

長周期波対策ソリューションはこれです。

Dr. Osamu Kunita (2011_03_31)

港内静穏度の確保は、荷役の安全と効率確保の観点から重要ですが、そのためには、地形の制約などがあり、技術的にそう簡単ではありません。

いわゆる45度の角度で沖に向かって伸びる防波堤では、沖から来る波は、防波堤の先端で回折し、防波堤先端部を中心とする同心円を描きつつ、港内に向かって波が直進してきます。ですから、大型船舶に悪影響のある長周期の波は、簡単に港内の奥深くに侵入します。回折波の進む道は、船の航路と同じ道です。もし防波堤で航路を遮ると船も、通れなくなってしまう。そこで、航路はそのままにして、メインの防波堤にハネのような波除け堤防を取り付けたり、岸壁を覆い隠すような堤防を港内に設けます。

しかし、それらの効果は限られたものでしかありません。上記の対策を施しても、満足のゆく静穏度が得られない場合には、ついに、次の手段、つまり、防波堤を更に延伸することが計画されます。しかし、防波堤を更に数百メートル伸ばしたところで、相手は長周期波なので、目に見えた効果は出ません。しかも、建設地点は沖合はるかであり、水深もかなり深くなっています。ということは、巨額な出費を覚悟しなければならないということです。

長周期波対策、なんとかならないものでしょうか？

防波堤をさらに伸ばす以外に、長周期波に対する対抗策はないのでしょうか？

-----実はその方法があるのです。-----

しかし、この方法は、世界でも未だ実際の港に適用されたことのない、全く新しい工法なので偏見をもって見られるかもしれませんが、実は、原理は周知の原理です。

つまり、全反射の現象の現地適用なのです。海の波についての全反射の記述は、合田良実先生の教科書に触れられています。

光の場合のプリズムなどでは皆さんも全反射に馴染みがあるでしょうが、海の波となると、体験したことが無のではないのでしょうか。多分、自然には全反射が起こる地形はないでしょう。人工的に作る地形でしか見られないでしょう。

(1)「全反射海底溝」の配置

図 2.9 は「45 度型の防波堤」に「全反射海底溝」を配置することを想定したものです。

「45 度型の防波堤」の場合、「全反射海底溝」は、防波堤の入り口に配置することが容易であると思われます。もし、全反射が起こると、波のエネルギーのすべてが反射されるので、その境界よりも内側には波が全く入射しないことになる。

全反射海底溝は長い距離やスペースをとらない長所を有し、防波堤の先端付近(港の入り口)に配置できる利点もある。

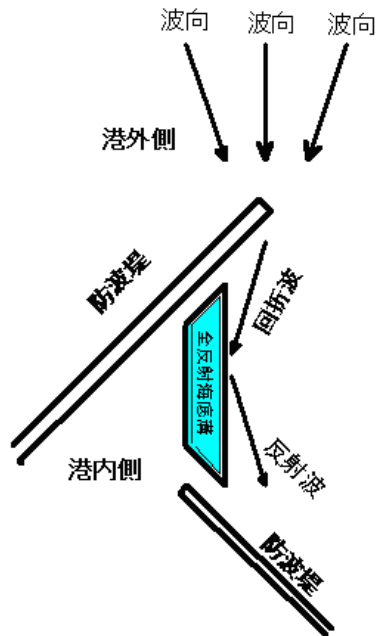


図 2.9 「45 度型防波堤」と組み合わせた場合の「全反射海底溝」の配置例

図 2.10 は「一文字防波堤」に対して配置した例である。一文字型の防波堤の場合も、全反射海底溝を防波堤の入り口に配置することは容易であると思われます。

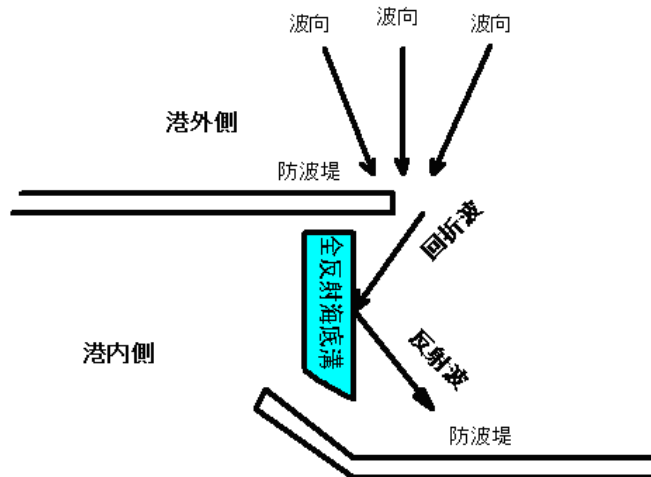


図 2.10 「一文字防波堤」での、「全反射海底溝」の配置例

以上のように、全反射海底溝は、45 度型防波堤にも、一文字型防波堤にも、容易に配置で

きると推察されます。

全反射海底溝は底面をフラットにでき、形状が単純で、現場施行が容易であることも想像できます。ただし、境界部分は直立壁となるから、円弧すべり等が起きないように、地盤を固化する必要があるでしょう。

全反射は、浅い領域からある入射角 β_1 以上の角度で、深い領域に波が侵入しようとする時に起きます

スネルの法則によれば、全反射の起こる限界状態は、 β_1 が次式 (2.4) を満足するときです。

$$\sin(\beta_1) = (L_1/L_2) \dots\dots (2.4)$$

ここに、入射角 β_1 は、「境界線に立てた垂線」と「波向き」のなす角です。全反射が起こる波向きは、限界の波向きよりも全反射海底溝により平行な角度の場合です。

(2)全反射角の計算

図 2.11 は、スネルの法則を適用し、波の周期が 14 sec で、海底の水深が -15m の場合に、段差を 5m, 10m, 15m, 20m とした場合の全反射の起こる臨界の角度を示したものです。

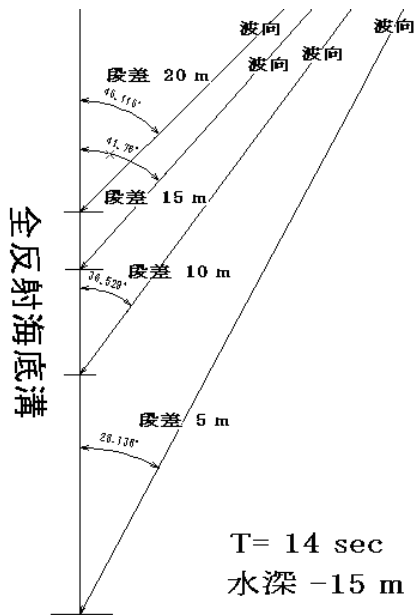


図 2.11 全反射の臨界角
(T=14sec,元海底-15m)

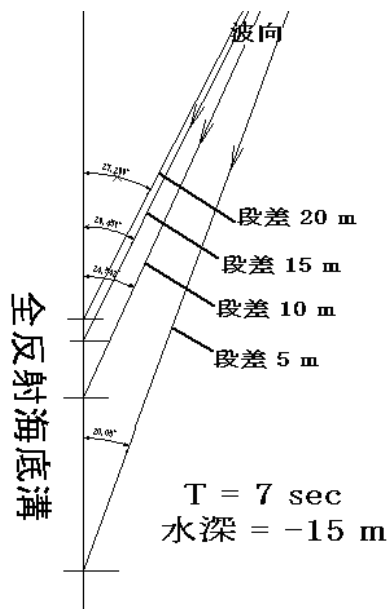


図 2.12 全反射の臨界角
(T=7sec,元海底-15m)

段差が 20m の場合には、45 度の方向から来る波でさえ、全反射させることができるという計算結果が得られる。これが本当であれば、多方向の波を全反射させることが可能となる。

一方、周期 7 sec 程度の波の場合にはどうか。計算結果を図 2.12 に掲げるが、屈折のときと同様、7sec の場合は、まだ効果が期待できる範囲にあることがわかる。

全反射も、屈折の場合と同様、-15m 程度の高水深に対して、周期 4 sec 以下では深海波の領域となり、水深の差による波速の差がほとんど無いため、全反射の効果は極めて小さいことが推定される。

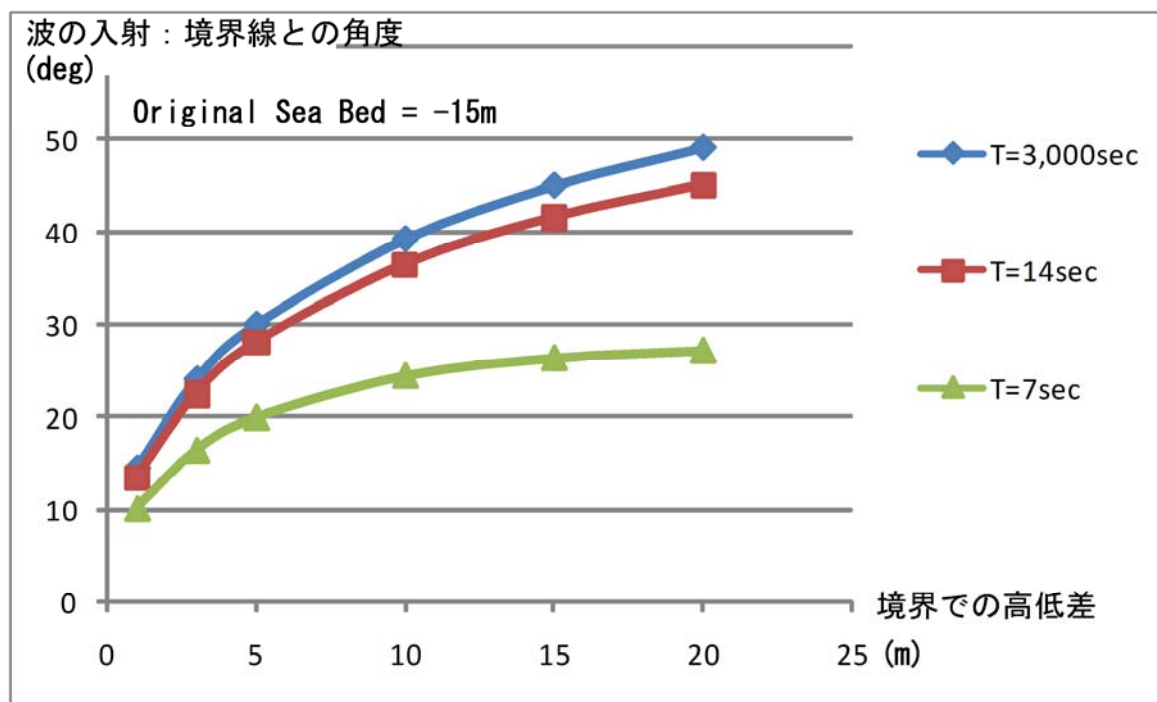


図 2.13 全反射の臨界角(元海底-15m)

光の場合には、媒質の境界で全反射され、まったく光は境界から外に漏れ出すことはないが、海の波の場合、水の質量があり、たとえ波を全反射したとしても、境界線の近傍では深い側の領域の水面も上下運動をするものと思われる。

まとめ、

海底を V 字型に掘削して、その溝を凹レンズとして使用する場合、オリジナルの海底が -10m~-15m、周期が 10sec 以上であれば、谷の深さ 10m の V チャンネルを用いると長さ 500m 程度で凹レンズの効果が発揮できると考えられる。

同様に、海底を海底溝状に掘削して、その段差での全反射を利用して波除けとして利用する場合、オリジナルの海底が -10m~-15m、周期が 10sec 以上であれば、段差 5m~10m で全反射の効果が発揮されると考えられる。

事前のスネルの法則を用いた検討によると、全反射海底溝は、 -15m 程度の水深であれば、 10sec 以上の周期の波については、段差 $5\text{m}\sim 10\text{m}$ で全反射海底溝は十分役立つであろうことが推定された。

ここでは、 45 度防波堤の場合について、全反射海底溝を設置し、数値シミュレーションにより、静穏度向上の効果を確認する。

全反射海底溝「あり」のケース

図 11.1 は 45 度型防波堤に対して、全反射海底溝(幅約 300m)を配置した状態の地形である。防波堤先端付近はもとの水深が -12m 程度であり、それに対し全反射のため 10m の窪みを帯状に掘ったものである。全反射を期待するために、全反射の境界線の延長線は、防波堤先端よりもやや内側を通るように設定されている。

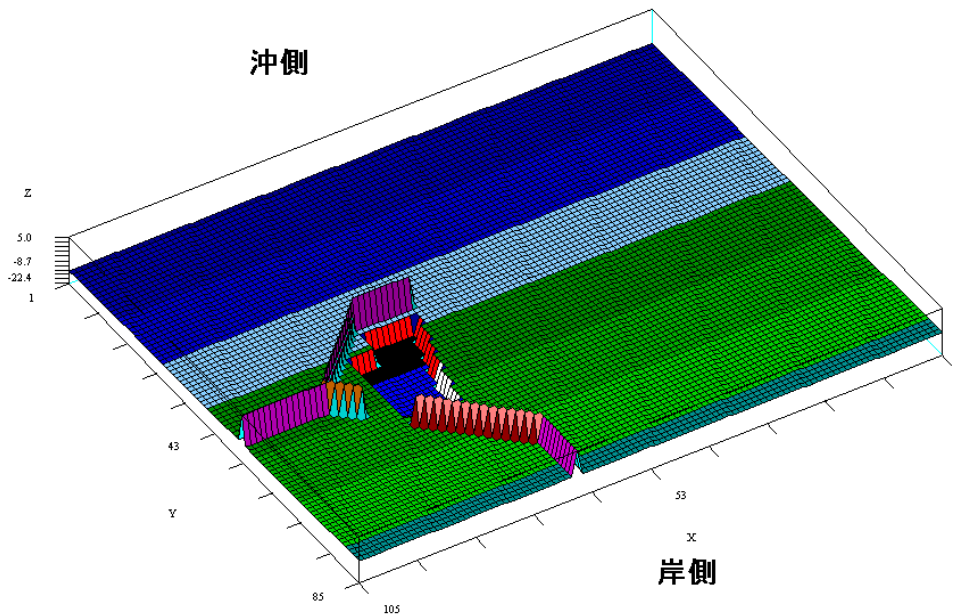


図 11.1 45 度型の防波堤における全反射海底溝の配置状況

以下のシミュレーションはいずれも周期 14sec , $S_{\text{max}}=99$ で実施したものである。

進入角 30 度の、有義波高分布(図 11.4)を見ると、より鮮明に波がせき止められている様子が観察される。

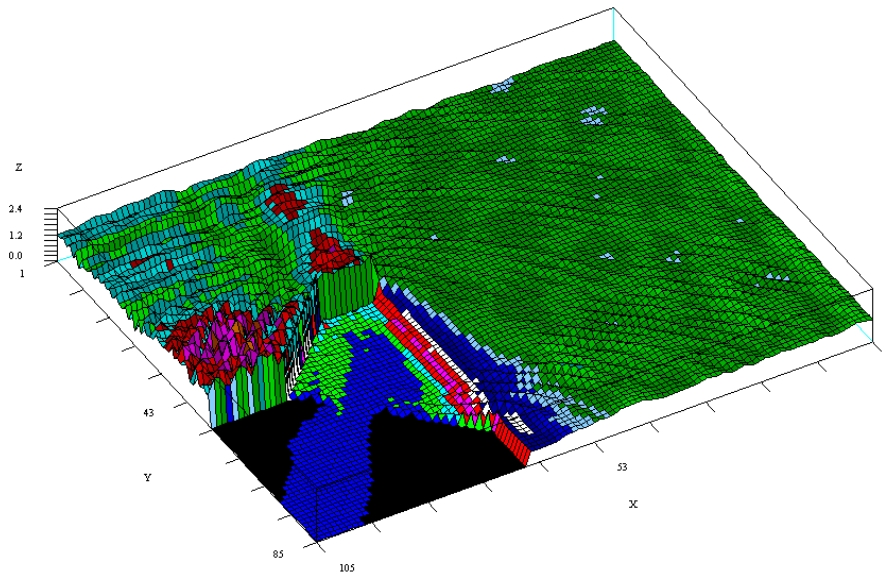


図 11.2 進入角 0 度の場合の有義波高分布 (全反射海底溝あり)

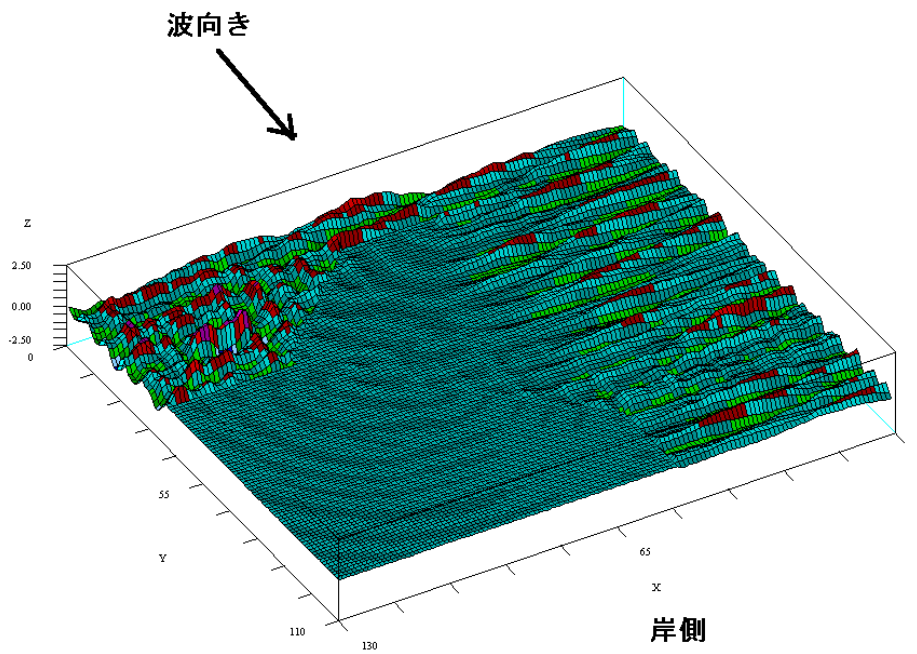


図 11.3 進入角 0 度の場合の水面波形 (全反射海底溝あり)

図 11.2 の有義波高分布において、港内の波高分布で黒い領域が多く、全反射海底溝が効果を発揮している様子が観察できる。図 11.3 における全反射の水表面波形をみると、回折したばかりの時の波の形はしっかりしている。しかし、それが防波堤の入口あたりに来ると形が崩れてぼやけているように見える。

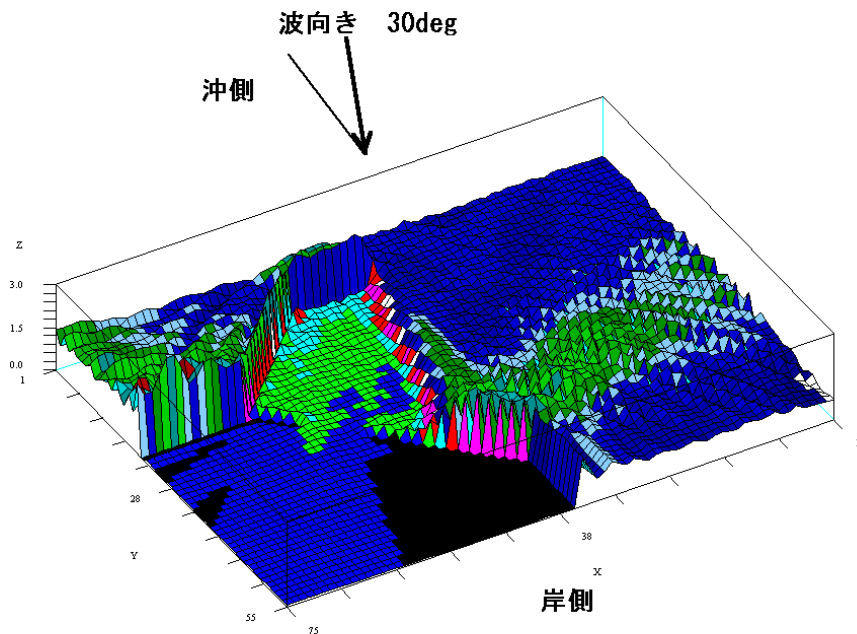


図 11.4 進入角 30 度の場合の有義波高分布(全反射海底溝あり)

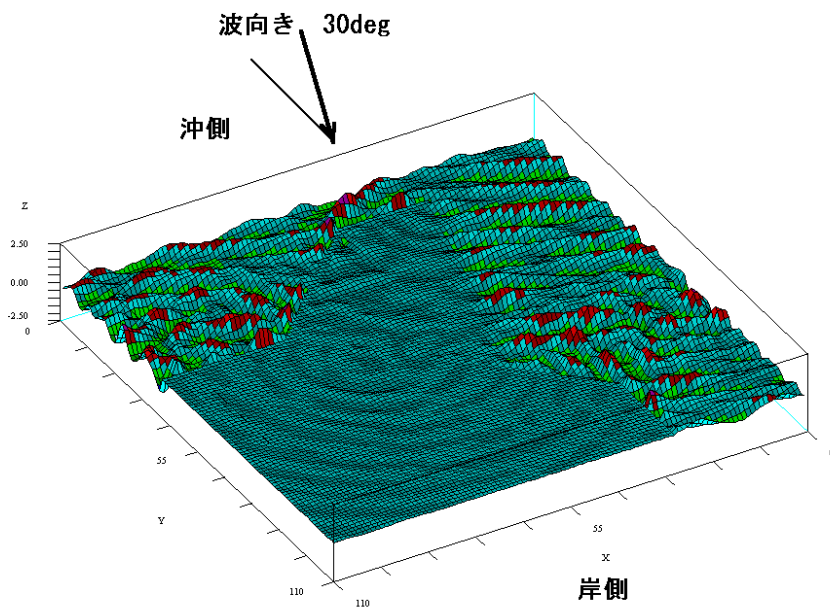


図 11.5 進入角 30 度の場合の水面波形(全反射海底溝あり)

11.2 全反射海底溝なしのケース

以下に比較のために、全反射海底溝「なし」30度入射の場合を掲げる。

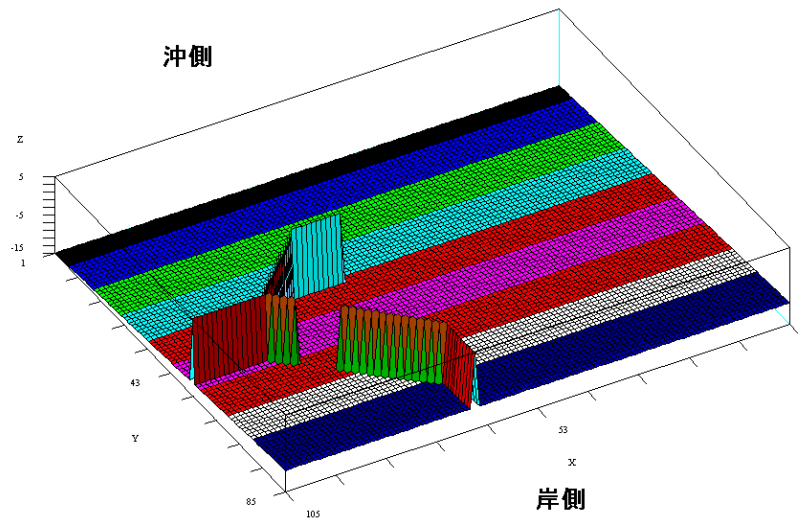


図 11.6 45度防波堤(全反射海底溝なし)

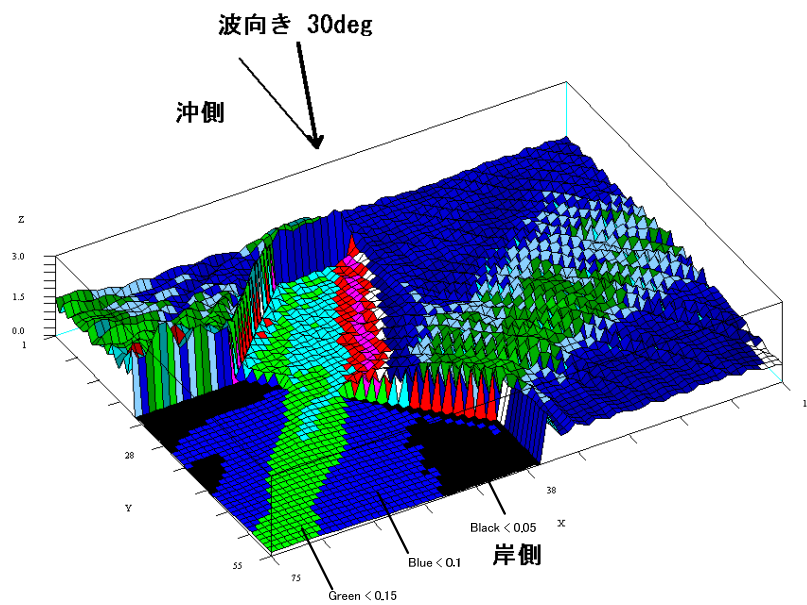


図 11.7 進入角 30 度の場合の有義波高分布(全反射海底溝なし)

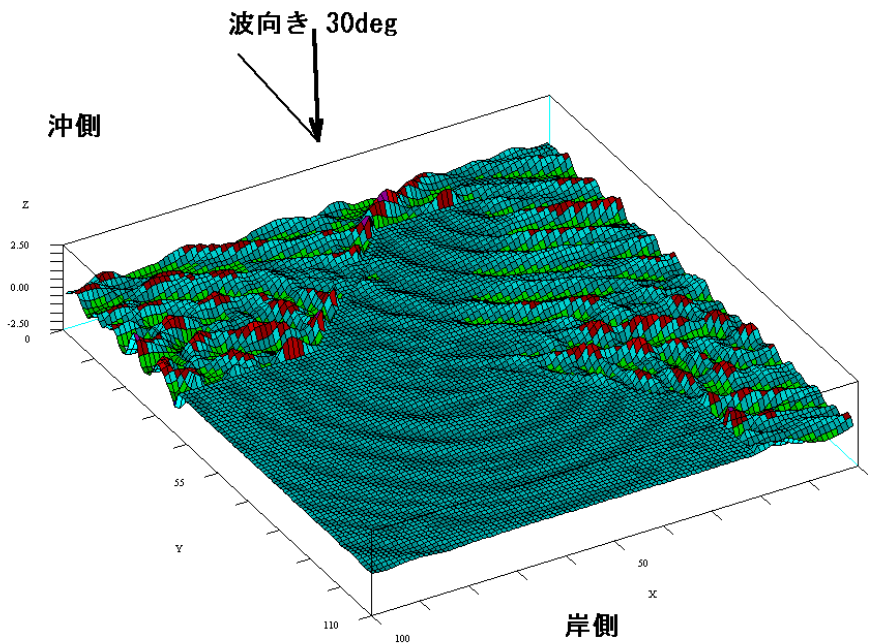


図 11.8 進入角 30 度の場合の水面波形(全反射海底溝なし)

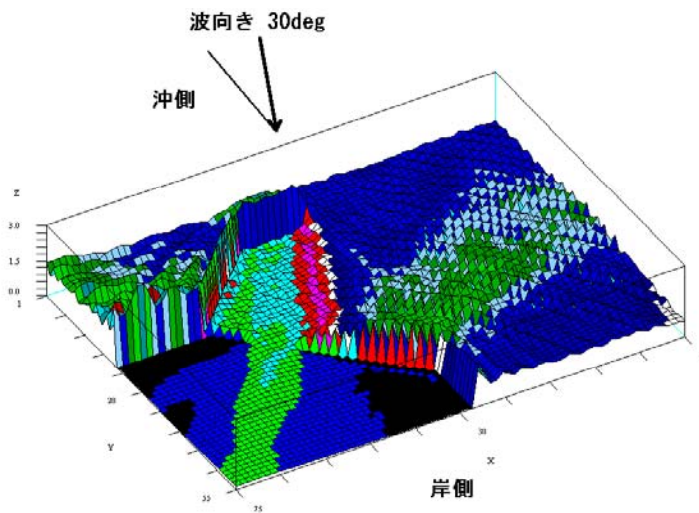
図 11.7 における有義波高分布において、港内の緑色の部分が波高比およそ 0.15 であり、港内の青の部分はおよそ 0.7，黒の部分がおよそ 0.4 である。

全反射海底溝ありの場合は、色が港内で黒または青，すなわち波高比 0.1 以下であるのに対し、全反射海底溝なしの場合は港内に緑や水色が侵入してきており、波高 0.15 の緑の領域が港内奥深くまで延びている。このことから、全反射海底溝が港内を静穏化するための効果を顕著に発揮していることが分かる。

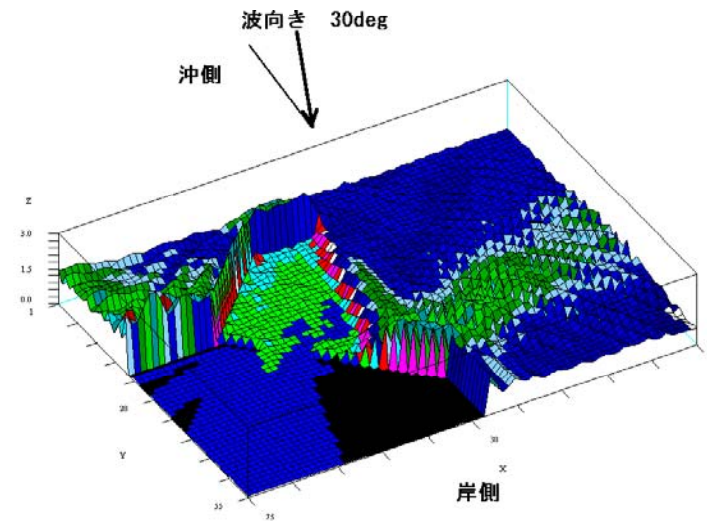
いかがでしょうか？

全反射なのに、波の侵入が起こっていますが、その理由や、溝の深さ、幅などとの関係はまだ分かっていません。しかし、確かに効いています。この工法は、船の航行に支障が起こらない点で優れていると考えられます。また、現地を掘り下げただけですから、工事も単純です。おそらく、工事の費用も、防波堤をつくるより、かなり安上がりでしょう。

全反射海底溝の効果



全反射海底溝なし



全反射海底溝あり