

海域調査における衛星リモセンデータの実用的補正法

宇多高明*・村井禎美**・竹 潤 勉***

1. ま え が き

近年、広域をほぼ瞬時に観測可能という特徴を持ったリモートセンシング技術が、各地における沿岸海域調査へ利用されるようになった。現時点において沿岸海域調査に利用が可能な衛星は、ランドサット、SPOT、MOS-1 であるが、今後も衛星の打ち上げが予定されているために、以前にも増して衛星リモセンの利用が進められるものと考えられる。筆者らは、水質指標と衛星データ（輝度）の定量的な関係を明らかにし、その結果より濁度の平面分布を推定した^{1),2),3)}。しかし現在のところ、この種の調査では衛星飛来日に同期させて取得した sea truth data が不可欠である。sea truth を実施するには、多額の費用がかかるばかりでなく、海象条件によって実施が左右される。そこで、経済的、確率的に見て衛星データの利用頻度は必然的に制限を受ける。

本研究は、sea truth data を必要とせずに衛星リモセンデータより濁度の平面分布を推定する方法を開発することを目的とする。このため過去に取得した衛星データと sea truth data を用いて、衛星データの補正方法を検討した。その結果、衛星データの実用的な補正方法が開発されたので報告する。

2. 観 測 方 法

現地観測は、静岡県の大井川河口前面海域において1983年から1986年の間に行った。観測の目的は、衛星リモセンと同期した sea truth data を取得することにある。sea truth は4年間に合計12回実施したが、そのうち、衛星リモセンとの同期観測に成功し、かつ良好なデータが得られたのは合計5回であった。その観測日と、得られた衛星リモセンデータの諸元を表-1に示す。得られたデータは全て精密補正モードのCCTである。sea truth の具体的な内容は、海表面付近における濁度、塩分濃度、水温の測定であり、大井川河口右岸の堤防上に設けた基準点Oを中心とした放射状の測線上で測定

表-1 観測日とデータ諸元

Date	Satellite	Sensor	Gain
Nov. 1 1983	LANDSAT IV	MSS	high
Nov.27 1984	LANDSAT V	MSS	high
Oct. 21 1985	LANDSAT IV	MSS	high
Nov.14 1985	LANDSAT V	TM	low
Dec.11 1986	LANDSAT IV	MSS	low

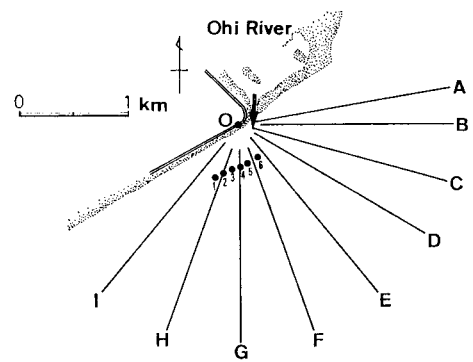


図-1 測線配置図

した(図-1参照)。各データは、船を測線に沿って3~5ノットのスピードで航走させて、水深0.5m以浅の表層で連続的に取得した。また分光反射強度と水質指標の関係を求めるために定点において分光反射強度と濁度の測定を行った。分光反射強度の観測は同海域について1986年、1987年にそれぞれ4、3回実施した(表-2参照)。分光反射強度の測定位置は観測日によって異なるが、全て基準点O(図-1参照)を中心とした2km四方の範囲内である。図-1

表-2 分光反射強度測定日

No	1986	1987
①	Sep.6	Nov.17
②	Oct.24	Nov.20
③	Dec.11	Dec.22
④	Dec.20	

1に示した1~6の点は1987年11月17日の測定位置である。測定は、船をアンカーで固定して、船上より白色板(BaSO_4)と海面の分光反射強度、並びに濁度を測定した。なお分光反射強度の測定波長の範囲は0.4~1.05 μm である。この結果、合計20組の分光反射強度と濁度のデータが得られた。

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室

*** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

3. リモセンデータの補正方法

一般に、衛星リモセンデータより濁度の平面分布を推定するには、そのたびごとに sea truth data を収集する必要がある。この理由は、衛星リモセンで得られた輝度と水質指標の一般的な関係が確立されていないことにある。両者の関係が確立されれば、sea truth の必要はなくなり、衛星リモセンデータの利用が容易になる。したがって、これらの関係の確立は非常に重要なテーマであり、その解決が急務とされている。この関係が容易に確立されない原因として、パスラジアンズの補正手法が十分でないことや、リモセンデータ（輝度値）と水質指標の関係が季節的に変動することなどが挙げられる。更に、相関法によりデータの解析を行う場合には、センサおよびゲインの相違による輝度変化を考慮する必要がある。

以下に、センサおよびゲインの相違、パスラジアンズ、輝度の季節変化の補正方法について順に述べ、輝度と水質指標の一般的な関係を求めるためのリモセンデータの補正手法を示す。

3.1 センサおよびゲインの相違

相対輝度 (RR) と濁度 (S) の相関を図-2 に示す。用いた輝度データは、全て可視域のデータであり、MSS で4バンド ($0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$)、TM で2バンド ($0.52 \sim 0.6 \mu\text{m}$) のものである。また濁度データは衛星リモセン実施時の前後1時間以内に得られたデータを用いた。なお、同海域の衛星リモセン実施時刻は、毎回ほぼ9時50分である。各観測口のデータを基に濁度 S と相対輝度 RR の一次回帰式を求め、回帰係数 a 、切片 b およ

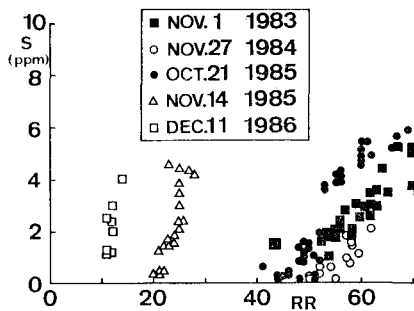


図-2 相対輝度 RR と濁度 S の関係

表-3 回帰係数 a 、切片 b 、相関係数 r の一覧

Date	a	b	r
Nov.1 1983	0.17	-7.6	0.88
Nov.27 1984	0.15	-7.5	0.88
Oct.21 1985	0.28	-12.1	0.92
Nov.14 1985	0.56	-7.2	0.85
Dec.11 1986	0.81	-7.5	0.78

び相関係数 r を表-3 にまとめた。表によれば1986年12月11日のデータを除けば相関係数 r は0.85以上と良好な相関関係にある。しかし、図-2 および表-3 より明らかなように、各観測日ごとの相関は良いものの、全体では大きくばらついている。例えば、表中の回帰係数の最小は0.15、最大は0.81と、その差が大きい。このようなデータのばらつきの一因に、センサおよびゲインの相違がある。CCT に記録された輝度データは相対値であり、実際の地表反射強度が同じであっても、センサ、ゲインの違いによってセンサの感知する輝度が異なる。この点より、センサおよびゲインの異なるデータを比較するには、相対輝度 (RR) を絶対輝度値 (AR) に変換する必要があることが明らかである。

以上のことから、センサ、ゲイン別に対応する換算式⁴⁾を用いて、 RR を AR に変換し、 AR と濁度との相関を求めた(図-3 参照)。この結果、ゲインおよびセンサの違いによる輝度値の変動が取り除かれ、各データを同一の場で議論することが可能となった。データは $0.2 \leq AR \leq 0.48 \text{ mW}/(\text{sr} \cdot \text{nm} \cdot \text{cm}^2)$ に分布し、図-2 と比較するとばらつきはかなり小さくなった。しかし、各観測データの間でのばらつきはなお大きい。

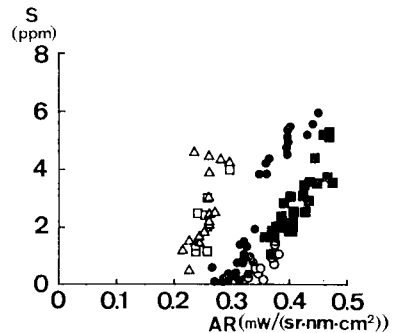


図-3 絶対輝度 AR と濁度 S の関係

3.2 パスラジアンズの補正

衛星データのパスラジアンズの補正を試みる。衛星は、数百kmの高度より地球表面を探索している。このため、衛星と地表の間には大気が存在する。したがって衛星搭載のセンサで得られた輝度値は、パスラジアンズを多く含んでいる。筆者らが行った船、航空機、ランドサットの同時観測データを基にしたパスラジアンズ量の推定⁵⁾によれば、パスラジアンズ量は得られた輝度のほぼ半分以上に及んだ。輝度と濁度の一般的な関係を求めるためには、このパスラジアンズを取り除く必要がある。パスラジアンズの補正手法については、現在研究段階にあるが、水域を調査の対象とする場合、次に述べる簡便な手法が利用できる。すなわち、近赤外域の波長帯の光は水域において無反射であると仮定できることから、センサが感知した近赤外域のデータは、パスラジアンズ

ンス量に相当するという考え方である。これによれば、可視域のデータから、相当する補正量を差し引くことでパスラジアンズの補正が可能となる。ただし、太陽光の入射量は波長帯毎に異なるため、海面上での近赤外域のデータをそのまま可視域データより差し引くことはできず、太陽光の波長帯別の入射量変化を考慮する必要がある。また可視域データおよび近赤外域データは、センサおよびゲインによっては、異なる波長帯幅で観測されている場合が多いことにも留意する必要がある。例えば MSS のローゲインモードの場合、可視域の観測波長帯幅は 100 nm、近赤外域のそれは 300 nm と異なる。したがって、波長帯幅の相違が輝度補正に及ぼす影響をあらかじめ除去する必要がある。ここでは単位波長帯幅当りの輝度に変換する。以上の考えに基づいたパスラジアンズの補正式は次式となる。

$$BR = AR_4 / BL_4 - AR_7 / BL_7 \cdot \alpha \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 BR ：パスラジアンズ補正後の輝度、 AR_4 、 AR_7 ：可視および近赤外域の絶対輝度の測定値、 BL_4 、 BL_7 ：可視および近赤外域の波長帯幅、 α ：定数である。 BR 、 BL の単位はそれぞれ $\text{mW}/(\text{sr} \cdot \text{nm} \cdot \text{cm}^2)$ 、 nm である。式 (1) 中の α は、太陽光の波長帯別の入射量変化に関する補正定数であり、次のように定めた。

太陽係数を $1.94 \text{ ly}/\text{min}$ として $500 \sim 600 \text{ nm}$ および $700 \sim 800 \text{ nm}$ の波長帯における太陽光の入射量を計算すると、大気圏外においてそれぞれ 614×10^{-3} 、 $364 \times 10^{-3} \text{ mW}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$ となる。この結果、これらの相対比は $1.7:1$ となるから $\alpha = 1.7$ とおくことができる。以上の計算によって求められた補正輝度 BR と濁度の相関図を図-4 に示す。図-3 と比較してばらつきが小さくなったことがわかる。またデータの分布範囲は、 $0.13 \sim 0.4 \text{ mW}/(\text{sr} \cdot \text{nm} \cdot \text{cm}^2)$ であり、 BR の平均値は AR のそれと比較すると $0.1 \text{ mW}/(\text{sr} \cdot \text{nm} \cdot \text{cm}^2)$ 程度小さくなる。

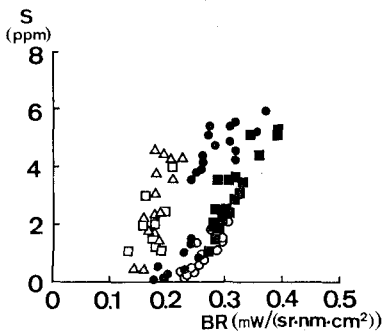


図-4 パスラジアンズ補正輝度 BR と濁度 S の関係

3.3 輝度の季節変動の補正

MSS および TM で得られるデータは太陽光の地表反射強度を相対値として観測したものである。したがって

太陽光に対する地表の反射率が一定であっても、太陽光の入射量が変化すればその値は異なる。地表の単位面積当たりの太陽光の入射量の変化は、地球の公転によって生ずる。観測期間の 10 月から 12 月における大井川河口 (北緯 $34^\circ 45' 38.387''$ 、東経 $138^\circ 17' 34.357''$) における 9 時 50 分の太陽高度は、約 44° から約 26° に変化した。これにより 10 月と 12 月の入射量の比は、余弦法⁹⁾ により、 $1:0.63$ となる。このように入射量は太陽高度に応じて大きく変化するため、衛星データより水質指標を sea truth data 無しで推定するにはパスラジアンズの補正のみならず太陽光の入射量変化の補正 (季節補正) が必要となる。

既に前節で述べたようにパスラジアンズの補正を行い、この結果は図-4 に示した。したがって図-4 のデータを季節補正すれば最終結果が得られる。しかしそれを行う前に季節変動の影響を知るために、まず絶対輝度と濁度との相関データ (図-3) をもとにして補正を行った。補正の順序は次のようである。①リモセンの観測範囲内で時空間的に光の反射率が変化しない広い場所 (リモセンデータで 20 画素以上と考える) を選定する。②①で選定した場所での可視域輝度のヒストグラムを各観測日毎に求める。③各ヒストグラムの加重平均を求める。④各観測日の中から基準日を設定する。⑤基準日の加重平均値と各観測日のその比 (E) を求め、各データに E を乗ずる。本報では、時空間的に反射率が変化しない場所として焼津港の埋立地を選んだ。また、基準日は、観測日中最も太陽高度が高い 1985 年 10 月 21 日とした。この結果 E は 1984 年 11 月 27 日で 1.22、1983 年 11 月 1 日で 1.08、1986 年 12 月 11 日で 1.59 となった。これらは、各観測日の地表反射率を余弦法で求め、それぞれの値を基準日の値で除した値の逆数とほぼ一致する。なお、上述の①～⑤の補正に際して、埋立地の状態 (例えば乾湿状態) によるわずかな輝度変化を以下に述べる方法により除去した。まず、埋立地の近赤外域の波長帯に対する反射率が明らかでないため、埋立地の近赤外域輝度のヒストグラムを全観測日において求めた。

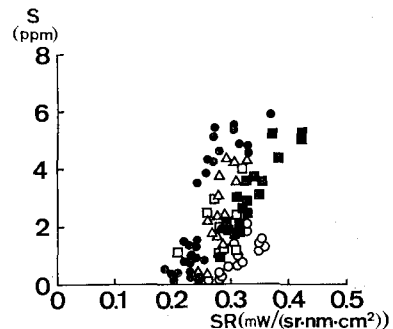


図-5 季節補正輝度 SR と濁度 S の関係

次に、その加重平均値の一番小さい1986年12月11日の輝度と各観測日の加重平均値の比を求め、その比を可視域のヒストグラムの加重平均値に乗じた。以上の処理法を用いて季節補正輝度 SR を求め、濁度との相関を求めたのが図-5である。図-3の相関図と比較してばらつきが減少しているのが明らかである。特に図-3に示したデータにおいて、ローゲインのデータの方がハイゲインのデータよりも全体的に AR が小さい傾向にあったが、図-5では、その傾向が明らかになくなった。

以上に示した補正と3.2節で述べたパスラジアンズ補正を同時に行った結果が図-6である。図で明らかなように各観測日のデータのばらつきが減少し、 S との間に正の比例関係がある。この結果、相関係数 $r=0.69$ において次の関係が得られた。

$$S=31.0CR-5.55 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに S および CR の単位は ppm, $mW/(sr \cdot nm \cdot cm^2)$ である。

次に、実際に海上で測定した分光反射強度 (TR) と濁度 (S) の関係を図-7に示す。図中の TR は $mW/(sr \cdot nm \cdot cm^2)$ の単位を持つ。ここで用いた TR は、500, 525, 550, 575, および 600 nm の波長帯における反射強度の平均値である。データにばらつきはあるものの $r=0.78$ において次式が成立する。

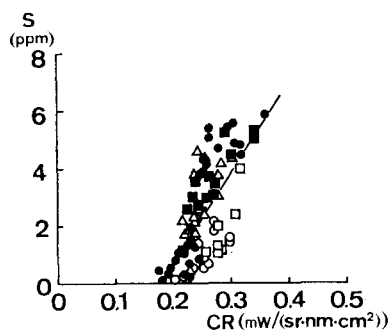


図-6 補正輝度 CR と濁度 S の関係

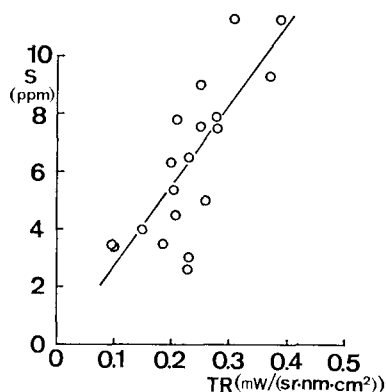


図-7 分光反射強度 TR と濁度 S の関係

$$S=27.6TR-0.15 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで式(2)と式(3)を比較すると、両者の回帰係数は非常に近い値である。 TR は、海面より1~2m程度の高さで測定したデータであり、パスラジアンズの影響は無視して良い。また、白色板のデータを用いて太陽光の入射量に対する補正も行った。このことから、式(3)は、太陽光の入射量変化や大気の影響を受けていない濁度と輝度の関係式と考えて良い。このことから式(2)の信頼性が高いものであることが明らかである。両関係式において切片値に差があるが、これは季節補正の際の基準日の選定いかんにより変化するものであるため意味を持たない。

4. 実測値と補正值の比較

過去に得られたデータを用いてセンサおよびゲインの相違、パスラジアンズ、輝度の季節変化に関する補正を行った結果、式(2)が得られた。ここで式(2)の一般性を確かめるために sea truth data を用いて推定した濁度の平面分布図(図-8)と式(2)より推定した平面分布図(図-9)を比較する。用いたデータは、1985年10月21日に取得されたランドサット4号の MSS ハイゲインモードデータである。両図を比較すると、大井川河口前面の5ppmの等濁度線の分布形状が若干相違し、また、図-9において1ppmの等濁度線が明瞭でないなどの問題もあるが、2,3,4ppmの等濁度線の形状は良く一致している。特に3,4ppmの等濁度線が河口の南側沖合に舌状に延びている状況や、吉田漁港東側沖合の3ppmの濁度線の形状は良く一致している。更に、濁度の分布の一致度を詳しく調べるため、図に示したP-P', Q-Q'断面に沿う濁度の分布を比較した(図-10)。図

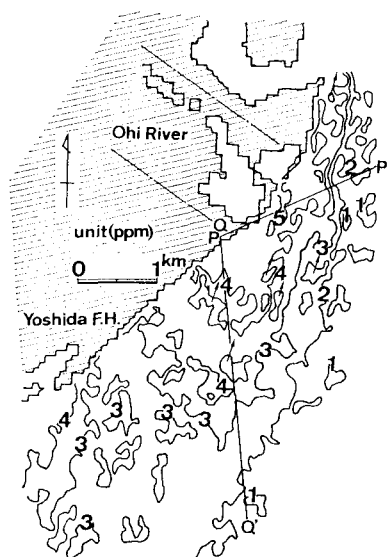
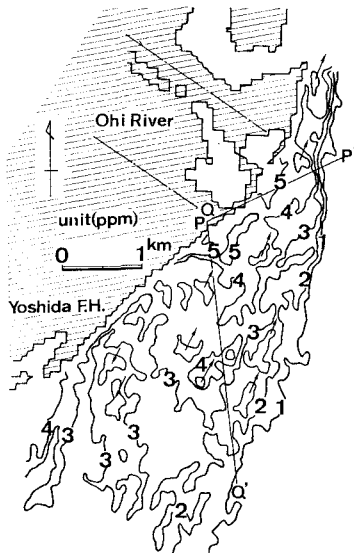
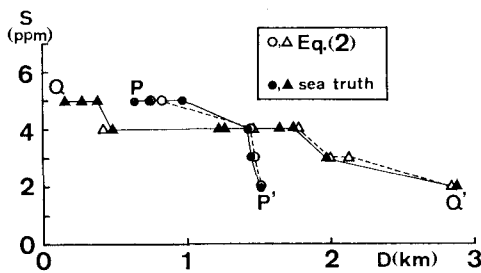


図-8 推定した濁度分布 (sea truth 有り)



図—9 式 (2) により推定した濁度分布



図—10 測線に沿う濁度分布の比較

の横軸は、基準点からの距離 (D)、縦軸は濁度 (S) を示す。sea truth data を用いた推定結果と式 (2) による推定結果は、良く一致している。また測線 $P-P'$ に現われている濁度のフロント ($D=1.5$ km 付近) も良く対応しているのがわかる。結局、以上に述べた補正法を用いれば、sea truth data を直接用いて推定した濁度分布とはほぼ同等な分布が推定できることが明らかである。

5. 結 論

sea truth data を用いずに濁度分布を推定できる方法について検討した結果、以下に述べる 3 段階の方法で衛星データを補正すれば、充分な精度で濁度の平面分布を推定可能となることがわかった。

① センサおよびゲインの相違による輝度データの変動を除去する。② 近赤外域の波長帯は水域で無反射と仮定した簡便な補正式 (式 (1)) を用いてパスラジアンズの補正を行う。③ 反射率が時空間的に変化しない場所での輝度値を用いて補正係数を求める。その値を、絶対輝度値に乘ずることで太陽光の入射量変化に関する補正を行う。

謝辞 本研究は科学技術庁の海洋遠隔探査技術の開発研究の一環として進められたものであることを付記し、科学技術庁の宇宙開発課の担当者に感謝の意を表します。また国際交友会天文部月光天文台の諸氏には太陽高度の算定法について教示を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 宇多高明・古川博一・竹淵 勉: ランドサット・航空機・船の同時観測による沿岸海域特性の把握, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 690~694, 1984.
- 2) 宇多高明・古川博一・竹淵 勉: ランドサットによる沿岸水理の観測, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 772~776, 1985.
- 3) 宇多高明・村井慎美・竹淵 勉: ランドサットによる沿岸流況調査, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 591~595, 1986.
- 4) (財)リモートセンシング技術センター: 地球観測データ利用ハンドブック——ランドサット編・改訂版——, p. 6-2, 1986.
- 5) 宇多高明・村井慎美・竹淵 勉: 沿岸海域調査への衛星リモセン利用の現状と課題, 土木技術資料, Vol. 30, No. 1, pp. 2~7, 1988.
- 6) 久保田 広: 光学技術ハンドブック, 朝倉書店, p. 319, 1975.