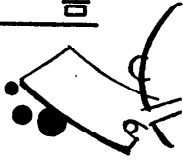


報告



水質調査手法としてのリモートセンシング††

横山 隆三††

1. はじめに

LANDSAT(資源衛星)の画像を見て、山や街が微妙な色調をみせながら、地図で知っているものと同じ地形になっていることに安心したり、新しい計測技術のすばらしさに感心したことのある経験を持つ人は多いことであろう。また気象衛星からの画像を見て、予報官顔負けの天気予報をできる人も少なくない。国産観測衛星の第1号として、MOS-1(海洋観測衛星1号)の打上げも数年後に迫っている。今やリモートセンシングは社会の至るところに普及しつつある。

リモートセンシングの原理は、地表から反射または放射される電磁波強度を、高空から波長域別に画像データとして収集し、そこに存在している対象物の種類や状態を同定しようとするものである。簡略な表現をすれば、「リモートセンシングとは、地球表面(大気や宇宙を含めてもよい)を対象とした分光分析の一種である」とも言える。地表の状態に応じて分光特性は異なる。画像データは短時間のうちに広い範囲を観察した地表の分光特性の集合であり、そのデータ処理にはコンピュータが駆使される。リモートセンシングは画期的な環境計測法と期待され、陸域、水域など広範な分野にわたり活発な研究がおこなわれてきた。

しかしながら、リモートセンシングから定量的な情報を得ようとするとき、長い大気層をくぐりぬけてセンサに達する電磁波から、地表でのどのような現象を、どの程度の精度で計測できるものであろうか。今後ますます普及するであろうリモートセンシングにとって、その適用限界を見きわめておく必要がある。われわれも定量的な水質環境情報を得ることを目的として昭和53年以来三陸沿岸域を対象にリモートセンシング観測プロジェクトを推進してきた。本論文では、プロジェクトで得られた結果を中心として、水質調査法としてのリモートセンシングの現状および問題点に

ついて解説するものである。

2. リモートセンシングと水質調査

図-1は、水質調査におけるリモートセンシング観測の状況を示している。センサは航空機や人工衛星に搭載されて、高空から観測領域の波長域別の画像データを収集する。われわれの場合には、センサとして、Multi Spectral Scanner(略してMSSと呼ぶ)を使用した。MSSは、現在最も普及しているセンサの一つであり、可視光から近赤外までの各種波長域および熱赤外域についての画像データを走査方式により収集するものである。

上空でMSS画像データを収集しているとき、海上では代表地点において、水質調査対象項目(たとえば水温、透明度、クロロフィルなど)についての実測をおこなう。これを表面実測という。

図-1に示すようにMSSが水面の一点に向けられているとき、波長域 λ について感知する光の強さ $L(\lambda)$ は、

$$L(\lambda) = \tau(\lambda) \{ L_0(\lambda) + \varepsilon(\lambda) B(\lambda, T) \} + L^*(\lambda) \quad (1)$$

とあらわされる¹⁾。ここで

(i) $L_0(\lambda)$ は海面直上からMSSへ向かう光の強さ(太陽光に由来する成分として)

(ii) $B(\lambda, T)$ は、水温($T^\circ\text{K}$)による黒体放射の

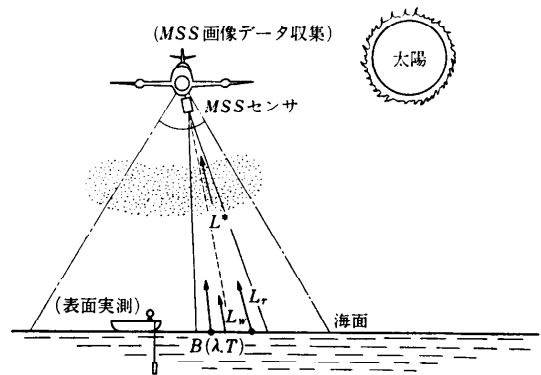


図-1 リモートセンシング観測状況図

† Water quality detection by remote sensing by Riuzo YOKOYAMA (Department of computer science, Iwate University).

†† 岩手大学工学部情報工学科

強さ,

(iii) $\epsilon(\lambda)$ は水の分光放射率,

(iv) $\tau(\lambda)$ は MSS と水面との間における透過率,

(v) $L^*(\lambda)$ はパステリアンス (太陽光が空気分子やエアロゾルによって散乱されて生ずる),

$L_o(\lambda)$ は, 図-2 のように,

$$L_o(\lambda) = L_w(\lambda) + L_r(\lambda) + L_s(\lambda) \quad (2)$$

と分けられ,

(vi) $L_w(\lambda)$ は海中から海面を透過して空気中に出てきた光の強さ,

(vii) $L_r(\lambda)$ は天空光が海面によって反射されたものの強さ,

(viii) $L_s(\lambda)$ は太陽直射光が海面によって反射されたものの強さ,

である. 特に $L_s(\lambda)$ はサングリッタと呼ばれ, MSS の向きと太陽位置の相対関係によって生ずる. サングリッタのエネルギーは, 他の L_w や L_r に比べて強大であり変動もはげしいことから, 水質調査ではサングリッタが発生していないことが前提とされる.

L_w は水中を経てきた光として, 水質に関する情報を担っていると考えられる. 特に可視光および近赤外線については, L_w を水面直上での放射照度 $H(\lambda)$ で規準化して, 水の分光反射率

$$R_w(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{H(\lambda)} \quad (3)$$

が定義される. 沿岸域での水質調査項目のうち, クロロフィル a, 浮遊物質および黄色物質などは, 濃度が変化すると, 特定波長域の R_w が単調変化することが知られている.

可視光から近赤外線にかけては, (1) 式のうち, $B(\lambda, T)$ は無視できるほど小さいことが知られている. MSS で検知された信号には増幅や A/D 変換の過程でゲイン $\alpha(\lambda)$ およびオフセット $\beta(\lambda)$ が加わり, ユーザが手による MSS データは,

$$C(\lambda) = \alpha(\lambda) \tau(\lambda) \{ L_w(\lambda) + L_r(\lambda) + L^*(\lambda) \} + \beta(\lambda) \quad (4)$$

なる形となっている.

熱赤外線においては, (1) 式の中で L_o や L^* は $B(\lambda, T)$ に比べて無視できるほど小さいことがわかっており,

$$C(\lambda) = \alpha(\lambda) \tau(\lambda) \epsilon(\lambda) B(\lambda, T) + \beta(\lambda) \quad (5)$$

となる. $B(\lambda, T)$ は, 水からの黒体放射として水温の検出に利用され, このための熱赤外波長域は特に熱バンドと呼ばれる.

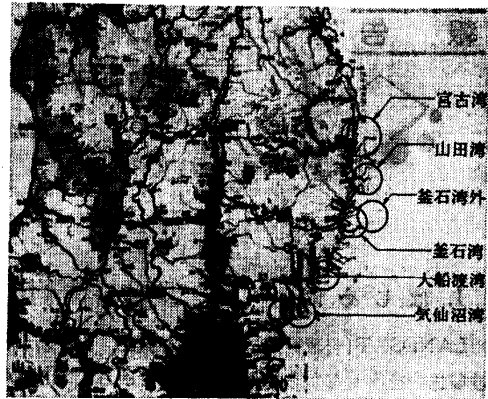


図-2 三陸沿岸地図およびリモートセンシング観測領域

以上より, 水面の一点からの MSS データは, 波長域ごとのデータを集めたものとして

$$C(\lambda) = [C(\lambda_1), C(\lambda_2), \dots, C(\lambda_n)]$$

なるベクトル形式を持つことになる. MSS 画像データとは, 観測領域内のすべての地点の $C(\lambda)$ の集合である. 観測データ $C(\lambda)$ を得て, その地点の水質や水温を知ろうとするときには, $C(\lambda)$ との対応関係がわからねばならない. これは表面実測地点での測定値と $C(\lambda)$ との間の回帰分析によって求められるものとなる. 求められた回帰式をもとに原 MSS 画像データを演算処理すれば, 目的とする水質調査項目の分布画像が得られることになる. MSS 画像データをデジタル形式に変換して磁気テープに収納したものは, Computer Compatible Tape (略して CCT) と呼ばれる.

3. リモートセンシングによる三陸沿岸の水質調査

3.1 プロジェクトの概要

三陸沿岸は, 岩手県の太平洋岸を中心として南北約 200 km にわたり, 美しいリヤス式海岸を形成している (図-2). 沖合は古くから豊富な漁場として知られており, 沿岸の各湾では貝類や海草類を主体とした養殖業が盛んである. 沿岸には, 後背地の天然資源や輸入品を原料として, 窯業, 製錬業, 化学工業などが点在しており, また水産物を中心とした食品加工業も盛んである. 人口は, 各湾の周囲のせまい平地に集中しており, 湾内水質保全に関して, 漁業と都市産業活動との協調をふまえた対策が模索されている.

筆者らは, 2年間の準備の後, 昭和 53 年以来, 三

陸沿岸の水質調査とリモートセンシングの技術評価を目的として、リモートセンシング観測を実施してきた。従来まで観察の対象としてきたものには、宮古湾、山田湾、釜石湾、大船渡湾および気仙沼湾などがある。これらは、周囲の都市産業構造、湾の地形、湾内の利用状況などに、それぞれ特徴を持っており、かつ水質保全対策が急がれているところでもある。

3.2 観測の方法

リモートセンシングの観測は、空からの MSS 画像データの収集と海上での表面実測作業から成る。われわれのプロジェクトでは、MSS は JSAN-AT-XM を使用し、航空機を用いて画像収集をおこなってきた。JSCAN-AT-XM は、表-1 に示すように 11 チャンネルの波長域を持つが、これらの中に CZCS (Coastal Zone Color Scanner) の持つ波長域をすべて含んでいるように設計されている。CZCS は、沿岸水質観測用の MSS として NOAA によって開発され、NIMBUS-7 号衛星に搭載されているものである。

水質調査項目には、湾内表面における水温、クロロフィル a, SS (浮遊物質), COD(化学的酸素要求量), TOC (全有機炭素量), 塩分および透明度を選んだ。クロロフィル a は、植物性プランクトンの量を示すものであり、その水域の基礎生物生産力の指標として重要なものである。また植物性プランクトンが異常に発生した場合には、赤潮となる。SS は水に溶けない懸濁物質をいう。その他の項目の説明は省略する。実測項目には、これらの他に画像解析結果の判読の際の参考とするために、垂直方向の水温と塩分の分布も加えた。

観測にあたっては、特に MSS 画像データ収集と表面実測作業が同時性を持っておこなわれること、表面実測地点数は後の回帰分析で必要とする数より多少余裕を持って多く確保すること、一つの観測領域について MSS 画像データはフライトコースを少しずつずらして複数本確保することなどに留意した。

プロジェクト発足以来計 15 回の観測が計画されたが、画像と表面実測の両データを確保できたのは 5 回にすぎず、他は天候不順などで失敗した。本プロジェクトはわが国でおこなわれたもののうち、最も組織的・継続的におこなわれたものの一つであると言えよう。経過および結果は、文献 2)~5) などで報告してきた。

3.3 回帰分析

MSS データと水質調査項目の対応関係を調べるた

表-1 JSCAN-AT-XM の波長域

ch	波長域 (μm)	ch	波長域 (μm)
1	0.35 ~0.40	7	0.660~ 0.680
2	0.433~0.453	8	0.70 ~ 0.80
3	0.470~0.490	9	0.80 ~ 0.90
4	0.510~0.530	10	0.90 ~ 1.10
5	0.540~0.560	11	10.5 ~12.5
6	0.60 ~0.65		

めに回帰分析がおこなわれる。いま一つの画像データの中に N 個の実測地点が存在しているとすれば、

$$\{(y_i, X_i) | i=1 \sim N\}$$

なるデータの組が与えられることになる。 y_i は第 i 番目の実測地点での調査項目の実測値であり、 X_i は、その地点に相当するところの CCT 値である。CCT には 6 チャンネル分しか収容できないため、ユーザは調査の目的や画像の質を考慮しながら、原 MSS 画像データの 11 チャンネルのうちから六つを選んで CCT の作成を依頼することになる。したがって CCT 値 X は、6 次元ベクトルとして

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_6]$$

で記述されるものとなる。

回帰分析は各調査項目ごとに、実測値 y を目的変数として、単回帰および重回帰分析をおこなった。単回帰では、(i) 各チャンネルの CCT 値、(ii) それらの対数、(iii) 二つのチャンネル間の和、差、比およびそれらの対数形式など計 228 種についておこなった。重回帰では、二つのチャンネルおよびその対数形式についておこなった。

回帰分析の結果から、対象とした調査項目が画像データから検出できるという判定の根拠には、次の四つが満されることを基準とした。

- (1) 回帰式の F 検定や偏回帰係数の t 検定において帰無仮説 (水準 1% または 5%) を棄却すること、
- (2) 一つの観測領域について同じ時間帯に収集された複数の画像データについて、同じような所見があらわれていること、
- (3) 調査項目と説明変数のチャンネルとの組合せに物理的妥当性が説明できること、
- (4) 回帰式にもとづいて得られた水質調査項目の分布画像を、観測領域の事情に精通した専門家 (たとえば水産試験場の係官など) が見たとき、日頃の知見と明らかに矛盾する事実があらわれていないこと。

得られた回帰式において、あまりにも残差の大きな

表-2 三陸沿岸リモートセンシング観測プロジェクトで収集されたデータの回帰分析事例数

観測年月日	観測領域	表面実測		回帰分析をおこなった項目ごとの MSS 画像データ数						
		時間帯	地点数	水温	透明度	クロロフィル a	SS	COD	TOC	塩分
昭和53年7月25日	大船渡湾	9:30~11:13	44	5	5	5	0	5	5	0
		12:55~14:22	44	4	4	4	0	4	4	0
昭和54年3月29日	"	9:39~10:55	15	6	6	6	0	6	0	0
		15:20~16:20	12	2	2	0	0	0	0	0
昭和54年10月29日	宮古湾	9:02~10:18	37	2	2	2	0	0	0	2
		14:00~14:46	37	2	2	2	0	0	0	2
	山田湾	14:40~15:20	31	2	2	0	0	0	0	0
		釜石湾	9:29~10:16	31	3	3	3	0	3	0
	釜石湾外	9:08~10:30	18	3	3	3	0	2	0	2
	大船渡湾	9:10~10:06	36	2	2	2	0	2	0	2
"	14:50~15:31	36	2	2	2	0	2	0	2	
昭和55年5月19日	宮古湾	8:52~9:58	36	2	2	2	2	2	0	2
		10:30~11:27	36	2	2	0	0	0	0	2
	"	12:32~13:44	36	2	2	0	0	0	0	2
	"	13:59~15:14	36	2	2	2	2	2	0	2
	気仙沼湾	9:40~11:56	39	4	4	4	4	4	0	4
"	13:24~15:37	40	4	4	4	4	4	0	4	
昭和56年8月3日	宮古湾	9:52~10:47	36	2	2	0	0	0	0	2
		13:05~13:58	36	2	2	0	0	0	0	2
	"	15:20~16:05	36	2	2	0	0	0	0	2
	大船渡湾	10:25~11:17	36	2	2	0	0	0	0	2
		13:45~14:37	36	2	2	2	0	2	0	2
	気仙沼湾	11:00~12:55	63	3	3	2	2	2	0	2
"	14:00~15:58	63	3	3	0	0	0	0	2	
合	計			65	65	45	14	40	9	43

ものがあつたときには、実測野帳や画像データを再調査し、妥当な理由づけがある場合は、その地点を除外して再び回帰分析を実施した。除外した理由には、実測時の誤記と思われるもの、画像中に大きなノイズが発生していると思われるもの、実測地点がサングリッタの中にあると思われるものなどが主なものであつた。

3.4 回帰分析結果

現在まで確保された表面実測データと MSS 画像データは、調査項目別に表-2 のように集計される。このうち、昭和56年度分ものは現在解析中であるが、他はすべて回帰分析を完了した。これらの結果の概要は、調査項目別に次のようにまとめられる。

(a) 表面水温の解析結果

表-3 は、表面水温に関する回帰分析結果のうち、季節や場所別に代表的なものを示した。特に説明変数は見掛温度（熱バンドの CCT 値から MSS 内蔵の参照温度信号をもとに復元した温度値）であらわしている。解析例のほとんどが高い相関値を示しており、これらの結果は、常温付近の温度は熱バンド (JSCAN-AT-XM では 11 チャンネルに相当する) によって効

表-3 回帰分析結果例 (表面水温と見掛温度)

観測年月日 および場所	画像データ (収集時刻)	データ数	回帰式	相関係数
昭和53年7月25日 大船渡湾	8725M16 (12:56)	39	$y=1.403x-12.599$	0.933**
	8725M23 (14:20)	34	$y=1.345x-10.594$	0.875**
昭和54年3月29日 大船渡湾	9329M03 (10:12)	9	$y=0.374x+5.578$	0.740**
	9329M06 (10:52)	10	$y=0.439x+5.343$	0.522
昭和54年10月29日 釜石湾	9X29M04 (10:42)	16	$y=0.636x+7.706$	0.835**
	9X29M06 (10:56)	19	$y=0.708x+6.344$	0.773**
昭和54年10月29日 大船渡湾	9X29M07 (11:11)	33	$y=0.664x+6.851$	0.880**
	9X29M08 (11:16)	27	$y=0.818x+3.877$	0.905**
昭和54年10月29日 宮古湾	9X29M09 (11:39)	28	$y=0.990x+1.035$	0.817**
	9X29M10 (11:49)	17	$y=0.679x+6.168$	0.735**
昭和54年10月29日 山田湾	9X29M13 (14:56)	15	$y=1.084x-1.095$	0.789**
	9X29M14 (15:01)	16	$y=0.310x+13.741$	0.828**

注) ** は有意水準 1% で帰無仮説を棄却したもの

果的に検出できるという物理的知見とよく一致している。しかしながら実測水温と見掛水温が等しいという

表-4 回帰分析結果例 (透明度と各チャンネルとの相関係数)

観測月日および場所	画像データ(収集時刻)	データ数	Ch. 1	Ch. 2	Ch. 3	Ch. 4	Ch. 5	Ch. 6	Ch. 7	Ch. 8	Ch. 9
昭和53年7月25日 大船渡湾	8725M16 (12:56)	39	0.313	△	-0.191	** -0.400		** -0.578	** -0.573	** -0.412	-0.234
	8725M23 (14:20)	34		** -0.749		** -0.727			** -0.644		
昭和54年3月29日 大船渡湾	9329M03 (10:12)	9	-0.313		-0.453		* -0.686		* -0.628		* -0.645
	9X329M06 (10:56)	10		△	△			-0.490	-0.428		-0.128
昭和54年10月29日 釜石湾	9X29M04 (10:42)	16		△	△		△		△		△
	9X29M06 (10:56)	19		** -0.581	** -0.578		** -0.857		** -0.651		-0.363
昭和54年10月29日 大船渡湾	9X29M07 (11:11)	33		* -0.389	** -0.542		** -0.737		** -0.796		** -0.672
	9X29M08 (11:16)	27		△	△		* -0.359		** -0.702		** -0.648
昭和54年10月29日 宮古湾	9X29M09 (11:39)	28		* -0.327	* -0.369		** -0.780		** -0.720		** -0.736
	9X29M10 (11:49)	17		-0.113	-0.210		* -0.517		* -0.561		* -0.481
昭和54年10月29日 山田湾	9X29M13 (14:56)	15		0.262	0.441		△		0.432		0.323
	9X29M14 (15:01)	16		△	△		-0.419		-0.367		△

注1) △印は、自由度調整後、無意味となったもの

注2) * および ** は、それぞれ有意水準 5% および 1% で帰無仮説を棄却したもの

結果には必ずしもなっていない。実測水温のデータレンジの中に限定しても、両者がほとんど一致しているとみられる場合もあり、また 4~5°C 程度の差を示しているものもある。

実測水温は作業条件からみて、水深 5 cm 程度までの平均水温と考えられる。見掛水温とは熱バンドの波長域からみて、ミクロンオーダーのごく表面のものと言われ、そこでは水と空気が接しているところとし複雑な界面現象があり、また熱バンドが大気層を通過してくる間には、透過や放射の現象が重畳されることになる。

測定条件がほぼ同じと考えられるデータ間においても、回帰分析の結果が大きく異なる場合もある。表-3において、9329M03と9329M06では、後者の相関係数が小さい。これらの場合、実測データの数が少なく、またデータレンジも狭い。9X29M13と9X29M14では、それぞれ山田湾の北半分と南半分を引き続いて収集したものであるが、ともに高い相関係数を持ちながら回帰式は全く異なっている。この場合後者の実測水温のデータレンジは前者のものに比べて非常に小さい。

統計解析の立場からすれば、ある程度以上のデータの数が確保され、実測水温値が片よりなく広い範囲に分布しているものほど、安定した回帰式が得られ、ま

た相関係数も高い。ここで回帰式が安定しているとは、観測条件がほぼ同じとみられるデータセットについての結果が、似たものとなっていることを意味する。われわれの経験では、実測地点数が 20 以上あって、実測水温値の最高と最低の差が 5°C 以上あるような場合は安心して回帰分析ができるが、これが 3°C 以下になったり、実測地点数が 10 以下になったような場合には、あまり良い結果が得られない場合が多かった。データ数が少なかったり、データレンジが小さいときには、信号分がノイズに埋もれてしまうためと考えられる。

表面実測作業に長い時間を要した場合や、実測時間帯と MSS 画像データ収集時刻がはなれている場合にも、データの対応性が悪くなって低い相関値となる場合が多い。日射による水温変化の激しい夏期の観測の場合には、特にこの点に注意する必要がある。

(b) 透明度の解析結果

表-4は、各チャンネルの CCT 値を、そのまま説明変数として用いた場合の単回帰分析結果について、相関係数をまとめたものである。いずれの場合も、長波長域(5ないし7チャンネル)で高い相関が見られる。また短波長域(2ないし3チャンネル)高い相関を示すものもある。どの場合も、負の相関となっているが、係数項の値は観測データごとに種々異なっている

た。負の相関は透明度が低下するとそれだけ濃い水の色となり反射光が増すためである。

表-5 は、上と同様各チャンネルの CCT 値による二重回帰分析の結果の例であり、短波長域と長波長域の組合せで高い相関を持つものが多かった。偏回帰係数は、短波長域のものが正となり長波長域のものが正となっているが、値そのものは単回帰の場合と同様に種々異なったものとなっていた。

説明変数を CCT 値そのままではなく、チャンネル間の比や対数など他の形式にした場合の結果には、上で述べた以上に良い結果を示すものはなかった。三重回帰分析も一部についておこなったが、 t 検定で三つのチャンネルともすべて有意となったものは見当らなかった。

(c) クロロフィル a の解析結果

表-6 は、各チャンネルの CCT 値との単回帰分析結果の例である。ほとんどの場合が 5% の有意水準に達しておらず、クロロフィル a が検出できたとは言いがたい。水槽内で培養された植物性プランクトンについては、クロロフィル a が 2 と 7 チャンネルに光の吸収の極大値を持ち、5 チャンネルには極小値を持っていることが知られている。全解析例のうちわずかに 1 例だけ昭和 55 年 5 月の気仙沼湾のデータに関して 5 チャンネルとに高い相関を持つものがあったにすぎない。このときのデータは、三陸沿岸のものとしてはクロロフィル a の濃度が非常に高くデータレンジも広がった (0.54~27.71 $\mu\text{g/l}$)。

表-6 回帰分析結果例 (クロロフィル a と各チャンネルとの相関係数)

観測月日および場所	画像データ(収集時刻)	データ数	Ch. 1	Ch. 2	Ch. 3	Ch. 4	Ch. 5	Ch. 6	Ch. 7	Ch. 8	Ch. 9
昭和53年7月25日 大船渡湾	8725M16 (12:56)	11	-0.531	-0.274	Δ	-0.352		Δ	Δ	Δ	Δ
	8725M123 (14:20)	8		*0.655		0.355			0.331		
昭和54年3月29日 大船渡湾	9329M03 (10:12)	13	0.456		0.184		0.359		0.562		0.298
	9329M06 (10:56)	13		Δ	Δ			Δ	Δ		Δ
昭和54年10月29日 釜石湾	9X29M04 (10:42)	17		Δ	Δ		0.267		0.051		Δ
	9X29M06 (10:56)	22		Δ	Δ		-0.314		Δ		-0.239
昭和54年10月29日 大船渡湾	9X29M07 (11:11)	36		Δ	0.067		0.112		0.305*		Δ
	9X29M08 (11:16)	30		Δ	Δ		Δ		-0.357*		Δ
昭和54年10月29日 宮古湾	9X29M09 (11:39)	30		-0.106	-0.147		-0.301		-0.253		-0.150
	9X29M10 (11:49)	19		Δ	Δ		Δ		Δ		Δ

注1) Δ 印は自由度調整後、無意味となったもの

注2) * は有意水準 5% で帰無仮説を棄却したもの

表-5 回帰分析結果例 (透明度と各チャンネルとの二重回帰)

画像データ	データ数	回帰式	相関係数
8725M16	39	$y=0.307x_1-0.239x_2-7.022$	0.828**
9X29M07	33	$y=0.190x_1-0.274x_2+19.449$	0.903**
9X29M08	28	$y=0.258x_1-0.346x_2+20.606$	0.899**
9X29M09	30	$y=0.291x_1-0.390x_2+20.020$	0.854**
9X29M10	19	$y=0.349x_1-0.423x_2+16.030$	0.777**
9X29M11	28	$y=0.613x_1-0.467x_2-4.266$	0.734**

注1) x の下添字はチャンネル番号を意味する

注2) ** は有意水準 1% で帰無仮説を棄却したもの

注3) 偏回帰係数は、 t 検定で 1% 有意水準となっている

説明変数を他の形式にとった場合や二重回帰分析の結果においても、特に良い結果は見当らず、クロロフィル a を MSS 画像から検出することは、一般に困難であるとの結論に終わった。これらの理由は、次章でも議論する。

(d) SS の解析結果

解析結果において、SS が検出できたと思われるものは、一つもなかった。SS はクロロフィル a と同様に、その濃度と水の分光反射率との間に密接な関連を持つものであり、リモートセンシングの観察対象とされるものであるが、結果は極めて悲観的なものであった。

(e) 他の項目の解析結果

COD, TOC や塩分などについての結果は、いずれも検出できたと思われたものはなかった。これらの項目の濃度変化が直接に水の分光反射率に反映してくる因果関係は考えにくく、リモートセンシングでは検出困難であろう。

4. 水質環境情報収集における諸問題

三陸沿岸での観測データの解析では、水温と透明度は検出可能であったが、クロロフィル a や SS などは検出困難という結果におわった。リモートセンシングへの期待が大きかっただけに、ある意味の失望感を禁じ得なかった。画像および表面実測データは周到な計画のもとに収集され、サンプル分析にも万全を期したものであった。クロロフィル a や SS はなにゆえ検出できなかったのであろうか。三陸沿岸の水質が特殊なためであろうか。あるいはデータ解析の方法が適切でなかったためであろうか。以下では、定量的な水質情報を得ることに関して、リモートセンシングの技術的問題点について考察してみる。

(1) 大気の補正

可視および近赤外の波長域では、(2)式における L_w が水質情報を担ってきていると考えられる。しかし回帰分析では $C(\lambda)$ が用いられ、これは(4)式に示されるように τ , L_r , L^* など大気の状態、MSS の向きや水面までの距離、太陽位置、水面の形状などに依存する要素の影響を受けたものとなっている。しかもこれらの要素は画像データ全体に均等に影響を与えるものと、画素ごとに異なった影響を与えると考えられるものがある。当然 $C(\lambda)$ を用いた解析結果は L_w によるものよりも精度は落ちるであろう。

原 MSS 画像データから L_w に関する画像データを復元して、回帰分析を実施する方法が考えられる。 $C(\lambda)$ から L_w を求める問題は、「大気の補正の問題」として盛んな研究がおこなわれている分野である。補正のための種々の物理モデルが提案されており、補正後のデータによって良い結果が得られたという報告も多い(たとえば文献 6)~9)。

水の分光反射率は数パーセント以下であり、 $C(\lambda)$ の中で L_w が占める割合は非常に小さい。 L_w を復元することは重要な意義を持つが、 L_w の割合が小さいだけに補正には十分な注意が必要である。補正法を適用するためには、 $C(\lambda)$ が光のエネルギーに換算できることが必要であり、このためには MSS が標準光源に対して正確に校正されていなければならない。残念ながら我が国においては、このような体制は整備されておらず、大気補正の本格的観測実験を実施できないのが現状である。

(2) 沿岸水質の特殊性

クロロフィル a や SS の濃度が変化すると、特定の

波長域での L_w が変化することは知られている。沿岸の水質は、河川水、都市産業排水、外海水などが混合しているものとして、水色に関連する構成物質も単一ではなく、地域性も強い。個々の構成物質と L_w の対応がわかったとしても、それらが混合したときの現象には、まだまだ不明の部分が多い。

沿岸域では水塊の動きは、上下方向にも複雑に入り乱れている。植物性プランクトンは日光に反応して上下に移動することも知られている。沿岸水質の垂直分布は必ずしも様ではない。クロロフィル a や SS などの実測は表面水を対象としておこなわれる。一方 L_w は水の中を通過してきたものとして、水質の垂直方向の積分の情報をもって考えると、表面の実測値との対応は必ずしも良くないかも知れない。

(3) 水質のデータレンジ

観測領域内における調査項目の濃度やその変化幅が小さいときには、 L_w の変化分が光の伝播系や計測系のノイズに埋もれてしまうことが考えられる。解析結果でも述べたように、物理的性質が比較的わかっている熱バンドの場合でも、水温の最大と最小の差が小さくなると、良い結果が得られない場合があった。三陸沿岸において、クロロフィル a や SS が検出できなかったのは、これらの濃度が小さかったことも一つの理由と考えられる。

(4) 測定やサンプルの方法

水質の測定方法やサンプル分析法は、現在のところ文献 10) に従っておこなわれている。SS やクロロフィル a などの有機量の分析値は、分析方法によって、極端なときには分析者によっても大きな差を生ずるとも言われている。現状では主に作業量の理由から、1地点1サンプルの測定を用いている場合が多い。測定や分析にともなうデータのバラツキを考慮すると複数個のサンプルをとる必要があると思われる。画像データと対応させるのに十分な精度を持たせ、多くの機関での分析結果をも共用して解析ができるためには、測定や分析の方法に統一された基準が設けられ、分析値の絶対校正ができる体制を確立しておく必要がある。特に人工衛星データを利用して広範囲の観測をおこなうとき、いくつかの領域の実測を別々の機関が受け持つ場合など、このことは切実な問題となろう。

(5) 観測手法

良質な観測データが得られれば、解析結果も良いものが得られる。MSS の操作、実測、サンプル分析が適切におこなわれたとしても、データの質は観測当日

の天候、飛行条件や表面実測の内容に依存するところが多い。天候が悪ければ画像収集は不可能となるし、ヘイズが強かったり大気の状態が不安定であれば画像の質は劣るものとなる。太陽高度が高すぎたり飛行ルートが適切でないときには、画像の中にサングリッタがあらわれ、せっかくのデータを台なしにする場合も多々ある。表面実測にあたっては、適切な数の地点(後の回帰分析について)を位置同定が容易であり、かつ測定値全体としてなるべく広いデータレンジが得られると思われるところに配置すべきである。これらの条件は、文章や数式で表現するには難しい概念であるが、観測の季節、時刻、地形、状況に広じて適切な判断が必要である。

(6) 観測例の蓄積

一口に水質と言っても、周囲の環境、気象、海象や季節によって種々変化するものであり、季節や場所ごとの特殊性が強い。さらに MSS 画像データには、大気の影響が加わっている。ある領域のある季節の観測データの解析で良い結果が得られたからといって、そのアルゴリズムがそのまま他の観測データに適用できるともかぎらない。この意味において、今後さらに多くの場所での観測をおこない、解析結果を比較検討して、リモートセンシングによってもたらされる水質情報の内容、条件および精度を総合評価する必要がある。

また従来は水質項目として、透明度、クロロフィル a, SS などを選んできているが、これらの他に水質環境をより適切に把握できて、かつリモートセンシングで検出容易な新しい量性が考えられるのかも知れない。

われわれのデータも以上のような諸点から、さらに詳細な検討が必要であると考えられる。

5. おわりに

三陸沿岸での観測結果を中心として、リモートセンシングから得られる定量的な水質情報の現状および技術の問題などを述べてきた。画像データの収集装置や解析装置は、技術的にはほぼ定形をみるに至ったと考えられる。しかし画像データと水質との対応づけに関しては、多くの問題が残されている。これらは観測例を重ねて試行錯誤をくり返ししながら、解決してゆくより方法はないであろう。

本論文では航空機による観測データについて論じたが、人工衛星 MSS データでも、あるいはマイクロ波など他種のセンサについても、画像データと地表の現象との対応づけについては同じ問題をかかえていると言えよう。昭和 60 年代のはじめには、莫大な費用をかけた国産観測衛星が打ち上げられる予定であり、アメリカ、ヨーロッパなども多彩な計画を持っている。リモートセンシングへの期待が大きいだけに、また問題の解決も急がなければならない。

本報告における MSS 画像データ収集は、すべて日本国土海洋総合学術診断事業(日本造船振興財団)によった。また表面実測作業には、岩手県水産試験場をはじめとする地元諸機関の献身的協力のもとにおこなわれた。協力の関係各位に深謝する次第である。

参考文献

- 1) 岡見: 海の色スペクトルについて, 沿岸海洋研究ノート, 15, pp. 56-66 (1977).
- 2) 横山: リモートセンシングによる三陸沿岸水質環境調査, JAFSA RS Rep. No. 794003, 日本造船振興財団 (3月, 1979).
- 3) 横山: リモートセンシングによって検出できる水質環境情報, 第6回リモートセンシングシンポジウム資料, 計測自動制御学会, pp. 9-12 (11月, 1980).
- 4) 横山: リモートセンシングによる水質環境調査, JAFSA RS Rep. No. 803003, 日本造船振興財団 (11月, 1980).
- 5) 横山: リモートセンシングによる大船渡湾の海水交流機構の解明, 日本リモートセンシング学会誌, 1巻, 1号, pp. 15-33 (11月, 1981).
- 6) Hovis, W. & Leung, K.: Remote Sensing of Ocean Color, *Optical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 158-166 (Mar. 1977).
- 7) Gordon, H.: Removal of Atmospheric Effects from Satellite Imagery of Ocean, *Appl. Opt.*, 17, No. 10, pp. 1631-1643 (May, 1978).
- 8) Wilson, W. et al: Optical Remote Sensing of Chlorophyll in Ocean Waters, *Proc. 12th Int'l Symposium on Remote Sensing of Environment, Manila, Philippines* (1978).
- 9) Sorensen, B.: The North Sea Ocean Color Scanner Experiment 1977 Fial Report, JRC Ispra, Italy (1979.).
- 10) 気象庁編: 海洋観測指針, 日本気象協会(1978). (昭和58年1月24日受付)