

重相関係数を用いた衛星マルチバンド・データによる海深度の推定

Estimation of water depth by using correlation between the sea-depth and remotely sensed data

前間英一郎*・森 正寿**・後藤恵之輔***

Eiichirou Maema, Masatoshi Mori and Keinosuke Gotoh

Satellite imagery of LANDSAT, SPOT, JERS-1 is used to estimate a water depth. An algorithm for water depth mapping is used of Lyzenga algorithm. As bathymetry method for satellite imagery, we used a linear-regression method to obtain correlation R^2 between water depth and estimated depth. The main purpose is to obtain the maximum R^2 for each sensor and to obtain a contribution band for correlation. In this study, we analyze the relation between absolute water depth and remotely sensed data by linear-regression, specially, STEPWISE method of SAS cluster. JERS-1/OPS is new sensors by NASDA, and which is used for the first analysis for bathymetry.

keywords : bathymetry method, linear-regression, correlation R^2 , water depth

1. はじめに

リモート・センシングデータ(以下RSデータ)を用いた水深推定のための研究において、浅海の海図¹⁾や水深図は、基本的な資料として多く利用されていることは良く知られている²⁾。しかし、沿岸域における海図や水深図を作るような水深測量の作業は、潮位の影響や風等の天候や自然環境によって困難性や苦勞を伴う。水深の調査などは、超音波やレーダーが使用される場合がほとんどであるため、衛星から送られてくる膨大なデータを水深の調査や水深測量に利用できれば、水深測量の作業過程に新しい道が開けるのではないと思われる。

一般的に、海図は最新のものでない場合が多い。また、比較的新しいものであったとしても、開発などの無かった所は、以前のものと変わらなかったりする。最新の海図や水深図を今までと大差なく作成できるようになれば、作成のための様々な問題を除去できるし、将来新しい技術として確立されれば、水深測量の作業や大規模な地震による地形の変化にも即対応でき、最新のものが短期間で作成できるようになるだろう。このことは、広域性・経済性・同時性・客観性・反復性に優れているRSデータの特徴と合致している。

本研究では、人工衛星から送られてくるデータを使って、福岡市の志賀島沿岸域の水深抽出し、海深度を推定していく。Bathymetry法³⁾により海深度マッピングを行いながら、衛星画像データを幾何補正(アフィン変換)し、海図からの深度と線形回帰法による解析後の深度の相関 R^2 を求める。この時、IBM-Power-Station上でSASと呼ばれる統合情報分析システムを利用した。SAS/STEPWISEプロシージャによる線形回帰解析後、どの衛星のセンサの、どのバンドの相関 R^2 (データが座標値を示すものである)ので、通常SAS上では自乗される場合が多い)が高いかを求め、比較し重相関係数による海深度の推定の有効性の検討を行う。

2. 研究環境

2-1. 使用データ

LANDSAT5(米)/TMセンサ⁴⁾、SPOT(仏)/HRVセンサ⁴⁾、JERS-1(日)/OPSセンサ⁵⁾のデータを使用した。土地被覆・利用分類・大気汚染等の環境問題の研究では、LANDSATやSPOTのデータは良く利用されているが、JERS-1/OPSセンサのデータは、他の2衛星データの地上分解能と大差ないうえに、比較的近い波長バンドを持っているにもかかわらず、種々の研究に利用されていないので、本研究では比較検討と有用性の確認のために選択した。また、本来なら海底の地質や海の汚れなども考慮に入れなければならないが、一般沿岸海域を対象とし、今回の解析エリアが特殊な海域でない福岡市沿岸域であるので、様々なパラメーターを含んだ特殊なモデルを用意していない。水質・潮位・風・幾何補正の際の誤差等の影響が考えられるが、水質(汚れ)と風の補正については考えていない。

* 学生会員 長崎大学大学院海洋生産科学研究所 (〒852 長崎市文教町1番14号)

** 非会員 近畿大学九州工学部経営工学科

*** 正会員 長崎大学工学部社会開発工学科

2-2. 解析環境

座標入力装置としてデジタイザにより、水深データの作成に必要な等水深データを抽出する。抽出された等水深データを基に、5m間隔の等水深間をスプライン曲線で補間した水深データを作成した。

- 1) パソコン(NEC PC9801シリーズ) 【等水深データ格納のため】
- 2) IBM Power Station 7011-22 (統計解析システムSASの使用のため)
- 3) NEC N9832-21A タブレット (RS-232Cインターフェイス接続：特殊カーソル付きデジタイザ)

リモート・センシング技術は、間接的に対象物の存在及びその性質を知ろうとするもので、遠隔探査技術として位置付けられるが、ある特定の方法での判断だけでは、情報の欠如や精密さに影響する。人工衛星搭載センサは、複数の分析波長バンドを持ち、数値的に表現が非常に難しいものが多い。さらに多くの情報の総合判断をするために、SASシステムを使用した。

2-3. 人工衛星搭載センサ

衛星画像は、センサの著しい性能の向上により、さらに高解像度の画像情報を我々に提供できるようになってきたが、人工衛星によって搭載センサの波長域やバンド数等が異なる。搭載センサの性能諸元を表-1に示す。

表-1. 人工衛星搭載センサの性能諸元

衛星/センサ	バンド	波長帯(μm)	地上分解能(m)	衛星/センサ	バンド	波長帯(μm)	地上分解能(m)
LANDSAT5/TM	TM1	0.45～0.52	30.0～30.0	SPOT/HRV	XS3	0.79～0.89	20.0～20.0
LANDSAT5/TM	TM2	0.52～0.60	30.0～30.0	JERS-1/OPS	VNIR1	0.52～0.60	18.3～24.2
LANDSAT5/TM	TM3	0.63～0.69	30.0～30.0	JERS-1/OPS	VNIR2	0.63～0.69	18.3～24.2
LANDSAT5/TM	TM4	0.76～0.90	30.0～30.0	JERS-1/OPS	VNIR3	0.76～0.86	18.3～24.2
LANDSAT5/TM	TM5	1.55～1.75	30.0～30.0	JERS-1/OPS	VNIR4	0.76～0.86	18.3～24.2
LANDSAT5/TM	TM6	10.4～12.5	120.0～120.0	JERS-1/OPS	SWIR5	1.60～1.71	18.3～24.2
LANDSAT5/TM	TM7	2.08～2.35	30.0～30.0	JERS-1/OPS	SWIR6	2.01～2.12	18.3～24.2
SPOT/HRV	XS1	0.50～0.59	20.0～20.0	JERS-1/OPS	SWIR7	2.13～2.25	18.3～24.2
SPOT/HRV	XS2	0.61～0.68	20.0～20.0	JERS-1/OPS	SWIR8	2.27～2.40	18.3～24.2

* JERS-1/OPSセンサのVNIR3とVNIR4は同じ波長帯のバンド

JERS-1は、供給パワー源が不安定なためノイズを生じる。VNIRはほぼ3ライン毎に水平方向に、SWIRは垂直方向に縞ができ、温度一定装置の故障により時々データ転送の停止という事態に陥ると報告されている⁵⁾。

観測時間と潮位を表-2に、原画像をLANDSAT5は図-1に、SPOTは図-2に、JERS-1は図-3に示す。ただし、LANDSAT5は第6バンドの地上分解能の性能差が、解析に影響を与える可能性があったため、線形回帰解析の誤差確認の追実験にしか使わなかった。SPOTはすべて、JERS-1は、VNIR1～3とSWIR8のバンドを使用した。

表-2. 衛星データの観測撮影時間

衛星/センサ	撮影時間(UST)
SPOT/HRV	1986.10/20 AM. 2:18:28
LANDSAT5/TM	1987.10/6 AM. 1:20:20
JERS-1/OPS	1993.3/20 AM. 2:14:59

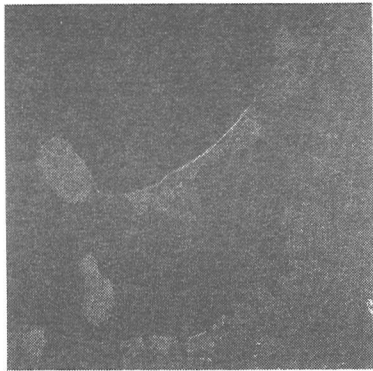


図-1. LANDSAT5の原画像

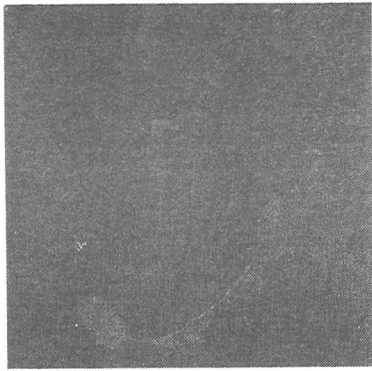


図-2. SPOTの原画像

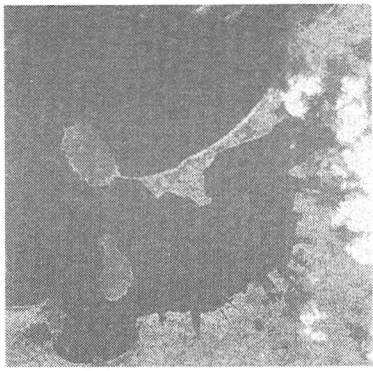


図-3. JERS-1の原画像

3. 研究方法

一般に、1972年にLANDSAT1が打ち上げられるまで、リモート・センシングによる水深研究は、飛行機からのものであったが⁶⁾、各国が様々な地球・資源探査を目的とした衛星を打ち上げるようになってきた最近では、人工衛星からのRSデータを用いた研究がなされている。考慮すべき海底の影響、数学的なモデルの開発、マルチバンドを生かしたマルチモデル式の開発等が行われている。

本研究では、海域を指定しない改良型のBathymetry法を用いた海深度の推定を行った。まず、海図より5mおきの等水深データを格納し、マージする。海深度マッピングにより0m～-35mまでの2次元の地形図を作成する。そして、スプライン曲線によって等水深間を補間後3次元化する。衛星画像データを幾何補正し、海図からの深度と線形回帰法による解析後の深度の相関 R^2 を求め、3次元のメッシュ補間図と幾何補正後の衛星画像データをオーバーレイさせて立体的な表現を試みる。また解析後、どのセンサの相関 R^2 が高いかを求め、重相関係数による水深推定モデルの検討を行う。2次元の深度マッピング図を図-4に、3次元の地形メッシュ補間図を図-5に示す。

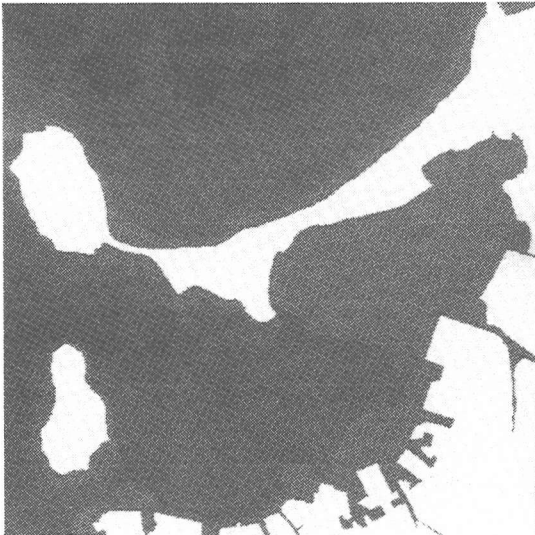


図-4. 2次元の深度マッピング図

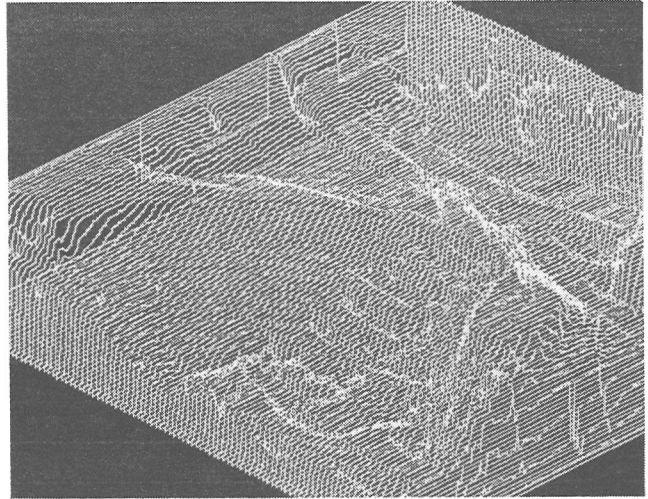


図-5. 3次元の地形メッシュ補間図(北西方向から)

4. 海深度の推定

4-1. 水深推定の原理

人工衛星のデータを用いる場合には、太陽光大気と海面を通過して海底まで入り、そこからの反射により人工衛星のセンサまで入ってくる量を測ることである。電磁波の大気との関係、また水深との関係を検討する必要があるが、どの波長域がどの程度の透過率を持っているか、水の汚れによる可視域の消散係数がどのように影響しているかがすでに研究されている。

これまでRSデータによる水深推定の研究には、Jerlovの反射理論⁷⁾に基づいた次のモデルが使われていた。

$$L_i = L_{di} + C_i \times R_{ai} \times \exp(-f \times k_i \times Z) \quad (1)$$

L_i は水深が Z の時の波 i の人工衛星センサの受感輝度、 L_{di} は海底の輝度、 C_i は太陽照度の関数、 R_{ai} は水深 Z 上で海底地質 a の反射率、 k_i は水の消散係数、 f は反復係数($=2$)、 Z は水深である。式(1)は、水深 Z で解くことができるが、水質や海底地質が変わるために生じる反射輝度や消散係数の問題が解決を難しくさせる。その後、RSデータを用いた沿岸域エリアの海深度マッピングアルゴリズムは、Lyzenga⁸⁾により(1978, 1981, 1985)、ParedesとSpero⁹⁾により(1983)、SpitzerとDirks¹⁰⁾により(1987)それぞれ研究され開発されている。それは、当初LANDSAT/TMセンサのデータを使って研究されたものである。彼らによれば、

$$Water\ Depth = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i X_i \quad (2)$$

$$A_0 : constant \quad A_i : Parameters \quad X_i = \ln \frac{(L_i - L_{i0})}{C_i}$$

のように表されるもので、海底地質や水質の影響を少なくできるメリットがあったが、それでもやはり海底地質や水質が考慮された地域にしか適応できず、誤差もかなり含まれていた。よって、この理論に基づいて考案し、大気補正(L_i 値を引く)を行ったRSデータのマルチ性を生かした改良型Bathymetry法で推定する。過去の研究では、水深とRSデータとのデジタル値の関係は、線形的な関係性を持っていると言われているが、海底地質や水質の影響等により、非線形的な関係になってしまう¹¹⁾。将来的に確立した技術にするには、条件を少なくした方が良いので改良型モデルで当てはめた。ただし今回は、一般海域に当てはめた場合の誤差や相関関係がどの程度あるのかわからなかったため、解析エリアは福岡湾の内湾側ではなく、外海側の志賀島沿岸域を選んだ。手順をSPOTを例にして、図-6にフローチャートを示す。

4-2. 改良型Bathymetry法

海深度を推定するためには、この理論の代表的なアルゴリズムであるLyzengaアルゴリズム¹²⁾を使用する。水深推測の原理のマルチバンドモデル式にある X_i は、 $\ln(L_i - L_{i0})$ と表すことができる。

$$W'_d = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \ln(L_i - L_{i0}) \quad (3)$$

A_i : constant

L_i : radiance in band i

L_{di} : deep-water radiance in band i

W'_d : Estimated water depth

センサバンド毎の画像データのヒストグラムによって、 L_{i0} 値を決定する。ヒストグラムの最低濃度値求めその値とした。ただし、 L_{i0} は、解析エリアに依存し、その値はほぼ水域と陸域との境の値となる。衛星画像の典型的な2次元ヒストグラムを図-7に示す。 L_i という値は、2次元ヒストグラム上で、図-7に示すような位置になる。

4-3. 重相関係数による解析

SAS(Statistical Analysis System)を使用する。線形回帰解析(STEPWISE法)を行い、 W_d (水深の測定値)と W'_d (水深の推定値)の相関 R^2 を調べ海深度を推定する¹³⁾。

そして、その時どの人工衛星のセンサの相関係数 R^2 が最大になるか、どの波長域のセンサのものが相関が大きくなるかを調べることによって、その有効性を検討する。

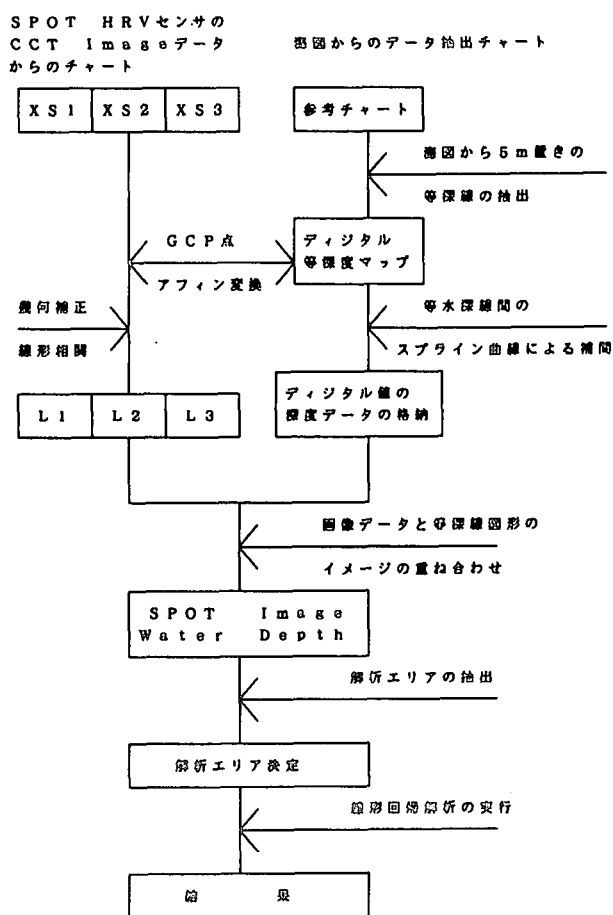


図-6. フローチャート

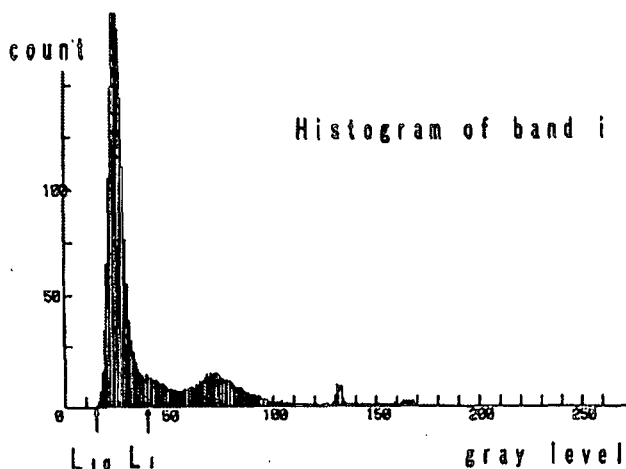


図-7. 衛星画像の典型的な2次元ヒストグラム

4-4. 任意時刻の潮位を求める方法

毎時潮位推算値¹⁴⁾については、海洋気象台及び検潮所を管理する気象官所に記録があるが、入手できない時には、潮位表の満潮・干潮の時刻及び潮位から任意時刻Tにおける潮位hの概略値を計算し、補正する必要がある。

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} + \frac{h_1 - h_2}{2} \cos\left(\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \pi\right) \tag{4}$$

T_1, T_2 : 任意時刻Tをはさむ満潮・干潮時刻(分) h_1, h_2 : T_1, T_2 時の潮位(cm)

4-5. 座標変換

一般に人工衛星から送られてくる画像データは、幾何学的歪みを多く含んでいる。通常画像の中から認識しやすい何点かの基準点を選び、それと対応する地上点の座標との関数関係を求める。画面内に20～30の地上基準点(GCP点: Ground Control Point)を求め、衛星画像をアフィン(線形)変換か疑似アフィン(形状)変換を行う。後者は、地球の球面効果を考慮する必要性のある広範囲を座標変換する時行うが、福岡市の狭い(30km×30km)範囲であったため、通常のアフィン変換だけで十分であると判断した。アフィン変換誤差を表-3に示す。

表-3. アフィン変換誤差

衛星/センサ	X軸(dot)	Y軸(dot)
SPOT/HRV	1.10	0.92
LANDSAT5/TM	1.16	0.90
JERS-1/OPS	1.27	0.89

5. 結果

線形回帰解析による相関係数を表-4(SPOT/HRV)、表-5(JERS-1/OPS)、表-6(LANDSAT5/TM)に示す。線形回帰解析の結果(SPOT)を図-8に示す。JERS-1/OPSとLANDSAT5/TMは、相関表を見てもわかるが、相関値が0.7以下でとても低く、相関があるとは言えないので提示しない。最後に、解析エリアの水深の3次元表示(SPOT)を図-9に示す。

表-4. 相関係数表(SPOT/HRV)

バンド	R ²	Cumulative	R
XS1	0.6422	0.6422	0.8014
XS2	0.0507	0.6929	0.8324
XS3	0.0331	0.7260	0.8521

表-5. 相関係数表(JERS-1/OPS)

バンド	R ²	Cumulative	R
VNIR1	0.1343	0.1343	0.3665
VNIR3	0.0282	0.1625	0.4031
SWIR8	0.0256	0.1881	0.4337
VNIR2	0.0250	0.2131	0.4616

表-6. 相関係数表(LANDSAT5/TM)

バンド	R ²	Cumulative	R
TM2	0.3401	0.3401	0.5832
TM7	0.0493	0.3894	0.6240
TM4	0.0360	0.4254	0.6522
TM3	0.0205	0.4459	0.6676
TM5	0.0188	0.4647	0.6817
TM1	0.0086	0.4833	0.6952

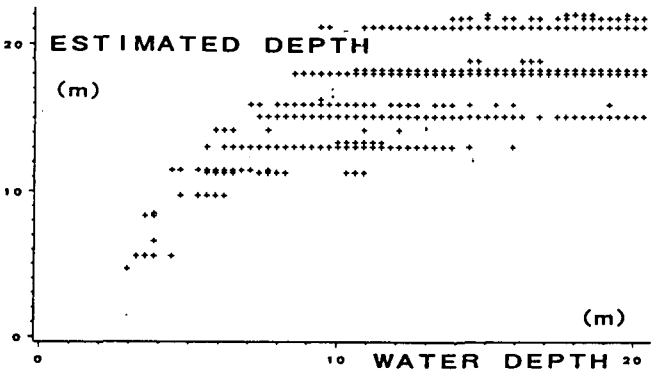


図-8. SPOTの線形回帰解析

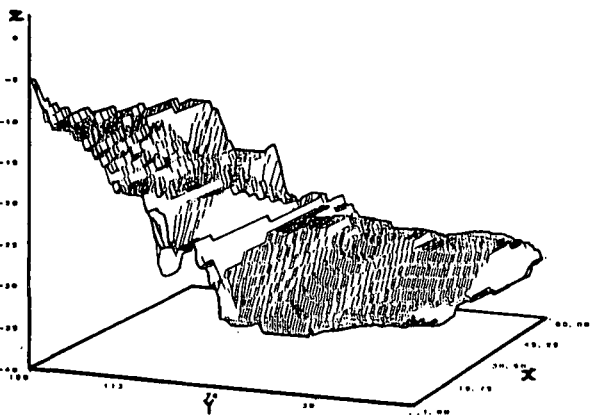


図-9. 解析エリアの3次元表示(SPOT/HRV)

6. 結論

人工衛星については、SPOTが最大の相関を示していた。また、非線形の特徴を示す緩やかな曲線を示していた。センサについては、SPOT/HRVセンサの第1バンドXS1とLANDSAT5/TMセンサの第2バンドTM2が強い相関を示していた。このことから、Bathymetry法による海深度の推定を行うには、可視光域0.5~0.6 μ mの波長域のセンサを持つ衛星データを使えば良いであろう。マルチバンドのRSデータを複数集めてさらなる解析が望まれる。そして、将来的に確立した技術にするには、もっと高い相関値でなくてはならない。そのためには、可視光域0.5~0.6 μ mでの効果や影響を調査し、誤差を無くす試行錯誤を繰り返す必要性があり、非線形回帰モデルでの検討が望まれる。

誤差についての追実験として、LANDSAT5で行ったところ、バンド数の多い方が誤差が小さくなることが分かった。赤外域よりも可視域にバンド数が多ければ、誤差が少なくなる。赤外域の誤差は、LANDSAT5やJERS-1でも分かるが非常に小さい。海の情報を含んでいる可視域の情報力の差が大きく反映し、水質情報を簡単に考慮できれば、誤差を少なくできると思われる。

JERS-1については、日本の衛星であり期待していたにもかかわらず、相関があるとは思えない結果になってしまった。このような解析には不向きであろうと思われる。地上分解能の差ではなく、衛星自体の欠陥が影響しているようだ。この衛星に搭載されているSARセンサデータでの種々の研究はあるのだが、OPSセンサデータでは少なく稀であるため、なんとか使えないものか様々な角度からの研究・検討が望まれる。

最後に今後の課題として、海底情報や水質情報を簡単に考慮でき、モデルの係数の信頼度アップのための数多くのデータ処理、信頼度の高い係数の求め方、非線形モデルでの解析が望まれる。

謝辞

本研究は、一部平成6年度文部省科学研究費補助金一般研究(c)【課題番号05680380】によるものである。

参考文献

- 1) 海洋保安庁水路部：5万分の1・沿岸の海の基本図(福岡市)，1988.
- 2) 杉原滋彦：海洋分野におけるリモート・センシングの現状と将来，日本リモートセンシング学会誌，Vol. 11，No. 1，pp. 90~94，1991.
- 3) 全 炳徳・後藤恵之輔・サムオウトウゼン：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. 5，pp. 189~193，1991.
- 4) 地球観測データ利用ハンドブック(SPOT編・LANDSAT編)，宇宙開発事業団・地球観測センター編集，1989.
- 5) 宇宙開発事業団(NASDA)，通商産業省(MITI)JERS-1情報交換会議発表資料集，工学院大学編集.
- 6) G. D. Hickman and J. E. Hogg：Application of an airborne pulser for near shore bathymetric measurements，Remote Sensing of Environment，Vol. 1，pp. 47~58，1969.
- 7) N. G. Jerlov：Marine Optics，Elsevier Scientific Publishing Co.，pp. 132~137，pp. 83~86，1976.
- 8) D. R. Lyzenga：Reflectance of a flat ocean in the limit of zero water depth，ibid，Vol. 16，No. 2，pp. 282~283，1977.
- 9) J. M. Paredes and R. E. Spero：Water depth mapping from passive remote sensing data under a generalized ratio assumption，ibid，Vol. 22，No. 8，pp. 1134~1135，1983.
- 10) D. Spitzer and R. W. J. Dirks：Bottom influence on the reflectance of the sea，Int. J. Remote Sensing，Vol. 8，No. 3，pp. 279~290，1987.
- 11) B. D. Jun，K. Gotoh，Y. Tanabashi and Sam Wouthuyzen：The extraction of bottom characteristics and mapping in Kin Bay，Okinawa Main Island，Japan using Landsat-5/TM and SPOT/HRV data，Proceeding of PORSEC '92，Vol. 1，pp. 211~216，1992.
- 12) D. R. Lyzenga：Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features，Applied Optics，Vol. 17，No. 3，pp. 379~383，1978.
- 13) 河口至商：多変量解析入門，森北出版，1978.
- 14) 気象庁：潮位表，1994.