

衛星リモートセンシングによる砂浜海岸の高精度水深推定法とその適用性に関する研究

鈴木健太郎*・泉宮尊司**・石橋邦彦***

本研究では、衛星リモートセンシングによる砂浜海岸の高精度水深推定法を提案している。浅海域では、水中消散係数および海底反射率の変動が無視できないため、検定測線を設けてその変動特性を取入れ、空間分解能を余り低下させないフィルターを開発して、水深を推定している。推定された水深は、実測の測量データを用いてその誤差の分布を調べ、本手法の有効性を検証している。その結果、水深 4 m 以浅では検定測線より 500 m から 600 m の距離まで 0.4 m 以内の推定誤差で推定できることが分った。

1. 緒 言

沿岸域の水深データを広範囲に収集することは、海浜の土砂管理や漂砂現象を解明する上で極めて重要なことである。しかしながら、定期的に測量されている海浜は、面積的にも狭い範囲に限られており、しかも海浜測量には多大な労力と費用がかかるために、測量間隔も衛星データの空間分解能より粗い場合が多い。

これまでの水深の推定に関する研究では、消散係数の値が沿岸域で一定であるとの仮定のもとに水深を推定した灘岡・田村 (1993) の研究や輝度値と水深との経験式を用いて水深を推定した Darkwah ら (1998) のものがある。しかしながら、これらの手法では水深の推定精度に限界があり、またその定量的な評価もなされていない。衛星データを用いて水深を推定する際に大きな問題となるのが、ノイズや水中消散係数および海底反射率等の変動に起因する推定精度の低下である。泉宮ら (2000) は、水中消散係数の岸沖方向の変動を考慮するために、検定測線を設けて海底反射率の分布を測定するとともに水中消散係数を推定して、水深を推定する方法を提案した。しかしながら、その研究では系統だった推定誤差の評価は行なわれておらず、また水中消散係数の変動は考慮しているものの、水中散乱光や海面反射率の変化はないものとしており、それらの変動が水深推定の誤差の要因の 1 つとなっていた。そこで本研究では、それらの変動の影響を出来るだけ小さくし、水中消散係数の安定した推定法および基準となる汀線位置推定法を示し、それらを用いて水深推定を行なっている。さらに、実測の測量データを用いてその誤差の沿岸方向の分布を調べ、本手法の有効性を検証する。

2. 衛星リモートセンシングによる水深の推定法

(1) 絶対輝度値と水深 h との関係

一般に、衛星光学センサへの入射光量は、太陽光が海面で反射した光および水中を透過し海底面で反射してきた光や、大気散乱光や水中散乱光などの光の成分も含まれ、次式で表される (灘岡, 1995)。

$$V_i = S_i \{ T_A [\Gamma(\lambda_i) \exp \{ -(\sec \theta + \sec \phi) K(\lambda_i) h \} + \Gamma_{a/w} + \Gamma_{scw}] L_{\lambda_i} \Delta \lambda_i + P_{sc} \} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 V_i は i チャンネルの輝度値、 S_i はセンサーの感度、 T_A は光の大気透過率、 $\Gamma(\lambda_i)$ は光の海底反射率、 θ および ϕ は入射角、屈折角、 $K(\lambda_i)$ は光の水中消散係数、 $\Gamma_{a/w}$ は光の海面反射率、 Γ_{scw} は光の水中散乱による反射率、 $L_{\lambda_i} \Delta \lambda_i$ は太陽光量、 P_{sc} は大気の散乱光量である。この大気の散乱光量 P_{sc} は、灘岡・田村 (1993) と同様に深海域の近赤外 BAND の輝度値を用いて補正することにした。

衛星リモートセンシングのデータには、散乱反射によるノイズやストライプノイズ等様々なノイズ成分が含まれるために、空間分解能を出来るだけ損なうことのないように、平滑化を行なう必要がある。本研究では、泉宮ら (2000) と同様に対数輝度値に対する平滑化手法を用いている。

ここで、水深が十分に大きい海域での輝度値 $V_{i\infty}$ と汀線付近の輝度値 V_{i0} を用いて式 (1) の輝度値を基準化すると、次式が得られる。

$$\frac{V_i - V_{i\infty}}{V_{i0} - V_{i\infty}} = \frac{\Gamma(\lambda_i) \exp \{ -(\sec \theta + \sec \phi) K(\lambda_i) h \}}{\Gamma_0(\lambda_i) - \Gamma_{a/w}^{\infty} - \Gamma_{scw}^{\infty}} + \frac{(\Gamma_{a/w} - \Gamma_{a/w}^{\infty}) + (\Gamma_{scw} - \Gamma_{scw}^{\infty})}{\Gamma_0(\lambda_i) - \Gamma_{a/w}^{\infty} - \Gamma_{scw}^{\infty}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\Gamma_0(\lambda_i)$ は汀線付近での海底反射率、 $\Gamma_{a/w}^{\infty}$ および Γ_{scw}^{∞} はそれぞれ水深が十分に深い海域での光の海面反射率と、光の水中散乱による反射率である。

これまでの研究では、浅海域での海面反射率および水中散乱光の反射率は沖合いでのそれらとそれぞれ等しいとして無視されていたが、厳密には ss やクロロフィル a

* 工修 新潟市 (前新潟大学大学院)
** 正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科
*** 正会員 新潟大学技官 工学部建設学科

等の濃度が異なるので、値は小さいが異なるものと予想される。したがって、水深を精度よく推定するためには、式(2)に含まれる不要な成分を除去し、水中消散係数と海底反射率を如何に精度の高い安定した推定値を得るかに懸っている。

一般に、水深や水中消散係数の値は比較的大きな空間スケールで変化するのに対して、式(2)の右辺最終項の変動は隣のピクセル間(20 m～30 m)でも有意に変化することがあり、より小さな空間スケールで変動する成分が含まれているため、そのままの値を用いて水中消散係数等を推定するとやや変動の大きい推定値が得られる。そこで本研究では、まず式(2)において、

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{V_i - V_{\infty}}{V_{i0} - V_{\infty}}, \quad a = \frac{\Gamma_{a/w}^{\infty} + \Gamma_{scw}^{\infty}}{\Gamma_0(\lambda_i)} \\ \psi(x, y) &= \frac{\Gamma_{a/w} + \Gamma_{scw}}{\Gamma_0(\lambda_i)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

とおき、式(2)を書き換えると、

$$E = \frac{\Gamma(\lambda_i) \exp\{-(\sec \theta + \sec \phi) K(\lambda_i) h\} + \frac{\psi - a}{1 - a}}{\Gamma_0(\lambda_i)(1 - a)} \dots\dots\dots (4)$$

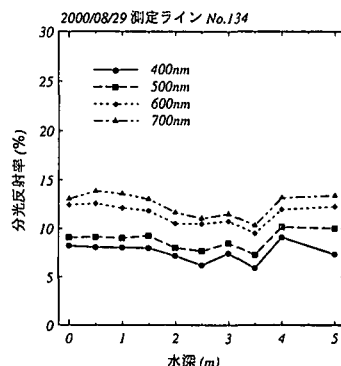
となる。ここで、 $\psi = a + \varepsilon$ とおき、 $a \ll 1$ の仮定もとに、上式を変形すると、

$$E = (1 + a) \frac{\Gamma}{\Gamma_0} \exp\{-(\sec \theta + \sec \phi) K h\} + \varepsilon \dots\dots\dots (5)$$

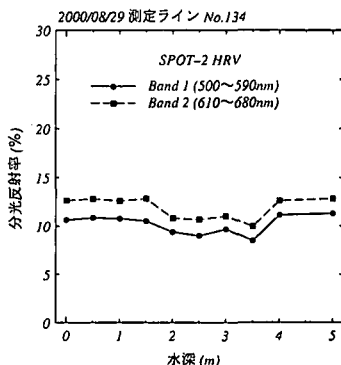
が得られる。上式において、右辺第2項が水深推定に不要なノイズ的な変動を持った成分であり、この項の存在によって、安定した水中消散係数の推定値が得られなくなる。そこで、浅海域においては、 ε の60 m程度以内の短周期成分 $\varepsilon^{\text{short}}$ の変動を去除するために、小領域で積分することにした。すなわち、ぼかし画像を用いることで、光の海面反射率および光の水中散乱による反射率の60 m程度以内の短周期成分を除去して、消散係数の安定した推定値を得ることを目的としている。本研究では、対象領域内において E を近傍の9点で平均化している。その結果、海面反射率および水中散乱による反射率の60 m程度以上の変動に起因する誤差が含まれるが、水深 h を算定する関係式として次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} h &= -\frac{1}{(\sec \theta + \sec \phi) K(\lambda_i)} \\ \left\{ \ln \left(\frac{V_i - V_{\infty}}{V_{i0} - V_{\infty}} \right) + \ln \left(\frac{\Gamma(\lambda_i)}{\Gamma_0(\lambda_i)} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

上式において、海底反射率については底質の鉱物組成の時間的変化が十分に小さいと見なせるので予め測定した値を用い、水中消散係数に関しては検定測線上の水深のデータを用いることにより、その変動性を考慮した水深の推定が可能となる。本研究では、まず海底砂の分光



図一 水深毎の分光反射率の変化



図二 各 Band の分光反射率と水深との関係

反射率と水深との関係を調べた。そして、対象領域内における汀線位置を衛星リモートセンシングデータより推定した上で、ある検定測線において求められた海底反射率と衛星データにより水中消散係数を推定し、その推定値と実測水深との関係を用いて、領域内の他の岸沖方向の水深を推定した。

(2) 海底分光反射率の測定

海底分光反射率を精度よく測定するために、新潟海岸の現地において採取ラインを設け、そのライン上の水深の異なる地点で海底砂を採取して持ち帰り、灘岡ら(1997)の方法により測定した。測定には分光光度計を用い、400～700 nm では 25 nm ごとに、700～750 nm では 50 nm ごとに分光入射光量より反射率を測定した。その際、日照の変動による補正を行うために、400, 500, 600, 700 nm を測定する時に、白色検定板の分光入射光量も同時に測定した。

図一および図二は、海底砂の分光反射率を、それぞれ代表的な波長および光学センサの各 Band の平均値について示したものである。両図より、反射率は全体的にはほぼ一定であるが、水深 1.5～3.5 m の範囲内ではやや小さくなっていることが分かる。特に衛星光学センサ

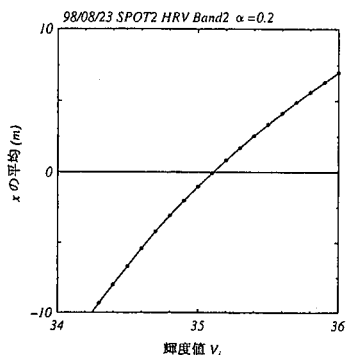


図-3 輝度値の変化による汀線位置の誤差

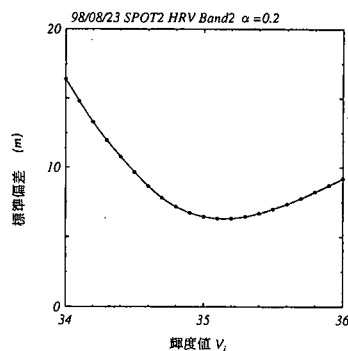


図-4 輝度値の変化による汀線位置の標準偏差

の各 Band の平均値は、2 m～3.5 m で分光反射率が 10 数%程度小さくなっている。海底砂を採取したこの範囲の水深の地点は、バーの沖側斜面に位置していたことが分かっている。すなわちこの地点では砕波が卓越し、波動流が大きくなることにより、軽い底質は巻き上げられ、比重の大きい黒っぽい底質の残存率が高くなったことから、分光反射率が小さくなったものと考えられる。

(3) 汀線位置の輝度値の推定

リモートセンシングデータを用いて水深を推定する際において、汀線位置の輝度値を知ることは、水深が 0 m と既知量であるので極めて重要なことである。しかしながら、衛星リモートセンシングの空間分解能が 20 m から 30 m であるので、ピクセル内の一部には陸域や海域が含まれたりするので、そのままの輝度値のデータを用いて判断するのはかなり難しい。そこで本研究では、衛星データの対数輝度値に対して前述の平滑化を適用し、等輝度値線と実測された汀線位置とを比較することにより、汀線位置の輝度値を決めることにした。

図-3 は、輝度値の変化による実測された汀線位置との誤差を表したものである。輝度値が大きくなるに従って、汀線位置は正の誤差が生じる傾向にあり、輝度値 V_i が 35.1 ($\text{W}/\text{m}^2 \text{srad } \mu\text{m}$) の時、誤差がほぼ 0 となっている。図-4 は、輝度値の変化による汀線位置の標準偏差を示したものである。SPOT2/HRV の Band 2 の分解能が 20 m であるにも拘らず、汀線位置の誤差の標準偏差が、輝度値が 35.1 ($\text{W}/\text{m}^2 \text{srad } \mu\text{m}$) の時、6.32 m であり、本研究で用いたフィルターの性能の高さを示していると言える。図-5 は、輝度値が 35.1 ($\text{W}/\text{m}^2 \text{srad } \mu\text{m}$) の位置と実測データとを比較したものである。この図において、実測データは実線で、衛星データによるものは点線で示しており、下側の点線は汀線ではなく草地あるいは防砂林地帯である。推定された汀線の位置は実測データとほぼ一致しており、その誤差の標準偏差も 6.3 m であることから、航空写真によって汀線を読み取った程度の

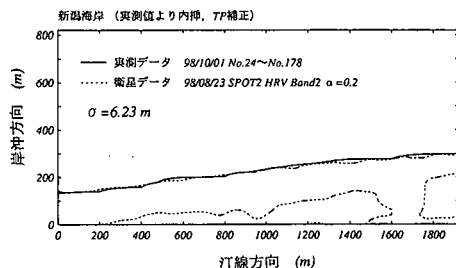


図-5 推定した汀線位置と実測データの比較

精度 (例えば、黒澤・田中, 2001) を有している。

3. 水深推定結果とその考察

(1) 調査対象海岸

衛星データを用いた水深推定の対象海岸として、新潟海岸の新川左岸側の海岸を選定した。この海岸には、図-6 に示すように砂州地形が発達しており、地形変化の精度を確かめ易いこと、および地形測量が国土交通省信濃川下流工事事務所により行われているので選定した。この海岸の底質は、比較的細粒の砂からなり、波浪が 1 m 程度以上になると濁りが発生するので、波の小さい夏のデータを用いることにした。

用いた衛星データは、1998 年 8 月 23 日に観測された SPOT-2/HRV のバンド 2 であり、海岸測量データは 1998 年 10 月 1 日に測量されたものを用いた。衛星データと測量データには 1 ヶ月余りの日時の差があるので、多少の地形変化が存在するものと思われる。

(2) 推定された水深とその誤差の評価

本研究では、対象領域においてある検定測線を設け、その測線上における水深と水中消散係数の関係を求め、その関係により近傍の他の海域の水深を推定した。

図-7 は、検定測線から 100 m 離れたライン上における水深を比較したものである。この図を見ると、全体的に推定された水深は実測水深と同様の傾向を示しており、値も極めて近い値をとっていることが分かる。しか

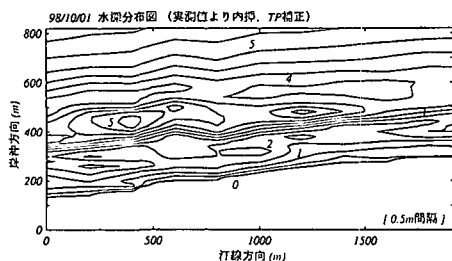


図-6 調査対象地域の等深線図

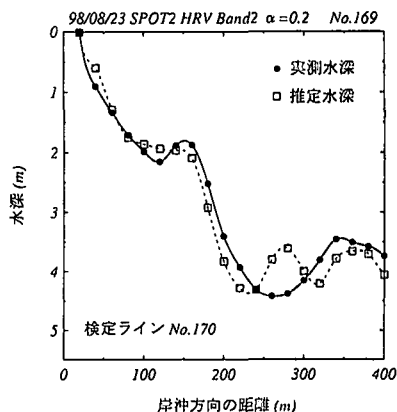
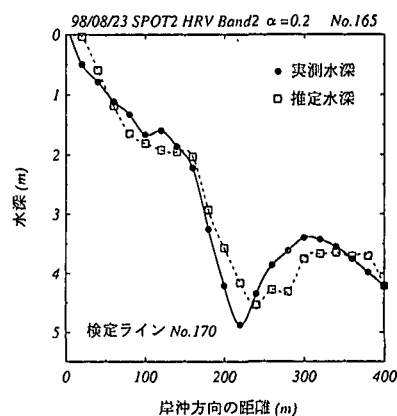
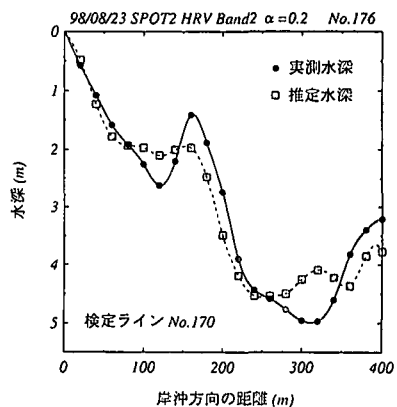
しながら、水深が4 m以深の地点ではやや大きな誤差が見られる。これは、水深が4 m以深になると海底からの反射光量が極めて小さく、水深変化に対して輝度値の絶対値の変化が小さいために、逆に水深を推定する際に大きな誤差が生じたものと考えられる。

図-8 は、検定測線から500 m離れたライン上における水深を比較したものである。この図を見ると、トラフやバーの位置は若干ずれているものの、全体の傾向としては、推定水深と実測水深は近い値をとっていることがわかる。しかしながら、汀線付近では誤差が見られる。これは、碎波によって生じた泡や浅水変形等による光の乱反射の影響が現れ、水深の推定に誤差を生じたものと推測される。

図-9 は、検定測線から600 m離れたライン上における水深を比較したものである。この図を見ると、全体的な傾向は似ているものの、水深が大きく変化しているバーやトラフのある地点では有意な誤差が見られる。これは、衛星データの前処理において、光の海面反射率と水中散乱による反射率の変動を除去するために、輝度値を近傍の9点で平滑化したことにより輝度値の変化が小さくなったこと、および水中消散係数の局所的な変動に起因するものと考えられる。

図-10 および図-11 は、検定測線からの距離に対する水深の推定誤差を、それぞれ検定測線より西側に600 mおよび東側に600 mの範囲について示したものである。図-10を見ると、検定測線より100 m離れた位置においては、0.2 m程度の誤差であるが、検定測線からの距離が長くなるにしたがって推定水深の誤差が徐々に大きくなっており、距離600 mの地点では水深の誤差が0.4 mとなっている。

一方、図-11の検定測線の東側では、前図の西側に比べて水深の推定誤差は小さく、その距離に対する誤差の増加の割合も小さくなっている。これは、西側には水深5 m以上のやや深いトラフが存在していることや、局所的な海上風によるさざ波の存在による海面輝度値の変化が影響しているものと考えられる。検定測線からの距離600 mの地点における水深の推定誤差が0.33 mである

図-7 推定水深と実測水深との比較 ($R=100$ m)図-8 推定水深と実測水深との比較 ($R=500$ m)図-9 推定水深と実測水深との比較 ($R=600$ m)

ことから、この程度の推定誤差であれば、浅海域の海岸地形を知るうえでは有効であり、本手法が実用に供するものと判断される。

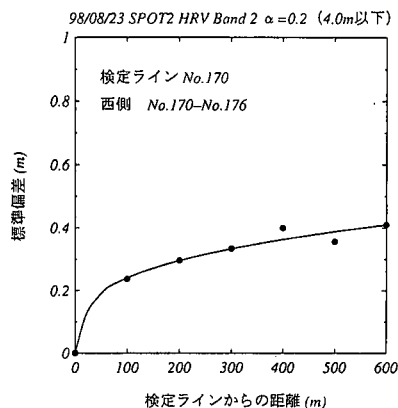


図-10 検定測線からの距離に対する水深の誤差

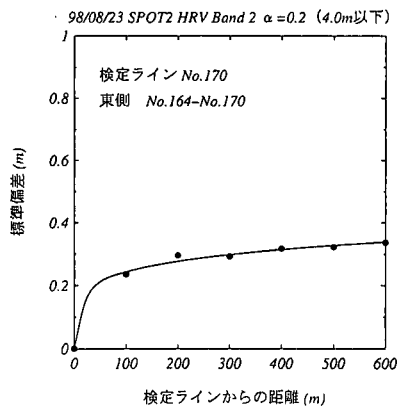


図-11 検定測線からの距離に対する水深の誤差

4. 結 論

本研究では、衛星リモートセンシングデータに基づいて水中消散係数の変動を考慮した浅海域の水深推定の精度を向上させるために新たな手法を開発すると同時に、新潟海岸の浅海域を解析対象として取り上げ、輝度値による汀線位置の推定も行い、それらの手法の有効性を検証した。以下に、本研究で得られた主要な結論を述べる。

(1) 新潟の砂浜海岸において、水深 5 m 以浅では海底の分光反射率は概略的にはほぼ一定と見なせるが、水深が 2 m から 3.5 m の地点では分光反射率が 10 数%程度小さくなる傾向が明確に見られた。この分光反射率の変動は、もし無視すれば水深推定に有意な誤差を与えるものであると判断された。

(2) 水深推定に用いられる代表的な輝度値である汀線の輝度値を調べるために、実測の汀線と等輝度値線との関係を調べたところ、衛星データの空間分解能が 20 m であるにも拘らず、汀線位置の誤差の標準偏差が最小値 6.32 m を得ることができた。このことは、本研究で用いたローパスフィルターの性能の高さが示されたと共に、航空写真による汀線位置の判定とほぼ同様な精度で評価できることを示している。

(3) 対数輝度値に対する上述のフィルターとぼかし画像によって得られた消散係数は、岸沖方向に有意に変動しており、パーおよびトラフ地形にほぼ対応した変動

を示していた。また、その沿岸方向の変化は岸沖方向に比べて小さいことが分った。

(4) 本手法で推定された水深は、水深が 4 m 以浅では検定測線より 500 m から 600 m 離れても比較的精度が高く、0.34 m から 0.4 m の誤差以内で推定できることが分った。

最後に、本研究の一部は日本学術振興会平成 13 年度科学研究費基盤研究 C(2)の補助を受けたこと、および衛星データは宇宙開発事業団より、また測量データは国土交通省信濃川下流工事事務所より提供されたことを付記し、感謝いたします。

参 考 文 献

- 黒澤辰昭・田中 仁 (2001): 空中写真による海浜汀線形状の判読に関する研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 586-590.
- 灘岡和夫 (1995): 衛星画像データに基づいた沖縄赤土流出モニタリングシステムの開発と汎用化, 平成 5 年度文部省科学研究費(試験研究 B(1)) 研究成果報告書, 269 p.
- 灘岡和夫・田村英寿 (1993): 沖縄赤土流出問題に関する汎用衛星モニタリングシステム構築の試み, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 1106-1110.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・横山智子・大見謝辰男・下池和幸 (1997): 海底分光反射特性解析に基づくサンゴ礁海域衛星モニタリングの一般化の試み, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1291-1295.
- Darkwah, S. O., C. Deguchi, S. Sugio and M. Kunishita (1998): A simple method of estimating water depth at the nearshore zone from satellite data, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 13-27.