ランドサットデータによる浅海域のサンゴ礁抽出と水深推測

An Extraction of the Coral Reef and Water Depth Using LANDSAT-5/TM

全 炳 徳*, 後藤恵之輔*, 宇野史郎**

Byungdug JUN, Keinosuke GOTOH, Shiroh UNO

Abstract : A new model to extract coral reef area was proposed and applied to an estimation model of bottom depth. Image density on 1540 pixels of LANDSAT/5-TM and provided data on depth and bottom condition from JODC (Japan Oceanographic Data Center) were used for mapping coral reef area and for estimating bottom depth.

Both models were adopted to Okinawa Main Island and Yaeyama Islands and discussed on its practical use. Moreover, limitations of applied model were also discussed and an errors analysis was performed. Depths from surface to 34m were measured with RMS residuals of 3.38m and 4.23 against the data obtained at fine atmospheric and the fine plus cloudy atmospheric conditions, respectively. Two and four bottom features models were compared each other on its application.

Finally, using two bottom features model described above, a three-dimensional image and a isodepth image were obtained by a personal computer at an area of Yaeyama Islands.

1. はじめに

近年、海洋研究の分野でも、リモートセンシング技術を導入し、海洋の情報を得るための広域性、経済性、同時性、反復性に優れたリモートセンシングの利点を生している。リモートセンシングの利用により、調査資材、調査時期、調査に要する時間や費用などの既存の調査方法の問題点を軽減するという点で、多くの長所を持っていると考えられる。

本研究では、人工衛星データの特徴を生かし、地球観測衛星であるランドサットのTMデータについて、①海底情報抽出モデルを作成した。また、②この海底情報抽出モデルから得られたデータを用いて、更に、サンゴ礁が卓越している地域を対象にした、水深推測モデルを開発した。③ここで開発した海底情報抽出モデルや水深推測モデルは、沖縄本島と八重山諸島に適用し、その実用性について検討した。更に、④適用地

域の水深推測結果をパソコンにより3次元表現と等水深線表現を試みた。

2. 本研究の手法

本研究の手法としては以下の点に重点を置き、研究を進めた。

海底情報のサンゴ礁の抽出に当たっては、①浅海域の潮位の差、②バスラジアンズ項と太陽高度による影響、③水深の影響など、3つの項目に対して補正を行い、抽出精度を高めることに努めた。

水深推測モデルでは、①水深精度の高い結果をもたらす海底地質モデル¹⁾の利用、②ただし、海底地質は人工衛星のデータから分離するが、③この海底地質はサンゴと非サンゴの2つの種類で分離する。

画像解析では、①水深結果の3次元表現、②各ピクセルごとの水深データから、等水深線の抽出、③水深ごとのカラースライス画像表現を試みた。

本研究で以上の点に重点をおいたのは、サンゴ礁抽出においては、ランドサットデータによる多くの研究²⁻⁵⁾で指摘された問題点(①潮位の差および水深の影響が抽出精度を落とす。②砂も同質で判別)を補強し、

* 長崎大学工学部社会開発工学科

** 海洋科学技術センター

「写真測量とリモートセンシング」Vol. 33, No. 4, 1994

精度の高いサンゴ礁情報を得るための目的があり、水深推測手法においては、水深推測を行う海域の海底地質が場所によって異なる場合、推測誤差が生じる問題点⁶⁻⁹⁾を除き、海底地質モデルの問題点¹⁾の一つである、人の手による入力法のエラーと面倒な手作業を無くすための目的があった。

以上の目的を満たすことにより、サンゴ礁が広がっている海域における、推測精度の高い水深推測モデルの手法を開発することができた。また、これらの水深結果を3次元カラースライス画像として表現し、視覚に訴え易く現した。

3. モデル理論と適用手法

水深推測モデルは海底地質モデルの理論¹⁾に基づいた。しかし、このモデルの問題点（海底地質情報を人手により入力）を無くすために、モデルの海底地質情報は、人工衛星データから取得して用いた。

本研究で用いた水深推測モデルの一般式は次の通りである。

$$Zc=Bc0+Bc1 * Xc1 + \dots + Bcn * Xcn \dots\dots\dots(1)$$

$$Zn=Bo0+Bo1 * Xo1 + \dots + Bon * Xon \dots\dots\dots(2)$$

ここで、Zc はサンゴ礁の水深、Zn はサンゴ礁以外の水深を示す。また、B(c,o)n は回帰分析により決まる値であり、X(c,o)n はデータ補正済みのデジタル値から求めた Ln (CCT 値ーデータ補正值：以下 Ln 値) 値である。

4. 使用したデータ

モデルと解析に用いたデータは、ランドサットー5号 TM の4回のデータ (Table 1 参考) と海上保安庁が1986年度に行った調査結果の水深原図である。また、モデル地域としては、サンゴ礁地域を含む浅い水深が広がっている、沖縄本島の金武湾を選んだ。

Table 1 Specification of Satellite date Complojed on the present study

Data No.	No.1	No.2	No.3	No.4
Platform	Landsat-5	Landsat-5	Landsat-5	Landsat-5
Sensor	TM	TM	TM	TM
Path/Row	113-042	113-042	113-042	113-042
Date	1986/07/15	1988/12/27	1989/03/01	1989/09/25
Time(G.M.T.)	01-18-20	01-26-00	01-25-20	01-21-20
Sun Elevation	58	32	42	50
Sensor Position	E128-06	E128-10	E128-08	E128-09

4回のデータを用いたのは、季節的な影響を調べ、その影響のないモデルを開発するというねらいがあった。

5. データの補正

人工衛星データにより水深及び海底情報を解析するためには、前処理としてのデータ補正が必要である。Fig.1の1は画像の幾何補正を示しており、2は大気補正、3は撮影時間ごとに異なる潮位の差により生じる海面高さの補正、それから4は海底地質ごとに当てはめられるモデル選択処理を意味している。

Fig.1 Situation of data correction in this study

5.1 幾何補正

幾何補正の方法には、(1)理論的な補正式によるもの、(2)基準点を用いて決定する補正式によるもの、(3)前述の(1)と(2)を組み合わせたものの3つに分けられる¹⁰⁾。本研究で用いたのは、(2)に相当する非系統的補正と呼ばれる地上基準点を用いた補正である。

地上基準点の10ポイントを用いて求めた、アフィン

変換式の係数はカラムとラインがそれぞれ次の式のように表される。

column=3463.25*latitude+(-628.63)

*longitude+426056.65.....(3)

line=(-558.48)*latitude+(-3822.85)

*longitude+172568.33.....(4)

各々の式が持っている R.M.S.エラーは、カラムとラインが各々1.69カラムと0.09ラインであった。

5.2 大気補正

本研究では、パスラジアンズと太陽高度の影響を大気に関わる要因として補正した。

パスラジアンズについては、Hovis¹¹⁾の研究が補正の必要性を良く説明している。パスラジアンズは海上に位置する人工衛星のセンサーが受ける大気の影響を示すもので、Hovisは、同じ海上の照度を0.91kmと14.90kmの高さで測定した結果より波長によって異なる、大気影響の独特のパターンを説明している。このようなパスラジアンズの影響は、ランドサットの場合、バンド1のが一番大きく、次いでバンド2、バンド3の順になる。本研究ではこのようなパスラジアンズ項を元のデジタル値から引くことにより、大気の影響を補正した。表2は引いたパスラジアンズ項のデジタル値である。この値は研究地域のヒストグラムを算出し、最小値を計算する項によって得られた。パスラジアンズ項の値がデータごとに異なるのは、人工衛星センサーがそれぞれのデータによって異なる大気条件を示しており、パスラジアンズの影響がいちばん強いバンド1の値がその影響を良く表している。

Table 2 Pathradiance values at each band of Landsat data used in the present study

Data No.	No.1	No.2	No.3	No.4
Date	1986/07/15	1988/12/27	1989/03/01	1989/09/25
Band-1	69	56	64	60
Band-2	20	17	18	17
Band-3	14	12	12	11

また、太陽高度の補正は、前述した幾何補正が行われた後、385地点のサンプリングポイントを太陽高度が異なる4つの画像上で1ポイントあたり4つずつ、全部で1540個のデジタル値を取り集め、デジタル値と太陽高度の間の相関係数を求めた。補正の内容は、求めた係数により、全部のデータを太陽高度90°に変換し、太陽高度によって生じた大気の影響を補正した。式(5)、

(6)、(7)は、回帰分析を用いて求めたもので、各バンドのデジタル値を太陽高度90°に変換するために使った。

band-1=0.081*sun el.+6.618(r=0.88) ... (5)

band-2=0.033*sun el.+3.191(r=0.74) ... (6)

band-3=0.040*sun el.+1.927(r=0.95) ... (7)

5.3 海面の高さの補正

Fig. 2 は本研究で行った海面の高さの補正方法を示している。図は各々の画像 (-1, -2, -3, -4) が、潮位の高さの異なる時間に取られていることを示している。基準潮位の高さは平均水面であり、画像1は平均水面より潮位が低い時刻に、また画像2、3、4は、平均水面より潮位の高い時刻に撮影したことになる。

Fig. 2 Schematic diagram of sea level correction

本研究で用いた金武湾のデータの場合、全部が平均水面以上の時刻に取られたデータであった。また現場の水深データ値は、基本水準面を基準とした値となっているので、画像のデータとの比較のため、平均水面を基準とした海面の高さを画像の撮影時刻に補正した。

補正の計算式としては、気象庁が提案した式を利用した¹²⁾。その結果、86年7月、88年12月、89年3月、89年9月の順に、オリジナルデータに対して+1.19m、+1.66m、+1.44m、+0.59mの結果となった。

6. モデル作成と海底地質の補正

モデル式は2種類で、一つは水深モデルであり、もう一つは前述した補正や水深の影響が補正された、海底情報抽出モデルである。海底地質の補正はこの海底情報抽出モデルにより行った。

6.1 水深モデルと海底情報抽出モデル

データ補正が行われた結果値から、引用されたモデル理論(式(1), (2))に基づき、次のような水深推測モデルが作成された。

$$Z_c = 22.445 - 5.466 * X_{c1} - 1.385 * X_{c2} + 0.896 * X_{c3} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$Z_n = 66.016 - 10.454 * X_{n1} - 14.871 * X_{n2} + 5.175 * X_{n3} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 X_{c1} , X_{c2} , X_{c3} および X_{n1} , X_{n2} , X_{n3} は、上述のデータ補正が行われた結果から得られたデジタル値のLn値である。 X_{n1} , X_{n2} , X_{n3} は、海底地質が非サンゴ礁であることを示し、 X_{c1} , X_{c2} , X_{c3} は、海底地質がサンゴであることを表す。各々の係数は多項回帰分析により求めた。

このモデルの結果から得られた推測水深は、各バンドとの強い相関性を持っている。Fig. 3は、水深推測モデルにより計算された、推測水深と補正されたデジタル値との相関関係をバンドごとに表したものである。図の中には、海上保安庁の水路部¹³⁾による海底地質図から判断されたサンゴを白丸に、これ以外を黒丸で示している。

この相関関係は、作成した水深モデルから求めたもので、既に水深の影響が考慮されている。また、水深モデルで用いた数値は、前述の大気と海面の高さの補正によるデータであるため、大気と海面の高さ補正が考慮された相関関係となっている。

このことから、水深推測モデルの結果値と両地質におけるデジタル値との相関関係により求められる、海底地質ごとの係数は、本研究のサンゴ礁抽出の手法であげられた条件、すなわち、①干満の差と、②大気の影響と、③水深の影響などの補正を満たす式となる。

図から判断されるように、作られた水深モデルの結果値は、サンゴ礁の場合、バンドー1において最も相関性が高く、非サンゴ礁の場合、バンドー2で最も相関性が高いことが分かる。その相関係数は、各々0.98、

Fig. 3 Relationship between calculated water depth obtained by water depth model and CCT counts in each band of Landsat-5/TM

0.95であった。このような相関関係により作成した、海底情報抽出モデルを次の式に示す。

$$Z_{cf}=24.477-6.615 \times X_{c1} \cdots \cdots \cdots (10)$$

$$Z_{nf}=58.011-20.595 \times X_{n2} \cdots \cdots \cdots (11)$$

ここで、Zcf はサンゴ礁の判断に用いた式で、Znf は非サンゴ礁の判断に用いた式である。

6.2 海底地質の補正

海底地質の補正は、地質によって異なる反射率のため生じるエラーを補正するもので、本研究では、海底地質の抽出に用いた式(10), (11)により、海底地質を分離した。

海底地質の情報として用いる、海底地質情報の分離方法を Fig.4 に示す。図を見ると分かるように、サンゴ礁と非サンゴ礁を代表する2つの海底情報モデルの線形式(式-10, 11)は、2つの海底情報を分離している。すなわち、この2つの式は、水深11.25m以上のデータをサンゴ礁以外の地質として、デジタル値のLn値がLn(digital count)=2.82以上のデータをサンゴ礁の地質として区分している。また、両者が一緒に含まれている水深においては、水深段階ごとに、あるデジタル値を区分値として2つの海底情報は分離できる。図中で暗部によって示された各水深ごとの四角の中では、Ln値はある区分値を中心に二分されるのである。

この方法は、水深や海底地質の補正ができていないデジタル値だけによる教師付き分類法や教師無し分類

Fig. 4 Diagram to divide into two bottom conditions ; coral reef and non-coral reef

法と異って水深データや大気、潮の高さ、海底地質の情報を考慮し分類している。提案した式によるサンゴ礁分類方法は、前述したように多くの研究で指摘したサンゴ礁分類方法の問題点を解決していることで意味深い方法と言えよう。

次に、抽出したサンゴ礁地域の情報図により、海底地質の補正が行なった水深図を作るために、海底がサンゴ礁の場合と非サンゴ礁の場合を区別し、各々のモデルによりサンゴ礁と非サンゴ礁の地域の水深を計算した。この補正過程を Fig.5 に示す。

Fig. 5 Flow chart of the model processing

図の説明のように、まず、バンドー4により陸域をカットし、マスキング作業を行った。この結果は、陸域と水域を区分する情報図として用いた。次は、サンゴ礁と非サンゴ礁地域のデータを抽出した。このように2つの流れによって作られたデータは、陸域と水域の区分図との重ね合わせにより、海底地質の情報図を作り、プログラムの中で判別情報として用いた。次の段階では、作られた海底地質の情報図が、海底がサンゴ礁の場合と非サンゴ礁の場合を区別し、各々のモデルにより両区分地域の水深を計算、海底地質による補

正を行い水深図を作成した。

7. モデルの評価

このように求めた水深図の結果は、モデルの評価のために、実測値と比較し、偏差を求めた。その結果を Fig. 6 に示す。結果は Fig. 6(A) から判断されるように、結果の偏差が均等に (+)20m から (-)20m までの間に分布していることが分かる。しかし、多くのデータは (+) 8 m から (-) 8 m までの間に分布している。このデータの結果は、Fig. 6(B)から判断されるように、1540個の全部のデータを使った場合、R.M.S.が 4.23m となった。しかし、雲の無い1986年7月のデータと1988年12月のデータだけを使った770個の結果の場合、R.M.S.が3.38m となった。Table 3 は、水深情報を得るためのモデルとして、海底地質を考慮していないモデル (N.B.F.M) と海底地質が考慮されたモデル (B.F.M) として分類している。各々のモデルは1つのバンドを用いた単バンドモデルと2つ以上のバンドを用いた複合バンドモデルに分け、各モデルの R.M.S. エラーを比較している。その中で、海底地質モデルは、デジタイザにより海底地質図を作り用いた 4 bottoms model¹⁾と本研究で提案した海底地質図を人工衛星データから直接取得し用いた 2 bottoms model に分けている。さらに、2 bottoms model は、1540データを全部使った結果 (all data) と、770個の雲無しデータだけを使った結果 (clear data) と分けている。2

bottom model は、精度の良い multi-model だけの結果である。

以上の結果から、水深は海底地質が考慮されていないモデルより、海底地質が考慮されたモデルの結果値がすべて良くなっていることが伺える。しかし、本研究の手法のように、海底情報を衛星データから取り、サンゴ礁、非サンゴ礁の2種類の情報をを用いる場合、海底情報をデジタイザにより入力し、4つの海底情報を用いた (Table 3 の 4 bottoms) 結果よりは、精度が落ちている。これは、分けられていない海底情報の影響が及んだ結果であると考えられる。しかし、本研究により開発されたモデルは、海底地質が考慮されていない複合モデル (Table 3 の N.B.F.M multi model) よりは精度が上がっており、雲の影響がないデータの結果からみると、4つの海底地質の情報が考慮された場合との差は少ない。これは水深推測をする際、大きく影響を与えている海底地質はサンゴ礁であることを説明するものであり、サンゴ礁と非サンゴ礁の地域を考慮することだけでも良い結果が求められることを意味する。

海底情報や水深などが精密に調査されていない地域は、未だ多く存在している。特に、本研究で取り上げた地域のように、サンゴ礁が卓越している地域においては、この傾向は強い。本研究の結果は、このように精密な現地調査が行われていない地域において、海底情報 (サンゴ礁、非サンゴ礁) の区分および水深推測をする際、大きな誤差なしに、水深情報が得られる可能性を示唆している。

Fig. 6 Calculated results of coral, and non-coral region (A), and actual distribution map of two region (B)

Table 3 R.M.S. value of each models used in the present study

Sensor		Root Mean Squire Error (m)
Model	Landsat -5/TM	
(*) Single		5.37
N.B.F.M. Multi		4.87
(**) Single		3.34
B.F.M.-1 Multi		3.05
(***) 2-Bottom		4.23
B.F.M.-2 (all data)		3.38
2-Bottom (clear data)		

(*):Non Bottom Feature Model
(**):Bottom Feature Model-1
(***) :Bottom Feature Model-2

Fig. 7 Distribution map of coral and non-coral region obtained by Landsat-5/TM data observed at Jun. 5 1989

Fig. 8 Map of water depth at Okinawa main Island obtained by Landsat-5/TM data observed at Jun. 5 1989

Fig. 9 Applied result of bottom condition model at Yaeyama Islands obtained by Landsat-5/TM observed at Oct. 25 1989; map of coral and non-coral region (upper), and map of water depth (lower)

Fig. 10 Three dimensional map (upper), coloring map (middle), and contour map (lower) of water depth at Hatomajima, north of Iriomote Island where indicated by an arrow and box in Fig. 9

8. モデルの適用と3次元表現

本研究のモデルと手法は、沖縄本島と八重山諸島に適用した。その結果を Fig. 7~9 までに示す。Fig. 7, Fig. 9(a) は、6.1 で述べた海底情報抽出モデルにより、得られたサンゴ礁の情報であり、Fig. 8, Fig. 9(b) は、本研究で提案した手法により、抽出した水深結果である。特に、Fig. 9 は、まだ海上保安庁の水路部により海の基本図が作られていないところで、本研究で提案した方法により分類したサンゴ礁の分布図 (a) と、水深推測図 (b) である。また、Fig. 9(b) では、白い線に囲まれている地域の水深を3次元で表現しており (Fig. 10(a))、水深別に等水深線を抽出し、カラーライス画像を作成した (Fig. 10(b))。また、コンタライン別に色線を引き、視覚に訴え易く表現した (Fig. 10(c))。これは人工衛星から水深図のコンタラインを作成する可能性を試みたものであり、その結果は、十分な可能性を示すものとなった。海上保安庁からの情報 (私信) によれば、沖縄本島における5万分の1の海の基本図が作られるのに水深調査を含めた調査経費として、ランドサットデータ購入費の数百倍も必要としている。今後、まだ調査されていない地域の開発や準備調査として、広域性と反復性、同時性、経済性の利点を備えた人工衛星情報による海底情報図や水深推測図、また水深のコンタラインの抽出は、多くの有益性を持つものと思われる。

9. 今後の課題

Table 3 の結果から、海底の情報をサンゴ礁と非サンゴ礁の2つに分類するときには、4種類に分類して行った水深推測の結果より誤差が増加しており、Fig. 6 からは、水深が浅くなると推測水深はより下方に評価され、水深が深くなるとより上方に評価される傾向がみられる。このことは、本論文で考慮していない海底情報の影響や水質の影響が及ぼす結果であると思われる。しかし、サンゴ礁が卓越している地域の透明度が一定以上であるとすれば、その大きな影響は海底地質の影響であると思われる。上記のような誤差を無くすための研究が今後の課題である。

本研究を進めるに当たって、水深原図を提供して下

さった海上保安庁水路部と大気補正の方法について多くの助言をして下さった、長崎大学工学部機械システム工学科の森山助教授には、記して感謝の意を表する次第である。(受付; 94.2.7, 受理; 94.7.12)

参考文献

- 1) 全 炳徳・後藤恵之輔: 水深推測のためのリモートセンシング手法の比較と提案, リモートセンシング学会誌, Vol.13, No.4, pp.41-50, 1993.
- 2) V.E. Smith, R.H. Roger and L.E. Reed: Automated Mapping and Inventory of Great Barrier Reef Zonation with Landsat Data, IEEE OCEAN '75, New York, pp. 775-780, 1975.
- 3) R.T. Bina, K. Carpenter, W. Zacher, R. Jara and J. B. Lim: Coral reef Mapping using Landsat data, follow-up studies, Proceedings Twelfth International Symposium Remote Sensing Environment, Ann Arbor, Michigan, pp. 42051-2070, 1978.
- 4) アジア航測(株): ランドサットデータによる海域情報処理システムの調査報告書, 1980.
- 5) P.A. Pirazzoli: Bathymetric Mapping of Coral Reefs and a tolls from satellite, Proceedings of Fifth International Coral Reef Congress, Vol. 6, pp. 539-544, 1985.
- 6) F.C. Polcyn and I.J. Sattinger: Water Depth Determinations using RemoteSensing Techniques, Proceedings of Sixth International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan, pp. 1017-1028, 1969.
- 7) C.T. Wezernak and D.R. Lyzenga: Analysis of Cladophora Distribution in Lake Ontario using Remote Sensing, Remote Sensing of Environment, Vol. 4, pp. 37-48, 1975.
- 8) B.D. Jun, K. Gotoh, Y. Tanabashi and Sam Wouthyzen: The Extraction of Bottom Characteristics and Mapping in Kin Bay, Okinawa Main Island, Japan using Landsat-5/TM and SPOT-1/HRV data., Proceedings of PORSEC '92, Vol. 1, pp. 211-216, 1992.
- 9) 全 炳徳・後藤恵之輔・サムウオウトウゼン: ランドサット TM データによる海底地質を考慮した水深推測モデルの開発, 海洋開発論文集, Vol.7, pp.189-193, 1991.
- 10) 高木幹雄ほか: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp.423-429, 1991.
- 11) Warren A. Hovis: Measurements of Ocean Color, Proceeding of a Symp. on the Significant Accomplishments in Sciences, NASA Goddard Flight Center, Greenbelt, Md., pp. 24-29, 1971.
- 12) 気象庁: 潮位表, 1988.
- 13) 海上保安庁水路部: 5 万分の 1 沿岸の海の基本図: 海底地形地質調査報告 (金武湾), 1988.3.