

離岸流と海岸変形の相互作用に関する研究

水工学研究室 村川 はるみ

指導教官 細山田 得三

1. はじめに

離岸流は、沿岸域において岸向きに輸送された海水がある場所において沖へ戻る強い流れであり、海水浴における海難事故の原因となる。沿岸域における海浜流は、セル構造と呼ばれる規則正しい循環流を形成しており、それに応じたカस्प地形と呼ばれる海岸線における凹凸の地形を生じる。海浜流と海岸変形はその形成や発達において密接な関係がある。本研究では地形と離岸流の相互作用について着目し、数値モデルを用いた研究を行った。

2. 研究の目的

離岸流に関する研究は古くから行われている。例えば、離岸流の現地観測として、出口ら(2003)が、鳥取県浦富海岸で係留気球からのビデオ撮影と極浅海域に設置した流速計による離岸流の実測を行い、既設潜堤開口部背後において、入射波高の増大に伴う顕著な地形性の離岸流を観測した。しかし、離岸流と海岸変形の相互作用についての研究は十分に行われてこなかった。そこで本研究では、数値波動モデルと地形変化モデルを結合させ、離岸流と海岸地形について互いに、同一時間ステップ内で影響を与えながら計算を進め、離岸流と地形の発達についての研究を行った。

3. 計算モデル

本研究では、海浜流と地形変化の相互作用を確認するために、**図-1**に示す数値モデルを用いて計算を行った。毎計算ステップで①波・海浜流の計算、②底質移動および海底地形変化の計算、③地形の修正を行った。これは、実海岸において波、海浜流、地形変化といった現象は同時に発生し、密接に相互作用していると考えられるためである。

波と海浜流の計算に用いた式は、流体運動の基礎方程式である連続式(式(1))と運動方程式(式

(2))である。式(2)は砕波項を含む修正ブシネスク方程式であり、波の非線形性によって生じる諸現象を解くことができる。

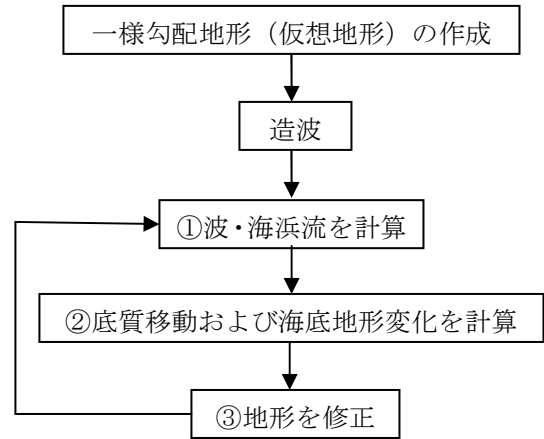


図-1 計算モデル アルゴリズム

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - MD \\ = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial x} \right) + Bgh^3 \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 Q は方向線流量(m/s)、 D は全水深(m)、 η は水面変動量(m)、 g は重力加速度(m/s²)、 h は静水深(m)、 B は補正係数、 MD は砕波によるエネルギー減衰である。

また、底質移動および海底地形変化の計算は、*Bailard (1981)*によって提案された、流れによって生じる砂の移動(掃流砂、浮遊砂)を考慮したモデルを用いて計算を行った。式(3)によって掃流砂量を、式(4)によって浮遊砂量を計算し、式(5)によって求め体積漂砂量の分布を求めた。

$$\bar{q}_B = \frac{C_f \varepsilon_B}{(\rho_s / \rho - 1) g \tan \phi} \left(\bar{u}_b |\bar{u}_b|^2 - \frac{s}{\tan \phi} |\bar{u}_b|^3 \bar{i} \right) \quad (3)$$

$$\bar{q}_S = \frac{C_f \varepsilon_S}{(\rho_s / \rho - 1) g w_s} \left(\bar{u}_b |\bar{u}_b|^3 - \frac{\varepsilon_S}{w_s} |\bar{u}_b|^5 \bar{i} \right) \quad (4)$$

$$\bar{q} = \bar{q}_B + \bar{q}_S \quad (5)$$

ここで、 \bar{q} は体積漂砂量(m²/s)、 \bar{q}_B は掃流砂量(m²/s)、 \bar{q}_S は浮遊砂量(m²/s)、 ρ_s は底質の密度(kg/m³)、 ρ は水の密度(kg/m³)、 C_f は抗力係数、 $\tan \phi$ は底質の内部摩擦角、 s は海底勾配、 \bar{i} は底面における局所的な斜面を登る向きの水辺単位ベクトル、 ε_B 、 ε_S はそれぞれ掃流砂、浮遊砂に対する無次元定数、 u_b は底面流速(m/s)、 w_s は底質の沈降速度(m/s)である。

そして式(5)によって求められた体積漂砂量を局所的な勾配の影響を考慮した修正式(6)によって修正し、底質の連続式(7)で地形変化の計算を行った。

$$\bar{q}_m = \bar{q} + \varepsilon |\bar{q}| \nabla \cdot z_b \quad (6)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = (\lambda - 1) \nabla \cdot \bar{q}_m \quad (7)$$

ここで、 \bar{q}_m は局所漂砂量(m²/s)、 ε (=0.5)は局所的な勾配の影響を表す係数、 λ (=0.4)は底質の空隙率、 z_b は地盤高(m)である。

4. 計算条件

地形条件、および波浪条件による離岸流発生の違いを検討するため、表-1に示すように条件を変化させ計算を行った。

計算領域は、海岸線方向に1600m、沖方向に800mとした。造波開始後、計算領域全体が定常状態になることを確認したうえで、造波200秒後に地形変化の計算を開始した。

表-1 計算条件

地形	カस्प地形(波長200m,振幅60m) 一様勾配地形
地形勾配	1/10,1/30,1/50
波高(m)	0.5~1.5
周期(s)	3~12
波向き(°)	180(岸に直角に入射)

また、地形変化による流れへの影響を調べるため、初期地形のまま地形変化が無いケースも含まれている。

5. 解析結果

離岸流の詳細を表示するため、結果の表示には岸方向500~1100m×沖方向0~300mの領域中央を拡大したものをを用いた。

a)海浜流計算

地形変化計算を行わない場合、各条件においてどの程度の離岸流が生じるかを検証した。その結果、一様勾配地形において離岸流は発生しなかったが、カस्प地形の場合、凸部に離岸流が発生した。これはカस्प地形が浅い場所と深い場所を有しているために波の屈折が起こりやすく、その結果生じた、セル構造と呼ばれる循環流が離岸流へ発達したためと思われる。さらに、カस्प地形に生じた離岸流の流速は波高が大きく、周期が長く、初期地形勾配が急であるほど、大きくなった。これは堀川(1973)による現地調査結果の知見である、離岸流の流速の大きさや離岸流の付け根から離岸流頭までの距離は、入射波高に関係していることと一致している。しかし、地形勾配が1/10と急勾配であった場合には、波高1.5m時よりも1.0m時のほうが離岸流速は大きく、周期についても周期12.0s時よりも8.0s時のほうが離岸流流速は大きかったことから、地形勾配により最大の離岸流が生じるような波高と周期が存在するものと考えられる。

b)地形変化計算

地形変化の影響を考慮して、3時間の地形変化計算を行った。計算の結果、波高が小さく周期の短いケースについては顕著な地形変化は見られなかったが、高波高、長周期の波浪条件において地形と海浜流に顕著な時間的变化が生じた。

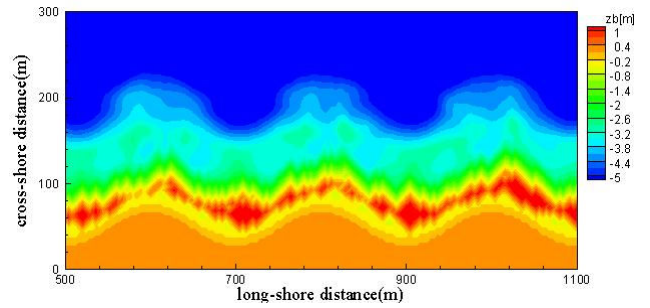
まず地形変化ケース1として、初期地形として地形勾配1/30のカस्प地形に、波向き180°、波高1.5m、周期12秒という波浪を3時間作用させたものである。地形標高を図-2に、流速分布図を図-3に、それぞれ造波60分後および180分後の図を示す。解析の結果、カस्प凹部沖では侵食、

カस्प凸部沖では砂が徐々に堆積し、離岸流流速は計算開始 60 分後に 0.2m/s 程度であったものが、計算開始 180 分後には 0.5m/s 程度の強い離岸流となった。これはセル構造において、凹部の沖から岸向きの海浜流によって輸送された土砂が、汀線付近に堆積、さらに沖へ向かう離岸流によって凸部の沖へ輸送され堆積したものと考えられる。その結果、波が強く屈折する領域が沖へと移動し、岸に向かうエネルギーが小さくなったことで離岸流が発達したと考えられる。

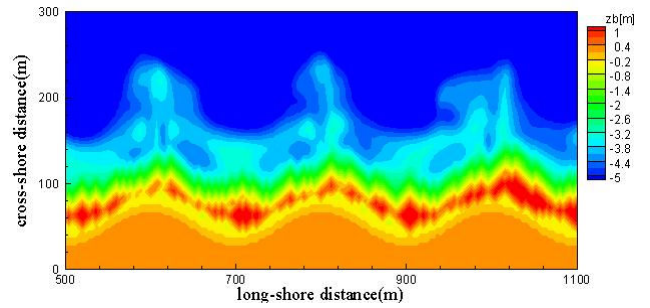
次に、地形変化ケース 2 として、初期地形として地形勾配 1/50 の一様勾配地形に、波向き 180°、波高 1.5m、周期 12 秒という波浪を 3 時間作用させたものである。造波 60 分後および 180 分後における地形標高を図-4 に、流速分布図を図-5 に示す。解析の結果、計算開始 60 分後に一様勾配だった地形が波状の地形になり、その後徐々に汀線が後退した。また流速については開始 60 分で離岸流の分布範囲が狭く流速が強いものとなり、その後一旦は流速が弱くなったが、180 分後にはまた沖方向に長く伸びる強い離岸流が形成されている。

これは、沖から入射してきた波が砕波することによって生じた水位上昇に不安定が生じたためと考えられる。一度生じた海岸線方向の不均一は、水位が高くなった状態にある汀線付近から、沖向き流速が生じ、流出した質量を補うためにその近辺で岸向き流速が発生し、それに伴う地形変化が生じたと考えられる。また、どちらのケースにおいても海浜流の計算時には生じなかった、離岸流流速の時間的な変化や発生箇所の変化が生じていることから、計算の結果生じた地形変化は離岸流の発達・形成に強い影響を与えるということが分かる。堀川による現地調査結果の要約によれば、離岸流の流速は時間とともに変動することが報告されており、それが海底地形の変動によることが予測される。

地形変化計算の解析結果全体を通して、一様勾配地形よりもカस्प地形のほうが離岸流は発生しやすく、とくに地形が凸となった箇所で離岸流が生じていることが分かった。しかし、一様勾配地



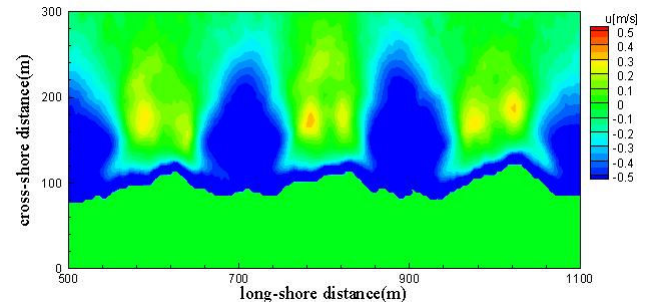
time = 60min



time = 180min

図-2 地形標高

(カस्प地形, $s=1/30, D=180^\circ, T=12, H=1.5$)



time = 60min

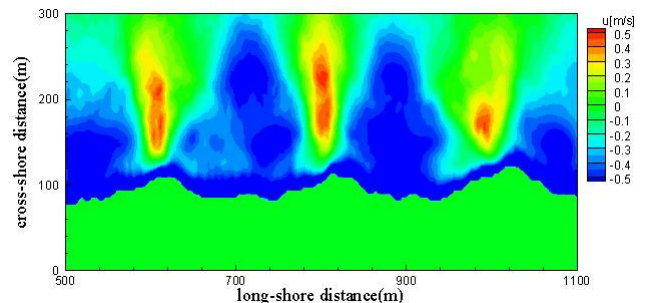


図-3 流速分布図

(カस्प地形, $s=1/30, D=180^\circ, T=12, H=1.5$)

形においても、離岸流に発達しうるセル構造を有する流れ、およびその流れによる地形変化が見られた。また、汀線が波状ではなくても、海底形状が波状であれば離岸流が発生していることから、離岸流の発生は汀線の地形よりも水中の地形に依存すると考えられる。初期の地形勾配については、勾配が緩やかなほど、地形変化、およびそれに伴う流速の変化は生じやすかった。これも堀川による現地調査結果の知見と一致している。初期地形としてカस्प地形を用いたケースでは、カस्पの凹凸がさらに強調されるものと、凹凸がなくなるものと2種類の変化が見られ、後者では離岸流が消滅している。現地の離岸流観測においても、その継続時間は数十分程度であったことから、離岸流は不安定で時間的変動を伴った現象であるといえる。

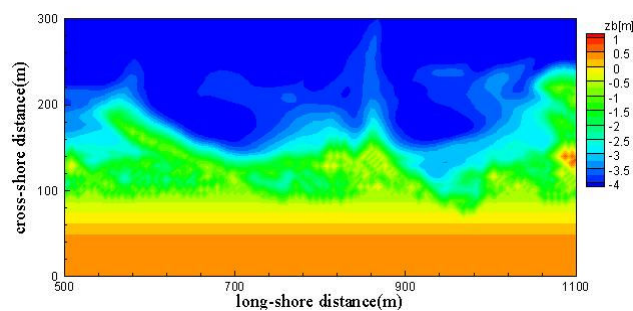
c) 日野による理論解析との比較

離岸流と、地形変化との関係については、日野(1974)によって1970年代の中期に論文が提出されている。それら論文の結論と、今回の解析により得られた結果との比較を行った。日野の結論は以下のようなものである。

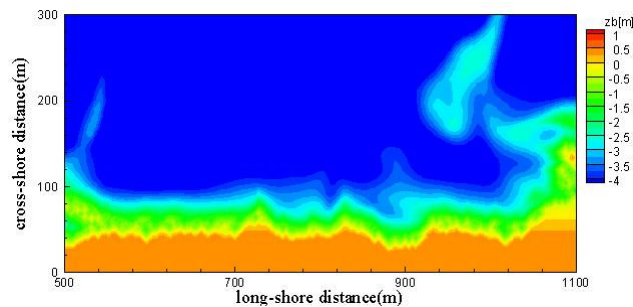
1. 入射角度が大きくなる、すなわち斜め入射となる場合、ピーク波数は小さい方向にシフトする。すなわち、離岸流セルの間隔が大きくなる
2. 離岸流セルの波長は、汀線から碎波帯までの距離 L_b の2~4倍程度である。
3. パラメータ (h_b / L_b) が小さい、すなわち海底地形勾配が小さくなるほど、地形変化に関する増幅率の値が大きくなる。従って遠浅の海岸ほど離岸流やカस्प地形がよく発達する。
4. 凸型地形ほど離岸流の発生が顕著である。

3., 4.は今回の解析結果においても多くのケースで再現された。さらに1., 2.についても比較を行った。

1.の入射角による離岸流セルの間隔について検証するため、地形勾配 $1/30$ の一様勾配地形に、波高 1.5m 、周期 12 秒、そして波向きを 180° 、 135° と変化させ3時間の計算を行った。それぞれの造波3時間後における流速分布図を図-6に示



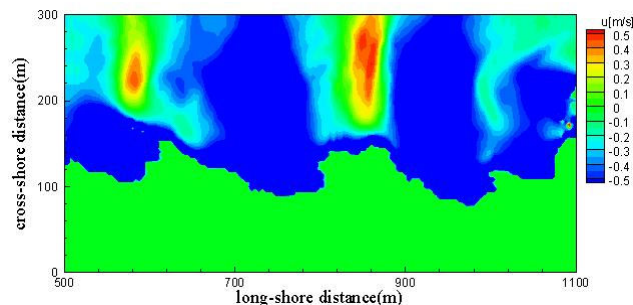
time = 60min



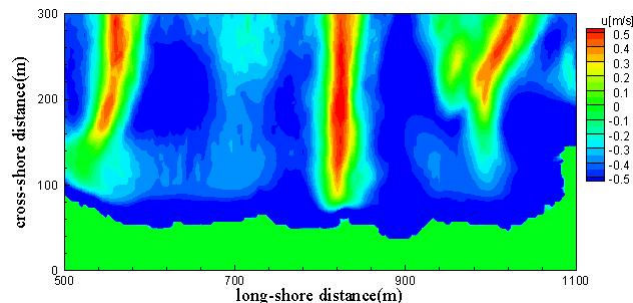
time = 180min

図-4 地形標高

(一様勾配地形, $s=1/50, D=180^\circ, T=12, H=1.5$)



time = 60 min



time = 180min

図-5 流速分布図

(一様勾配地形, $s=1/50, D=180^\circ, T=12, H=1.5$)

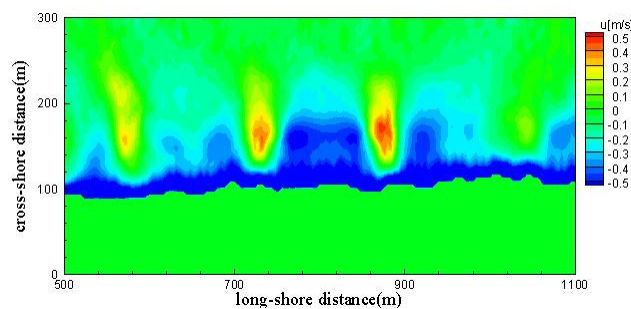
す。図-6(a)より波向きを 180° として計算した場合、離岸流セルの間隔、すなわち離岸流の発生間隔は 140m 程度であり、地形の凸型もこの間隔で形成されていた。一方、図-6(b)より波向きを 135° として計算した場合、離岸流の発生間隔は 240m 程度となり、波向き 180° の時と比べて離岸流セルの間隔が大きくなっていることが分かる。

次に 2.の離岸流セルの波長について検証するため、地形勾配 $1/30$ の一様勾配地形に、波高 1.5m 、周期 12 秒、波向き 180° とし 3 時間の計算を行った。計算開始 3 時間後の碎波係数分布を図-7 に、流速分布を図-8 に示す。結果、汀線から碎波帯までの距離が 70m 程度であるのに対し、離岸流セルの波長は 140m 程度と汀線から碎波帯までの距離の約 2 倍であった。よって、離岸流セルの波長は、汀線から碎波帯までの距離 L_b の 2 倍程度となり、これは日野の結論 2. 「離岸流セルの波長は、汀線から碎波帯までの距離 L_b の 2~4 倍程度である。」と一致している。

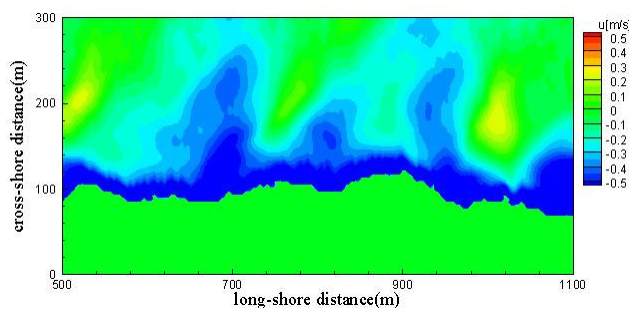
d)実地形計算

新潟県島見浜付近(太夫浜)を対象とし、離岸流の再現を行った。計算領域は海岸線方向に 800m 、沖方向に 400m とした。図-9 は対象地形周辺の航空写真、図-10 はデータより作成した地形図である。現地には突堤といったコンクリートの海洋構造物が設置されている。この地点において、第九管区海上保安部が離岸流観測調査を行った、平成 18 年 5 月 25 日の波浪を作用させ、計算を行った。当日の波浪は波向きが北北西、波高が $0.5\sim 1.0\text{m}$ 、周期については記載が無かったため、 5 秒とし 15 分程度の海浜流と地形変化の計算を行った。

結果として、図-11 に流速分布図を、図-12 に地形標高を示す。図-11 より、突堤付近から $0.3\text{m/s}\sim 0.4\text{m/s}$ 程度の離岸流が発生しているのがわかる。また、一番左端は長い突堤があり、そこでは流速が大きい離岸流が形成され、それに伴う地形変化が確認できる。この日付近の突堤で行われた離岸流の観測では、 0.2m/s から 0.4m/s の流速が観測されており、これは解析の結果形成された離岸流の流速と合致している。



(a)波向き 180°



(b)波向き 135°

図-6 流速分布図

(一様勾配地形, $s=1/30, T=12, H=1.5$)

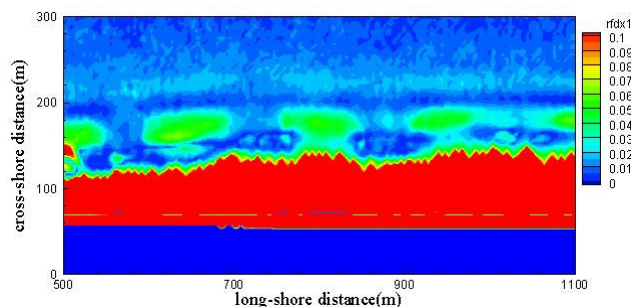


図-7 碎波係数分布図

(一様勾配地形, $s=1/30, T=12, H=1.5$)

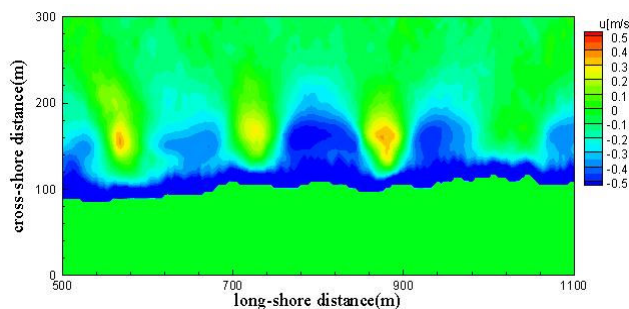


図-8 流速分布図

(一様勾配地形, $s=1/30, T=12, H=1.5$)

6. まとめ

離岸流と海岸変形の相互作用について検討を行うことを目的とし、様々な波浪条件、および地形条件について数値解析を行った。

解析の結果、カस्प地形において、地形変化が無い場合でも離岸流が発生した。しかし一様勾配地形において、地形変化計算を行わない場合には、離岸流の発生は無いにも関わらず、地形変化計算を行う場合には地形勾配 1/50、波高 1.5m、周期 12 秒という緩勾配、高波高、長周期の条件において 0.5m/s 程度の強い離岸流が生じることが分かった。また、地形変化計算時には、地形変化計算を行わない時には生じなかった、離岸流流速の時間的な変化や発生箇所の変化が生じていることから、離岸流と海岸変形の間には相互作用があるものと考えられる。日野の理論解析とは、定性的にはよい一致が見られた。

今後の課題としては、地形変化と離岸流について、さらに定性的かつ詳細な評価を行うこと、そして、実地形データを用いた計算結果と現地との比較を行い、指標の作成及び汎用性の向上があげられる。

参考文献

- 出口一郎, 荒木進歩, 竹田怜史, 松見吉晴, 古河泰典(2003):鳥取県浦富海岸で観測された離岸流の特性, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.151-155.
- 堀川清司(1973):海岸工学, 東京大学出版会, p304.
- 日野幹雄 (1974) : 海浜流系の発生理論, 土木学会論文報告集, No.225, pp.17-29.
- 日野幹雄 (1974) : 応答性を考慮した海浜流系と海浜地形の発生発達に関する理論, 土木学会論文報告集, No.237, pp.87-98.
- 第九管区海上保安部(2006) : 新潟県島見浜付近流況調査報告書
- James A. Bailard (1981) : An Energetics Total Load Sediment Transport Model For a Plane Sloping Beach, Journal of Geophysical Research, Vol.86, No. C11, pp.10938 - 10954.



図-9 太夫浜(google マップ)

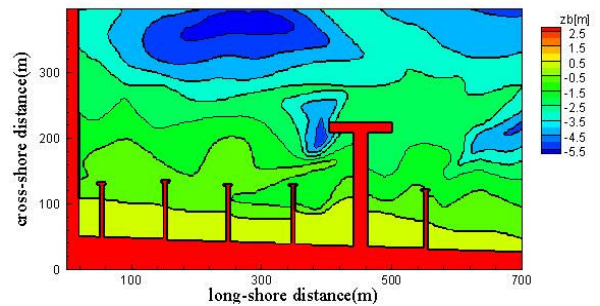


図-10 地形図データ

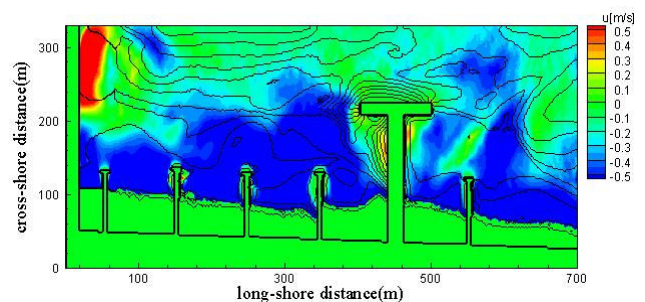


図-11 流速分布図

(太夫浜, T=5, H=0.5)

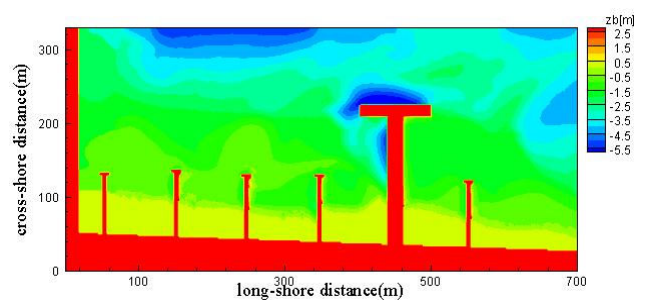


図-12 地形標高

(太夫浜, T=5, H=0.5)