

水鳥雅文*・片野尚明**・安達欣也***・大石みち子***

本研究の目的は、この MOS-1 衛星による海象観測の適用性を明らかにすることにある。具体的には、本衛星に搭載された各種センサーから得られる情報と、海上同期観測結果や他の衛星センサーによる観測結果との比較検討に基づき、各センサーの海面温度や海域の水質観測への有効性とその物理的推定精度を評価する。

MOS-1 衛星の諸元を表一1に示す。本衛星は、3種類の観測機器およびデータ収集システム用中継器(DCTS)を搭載している。この内、水質観測にはMESSR(可視近赤外放射計)、海面温度観測にはVTIR(可視熱赤外

軌道	種類	太陽同期率回掃軌道		
	高度	約 909 km		
	傾斜角	約 99 度		
	回掃周期	17 日 (西方移動)		
観測機	名称	可視近赤外放射計 (MESSR)	可視熱赤外放射計 (V T I R)	マイクロ波放射計 (MSR)
	観測波長域	Band 1: 0.51~0.59 μm	Band 1: 0.5~ 0.7 μm	Band 1: 23.8 GHz
		Band 2: 0.61~0.69 μm	Band 2: 5 ~ 7 μm	Band 2: 31.4 GHz
		Band 3: 0.72~0.80 μm	Band 3: 10.5~11.5 μm	
		Band 4: 0.80~1.1 μm	Band 4: 11.5~12.5 μm	
	距離分解能	約 50 m	Band 1 : 約 900 m Band 2~3: 約 2700 m	Band 1: 約 32 km Band 2: 約 23 km
約 100 km 両系運用時約 190 km		約 1500 km	約 320 km	

放射計)の活用が期待される.

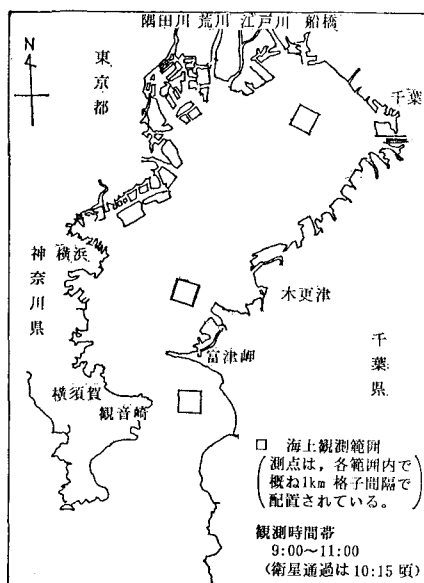
3. 水質観測への適用

3.1 解析対象データ

本研究で用いた MESSR データは、東京湾を対象とした 1987 年 10 月 13 日および 1988 年 6 月 7 日の、いずれも Path 70, Row 20, 1 系ハイゲインのデータである。

これに同期して実施した海上観測では、1)クロロフィル-*a*, 2) *SS*, 3) 透明度, 4) 水色の4つを主な測定項目とし、図-1に示す湾奥、湾央、湾口に設置した3つのエリアを中心にデータを取得した。

各観測日の海象・気象状況は、概ね次のようなものであった。10月調査時は、ほぼ快晴の状態であったが、波が高く風速も最大 10 m/s 程度であった。6月調査時は、若干の上層雲が認められると共に、海域では大規模な赤潮の発生がみられた。表-2 に示した各観測日の実測データの統計値からもわかるように、6月調査時には10月調査時に比べクロロフィル-*a* や SS の変動範囲がかな



図一1 東京湾における水質観測範囲

* 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
**		(株)三菱総合研究所	社会情報システム部	

表—2 水質観測結果の統計値

水質項目	観測日	測点数	平均	標準偏差	MIN	MAX
クロロフィル- <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)	87.10.13	48	14.004	10.529	1.6	33.0
	88.6.7	35	64.486	48.426	12.0	200.0
SS (mg/L)	87.10.13	48	3.215	1.581	0.9	6.6
	88.6.7	35	6.911	5.191	1.7	22.0
透明度 (m)	87.10.13	48	4.577	1.833	2.7	8.0
	88.6.7	35	2.158	0.628	2.0	3.3
水色 [*]	87.10.13	48	14.042	2.953	9.0	18.0
	88.6.7	35	18.714	1.100	16.0	20.0

* 測定水深は海面下0.5m。

り大きいことが特徴的である。

3.2 解析結果とその考察

まず、各観測データと MESSR・バンド1およびバンド2のデータとの単回帰分析を行った。表—3 にその結果を示す。MESSR データとの相関が認められた水質項目は、クロロフィル-*a*、SS および透明度の3項目であり、クロロフィル-*a*、SS については目的変数(観測値)を対数にとることにより高い相関が得られた。バンド別では各項目共にバンド2が比較的高い相関を示した。観測日で比較すると、全体として10月調査時よりも6月調査時の方が相関が高く、バンド1についてもある程度の相関が得られた。このことは、前述の表—2 で示した水質変動範囲の広さの相違に起因しているものと考えられ、MESSR が比較的大きい水質変動を捕えることに適していることを示唆している。

表—4 には、比較的高い6月の観測データを対象として、バンド1および2による重回帰分析結果を示す。各項目とも単回帰の場合よりも高い相関が得られ、両バンドを考慮することによりその推定精度が向上すると思われる。また、各項の係数値に着目すると、いずれの場合もバンド1にかかる係数は、バンド2の係数や単回帰の場合と逆符号となっていることがわかる。これは、バンド1がバンド2に比べ大気での散乱等の影響を受け易いため、式の上で大気補正的役割を果たしていると考えられる。

次に、MESSR による水質項目別の特徴抽出の可能性について検討するため、バンド1と2を用いた様々なモード(両者の比モード、和と差のモードおよび標準化モード)による相関係数を算出した(杉森康広ら, 1985)。表—5 に示す結果からわかるように、いかなるモードに対しても各項目はほとんど同程度の相関を有しており、こうしたデータ処理から項目別の特徴を明確化することはできなかった。この結果がセンサーの性能に起因するものか、東京湾の水質特性に起因するものかについては、他の海域での適用例等を加えてさらに検討する必要がある。

最後に MESSR による各水質項目の定量的推定精度について検討する。前述の表—3 や表—4 に示した回帰分析結果によれば、回帰式からの残差平均は観測日によりかなり異なる。クロロフィル-*a* および SS については10月調査時の方が6月調査時にくらべてかなり小さく、透明度ではその逆の傾向が認められる。これは表—2 に示した観測値の変動範囲の相違に起因していると考えられる。特にクロロフィル-*a* と SS については目的変数に対数をとっているため、高濃度領域では推定誤差が相対的に大きくなる。ちなみに6月の観測データについて、クロロフィル-*a* は $54.6 \mu\text{g/L}$ 、SS は 7.4 mg/L を境界値として、その前後のデータについて各々残差平均を算出した結果を表—6 に示す。境界値以下のデータから求めた残差平均は、10月調査時のものとほぼ同程度の値となっていることがわかる。

表—3 MESSR データによる単回帰分析結果

(1) 87.10.13				
水質項目	バンドNo	回 帰 式	相関係数	残差平均
クロロフィル- <i>a</i>	1	$\ln y = 0.393x - 11.718$	0.496	10.590
	2	$\ln y = 0.716x - 14.651$	0.755	10.751
SS	1	$\ln y = 0.187x - 5.60$	0.467	1.463
	2	$\ln y = 0.329x - 6.70$	0.685	1.332
透明度	1	$y = -0.59x + 25.35$	0.476	1.505
	2	$y = -1.04x + 28.95$	0.719	1.166
水色	1	$y = 0.500x - 3.500$	0.238	2.822
	2	$y = 1.275x - 15.818$	0.507	2.505

(2) 88.6.7				
水質項目	バンドNo	回 帰 式	相関係数	残差平均
クロロフィル- <i>a</i>	1	$\ln y = 0.154x - 5.963$	0.778	39.404
	2	$\ln y = 0.148x - 4.161$	0.859	31.582
SS	1	$\ln y = 0.127x - 6.48$	0.680	4.876
	2	$\ln y = 0.127x - 5.22$	0.778	4.434
透明度	1	$y = -0.12x + 9.68$	0.730	0.451
	2	$y = -0.11x + 8.11$	0.787	0.407
水色	1	$y = -0.064x + 22.83$	0.233	1.061
	2	$y = -0.050x + 21.44$	0.207	1.068

y: 水質値, x: CCT値

表—4 MESSR データによる重回帰分析結果

水質項目	回 帰 式	相関係数	残差平均
クロロフィル- <i>a</i>	$\ln y = -0.223B1 + 0.338B2 - 0.183$	0.896	23.910
SS	$\ln y = -0.279B1 + 0.355B2 - 0.237$	0.848	3.663
透明度	$y = 0.12B1 - 0.21B2 + 6.05$	0.803	0.400

y: 水質値, B1: バンド1のCCT値, B2: バンド2のCCT値

表—5 MESSR データによる各モードの相関係数

水質項目	$\frac{B1}{B2}$	$\frac{B1 - B2}{B1 + B2}$	$\frac{B1}{B1 + B2}$
$\ln$ (クロロフィル- <i>a</i>)	-0.629	-0.624	-0.624
$\ln$ (SS)	-0.550	-0.545	-0.544
透 明 度	0.670	0.666	0.665

表-6 MESSR による水質の定量的推定精度

(1) クロロフィル-a			
y:クロロフィル-a ($\mu\text{g/L}$)		$\ln y < 4.0$ ($y < 54.6$)	$\ln y \geq 4.0$ ($y \geq 54.6$)
単回帰	Band 1	9.875	56.595
	Band 2	9.183	44.902
重回帰		10.640	35.314

(2) SS			
y:SS (mg/L)		$\ln y < 2.0$ ($y < 7.40$)	$\ln y \geq 2.0$ ($y \geq 7.40$)
単回帰	Band 1	1.374	6.343
	Band 2	1.277	5.447
重回帰		1.243	3.742

4. 海面温度観測への適用

4.1 解析対象データ

本検証で対象とした VTIR データは、1987 年 4 月 27 日、同年 6 月 1 日、1988 年 6 月 7 日および同年 7 月 31 日の 4 シーンである。

トルースデータについては、各シーンの観測当日（7 月 31 日分はその前後の日を含む）の日本沿岸で観測された水温データを日本海洋データセンター（海上保安庁水路部）より提供を受けた。用いたデータの測点位置は、図-2 に示すとおりである。

また、他衛星データとの比較として、1987 年 4 月 27 日および 1987 年 6 月 7 日の NOAA・AVHRR データ、ならびに 1987 年 4 月 27 日の LANDSAT・TM データを解析・検討した。

4.2 解析結果とその考察

a) トルースデータによる検討

VTIR の赤外域バンドは、バンド 2 から 4 の 3 つであるが、この内 3 バンドおよび 4 は大気中の水蒸気の影響が比較的少ない波長帯であり、海面温度測定にはこの 2 つのバンドを組み合わせることが有効であるとされている。本報では、このバンド 3、4 を中心に、バンド 2 を含めた種々の組み合わせによる回帰分析を実施した。表-7 にその解析結果を示す。今回解析した 4 シーンいずれの場合についても、バンド 2 を含む 3 バンドで回帰したものが最も高い相関を示し、この組み合わせによる推定方法が最も精度良く推定できることがわかる。しかし、各回帰間の相関係数値に顕著な差が認められないことから、バンド 2 による大気補正効果について明確なことは言及できない。

図-3 は、上述の 3 バンドを用いた回帰式による推定値と観測値との相関図を示す。この回帰式からの残差平均は、表-7 中にも示したように 4 月 27 日の場合、0.4℃、6 月 1 日の場合 1.1℃、6 月 7 日の場合 1.2℃、7 月 31 日

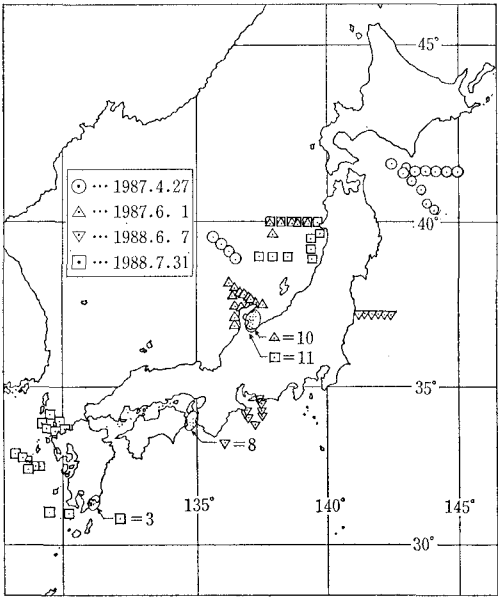


図-2 水温トルースデータの測点位置

表-7 VTIR データによる回帰分析結果

年月日	No.	相関係数	残差平均	a1	a2	a3	b
87	1	0.969	0.49	0.471	—	—	-36.865
	2	0.981	0.39	0.536	—	—	-42.212
	3	0.982	0.38	0.525	-0.414	—	-41.319
4.27	4	0.983	0.37	-0.056	0.551	-0.533	-41.527
87	1	0.741	1.14	0.530	—	—	-42.560
	2	0.740	1.14	0.576	—	—	-47.036
	3	0.757	1.11	0.577	-0.300	—	-47.592
6.1	4	0.774	1.07	0.134	0.600	-0.369	-53.382
88	1	0.918	1.36	0.339	—	—	-20.097
	2	0.929	1.27	0.338	—	—	-19.033
	3	0.929	1.27	0.339	-0.307	—	-19.227
6.7	4	0.936	1.21	0.173	0.192	-0.191	-8.037
88	1	0.912	1.13	0.535	—	—	-41.241
	2	0.887	1.26	0.559	—	—	-42.436
	3	0.912	1.13	0.533	0.019	—	-41.085
7.31	4	0.916	1.10	0.043	0.489	0.065	-37.600

No.	回 帰 式	y:水温値
1	y=a1*B3+b	B2:Bバンド2のCCT値
2	y=a1*B4+b	B3:Bバンド3の "
3	y=a1*B3+a2*(B3-B4)+b	B4:Bバンド4の "
4	y=a1*B2+a2*B3+a3*(B3-B4)+b	

の場合 1.1℃ 程度であった。4 月 27 日の残差が他の観測日に比べ小さい値を示した理由は、図-2 からわかるように観測位置が日本北部に集中し、かつバンド 1 の画像上から推定して上層雲の影響が比較的少ない状況であったためと推測される。それに対し、他の観測日のように測点分布が広域的に広がり、水温変動も広い範囲を対象としている場合には、概ね 1℃ 程度の推定誤差が見込まれる。ただし、これにはトルースデータ自身の位置情報

や測定 of 誤差も含んでいることも考慮しなければならない。

b) 他衛星データとの比較・検討

まず、広域的な海水温分布観測に比較広く用いられている NOAA・AVHRR データについて前述の 2 シーンを解析した。表-8 には、VTIR の解析に用いたものと同じトルースデータをもとに回帰分析した結果を示す。ただし、4 月 27 日は NOAA-9、6 月 7 日は NOAA-10 のデータであり、各衛星に搭載された AVHRR の観測波長帯が表-9 に示すように異なるため、前者についてはバンド 4 および 5 による重回帰、後者についてはバンド 4 による単回帰の解析を行った。この結果を表-7 に示した VTIR の場合と比較すると、4 月 27 日については両者同程度の相関係数 および 残差を示し、6 月 7 日については AVHRR の方が VTIR に比べ相関も高く、残差も 1/2 程度であることがわかる。6 月 7 日の結果は、広域的で水温変動範囲の広い情報を対象としており、VTIR と AVHRR との温度分解能の差から考えると、両者の残差平均の相違はほぼ妥当な結果と考えられる。また、4 月 27 日の場合のように比較的狭い海域を対象とし、良い大気条件下のもとでは、VTIR は AVHRR とあまり大差のない精度を示す可能性のあることを示している。

図-4 には、1987 年 4 月 27 日の VTIR および AVHRR による能登半島沖の日本海沿岸域の水温分布画像を示す。両者の観測時刻には数時間のずれがあるものの、その水温分布画像は幾つかの渦の形成をはじめとしてほぼ同様のパターンを示していることがわかる。

次に、LANDSAT・TM データと VTIR データとの比較を示す。表-9 に示したように、TM と VTIR の温度分解能はほぼ同程度と考えられるが、TM の距離分解能は約 120 m と VTIR に比べ 1 オーダー以上細かい。図-5 には、1987 年 4 月 28 日の三陸沖を対象とした TM・バンド 6 による水温分布画像 (Path 107, Row 33) と、同じエリアにおける 同年 4 月 27 日の VTIR データによる水温分布画像を示す。両者の観測日には 1 日のズレがあり、かつ VTIR の画像は、かなり拡大表示している

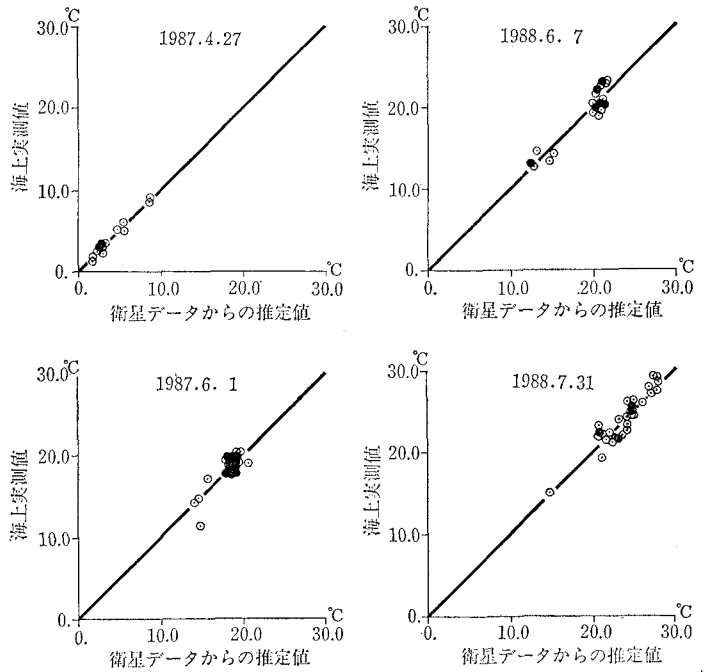


図-3 回帰式からの水温推定値と観測値との相関図

表-8 AVHRR データによる回帰分析結果

	年月日	回 帰 式	相関係数	残差平均
NOAA-9	87. 4. 27	$Y = 1.857X_4 - 0.687X_5 - 1.456$	0.982	0.423
NOAA-10	88. 6. 7	$Y = 1.518X_4 - 3.849$	0.981	0.670

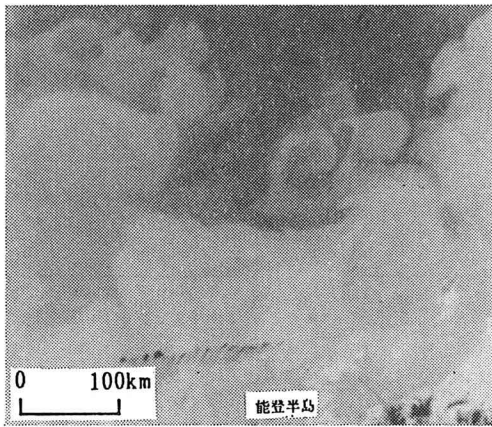
Y: 水温値 X_4 , X_5 : バンド 4 および 5 の輝度温度

表-9 熱赤外バンドを持つ衛星センサーの性能比較

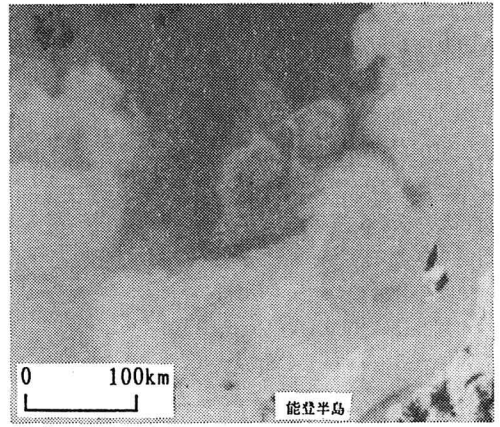
センサー名	VTIR	AVHRR	TM
搭載衛星	MOS-1	NOAA-9, 10	LANDSAT-5
熱赤外波長域 (μm)	Band 3: 10.5~11.5 Band 4: 11.5~12.5	Band 4: 10.5~11.3 Band 5: 11.5~12.5 (ただし、NOAA-10 は Band 4 のみ)	Band 6: 10.4~12.5
距離分解能	約 2700 m	約 1100 m	約 120 m
温度分解能	約 0.5 K	約 0.12 K	約 0.5 K

ためにモザイク模様のようにいるが、TM の画像に見られる沿岸水 (津軽暖流系) と沖合水 (親潮系と黒潮系) との間の複雑な水温分布構造が VTIR の画像にも明瞭に認めることができる。

以上の結果から判断すると、VTIR の情報は AVHRR や TM と同様に、海流の流況や沿岸水と沖合水との混合現象など広域的な海象状況を把握するため十分活用できるものと考えられる。

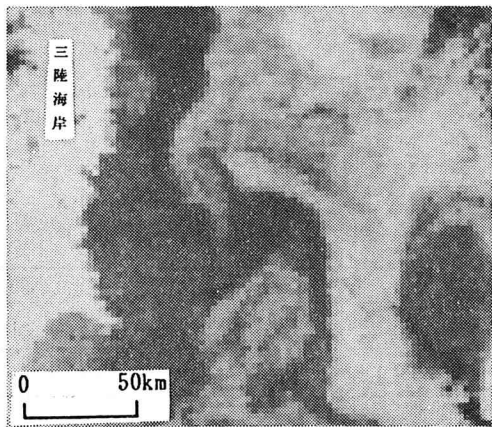


(1) VTIR (1987. 4. 27)

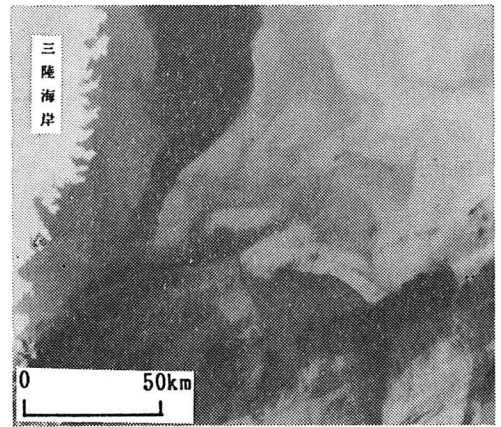


(2) AVHRR(1987. 4. 27)

図-4 能登半島沖における水温分布画像の比較



(1) VTIR (1987. 4. 27)



(2) TM (1987. 4. 28)

図-5 三陸海岸沖における水温分布画像の比較

5. おわりに

以上, MOS-1 衛星に搭載された MESSR および VTIR という 2つのセンサーによる海域の水質や海面温度の観測可能性とその物理量推定精度について考察した。その結果, 本衛星は比較的变化の顕著な海域の水質観測や, 広域的な海域を対象とした水温観測に十分活用できるものと判断された。

現在同衛星は観測を継続中であるが, 平成元年度にはさらにその後継機として MOS-1b が打ち上げられる予定であり, 益々その今後の活用が期待される。

なお, 本研究は MOS-1 衛星検証 (宇宙開発事業団主催) の検証協力として実施したものである。また, 本研究の実施に当たり, 海上保安庁水路部および(株)東京久栄の方々にはトルースデータの取得に関して, (株)三菱総合研究所 稲村早苗氏には画像解析に関して多くの御協力をいただいた。ここに記して, 感謝の意を表します。

参考文献

- 杉森康広・夏目巨夫・木暮 陸・松村卓月 (1985): 可視域リモートセンシング技術によるクロロフィル量の定量的解析手法に関する研究-I, 航水研ノート, 空と海, 第7号, pp. 39~77.