather conditions.

**Key words** : Kuroshio, IR imagery, satellite imagery

キーワード : 黒潮, 赤外面像, 衛星画像

---

\*気圏・水圏地球科学技術研究部, 気候変動影響評価研究室 (現在, 滋賀県教育委員会琵琶湖博物館開設準備室)

†Climate Change and Impacts Laboratory, Atmospheric and Hydrospheric Science Division (Now at Lake Biwa Museum Project Office, Shiga Prefecture Board of Education)

## 1. はじめに

黒潮は北太平洋亜熱帯循環の西岸境界流であり、陸棚・沿岸域の物理過程に対して擾乱源・熱源・エネルギー源として作用し、ひいては沿岸における水位変動や気温湿度変動に大きく影響していると考えられる。このような黒潮の作用が具体的にどのような形でなされているかを知るためには、黒潮の挙動を空間的に100km以下、時間的に数日以下という陸棚・沿岸現象のスケールで知ることが必要である。しかし、従来の経常的船舶観測はこのような目的には分解能が不足しており、より高分解能の新しい観測手法、例えば衛星熱赤外観測を利用する必要がある。

このような背景に基づいて、筆者は人工衛星NOAAの観測画像を例にとって衛星熱赤外観測画像を用いて黒潮の微細変動を解析する方法論についての研究を進めてきた。その全体像は戸田ほか(1993)に報告した通りであるが、本論文では、そのうち実際に画像を用いて解析を進めるにあたっての問題点について、戸田ほか(1993)では漏れた技術的な問題に重点をおいて論ずる。

## 2. 黒潮表面前線とは

熱赤外画像では夏季を除いて黒潮流の付近に最高水温帯が見出されるのが通常である(Fig.1aの黒い部分)。最高水温帯の岸側(北西側)には通常明瞭な水温前線が見出される

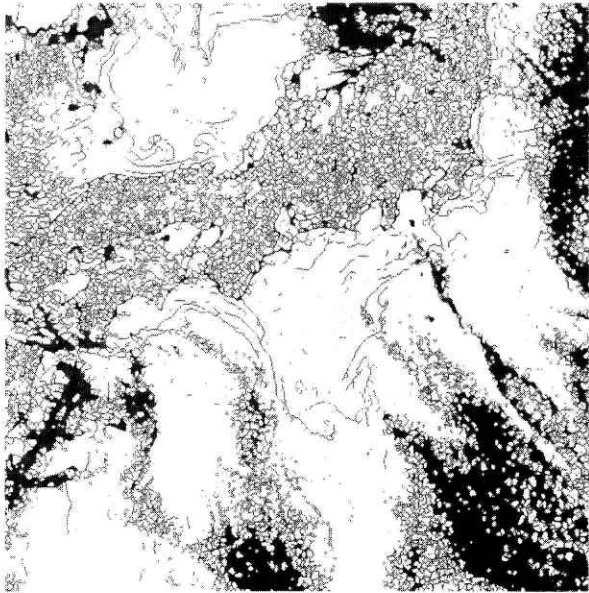


図1 黒潮表面前線の検出例。  
(a)1990年3月13日に観測された原画像。

Fig.1 An example of identifying the surface Kuroshio front.  
(a)Original thermal image observed in March 13, 1990.



(b) 図面aから得た勾配画像.  
(b) Gradient image established from panel a.



(c) 図面bの尾根筋として検出した前線.  
(c) Front detected as ridge lines in panel b.

(Fig.1b,cで検出された線, Plate 1の赤線付近)が, 沖側(南東側)には見出されないことが多い. 黒潮流が地衡流の関係を満たしているとすれば, 黒潮の南東側には軽い水即ち暖水が存在するはずであるから, この北西側の前線が明瞭であることは黒潮流の存在と関係しているであろう. 本研究では簡便のため, これを「黒潮表面前線」と呼ぶ.

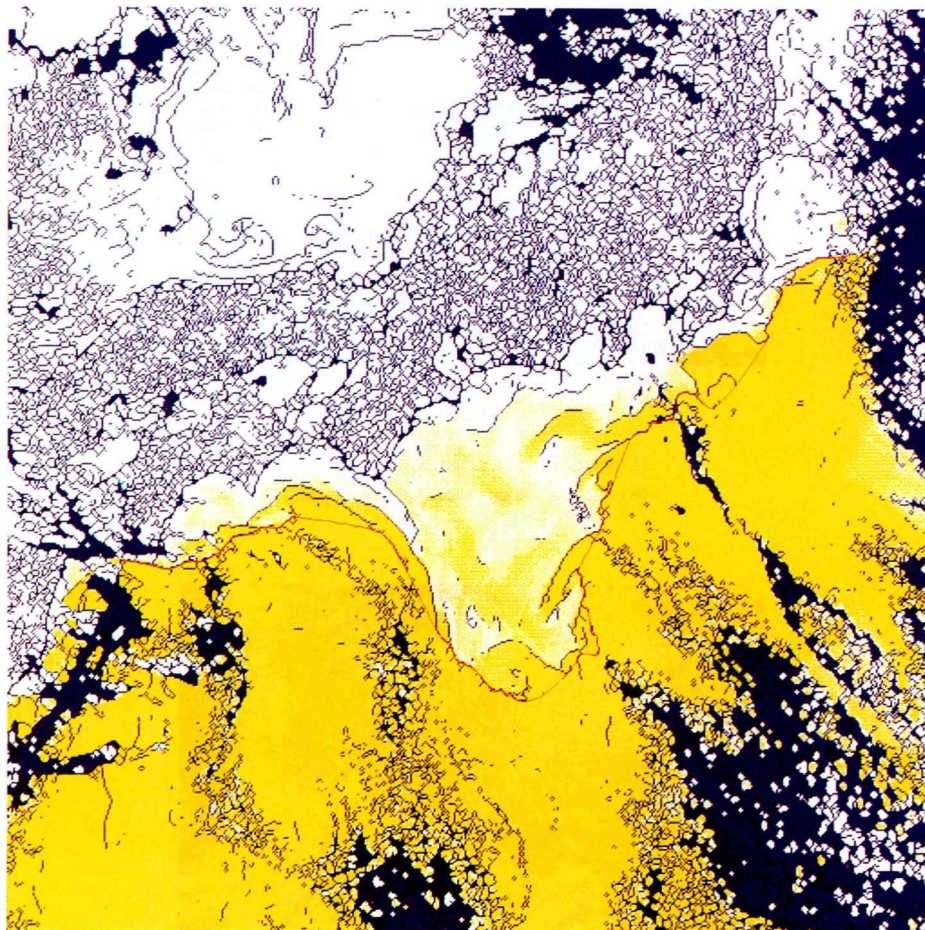


写真1 Fig.1a(黄)とc(青)を重ねたうえ, さらに黒潮表面前線(赤線)を重ねたもの.

Plate 1 An overlap of Fig.1a (yellow) and c (blue) together with the surface Kuroshio front (red line).

水温前線という言葉は水温勾配が最大となる位置を意味するものであるから、画像上の輝度値勾配の大きい部分を境界と定義する画像処理のエッジ検出の手法によって求めることができる。このようにして求められる前線は決して1本の連続な線ではなく、前線に沿って渦が発生すると、そこで不連続な線に分割される。ある場所で複数（通常2本）の前線が平行に存在する場合には、そのうち沖側のものが上流に、岸側のものが下流に続いており、沖側の下流側や岸側の上流側は徐々に弱くなってやがて消滅していることが多い。

このうち、どれを黒潮の指標として利用するかが問題となるが、戸田ほか（1993）に従って、なるべく沖側の前線を用いることにする。沖側の前線が弱過ぎて検出困難になる位置よりさらに下流側では、概ね等温線に沿って延長すると自然に岸側の前線に合流することが多いので、合流点まではこのようにして延長したものをを用いることにする。

戸田ほか（1993）は、この黒潮前線が、黒潮挙動の指標として従来から利用されてきた「流軸」とどのような関係にあるかも検討した。流軸という言葉の本来の意味は黒潮の強流帯の中心、即ち最強流が存在する位置である。しかし、通常の船舶観測でこの位置をいつも正確に求めることは不可能なので、最強流と最もよく一致する水面下200mでの等温線を経験的に求め、これを流軸の実用的定義としている（Kawai, 1969）。

戸田ほか（1993）によると、前線と流軸の対応関係に海域差があることに注意しさえすれば、黒潮表面前線を黒潮流路推定のための指標として利用可能である。そして、東シナ海や続流域では、船舶観測で検証できる限りでは両者の対応関係がほぼ一定であるので、指標としての精度は船舶観測の分解能（15km）未満であると結論できる。また、日本南岸域では両者の対応関係が変動するので、指標としての精度はこの対応関係の変動の程度（50km）未満であると結論できる。

### 3. 解析方法

解析に用いたシステムはインターナショナルイメージシステム（IS）社製の画像処理装置 SYSTEM 600 Version 4.0である。ハードウェア構成としては、全体の統轄はSunワークステーションで行い、標準的な周辺機器の他に、画像表示と座標入力のための装置IVASが接続されている。ソフトウェア構成としては、SunOSの基本システムの上に、標準的な諸ツールの他IVASの制御を含む画像処理ソフトウェアがインストールされている。

用いたデータは、気象庁の気象衛星センターで受信して日本気象協会が頒布している、1/2 inchの磁気テープに収められた、未処理のNOAA-HRPTデータである。

#### 3.1 幾何補正と輝度補正

幾何補正および輝度補正のためのシステムはSun-Fortranで新たに開発した（Fig.2）。但し、

幾何補正に必要な軌道計算の最も本質的な部分は、既にACOS用に開発されていたものを移植して用いた。幾何補正に先立って、まず元のデータテープに含まれている時刻情報と別に入手した軌道情報とから軌道計算を行う。同時に較正情報を読み取って、実際のデータの較正に使うための前計算を行っておく。この時、ディスク容量に余裕(20MBytes以上)があれば、目的とするチャンネルのデータのみ取り出してディスクに保存しておく。

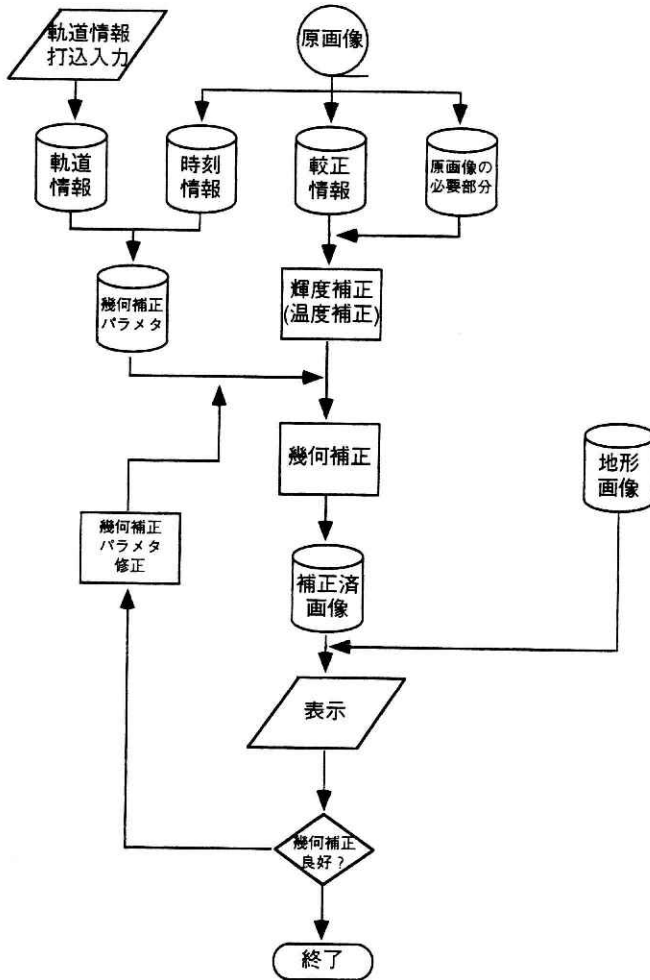


図2 幾何補正と輝度補正のデータフロー  
Fig.2 Data flow of the geometric correction and brightness correction.



引続いて軌道計算と校正情報前計算との結果を利用して、目的のデータを温度値（大気補正前の値）に変換しながらMercator図法の地図上に再配置する。この作業は専らテープを読む時間に律速されており、1画像の処理に10分程度かかる。ディスク容量に余裕が無い場合は、テープを2回読むことになるため巻戻し時間も含めて2倍以上の時間を要する。

ここで、幾何補正結果をIVAS上で確認する。これは、軌道情報にかなりの誤差が含まれていて、衛星の進行方向に数十kmのズレを生ずることがあるからである。別に用意されている地形画像と照合して目視でズレの程度を求め、その値を入力して幾何補正を再実行する。この場合、ディスク容量に余裕が無ければ更に1回テープを読み直す時間を要する。

### 3.2 前線検出

前述したように、画像処理のエッジ検出の手法を利用して勾配値の大きい場所を前線と定義する。勾配値の算出法にはいくつかの方法が提案されているが、ここではCornillon and Watts (1987) に従い、最もよく使われているSobelフィルターを用いた。SobelフィルターはSYSTEM 600のソフトウェアに標準で用意されている。Fig.1aに対する演算結果はFig.1bのようなものになる。

演算結果は画像情報なので、これを線情報に縮退させる。なるべく勾配値の尾根筋にあたる線を用いるのが望ましいので、敷居値処理と細線化処理を反復的に施すこととした。即ち、敷居値処理で得た2値画像を細線化処理の手法で1画素だけ収縮させ、それと敷居値を1だけ上げて得た2値画像との和集合をとってまた収縮させるという手順を繰り返して、線を求める。この計算のためのソフトウェアは、Sun上のC言語で自作した。計算にはワークステーションにかかる負荷に依存して5分ないし10分を要する。

線情報化の結果は初期敷居値に依存し、その値が小さいほど細かい微妙な前線まで捉えることができるが、不必要に細かくすると目的とする強い前線が見にくくなる。そこで、前もってIVAS制御ソフトウェアのLevel Slice機能を用いて、目的とする前線上の勾配値の下限を求めておき、これを初期値とする。Fig.1bに対する線情報化処理の結果がFig.1cである。

### 3.3 前線選択

最後に、多数の前線の中から、黒潮の指標として適切な前線を選択し、更に渦によって前線が不連続になっている部分を延長補間せねばならない。

この操作を少しでも客観的に行うため、以下のような手順を用いた。まず、抽出した前線のうち、黒潮流に対応していると考えられるものを選び出し、これを3次spline関数で近似した。spline関数の制御点は30km程度の間隔でとり、前線の形状がなるべく再現できるようオペレータの指示で位置を微調整した。そして、前線が弱くて検出困難な部分については、両側のspline関数を接続することにより補間推定を行った。補間距離は100km程度までに制限

した。この作業はSYSTEM 600のIVAS制御ソフトウェアで行うことができる。Fig.1cに対するこの操作の結果がPlate 1の赤線である。

この方法は目視に頼っているという点では主観的な要素を含んでいるが、勾配演算の結果に基づいているという意味においては完全な目視よりは客観的な手法であると言えるであろう。なお、この作業には熟練したオペレータでも1画像あたり約10分を要する。自動化不可能で人手を介して処理せねばならない作業としては最も時間を要する手順であり、このシステムの最大の律速要因となっている。

なお、雲のため短い区間で前線が検出できなかった場合の補間も同じ操作で行うことができるので、あわせて行った。

#### 4. 解析の実例

NOAA-11号の11 $\mu$ バンドの熱赤外画像のうち1990年2月下旬から翌年3月上旬までの1-2日おきの270シーンを解析し、そのうち57シーンについて200km以上にわたって黒潮表面前線を抽出することに成功したが、その全てを重ねて表示したのがFig.3である。この図からは黒潮蛇行の頂点が2ヵ所に集中していることが見て取れるが、そのうち西側のもの(矢印B)は2-5月のもの、東側のもの(矢印C)は10-3月のものである。水路部の海洋速報によると、8月ごろに蛇行の頂点が東へ移動して蛇行パターンが二谷(1969)の分類に言うB型からC型へ移行しており、Fig.3の傾向と一致している。

さらに微細な黒潮変動を解析するため、平均流路にはほぼ直交する測線Fig.3の実線のようにとり、その上での表面前線の平均位置からの変位の標準偏差 $\sigma$ を算出したのがTable 1である。 $\sigma$ が小さいほど流路は安定していることを示している。算出は蛇行パターンがB型の時期(期間B)とC型の時期(期間C)の各々について、および双方を含む全期間について行った。なお、平均位置を各期間について独立に求めているので、全期間の標準偏差は期間BおよびCにおける標準偏差の加重平均とは一致しない。

Table 1によると、表面前線の位置が最も安定しているのは四国沖の測線7であり、それに都井岬沖の測線5が続く。この海域は黒潮がTaylor-Proudman則に従い等深線に沿って安定的に流れる傾向があると考えられる海域であり、Table 1の結果はこの考え方に合致する。この2測線の間にある測線6があまり安定でないのは話が合わないようだが、これは31例中5例においてこの測線付近で小蛇行が発生しているからである。この5例のデータを除いて再算出すると約15kmとなり、測線5および7と同程度となる。また期間Cにおいては、流路が曲率を小さく保ったまま離岸していく測線8および9においても四国沖に準ずる程度に安定していることは興味深い。

これと並んで目を引くのは、犬吠埼沖の測線12で非常に安定していることである。この測



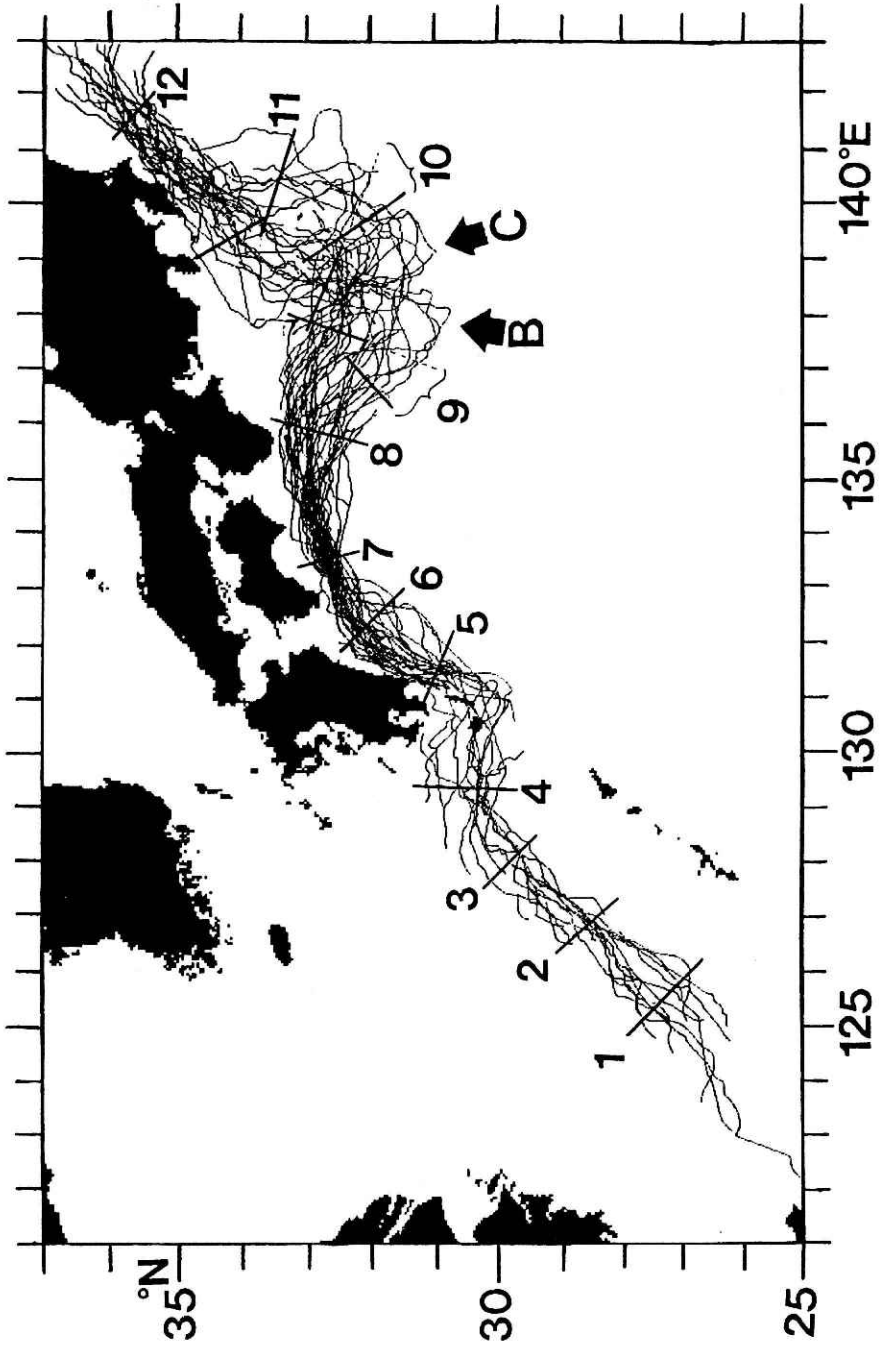


図3 1990年2月から1991年3月までの利用可能な全てのデータから得た黒潮表面前線を重ね合わせたもの。数字を付した線は、Table 1で用いた測線。

Fig.3 Superimposition of the surface Kuroshio fronts established from all available data from February 1990 to March 1991. The numbered lines denote the sampling line used in Table 1.

表1 Fig.3に示す測線上における，黒潮表面前線の位置の平均位置からの変位の標準偏差 ( $\sigma$ ，単位 km)．但し， $N$ は有効データ数を意味する．測線9，10および11は期間Bと期間Cとで異っていることに注意．

Table 1 Standard deviation ( $\sigma$ ) in kilometers of the surface Kuroshio front from its mean position on the lines shown in Fig.3, where  $N$  denotes available data number. Note that lines 9, 10, and 11 in term B and those in term C are different from each other.

Line No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\sigma$ in term B	34	21	28	26	21	20	13	24	28	29	34	16
$\sigma$ in term C	29	24	15	30	13	31	11	18	23	39	49	20
$\sigma$ in the whole term	33	23	23	29	17	26	13	32	-	-	-	18
$N$ in term B	3	5	4	6	9	15	16	17	14	14	13	10
$N$ in term C	9	6	4	9	12	16	17	20	21	16	11	11
total $N$	12	11	8	15	21	31	33	37	35	30	24	21

線は黒潮流が蛇行を経て再び房総半島の沿岸地形に接近する海域にあるため，測線4や6と同様にTaylor-Proudman則に基づく地形の規制を受けている可能性がある．一般には二谷(1969)の分類にいうD型蛇行流路など房総半島にそれほど近付かない流路パターンも存在するので，そのような場合には黒潮流は地形に規制されず，このように安定してはいない可能性がある．この点は長期間のデータを解析することによって検証していく必要がある．

東シナ海においては，測線2および3に比較して上流の測線1において不安定であることが目を引く．Qiu and Imasato (1990)は，黒潮流が東シナ海の陸棚域へ突入する時に発生する擾乱場によって台湾北東部の黒潮分枝流などが産み出されることを数値実験により示した．測線1ではこのような擾乱の影響が残っているのかもしれない．

## 5. 問題点

### 5.1 黒潮表面前線の選択判断

解析方法の章の末尾でも述べたように，現在のシステムでは勾配演算結果から自動的計算によって求めた数多くの前線の中から目的の前線を主観的判断によって選び出さねばならない．この作業には当然熟練が必要であるし，時間も多く費やす．また，特に発達初期の渦が存在したり，黒潮本流が雲に隠れていたり，あるいは大蛇行の先端部で渦の様相が複雑になっていたりすると，処理結果がオペレータの判断に大きく依存することになる(戸田ほか，1993)．このことはこの手法を利用して多数の画像から黒潮の変動を解析していくうえで大きな障害となろう．

## 5.2 データの利用可能性

Fig.3を作成するために270例のデータを用いたが、そのうち前線検出成功例はわずか57例であった。この低成功率には2つの原因がある。ひとつは、夏季（7-10月）には海表面水温が冬季に比べて一様となる傾向があるために前線検出が非常に困難となり、特に8-9月には成功例は皆無となることである。これは熱赤外観測の本質的限界ともいえる問題であり、その克服には水色など他のデータの利用が必要である。

但し、データ数が少ないため本論文では統計解析の対象としなかったが、Fig.3の範囲外にあたる続流海域の画像では夏季にもいくらかの検出成功例がある。続流海域は黒潮が低温の親潮系海水と接する部分であり、大きな水温差が存在している。このような海域では夏季でも赤外画像がうまく利用できる可能性は高い。

低成功率のいまひとつの原因は、海面が雲に蔽われていて見えない例が多いことである。このうち、海域が一面雲に蔽われていて全く水温がわからない場合はどうしようもないが、実際には海域に筋状の雲が分布していて雲の隙間から水温分布が垣間見えるという状況も少なくない。

この場合、主観的には「このあたりに前線がある」と推定できることが多いが、本研究で用いた方法ではエッジ検出演算が雲と海との境界に強く反応してしまっていて使えない。従って本研究の解析法の改良として、適切な雲域除去・データ補間によってこのような画像も扱えるようにするということが考えられる。

## 6. 結 論

黒潮の変動を記述するのに適切で、かつ衛星熱赤外画像から検出可能な指標として、黒潮表面前線を利用することを提唱した。解析の実例として、1990年2月から1991年3月まで約1年間のデータの解析を試みた結果、1990年夏に発生した黒潮流路パターンの変遷を捉えることができた。また、黒潮流路が四国沖および犬吠埼沖において他の海域に比べて安定していることを明らかにした。

手法上の最大の問題点は、複数に分れている前線の中から1本を選び出す手順を主観的判断に頼っているということである。また、夏季のデータはうまく利用できなかったが、この点は水色画像などの利用によって改良できると期待される。

黒潮の変動が気候や沿岸水位に及ぼす影響を定量的に記述する上でも、その流路のより客観的な捉え方が今後も求められるであろう。

## 謝 辞

本論文で述べた内容は、筆者が平成3年度科学技術特別研究員として防災科学技術研究所

において実施したものであり、その遂行にあたっては、同研究所気圏・水圏地球科学技術研究部の竹田部長（当時）を始めとする諸氏に多くの貴重な助言をいただいた。また、本研究の一部は同研究所「地球温暖化」特別研究（海面上昇）との共同研究として行った。なお、幾何補正に利用したACOS用軌道計算プログラムは矢崎主任研究官より提供を受けたものである。

#### 参考文献

- 1) Cornillon, P. and D. R. Watts (1987) : Satellite thermal infrared and inverted echo sounder determinations of the Gulf Stream northern edge. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 4, 712-723.
- 2) Kawai, H. (1969) : Statistical estimation of isotherms indicative of the Kuroshio axis. *Deep Sea Res.*, 16, suppl., 109-115.
- 3) 二谷穎男 (1969) : 最近数年の黒潮の変動について。水産海洋研究会報, 14, 13-18.
- 4) Qiu, B. and N. Imasato (1990) : A numerical study on the formation of the Kuroshio Counter Current and the Kuroshio Branch Current in the East China Sea. *Continental Shelf Res.*, 10, 165-184.
- 5) 戸田孝・今里哲久・竹田厚 (1993) : 衛星熱赤外面像による黒潮流路変動の解析, 海の研究, 2, 1-13

(1993年7月19日 原稿受理)