

1. はじめに

四方を海で囲まれた我が国にとって、海岸侵食は国土が脅かされることを意味し、その対策は喫緊の課題となっている。最近の傾向としては、構造物によるハード的対策だけでなく、直接土砂投入を行う養浜やサンドリサイクルのようなソフト的対策が注目されている。一般的に侵食対策を施す場合、その効果を評価する必要がある。そのため、海浜変形予測が実施されることが多く、養浜などのソフト的対策を行った場合も同様である。これまで、著者らは養浜効果を予測可能な海岸線変化モデルを提案してきた。しかし、養浜などの土砂投入を行う場合、養浜砂と現地の砂の粒径が異なることも多く、粒径の違いが養浜効果に及ぼす影響を検討することが非常に重要である。そこで、本研究では、澁谷ら(2008)の等深線変化モデルを混合粒径を考慮したモデルへ拡張し、単一粒径砂と混合粒径砂の違いならびに養浜砂の粒径の違いが養浜効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 数値モデル

本モデルは宇多・河野(1996)の等深線変化モデルに、2次元移流拡散方程式を用いて土砂投入の影響を考慮し、さらに熊田ら(2002)の混合粒径の考えを取り入れたものである。

図-1 に計算フローを示す。波浪場は間瀬ら(1999)の回折を考慮したエネルギー平衡方程式を用いた。

1) 沿岸漂砂量の計算

沿岸漂砂量式は小笹・Brampton(1979)公式を適用するが、Kamphuis *et al* (1986)による粒径の大きさを考慮した漂砂量係数を導入し、粒径毎の沿岸漂砂量の算定式を以下に示す。

$$Q^{(L)} = \mu^{(L)} A^{(L)} H_{bs}^2 C_{gb} \left(\hat{K}_1 \sin 2\alpha_{bs} - \hat{K}_2 \cos \alpha_{bs} \cot \beta \frac{\partial H_{bs}^2}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここに、 C_{gb} および α_{bs} は碎波点における群速度および波向きを表す。 $\cot \beta$ は海底勾配の逆数である。 $\mu^{(L)}$ は交換層内の粒径毎の体積含有率 ($L=1..NN$)、 $A^{(L)}$ は Kamphuis *et al* (1986)による粒径に関する係数で、次式より求めた。

$$A^{(L)} = A_d / d_{50}^{(L)} \quad (2)$$

ここに、 A_d は粒径の大きさに関する係数、 $d_{50}^{(L)}$ は粒径毎の中央粒径である。

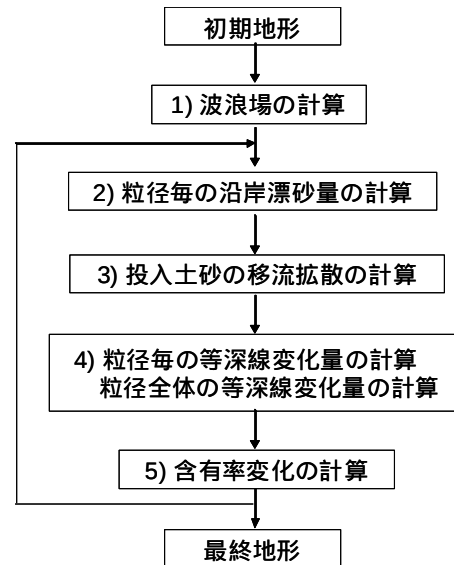


図-1 計算フロー

2) 養浜土砂の考慮

養浜砂は単一粒径とし、投入土砂の挙動に関する2次元移流拡散方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} + C_1 U_s \frac{\partial q_n}{\partial x} + C_2 V_s \frac{\partial q_n}{\partial y} = C_3 K_x \frac{\partial^2 q_n}{\partial x^2} + C_4 K_y \frac{\partial^2 q_n}{\partial y^2} \quad (3)$$

ここに、 q_n は投入された土砂量である。 U_s 、 V_s は投入土砂の岸沖・沿岸方向の移動速度、 K_x 、 K_y は投入土砂の岸沖・沿岸方向の拡散係数である。また、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 は粒径の大きさを考慮するための係数であり、次式で表される。

$$C_l = C_{ld} / \sqrt{dd_{50}} \quad (l=1\sim 4) \quad (4)$$

ここに、 C_{ld} は粒径の大きさに関する係数で、 dd_{50} は養浜砂の中央粒径である。 V_s は、灘岡ら(1981)より $V_s=0.01V$ とし、 V は沿岸流速で、Inman・Quinn (1951)より求めた。 U_s は、底面水粒子速度の最大値の関数を用い、 $U_s = U_A \times U$ で求める。 U_A は移動方向を考慮した投入土砂の移動速度に関する漂砂量係数で、 U は底面水粒子速度の最大値である。

3) 等深線変化の計算

粒径毎の等深線変化量は粒径毎の土砂量保存則に

より、次式で表される。

$$\frac{\partial y_m^{(L)}}{\partial t} + \frac{1}{h_m} \left(\frac{\partial Q_m^{(L)}}{\partial y} - q^{(L)} \right) = 0 \quad \begin{matrix} (m=1 \dots N) \\ (L=1 \dots NN) \end{matrix} \quad (5)$$

ここに、 m は等深線番号、 N は等深線の本数、 NN は粒径数である。 $y_m^{(L)}$ は m 番目の粒径毎の等深線位置(m)、 h_m は m 番目の等深線における砂の移動高さ(m)、 $Q_m^{(L)}$ は m 番目の粒径毎の等深線の沿岸漂砂量(m^3/s)であり、宇多・河野(1996)の沿岸漂砂量の水深方向分布 $\xi(z)$ を用い、次式で求める。

$$Q_m^{(L)} = \varepsilon_m Q^{(L)} \quad (6)$$

$$\varepsilon_m = \int_{z_m}^{z_{m+1}} \xi(z) dz / \int_{h_c}^{h_R} \xi(z) dz \quad (7)$$

ここに、 z は静水面を基準とした鉛直上方距離、 h_R は陸上部において波による土砂移動が生じる限界高さ、 h_c は沖側の移動限界水深である。

また、 $q^{(L)}$ は養浜土砂による寄与分であり、養浜砂の粒径と、計算する等深線の粒径が等しい時に付加される。しかし、式(3)中の q_n は体積量であり、式(5)中の $q^{(L)}$ は単位時間、単位長さ当たりの土砂量であるため、以下の関係を適用する。

$$q^{(L)} = K_p q_n \quad (8)$$

$$K_p = 1/(\Delta t \cdot \Delta y) \quad (9)$$

ここに、 Δt は計算時間間隔、 Δy は格子間隔である。全粒径の等深線変化量 Y_m は粒径毎の変化量を合計して次式となる。

$$\frac{\partial Y_m}{\partial t} = \sum_{L=1}^{NN} \frac{\partial y_m^{(L)}}{\partial t} \quad (10)$$

4) 含有率変化の計算

粒径の分級作用を考慮するため、交換層内での粒径毎の体積含有率を計算する。熊田ら(2002)の粒径毎の土砂収支式を用い、堆積域では

$$\frac{\partial \mu^{(L)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_m^{(L)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_m}{\partial t} \cdot \mu^{(L)} \right\} \quad (L=1 \dots NN) \quad (11)$$

より含有率を算定する。一方、侵食域では

$$\frac{\partial \mu^{(L)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y_m^{(L)}}{\partial t} - \frac{\partial Y_m}{\partial t} \cdot \mu_B^{(L)} \right\} \quad (L=1 \dots NN) \quad (12)$$

より算定する。ここに、 $\mu_B^{(L)}$ は地形変化が起こる前の含有率であり、ここでは初期含有率とする。また、

B は交換層幅である。

3. モデルの検証

モデルの基本特性を確認するため、図-2のように、沿岸方向 2000m、岸沖方向 1000m、初期勾配 1/50、両端を突堤に囲まれたモデル地形での計算を行った。波を斜め入射させ、流れの上手側で侵食、下手側で堆積しサンドリサイクル等を行う状態を想定している。

1) 単一粒径における検証

まず、単一粒径で、養浜位置ならびに粒径の大きさの違いについての検証を行った。現地の砂の粒径は $d_{50}=0.25\text{mm}$ 、養浜砂の中央粒径は、 $dd_{50}=0.15\text{mm}$ 、 0.25mm 、 0.4mm である。土砂投入位置は、Case1 (汀線付近) および Case2 (水深 6m) とし、投入土砂量はいずれも $30,000\text{m}^3$ である。用いた波浪条件、各係数を表-1 に示す。

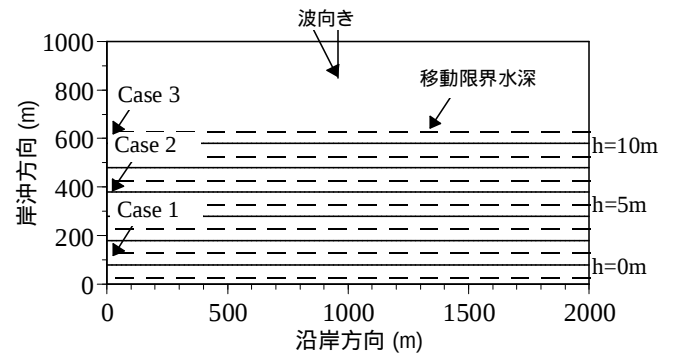


図-2 初期地形

表-1 計算条件

$H_s(\text{m})$	$T_s(\text{s})$	$A_d(\text{m}^{0.5})$	$\alpha(^{\circ})$	$C_{id}(\text{m}^{0.5})$	$\tan \theta$
1.20	7.0	0.016	5.0	0.014	1/50
K_1	K_2	U_s	$Vs(\text{m/s})$	$Kx(\text{m}^2/\text{s})$	$Ky(\text{m}^2/\text{s})$
0.2	0.324	-0.023	0.0012	0.00057	0.0023

Case1 において、 $dd_{50}=0.25\text{mm}$ の砂を養浜した場合の等深線の時間的変化を図-3 に示す。土砂投入直後である、3.3 日後には投入地点付近の等深線の一時的に前進し、その後、後退している様子が確認できる。図-3 では養浜効果が確認しづらい、図-4 に、Case1 および 2 の養浜を行った場合と行わなかった場合の 1 年後の変化量の差を示す。土砂投入地点付近で等深線の回復または前進が確認できる。また、養浜砂の粒径の違いの計算結果を図-5、6 に示す。Case1 および 2 の汀線および水深 6m の等深線変化を示している。図-5 より、汀線付近に土砂投入を行った場合、養浜砂の粒径が大きいほど、侵食域において、汀線の回復また、等深線の前進が確認できる。また、図-6 より投入地点より岸側の汀線において粒径による等深線変化の違いは確認できないが、投入地点の水深 6m では養浜砂の粒径が大きいほど、等深線が前進

することがわかる．よって，本計算においては，養浜砂の粒径が大きいほど，養浜効果が高いという結果を得た．

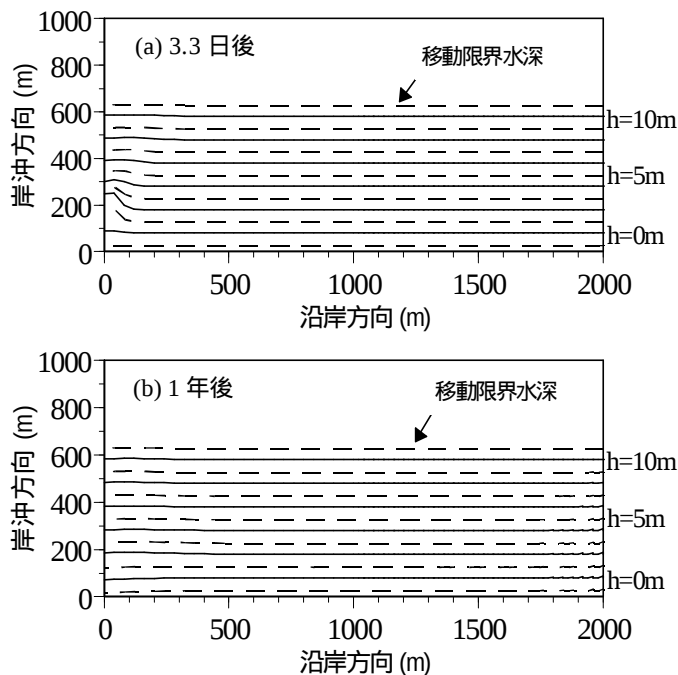


図-3 土砂投入による等深浅の時間的变化

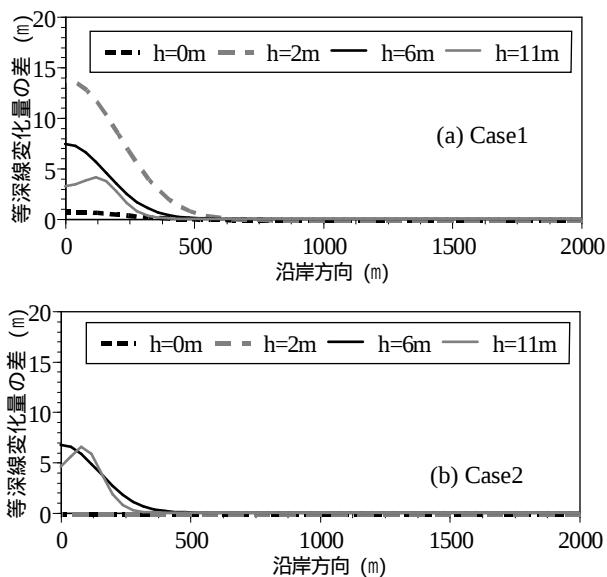


図-4 養浜の有無による1年後の等深浅変化量の差

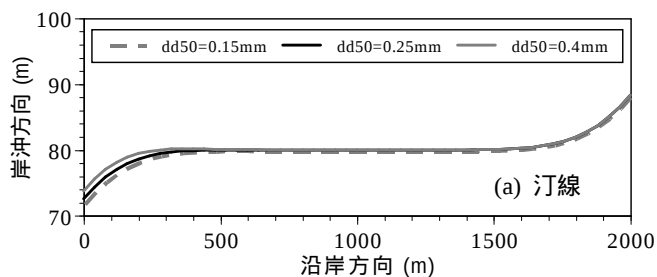


図-5 養浜砂の粒径の違い(Case1)

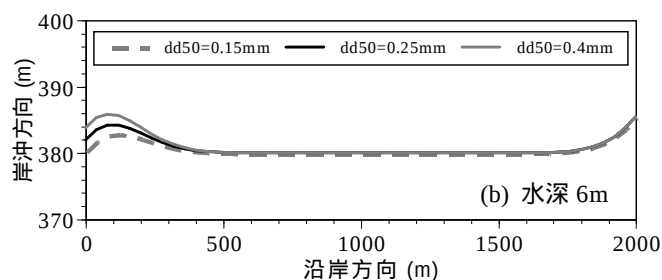


図-5 続き 養浜砂の粒径の違い(Case1)

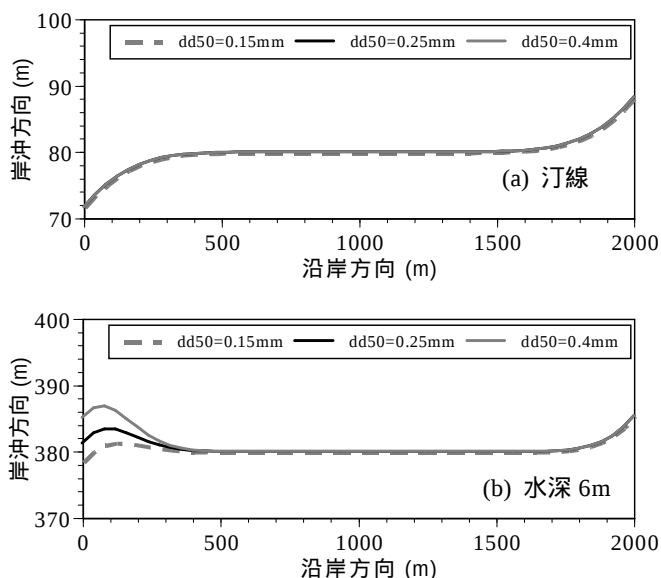
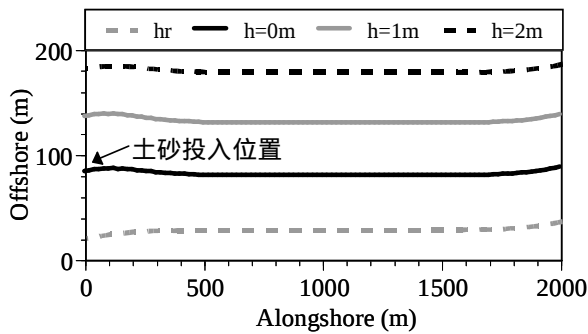


図-6 養浜砂の粒径の違い(Case2)

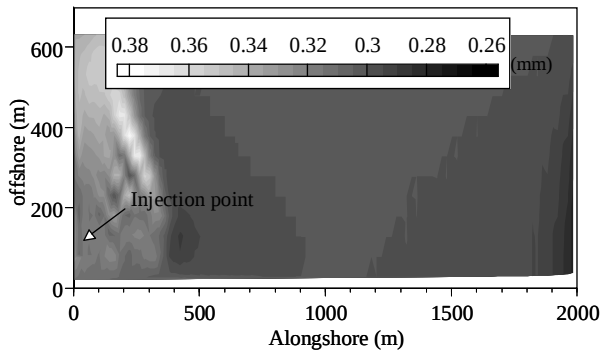
2) 混合粒径における検証

次に，同様のモデル地形において，混合粒径砂からなる海浜で養浜砂の粒径の違いについて検証した．底質は中央粒径 0.2mm と 0.4mm の 2 粒径を 1:1 の割合で混合し，養浜砂の中央粒径は $dd_{50}=0.4\text{mm}$ および 0.2mm である．

図-7 は，中央粒径 $d_{50}=0.4\text{mm}$ の砂を 5 日間で $20,000\text{m}^3$ 投入した結果である．養浜を行った場合，土砂投入付近において，等深線が前進し，中央粒径が粗くなっている．このことは，投入した土砂が，投入付近に留まり等深線の前進に寄与したことを示している．また，図-8 は中央粒径 $d_{50}=0.2\text{mm}$ の砂を 5 日間で $20,000\text{m}^3$ 投入した結果である．等深線の前進量はごく僅かであり，投入された土砂は沿岸流と波的作用により，流され等深線変化にほとんど寄与していないことがわかる．以上より，計算条件内の粒径では，養浜材に粒径の大きな砂用いた方が効果的であることがわかる．

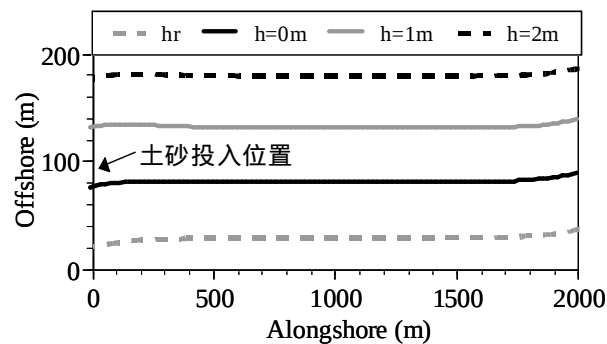


(a) 等深線変化

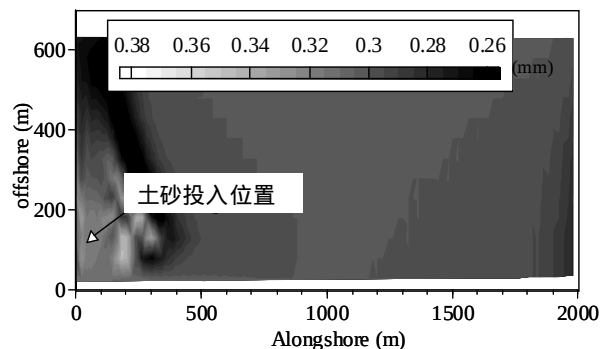


(b) 粒径の平面分布

図-7 1年後の計算結果（養浜砂 0.4mm）



(a) 等深線変化



(b) 粒径の平面分布

図-8 1年後の計算結果（養浜砂 0.25mm）

4. おわりに

本研究では、混合粒径を考慮した養浜効果を予測

可能な等深線変化モデルを用いて、養浜砂の粒径委の違いが養浜効果に及ぼす影響の調査を行った。単一粒径砂および、混合粒径砂のモデル地形での計算より、本計算の範囲内では、粒径の大きな土砂を投入することで、投入土砂が投入地点付近に留まり、等深線の回復に寄与することがわかった。

今後、更なるケーススタディーを重ね各係数を同定するとともに、現地データとの比較を行いモデルの妥当性を検証必要がある。

謝辞：本研究では波浪場の計算において、間瀬らの回折を考慮したエネルギー平衡方程式を参考にさせていただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 小笹博昭・A.H.Brampton(1979)：護岸のある海浜のてい線変化計算，港湾技術研究所報告，第 18 巻，第 4 号，pp. 77-104
- 宇多高明，河野茂樹(1996)：海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発，土木学会論文集，No539/II-35，pp.121-139
- 宇多高明・清野聡子・大矢忠一・安田武夫・高橋功・古池鋼・星上幸良(2005)：沖合投入土砂の養浜効果予測手法の開発，海岸工学論文集 第 52 巻，pp.641-645
- 熊田貴之，小林昭男，宇多高明，芹沢真澄，星上幸良，増田光一(2002)：混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデルの開発，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.476-480。
- 澁谷容子・黒岩正光・松原雄平(2008)：移流拡散による土砂投入を考慮した等深線変化予測モデルに関する研究，海洋開発論文集，第 24 巻（印刷中）
- 砂村継夫(1980)：自然海浜における汀線位置の時間的变化に関する予測モデル，第 27 回海岸工学論文集，pp. 225-259
- 住谷迪夫・松浦健郎・宇多高明・高橋功・大木康弘・熊田貴之・芹沢真澄(2005)：粒度組成の平面変化を考慮した等深線変化モデルの鹿島灘海岸への適用，海岸工学論文集 第 52 巻，pp. 546-550
- 灘岡和夫・田中則男・加藤一正(1981)：蛍光砂を用いた碎波帯内における局所的移動の観測，港湾技術研究所報告 第 20 巻，第 2 号，pp. 75-126.
- 間瀬肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋(1999)：波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究，土木学会論文集，第 628 号，-48，pp. 177-187
- Inman, D. L. and W. H. Quinn(1951)：Currents in the surf zone, Proc, 2nd Conf. on Coastal Engineering.
- Kamphuis, J.W., M.H.Devies, R.B.Narin and O.J.Syao(1986)：Calculation of littoral sand transport rate, Coastal engineering, Vol.10, pp. 1-12
- Kuroiwa, M. and H. Noda(1994)：Field investigation of sand drift using fluorescent tracer, Proceedings of the international symposium: waves-physical and numerical modelling, pp. 1483-1490.