

対馬暖流における冷水塊の衛星リモートセンシング

長崎大学大学院海洋生産科学研究科	学生員	湯藤 義文
同上 工学部	正会員	後藤恵之輔
九州大学応用力学研究所		川建 和雄
福岡県福岡水産試験場		三井田恒博

1. まえがき

日本海の海流で最も顕著な海流は、対馬暖流であり、黒潮からの分岐流である。九州西南沖合で黒潮主流から分離した暖流は九州西方を北上し、五島列島西沖から対馬海峡を経て日本海へ流れ込む。九州大学応用力学研究所¹⁾においては、昭和58年夏から対馬東水道において対馬暖流の測流を行い、夏期における本海流の短期移動と冷水域の存在を明らかにしている。しかし、この測流は定点観測によっているため、黒潮に比べて、流量、流速とも小さく、変化が大きい対馬暖流においては、観測点における海中の鉛直情報は得られるものの、広域にわたる立体情報を詳細に把握することはきわめて難しい。

衛星リモートセンシングによるデータ解析は、精度等の問題はあがあるが、反復広域観測が可能であるので、変化しやすい対馬暖流域の観測に適していると考えられる。

そこで本研究では、人工衛星データを用いて、対馬東水道及び周辺海域の海面温度分布を求め、対馬暖流における冷水塊の存在をさらに解明するものである。衛星データには極軌道気象衛星NOAAのAVHRR（改良型超高分解能放射計）データを使用し、観測日は定点観測が行われた期間に合わせた昭和60年7月15日と、他の時期として春期である昭和61年3月6日、昭和63年4月14日とする。

2. 冷水塊の探査目的

冷水塊の探査を行う必要性の背景としては、2つのことがある。1つは冷水塊が水産業に大きな影響を与えることにある。その例として、4年前の九州南東海における黒潮の蛇行現象²⁾である。これは図-1に示すように、発生した冷水域によって、黒潮が大きく南方へ蛇行したもので、この蛇行現象のために、南九州の漁業に大きく影響した。特にイワシやスルメイカの漁獲減少が起こった。また他の例として、隠岐海嶺における海中の密度成層面に発生する内部波現象^{3), 4)}である。これは、対馬暖流が潮汐流と合成されることによって、迂回する流速は変化を起し、日本海固有冷水が30m位上がったたり下がったりする現象が起り、図-2のように冷水塊が陸棚へ打ち上げられる。これにより、タイ等の底層魚が内部波のフロントに追われる現象など、行動に影響を与えるようである。そうするとタイ等の漁場は、このような陸棚の上部が良いことになる。これらのことから、冷水塊の存在を確認することによって、適切な漁場を判断あるいは示唆することが出来るものと考えられる。

もう1つの背景としては、海洋温度差発電(OTEC)の設置場所を判断することにある。海洋温度差発電とは、海水の表層部と深層部との温度差を利用して、電気エネルギーを得るシステム⁵⁾で、図-3にその原理を示す。これは、蒸発器の中に低温で蒸発する物質を入れておき、この物質を温かい表層水で加熱して、液体は蒸気になる。この蒸気によってタービンを回転させ、さらに蒸気は凝縮器に入り、冷たい底層水によって液体に戻る。

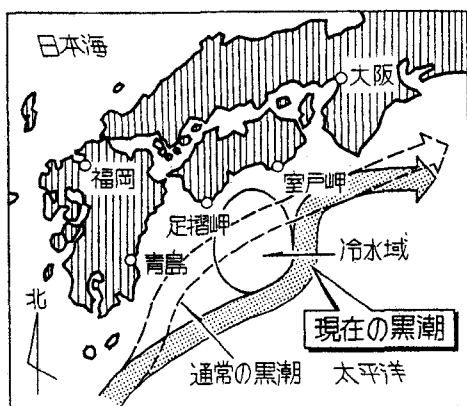


図-1 黒潮の蛇行現象²⁾

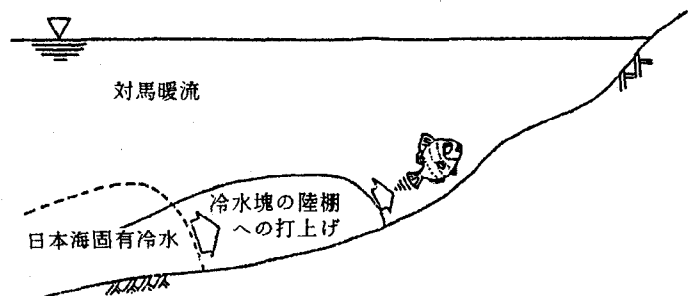


図-2 内部成層面の波動⁴⁾

これを繰り返し行う。しかし海洋温度差発電は、温水と冷水の温度差が 20°C 以上必要であるため、日本近海では、無理であると言われている。そのため、冷水塊の存在を確認することによって、この海洋温度差発電が少しでも可能な海域を発見することが出来るのではないかと考えられる。

3. 解析の準備

3. 1 解析対象海域⁶⁾

解析は 図-4 に示すように対馬東水道の最強流域(対馬-壱岐間)を含む海域を対象とした。図中の●印は昭和58年度に実施した定位置測流点($T_1, T_2, \dots, T_5$)を示す。観測期間は昭和60年度の場合、7月8日から9月3日までの58日間である。

図-4の測線AとBは、流速計の設置航海時において水温と塩分の鉛直断面分布を計測したラインであり、測点間隔は4.8kmである。一例として、図-5に測線Bにおける水温の鉛直断面図を示す(ただし、この図は昭和58年7月28日観測のもの)。

この図によれば、水温 15°C 程度の冷水域は夏期の初めごろに生じやすいが、その理由は九州側の水深が浅いため加熱期に入ると急速に昇温するからである。

3. 2 探査のための手法

本研究の探査方法は、人工衛星のデータを用いて解析するものであるが、このデータだけでは、水温の海面温度しか判断できない。

そこで、このデータを用いて冷水塊の存在を知るためには、次のことが考えられる。ここで図-5を見てみると、対馬寄りの海面温度が低いことが分かる。これは、この海域では底層水が循環流のような流れにより、湧昇現象の様なことが起こり、対馬東水道の最深部(深さ100m前後)における水温 15°C 程度の冷水が、上昇するのではないかと考えられる。図-5でも分かるように、いわゆる「水温の押し上げ現象」によって、このような海面温度差が出来るものと考えられる。故に、人工衛星で海面温度を探査することによって、冷水塊の存在を確認できることになる。

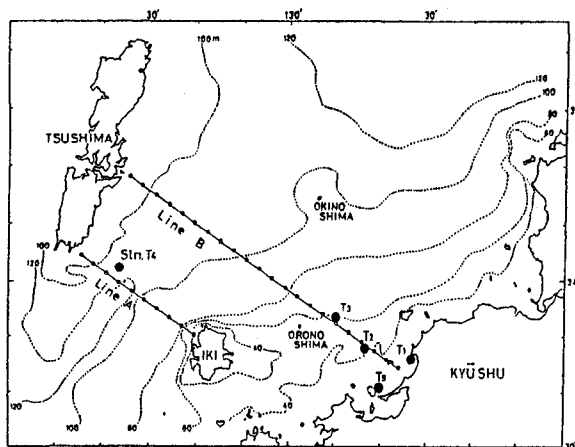


図-4 対象海域¹⁾

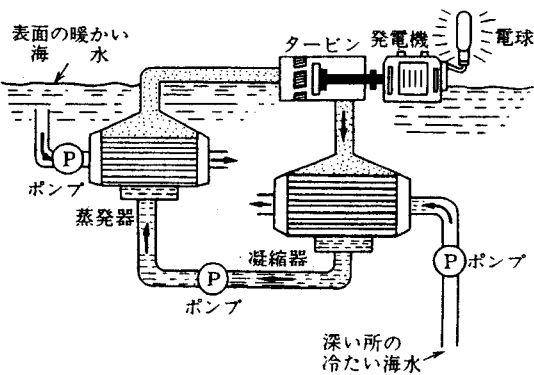


図-3 海洋温度差発電の原理⁵⁾

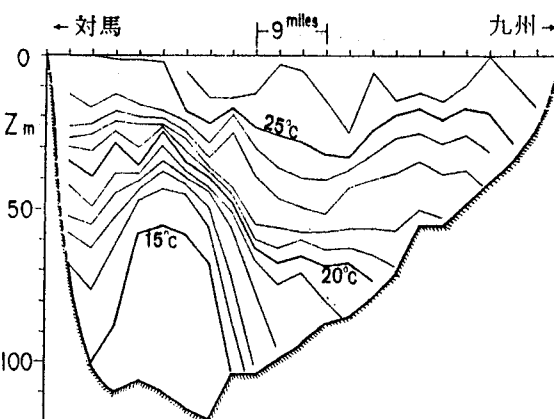


図-5 水温鉛直断面図(昭和58年7月28日)¹⁾

4. 衛星データの概要

4. 1 NOAA衛星

現在運用されているNOAAシリーズの衛星は、米国で極軌道衛星として開発された、第3世代の気象衛星である。その目的は、静止気象衛星と相補い、気象予報・警報、海洋・水理業務、宇宙観測に改良された資料を提供することにある。1978年10月にTIROS-Nが打ち上げられて以来、NOAA 6, 7, 8号が次々と打ち上げられ、現在は、1984年8月に打ち上げられた9号が稼働中である。

このシリーズは、常時2個の衛星により観測が行われるようになっており、太陽同期で互いに逆方向にしかも互いに直角の軌道面を保ちつつ円形軌道をまわっている。

4. 2 使用データ

T I R O S - N / N O A A シリーズに搭載しているミッション機器のうち、本解析では、A V H R R のデータを利用する。使用したデータは昭和60年7月15日午後2時28分（日本時間）、昭和61年3月6日午前5時47分（同）と昭和63年4月14日午後10時55分（同）、いずれもN O A A 9号により観測されたものである。A V H R R は従来のN O A A シリーズに搭載された高分解能放射計（V H R R）の改良型で、表-2に示すように可視・赤外波長域に5チャンネルの観測波長帯域をもつ。

この中で、チャンネル1（可視）においては、雲、氷、雪等の識別に使うことができる。チャンネル2（近赤外）は、海岸線、雪、氷、結氷・解氷の識別に役立つ。チャンネル3（中間赤外）は従来の赤外バンドに近いもので、海面及び陸、雲等の温度の測定に用いられる。チャンネル4（熱赤外）は、第2の大気の窓といわれるチャンネルであり、チャンネル3と同じ用途の測定に用いられるが、昼夜共に観測が可能である。チャンネル5（熱赤外）は、チャンネル4と同じ海面温度の測定に用いられる。いずれのチャンネルにおいても、分解能は1.1kmである^{6), 7)}。

A V H R R で測定されたデータは、衛星に搭載されているデータ処理装置（M I R P）によって、高解像度画像伝送（H R P T）の信号が作られる。H R P T データは、1698MHzと1707MHzで360本／分の標準ファクシミリにより位相変調のデジタル信号として地上局に送信される。データの読み出しは、地上受信局上空で指令により高速で行われるが、H R P T のデータは軌道一周分を記録できないので必要な地域のみとなっている。

表-1 N O A A - 9 / A V H R R の観測波長帯域⁶⁾

チャンネル	観測波長帯域(μm)	
1	0.58~0.68	可 視 光
2	0.725~1.10	近 赤 外
3	3.55~3.39	中 間 赤 外
4	10.5~11.3	熱 赤 外
5	11.5~12.5	

4. 3 海面温度の計算

本研究では、以上の5チャンネルのうち、夜間データも使えるチャンネル4の熱赤外データを用いて、海面温度を計算する。データは磁気テープ中に0~255の範囲の数値（C C T 値という）として入っており、海面温度はこのC C T 値から直接求めることができる。

しかし、このC C T 値よりそのまま海面温度の計算を行うと、実際の水温より低めに求められ、その誤差も一定でない。その原因は、海水のもつ物理温度と見掛けの輝度温度との間に差のあること、また大気を通過する間に大気中の水蒸気などの吸収媒体によって放射輝度エネルギーが減衰されることによる⁶⁾。しかし、本研究では海面温度の相対的分布を見るため、絶対値をそれほど必要としないことから、このような大気効果の補正は行わず、A V H R R データによるC C T 値をそのまま海面温度として扱うこととする。

5. 解析結果

5. 1 温度分布

解析対象地内の温度の最低、最高値をそれぞれ5℃及び30.5℃に設定する。このとき最低、最高温度はC C T 値でそれぞれ0, 255に相当するため、温度は $t(℃) = 5 + 25.5/255 \times C C T$ で計算される⁶⁾。

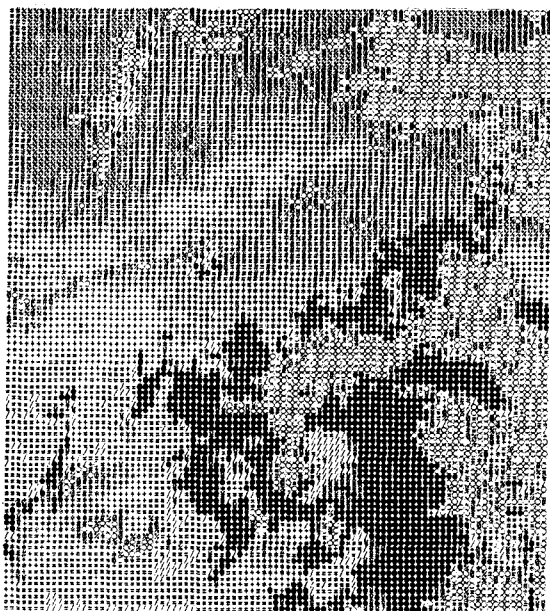
図-6に示すのは、温度を10段階に分け各レベルを記号で表したグレイマップである。C C T 値に対する各レベルの割り当てについて、夏期に当たる昭和60年7月15日のデータに対して相対的に低温な昭和61年3月6日と昭和63年4月14日のデータについては、あまり海面温度の差がないため、割り当ての範囲を細かくした。これらの図では、地形を明らかにするため、範囲を解析対象地だけでなく、南は長崎、熊本まで含んでいる。また、各記号は、ひずみが補正された3km平方の大きさである。以下に各データの温度分布を述べる。

昭和60年7月15日データ（図-6(a)）

最低温度（20.0℃以下）の○印は雲を表すようである。最高温度（24.1℃以上）の●印は陸地で、山口から福岡、佐賀、熊本にかけての内陸部は大半雲に覆われ、対馬の一部にも雲のあることが分かる。

昭和61年3月6日データ（図-6(b)）

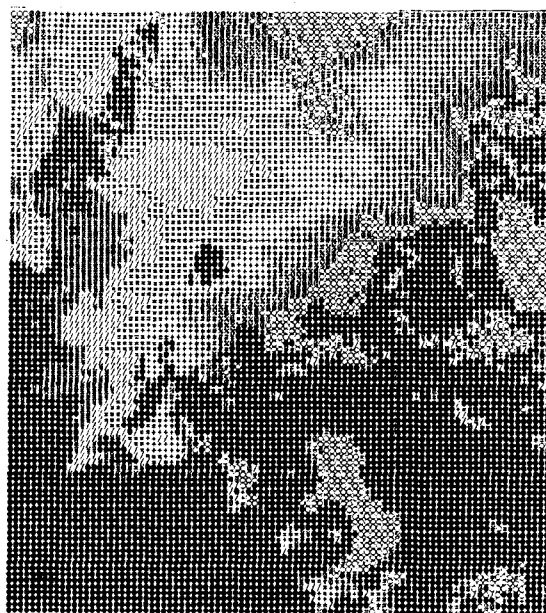
各レベルは、図-4の海域における海面温度の割り当てを考慮して、このような形とした。それ故、南方における高温域については、陸地と対馬暖流の温度が共に最高温度（16.0℃以上）の●印となっている。また、北方沖の○印で示す最低温度（15.1℃以下）は、雲を表す。



***** GRAY MAP LEVEL *****

No. 1 =	○	: 5.0 - 20.0℃
No. 2 =	@	: 20.1 - 20.5
No. 3 =	%	: 20.6 - 21.0
No. 4 =	#	: 21.1 - 21.5
No. 5 =	*	: 21.6 - 22.0
No. 6 =	+	: 22.1 - 22.5
No. 7 =	=	: 22.6 - 23.0
No. 8 =	/	: 23.1 - 23.5
No. 9 =	¥	: 23.6 - 24.0
No. 10 =	●	: 24.1 - 30.5

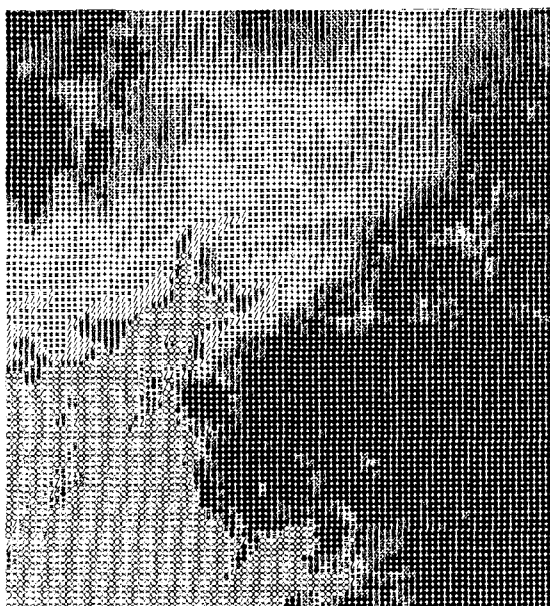
(a) 昭和60年7月15日



***** GRAY MAP LEVEL *****

No. 1 =	○	: 5.0 - 15.1℃
No. 2 =	@	: 15.2 - 15.2
No. 3 =	%	: 15.3 - 15.3
No. 4 =	#	: 15.4 - 15.4
No. 5 =	*	: 15.5 - 15.5
No. 6 =	+	: 15.6 - 15.6
No. 7 =	=	: 15.7 - 15.7
No. 8 =	/	: 15.8 - 15.8
No. 9 =	¥	: 15.9 - 15.9
No. 10 =	●	: 16.0 - 30.5

(b) 昭和61年3月6日



***** GRAY MAP LEVEL *****

No. 1 =	●	: 5.0 - 16.0℃
No. 2 =	@	: 16.1 - 16.1
No. 3 =	%	: 16.2 - 16.2
No. 4 =	#	: 16.3 - 16.3
No. 5 =	*	: 16.4 - 16.4
No. 6 =	+	: 16.5 - 16.5
No. 7 =	=	: 16.6 - 16.6
No. 8 =	/	: 16.7 - 16.7
No. 9 =	¥	: 16.8 - 16.8
No. 10 =	○	: 16.9 - 30.5

(c) 昭和63年4月14日

図-6 温度分布図

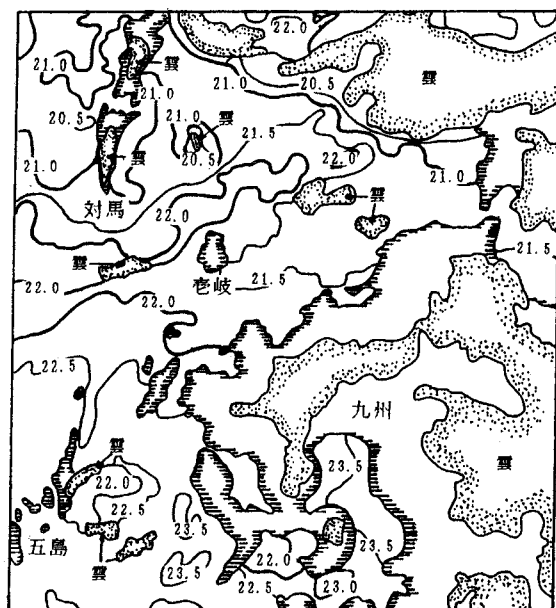
昭和63年4月14日データ（図-6(c)）

最低、最高温度の記号（●と○）が他のデータと逆になっているのは、陸地を分かりやすくするためである。南方では、陸地と対馬暖流との温度差がはっきりしていることが分かる。また、他のデータとは逆に、陸地より海面の温度の方が高いことも分かる。

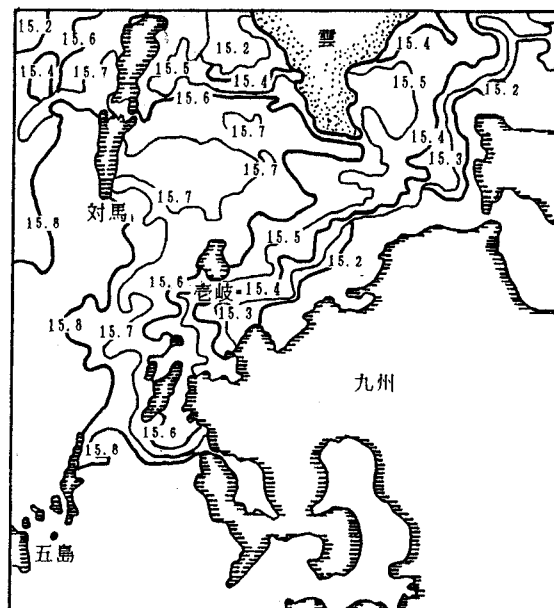
5.2 海面温度

図-7は図-6の温度分布図から作成した海面温度のコンター図である。図中の数値は温度（℃）を表す。両図から、どの観測日も海面温度は南の方が北より高く、その温度の高い海流（対馬暖流）が、対馬と九州に挟まれた対馬東水道に流入していく様子が分かる。

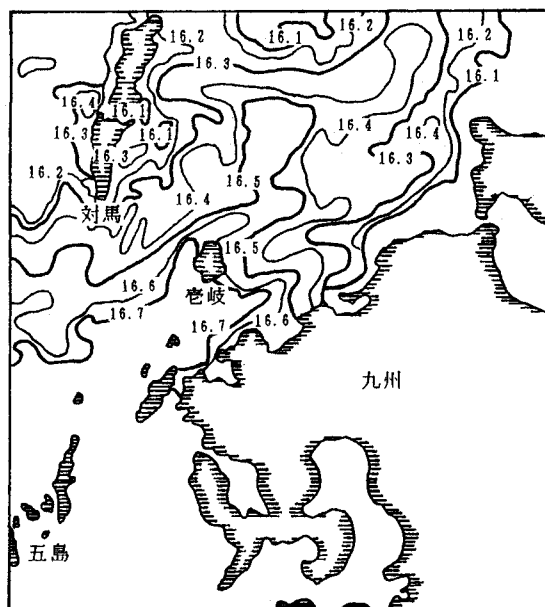
ここで、図-7を図-4の測線Bについて見てみる。まず、図-4に示す観測日と同じ時期に当たる昭和60年7月15日のデータから見ることにする。対馬寄りの海域に周囲より温度の低い箇所のあることが分かる。これは、雲の可能性を否定できない⁶⁾が、図-5の水温断面図と照合することにより冷水塊と判断できる。これを証明するため、測線B上の温度分布を図-8に示す。さらに図-8を図-5と対比することによって、両図とも対馬側



(a) 昭和60年7月15日



(b) 昭和61年3月6日



(c) 昭和63年4月14日

図-7 海面温度図

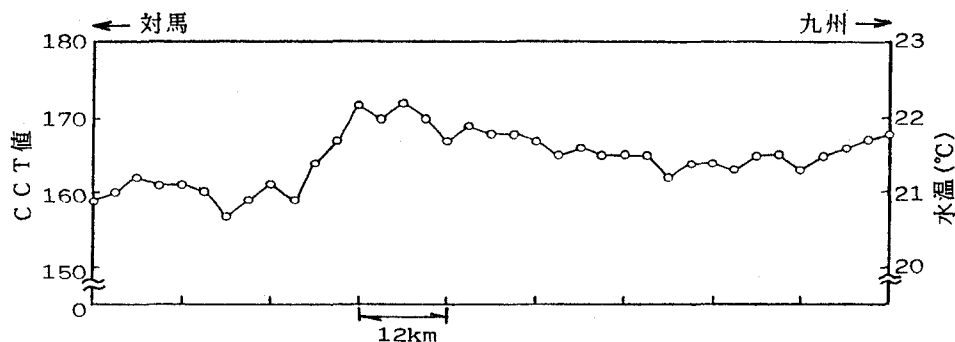


図-8 測線 B における海面温度分布図(昭和60年7月15日)⁶⁾

で温度が低くなっていることが分かり、以上より、冷水塊の存在を認めることができる。ただし、図-5は昭和58年7月28日、図-8は昭和60年7月15日の観測であり、観測日の相違に注意しなければならない。

さらにこの冷水塊周辺について、昭和61年3月6日と昭和63年4月14日の両データからも見てみる。

時期的な暖流の流軸のふれや蛇行性などの変化により、多少冷水塊の場所のずれは考えられるものの、図-7(c)の4月のデータからも、対馬寄りの海域に冷水塊が存在していることが分かる。

しかし、図-7(b)の3月のデータからは、この水域周辺における冷水塊の存在ははっきりしない。

この結果、この海域(対馬東水道)では、夏期の暖水期において顕著に冷水塊を発見できるのに対して、春期においては、この海域での最高と最低の温度差があまり大きくないために、冷水塊を発見することは難しい。

故に、人工衛星データを用いて冷水塊の存在を解明するためには、水温が低い時期よりも、水温が高い特に夏期のデータを用いるのがよいと考えられる。

6. あとがき

解析を行った NOAA データのうち、特に夏期のデータ(昭和60年7月15日)から、実測結果と合致する冷水塊の存在が認められた。また、冷水塊の存在を解明するには、この海域においては、海面の温度差が大きい夏期のデータを用いる方がよいことが分かった。

しかし、今回解析に用いたデータは、あくまでも夏期と春期のデータだけであるために、冬期や秋期のデータについても解析することによって、さらに新しい結果が生まれるのではないと思われる。今後の研究課題にしていきたいと思う。また、今回は図-4の測線 B について重点的に解析を行ったが、今後さらに範囲を広げて解析を行う必要がある。

今回使用した人工衛星データは、NOAA/AVHRR データであるが、それ以外に海面温度を把握できる人工衛星には、現在 LANDSAT/TM センサーや、我が国初の海洋観測衛星 MOS-1/VTIR センサーなどがある。NOAA/AVHRR データは、分解能が LANDSAT/TM データよりかなり劣るが(分解能 AVHRR=1.1km, TM=120m)、同一地域を1日に2回観測し、状況変化の激しい海洋の観測に適している。お互いに一長一短はあるが、NOAAとLANDSAT、MOS-1を併用することにより、さらに人工衛星データによる海洋観測における信頼性が増すであろう。

NOAAの問題点は、AVHRR データから計算される海面温度が、大気効果のため実際より低目であることにある。本研究においても、この大気効果を補正することなくチャンネル4で海面温度を求め、例えばチャンネル5との組み合わせによりこの補正は可能なようである。

いずれにせよ、衛星データを用いることにより、実測が点の調査であるのに対して、冷水塊の存在を面的に捉えることが出来ることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 水野信二郎・川建和雄・三井田恒博：対馬東水道と周辺海域における海洋観測，九州大学応用力学研究所報，第60号，pp.445～454，1984.
- 2) 西日本新聞：黒潮東へ300kmずれる(新聞記事より)，1986.9.
- 3) 中村 充：海のロマン—海洋開発，Chamber，1986.1/2，pp.48～56.
- 4) 水産工学研究所：水産工学研究の現況，1985.4.
- 5) 上原春男：海洋温度差発電読本，オーム社，pp.7～11，1982.7.
- 6) 後藤恵之輔・三井田恒博・水野信二郎・川建和雄：対馬東水道及び周辺海域における海面温度の遠隔観測，長崎大学工学部研究報告，第16巻，第27号，pp.161～164，1986.7.
- 7) 日本造船振興財団：人工衛星，JAFSAリモートセンシング資料，No.1，pp.38～43，1981.