波浪変形シミュレーション

EGWAVE Ver.3.0

エネルギー平衡方程式法による波の浅海変形解析

（京都大学開発モデル ExEBED ／ License No.C010. C011）

ユーザーズマニュアル

User's manual for EGWAVE Ver.3

AQUA NET

株式会社 水域ネットワーク

www.aquanet21.co.jp

目　　次

インストール前に必ずお読みください

第 1 章　概説

第 2 章　解析手順

第 3 章　理論解説

インストール前に必ずお読みください

Ⅰ. ソフトウェア使用許諾書

このたびは、弊社商品をご購入いただき、誠にありがとうございます。

本ソフトウェアは、『京都大学』によって開発されたエネルギー平衡方程式による波浪の浅海変形計算アルゴリズムに準拠しており（京都大学ライセンス No.C010,C011）、株式会社水域ネットワークが『EGWAVE』（イージーウェーブ）という名称で商品化しました。

弊社では、当ソフトウェア商品につきまして、下記の『Ⅱ. ソフトウェア製品使用許諾契約書』、『Ⅲ. ご注意』、『Ⅳ. サポート』を設けさせていただいており、お客様が下記契約書にご同意いただいた場合のみソフトウェア製品をご使用いただいております。お手数ではございますが、本ソフトウェア製品のインストール前に下記契約書を十分にお読みください。下記契約にご同意いただけない場合には、本ソフトウェア製品を速やかに弊社までご返送ください。なお、本ソフトウェア製品をインストールした場合には、お客様が下記契約にご同意いただいたものとさせていただきます。

II. ソフトウェア製品使用許諾契約書

株式会社水域ネットワーク（以下、AQUANET と略称します。）は、お客様に対し、本契約書とともにご提供するソフトウェア製品（当該商品のマニュアルを含みます。以下、「許諾プログラム」と呼称します。）の日本国内における譲渡不能の非独占的使用権を下記条項に基づき許諾し、お客様は下記条項にご同意いただくものとします。「許諾プログラム」およびその複製物に関する権利は AQUANET に帰属します。

1. 使用許諾

お客様は、「許諾プログラム」を一時に一台のコンピュータにおいてのみ使用することができます。お客様が、同時に複数台のコンピュータで「許諾プログラム」を使用したり、また「許諾プログラム」をコンピュータネットワーク上の複数のコンピュータで使用する場合には、別途 AQUANET よりその使用権を取得することが必要です。

お客様は、「許諾プログラム」の全部または一部を再使用許諾、譲渡、頒布、貸与、その他の方法により第三者に使用もしくは利用させることは出来ません。

お客様は、「許諾プログラム」の全部または一部を修正、改変、リバース・エンジニアリング、逆コンパイルまたは逆アセンブル等することは出来ません。また第三者にこのような行為をさせてはなりません。

2. 「許諾プログラム」の複製

お客様は、バックアップのために必要な場合に限り、「許諾プログラム」中のソフトウェア・プログラムを１コピーだけ複製することができます。あるいは、オリジナルをバックアップの目的で保持し、「許諾プログラム」中のソフトウェア・プログラムをお客様がご使用のコンピュータにおいてハードディスク等の記憶装置１台のみにコピーすることができます。しかし、これら以外の場合にはいかなる方法によっても「許諾プログラム」を複製できません。お客様には、「許諾プログラム」の複製物上に「許諾プログラム」に表示されているものと同一の著作権表示を行っていただきます。

3. 保証

AQUANET は「許諾プログラム」の仕様について事前の通告なしに変更することがあるものとします。また、AQUANET はユーザーサポート、バージョンアップおよび新製品の案内など「許諾プログラム」に関するサービスを無償、又は有償でお客様に提供いたします。

4. 保証の否認・免責

前項に定める場合を除き、AQUANET は「許諾プログラム」がお客様の特定の目的のために適当であること、もしくは有用であること、その他「許諾プログラム」に関していかなる保証も致しません。

AQUANET は「許諾プログラム」の使用に付随または関連して生ずる直接的または間接的な損失、損害等について、いかなる場合においても一切の責任を負わず、また「許諾プログラム」の使用に起因または関連してお客様と第三者との間に生じたいかなる紛争についても一切の責任を負いません。

ライセンスユニット付「許諾プログラム」のライセンスユニットを破損および紛失等により、納入させていただいたライセンスユニットと認識できない場合、ライセンスユニットの交換・再発行は行いません。

5. 輸出

お客様は、日本政府または該当国の政府より必要な認可等を得ることなしに、一部または全部を問わず「許諾プログラム」を、直接または間接に輸出してはなりません。

6. 契約期間

本契約は、お客様が「許諾プログラム」のインストールした時点で発効します。

お客様は、AQUANET に対して 30 日前の書面による通知をなすことにより本契約を終了させることができます。

AQUANET は、お客様が本契約のいずれかの条項に違反した場合、直ちに本契約を終了させることができます。

本契約は、上記②または③により終了するまで有効に存続します。上記②または③により本契約が終了した場合、AQUANET は「許諾プログラム」の代金をお返し致しません。お客様は「許諾プログラム」の代金を AQUANET に請求できません。

お客様には、本契約の終了後 2 週間以内に、「許諾プログラム」およびその複製物を破棄または消去したうえ、破棄または消去したことを証する書面を AQUANET に送付していただきます。

7.　一般条項

本契約のいずれかの条項またはその一部が法律により無効となっても、本契約の他の部分に影響を与えません。

本契約に関わる紛争は、東京地方裁判所を管轄裁判所として解決するものとします。

III.　ご注意

本書は、株式会社水域ネットワークによる、エネルギー平衡方程式による波浪の浅海変形計算のソフトウェア契約ユーザーに対する情報提供を唯一の目的とし、明示あるいは暗示を問わず、内容に関して一切の保証をするものではありません。

Windows11 は、米 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標です。

Adobe、Adobe ロゴ、Acrobat、Photoshop および PostScript は、Adobe Incorporated（アドビ社）の商標です。

※　その他すべてのブランド名および製品名は個々の所有者の登録商標もしくは商標です。

本書の内容はバージョンアップ等に伴い、予告なく変更することがございますので予めご了承ください。

IV. サポート

本製品に関するお問い合わせは、下記 URL のお問い合わせからお願い致します。

※EGWAVE3 はサポート料を含んでおりません。

不具合に関するお問い合わせに関しましては受け付けておりますが、
業務に関わる技術的なご質問に関しては有償となります（別途見積り）。

問い合わせフォーム
URL：https://www.aquanet21.co.jp/SupportForm/WaveSupport

お電話・FAX 及びメールでのお問い合わせは受け付けておりません。

第1章　概説

本章では、不規則波のエネルギー平衡方程式による浅海変形計算ソフトウェア『EGWAVE Ver3.0』（イージーウェーブ 3）についての概説、および使用するに当たっての準備等を説明します。

1-1.　はじめに

本書は、パソコンを用いて、不規則波による浅海変形計算を行うソフトウェアの操作説明書です。本ソフトウェアは、京都大学によって開発された屈折計算アルゴリズムに準拠しています。この理論の詳細を理解していなくても、波浪や波浪の浅海変形に関する基本知識をお持ちであれば、本ソフトウェアによる解析を容易に行える仕様になっていますが、より理解を深めるためには以下の論文を参考にしてください。

1) 間瀬　肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋：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、II-48, pp.177-187, 1999.
2) Mase, H.: Multi-directional random wave transformation model based on energy balance equation, Coastal Eng., Jour., Vol.43, No.4, pp.317-337, 2001.
3) 間瀬　肇・沖　和哉・高山知司・酒井哲郎：高次精度差分による位相平均不規則波浪変形計算モデルに関する研究、土木学会論文集、No.684/II-56, pp.57-68, 2001.

このプログラムを使った解析結果を成果物等とした場合、上に示した第 3 番目の論文を参考にしたことを記載してください。

なお、波浪及び波浪の浅海変形の基本となる概念を理解せずに本ソフトウェアを用いた場合、正しい計算結果が得られない場合がありますので、ご注意ください。

ここで、本ソフトウェアの特徴である機能を以下に列挙します。

① 回折変形を、より高次なレベルで解析できます。

② 反射波との合成波の分布を求めることが出来ます(任意選択)。

③ 反射面(構造物)が計算格子軸に対して直角・平行でない配置である場合でも、これに影響を受けることなく反射波の分散状況を解析できます。

④ DXF データの読み込み、ラスターデータを読込んでのトレース機能が使えます。

⑤ グラフィック・ユーザー・インターフェースにより条件設定が容易に行えます。
⇒この機能により条件の誤入力の回避、類似する計算条件を簡単に複製する等の効用が得られます。

⑥ 地形コンター図や計算結果(波高分布等)を可視化(画面表示)します。
⇒これと他の編集機能により部分的コンター編集などの作業を容易に行え、結果を画面表示することでトライアル&エラーを難なく行えます。

※本製品を使用するには、付属のハードウェア・ライセンス・キーが必要です。

1-2.　処理の概要

①　コンターデータの登録

海底地形図や等深浅図のラスターデータや CAD データ（DXF 形式）をコンター編集プログラムで読み込み、コンターデータ（地形データ）を作成します。

なお、水深属性は-5.00～500.00 の範囲で設定してください。範囲外の水深属性はシステム内で使用しており、異常作動・異常計算の原因となります。

②　水深（メッシュ）データの登録

コンター編集プログラムで作成したコンターデータには、計算には必要のない地形情報を含んでいたり、逆に水深データを効率良く生成するために補助コンターが必要になる場合があります。この様な場合に、表示用コンターとは別に水深データ作成に必要な地形(コンター)を付加した計算用コンターを作成することが出来ます。計算用コンターに計算領域などの設定を行い、水深（メッシュ）データとして登録します。

③　反射率等の設定

水深データを登録すると、自動的に構造物の境界データが作成されます。この境界に対して、必要に応じて防波堤の反射率、離岸堤の透過率などを設定します。

④　水深編集、マップ編集

地形作成用コンターで作成した水深データに対して、水深を確認しながら表示用コンターで細部を編集することができます。同様に、計算境界などを自動設定したマップも編集することができます。

⑤　計算ケース登録

指定した計算領域に対して、波高、周期、波向、周波数分割数、方向分割数、方向集中度パラメーター（S_{max}）、砕波モデル設定などの計算条件を登録します。

⑥　計算

登録した計算ケースについて、計算を実行します。計算は複数のケースを同時に指定することができ、順次実行します。

⑦　計算結果の出力

計算を終了したケースについて、画面、プリンタへ結果の図形出力を行います。出力レイアウト設定にて作図種別、波の種類、用紙サイズ、スケール、出力内容の出力位置などを指定すると、選択中の計算結果が同一の書式で出力されます。

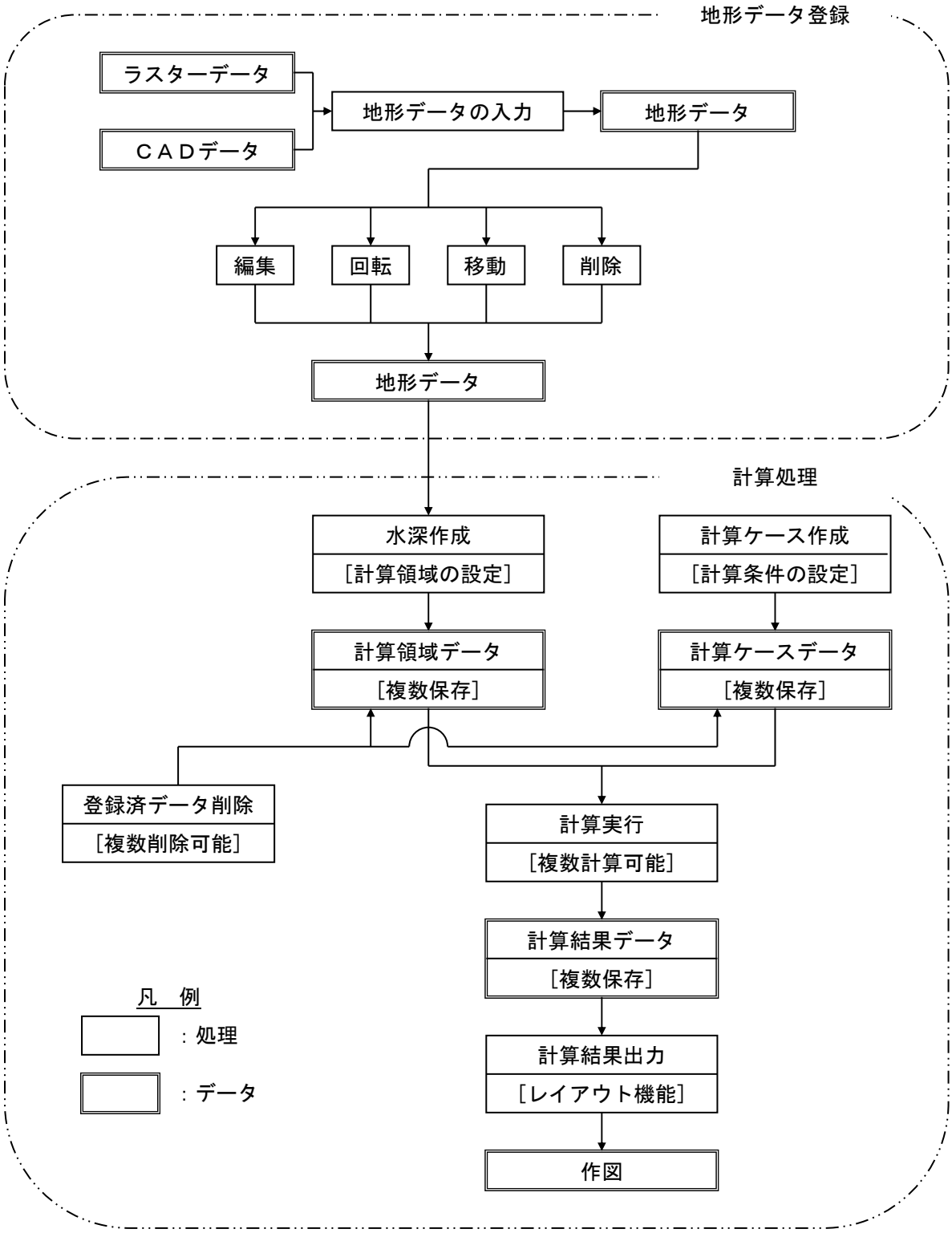
作図種別は、水深、有義波高、波向、波高比、浅水係数、換算沖波波高、Kr・Kd 値、砕波・非砕波の区分の各分布図です。波の種類は入射波、反射率の設定をした場合は反射波、合成波の出力ができます。

なお、作図に使用されるコンター線 1 本の最大点数は 10,000 点以下に設定してください。

⑧　計算結果の削除

登録済の領域データおよび計算ケースを削除します。領域データは、計算ケースで指定されている場合には削除することはできませんので、削除したい領域データを指定している計算ケースを削除した後に領域データを削除して下さい。

なお、計算済のケースを削除すると自動的に計算結果も削除されます。


地形データ登録
ラスターデータ
ＣＡＤデータ
地形データの入力
地形データ
編集
回転
移動
削除
地形データ
計算処理
水深作成
［計算領域の設定］
計算ケース作成
［計算条件の設定］
計算領域データ
［複数保存］
計算ケースデータ
［複数保存］
登録済データ削除
［複数削除可能］
計算実行
［複数計算可能］
計算結果データ
［複数保存］
計算結果出力
［レイアウト機能］
作図
凡　例
：処理
：データ

操作イメージのフロー

1-3.　計算内容について

1-3-1.　EBED と ExEBED

本プログラムは、EBED（Energy Balance Equation model with Diffraction）と ExEBED（Extended Energy Balance Equation model with Diffraction）を切り替えて使用することができます。EBED は回折を調整係数で合わせ込み、ExEBED は回折項を高次で計算しており、回折領域についてはより厳密な計算をしていますが、一般的なケースでは計算結果に大きな差異はありません。

1-3-2.　水深メッシュとマップ

本プログラムは、メッシュデータ作成により正方格子の水深データを作成しますが、同時にメッシュ間で計算の境界判定を行うためのマップを作成します。マップは自動的に生成されますので、通常はマップを編集することは避けてください。しかし、海上に架空の反射面を設定することなど、特別な設定が必要な場合、下記のマップ数値の機能をご理解のうえ、編集してください。

マップ編集画面では、海域が 1、陸上や構造物は 0 で表示され、計算境界や陸・構造物境界に 2～9 の数値が設定されます。

IJB =　0：陸
　　1：海
　　2：開境界で、境界外と同一スペクトル
　　3：開境界で、流出境界（波のエネルギーは常に外に流れ出し、流入なし）
　　4：x 方向から流入、J の境界で反射
　　5：x 方向から流入、J+1 の境界で反射
　　6：x 方向から流入なし、J の境界で反射
　　7：x 方向から流入なし、J+1 の境界で反射
　　8：x 方向から流入なし、y 方向には流出入
　　9：x 方向から流入なし、y 方向には流出（開境界上）
　　ただし、x 軸は沖から岸方向に正、y 軸は沖を上として左から右方向に正となります。

1-3-3.　計算条件

本プログラムは、計算条件中で周波数スペクトル、砕波計算についてモデルを選択することができます。

1)　周波数スペクトル：デフォルトでは Bretschneider－光易型スペクトルが設定されています。JONSWAP 型スペクトルを選択すると、ほかのデフォルト値が設定されます。

2) 砕波計算：「合田略算式」「高山モデル」「Thornton & Guza」「磯部モデル」の 4 タイプを選択することができます。「合田略算式」は非砕波で計算しますが、出力する「波高分布」は合田の砕波指標の略算式で評価した砕波波高が表示されます。非砕波で計算した値は、Kr・Kd や換算沖波波高を求める場合に必要ですので、設計波の計算などで換算沖波高が必要な場合は、「砕波なし（合田略算式)」で計算してください。「高山モデル」、「Thornton & Guza」、磯部モデル」の 3 モデルは、砕波減衰項を含んだ計算になりますので、砕波後はエネルギー逸散が生じています。

1-3-4. 出力結果

エネルギー平衡方程式で計算される波浪変形は、本来、屈折変形と浅水変形を対象に解析する手法ですが、本モデルではこれに回折、反射および砕波変形を解析する機能が付加されています。本モデルによる解析で得られる出力結果とその内容は、以下の通りです。

【波高】 ：計算で考慮したすべての変形(屈折、回折、浅水、砕波)後の有義波高($H_{1/3}$)の分布。

【波高比】 ：有義波高($H_{1/3}$)／沖波波高(H_0)、水深(h) ／換算沖波波高(H_0')

【波向】 ：方向エネルギー分布の重心となる方向(主波向)。

【浅水係数】 ：各メッシュ(各水深)において分割した周波数毎に規則波の浅水係数を求め、それを平均した値。

【換算沖波波高】 ：砕波を考慮せずに計算した結果は、有義波高 $H_{1/3}$＝屈折係数×（回折係数）×浅水係数×H_0 です。この $H_{1/3}$ を上記の浅水係数で割り戻した値を、換算沖波波高（H_0'＝$H_{1/3}$／浅水係数）としています。

【屈折係数(Kr・Kd)】 ：屈折係数は、換算沖波波高(H_0')を沖波波高(H_0)で割った値としました。従って、屈折係数＝屈折係数×(回折係数)×H_0／H_0 であり、遮蔽域がある場合には回折係数も含まれます。前述のように本モデルでは、回折変形が基本式中で計算されますので、回折係数のみを分離することができません。従いまして、止むを得ず屈折係数に含んだ形としています。

【砕波係数】 ：本来、砕波係数という用語はありませんが、砕波指標によって得られた波高がどの程度砕波減衰したかをみるために特別に求めています。換算沖波波高を求めた後、それを用いて合田の砕波帯内における波高の略算式によって波高 Hb を計算します。これと、もともとエネルギー平衡方程式で得られている波高 $H_{1/3}$＝屈折係数×（回折係数）×浅水係数×H_0 とを比較して、Hb＜$H_{1/3}$ であれば砕波状態と判断して $H_{1/3}$=Hb と置き換えています。

1-4.　マニュアルの表記について

1-4-1.　メニュー・コマンド・ツールボタン等の表記

メニュー名、コマンド名、ツールバーのボタン名、ウィンドウ名、ダイアログボックス名、ダイアログボックス内の項目名は、[　] で囲って表記しています。

ダイアログボックス内のボタン名は＜　＞で囲って表記しています。

例）[ファイル]-[地点選択]を選択します。[地点選択]ダイアログを表示させ、作業対象の地点名称を反転して選択し、＜選択＞をクリックします。

1-4-2.　キーの表記

キーは「 」で囲って表記しています。複数のキーを組み合わせる場合は、プラス記号（＋）で結んでいます。

例）「Ctrl」キーを押しながら「C」を押す　→　「Ctrl + C」

1-4-3.　マウス操作の表記

・クリック

マウスのボタンを押して離す動作です。本マニュアルでは、左ボタンを押す動作を指します。

・ダブルクリック（W クリック）

マウスのボタンを素早く 2 回押して離す動作です。本マニュアルでは、左ボタンを素早く 2 回押す動作を指します。

・右クリック

マウスの右ボタンをクリックする動作です。

・ドラッグ&ドロップ

マウスの左ボタンをクリックしたままマウスを動かして、アイコンなどを移動させたり、選択範囲を広げたりする動作です。

1-4-4.　その他の表記

・ハードウェア・ライセンス・キー

付属のハードウェア・ライセンス・キー（USB コネクタ接続）を指します。

本マニュアルでの解説画面は、Windows 11 のスクリーンショットを使用しております。

その他のバージョンの Windows で、本製品をお使いになる場合、デザイン、スタートメニュー等に違いがある場合がございます。

本マニュアルでは、特段これらの差異についての記述はしておりません。

1-4-5.　ウィンドウの表記

・ウィンドウ

本製品では、MDI（Multiple Document Interface）形式を採用しており、アプリケーションウィンドウ（メインウィンドウ）内の複数のドキュメントウィンドウをビューウィンドウと表記しています。

・ダイアログ

本マニュアルでは、項目の設定など、何かの操作を行うときに、確認や動作の設定を求めてくるウィンドウ（ダイアログボックス）をダイアログと表記しています。

1-5.　本ソフトウェアの表記について

・作業フォルダ

１つの地点は１つの作業フォルダから構成されています。

地点関連のファイルは全て、フォルダ内に保存されます。

[ファイル]-[作業フォルダの選択]-[新規(N)]メニューを選択すると、新たな地点用のフォルダが作成されます。

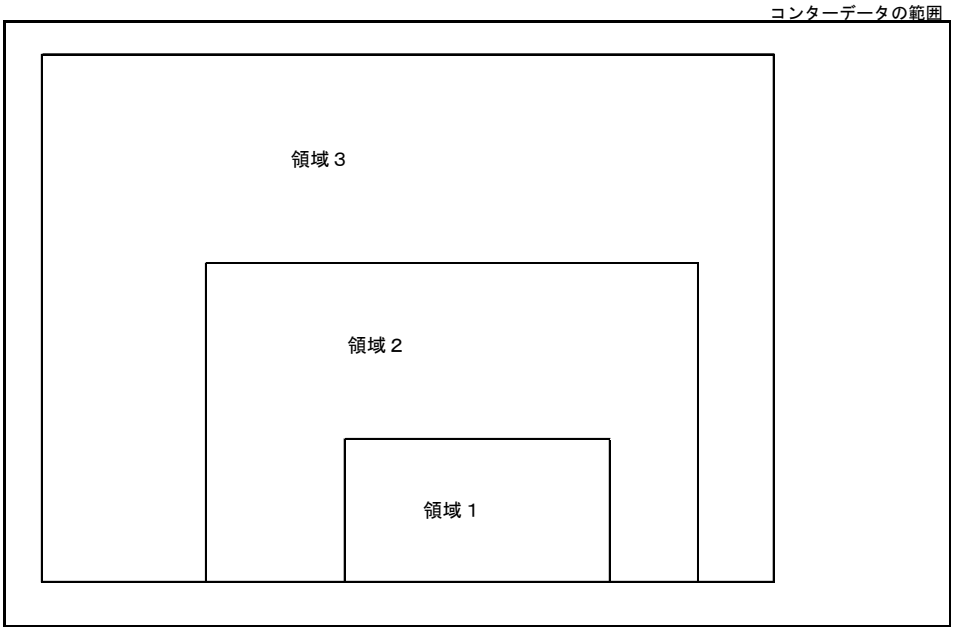
・コンターデータ

海底地形の等深線、港形や海岸地形をコンターデータと表記します。

・計算領域

領域 1～領域 3 の複数の格子点(メッシュ)データを計算領域と表記します。

計算領域は、対象とする海岸が領域 1 となり、外側へ領域 2、領域 3 と拡張します。



1-6.　インストールとアンインストール

1-6-1.　インストールの前に

＜インストールする際のご注意＞

- インストールの際は、「Administrator」または「管理者」権限でインストールを行って下さい。
- インストールを実施する際は**必ずハードウェア・ライセンス・キーを取り外してから**行ってください。
- 一部の環境では、インストール完了後に再起動を求められる事があります。

1-6-2.　インストール

＜インストーラーファイルのダウンロード＞

本製品は弊社 Web サイトよりオンライン配布形式にしております。

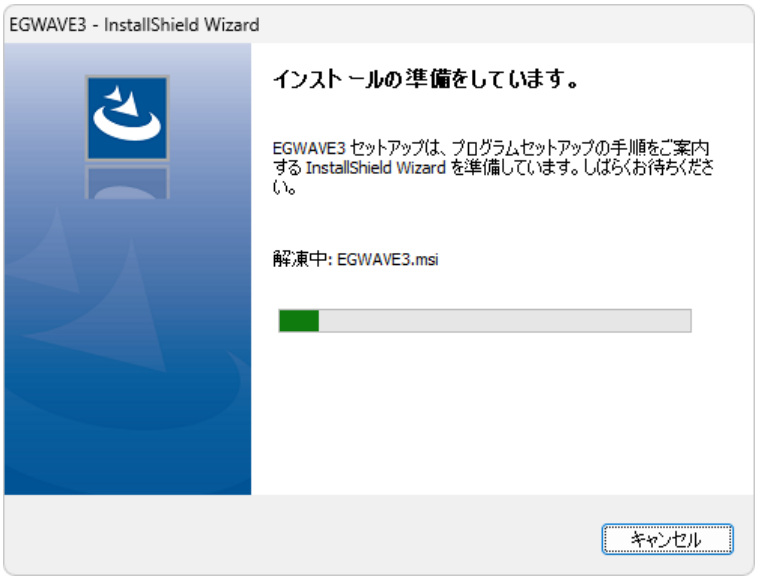
インストーラーファイルは下記 URL よりダウンロードをお願いします。

株式会社水域ネットワーク【ダウンロードページ】

URL：https://www.aquanet21.co.jp/download.html

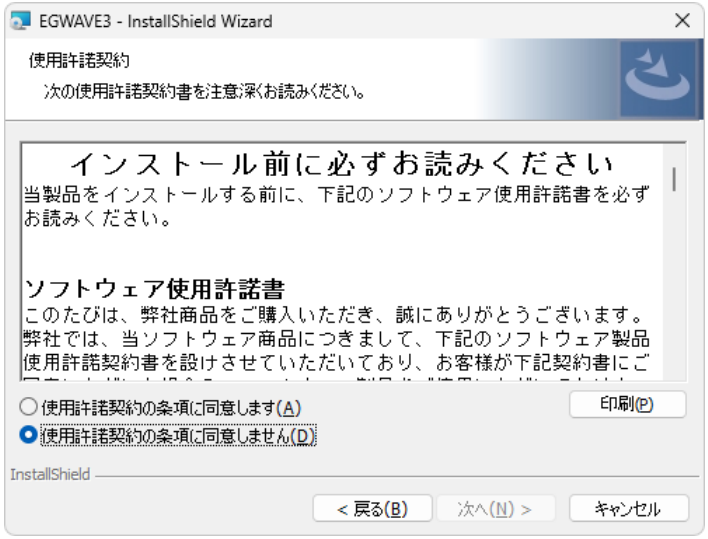
＜アプリケーションのインストール＞

(1) Zip ファイルの解凍後、セットアップランチャー（Setup.exe）をダブルクリックすると、「EGWAVE3 プログラム」アプリケーション本体のインストールウィザードが起動します。

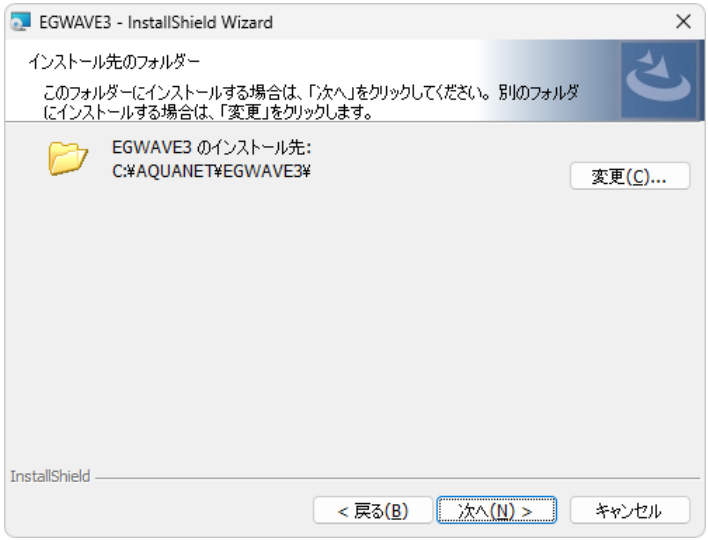


(2)　[ようこそ] 画面が表示されますので、＜次へ(N)＞をクリックします。

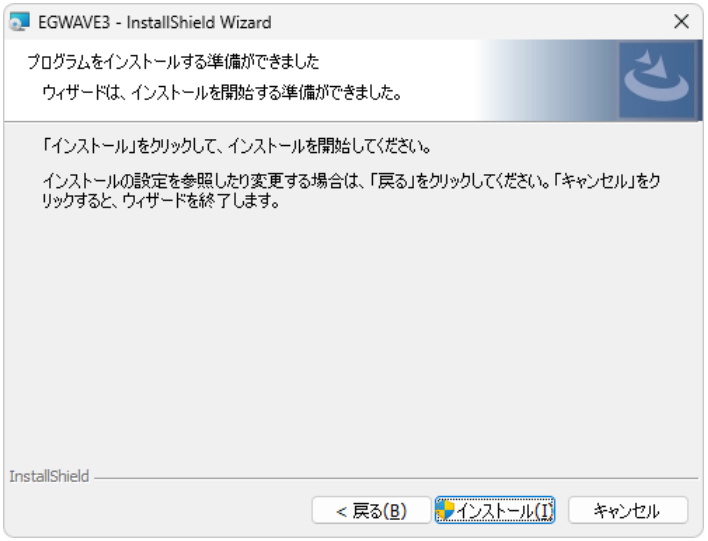
(3)　[使用許諾契約] 画面が表示されますので、使用許諾契約の条項に同意する場合は＜使用許諾契約の条項に同意します(A)＞を選択し＜次へ(N)＞をクリックします。
同意しない場合は＜使用許諾契約の条項に同意しません(D)＞を選択し、＜次へ(N)＞をクリックしインストールを終了します。



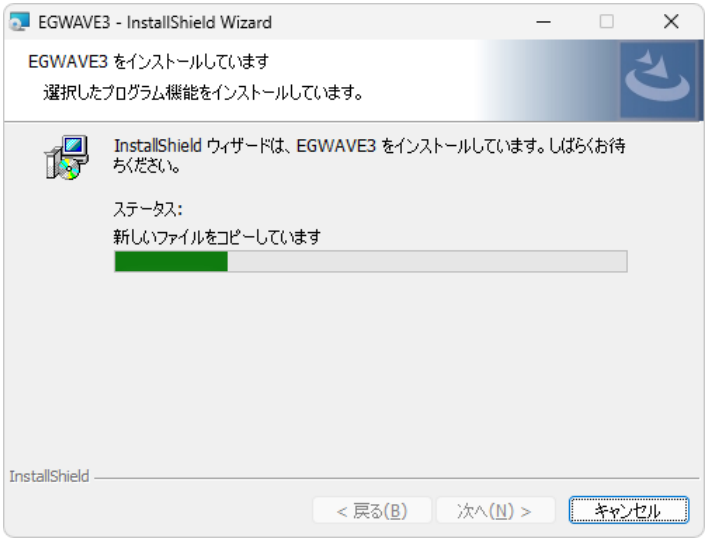
(4)　[インストール先のフォルダ] 画面が表示されます。プログラムのインストール先のフォルダを指定します。デフォルトでは C ドライブの“Aquanet”以下ですが、インストール先を変更する場合は＜変更(C)...＞をクリックしインストール先を指定します。次に、＜次へ(N)＞をクリックします。



(5)　[インストール準備] 画面が表示されますので、<インストール(I)>をクリックします。



(6)　インストールを開始します。インストールを中止する場合は<キャンセル>をクリックします。



(7)　[インストール完了] 画面が表示されますので、＜完了(F)＞をクリックします。

1-6-3.　アンインストール

(1)　Windows を右クリックし、[インストールされているアプリ] を開きます。

(2)　表示されたダイアログのリストから[EGWAVE3] を選択し、右側にある[…]より、＜アンインストール＞を選択します。

(3)　削除の確認を問い合わせてきますので、＜アンインストール＞をクリックします。

(4)　アンインストールが開始されます。

(5)　アンインストールが終了すると、終了したことを告げるメッセージが表示されますので、＜OK＞を選択して、アンインストールを完了します。

1-7.　アプリケーションの起動と終了

1-7-1.　起動

(1)　ハードウェア・ライセンス・キーを、USB コネクタに接続します。

(2)　Windows の[スタート]メニューより、[すべて]－[Aquanet]－[EGWAVE3] を選択することにより、EGWAVE3 プログラムを起動します。

1-7-2.　終了

(1)　EGWAVE3 プログラムの[ファイル(F)]－[終了(X)] メニューを選択、もしくはウィンドウの × ボタンをクリックすることにより、EGWAVE3 プログラムを終了します。

第2章　解析手順

本章では、不規則波のエネルギー平衡方程式による浅海変形計算ソフトウェア『EGWAVE3』（イージーウェーブ 3）について解析手順を説明します。

2-1.　プログラムの起動

Windows の[スタート]メニューより、[すべて]-[AQUANET]-[EGWAVE3]を選択し、EGWAVE3 プログラムを起動します。

本プログラムを活用していただく方法として､以下の 3 パターンが基本となります。

1. 新たにコンターデータを用意し、波浪を解析する。
2. 既登録の水深データを用いて、異なる海象条件について解析する。
3. 既登録のコンターデータを基に計算範囲や格子軸を変更した水深データを再作成し、波浪を解析する。

本プログラムは、所定のファイル形式で“コンターデータ”が予め用意されていることを前提とし、本章の解説も“コンターデータの登録”(新規作成の場合)に始まる作業手順について取り上げています。

上記 3 パターンの作業手順を以下に概述します。なお、文末の数字は、以降に示します解説の節・項の番号を示しています。

《 1. 新規コンターデータの登録 ⇒ 解析　の手順》

① 作業フォルダの選択（2-2-1）

② コンターデータの登録（2-2-2）

③ 計算領域の設定（2-4-1）

④ (必要に応じて)水深データの編集（2-3-3）

⑤ (必要に応じて)反射率等の設定（2-4-2）

⑥ 計算ケースの設定（2-4-3）

⑦ 計算の実行（2-5）

⑧ 計算結果の出力（2-6）

《 2. 既登録水深データの使用 ⇒ 異なる海象条件の解析　の手順》

① 計算ケースの設定（2-4-3）

② 計算の実行（2-5）

③ 計算結果の出力（2-6）

《 3. 既登録コンターデータ ⇒ 水深データの再作成 ⇒ 解析　の手順》

① コンターデータの複写（2-2-2）

② コンターデータの回転・移動（2-3-1）

③ 計算領域の設定（2-4-1）

④ (必要に応じて)水深データの編集（2-3-3）

⑤ (必要に応じて)反射率等の設定（2-4-2）

⑥ 計算ケースの設定（2-4-3）

⑦ 計算の実行（2-5）

⑧ 計算結果の出力（2-6）

なお、新規又は既登録のコンターデータの一部を変更して解析する場合は、“水深データの編集”作業の前または後で適宜行ってください。

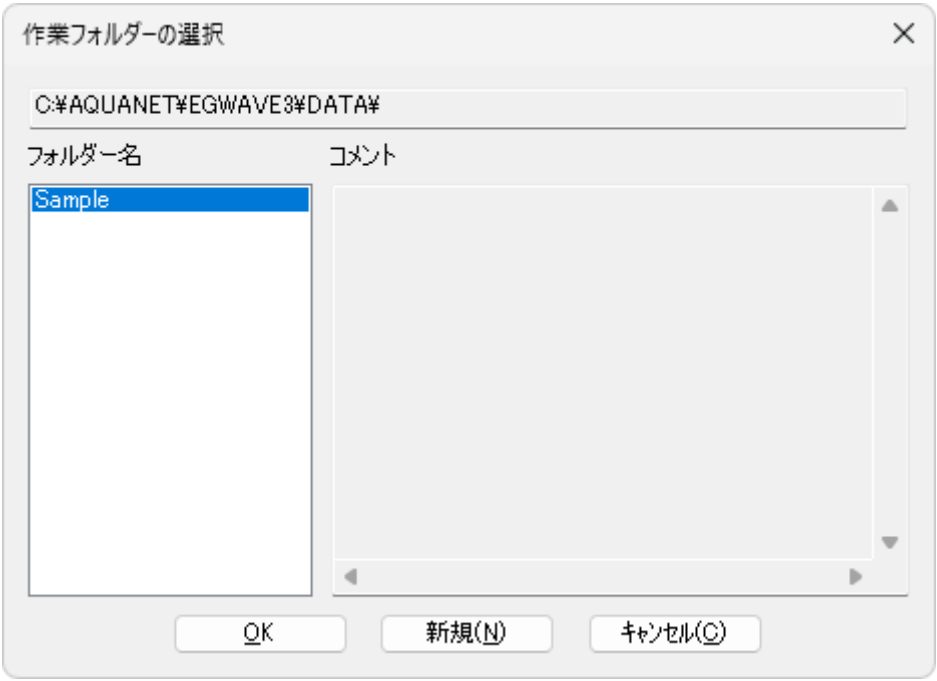
2-2. ファイル(F)

2-2-1. 作業フォルダの選択(W)

(1) [ファイル(F)]-[作業フォルダの選択(W)]を選択します。

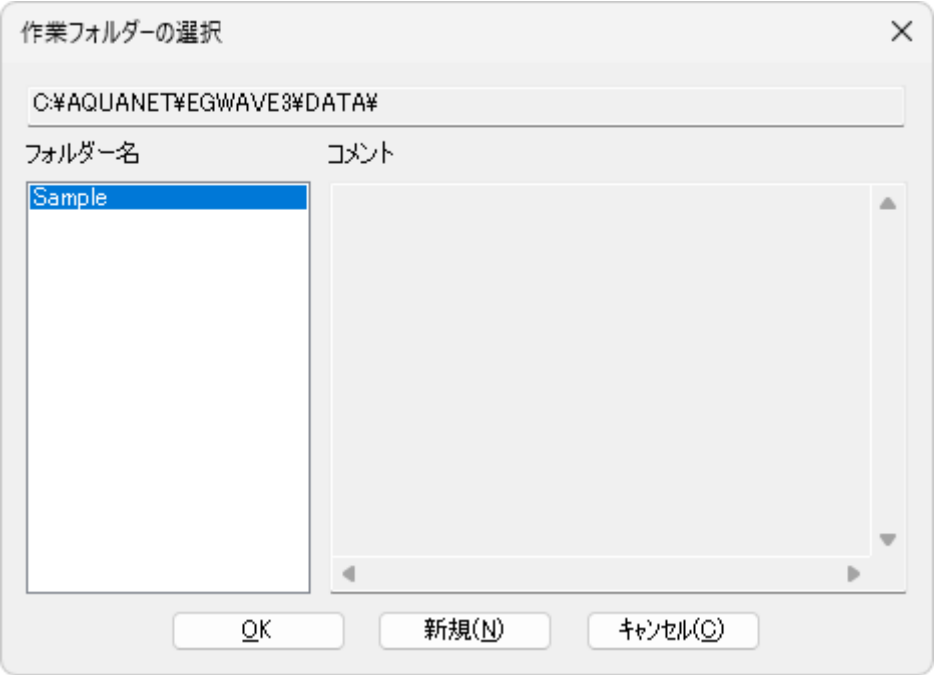
(2) 既登録の作業フォルダの選択する場合

表示された作業フォルダを選択し＜OK＞をクリックし、作業フォルダの選択をします。

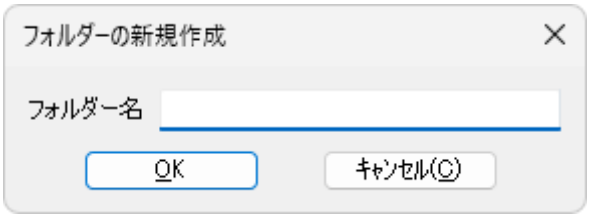


(3)　新規に作業フォルダを作成する場合

(3-1)　新規の作業フォルダを作成する場合は、画面下段の＜新規(N)＞をクリックします。



(3-2)　作成するフォルダ名を入力し、＜OK＞をクリックします



※1）フォルダ名は英数字の使用を推奨しております。

※2）作業フォルダは、本プログラムインストール先の DATA フォルダに作成されます。

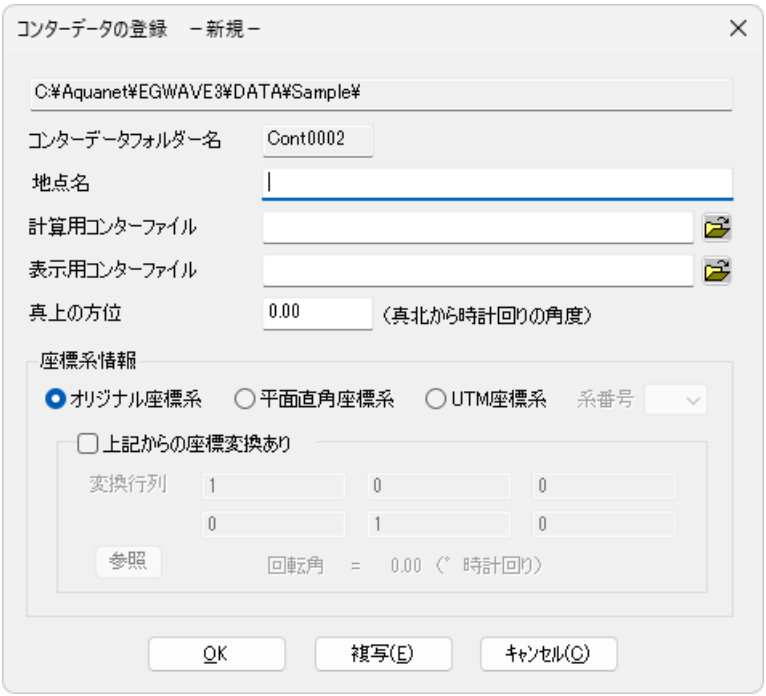
2-2-2. コンターデータの登録(R)

(1) [ファイル(F)]-[コンターデータの登録(R)]を選択します。

(2) 新規にコンターデータを登録する場合

(2-1) [ファイル(F)]-[コンターデータの登録(R)]を選択し、＜新規(N)＞をクリックします。

(2-2)　地点名を入力し、計算メッシュを作成するためのコンターファイル、真上の方位、座標系情報を指定します。



①　ここで入力した「地点名」は、出力図の表題(タイトルボックス)内の地点名として記載されます。

②　計算用コンターを、そのまま出力図のコンターとして用いる場合は、「表示用コンターファイル」欄の入力を省略できます。

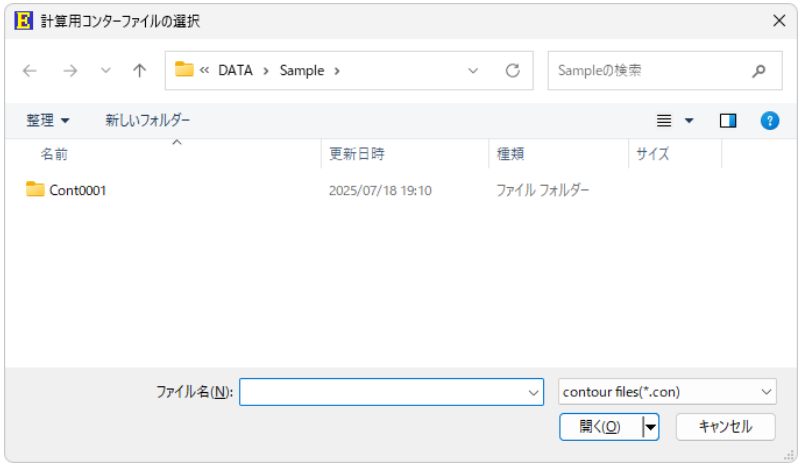
(注) 海岸構造物周辺での計算格子点の水深値を要領良く生成するために、本来の等深線(表示用コンターファイル)とは別に計算用コンターファイルを作成しておくと、“水深データの編集”作業を省力化する事も出来ます(§2-4-1 の項参照)。

③　真上の方位は、コンターデータの真上(計算領域の沖側)の方位を北からの時計回りの角度を正(+)として指定します

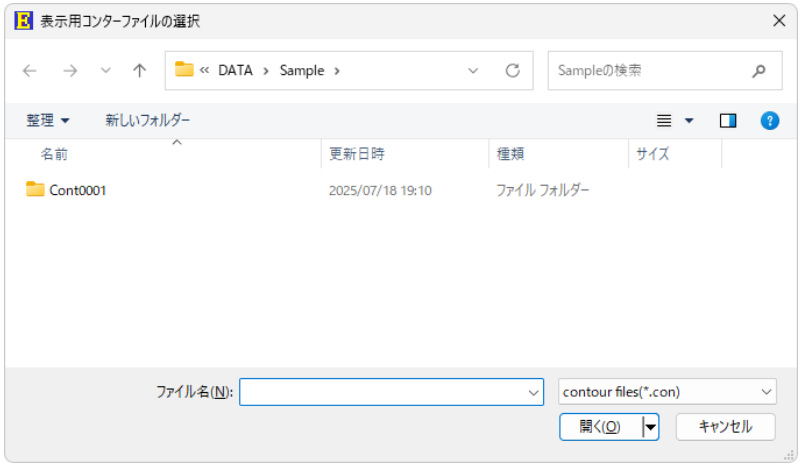
④　平面直角座標系、UTM 座標系を指定した場合は系番号も指定します。

⑤　座標の変換をする場合は、「上記からの座標変換あり」にチェックを入れ、設定します。

(2-3)　「計算用コンターファイル」欄右端の をクリックし、コンターファイルのあるフォルダを表示してファイルを選択し、<開く(O)>をクリックします。

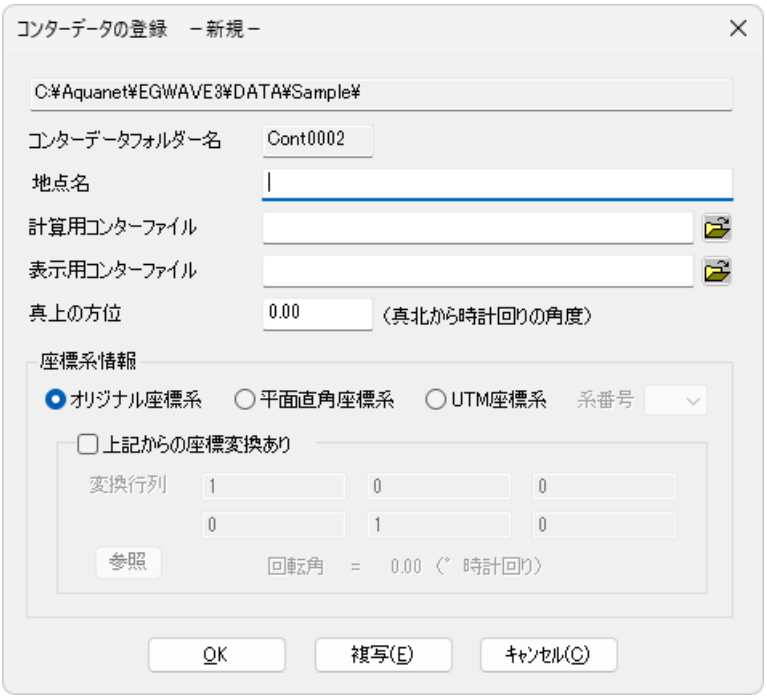


(2-4)　同様にして表示用コンターファイルを選択します。
(ファイルの選択を省略しますと、計算用コンターファイルが複写されます。)



(3)　既登録コンターデータを複写して再登録する場合

(3-1)　[ファイル(F)]-[コンターデータの登録(R)]を選択し、＜新規(O)＞-＜複写(E)＞をクリックします。

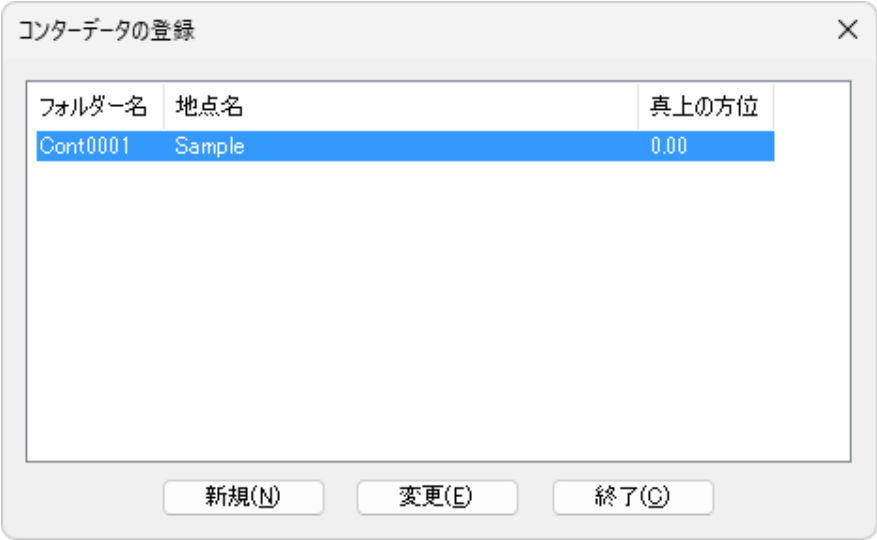


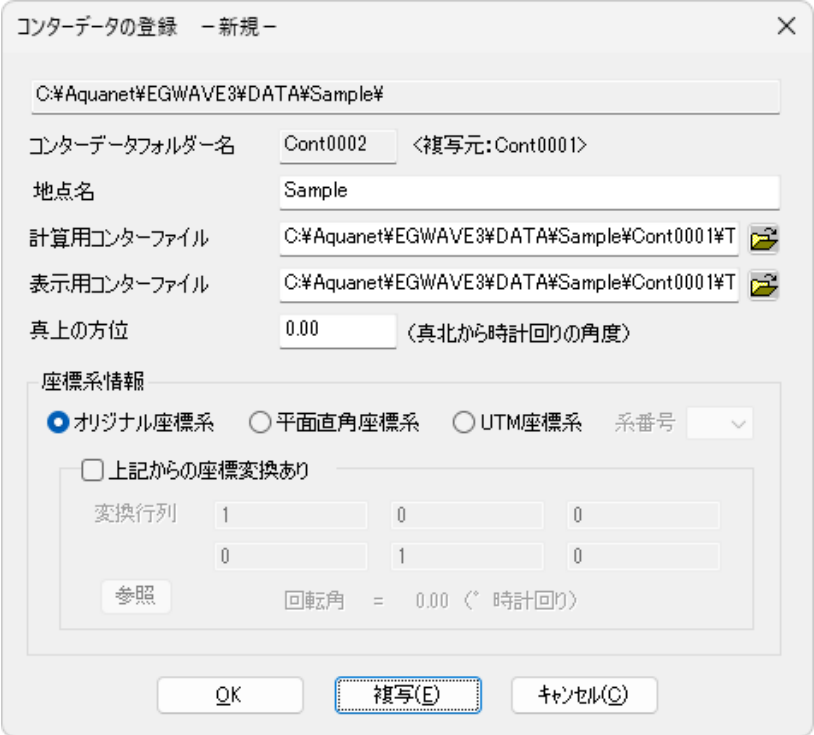
(3-2)　複写をクリックすると、作業フォルダ中の登録済みのコンターファイルが表示されます。

①　上記画面でファイルを選択し＜OK＞をクリックしますと、次項(4)と同様の画面が表示されます。

(4)　既登録コンターデータを変更して再登録する場合

(4-1)　[ファイル(F)]-[コンターデータの登録(R)]を選択し、＜変更(E)＞をクリックします。





①　上記画面で地点名、コンターファイル、真上の方位、座標系情報の変更ができます。

②　コンターファイルを変更する場合、右端の“フォルダのアイコン”からコンターファイルのあるフォルダを指定します。

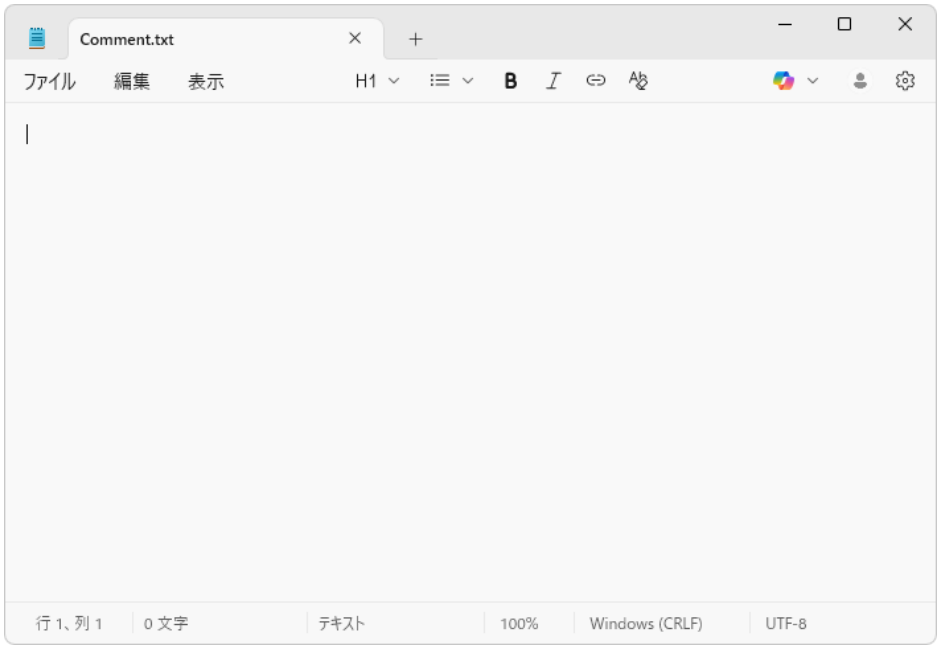
2-2-3. コメントの入力・修正（E）

作業フォルダ毎に“メモ帳”を用意してあります。

作業フォルダ名や地点名で作業内容などを管理出来ない時に作業履歴、特記事項等のコメントを入力します。この作業フォルダに初めてコメントを作成する場合はテキストファイルが新規作成され、既に入力済みで修正する場合には、作成済みのテキストファイルが表示されます。

(1) [ファイル(F)]-[コメントの入力・修正(E)]を選択します。

(2) コメントを入力します。書式に指定はありません。



2-2-4. ファイルの削除（D）

ここでは、このフォルダに登録されているコンターデータ、計算領域、計算ケースの削除を行います。

(1)　「計算ケース」の削除

(1-1)　[ファイル(F)]-[削除(D)]-[計算ケース(S)]を選択します。

登録されている計算ケースを選択し、＜削除(D)＞をクリックします。

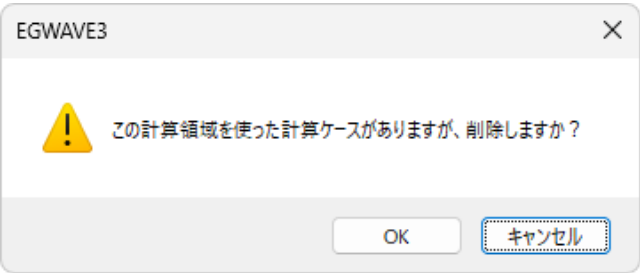
(1-2)　＜OK＞をクリックします。

(2)　「計算領域」の削除

(2-1)　[ファイル(F)]-[削除(D)]-[計算領域(A)]を選択します。

登録されている計算領域を選択し、＜削除(D)＞をクリックします。

※削除する計算領域に付随する計算ケースが存在する場合は、以下のウィンドウが表示されます。



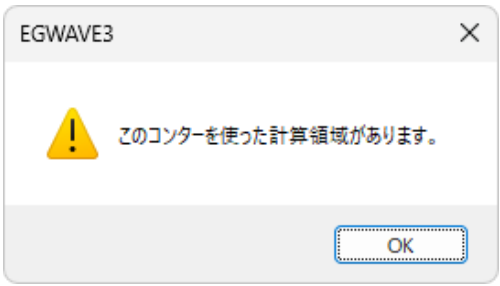
(2-2)　＜OK＞をクリックします。

(3)　「コンターデータ」の削除

(3-1)　[ファイル(F)]-[削除(D)]-[コンターデータ(C)]を選択します。
登録されているコンターデータを選択し、＜削除(D)＞をクリックします。
コンターデータの削除を行う場合は、削除するコンターデータを元に登録されている計算領域、計算ケースを削除した後に行います。

(3-2)　＜OK＞をクリックします。

※削除するコンターデータを元に登録されている計算領域、計算ケースがある場合、＜OK＞をクリックしても削除されません。



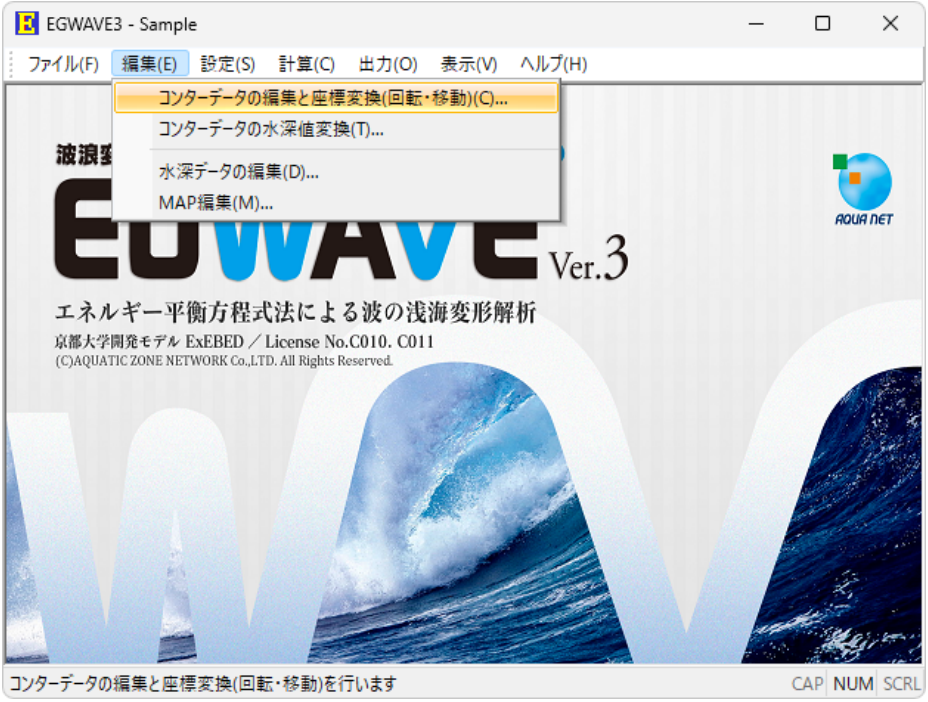
2-2-5. 終了（X）

[ファイル(F)]-[アプリケーションの終了(X)]を選択すると、本プログラムを終了します。

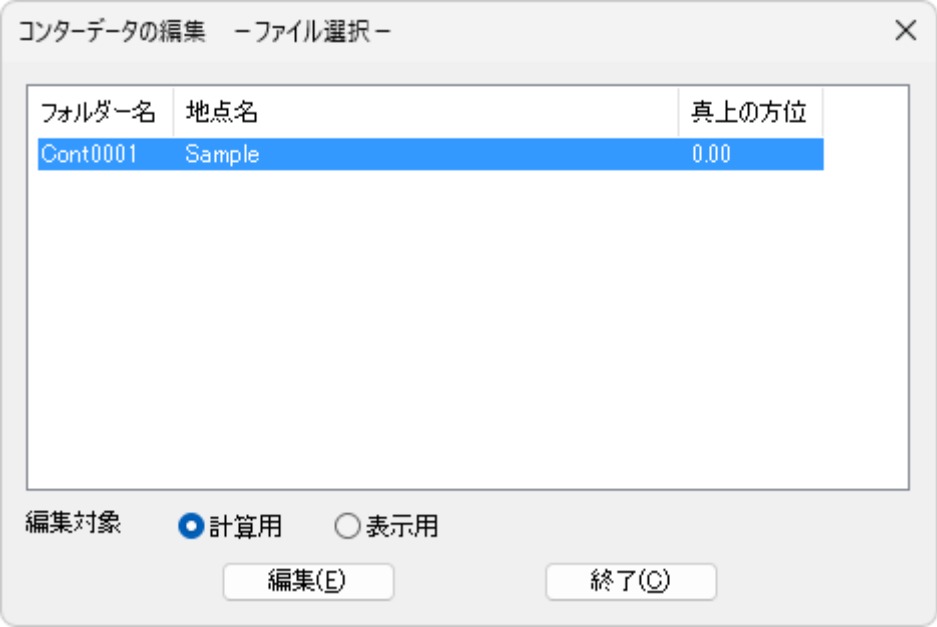
2-3. 編集(E)

2-3-1. コンターデータの編集と座標変換（回転・移動）(C)

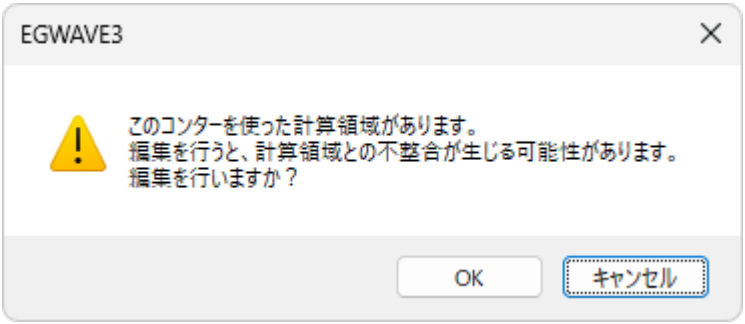
登録されているコンターデータを「計算用」、「表示用」でそれぞれ編集できます。



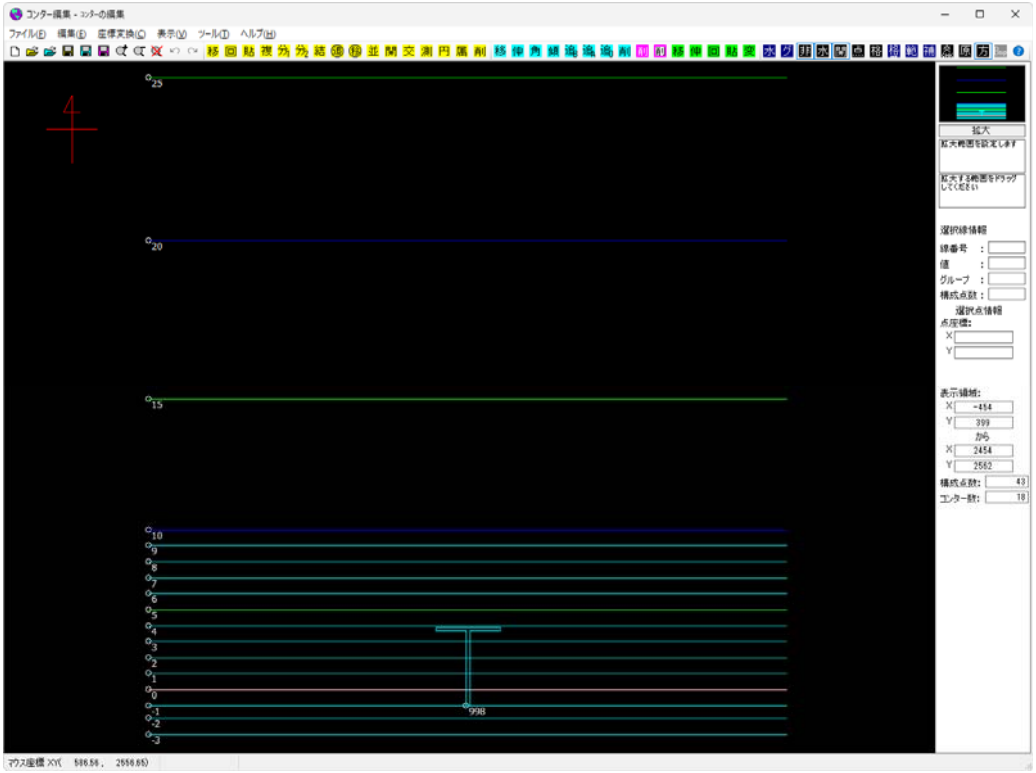
(1) [編集(E)]-[コンターデータの編集と座標変換（回転・移動）(C)]を選択します。
編集対象(計算用・表示用)を選択し、編集するコンターデータを選択します。
＜編集(E)＞をクリックします。



(2)　編集するコンターデータを元に作成した計算領域データが存在する場合は、次のメッセージが表示されます。
＜OK＞をクリックし、コンターデータを編集します。
この場合、これから編集するコンターデータと既存の水深データとの整合性が失われますので、水深データを再度作成し直す必要があります。

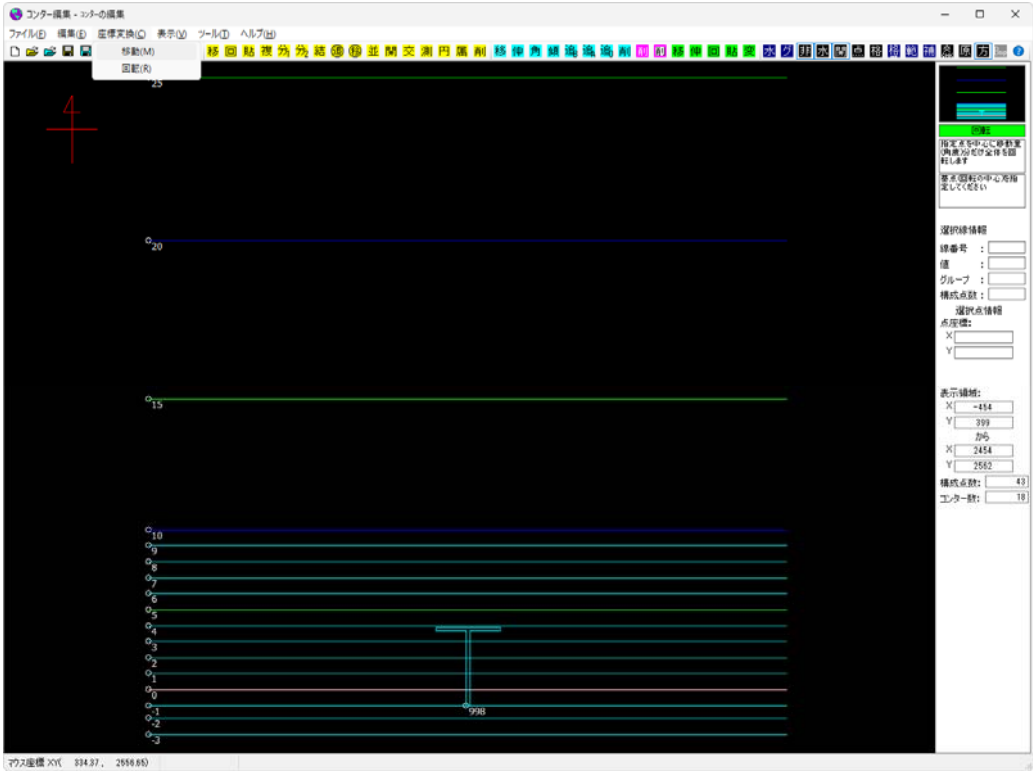


(3)　コンターデータが表示されますので、コンターの編集を行います。
(編集手順は省略しますが、[ヘルプ(H)]をクリックしますと機能別に操作方法を詳述してありますので、適宜参照しながらコンター編集を行ってください。)

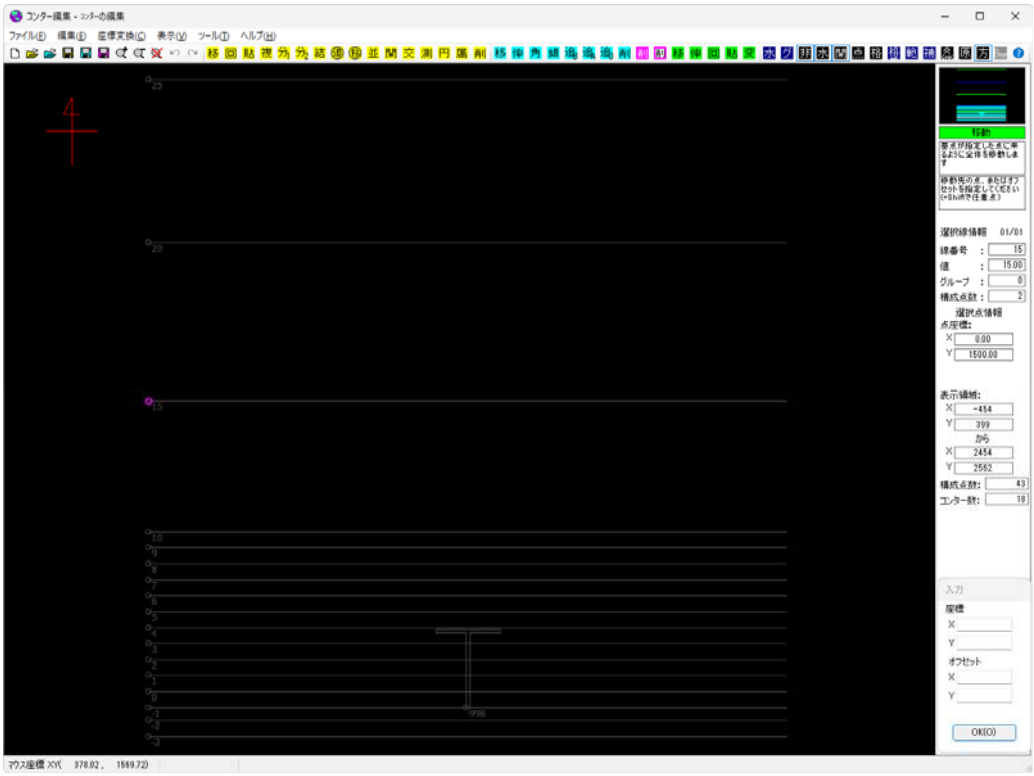


(4)　コンターデータを移動します

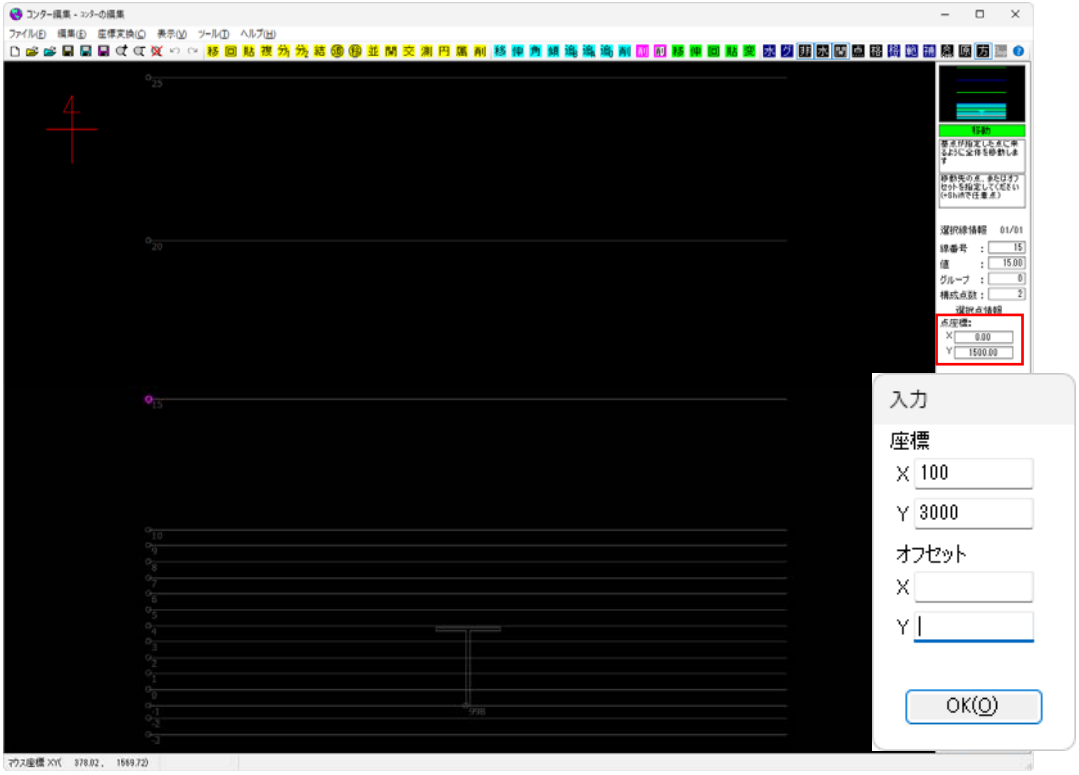
(4-1)　[座標変換(C)] -[移動(M)]を選択します。



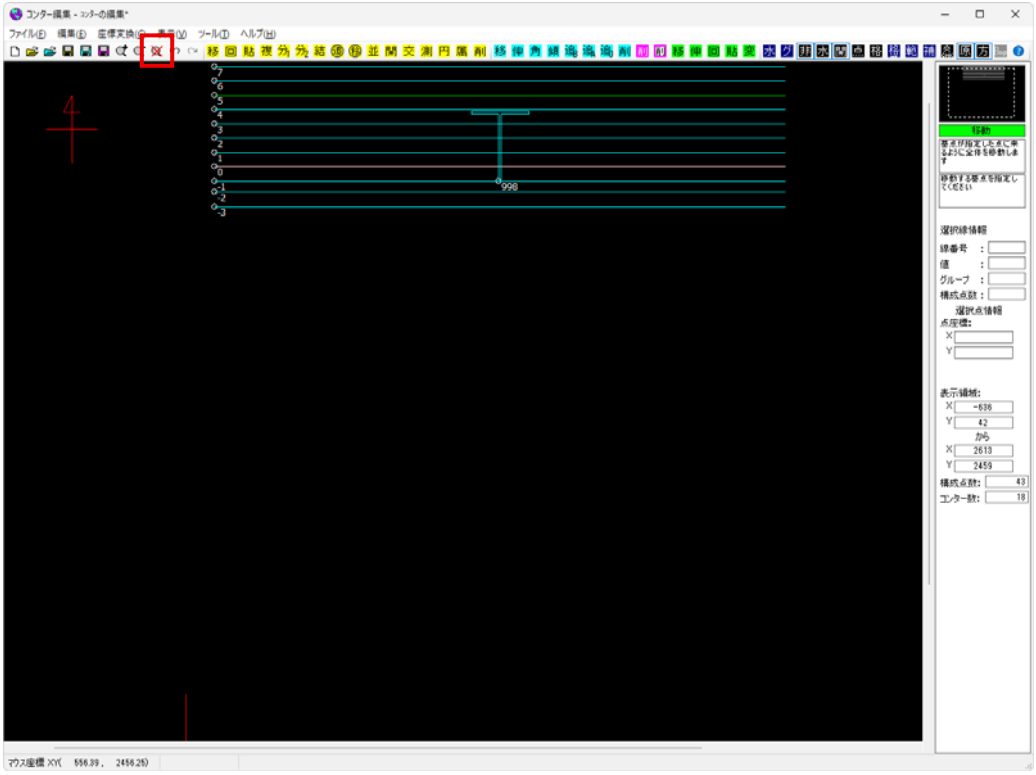
(4-2)　基点となる点を選択します。



(4-3)　[移動]させたい XY 座標、またはオフセット（現在位置からの距離）を入力し、＜OK(O)＞をクリックします。

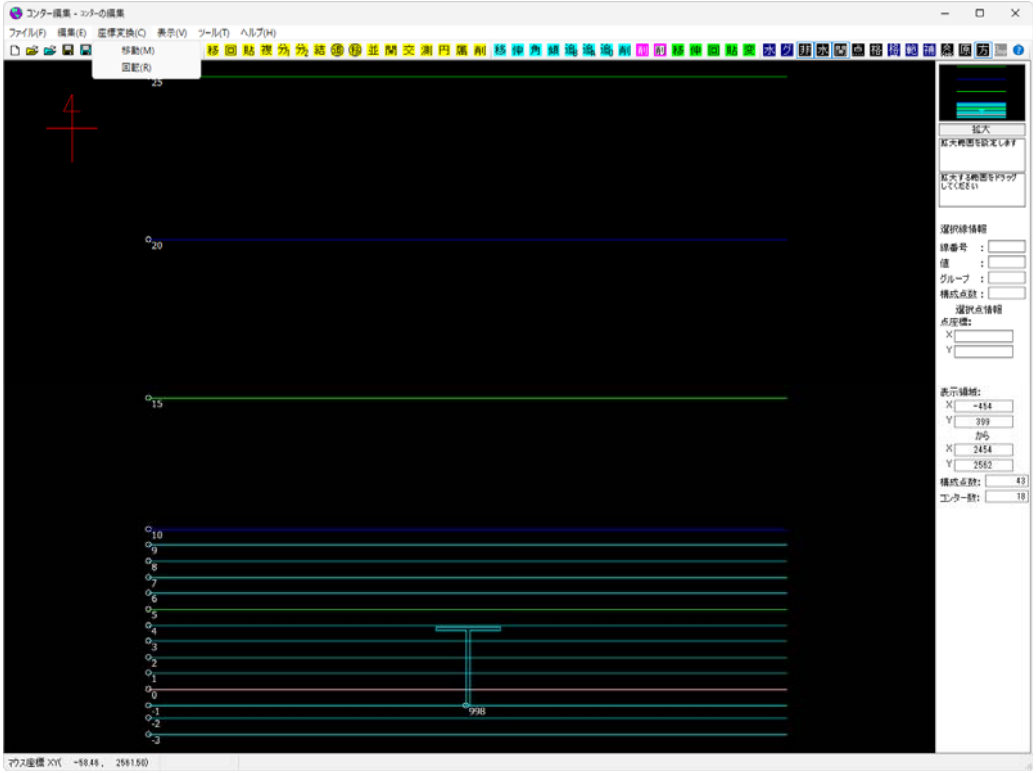


(4-4)　移動後、 アイコンをクリックして、表示範囲を再設定します。

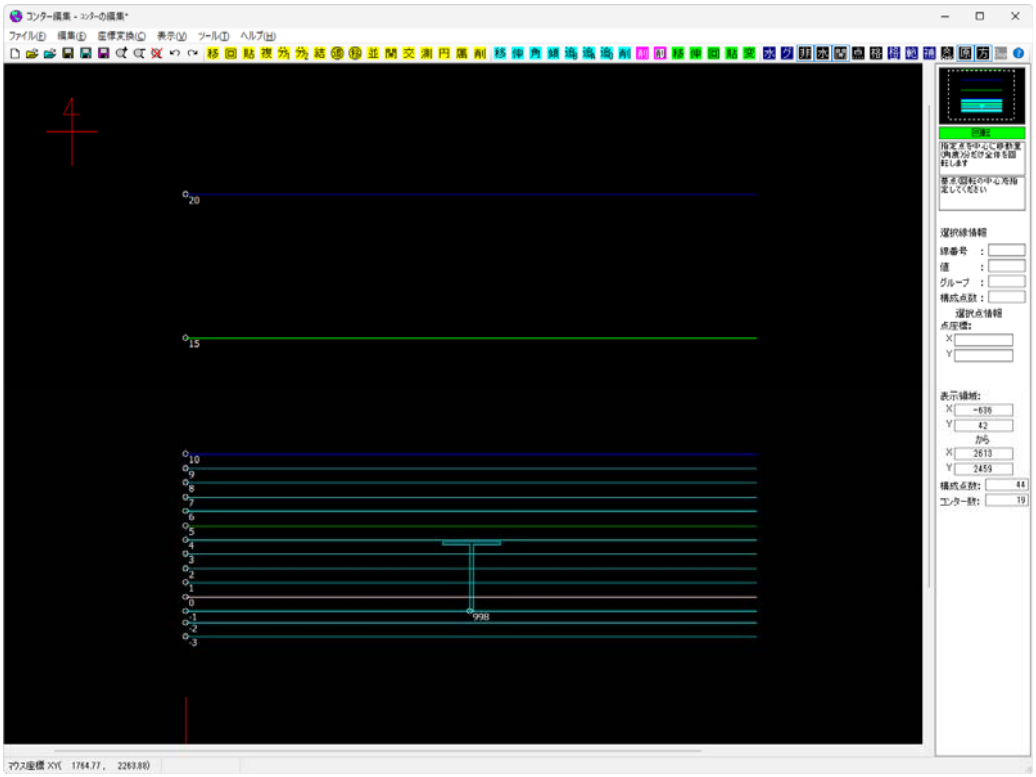


(5)　コンターデータの回転をします

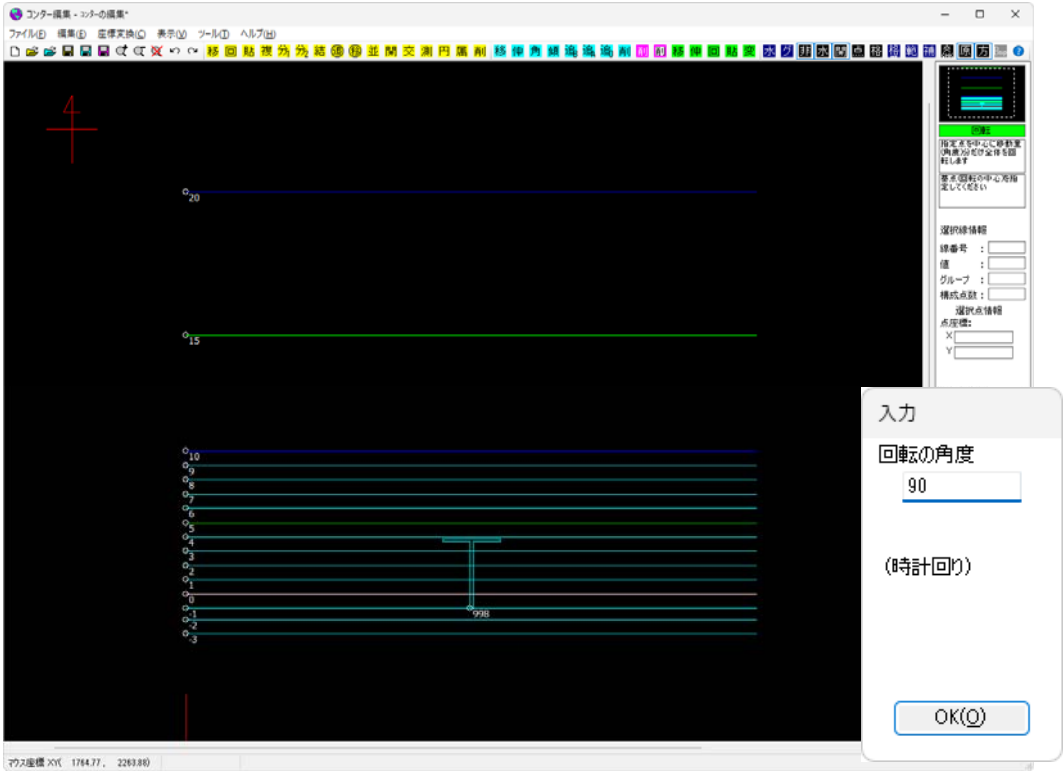
(5-1)　[座標変換(C)] - [回転(R)]を選択します。



(5-2)　基点となる点を選択します。

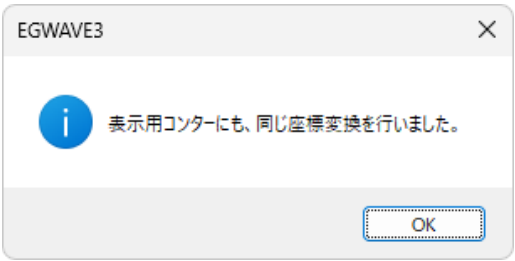


(5-3)　[回転]させたい角度を時計回りで入力し、＜OK(O)＞をクリックします。

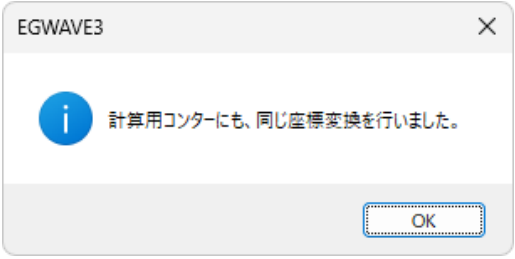


(5-4)　移動後、 アイコンをクリックして、表示範囲を再設定します。

（ア） 計算用コンターの座標変換をした後は、表示用コンターにも同じ座標変換を行ったメッセージが表示されます。



（イ） 表示用コンターの座標変換をした後は、計算用コンターにも同じ座標変換を行ったメッセージが表示されます。



＜OK＞をクリックすると、既存領域を座標時変換したメッセージが表示されます。

※注意

グループ処理で移動、または回転をすると、「計算用・表示用」選択した方のみ処理され、既存領域の座標変換等は行われないため、「計算用・表示用」両方のコンターを移動、または回転させる場合は、必ず座標変換メニューから行ってください。

↑座標変換・回転の場合はこちら

2-3-2. コンターデータの水深値変換(T)

コンターデータの水深値を一括で変換することが出来ます。

(1) 変換対象のコンターを選択し、変換するグループ又は水深を選択します。

(2)　変換係数を設定します。

A：倍率を入力します。

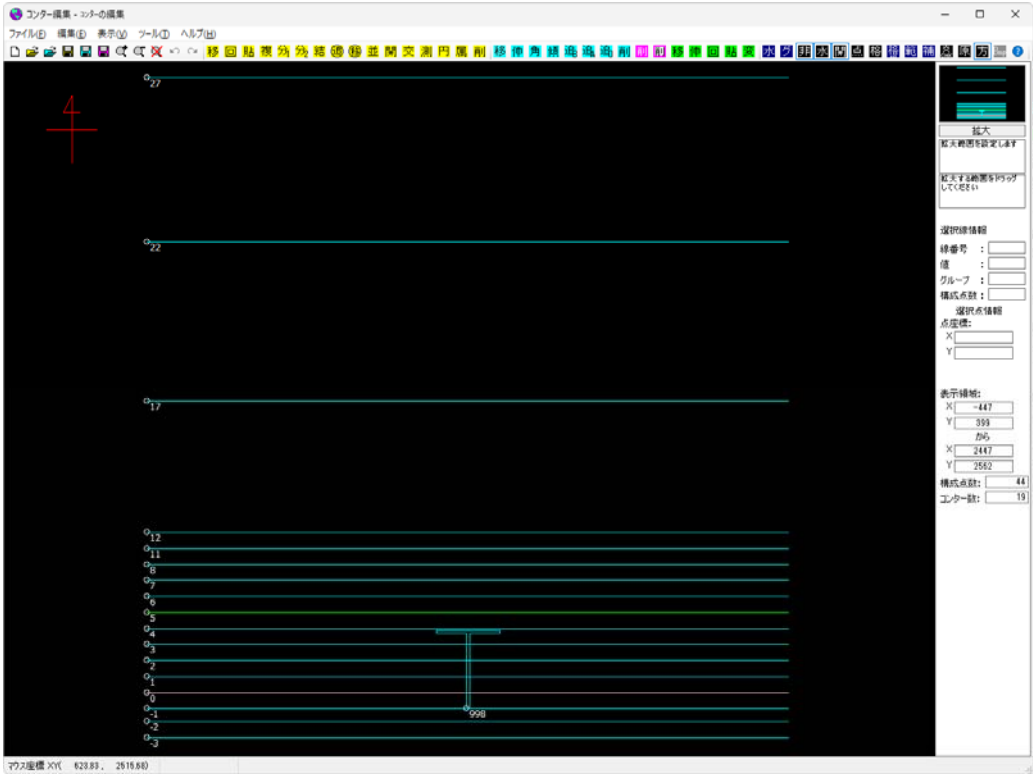
　　コンターデータはメートル表記ですが、元データがフィートやインチなど、メートル以外の場合はメートルに変換する必要があるので、倍率を設定します。元データがメートル表記の場合は、「1」を入力します。

B：加減値を入力します。

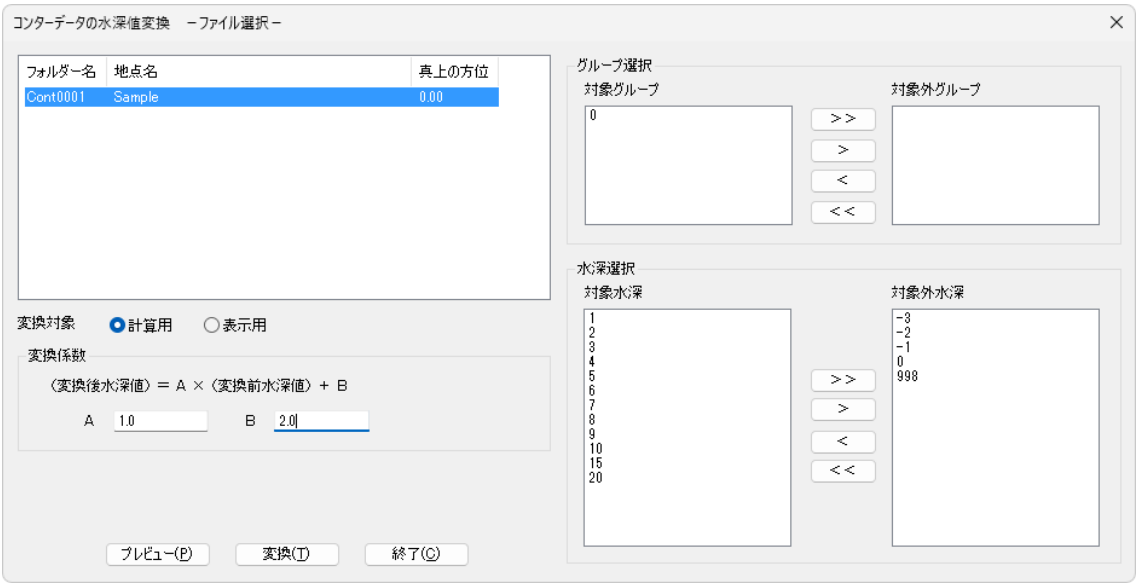
・グループ選択で対象となるグループ、対象外となるグループを選択します。
・水深選択で対象となる水深、対象外となる水深を選択します。

(3)　各条件を確認し、＜変換(T)＞をクリックすると、コンターが変換されます。

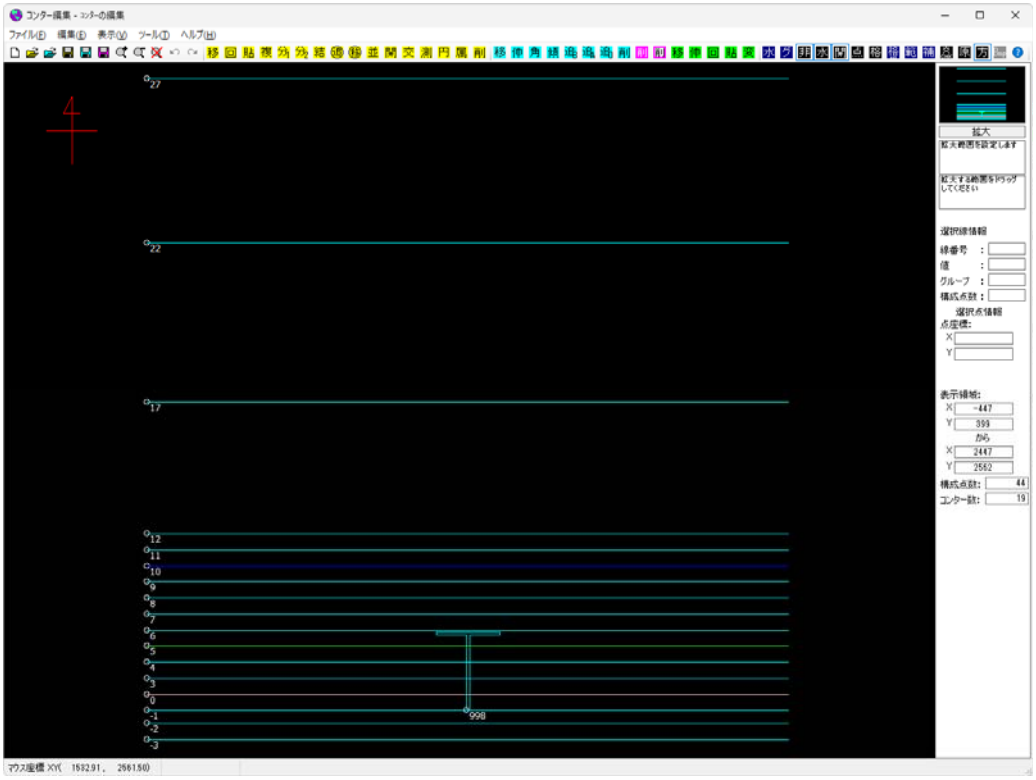
以下に、コンター値を 2.0m 加算する場合の例を示します。



コンターデータはメートル表記なので、変換係数 A に「1.0」を入力し、変換係数 B に「2.0」を入力します。



＜プレビュー(P)＞をクリックすると、元のコンターに 2.0m 加算されたコンターが表示されます。

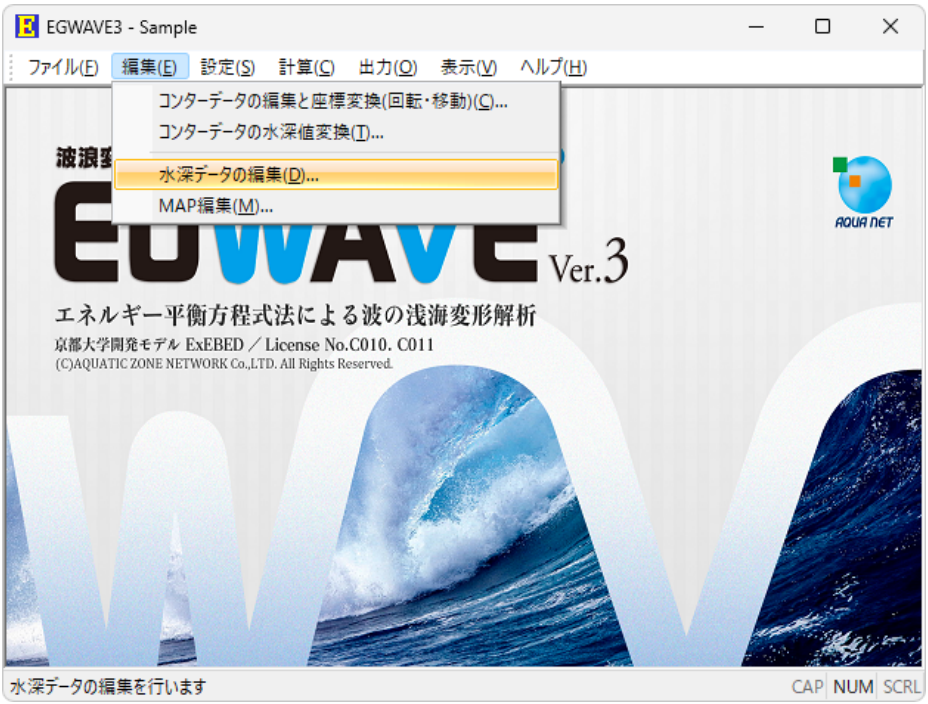


コンター値-2 にしたい場合は、変換係数 B に「-2」と入力します。

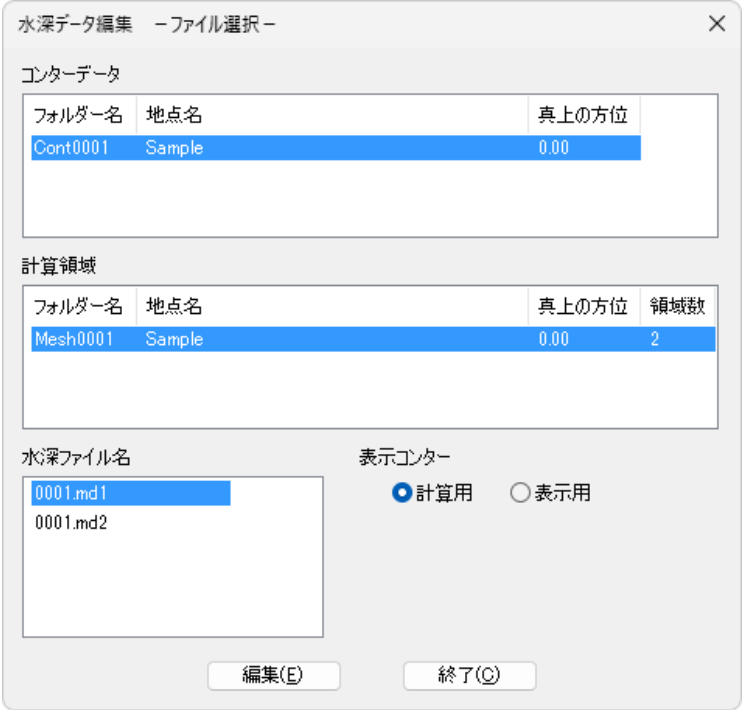
2-3-3. 水深データの編集(D)

後述する§2-4-1 で作成された水深データ(各計算格子点上の水深の値)の編集を行います。ここでは、コンターデータから作成された水深データを編集することが出来ます。

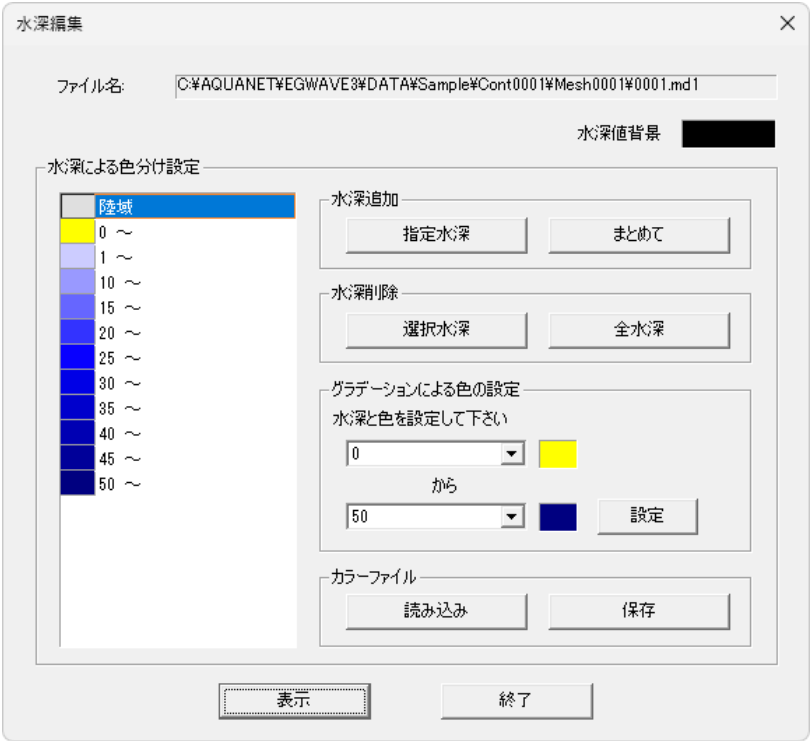
※一度保存した水深データは元に戻りません。水深データを元に戻すには、§2-4-1 において水深データの再作成が必要です。



(1)　画面に表示された 3 種のファイル(コンターデータ、計算領域、水深ファイル名)について、該当するファイル名を反転させて選択し<編集(E)>をクリックします。



(2)　水深を色分け表示するため、水深による色分け設定をします。



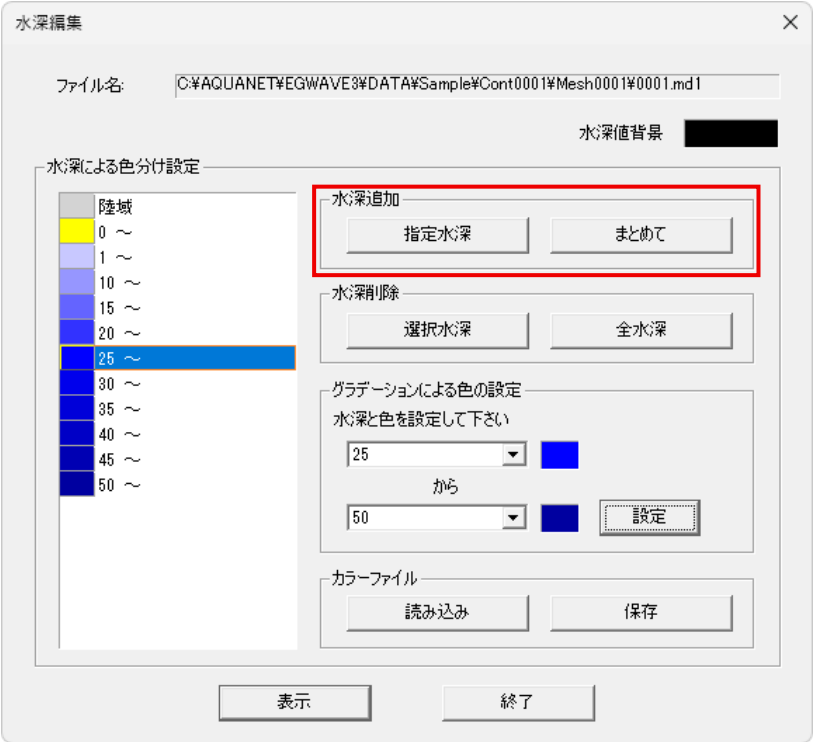
(2-1)　水深データの編集では、コンター表示画面を水深ランク毎に色分けして表示します。この画面では、水深値と表示色の指定を行います。

(2-2)　表示色は、色のボックスをクリックするとカラーパレットが表示され、そこで色の指定をします。

(2-3)　＜水深追加＞を選択すると、任意の水深値を設定できます。

（ア）　＜指定水深＞を選択すると、水深値１つを設定します。

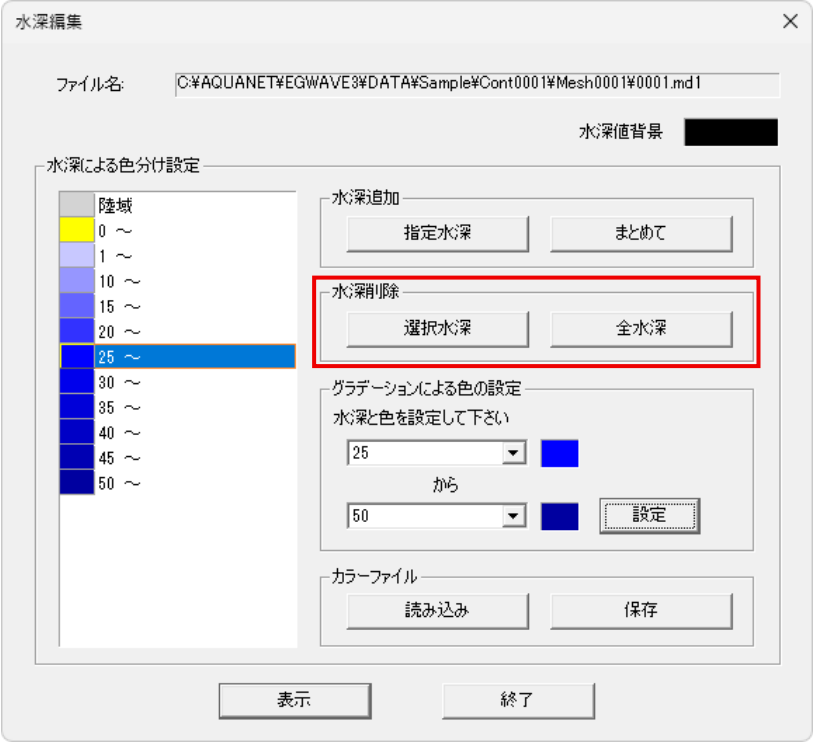
（イ）　＜まとめて＞を選択すると、最小水深～最大水深を指定したピッチで設定します。



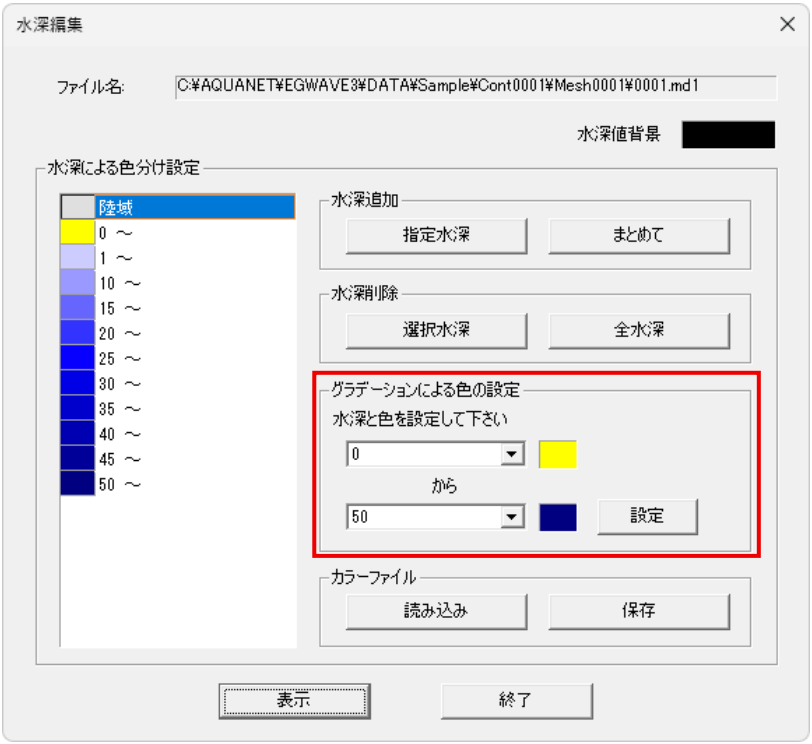
(3)　＜水深削除＞を選択すると、選択した水深を削除します。

（ア）　＜選択水深＞を選択すると、選択されている水深１つを削除します。

（イ）　＜全水深＞を選択すると、全水深が削除されます。



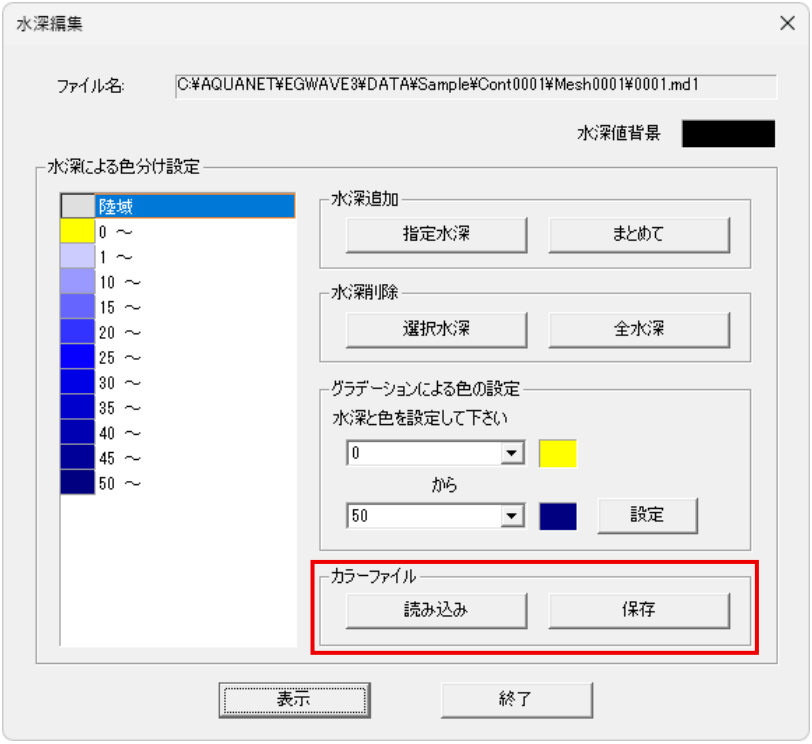
(4)　＜グラデーションによる色の設定＞を選択すると、編集データの最小水深～最大水深を等分割したランク値を設定します。



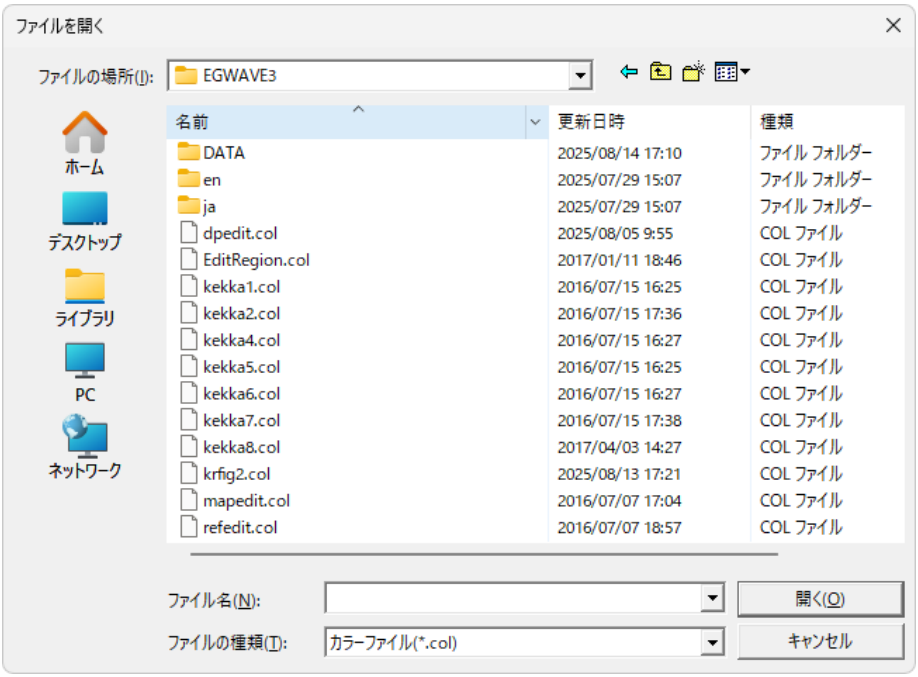
(5)　＜カラーファイル＞を選択すると、ファイル選択、保存をします。

（ア）　＜読み込み＞を選択すると、既存のカラーファイルを選択します。

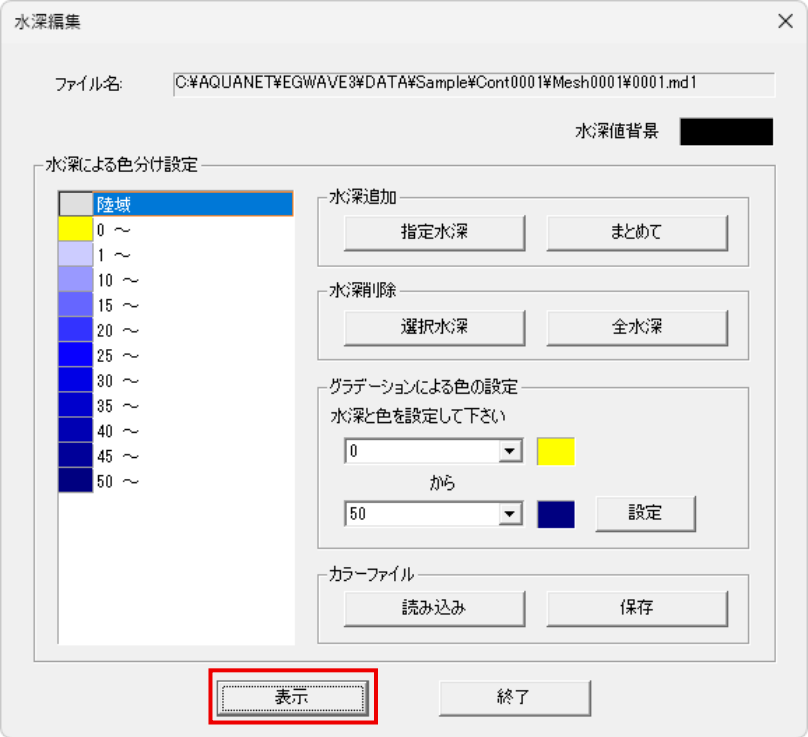
（イ）　＜保存＞を選択すると、変更した色分け設定が上書き保存されます。



※カラーファイル読み込みを選択した場合



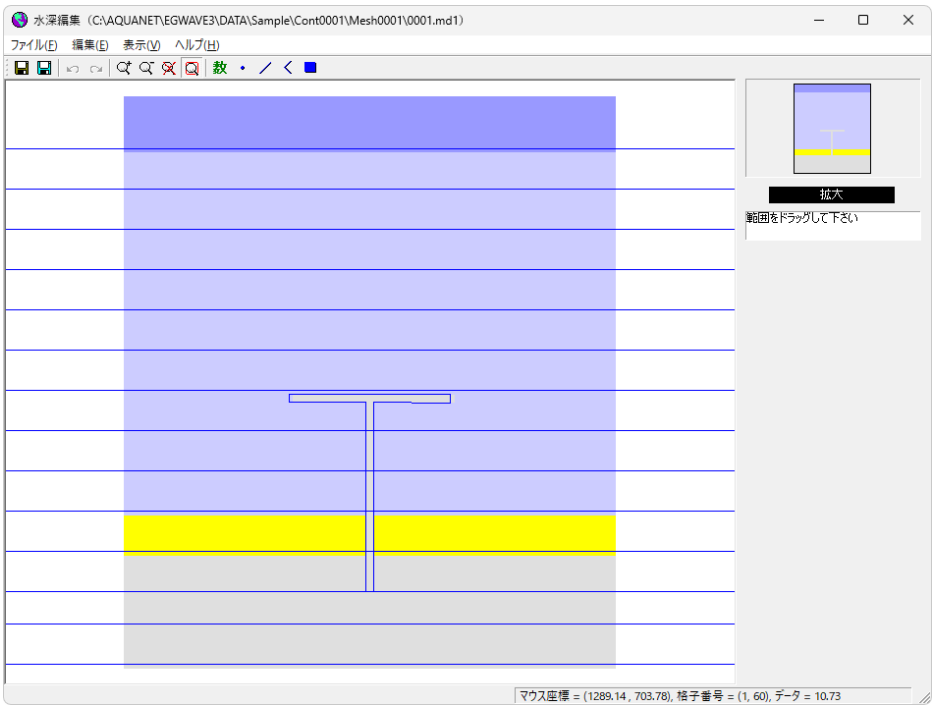
(6)　＜表示＞を選択すると、次項に示す格子水深編集画面が表示されます。



(7)　全域のコンター図が表示されます。

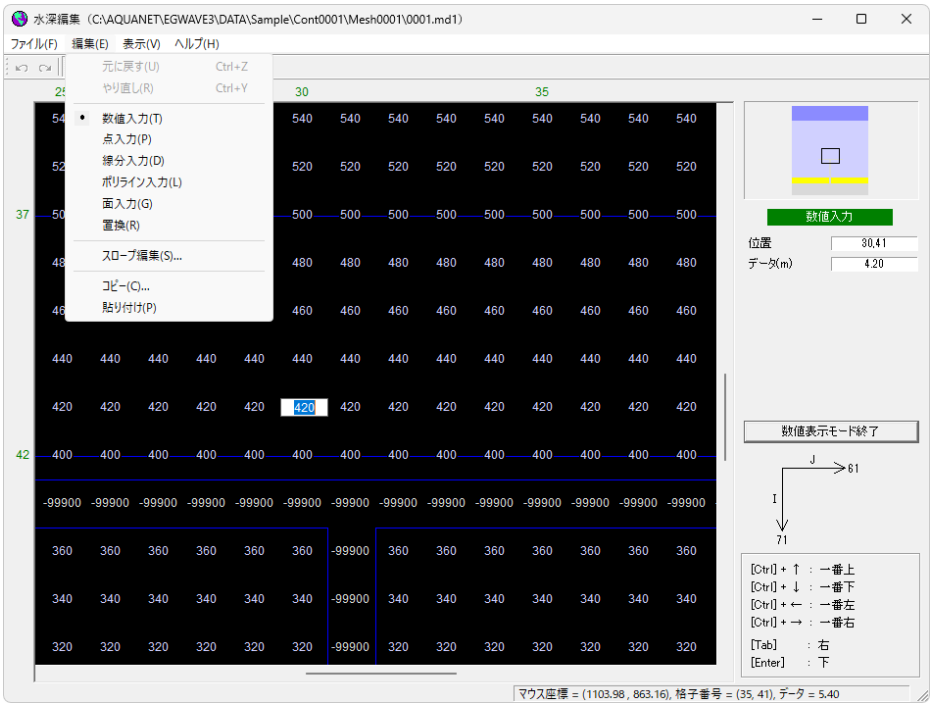
編集対象域を拡大して表示することができます(をクリック)。

数 を選択した後に水深値を編集したい地点付近をクリックしますと、計算格子上の水深値が表示され数値編集モードに変わります。

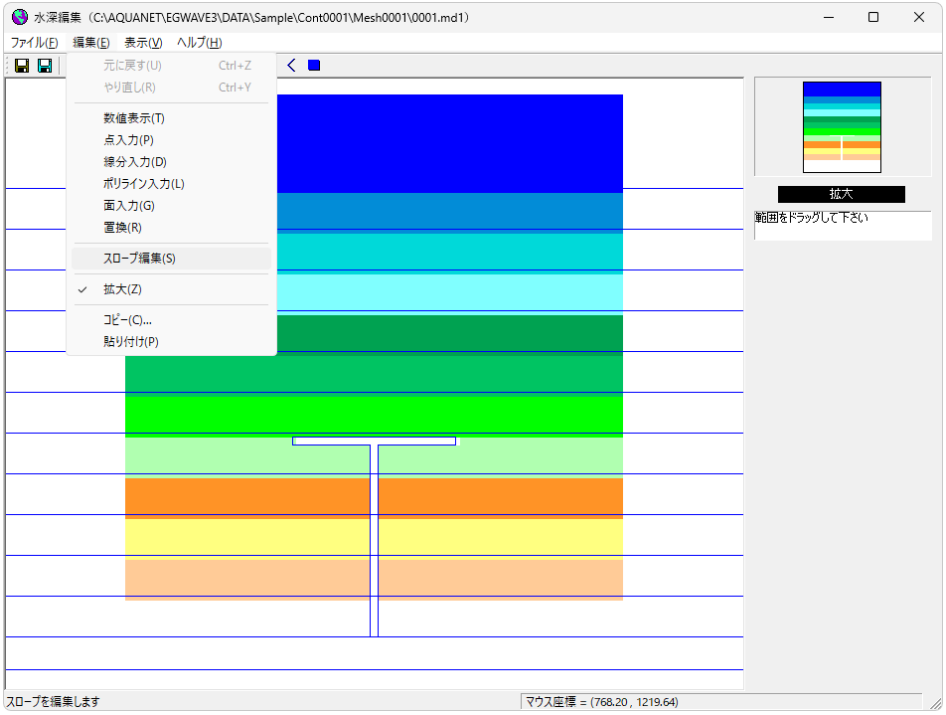


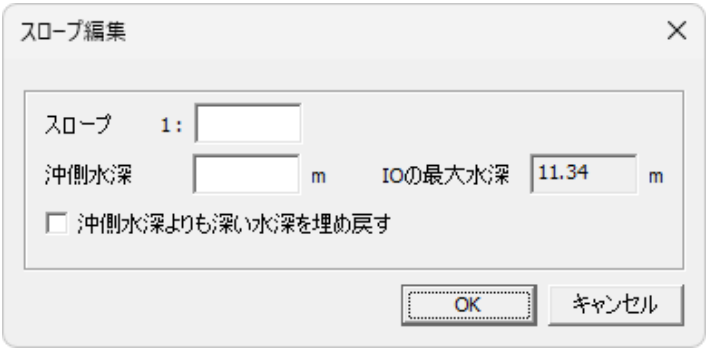
(8)　数値編集モードに変わりましたら、キー入力により値を直接更新します。

その他、＜編集(E)＞にある機能(点入力、線分入力、ポリライン入力、面入力、置換)を使用すると、指定した範囲の水深値をまとめて編集する事もできます。

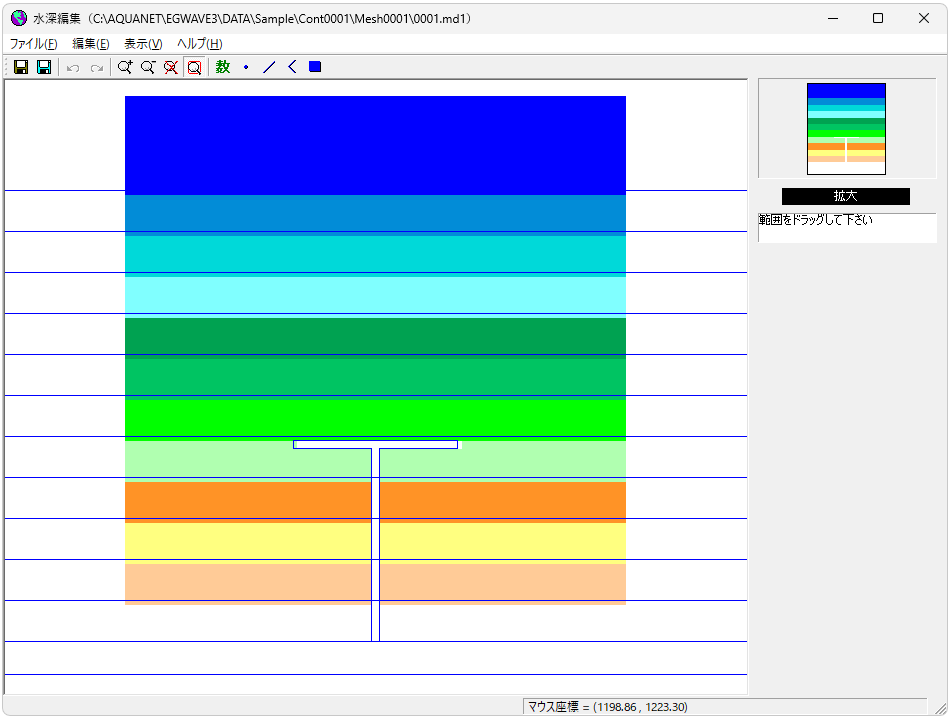


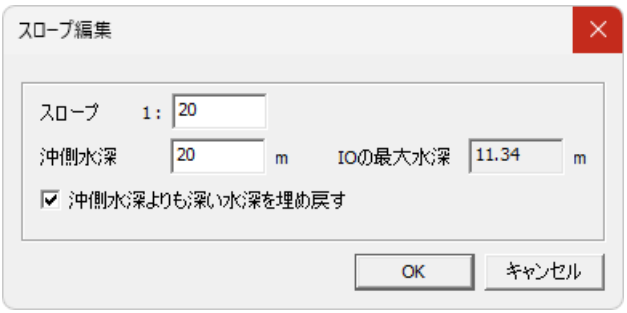
(9)　＜編集(E)＞にあるスロープ編集をクリックすると、スロープ編集画面に変わります。沖側境界から設定する勾配、沖側水深を入力します。
設定した沖側水深よりも深い水深を埋め戻す場合はチェックを入れます。

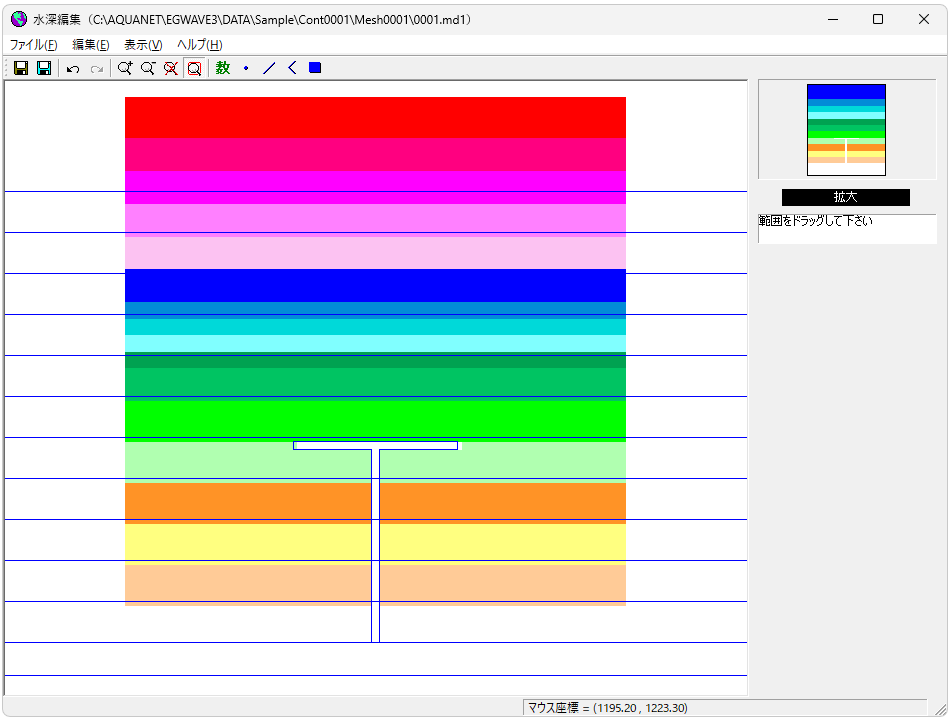




以下に、勾配 1：20、沖側水深 20m、水深埋戻し有りの場合の例を示します。







2-3-4. MAP 編集(M)

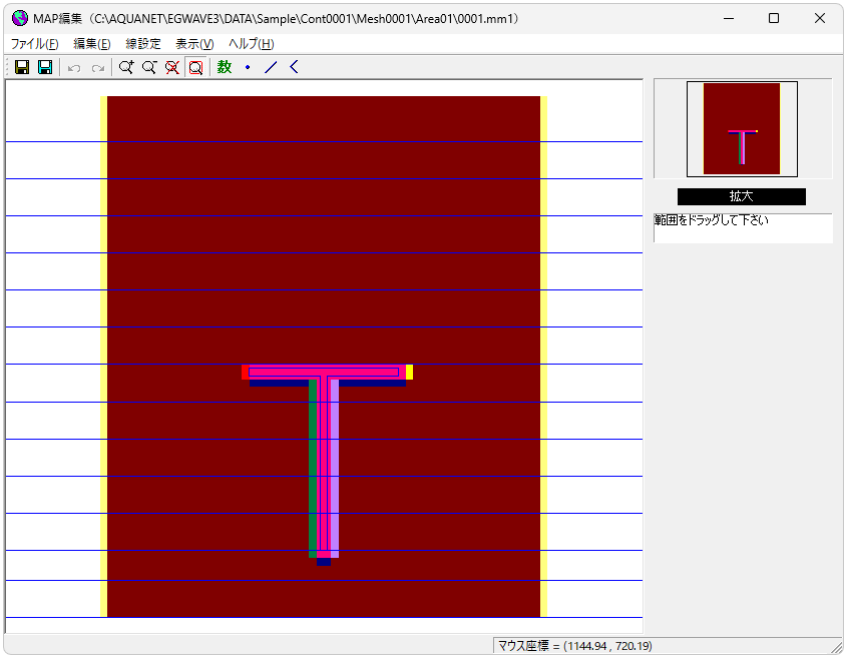
計算格子点では、水深データを生成する際に“マップ”と呼称される数値データが作成されます。マップは、0～9 までの 10 種の数値で表され、その内容は§1-3-2 に示す通りです。計算を行う上で、他の条件と併せて参照されます。一般的には、自動生成されるマップを意識せずに計算を行うことができますが、稀に特異な条件下で波浪変形を解析する場合などでは、部分的にマップの値を変更して計算します。マップの編集をされる場合は、内容を十分熟知した上で行ってください。

(1) 各フォルダ名、領域範囲を反転して選択し、＜編集(E)＞をクリックします。

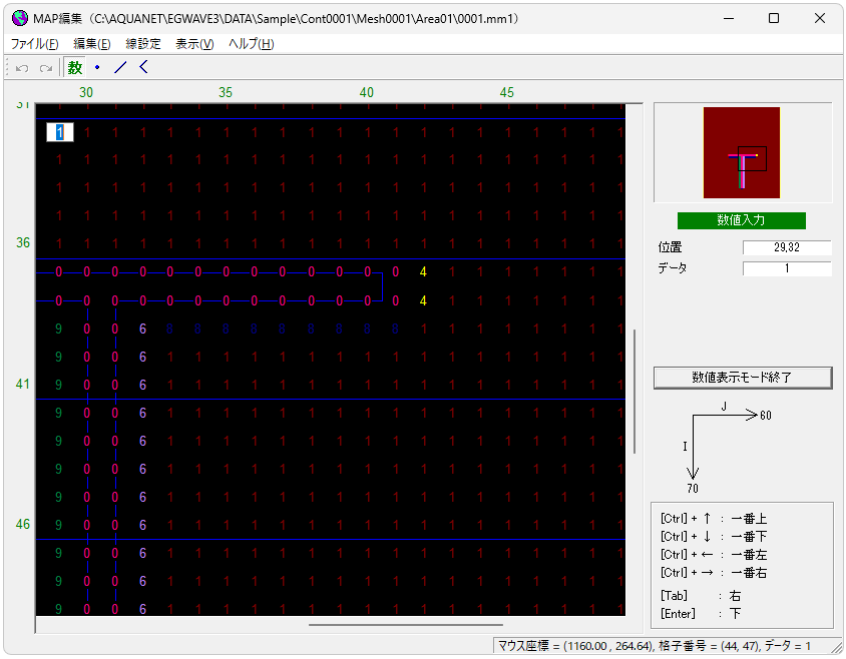
(2)　マップを表示するため、色の設定画面が表示されます。マップで使用している 0～9 までの数値を色別に表示します。必要に応じて表示色の変更ができます。

(2-1)　表示色のボックスをクリックしますと、カラーパレットが表示されますので好みの色を選択して、＜OK＞をクリックします。
表示色を設定後、＜表示＞をクリックします。

(3)　表示をクリックすると、マップの数値が色で表示されます。数 を選択した後に変更したいマップの格子位置付近をクリックしますと、マップの数値が表示されます。



(3-1)　この画面で任意の格子点におけるマップの値を変更できます。但し 1 は海域、0 は構造物です。0 以外の数値が編集可能です。



注意：マップ値はほとんどが構造物境界で設定されるものですので、修正する場合はマップの機能を熟知して実行してください。

2-4. 設定(S)

2-4-1. 計算領域 (A)

計算領域の設定方法には、次の 2 通りがあります。

A. コンター画面上で、マウスで矩形範囲の対角点をドラッグして範囲を指定する。

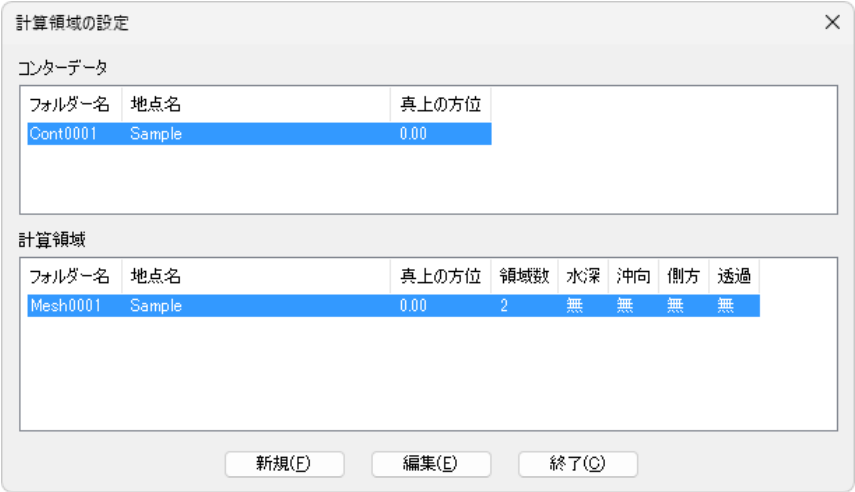
B. 計算領域の設定画面を使い、左下の XY を座標値で指定し、範囲を指定する。

A の方法が操作性や視認性が良いことから、ここでは画面に表示されたコンター図に対して “領域 1”、“領域 2” (領域 2 以上の設定は任意)と計算領域を新規に設定した後、計算領域の設定画面(X,Y 方向の範囲を座標値で設定する画面)で領域の微調整を行っていく操作方法を解説します。

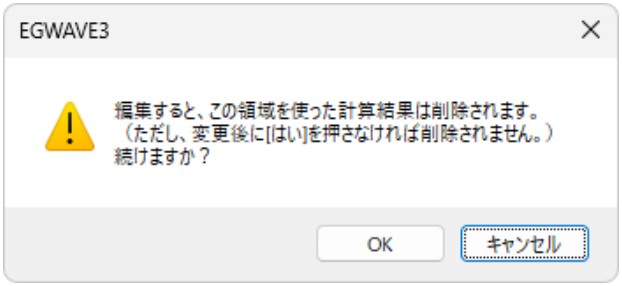
なお、この操作方法を習得できれば、この応用として「既設定の計算領域の編集」、「既設定ファイルを複写して編集し直す」等の操作は容易に行えますので、操作解説は省略します。

(1)　計算領域を新規作成する場合

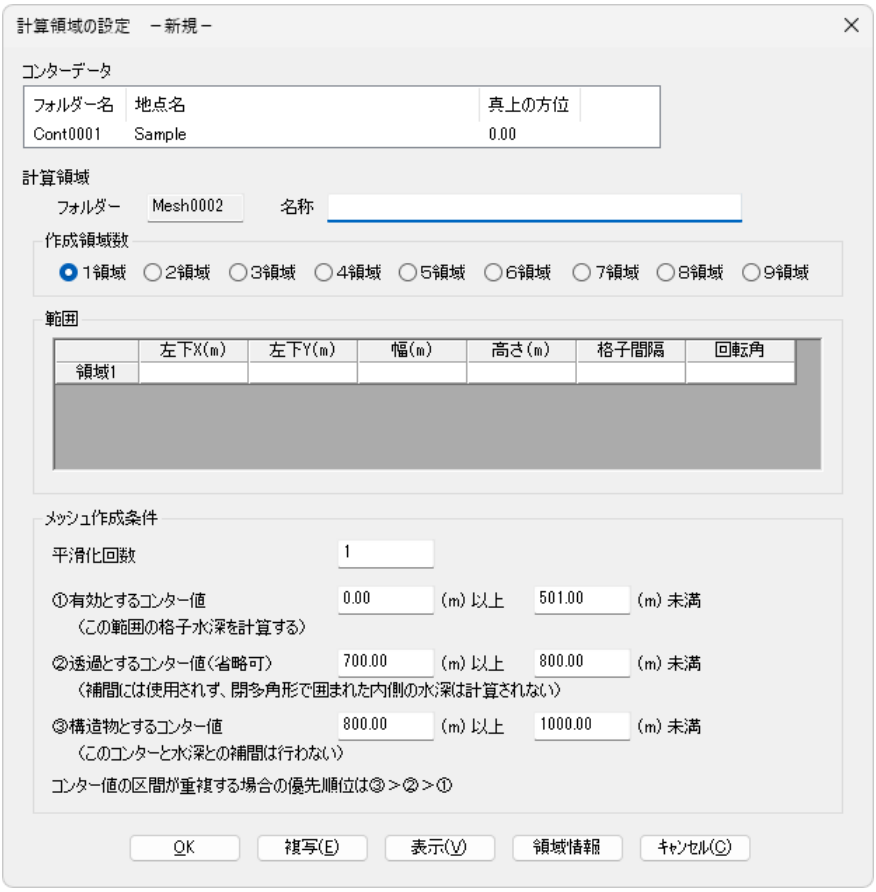
(1-1)　コンターデータ欄のファイルを反転して選択し、<新規(N)>をクリックします。



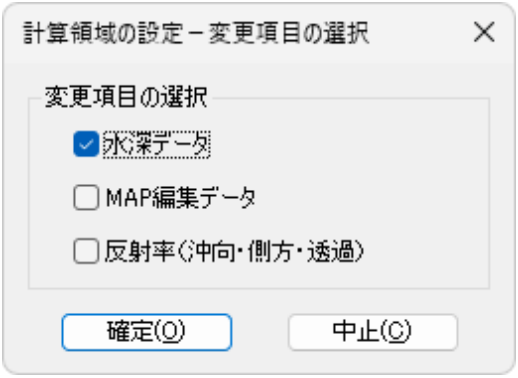
(注)　上記画面で<編集(E)>を選択した場合は、次の画面が表示されますので<OK>をクリックします。



(2)　「計算領域-名称」欄に“ファイル名”を入力し、＜表示(V)＞をクリックします。

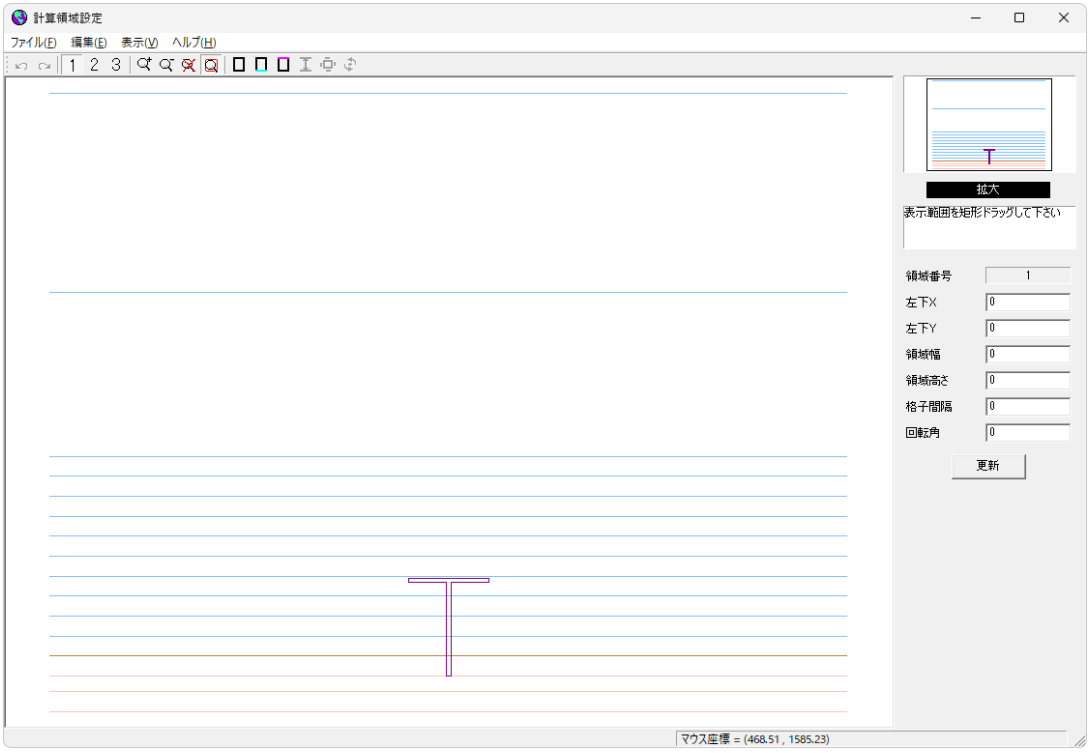


(注)　前掲の(1)の画面で＜編集(E)＞を選択し、“範囲”の内容を変更せずに＜OK＞をクリックした場合は、変更項目を選択する画面が表示されますので変更(更新)する項目にチェックを入れ、＜確定(O)＞をクリックします。



(2-1)　選択したコンター図(全域)が表示されます。

- 必要に応じて、領域設定がしやすいように対象領域を拡大表示します。
- 拡大表示：をクリック、または拡大する範囲の対角点をドラッグします。
- 縮小表示：をクリックします。
  ※マウスホイールを前後に動かす事でも拡大・縮小できます。



・　その他機能アイコン

 　・・・・元に戻す

 　・・・・やり直し

　・・・・領域 1

 　・・・・領域 2

 　・・・・領域 3

 　・・・・拡大

 　・・・・縮小

 　・・・・再設定

 　・・・・拡大

 　・・・・領域矩形設定

 　・・・・岸側境界設定

 　・・・・沖側境界設定

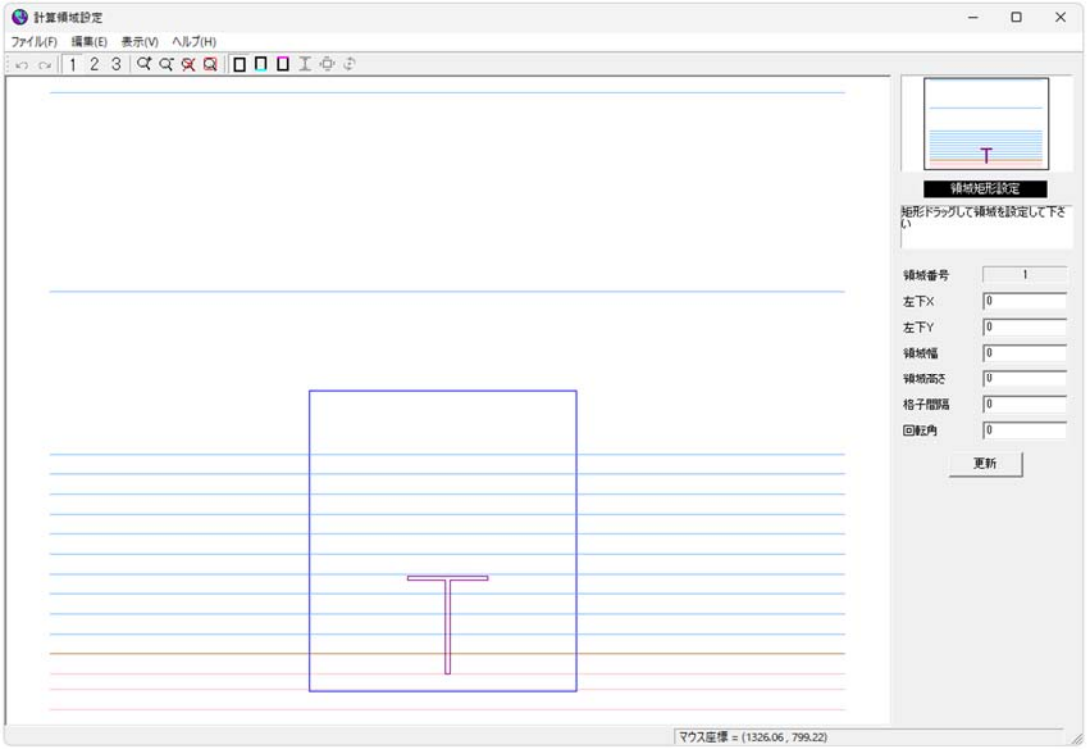
 　・・・・領域高さ指定

 　・・・・領域移動・変形

 　・・・・領域回転

(2-2)　領域の範囲を設定します。

＜ □ ＞を選択し、設定したい領域の対角点をドラッグ&ドロップします。

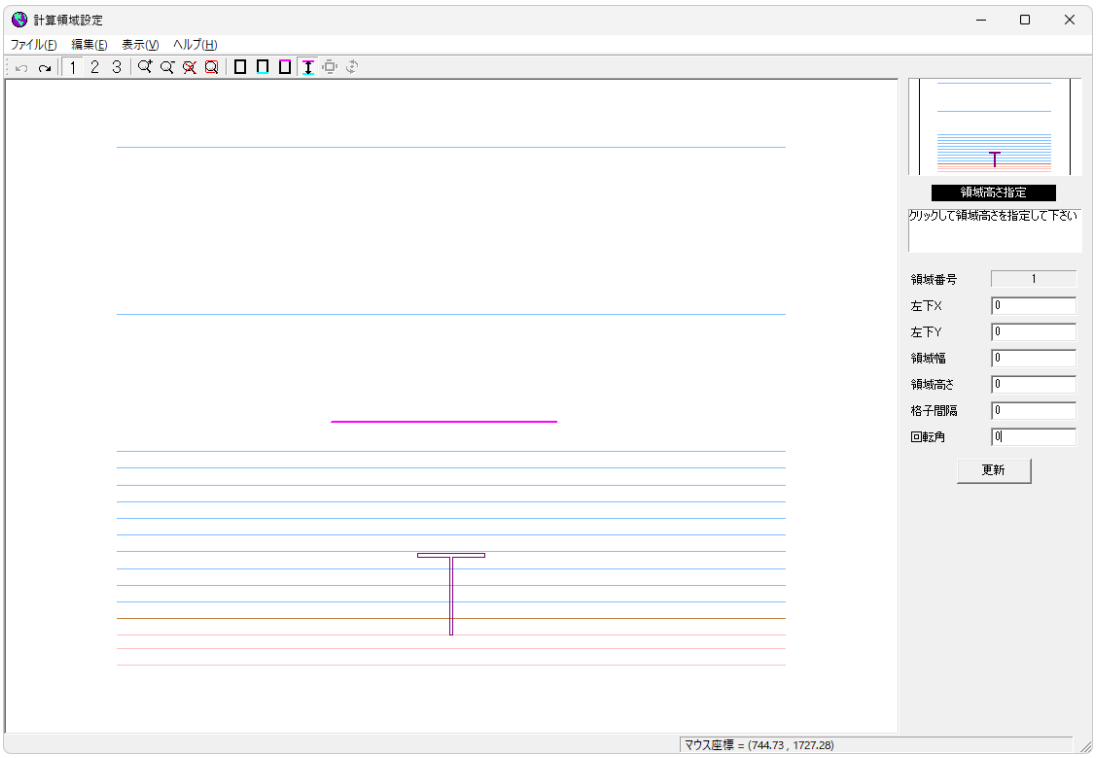


①　岸側境界を設定します。

＜ □ ＞を選択し、岸側となる境界をドラッグ&ドロップします。

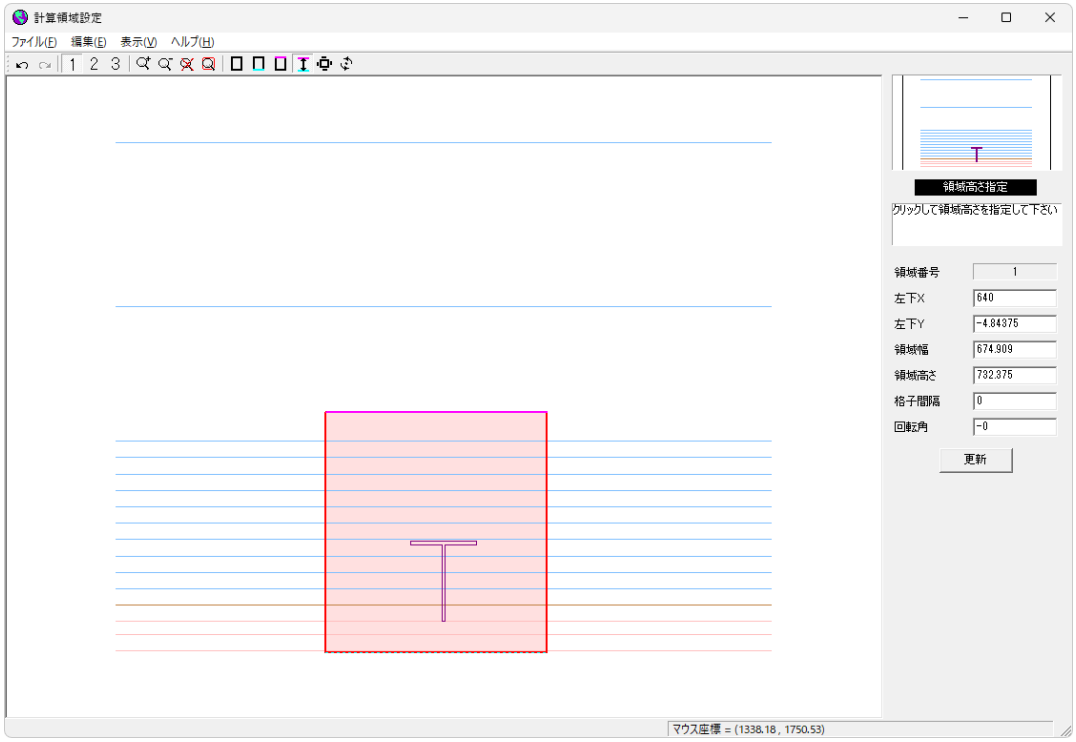
(2-3)　沖側境界を設定します。

＜ ＞を選択し、沖側となる境界をドラッグ&ドロップします。



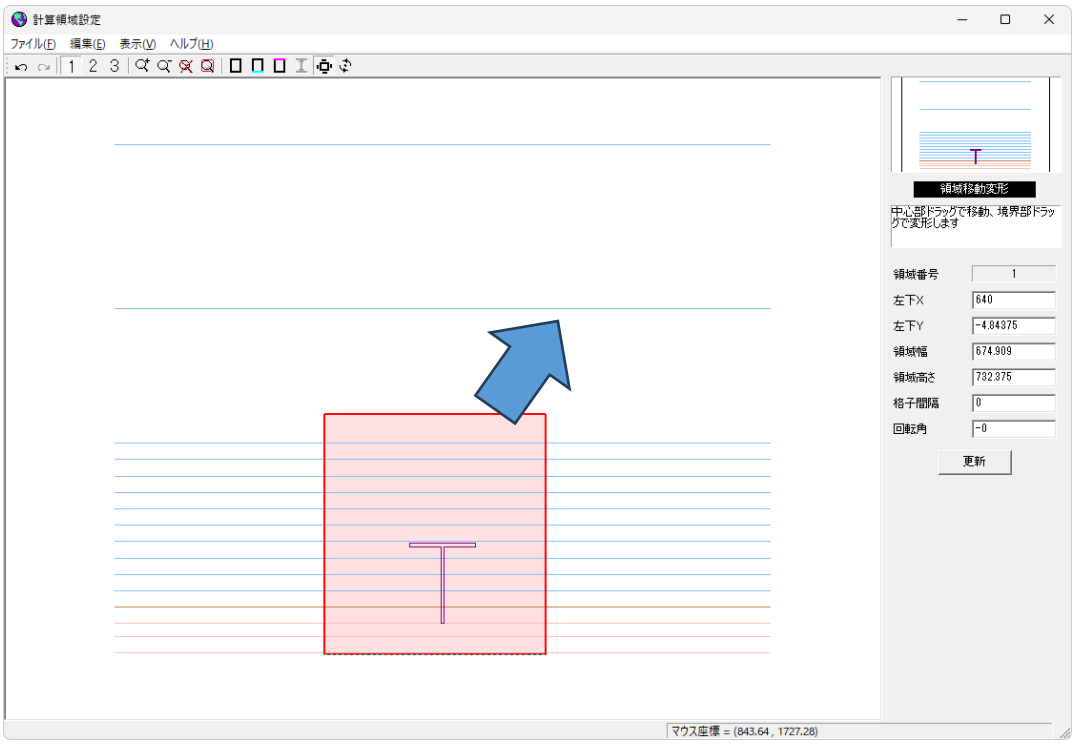
(2-4)　領域の高さを指定できます。

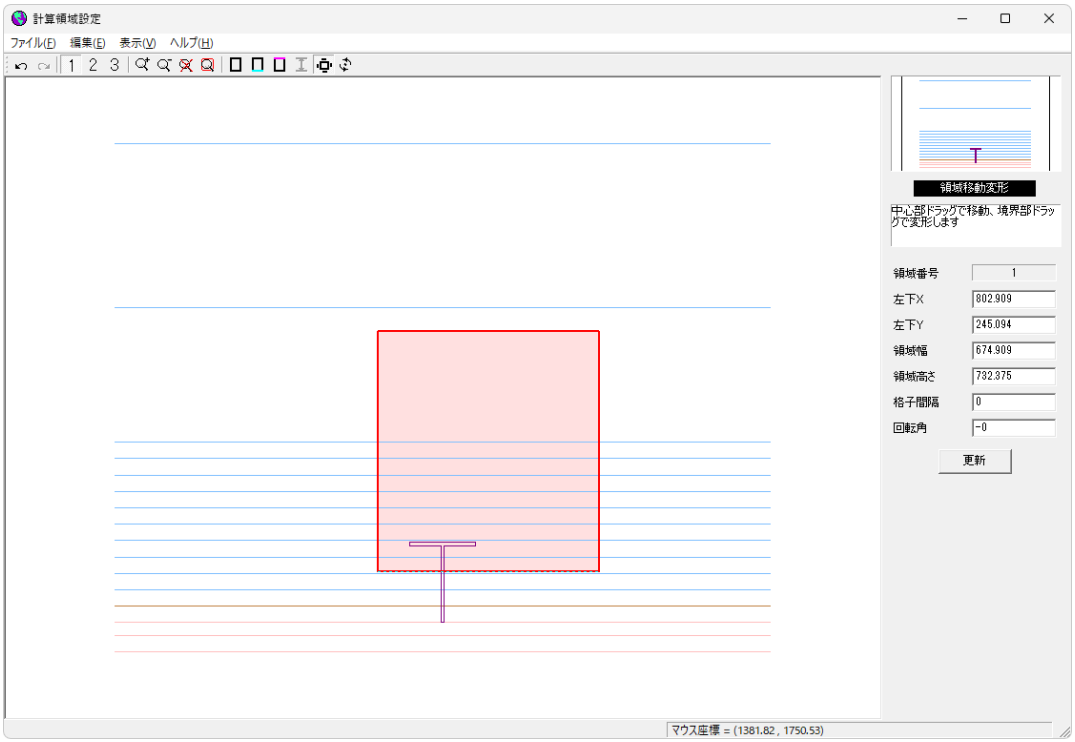
岸側境界または沖側境界を設定した後、＜ ＞を選択し、任意の高さの点をクリックします。



(2-5)　設定した領域を変えずに領域を移動できます。

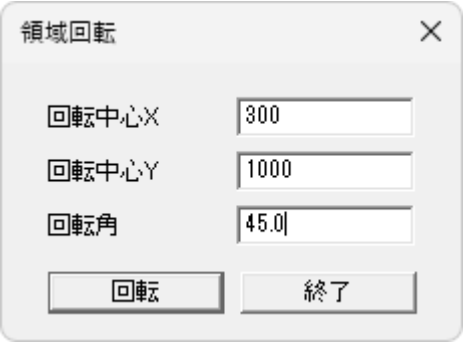
＜ ＞を選択し、領域内をドラッグ&ドロップします。



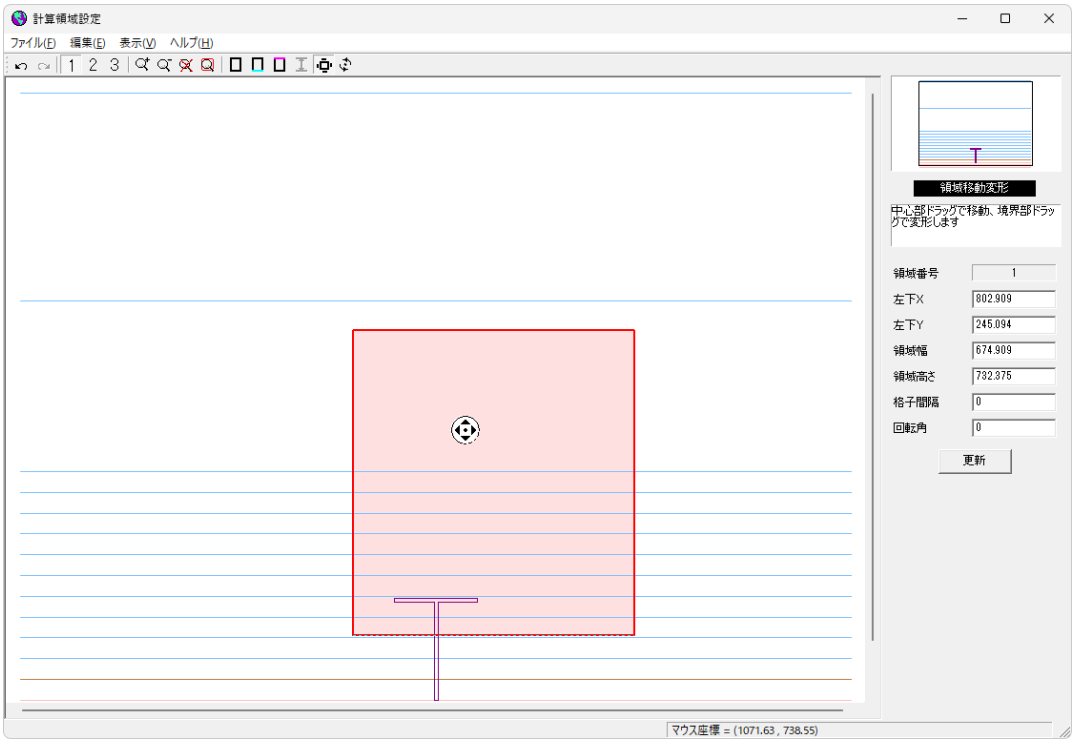


(2-6)　領域の回転ができます。

＜ ＞を選択し、回転中心 X の座標、回転中心 Y の座標、回転角を入力し、＜回転＞をクリックします。



(2-7)　マウスのホイールを押しながらマウスを移動させると、画面移動ができます。



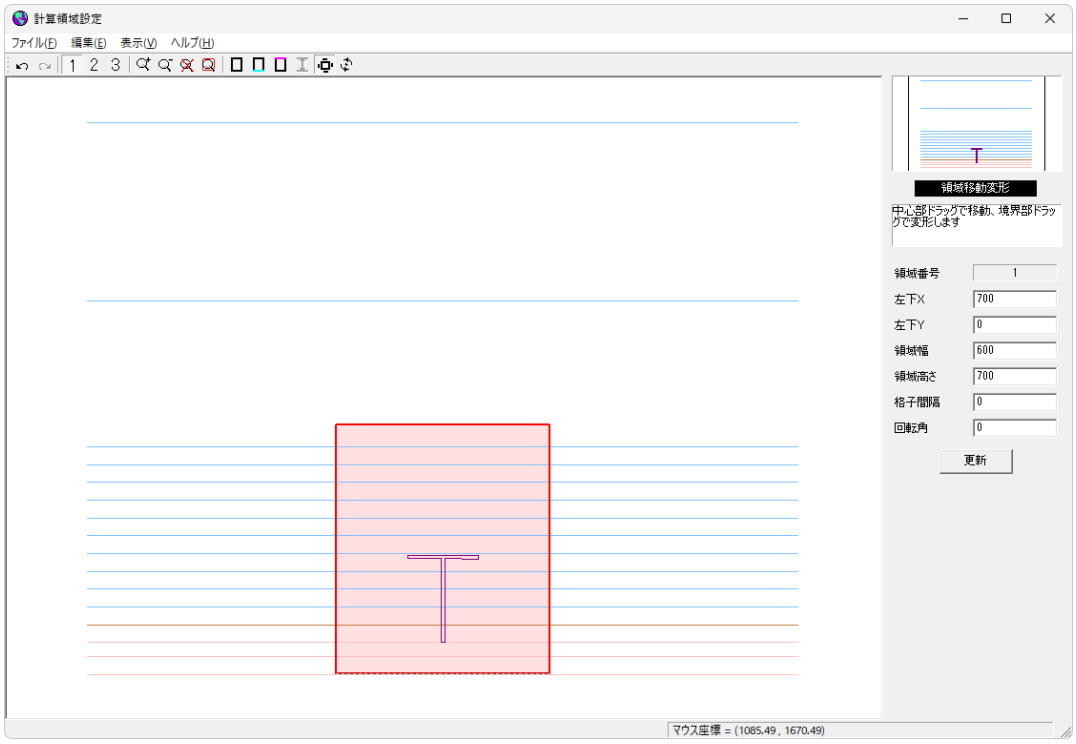
①　領域は 9 つまで設定できます。複数の領域は、後項(2-5)に示すネスト構造になります。

②　領域 1 から順次、広域側へと設定していきます。

(2-8)　計算領域設定の画面右に現在の設定値が表示されていますので、“左下 X” の座標、“左下 Y” の座標、“領域幅”、“領域高さ”、“格子間隔”、“回転角” を入力し、＜更新＞をクリックして設定する事もできます。

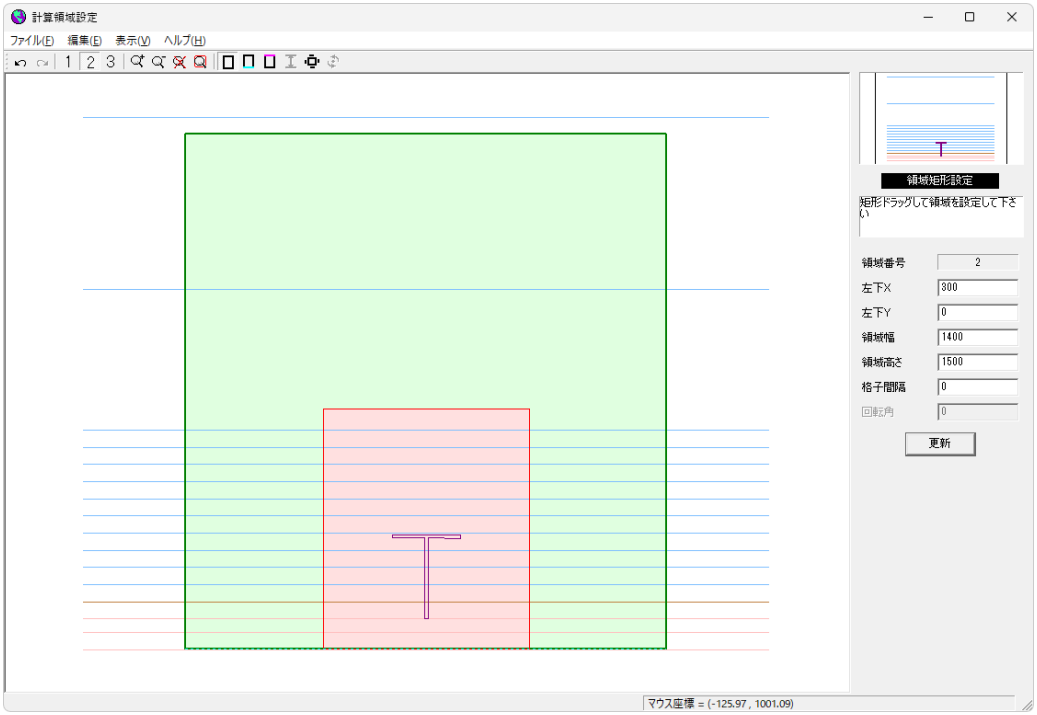
①　領域 1 の計算格子間隔は、検討の主体となる地点での波長との相対的関係(「海岸波動(土木学会編)」,P89 参照)、計算格子数の上限(3,001×3,001 格子)等を考慮して決めます。

②　設定した領域 1 の範囲は、設定画面上で赤色に塗り潰された矩形で表示されます。

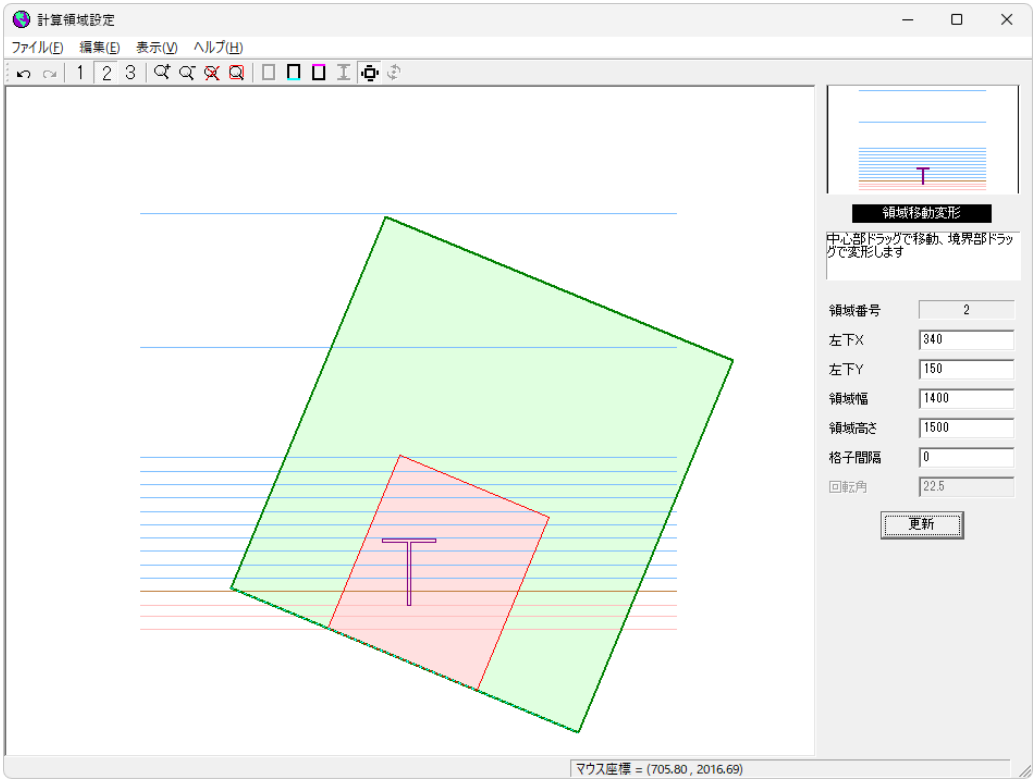


(2-9)　領域 2 の設定は、＜ 2 ＞を選択し、領域 1 の外側で設定したい領域の対角点をドラッグ&ドロップします。

①　設定した領域 2 の範囲は、設定画面上で緑色に塗り潰した矩形で表示されます。

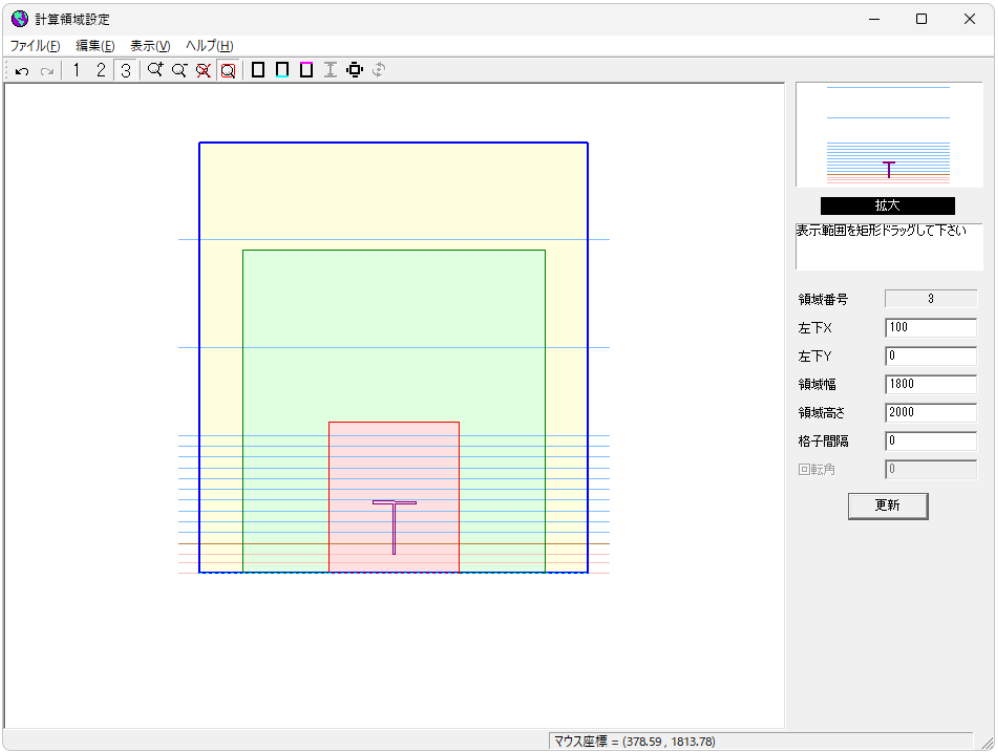


②　領域 1 で計算軸を回転した場合、領域 1 で設定した計算軸で表示されます。

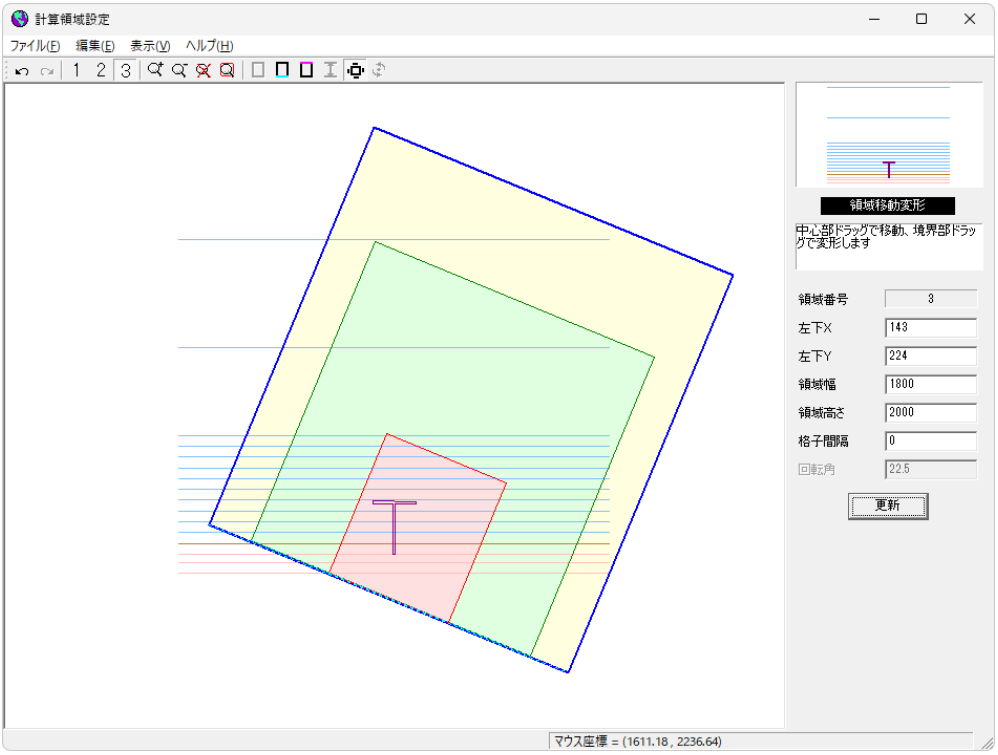


(2-10) 領域 3 以上の設定は、前項(2-4)と同様の手順で操作します。

① 設定した領域 3 の範囲は設定画面上で黄色に塗りつぶした矩形で表示されます。

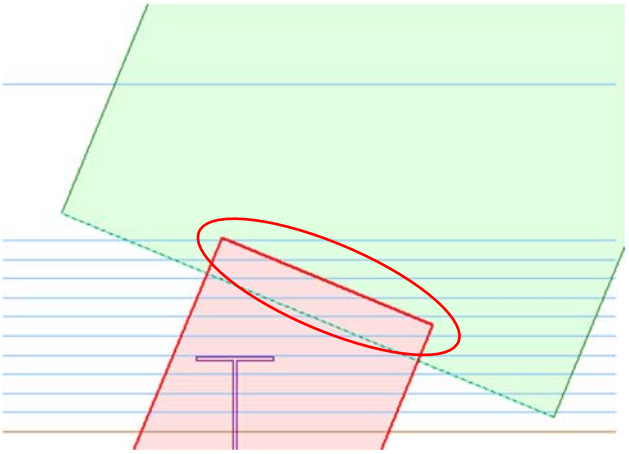


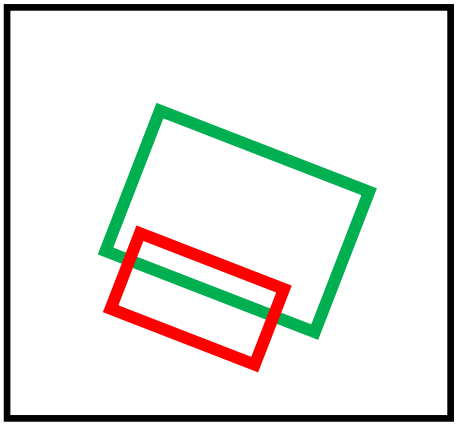
② 領域 1 で計算軸を回転した場合



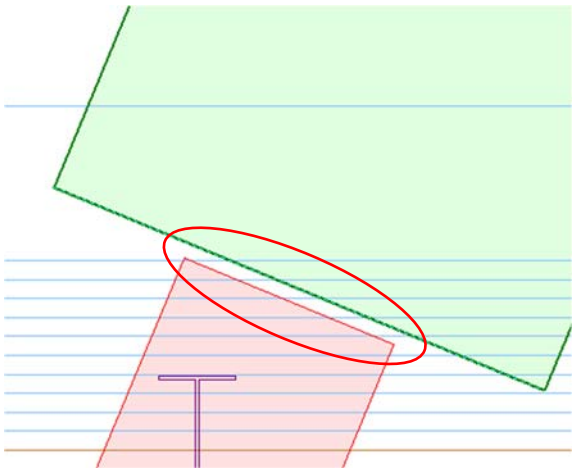
注）領域 2 の岸側境界の内側の格子点が、領域 1 の沖側境界の内側の格子点に全て入るように設定します。
例として、右図に領域 1 の外側格子を橙、内側格子を赤で示し、領域 2 の外側格子を青、内側格子を緑で示しました。

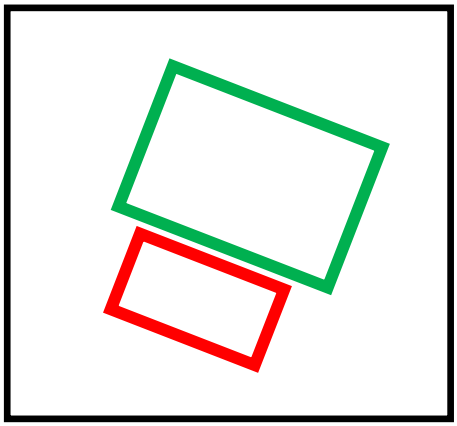
（ア）　領域 2 の岸側境界の内側の格子点（緑）が、領域 1 の沖側境界の内側の格子点（赤）に入っているので、正常に領域を作成する事ができます。



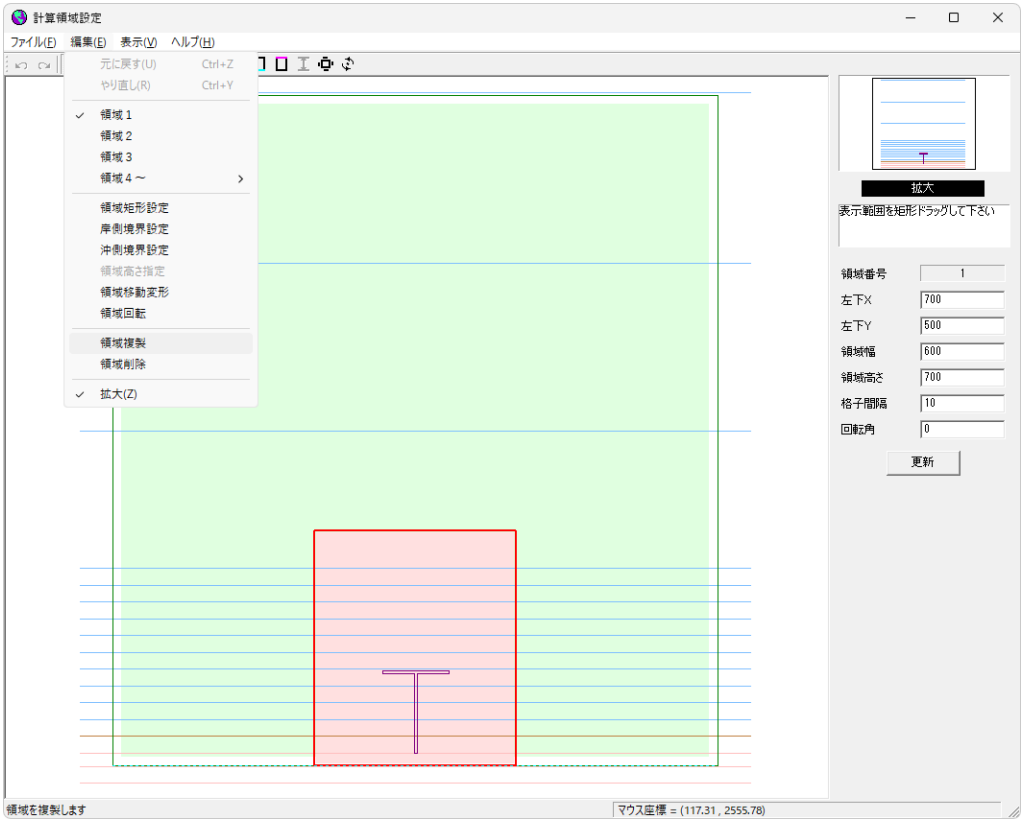


（イ）　領域 2 の岸側境界の内側の格子点（緑）が、領域 1 の沖側境界の外側の格子点（橙）に全て入っているのですが、内側の格子点（赤）は全て入っていないため、正常に領域を作成する事ができません。





(2-11) 複製したい領域を選択し、[編集(E)]-[領域複製]を選択すると、領域の複製ができます。



(2-12) 前項の画面を閉じると計算領域設定画面が表示されます。
前項の操作で設定した領域の X 座標(始点)、Y 座標(始点)、領域幅、領域高さ、格子間隔、回転角が表示されます。

① この画面で“範囲”と“メッシュ作成条件”の確認または変更を行った上で<OK>をクリックします。“メッシュ作成条件”の詳細については次項で解説しますが、領域設定に不具合があると<OK>をクリックした段階で、以降に示しますメッセージが表示されます。

② 格子数の上限値を超えた範囲(または格子間隔)を設定した場合

③ 領域 1 の沖側境界が領域 2 の中にない設定をした場合

(2-13) “メッシュ作成条件”欄の各設定値は、本来、コンターデータを作成する段階で必要な知識です。以下にその属性を持つコンターの性質と、格子水深に及ぼす結果について概述します。

① “有効とするコンター値”

- 等深線の水深値を与える範囲を設定します。
- 水深値は、海域を(+)符号、陸域を(-)符号で与えます。
  ※陸域の値は、(-9)まで設定可能です。(-10)以上の値は無視されます。
- デフォルト値は、“0.00m 以上　501.00m 未満”になっています。
- 水深 500m は、周期 T=18sec の波の波長(Lo=505.4m)に相当していますので、一般的な異常時波浪の解析を行う場合では、十分な沖波水深と言えます。
- 水深の範囲を再設定される場合は、他のコンター値との整合を図ってください。

② “透過とするコンター値”

- やや沖合に配置されている構造物、例えば沖防波堤や離岸堤を設定する場合に、平面形状を閉多角形のコンター線で表し、その水深をここで指定する範囲内の値とします。
- 格子水深の計算では、このコンター内の格子水深値は陸域を表す“-999”とします。
- 但し、このコンターは、①で与えたコンター値を用いて格子水深を計算する際に影響を及ぼしません。即ち、格子水深を計算する際には、参照されないコンターになり、この点が次に示す③のコンター値と異なる点です。

③ “構造物とするコンター値”

- 一般には水際線付近に在る構造物(防波堤、護岸、係船岸など)を設定する際に、ここで設定する範囲のコンター値を用います。
- このコンターは、②のコンターと異なり格子水深値を計算する際に参照されますので、この構造物の近傍における水深値が陸域の値として設定されることが、しばしば生じます。
- このように本来海域である格子点の水深が陸域の水深値として設定されてしまった場合には、[編集]-[水深データの編集]機能を使って、1 つ 1 つ水深値を修正する方法もありますが、このような結果を回避するために②のコンター値で構造物を表し、ダミーのコンター線を挿入(計算用コンターファイルのみに挿入)する等のテクニックを使います。
- この辺りの手法については、ヘルプ(“コンター→格子水深”の項)を参照してください。

なお、2 種のコンター値の設定範囲が重複し、重複した範囲の値がコンター値として用いられている場合の優先順位は、③,②,①の順になります。

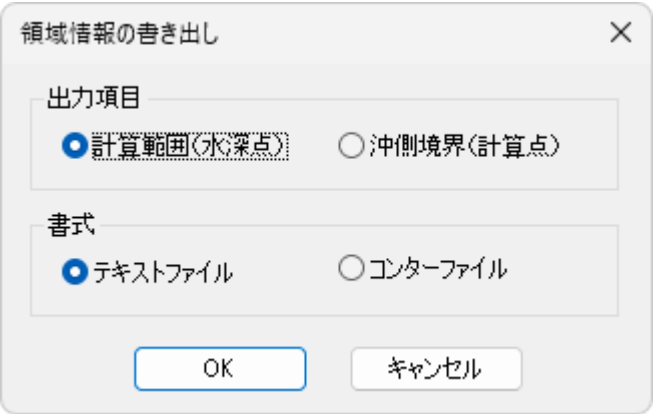
ここで、コンター値と印刷出力(線種と線の太さ)との関係を解説しておきます。下表に示す通り“0”、“888”、“999”のコンター値を除き、コンター線は“細い実線”で描画されます。前項に示すコンター値の持つ属性と併せて活用してください。

コンター値	線種	線の太さ	摘　　要
0	実線	太線	汀線
888	点線	太線	消波堤など
999	実線	太線	防波堤、埋立地など
その他	実線	細線	一般の等深線

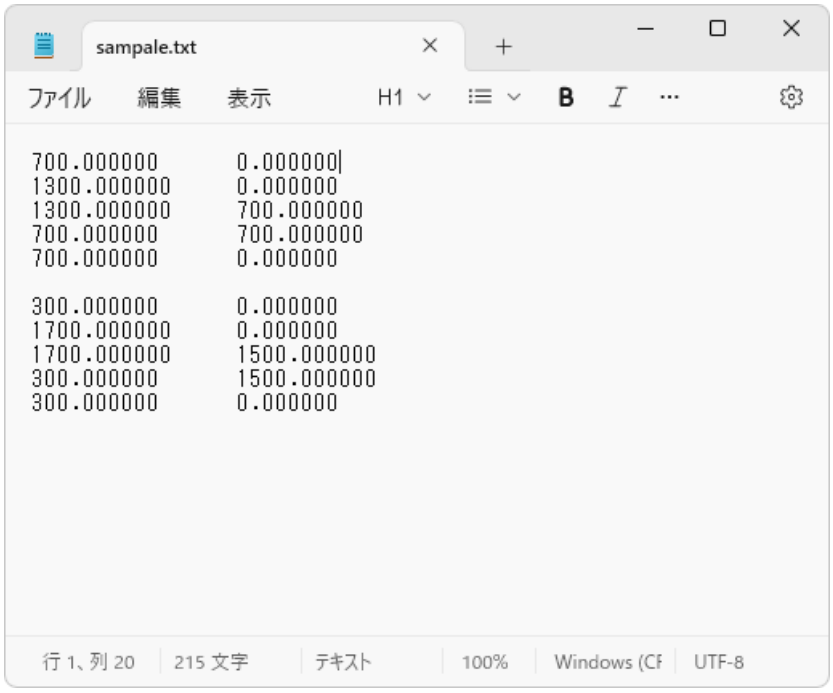
(3)　＜領域情報＞をクリックすると、計算範囲(水深点)及び沖側境界(計算点)について“テキストファイル書式”または“コンターファイル書式”で書き出す事ができます。

①　出力項目　　計算範囲(水深点) または 沖側境界(計算点)を選択します。

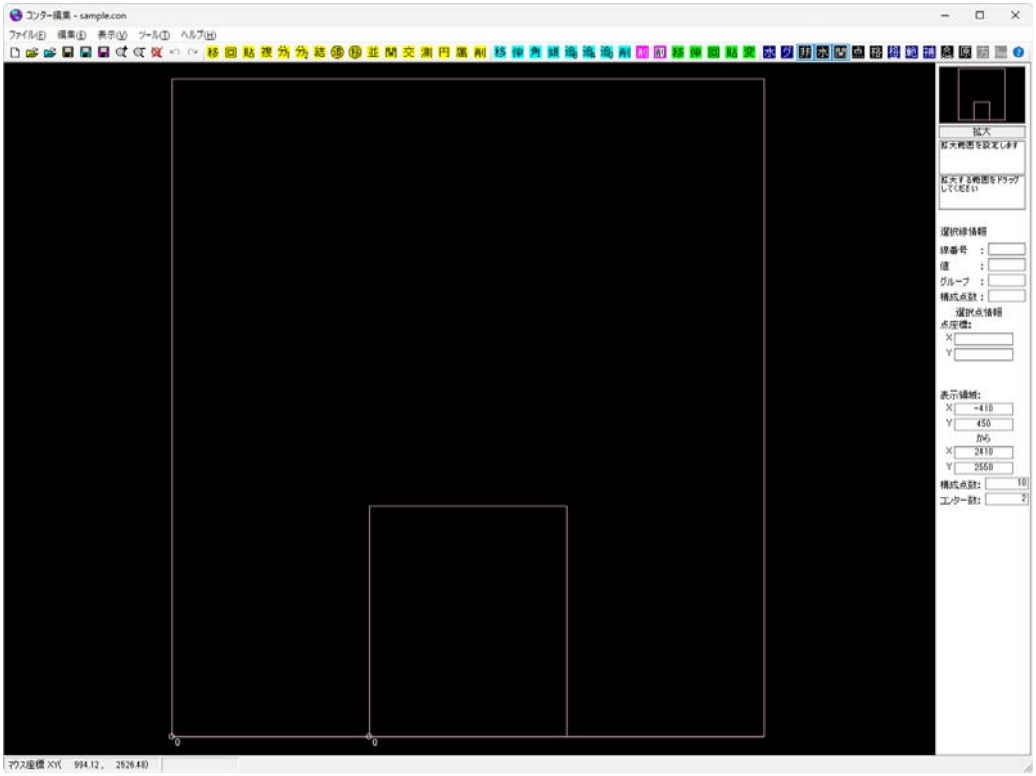
②　書式　　テキストファイル または コンターファイルを選択します。



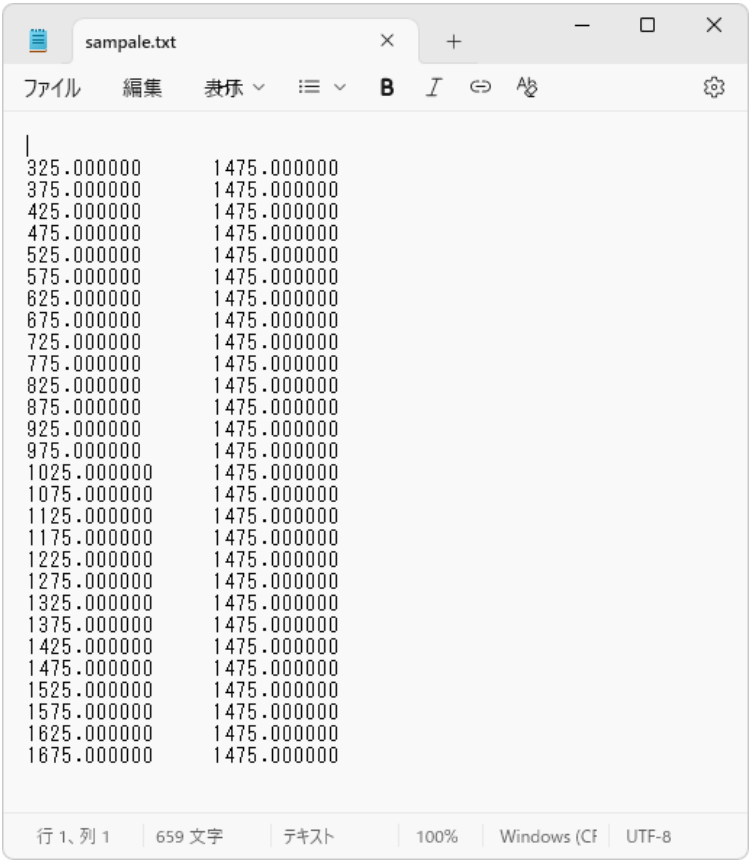
（ア）　出力項目：計算範囲、書式：テキストファイル



（イ）　出力項目：計算範囲、書式：コンターファイル



（ウ）　出力項目：沖側境界、書式：テキストファイル

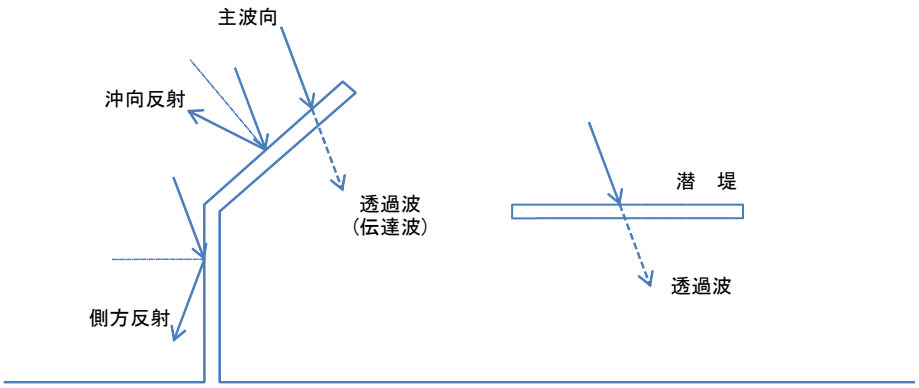


（エ）　出力項目：沖側境界、書式：コンターファイル

2-4-2. 反射率等（R）

反射率等の設定操作を解説する前に、用語の意味と性質について記述しておきます。

このプログラムでは、防波堤等の構造物による反射波や伝達波を解析することができます。勿論ここで反射率を設定しなければ、従来モデルと同様に進行波のみを解析します。反射波は、「沖向反射」と「側方反射」の 2 種があり、波の入射方向と構造物(反射面)の相対的位置関係で使い分けます。



沖向反射：主波向の反射波(反射面に対して幾何学的な反射)の方向が沖方向を向く場合

側方反射：主波向の反射波の方向が岸方向を向く場合

(注) 使用する条件に依っては、どちらとも判断がつかない場合も想定されます。
この様な場合は、試行的に適切な条件を設定してください。

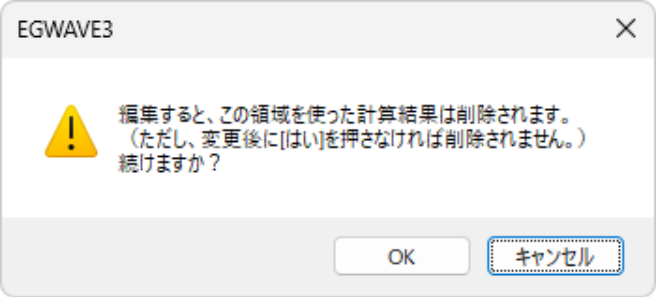
沖向反射波と設定した場合と側方反射と設定した場合では、結果の出力に関し相違点があります。

沖向反射波とした場合は、進行波のみの出力、反射波のみの出力、合成波の出力の 3 通りを選択できます。しかし、側方反射波とした場合には、反射波を分離することが出来ず、進行波と反射波が合成された波としてのみ出力されます。

(1)　[設定(S)]- [反射率等(R)]を選択します。

(2)　コンターデータ、計算領域、領域範囲をそれぞれ選択します。設定項目から沖向反射率、側方反射率、透過率の何れか１つ、表示コンターから計算用、表示用の何れかを選択し、＜設定(S)＞をクリックします。

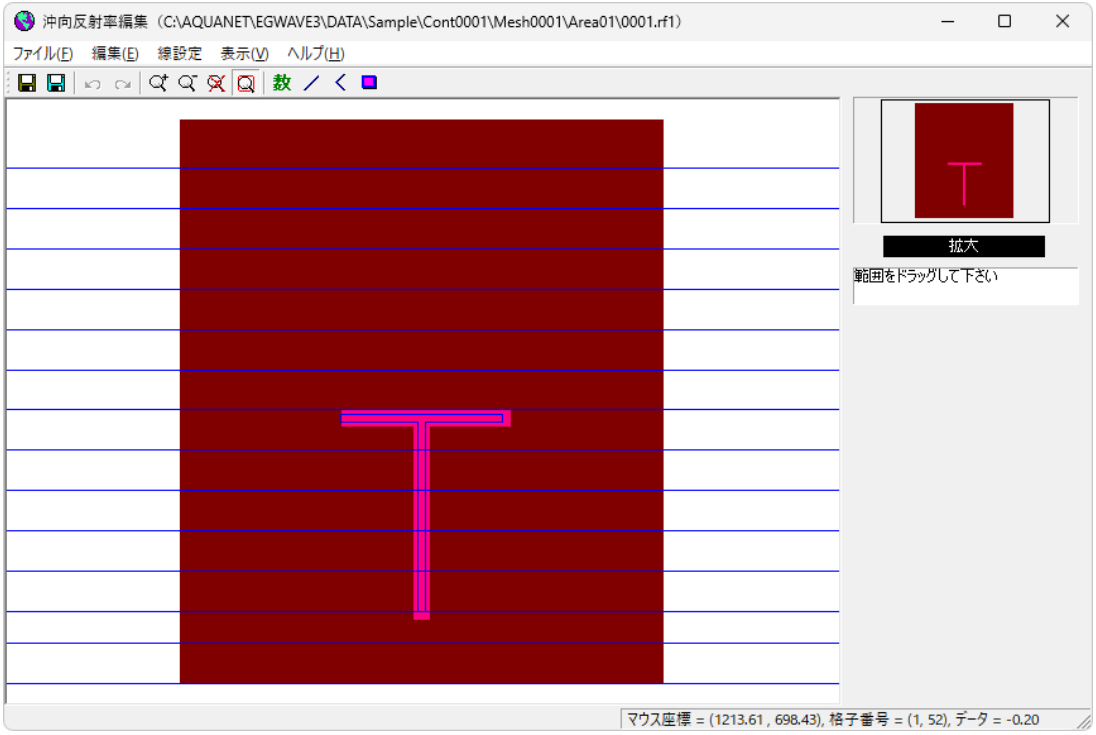
① この計算領域を使用して計算した結果がある場合には、既計算結果の削除の確認画面が表示されます。



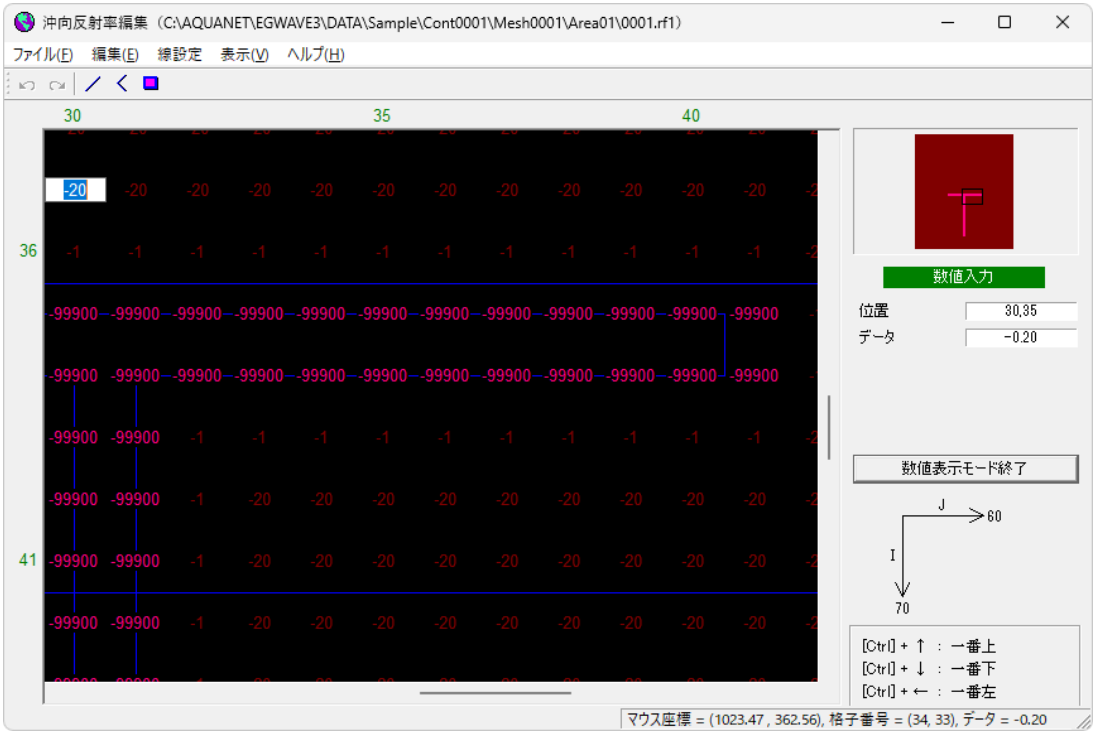
② 反射率編集画面が表示されます。

・ 反射率編集では、反射率をある一定のランクに色分けして表示します。この画面では、反射率の値と表示色の指定を行います。表示色は、色のボックスをクリックするとカラーパレットが表示され、そこで色の指定をします

(3)　＜表示＞をクリックしますと、透過・反射率の編集画面が表示されます。反射率、透過率が未設定である場合には、設定可の領域と設定不可の領域の 2 色で表示されます。



(4)　反射率または透過率を設定したい箇所をクリックしますと、次の画面が表示されます。但し、設定可の領域にしか設定はできません。



①　反射率は、“-1”と表示されている構造物近傍に設定できます。
透過率は、“-20”と表示されている海域に設定してください。

②　画面の右上で反射率または透過率の値を入力します。

③　設定したい箇所をドラッグ&ドロップしますと、②で設定した値に置き替わります。
この操作を繰り返して、所定箇所全てについて設定します。

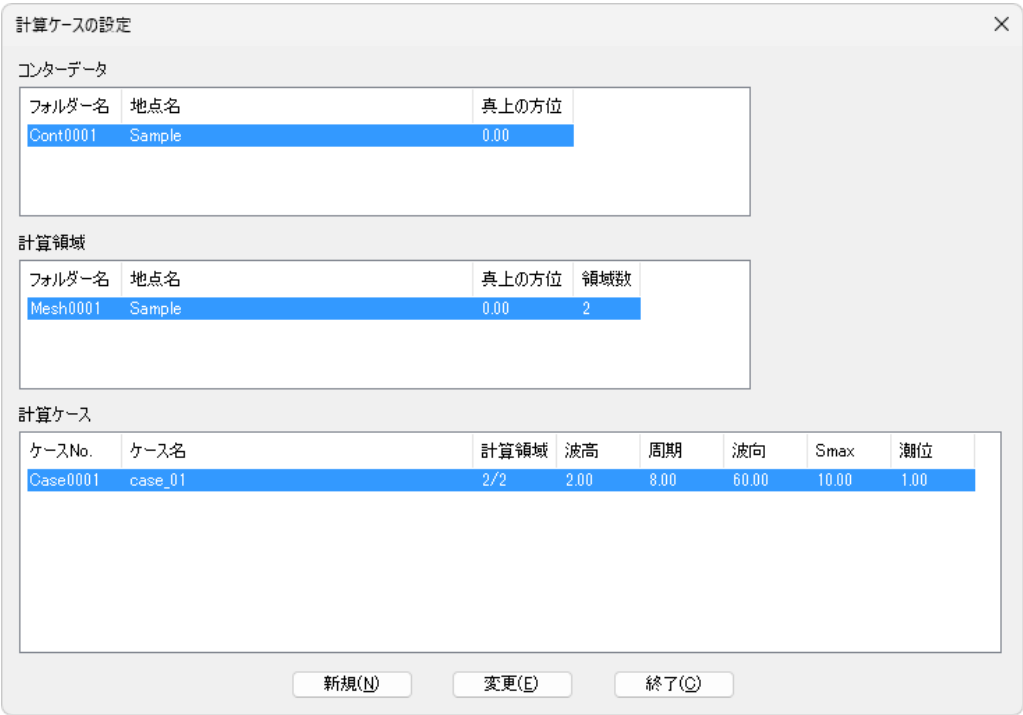
(5)　他の反射率または透過率を設定する場合は、(1)の画面からの操作を繰り返し行います。

(6)　(最後に、(2)の画面により各設定値を確認することを、お奨めします。)

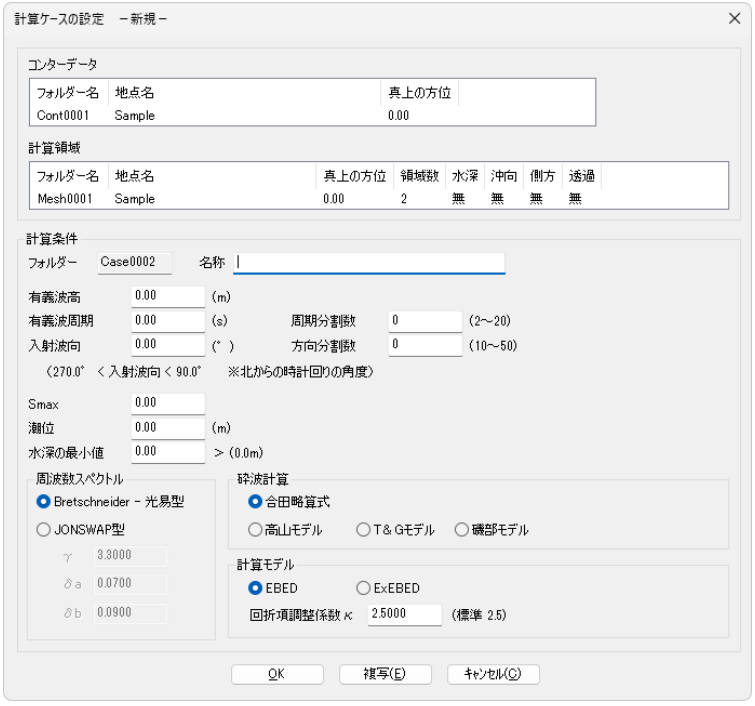
2-4-3. 計算ケース（S）

(1) [設定(S)]-[計算ケース(S)]を選択します。

- この画面で、対象とするコンターデータと計算領域を選択します。計算ケースの欄は、このフォルダ内の条件で初めて計算する場合には空欄になっています。
- 計算ケースの新規作成と、既存ファイルを変更する操作は、基本的に同じになりますので、以降では新規に作成する手順について解説します。



(1-1)　＜新規(N)＞をクリックしますと、次の画面が表示されます。



・ コンターデータ欄と計算領域欄は、前項の画面で選択したファイル名が表示されます。

・ 計算領域欄右側に表示されている項目は、計算領域と反射率の設定内容を表示しています。

(1-2)　計算条件の主な内容について解説します。

①　「有義波高」、「有義波周期」、「入射波向」は、設定した計算領域の最も沖側に入射する波の諸元です。通常は、深海域から浅海域にかけての波の変形解析をしますので、この場合はそれぞれが沖波諸元にあたります。

②　「入射波向」は、主波向の方位 N から時計回りに測った角度で与えます。既述の通り、深海域⇒浅海域に進行する波として解析しますので、計算格子軸の方向と入射波向の関係、及び Smax と成分波エネルギーを考慮して適切に設定してください(Smax の項参照)。

(注)「入射波向」の入力欄の下に入射波向として採り得る範囲が表示されます。例示画面では、計算領域の真上(沖側)の方位が“0.00”(=N0°)ですので、物理的(計算上エラーが発生しない)に N270.0°から時計回りに N90.0°の範囲と表示されます。但し、この範囲内の全ての入射角度が適切であるか否かは、上記解説を考慮のうえ判断してください。

③　成分周期と成分波向の分割数は、所定の範囲内で任意に設定できます。一般には、周期分割数=10、波向分割数=36 程度で十分な精度で解析が行えます。

④　「Smax」(方向集中度パラメーター)の値は、10、25、75 の 3 種を基本とし、以下のような波の性質を持ちます。

・ S_{max}=10：風波

・ S_{max}=25：減衰距離の短いうねり（波形勾配(H/L)が比較的大きい波）

・ S_{max}=75：減衰距離の長いうねり（波形勾配(H/L)が比較的小さい波）

S_{max} の推定法や波の特性については、参考書等を参照してください。

(例：合田著「港湾構造物の耐波設計」P21～27)

⑤　「潮位」は、コンターデータが使用している基準面からの高さ(+符号)として与えます。

⑥　「水深の最小値」は、解析の対象とする水深の下限値を与えます。

この場合の水深値は、潮位を加えた値になります。

(1-3)　周波数スペクトルの分布型は、次の 2 種から選択できます。

①　「Bretschneider-光易型」

・ 日本の各種基準では、この分布型を使用することを標準としています。

・ この分布型は、実測波形記録を基に波高や波長の分布、波高と周期の結合分布などから分布式を導き、光易が原式の係数を補正したもので、十分に発達した波浪に適合性が良いとされています。

②　「JONSWAP 型」

・ JOint North Sea WAve Project の略で、北海における国際共同の大規模な波浪観測データを基に分布型が導かれたものです。

・ 分布型としてエネルギー集中度が高いのが特徴で、発達初期の波がこの分布型に近い傾向にあるとされています。

(1-4)　砕波計算は、次の 4 種のモデルから選択できます。

①　「合田略算式」

・ 「港湾技術基準」では、砕波波高の算定を“砕波帯内の有義波高の算定図”またはこの略算式により推定することを基本としています。

・ この略算式は、上記算定図を 3 種の直線または曲線で近似したもので、同基準では算定図に替えて適用しても良いと記述されています。

・ 略算式の詳細については、「港湾技術基準」を参照してください。

・ この砕波モデルの適用では、波の浅海変形を非砕波として解き、この浅海波を用いて砕波波高を求めていきますので、換算沖波波高の値も推算することができます。

・ この解析を行った後に改めて(設計)有義波高を算出する、或いは越波流量を計算する等の場合には、このモデルを適用します。

② 「高山モデル」

- 高山ら(1991 年)が定式化したエネルギー減衰項と、合田(1975 年)の砕波指標を組み合わせたモデルです。
- 合田の砕波指標は、規則波(成分波)の砕波限界波高を推定する曲線で、前掲の基準以外にも「漁港基準」、「築造基準(旧称)」で砕波条件の推定法として取り扱われている手法です。

③ 「T&G モデル」

- Thornton Guza が提唱したモデルです。
- このモデルの詳細については、海岸工学関係の専門図書または論文を参照してください。

④ 「磯部モデル」

- 磯部ら（1997 年）が提唱したモデルです。

(1-5) 計算モデルは、「EBED」と「ExEBED」の 2 種を使い分けることができます。それぞれ、計算モデルの略称を表すもので、正式な名称は§1-3-1 を参照してください。両モデルの主な特徴、相違点は、次の通りです。

- 「ExEBED」モデルは、回折項をより高次までを対象に解析します(詳細については§1-1 に掲げた 3 番目の文献を参照してください)。
- しかし、実務レベルでは、両モデルから得られる結果に著しい差異は生じません。強いて挙げるとすれば、防波堤背後のような回折変形が大きい地点での波高に多少の差異が生じます。
- 計算に要する時間は、「EBED」が格段に短く済みます。

なお、“回折項調整係数”の詳細については、既述の文献を参照してください。

2-5. 計算（C）

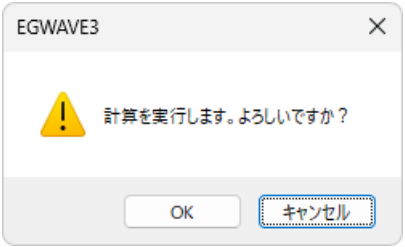
2-5-1. 計算実行(C)

(1) [計算(C)]-[計算実行(C)]を選択します。

(2) 計算条件とする各フォルダ名、計算ケース名を選択し、<追加(A)>をクリックすると、選択リストに追加され、<実行(R)>をクリックすると、計算が実行されます。

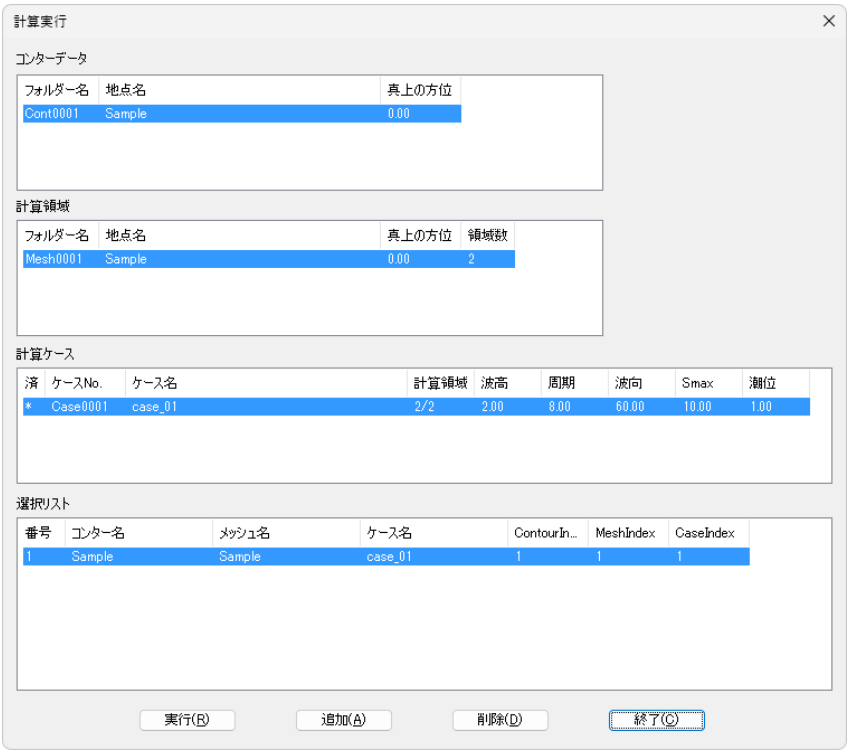
(2-1) 複数ケースを同時選択する場合は[Ctrl]または[Shift]キーを押しながら選択します。

(2-2)　実行確認のメッセージが表示されましたら、<OK>をクリックします。



(2-3)　計算実行中は以下のメッセージが表示されます。計算終了のメッセージが表示されましたら<OK>をクリックします。

(2-4)　計算が終了しますと、以下の様な計算終了ダイアログと計算ケース名に“＊”の印が入ります。

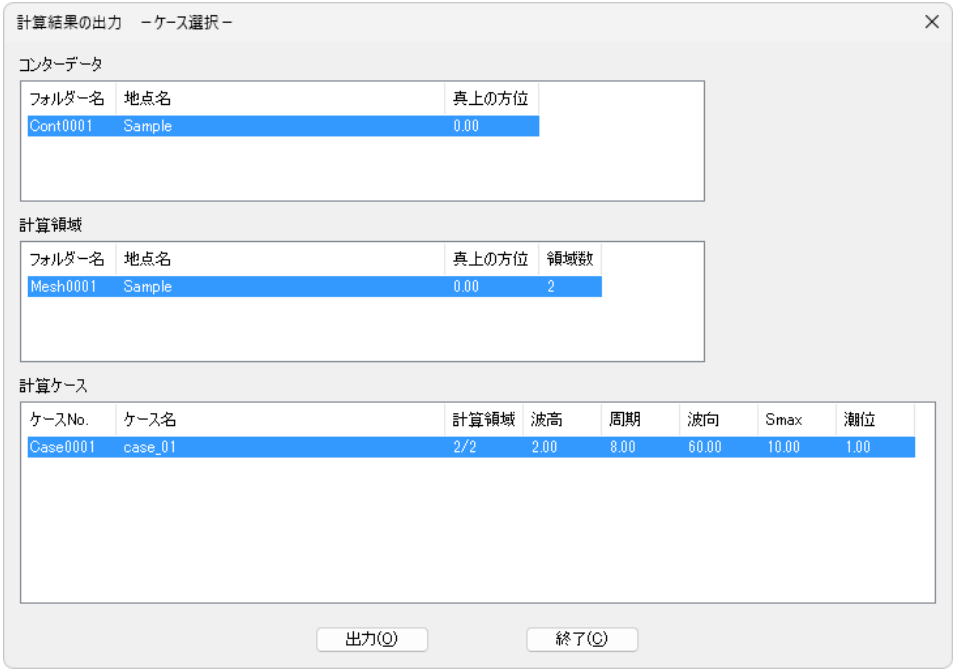


2-6. 出力（O）

2-6-1. 計算結果（R）

(1) [出力(O)]-[計算結果(R)]を選択します。

計算条件とした各フォルダ名、計算ケース名を選択し、＜出力(O)＞をクリックします。



(2)　出力の要領を設定します。

作図領域　　：出力する領域番号が表示されます。複数領域を作成した合は計算領域毎にレイアウトを設定してください。
計算領域の切り替えは、岸側領域-沖側領域をクリックして切り替えます。

コンターデータ　　：選択されているコンターデータのファイル番号、地点名、真上の方位が表示されます

計算領域　　：選択されている計算領域のファイル番号、名称、真上の方位、作成領域数、反射率等の設定の有無が表示されます。

レイアウト番号　　：同一の出力ケースで異なったレイアウト設定をする場合は、No.1、No.2、No.3、新規作成・・・と複数のレイアウトを登録することができます。

図の種類　　：出力する図を選択します（複数選択する事も出来ます）。
水深分布の単位は m・10cm どちらかを選択出来ます。
波高比分布は、有義波高比・水深換算沖波波高比のどちらを出力するか選択出来ます。
※砕波モデルに合田略算式以外を設定した場合、水深換算沖波波高比、換算沖波波高、Kr･Kd、砕波係数は選択出来ません。

波の種類　　：2-4-2 反射率等の設定で、反射率を設定した場合は、反射波、合成波が選択出来ます。

※反射率の設定の有無に応じて、出力可能な“波の種類”が異なります。

	反射・透過の設定条件			出力する”波の種類”の選択肢
	沖向反射	側方反射	透過波	
1	無	無	無又は有	○入射波
2	有	無	無又は有	○入射波　，　○沖向反射波　，　○合成波
3	無	有	無又は有	○入射波＋側方反射波の合成波
4	有	有	無又は有	○入射波＋側方反射波の合成波 ○沖向反射波 ○入射波＋側方反射波＋沖向反射波の合成波

用紙サイズ　　：出力する用紙サイズと方向を選択します。ここでサイズを選択する作図スケールが計算されます。

図題の位置　　：図題の位置を 5 種(なし、左上、右上、左下、右下)から選択します。地点名称、計算ケース、計算条件、方位、スケールがその内容になります。

出力格子範囲　　：出力する範囲を格子数で指定します。デフォルトでは、計算領域全域の格子範囲が表示されます。

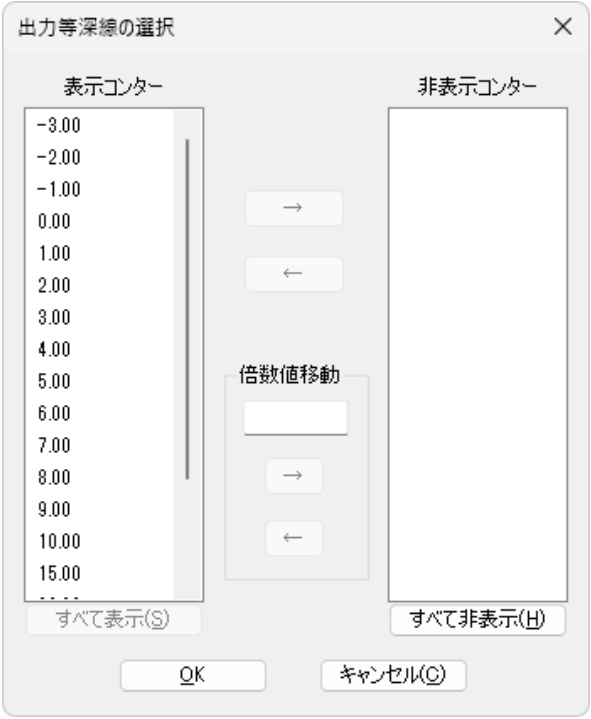
出力格子間隔　　：出力する格子間隔を指定します。デフォルトでは、X，Y とも 1 格子毎になっています。出力用紙、出力格子範囲と併せて適正値を設定します。

スケール　　：作図スケールを指定します。用紙サイズを選択したときに、右側に表示されるスケールを目安にしてください。

スケールバー　　：図題に表示されるスケールバーの長さ、分割数を指定します。

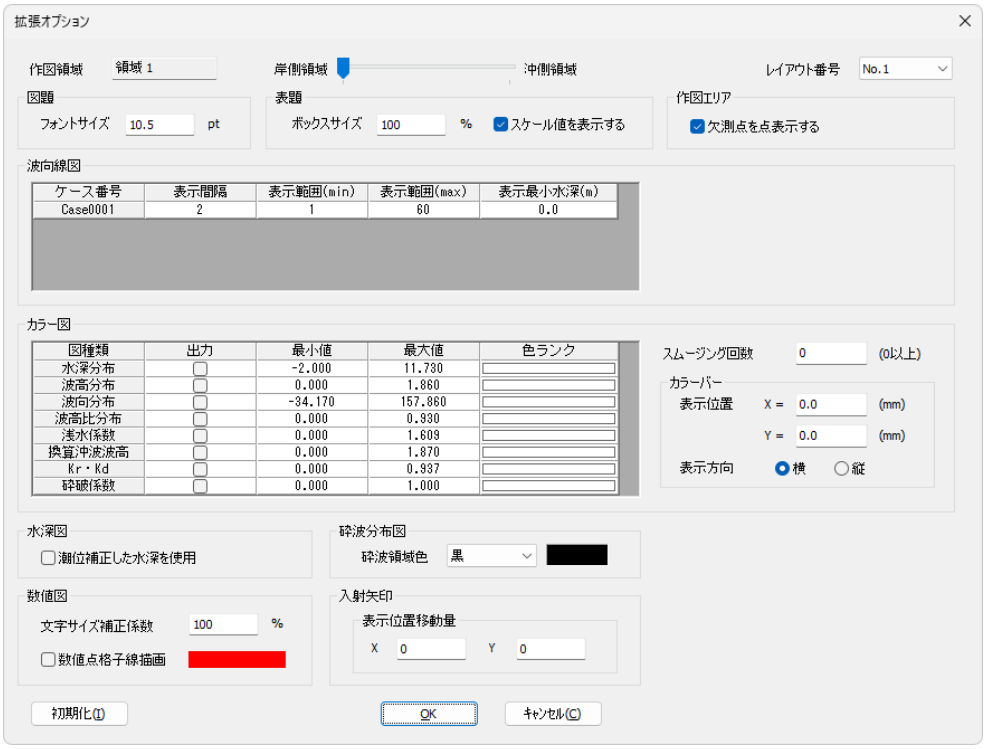
図面内移動量　　：選択した用紙サイズ内での作図位置の移動量を指定します。

出力等深線の選択　：出力する等深線の値を選択します。このボタンをクリックすると次の画面が表示されます。



・表示コンター欄に表示されている値のコンター線が作図されます。
　コンター値を選択し、→ または ← ボタンでコンター値を移動します
・ すべて表示(S) 非表示コンター欄に表示されているコンター値を、すべて表示コンター欄へ移動します。
・ すべて非表示(H) 表示コンター欄に表示されているコンター値を、すべて非表示コンター欄へ移動します。
・ OK 選択された出力コンターの値を確定し、設定画面に戻ります。
・ キャンセル(C) この処理を終了して、設定画面に戻ります

拡張(E)



図題　　：図題のフォントサイズを設定します。

表題　　：ボックスサイズの補正係数を設定します。スケール値を表示しない場合はチェックを外します。

作図エリア　　：欠測点を点表示しない場合はチェックを外します。

波向線図　　：波向線を表示させたい場合に設定します。(表示間隔、表示範囲(min)、メッシュ範囲(max)、表示最小水深(m)を設定します。矢印サイズ補正係数：矢印サイズ補正係数を設定します。流線型のベクトル表示にする場合はチェックを入れます。

カラー図　　：カラー図を表示させたい場合に設定します。出力する図にチェックを入れます。複数選択する事ができます。

スムージング回数：計算結果のスムージング回数を設定します。(0 以上の任意値)

カラーバー　　：カラーバーの表示位置、表示方向を設定します。

水深図　　：潮位補正した水深を使用する場合はチェックを入れます。

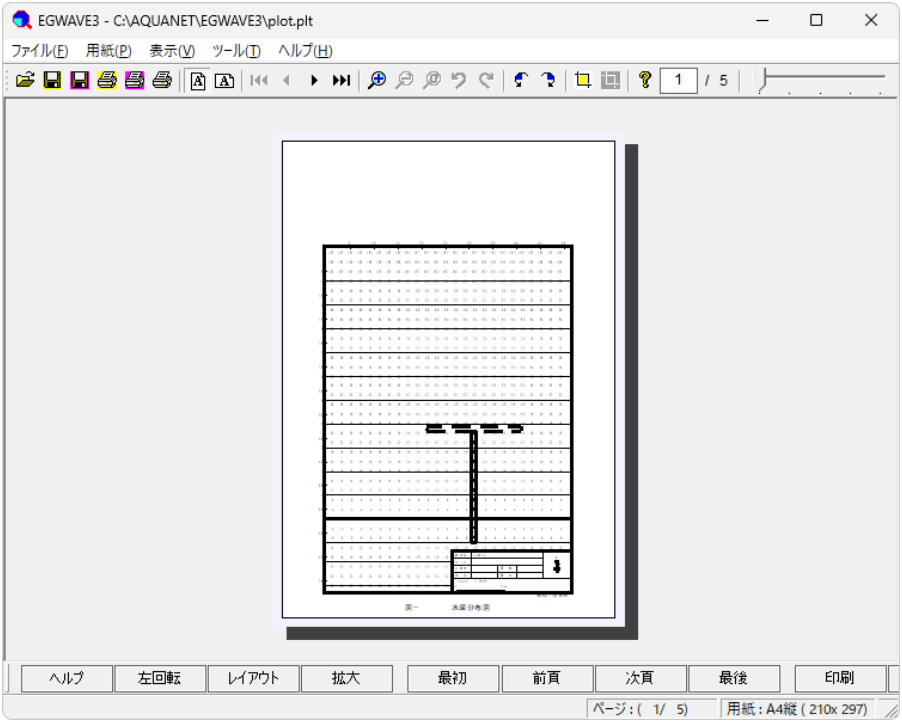
砕波分布図　　：砕波領域の色を選択します。

数値図　　：文字サイズ補正係数を設定します。数値点がわかる格子線を描画したい場合はチェックを入れます。

入射矢印　　：入射矢印の表示位置を変更する場合の移動量を設定します。

※計算領域を複数設定している場合の計算領域の切り替えは、岸側領域-沖側領域にあるシークバーをドラッグして切り替えます。

(3)　前項の画面で出力要領を設定後、＜表示(V)＞をクリックすると出力イメージを画面に出力します。



①　このレイアウト等で出力する場合は、画面下段の＜印刷＞をクリックしてください。

②　上記の他に画面上段のアイコンからも印刷できます。

・：表示ページの出力

・：全ページの出力

(詳細は、この画面の[ヘルプ]を参照してください。)

③　修正する場合は、× をクリックして前の画面に戻ります。設定値を変更し、再度、画面に表示して確認します。

2-6-2. 計算範囲図（A）

(1) [出力(O)]-[計算範囲図(A)]を選択します。
計算条件として使用した各フォルダ名を選択し、＜出力(O)＞をクリックします。

(2)　出力要領を設定します。

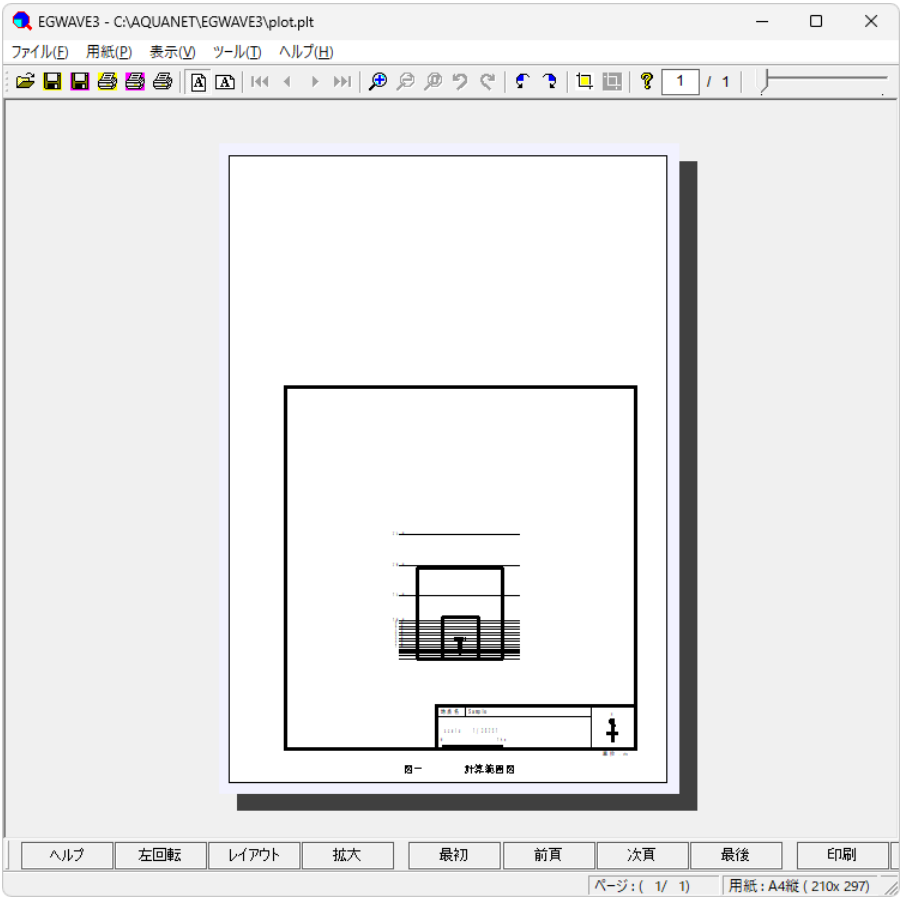
作図領域　　：全領域を選択すると、全ての領域が作図され、岸側領域を選択すると、岸側の領域のみ作図されます。

出力範囲　　：出力する範囲を設定します。計算領域で設定した範囲がデフォルトで表示されるため、原則編集しません。

余白　　：計算領域の外側の表示範囲を設定します。

(注)他の各項目の説明は、前掲の 2-6-1-(2)を参照してください。

(3)　前項の画面で出力要領を設定後、＜表示(V)＞を選択し出力図のイメージを画面で確認します。



①　このレイアウト等で出力する場合は、画面下段の＜印刷＞をクリックしてください。

②　修正する場合は、× をクリックして前の画面に戻ります。設定値を変更し、再度、画面に表示して確認します。

2-6-3. 指定範囲データ（S）

格子範囲で指定した領域内の格子水深、各種計算結果データを抜き出してファイルに出力します。

(1) [出力(O)]-[指定範囲データ(S)]を選択します。
計算条件の各フォルダ名、計算ケース名を反転して選択し、＜出力(O)＞をクリックします。

(2)　出力要領を設定します。

コンターデータ　　：選択されているコンターデータのファイル番号、地点名、真上の方位が表示されます

計算領域　　：選択されている計算領域のファイル番号、名称、真上の方位、作成領域数、反射率等の設定の有無が表示されます。

計算ケース　　：選択されている計算ケースのケース名、領域数、波高、周期、波向、Smax、潮位が表示されます。

作図領域　　：出力する領域番号が表示されます。複数領域を作成した場合は計算領域毎にレイアウトを設定してください。計算領域の切り替えは、岸側領域-沖側領域をクリックして切り替えます。

データの種類　　：出力する計算結果を選択します。

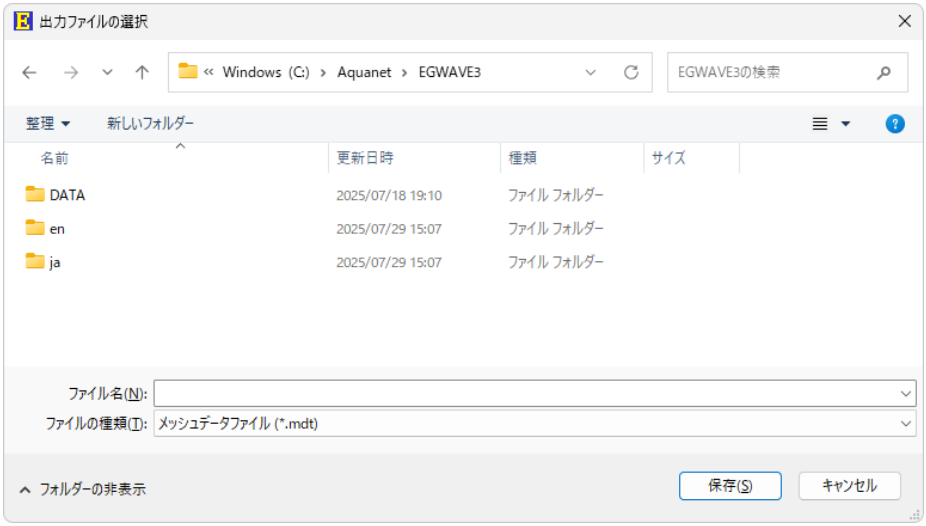
波の種類　　：2-4-2 反射率等の設定で、反射率を設定した場合、反射波、合成波が選択できます。

出力格子範囲　　：出力する範囲を格子数で指定します。デフォルトでは、計算領域全域の格子範囲が表示されます。

出力格子間隔　　：出力する格子間隔を指定します。デフォルトでは、X，Y とも 1 格子毎になっています。

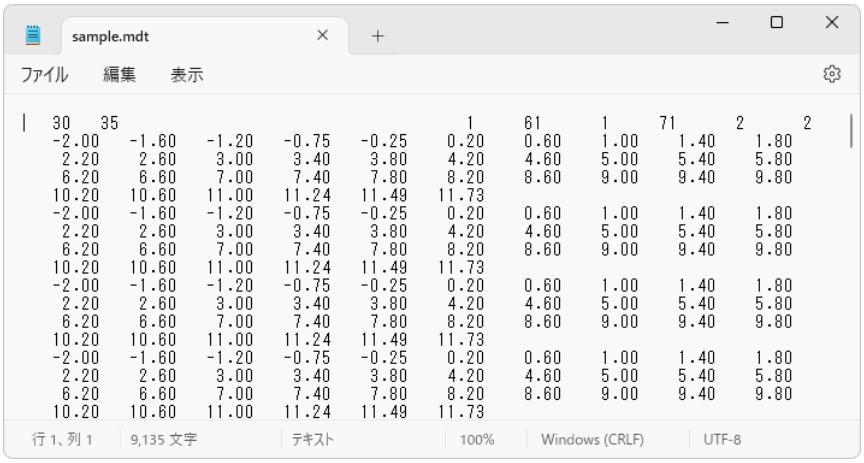
演算　　：チェックを入れて数値を入力します。

出力ファイル名　　：結果を出力するファイル名を指定します。 をクリックすると画面上から指定出来ます。



(3)　＜出力(O)＞をクリックしますと、指定範囲のテキストデータがファイルに書き出されます。

次図は、出力結果(例)をメモ帳で開いた画面です。



```
   30   35                                   1     61      1     71      2      2
   -2.00   -1.60   -1.20   -0.75   -0.25    0.20    0.60    1.00    1.40    1.80
    2.20    2.60    3.00    3.40    3.80    4.20    4.60    5.00    5.40    5.80
    6.20    6.60    7.00    7.40    7.80    8.20    8.60    9.00    9.40    9.80
   10.20   10.60   11.00   11.24   11.49   11.73
   -2.00   -1.60   -1.20   -0.75   -0.25    0.20    0.60    1.00    1.40    1.80
    2.20    2.60    3.00    3.40    3.80    4.20    4.60    5.00    5.40    5.80
    6.20    6.60    7.00    7.40    7.80    8.20    8.60    9.00    9.40    9.80
   10.20   10.60   11.00   11.24   11.49   11.73
   -2.00   -1.60   -1.20   -0.75   -0.25    0.20    0.60    1.00    1.40    1.80
    2.20    2.60    3.00    3.40    3.80    4.20    4.60    5.00    5.40    5.80
    6.20    6.60    7.00    7.40    7.80    8.20    8.60    9.00    9.40    9.80
   10.20   10.60   11.00   11.24   11.49   11.73
   -2.00   -1.60   -1.20   -0.75   -0.25    0.20    0.60    1.00    1.40    1.80
    2.20    2.60    3.00    3.40    3.80    4.20    4.60    5.00    5.40    5.80
    6.20    6.60    7.00    7.40    7.80    8.20    8.60    9.00    9.40    9.80
   10.20   10.60   11.00   11.24   11.49   11.73
```

《データフォーマット》

- ヘッダー部（2I5，30X，6I7）

j 方向のデータ数　　　　　　　　i 方向のデータ数
j 方向のデータ出力開始格子番号　j 方向のデータ出力終了格子番号
i 方向のデータ出力開始格子番号　i 方向のデータ出力終了格子番号
j 方向のデータ出力間隔　　　　　i 方向のデータ出力間隔

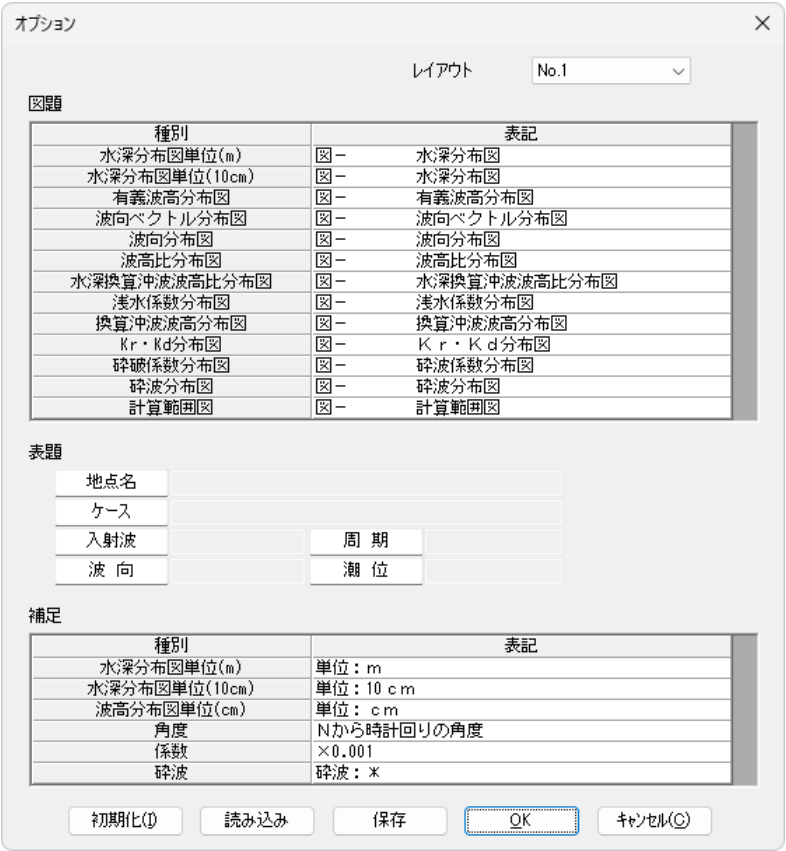
- データ部（10F8.2）

(1,1)　(2,1)　(3,1)　(4,1)　(5,1)　(6,1)　(7,1)　(8,1)　(9,1)
(10,1)
・
・
(j-3,1)　(j-2,1)　(j-1,1)　(j,1)
(1,i-1)　(2,i-1)　(3,i-1)　(4,i-1)　(5,i-1)　(6,i-1)　(7,i-1)　(8,i-1)　(9,i-1)
(10,i-1)
・
・
(j-3,i-1)　(j-2,i-1)　(j-1,i-1)　(j,i-1)
(1,i)　(2,i)　(3,i)　(4,i)　(5,i)　(6,i)　(7,i)　(8,i)　(9,i)
(10,i)
・
・
(j-3,i)　(j-2,i)　(j-1,i)　(j,i)
EOF

2-6-4. オプション（0）

(1) [出力(O)]-[オプション(O)]を選択します。

(2) 図題、表題を編集し、＜OK＞をクリックします。
＜初期化(I)＞をクリックしますと、初期値(下記画面)に戻ります。



2-7. 表示（V）

2-7-1. ツールバーとドッキングウィンドウ（T）

ツールバーとドッキングウィンドウの表示／非表示を選択できます。

2-7-2. ステータスバー（S）

ステータスバーの表示／非表示を選択できます。

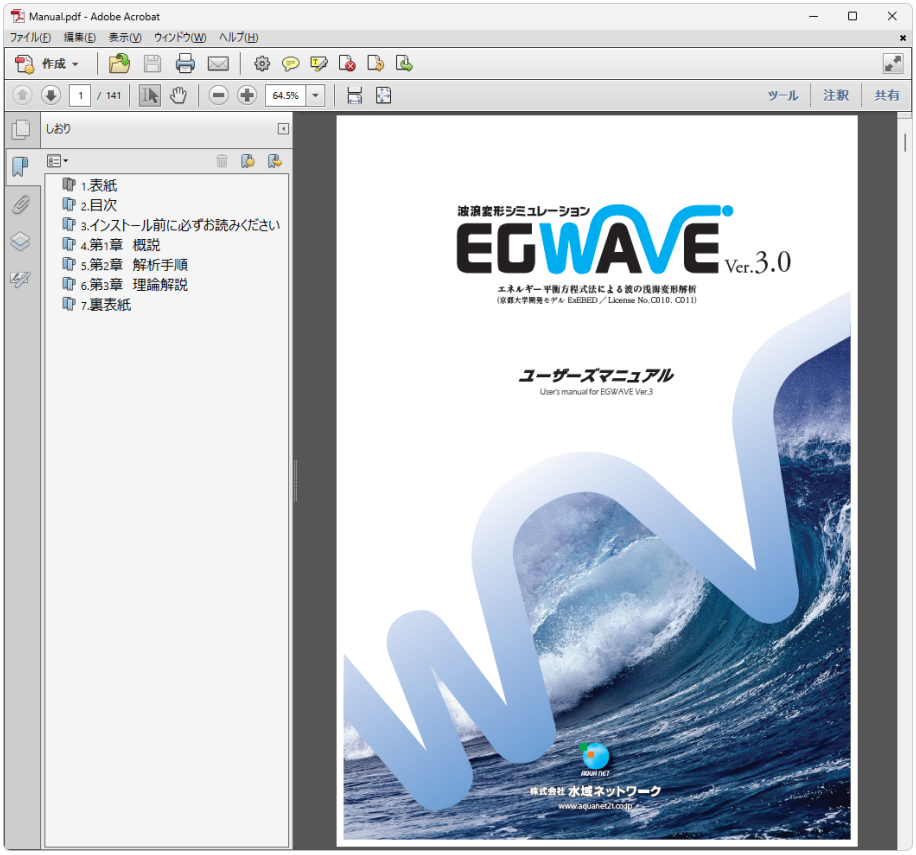
2-7-3. アプリケーションの外観（A）

アプリケーションの外観を選択できます。

2-8. ヘルプ（H）

2-8-1. ユーザーズマニュアル（H）

このマニュアルを画面上で参照できます。



2-8-2. バージョン情報

インストールされている EGWAVE3 のバージョン情報を画面上で参照できます。

第3章　理論解説

本章では、不規則波のエネルギー平衡方程式による浅海変形計算ソフトウェア『EGWAVE Ver.3』（イージーウェーブ 3）の理論について説明します。

3-1. エネルギー平衡方程式の概要

本モデルは、不規則波の屈折・浅水変形を求めるために、方向スペクトルで表される波のエネルギーが、水深および地形の変化する場所で輸送される状態を数値的に解くものであり、Karlsson(1969)らの手法を参考としています。ここでは、一般的に記述されている基本式などを概説しますが、詳細は添付する論文等を参照してください。

3-1-1. 基本式

不規則波は、時間・空間・方向・周波数の各々を独立変数として表示するエネルギー密度関数として表現できます。

エネルギー密度関数 $= D(t,\ x,\ y,\ \theta,\ f)$　　(3.1.1)

ここに、　t　：時間
　　x, y　：Euler 空間座標
　　θ　：方向
　　f　：周波数

このエネルギー密度関数の平衡方程式を用いることによって、波の変形を求めることができます。

$$\frac{\partial D}{\partial t} + V \cdot (DV) + Q = 0 \qquad (3.1.2)$$

ここに、　V　：エネルギー輸送速度
　　Q　：エネルギー逸散項（砕波等）$= \varepsilon\, bD$
　　V　：$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial \theta}, \frac{\partial}{\partial f}\right)$

さらに、下記の仮定を導入すると(3.1.2)式は以下の様になる。

i)　現象は定常である。

ii)　周波数空間でのエネルギー輸送はない。

$$\frac{\partial}{\partial x}(DVx) + \frac{\partial}{\partial y}(DVy) + \frac{\partial}{\partial \theta}(DV\theta) = -\varepsilon bD \qquad (3.1.3)$$

ここに、

$$\begin{Bmatrix} Vx \\ Vy \\ V\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Cg\cos\theta \\ Cg\sin\theta \\ \dfrac{Cg}{C}\left(\dfrac{\partial C}{\partial x}\sin\theta - \dfrac{\partial C}{\partial y}\cos\theta\right) \end{Bmatrix}$$

Cg：群速度、C：波速、θ ：波向

上記の波速、群速度は規則波と同様に次式から求めることができます。

$$C = \frac{L}{T} = \frac{2\pi f}{k}$$

$$Cg = nC = \frac{C}{2}\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right)$$

k：波数（2π／L)、h：水深

3-1-2. 回折の取り扱い

間瀬・高山ら（1999,土木学会論文集,NO.628,p.177-187）によって、エネルギー平衡方程式への回折項の導入が図られており、モデル方程式として(3.1.3)に以下のような回折項を導入しています。

$$\frac{\partial(D\nu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(D\nu_y)}{\partial y} + \frac{\partial(D\nu_\theta)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\omega}\left\{\left(CC_g\cos^2\theta D_y\right)_y - \frac{1}{2}CC_g\cos^2\theta\, D_{yy}\right\} - \varepsilon_b D \quad (3.1.4)$$

ここに、　κ：回折の影響係数　εb：エネルギー減衰係数（砕波等）

間瀬・高山らによると、回折の影響係数 κ は回折項を近似したための調整係数であり、数値実験では **2.5 程度**（EBED の場合）の値が適切としています。

3-1-3. 砕波の取り扱い

(1) 砕波なし（非砕波で計算し、計算後に合田の砕波指標で評価する方法）

基礎式中の砕波減衰項を無視し、非砕波で入射波を計算します。各メッシュ点で計算された波高に対し、合田の砕波指標（略算式）から砕波判定し、波高を評価しています。

(2) 高山モデル（計算中に砕波を考慮する方法）

エネルギー平衡方程式の基礎式に（3.1.4）式で示した砕波減衰項（$-\varepsilon_b S$）を付加し、合田の砕波指標から砕波によるエネルギー逸散率 ε_b を評価して、方向スペクトルの総エネルギーを減衰させています。

3-1-4. 入射波の境界条件

計算領域の沖側に設定するエネルギー密度関数 D の成分 S (f, θ)は、次に示すように、周波数スペクトルと方向スペクトルの積の形で与えられます。

$$S(f,\theta) = S(f)\cdot G(f,\theta) \qquad (3.1.5)$$

ここに、　S(f)　：周波数スペクトル

G(f, θ)　：方向スペクトル

標準的には周波数スペクトルには Bretshneider･光易型の(3.1.6)式を、方向スペクトルには光易型の(3.1.7)式を用いています。

$$S(f) = 0.257H_{1/3}^{2}\cdot T_{1/3}^{2}(T_{1/3}\cdot f)^{-5}\times\exp[-1.03(T_{1/3}\cdot f)^{-4}] \qquad (3.1.6)$$

$$G(f,\theta) = G_0(f)\cdot\cos^{2S}\left(\frac{\theta-\alpha p}{2}\right) \qquad (3.1.7)$$

$$G_0(f) = \left[\int_{\theta\min}^{\theta\max}\cos^{2S}\left(\frac{\theta-\alpha p}{2}\right)d\theta\right]^{-1}$$

$$S = \begin{cases} S_{max}(f/fp)^{5} & (f \le fp) \\ S_{max}(f/fp)^{-2.5} & (f > fp) \end{cases}$$

ここに、　αp　：主波向

fp　：ピーク周波数(=1/(1.05T1/3))

S_{max}　：方向集中度パラメータ

$\theta_{max}, \theta_{min}$　：波向方向の範囲

($\theta_{min} = -\pi/2,\ \theta_{max} = \pi/2$)

3-1-5. 波高・波向の定義

エネルギー平衡方程式による不規則波の変形計算では、解としてエネルギー密度 Da の分布が決まるので、有義波高および波向を次のように定義しています。波高確率分布がレーリー分布に従うなら、表- 3-1.1 の関係が各代表との間にあります。これより有義波高は、次のように定義できます。

$$H_{1/3} = 4.004\sqrt{m_0}$$

ここに、m0 は波の総エネルギーで、次式で表せます。

$$m_0 = \int_0^{\infty}\int_{-\pi/2}^{\pi/2} D(f, \theta)\,d\theta\,df \qquad (3.1.8)$$

表- 3-1.1　レーリー分布による代表波高の値（合田）

N	$H_{1/N}/(m0)^{1/2}$	$H_{1/N}$/Hmean	$H_{1/N}$/Hrms	備　考
100	6.673	2.662	2.359	―――
10	5.090	2.031	1.800	1/10 最大波高
3	4.004	1.597	1.416	有義波高
1	2.507	1.000	0.886	平均波高

また、不規則波の波向の定義には、表- 3-1.2 に示すいくつかの定義がありますが、ここでは代表波向を卓越波向とし、方向エネルギーの重心の角度 θ としました。

表- 3-1.2　波向の定義

名　称	定　義	式
卓越波向	方向エネルギー分布が最大となる。	θ_p
平均波向	方向スペクトルの重心の位置の方向	$\theta = \tan^{-1}(M_{01}/M_{10})$
主 波 向	波の峯が最も密に分布する方向	$\theta pr = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{2M_{11}}{M_{20}-M_{02}}\right)$

注）$Mpq = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} E(l, m)\cdot l^p \cdot m^q\, dl dm$

3-2. 検証計算

3-2-1. 屈折計算

表- 3-2.1 の条件で平行等深線における屈折計算を行い、不規則波の屈折係数図（図- 3-2.1）との比較を行いました。直角入射、40°の角度入射ともによく一致しています。

表- 3-2.1　計算条件

項目	Case-1	Case-2
計算範囲	2000m×2000m	
格子間隔	10m×10m	
沖境界水深	80m	
海底勾配	1/25	
波高	1.0m	
周期	8.0s	
波向	0.0°	40.0°
Smax	10	75
備考		

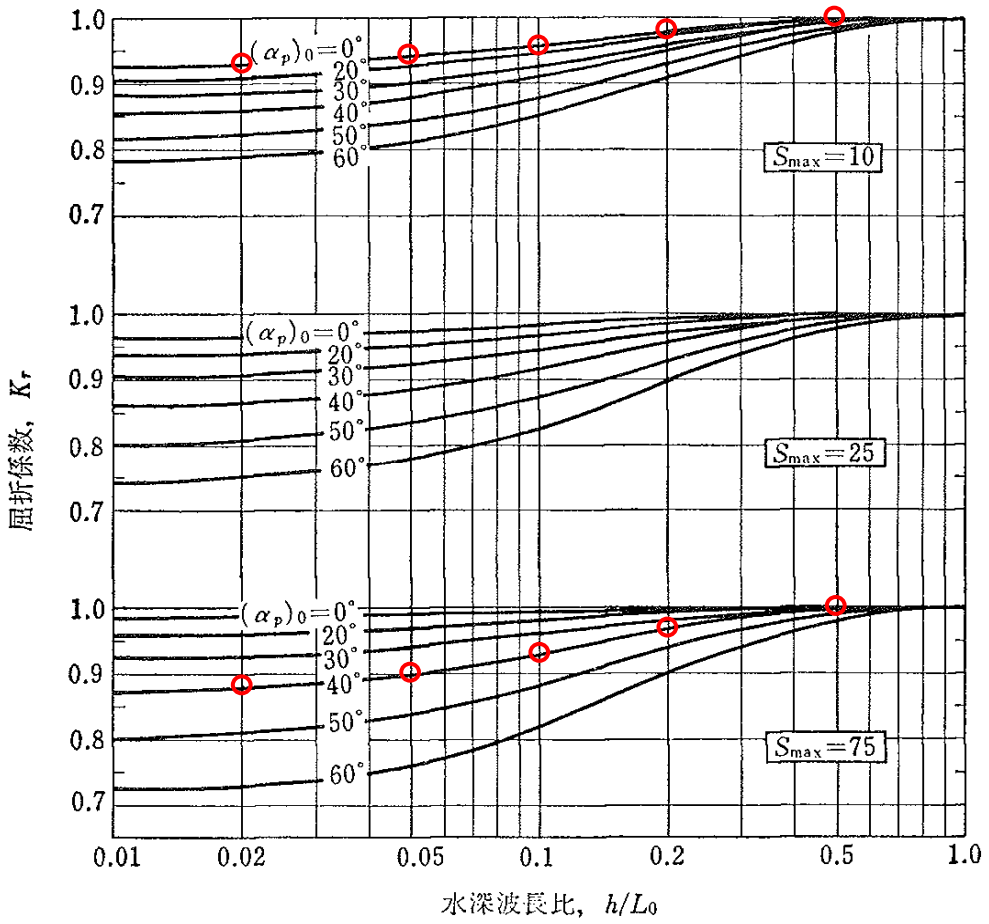


図- 3-2.1　直線状平行等深線海岸における不規則波の屈折係数

3-2-2. 回折計算

表- 3-2.2 の条件で一定水深における半無限堤の回折計算を行い、不規則波の回折係数図（図- 3-2.2）との比較を行いました。回折係数 1.0～0.3 程度の範囲でよく一致しています。

表- 3-2.2　計算条件

項目	Case-3
計算範囲	2000m×2000 m
格子間隔	10 m×10 m
水深	100 m の一様水深
波高	1.0 m
周期	8.0s
波向	0.0°
Smax	10
備考	

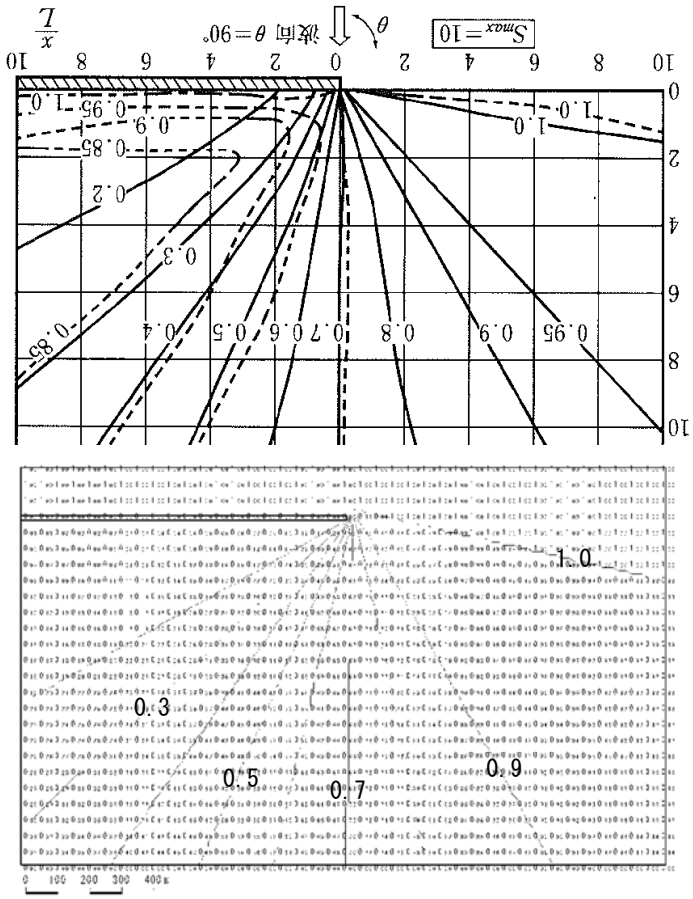


図- 3-2.2　回折計算の比較

3-2-3. 砕波

表- 3-2.3 の条件で平行等深線における砕波計算を行い、合田の砕波指標との比較（図- 3-2.3）を行いました。ピーク位置を除いて、概ね一致しています。

表- 3-2.3　計算条件

項目	Case-4
計算範囲	400m×2000 m
格子間隔	5 m×5 m
沖境界水深	60 m
海底勾配	1/25
波高	2.0 m
周期	11.3s
波向	0.0°
Smax	10
備考	

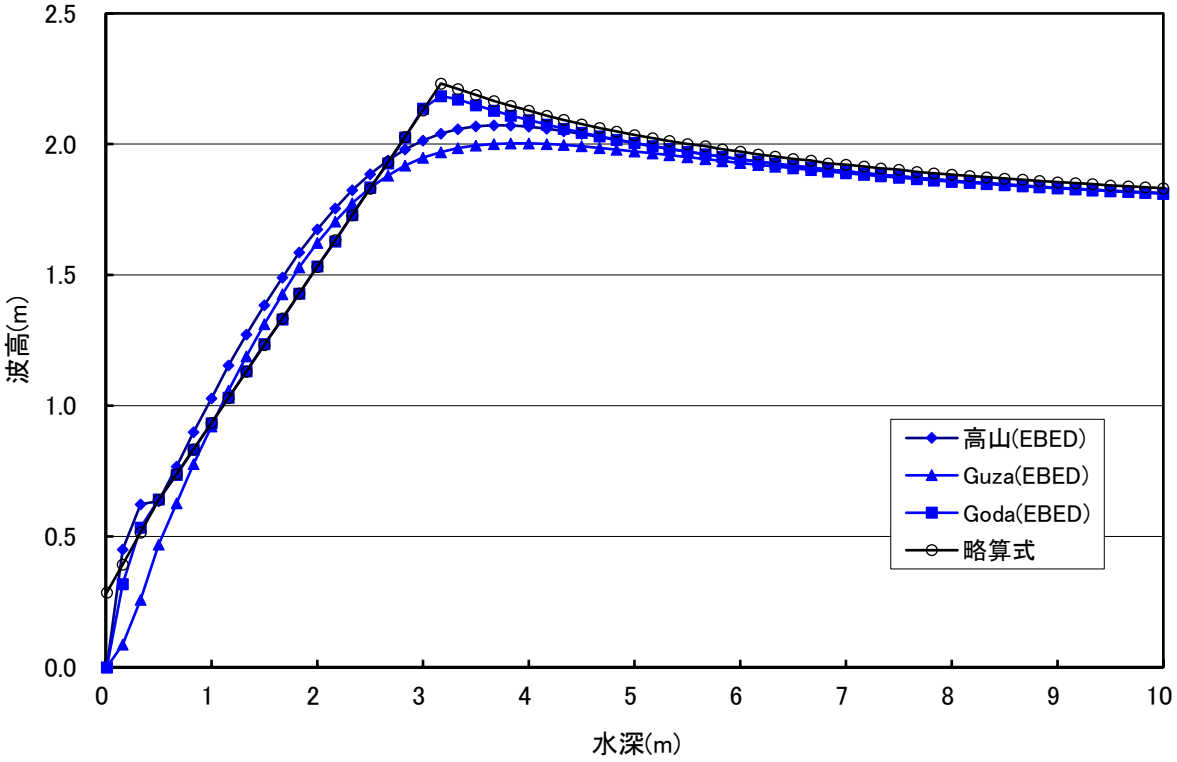


図- 3-2.3　砕波計算の比較

3-3. 参考文献

土木学会論文集 No. 628／II-48, 177-187, 1999.8

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

間瀬　肇[1]・高山知司[2]・国富將嗣[3]・三島豊秋[4]

[1]正会員　工博　京都大学助教授　防災研究所（〒611-0011 宇治市五ケ庄）
[2]フェロー　工博　京都大学教授　防災研究所（〒611-0011 宇治市五ケ庄）
[3]学生員　工修　京都大学大学院工学研究科　博士課程（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）
[4]正会員　(株)ニュージック　河川・海岸部（〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19）

本研究は，波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデル（エネルギー平衡方程式）を提案したものである．モデル方程式は放物型波動方程式を基にした回折項を陽な形で含み，計算が容易である．このモデル方程式を用いて開口防波堤背後の波浪変形計算を行い，Sommerfeld の理論解，従来のエネルギー平衡方程式による計算結果と比較・検討するとともに，楕円浅瀬による多方向不規則波の変形実験結果とも比較し，その有効性を確かめた．

Key Words: *multi-directional random waves, energy balance equation, wave refraction-diffraction, wave shoaling, wave breaking, wave transformation*

1．はじめに

沖から来襲した波は，浅海域を伝播する過程で海底地形や構造物の影響を受け，屈折，浅水変形，砕波変形，回折，反射によって，波高や波向きが変化する．こうした波浪変形を精度よく推定することは，海岸海洋構造物の設計外力の評価のみならず，漂砂系の外力評価にとっても重要である．波浪変形の推定に当たっては，波の不規則性を考慮しなければならないことは言うまでもない．

波浪変形予測モデル（理論）は，1) 位相解析モデルと 2) 位相平均モデル，の大きく２つのカテゴリーに分けられる．

1) 位相解析モデルの代表的なものは，Boussinesq 方程式である．ここでは，水深方向に平均化した連続式と運動方程式を基にして，微小時間間隔毎に平面上の格子点において，水位と流速（あるいは流量）を求めていく[1),2)]．時間間隔は波の周期に比べて小さく，また，格子間隔は波長に比べて小さく設定することが必要である．位相解析モデルを用いれば，時間および空間波形情報を得ることができる．不規則波の波高分布は，数百波分の波形情報を統計処理することにより得られる．欠点としては，波長に比べ格子間隔を小さくしなければならないので，大領域の波浪変化予測計算に適用できないことが挙げられる．緩勾配方程式[3)]や放物型波動方程式[4)]は複素振幅の変化を求めるものであるが，複素振幅に位相の情報が含まれるので，位相解析モデルとして分類される．振幅の変化は波形の変化よりも空間的に緩やかであるので，格子間隔は少し長めにとることができる．

2) 位相平均モデルの代表的なものは，エネルギー平衡方程式である[5)]．これは，位相的に平均化された諸量の１つである波エネルギーの変化を，平面上の格子点で求めるものである．時間変化やエネルギーのやりとりを考慮したものが，第３世代波浪推算モデルといわれる WAM モデル[6)]および SWAN モデル[7)]である．これらのモデルは位相平均量の変化を対象とするので，格子間隔を大きくとることができ，大領域における波浪変形を計算することが可能である．非線形性は，成分波間のエネルギーの移行（非線形相互作用）としてモデル化される．欠点としては，平均化により位相情報がないために波の反射や回折効果が考慮できないことが挙げられる．

最近，位相平均モデルに回折効果を導入しようとする試みがなされている[8),9)]．その方法は，エネルギー平衡方程式における特性速度に回折の効果を陰的に導入するものである．Booij ら[8)]は計算モデルにうまく回折効果を取り入れられなかったが，Rivero ら[9)]は防

波堤背後の波の回折の計算を行い，合理的な回折係数が値を得られたと報告している．

本研究は，Booij ら[8]や Rivero ら[9]とは異なる方法で，エネルギー平衡方程式に陽な形で回折項を導入する．本計算モデルは計算が容易で，かつ安定である．具体的な計算例として，開口防波堤背後の波浪変形計算を行い，Sommerfeld の理論解，従来のエネルギー平衡方程式を用いた計算結果，新しく回折効果を導入したエネルギー平衡方程式を用いた計算結果を比較・検討するとともに，楕円浅瀬による波の変形計算を行い，実験結果と比較・検討することにより，本計算モデルの有効性を示す．

2．エネルギー平衡方程式と特性速度

(1) エネルギー平衡方程式

エネルギー平衡方程式[5]は，多方向不規則波の屈折，浅水変形，さらには砕波変形を解くことができる[10]．そのため，実用的にも大領域の波浪変形計算モデルとして盛んに用いられている．しかし，波の回折については，問題があることが指摘されている[11]．

定常波浪場において，砕波等によるエネルギー減衰項を加えたエネルギー平衡方程式は，次のように表される．

$$\frac{\partial(v_x S)}{\partial x}+\frac{\partial(v_y S)}{\partial y}+\frac{\partial(v_\theta S)}{\partial \theta}=-\varepsilon_b S \tag{1}$$

ここで，S は波の方向スペクトル，$(x,\ y)$ は水平座標，θ は x 軸から反時計回りに測った波向角，ε_b はエネルギー減衰係数であり，特性速度 $(v_x,\ v_y,\ v_\theta)$ は

$$(v_x,\ v_y)=\frac{\partial\omega}{\partial k}\vec{s}=(C_g\cos\theta,\ C_g\sin\theta) \tag{2}$$

$$v_\theta=-\frac{1}{k}\frac{\partial\omega}{\partial k}\frac{\partial k}{\partial n}=\frac{C_g}{C}\left(\sin\theta\frac{\partial C}{\partial x}-\cos\theta\frac{\partial C}{\partial y}\right) \tag{3}$$

と表される．(s,n) は **Fig.1** に示す波向・波峰に沿った座標，C は波速，C_g は群速度である．

(2) 回折を考慮した特性速度

式 (1) のエネルギー平衡方程式には，波の回折効果が考慮されていない．最近，エネルギー平衡方程式に回折の効果を取り入れる研究が発表された[8), 9)]．その方法は，特性速度に回折効果を取り入れるものである．以下，その方法を概述する．

屈折，回折，浅水変形，反射を考慮できる緩勾配方程式は，次式で表される．

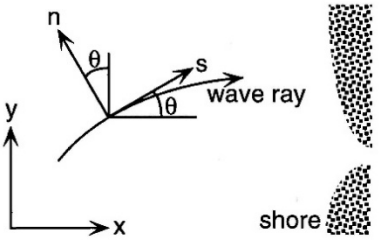


Fig.1 Coordinate system

$$\nabla_h\cdot\left(CC_g\nabla_h\phi\right)+k^2CC_g\phi=0 \tag{4}$$

ここで，∇_h は水平勾配ベクトルである．速度ポテンシャル ϕ は，複素振幅 A と

$$\phi=-\frac{igA}{\omega}e^{i\int k\,dx} \tag{5}$$

の関係があり，波数 k と角周波数 ω には

$$\omega^2=gk\tanh kh \tag{6}$$

の関係がある．ここで，g は重力加速度，h は水深である．

いま，$\phi=ae^{iS}$ とおいて式 (4) に代入し，実部について整理すると，

$$K^2=S_x{}^2+S_y{}^2=k^2+\frac{\nabla_h\cdot(CC_g\nabla_h a)}{CC_g a} \tag{7}$$

虚数部について整理すると，

$$\nabla_h\cdot\left\{C_g\frac{\vec{K}}{k}a^2\right\}=0 \tag{8}$$

が得られる．a^2 はエネルギー E に比例するので，式 (8) はエネルギー保存式を表し，式 (7) は波の回折により振幅の空間変化の影響が波数に入ってくることを示している．そこで，式 (7) で表される波数を

$$K=k\sqrt{1+\delta} \tag{9}$$

と表し，特性速度を以下のように定義することにより，式 (1) のエネルギー平衡方程式に回折の効果を陰的に取り入れる．

$$(v_x,\ v_y)=\frac{\partial\omega}{\partial k}\frac{K}{k}\vec{s}=\left(C_g\sqrt{1+\delta}\right)\vec{s} \tag{10}$$

$$v_\theta=-\frac{1}{k}\frac{\partial\omega}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial n}\sqrt{1+\delta}+\frac{1}{2\sqrt{1+\delta}}\frac{\partial\omega}{\partial k}\frac{\partial\delta}{\partial n} \tag{11}$$

ここで，δ としてはスペクトルや代表波高を用いて評価することになる．$\partial\delta/\partial n$ は (x,y) 座標では

$$\frac{\partial\delta}{\partial n}=-\sin\theta\frac{\partial\delta}{\partial x}+\cos\theta\frac{\partial\delta}{\partial y} \tag{12}$$

であり，特性速度は波高の3階微分項となるため，計算が難しい．Rivero ら[9]は計算結果を得ているが，Booij ら[8]は解を得ることができなかった．

3．エネルギー平衡方程式への回折項の導入

(1) 回折項の定式化

放物型波動方程式を基にして回折項を定式化し，エネルギー平衡方程式に導入することを考える．基本的な放物型波動方程式は，以下のように書くことができる．

$$2ikCC_gA_x+i(kCC_g)_xA+(CC_gA_y)_y=0 \tag{13}$$

式(13)に A の共役複素数を乗じたものと，式(13)全体の共役複素数に A を乗じたものを加えて，すなわち，{式(13) $\times A^*$ } + {式(13)$^*\times A$ }を求めると，

$$\left(C_g|A|^2\right)_x-\frac{i}{2\omega}\left\{\left(CC_g|A|_y^2\right)_y-2CC_gA_yA_y^*\right\}=0 \tag{14}$$

が得られる．上式が成り立つためには

$$\left(C_g|A|^2\right)_x=0 \tag{15}$$

$$\left(CC_g|A|_y^2\right)_y-2CC_gA_yA_y^*=0 \tag{16}$$

である．式(15)はエネルギーの保存式を表し，式(16)は回折によるエネルギーの釣り合いを示している．波エネルギーは $E\propto|A|^2$ であり，式(15)および式(16)の左辺第1項は E で表現できるが，第2項の $A_yA_y^*$ は E で表現できない．そこで，$A=a+ib$ として得られる $A_yA_y^*$ の表示式ができるだけ同じになるように $E_{yy}/4$ と近似する．したがって，式(16)は

$$\left(CC_gE_y\right)_y-CC_gE_{yy}/2\cong 0 \tag{17}$$

となる．

いま，式(15)の左辺が式(1)の左辺と比べ，エネルギー E を方向スペクトル S とみなす．そして，ほぼゼロである式(17)の E を S として式(1)の右辺に加えると，モデル方程式として次式を得る．

$$\frac{\partial(v_xS)}{\partial x}+\frac{\partial(v_yS)}{\partial y}+\frac{\partial(v_\theta S)}{\partial\theta}=\frac{\kappa}{2\omega}\left\{\left(CC_g\cos^2\theta\,S_y\right)_y-\frac{1}{2}CC_g\cos^2\theta\,S_{yy}\right\}-\varepsilon_bS \tag{18}$$

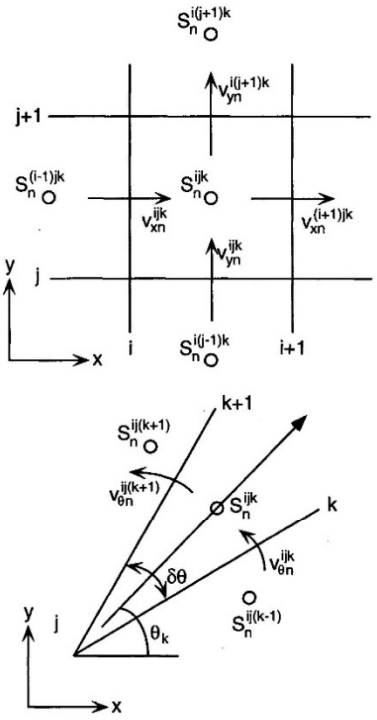


Fig.2 Grid system

ここで，κ は回折項に関する影響係数である．すなわち，式(17)のようにこの項は完全にゼロにはならないのでこの影響係数によって回折項を調整する．この項は個別にはほぼゼロとなるが，差分化に当たって左辺の S と連成するため，拡散項の役目を果たすことになる．放物型近似方程式は，波の伝播方向（ほぼ x 軸方向）に垂直な方向に回折効果を導入することができる．ここでは多方向不規則波の成分波のそれぞれに回折効果を導入しようとするものである．それぞれの成分波の伝播方向は x 軸とは異なり，その分 $\cos\theta$ の重みがついている．

(2) 数値計算法

成分波はすべて岸に向かって伝播するとする．**Fig.2** のような ○ 印で示した方向スペクトルと矢印で示した特性速度の定義点の元で，風上差分を用いて式(18)を差分化すると，以下の式が得られる．

$$A_1S_n^{ijk}+A_2S_n^{i(j-1)k}+A_3S_n^{i(j+1)k}+A_4S_n^{ij(k-1)}+A_5S_n^{ij(k+1)}=-BS_n^{(i-1)jk} \tag{19}$$

ここで，i および j はそれぞれ x 軸および y 軸方向の格子番号，n は周波数番号，k は波向番号を表し，

A_1〜A_5 および B は次のようである．

$$A_1 = v_{xn}^{ijk} / \delta x + \varepsilon_{bn}^{ij} + \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2}\left\{\begin{matrix}(CC_g)^{i(j+1)k} + (CC_g)^{ijk} \\ -(CC_g)^{i(j+1/2)k}\end{matrix}\right\}\cos^2\theta_k$$

$$+\begin{cases} v_{y_n}^{i(j+1)k} / \delta y & (v_y \geq 0) \\ -v_{y_n}^{ijk} / \delta y & (v_y < 0)\end{cases}$$

$$+\begin{cases} v_{\theta_n}^{ij(k+1)} / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \\ (v_{\theta_n}^{ij(k+1)} - v_{\theta_n}^{ijk}) / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ -v_{\theta_n}^{ijk} / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0)\end{cases} \tag{20}$$

$$A_2 = \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2}\left\{-(CC_g)^{ijk} + \frac{1}{2}(CC_g)^{i(j+1/2)k}\right\}\cos^2\theta_k + \begin{cases} -v_{y_n}^{ijk} / \delta y & (v_y \geq 0) \\ 0 & (v_y < 0)\end{cases} \tag{21}$$

$$A_3 = \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2}\left\{-(CC_g)^{i(j+1)k} + \frac{1}{2}(CC_g)^{i(j+1/2)k}\right\}\cos^2\theta_k + \begin{cases} 0 & (v_y \geq 0) \\ v_{y_n}^{i(j+1)k} / \delta y & (v_y < 0)\end{cases} \tag{22}$$

$$A_4 = \begin{cases} -v_{\theta_n}^{ijk} / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ -v_{\theta_n}^{ijk} / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0)\end{cases} \tag{23}$$

$$A_5 = \begin{cases} 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} \geq 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0) \\ 0 & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} / \delta\theta & (v_{\theta_n}^{ijk} < 0,\ v_{\theta_n}^{ij(k+1)} < 0)\end{cases} \tag{24}$$

$$B = -v_{xn}^{ijk} / \delta x \tag{25}$$

ここで，δx および δy は x 軸および y 軸方向の格子間隔である．

式 (19) の右辺の $S_n^{(i-1)jk}$ は既知であり，周波数成分 n に対して，$j = 1$〜$J, k = 1$〜K の $J \times K$ 個の連立方程式を解くことによって S_n^{ijk} を求めることができる．すなわち，沖波条件として所定の方向スペクトルを与え，境界条件を考慮して前進的に S_n^{ijk} を求めていく．計算された S_n^{ijk} を用いて，有義波高 $H_{1/3}$，有義周期 $T_{1/3}$，平均波向き $\bar{\theta}$ を以下の式で求める．

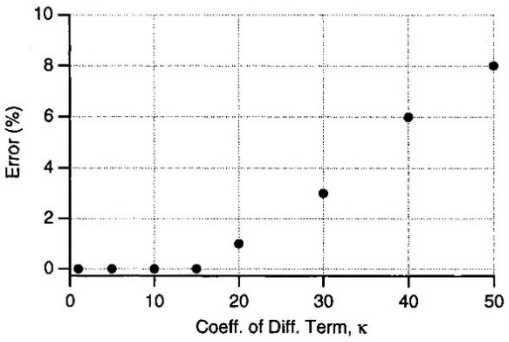


Fig.3 Calculation error due to diffraction term

$$H_{1/3} = 4.0\sqrt{m_0} \tag{26}$$

$$T_{1/3} = T_0\sqrt{m_0 / m_2} / \bar{T}_0 \tag{27}$$

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K}\theta_k S_n^{ijk} / m_0 \tag{28}$$

ここで，

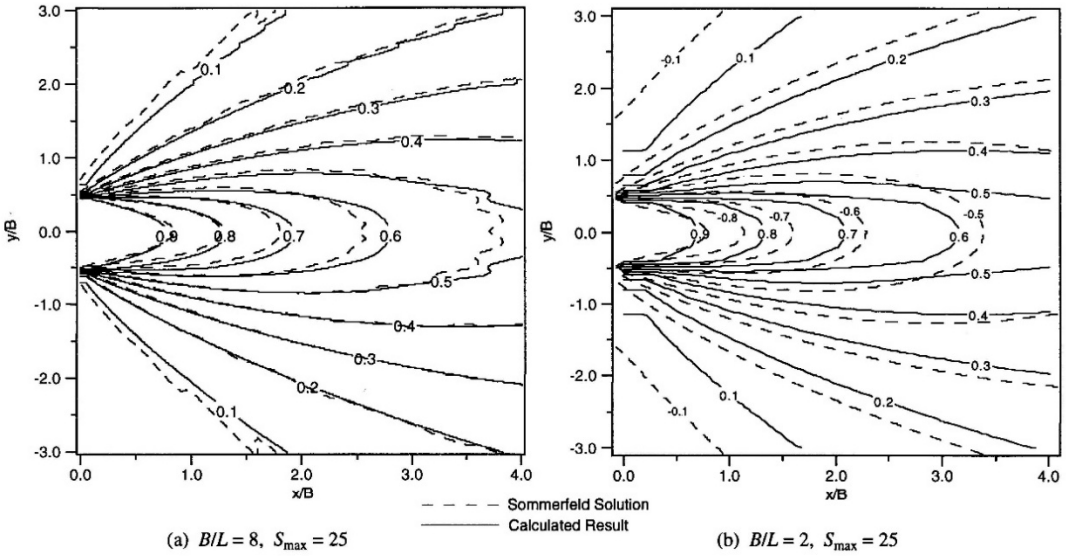
$$m_i = \sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} f_n^i S_n^{ijk} \tag{29}$$

である．T_0 および $\bar{T}_0$ はそれぞれ沖波の有義周期と平均周期である．砕波減衰項は，高山ら[10] の定式化を用いる．

(3) 回折影響係数

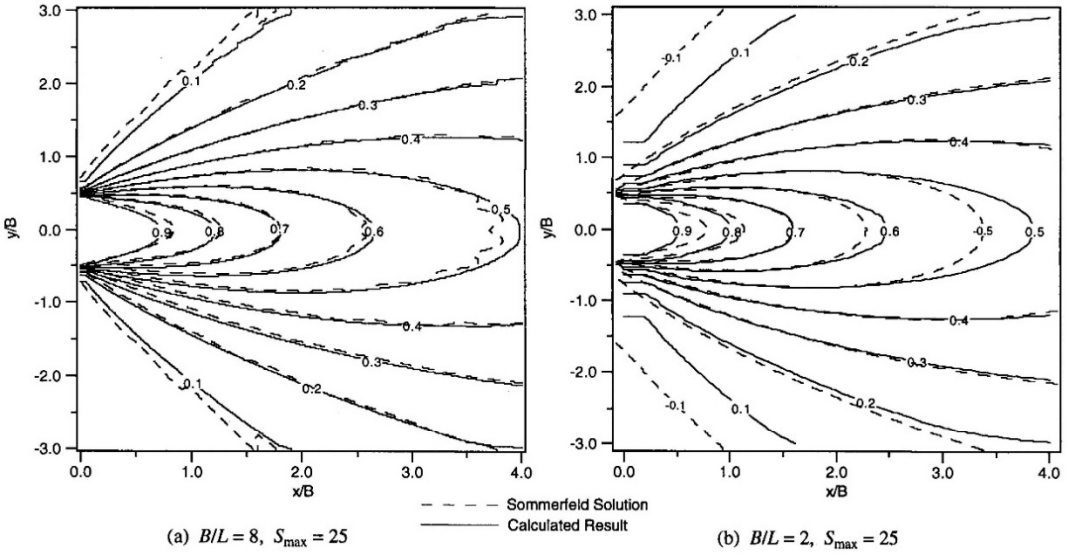
波長を L とし，領域 $50L \times 50L$ の一様水深 $h/L = 0.12$ の場において，周波数スペクトルとして Bretshneider-Mitsuyasu型スペクトル，方向関数として光易型方向関数を有する不規則波の伝播計算を行い，回折影響係数 κ を変化させた場合の波の減衰程度を調べた．一様水深の場であるから計算される有義波高は一定でなければならない．なお，計算に当たっては，$\delta x = \delta y = 2L / 5, N = 10, K = 36$ を用いた．

Fig.3 は，$50L$ 風下の位置において計算された有義波高の沖波有義波高に対する誤差をプロットしたものである．回折影響係数 κ が 15 より大きくなるとわずかに誤差が生じ始めることがわかった．



(a) $B/L = 8$, $S_{max} = 25$　　(b) $B/L = 2$, $S_{max} = 25$

Fig.4 Wave height distribution calculated by original energy balance equation and Sommerfeld solution



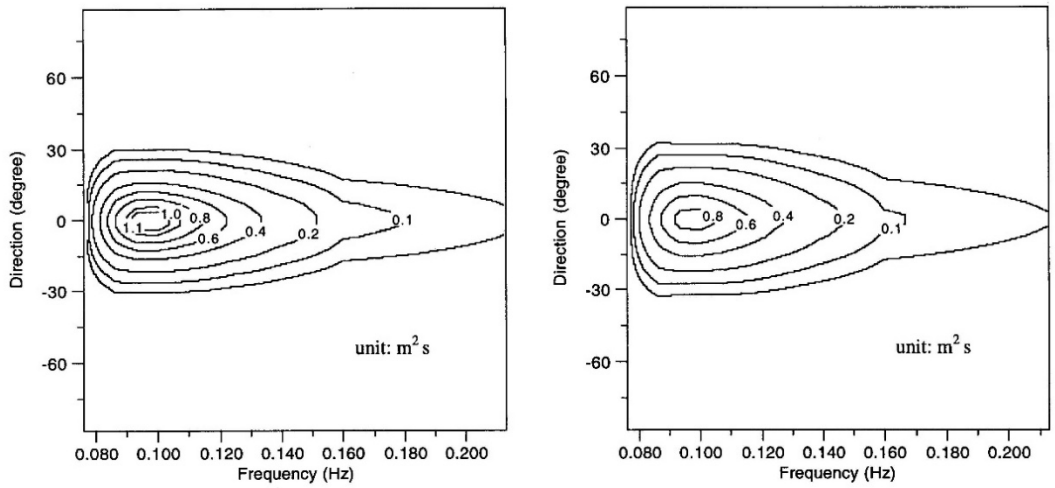
(a) $B/L = 8$, $S_{max} = 25$　　(b) $B/L = 2$, $S_{max} = 25$

Fig.5 Wave height distribution calculated by new energy balance equation and Sommerfeld solution

4．開口防波堤背後の波高分布

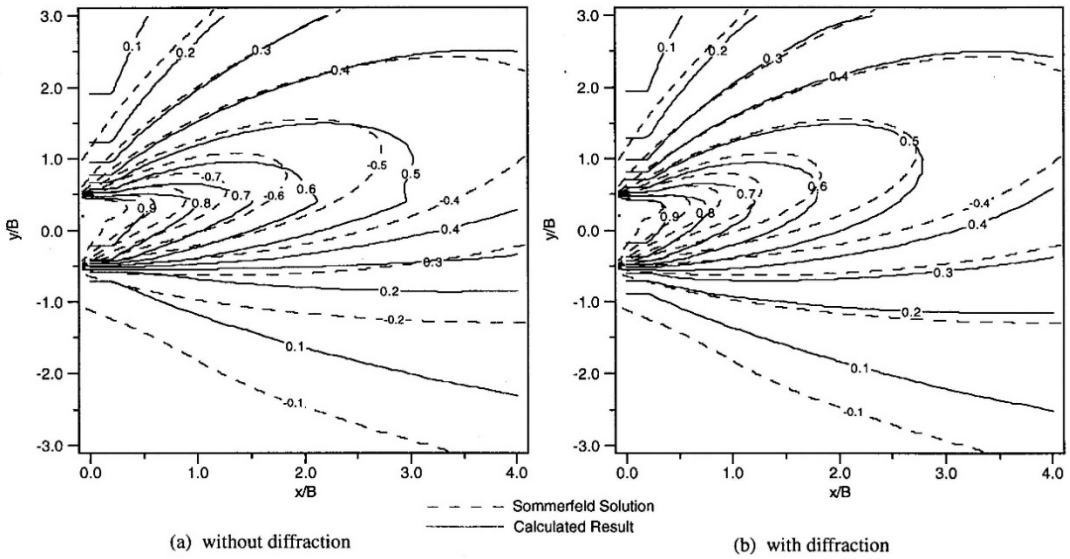
エネルギー平衡方程式の数値モデルを用いて防波堤背後の波浪変形計算を行うと，数値分散によってエネルギーの側方への分散が生じ，あたかも回折の効果が入るようになる[11]が，それ以上にエネルギーの方向分散効果で，特に防波堤開口幅が広い場合，計算値は Sommerfeld の理論値とよく一致する[12]．しかし，開口幅が狭くなると，理論値からのずれは大きくなる[12]．

Fig.4 は，無次元防波堤開口幅が $B/L = 8$ と $B/L = 2$ について，従来のエネルギー平衡方程式を用いた無次元波高の計算結果を示したものである．なお，計算に当たっては，周波数スペクトルは Bretshneider-Mitsuyasu型スペクトル，方向関数として光易型方向



(a) without diffraction (b) with diffraction

Fig.7 Directional spectra calculated at (x/B, y/B) = (2.0, 0.0) in the case of B/L = 2 and S_{max} = 25



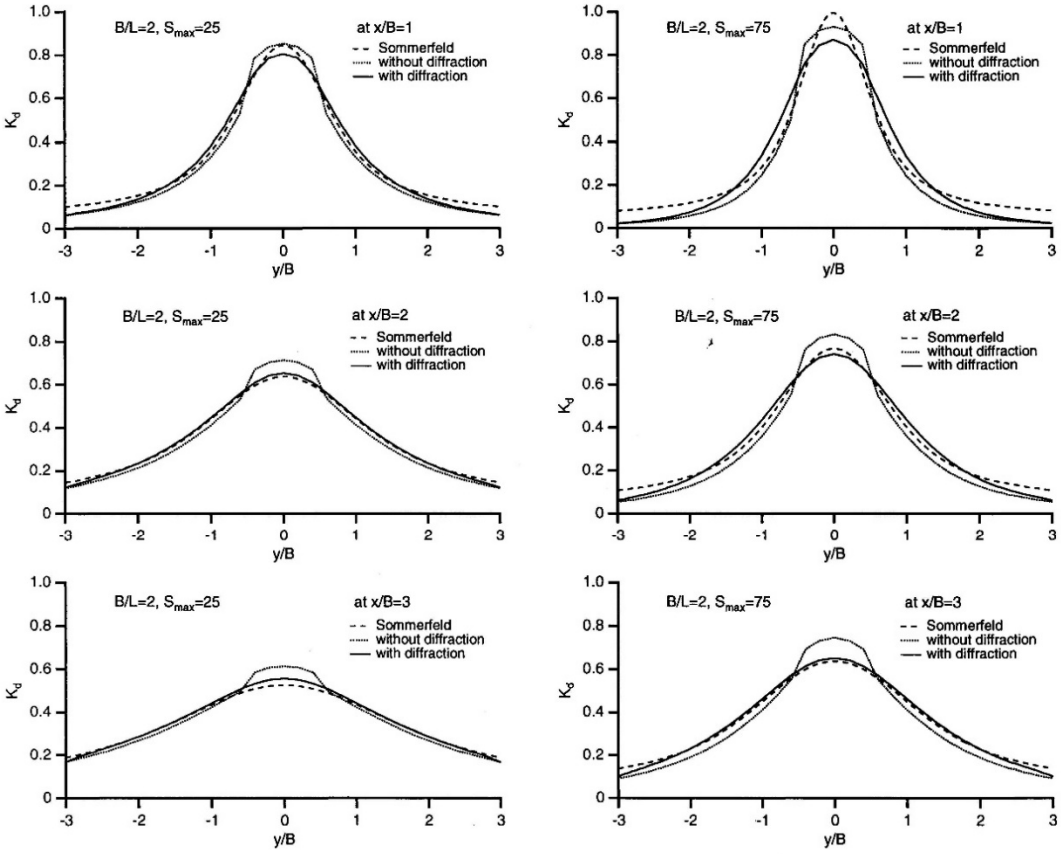
(a) without diffraction (b) with diffraction

Fig.8 Wave height distribution due to 30° degree incidence

小さくなり，また周波数方向に縮んだ形になっているが，全体的な傾向は同じである．

開口幅を B/L=2 とし，S_{max}=25 の方向分布関数を持つ不規則波が 30° の角度で入射するときの防波堤背後の無次元波高分布の計算結果を **Fig.8** に示す．(a) 図は従来のエネルギー平衡方程式を用いた場合，(b) 図は回折項を導入したエネルギー平衡方程式を用いた場合であり，両図の破線は Sommerfeld の理論値である．また，**Fig.9** には x/B = 1, 2, 3 の測線における無次元波高分布を示す．

以上の結果から，本研究で提案する波の回折を考慮したエネルギー平衡方程式を用いると，側方（波の伝播方向に垂直な方向）へのエネルギーの平滑化が生じ，Sommerfeld の理論値との対応が良くなることがわかる．



(a) $B/L = 2,\ S_{max} = 25$

(a) $B/L = 2,\ S_{max} = 75$

Fig.6 Comparison between wave heights calculated by original and new enegy equations and Sommerfeld solutions at given cross sections

関数を用い，$\delta x = \delta y = B/20, N = 10, K = 36$ とした．同様の計算条件で，回折を考慮したエネルギー平衡方程式を用いた計算結果を **Fig.5** に示した．用いた回折影響係数は $\kappa = 2.5$ であるが，この値は κ を数種類変えた予備計算によって $\kappa = 2 \sim 3$ が良い結果が得られたことから決定した．

Fig.4 と **Fig.5** において $-0.5 < y/B < 0.5$ が開口部，破線が Sommerfeld の理論値，実線が計算結果である．両図を比較してわかるように，回折係数の値が 0.1 と小さくなる開口部から離れた防波堤背後の領域では一致の程度は良くないが，開口幅が狭い場合でも本計算モデルによる計算結果は Sommerfeld の理論値にかなりよく一致する．

Fig.6 は，開口幅が狭い $B/L = 2$ の $S_{max} = 25$ と 75 の場合について，$x/B = 1, 2, 3$ の測線における無次元波高（回折係数）を示したものであり，点線が従来のエネルギー平衡方程式による計算結果，実線が回折項を導入したエネルギー平衡方程式による計算結果，破線が Sommerfeld の理論である．従来のエネルギー平衡方程式を用いた結果は，開口部の領域で波高が盛り上がっているが，回折項を導入した計算モデルによると波高は滑らかに変化するようになる．Sonmerfeld の理論値は，防波堤開口部直後で 1.0より大きくなったりするが，エネルギー平衡方程式の計算結果は 1.0 より大きくなることはない．

Fig.7 は，**Fig.4** (b) および **Fig.5** (b) の $(x/B, y/B) = (2.0, 0.0)$ 地点における方向スペクトルを示したものであり，横軸が周波数，縦軸が方向である．回折項を考慮した方程式による計算結果である (b)図は，従来の方程式による (a)図の結果に比べて，ピーク値が

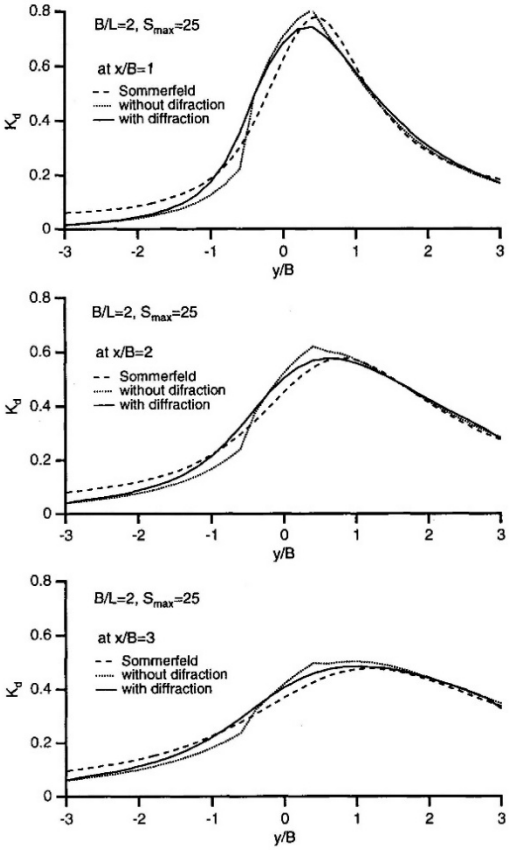


Fig.9 Wave height distribution at three lines corresponding to **Fig.7**

5．楕円浅瀬による波浪変形

本計算モデルの適用例として Vincent and Briggs[12] が行った楕円浅瀬による多方向不規則波の変形実験を取り上げ，実験結果と計算結果と比較して，計算モデルの有効性を検討する．**Fig.10** は実験で用いられた楕円浅瀬と計測線の位置を示したものである．ただし，座標軸の原点は原論文のそれとずらしてある．x 軸が主たる波の伝播方向であり，y 軸に沿って造波板が設置されている．浅瀬の中心は $x=6.1$ m, $y=9.0$ m にある．実験結果としては，入射波高で無次元化された等波高線と測線 4 における y方向の無次元波高分布が示されている．

実験で用いられた不規則波の周波数スペクトルは TMA スペクトル，方向関数は wrapped nornal function であり，スペクトルの尖鋭度，エネルギーレベル，方向分散度といった条件を変えて実験が行われた．

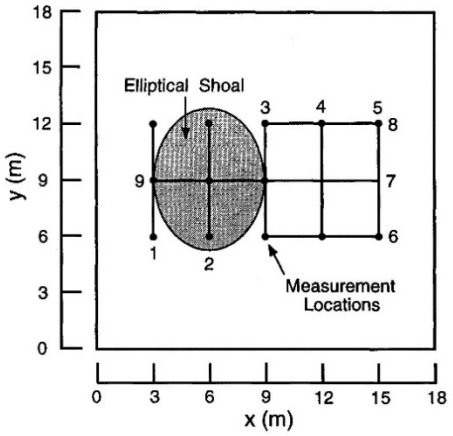


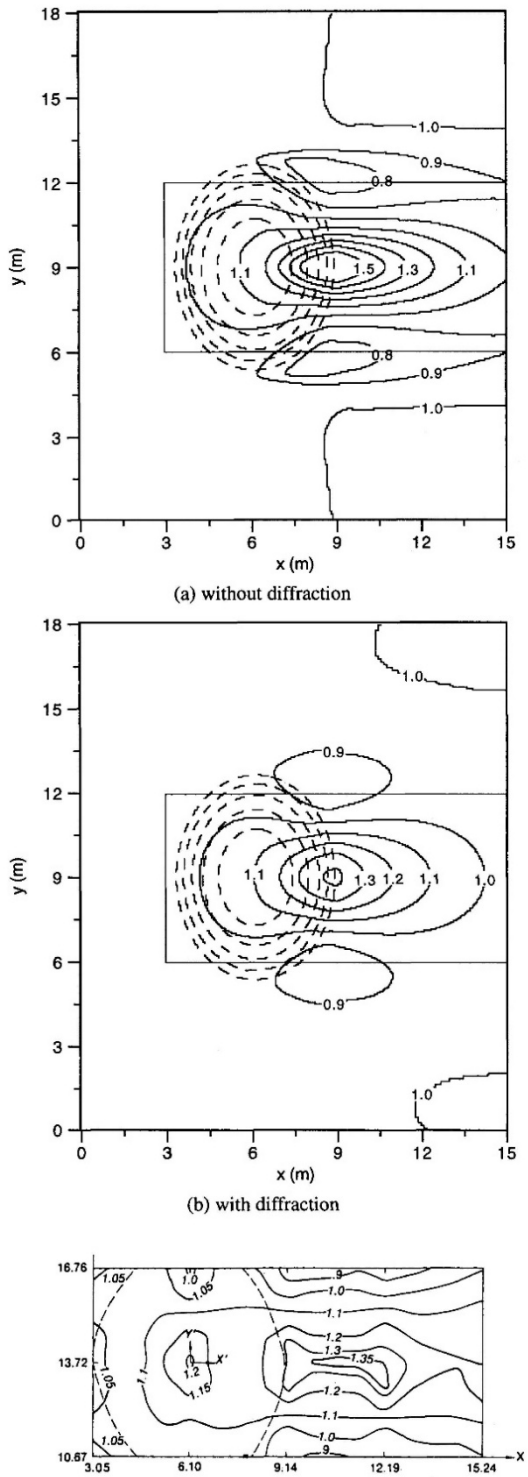
Fig.10 Layout of elliptic shoal

エネルギー平衡方程式の数値計算するに当たっては，$\delta x=\delta y=0.1$ m, $N=10$, $K=36$, $\kappa=2.5$ とした．

Fig.11 は，実験条件 N1（小スペクトル尖鋭度・狭方向分散不規則波）について，無次元波高分布を示したものであり，(a) 図は回折を考慮しない従来のエネルギー平衡方程式を用いた計算結果，(b) 図は回折効果を取り入れたエネルギー平衡方程式を用いた計算結果，(c) 図は Vincent and Briggs の実験結果である．(a) 図および (b) 図には (c) 図の実験結果に対応する領域を示してある．回折を考慮しないエネルギー平衡方程式を用いると，楕円浅瀬の後端付近で無次元波高が 1.5 以上になり実験結果との差異が大きい．回折を考慮すると，無次元波高の値はほぼ実験結果と同じになる．ただし，計算結果は，実験結果に比べ，波高が大きくなる領域が波の伝播方向に縮まった形になっている．

Fig.12 は，実験条件 B1（小スペクトル尖鋭度・広方向分散不規則波）についての無次元波高分布を示したものである．(a) 図と (b) 図から，成分波の方向分布が広くなると，エネルギー平衡方程式に回折効果を導入した場合もしない場合も計算結果はあまり顕著に違わないが，回折効果を取り入れた (b) 図の結果をみると，無次元波高が 1.1 および 1.2 となる領域が実験で得られた領域とよく一致している．

Fig.13 は，測線 4 における無次元波高分布について実験結果と計算結果を比較したものである．実験条件 B1（小スペクトル尖鋭度・広方向分散不規則波）については，等波高線の図からもわかるように，両者の一致はよい．実験条件 N1（小スペクトル尖鋭度・狭方向分散不規則波）については，波高が大きな領域が縮まった形，すなわち，左方向に寄っているので，$x=12$ m における y 方向の波高分布は実

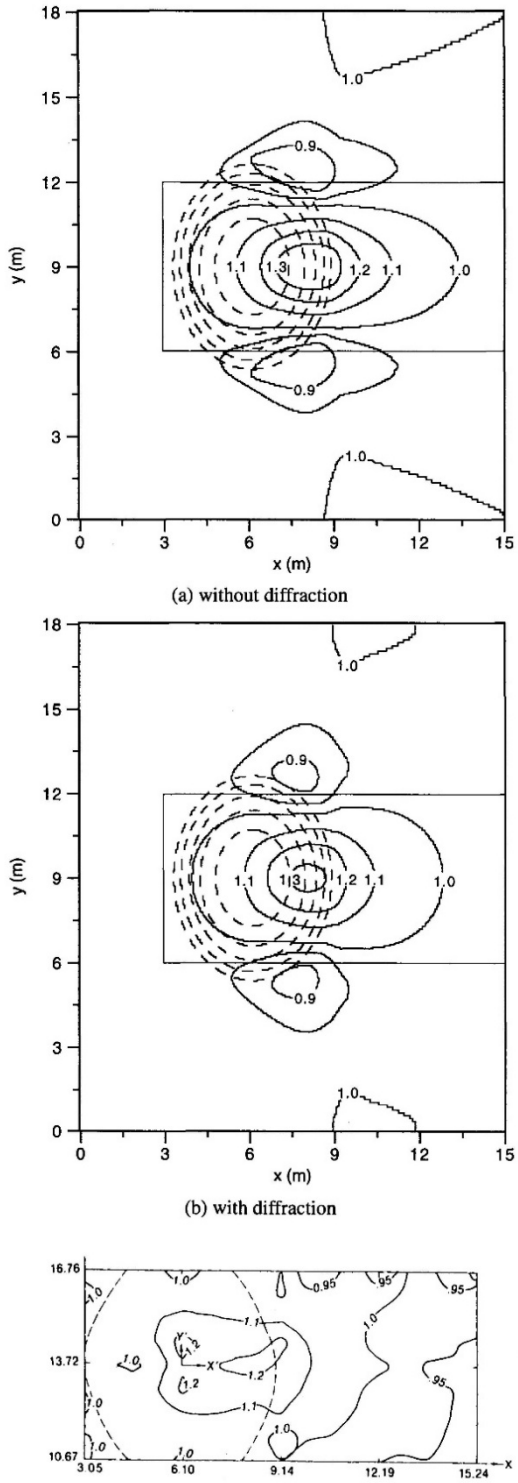


(a) without diffraction

(b) with diffraction

(c) Experimental result[12)]

Fig.11 Spatial distribution of normalized wave heights (Case N1)



(a) without diffraction

(b) with diffraction

(c) Experimental result[12)]

Fig.12 Spatial distribution of normalized wave heights (Case B1)

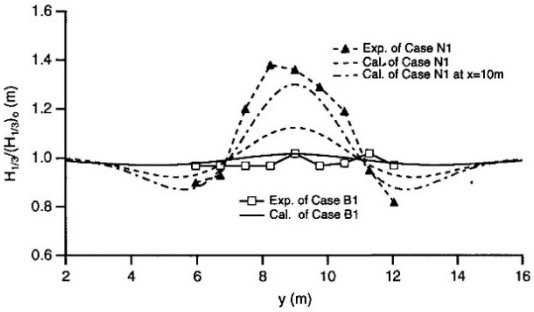


Fig.13 Comparison of normalized wave heights along transect 4

験値の ▲ より小さくなっている．そこで，x =10 m における y 方向の波高分布をプロットしてみると破線のようになり，実験値との対応が良くなる．

なお，入射波高が大きく楕円浅瀬上で砕波が顕著になる条件 N5 および B5 に対応した計算結果を **Fig.14** に示す．

また，**Fig.15** に x =12 m における波高の分布を示す．この実験結果は y = 9 m での波高が小さくなりすぎていて，これまでの計算モデルではこの波高分布を説明することができない[13), 14)] が，本計算モデルによっても説明できない．実験結果が少しおかしいようにも思われるが，このような砕波が顕著なケースに対してはさらなる実験による検討が必要である．

6．まとめ

本研究は，放物型波動方程式を基にして回折項を定式化し，エネルギー平衡方程式に陽な形で回折項を導入した．この回折項にかかる影響係数は 2.5 が適切であった．ここで提案した計算モデルは計算が容易で，かつ安定である．

具体的な例として，まず開口防波堤背後の波浪変形計算を行い，Sommerfeld の理論解，従来のエネルギー平衡方程式を用いた計算結果，新しく回折効果を導入したエネルギー平衡方程式を用いた計算結果を比較・検討した．その結果，回折項を含んだエネルギー平衡方程式を用いると，従来のエネルギー平衡方程式に比べ，波の伝播方向に垂直な方向へのエネルギーの平滑化が生じ，Sommerfeld の理論値との対応が良くなることがわかった．

次に，楕円浅瀬による多方向不規則波の変形実験結果と計算結果と比較した．小スペクトル尖鋭度・狭方向分散不規則波の条件に対しては，回折を考

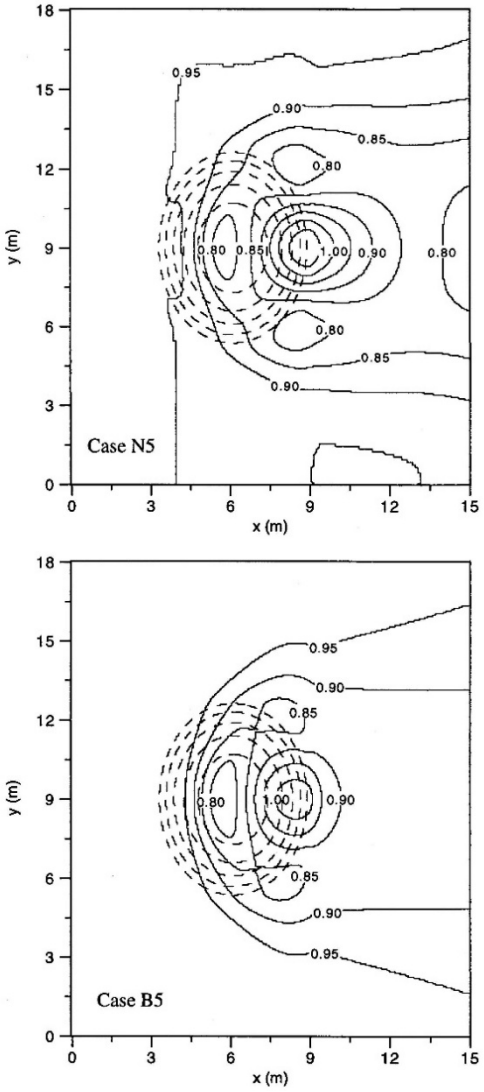


Fig.14 Spatial distribution of normalized wave heights (Cases N5 and B5)

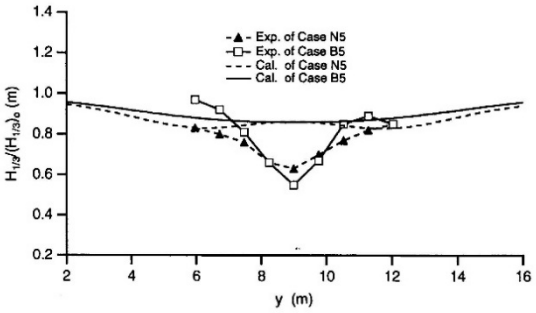


Fig.15 Compariron of normalized wave heights along transect 4

慮しないエネルギー平衡方程式を用いると，楕円浅瀬の後端付近で無次元波高が 1.5 以上となって実験結果との差異が大きいが，回折を考慮すると，無次元波高の値はほぼ実験結果と同じになることがわかった．小スペクトル尖鋭度・広方向分散不規則波の条件に対しては，エネルギー平衡方程式に回折効果を導入してもしなくても，計算結果はあまり差がないが，詳細に見ると回折効果を取り入れた方がより実験結果とよく一致することがわかった．入射波高が大きくなり楕円浅瀬上で砕波が顕著になる条件に対しては，従来の研究と同様，計算値と実験値の対応は良くなかったが，このような砕波が顕著なケースに対してはさらなる実験による検討が必要である．

最後に，本研究を行うに当たり，運輸省港湾技術研究所 平石哲也博士には回折計算について便宜を図っていただきここに謝意を表する．

参考文献

1) Peregrine, D.H. : Long waves on a beach, Jour. Fluid Mech., Vol.27, pp.815-827, 1967.
2) Karambas, Th.V. and C. Koutis : A breaking wave propagation model based on the Boussinesq equations, Coastal Eng., Vol.18, pp.1-19, 1992.
3) Berkhoff, J.C.W. : Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 13th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.471-490, 1972.
4) Radder, A.C. : On the parabolic equation method for water-wave propagation, Jour. Fluid Mech., Vol.95, pp.159-176, 1979.
5) Karlsson, T. : Refraction of continuous ocean wave spectra, Proc. ASCE, Vol.95, No.WW4, pp.471-490, 1969.
6) WAMDI group : The WAM model - a third generation ocean wave prediction model, Jour. Physical Oceanography, Vol.18, pp.1775-1810, 1988.
7) Booij, N., Holthuijsen, L.H. and Ris, R.C. : The "SWAN" wave model for shallow water, Proc. 25th Int. Conf Coastal Eng., pp.668-676, 1996.
8) Booij, N., Holthuijsen, L.H., Doorn, N. and Kieftenburg, A.T.M.M. : Diffraction in a spectral wave model, Proc. 3rd Int. Symp. on Wave '97, ASCE, pp.243-255, 1997.
9) Rivero, F.J., Arcilla, A.S. and Carci, E. : An analysis of diffraction in spectral wave models, Proc. 3rd Int. Symp. on Wave '97, ASCE, pp.431-445, 1997.
10) 高山知司，池田直太，平石哲也：砕波および反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告，第 30 巻，第 1 号，pp.21-67, 1991.
11) 西村仁嗣：エネルギー平衡方程式の積分に伴う数値分散について，第 34 回海岸工学講演会論文集，pp.11-15, 1987.
12) Vincent, C.L. and Briggs, M.J. : Refraction-diffraction of irregular waves over a mound, Jour. Waterways, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol.115, No.2, pp.269-284, 1989.
13) 間瀬　肇，酒井哲郎，ペイ義光：楕円浅瀬を通過する多方向不規則波浪の確率分布法による屈折・回折・砕波変形計算，海岸工学論文集，第39巻，pp.116-120, 1992.
14) Ozkan, H.T. and Kirby, J.T. : Evolution of breaking directional spectral waves in the near shore zone, Proc. 2nd Int. Symp. on Waves Measurement and Analysis, New Orleans, pp.849-863, 1993.

(1998.8.31 受付)

MULTI-DIRECTIONAL SPECTRAL WAVE TRANSFORMATION MODEL INCLUDING DIFFRACTION EFFECT

Hajime MASE, Tomotsuka TAKAYAMA,
Shoji KUNITOMI and Toyoaki MISHIMA

This paper proposed an energy balance equation including the effect of wave diffraction as a multi-directional random wave transformation model. The term of wave diffraction was included explicitly in the model, which was formulated based on a parabolic wave refraction-diffraction equation. The present wave model is easy to solve numerically and is stable. The wave model was employed to estimate wave transformations through the mouth between two breakwaters, and the estimated results were compared with the predictions by the existing energy balance equation without wave diffraction effect and with the Sommerfeld solutions. The comparison between the wave heights shows that the present wave model is the good predictor. The present wave model was also applied to the experiments of wave transformation due to an elliptic shoal, and it was found that the model predictions agreed well with the experimental observations excluding the cases where the wave breaking on the shoal was severe.

土木学会論文集 No. 684／II-56, 57-68, 2001. 8

高次精度差分による位相平均不規則波浪変形計算モデルに関する研究

間瀬　肇[1]・沖　和哉[2]・高山知司[3]・酒井哲郎[4]

[1]正会員　工博　京都大学助教授　防災研究所（〒611-0011 宇治市五ケ庄）
[2]正会員　工修　京都大学工学研究科助手　土木工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）
[3]フェロー会員　工博　京都大学教授　防災研究所（〒611-0011 宇治市五ケ庄）
[4]フェロー会員　工博　京都大学工学研究科教授　土木工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

本研究は，波の回折と砕波を考慮したエネルギー平衡方程式を基にして，高次精度の風上差分を用いた多方向不規則波の変形計算モデルを提案したものである．QUICK 差分により数値拡散を減少させた上で，放物型波動方程式をもとに定式化した回折項により波の回折効果を導入した．この波浪変形計算モデルを用いて開口防波堤背後の波浪変形計算を行い，Sommerfeld の理論解，従来の 1 次精度風上差分による計算結果と比較・検討し，本波浪変形モデルの有効性を確かめた．また，球面浅瀬による多方向不規則波の変形を調べた Chawla ら (1998) の実験結果と本計算モデルによる計算結果を比較し，その妥当性を確かめた．

Key Words: *multi-directional random waves, energy balance equation, wave refraction-diffraction, wave shoaling, wave breaking, random wave transformation*

1．はじめに

港湾構造物や海岸保全施設の設計に際しては，波の情報を必要とする．そのため，最初に，波浪観測データや波浪推算結果を用いて，極値統計解析により 50 年再現確率波といった計画波浪が決定される．波は，構造物に到達するまでに，波高，周期および波向きが変化する．特に，沿岸域では海底地形の影響を受けて，浅水変形，屈折，砕波変形により，波高が大きく変化する．また，島や岬などの周辺の地形や既存の構造物により，波の回折や反射が生じる．そこで，これらの諸現象を考慮して，計画波に対して波浪変形計算を行い，構造物に対する設計波を推定しなければならない．

設計波を算定するための波浪変形計算モデルには，種々の理論・計算モデルが提案されている[1]．計算領域が小さければ，ほぼ全ての波変形現象を考慮することができる拡張型 Boussinesq 方程式が使える[2),3),4)]．Boussinesq 方程式は本来長波近似に基づいた理論[5)]であったため，深海域には適用できなかった．しかし，近年多くの研究者により深海域でも適用できるよう改良が図られ，拡張型 Boussinesq 方程式として我が国でも盛んに使われるようになっている．Boussinesq 方程式は，連続式と運動方程式を基にして微小時間間隔毎に各格子点において水位と流速（あるいは流量）を求める．そのため，時間間隔および格子間隔を小さくしなければならない．非定常緩勾配方程式も同様の手法で計算される[6)]．こうした波浪変形モデルは，時々刻々の波の変化を求めていくので，位相解析波浪変形計算モデルといわれる．

波浪推算は広領域を対象とした波浪変形計算を行わなければならないので，位相的に平均化されたエネルギースペクトルが計算対象となる．ここでは，エネルギー平衡方程式に風からのエネルギー流入項，白波砕波に伴うエネルギー減衰項，波の共鳴干渉項が考慮される．WAM モデル[7)]は，世界的に使われている波浪推算モデルである．浅海域での波浪推算モデルとしては，SWAN[8)]がある．本研究の波浪変形計算モデルは，計画波から設計波を算定するための沿岸域を主対象とするものである．計画波は十分発達しており，計算領域においては風からのエネルギー流入と白波砕波に伴うエネルギー散逸はバランスしているものと仮定する．すなわち，設計波を算定する際に風の影響は考え

ない．実際，設計風を設定することは難しい．また，波の非線形干渉による周期変化は生じない程度の広領域を対象とする．エネルギー平衡方程式に基づく波浪変形計算モデルの欠点としては，平均化により位相情報がないため，波の反射や回折効果が正確に考慮できないことが挙げられる．また，エネルギー平衡方程式の数値計算では，数値的な拡散効果が生じる．そのため，構造物背後の波浪変形計算結果には回折効果が見かけ上現れる[9]．

最近，エネルギー平衡方程式に回折効果を導入する試みがいくつかなされている．Resio[10]は場所と方向成分の重みつき平均により平滑化を行うことで回折をあらわそうしたが，これは理論的根拠に基づくものではない．一方，Booij ら[11]や Rivero ら[12]は，エネルギー平衡方程式における特性速度に回折の効果を導入した．間瀬ら[13]は放物型波動方程式を基にして回折項を定式化し，エネルギー平衡方程式に陽な形で回折項を導入した．そのモデル方程式を用いると，開口防波堤背後の波高の計算結果が Sommerfeld 解と良く一致することを示した．

本研究では，間瀬ら[13]が提案した回折項を有するエネルギー平衡方程式を基にして，移流項に対して高次精度の風上差分を用いた多方向不規則波の変形計算モデルを提案する．本波浪変形計算モデルを用いて開口防波堤背後の波浪変形計算を行い，Sommerfeld の理論解，従来の１次精度風上差分による計算結果と比較・検討し，モデルの有効性を確かめる．また，球面浅瀬による多方向不規則波の変形計算を行い，Chawla ら[14]の実験結果と比較し，本計算モデルの妥当性を確かめる．

2. 回折項を含むエネルギー平衡方程式

本論文の基礎とする間瀬ら[13]のモデル方程式は，以下のようである．

定常波浪場における，エネルギー減衰項[9]を有するエネルギー平衡方程式は，次のように表される．

$$\frac{\partial(v_x S)}{\partial x}+\frac{\partial(v_y S)}{\partial y}+\frac{\partial(v_\theta S)}{\partial \theta}=-\varepsilon_b S \qquad (1)$$

ここで，S は波の方向スペクトル，$(x,\ y)$ は水平座標，θ は x 軸から反時計回りに測った波向角，ε_b はエネルギー減衰係数，特性速度 $(v_x,\ v_y,\ v_\theta)$ は

$$(v_x,\ v_y)=\frac{\partial\omega}{\partial k}\vec{s}=(C_g\cos\theta,\ C_g\sin\theta) \qquad (2)$$

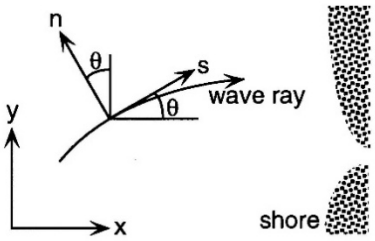


Fig.1 Coordinate system

$$v_\theta=-\frac{1}{k}\frac{\partial\omega}{\partial k}\frac{\partial k}{\partial n}=\frac{C_g}{C}\left(\sin\theta\frac{\partial C}{\partial x}-\cos\theta\frac{\partial C}{\partial y}\right) \qquad (3)$$

と表される．ここで，$(s,\ n)$ は **Fig.1** に示す波向・波峰に沿った座標，C は波速，C_g は群速度である．

回折項は以下の放物型波動方程式から定式化された．

$$2ikCC_gA_x+i(kCC_g)_xA+(CC_gA_y)_y=0 \qquad (4)$$

式 (4) を変形し，実部と虚部について整理すると

$$\left(C_g|A|^2\right)_x=0 \qquad (5)$$

$$\left(CC_g|A|_y^2\right)_y-2CC_gA_yA_y^*=0 \qquad (6)$$

となる[13]．式 (5) はエネルギーの保存，式 (6) は回折によるエネルギーの釣り合いを表している．波エネルギー は $E\propto|A|^2$ であり，式 (5) および式 (6) の左辺第１項は E で表現できるが，第２項の $A_yA_y^*$ は E で表現できない．そこで，$A_yA_y^*$ を $E_{yy}/4$ と近似すると，式 (6) は

$$\left(CC_gE_y\right)_y-CC_gE_{yy}/2\cong 0 \qquad (7)$$

となる[13]．式 (5) の左辺と式 (1) の左辺とを比べ，エネルギー E を方向スペクトル S とみなす．そして，ほぼゼロである式 (7) の E を S として式 (1) の右辺に加えると，モデル方程式として次式を得る．

$$\frac{\partial(v_xS)}{\partial x}+\frac{\partial(v_yS)}{\partial y}+\frac{\partial(v_\theta S)}{\partial\theta}=$$
$$\frac{\kappa}{2\omega}\left\{\left(CC_g\cos^2\theta\ S_y\right)_y-\frac{1}{2}CC_g\cos^2\theta\ S_{yy}\right\}-\varepsilon_bS \qquad (8)$$

ここで，κ は回折影響係数である．間瀬ら[13]は $\kappa=2.5$ を用いた．放物型近似方程式は，波の伝播方向（ほ

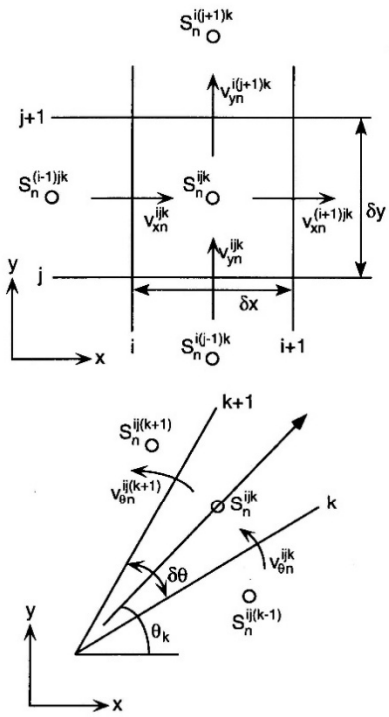


Fig.2 Grid system

ぼ x 軸方向）に垂直な方向に回折効果を導入することができる．ここでは，多方向不規則波の成分波ごとに回折効果を導入した．それぞれの周波数成分波はいくつかの方向成分を持ち，それらの伝播方向は x 軸とは異なり，その分 $\cos\theta$ の重みがついている．

3. 差分化方程式

Fig.2 は計算格子と特性速度の定義点を示したものである．成分波は全て岸方向（x 軸方向）に進行すると考える．したがって，式 (8) の左辺第 1 項の差分式は次式で表される．

$$\frac{\partial(v_{x_n}S)}{\partial x}=\left(S_n^{ijk}v_{x_n}^{(i+1)jk}-S_n^{(i-1)jk}v_{x_n}^{ijk}\right)\Big/\delta x \tag{9}$$

ここで，i および j はそれぞれ x 軸および y 軸方向の格子番号，n は周波数識別番号，k は波向き識別番号である．式 (8) の左辺第 2 項および第 3 項は，従来 1 次精度風上差分が用いられてきた[9),13)]．1 次精度風上差分は強い数値拡散効果により数値安定性に優れているが，この数値拡散が 2 階微分であるために，同じ 2 階微分である回折項の物理的な拡散と区別できず，得られる解は両拡散効果が合わさったものとなる．ここでは以下で示すように，移流項を QUICK (Quadralic Upstream Interporation for Convective Kinematics)[15)] を用いて差分化する．

式 (8) の左辺第 2 項の QUICK による差分は，以下のようである．

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial(v_{y_n}S)}{\partial y}\\
&=\frac{1}{16\delta y}\Big\{v_{y_n}^{i(j+1)k}\left(-S_n^{i(j+2)k}+9S_n^{i(j+1)k}+9S_n^{ijk}-S_n^{i(j-1)k}\right)\\
&\quad-v_{y_n}^{ijk}\left(-S_n^{i(j+1)k}+9S_n^{ijk}+9S_n^{i(j-1)k}-S_n^{i(j-2)k}\right)\Big\}\\
&\quad+\frac{\beta}{16\delta y}\Big\{\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right|\left(S_n^{i(j+2)k}-3S_n^{i(j+1)k}+3S_n^{ijk}-S_n^{i(j-1)k}\right)\\
&\quad-\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\left(S_n^{i(j+1)k}-3S_n^{ijk}+3S_n^{i(j-1)k}-S_n^{i(j-2)k}\right)\Big\}
\end{aligned} \tag{10}$$

ただし，この差分化は j 番目の格子点が計算領域内部にある場合に適用する．境界上の格子点においては以下の 1 次精度風上差分を用いる．

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial(v_{y_n}S)}{\partial y}\\
&=\frac{1}{2\delta y}\Big\{\left(S_n^{i(j+1)k}+S_n^{ijk}\right)v_{y_n}^{i(j+1)k}-\left(S_n^{ijk}+S_n^{i(j-1)k}\right)v_{y_n}^{ijk}\Big\}\\
&-\frac{\beta}{2\delta y}\Big\{\left(S_n^{i(j+1)k}+S_n^{ijk}\right)\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right|-\left(S_n^{ijk}+S_n^{i(j-1)k}\right)\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\Big\}
\end{aligned} \tag{11}$$

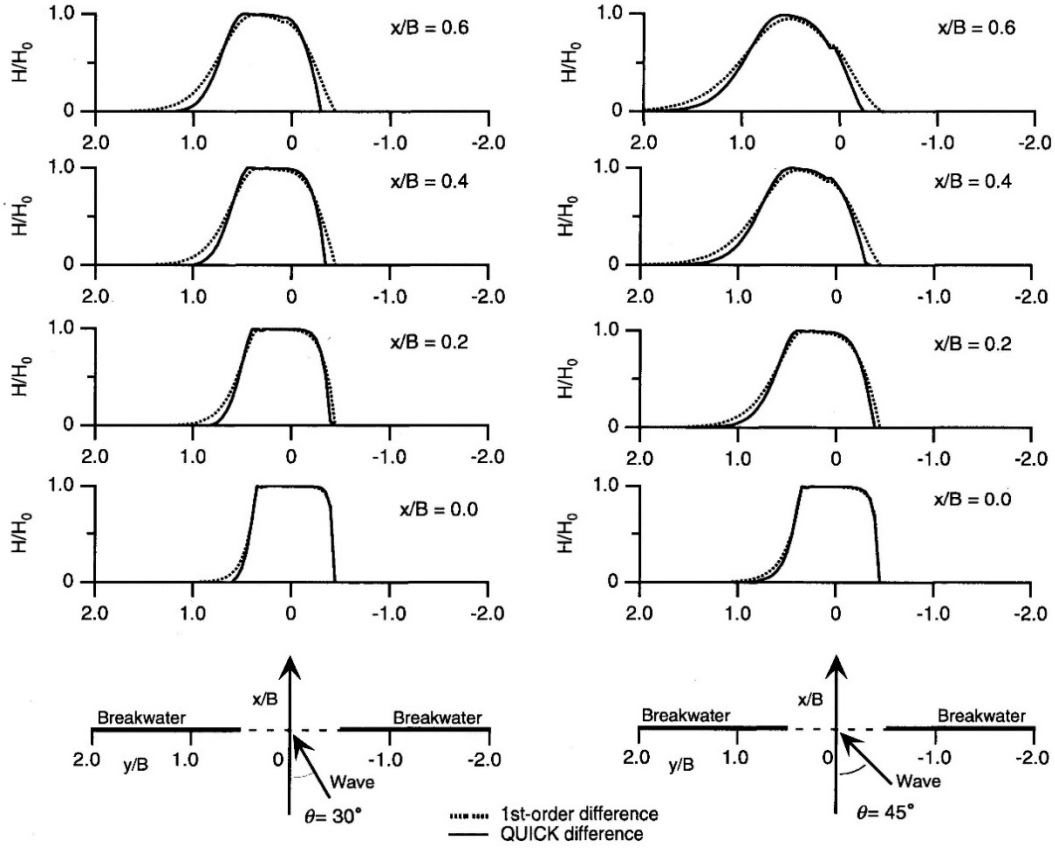
ここで，β は重み定数である．本研究では $\beta=1.0$ を用いた．

式 (8) の左辺第 3 項についても QUICK による差分化を行う．ただし，境界においては 1 次精度風上差分を用いる．式 (8) の回折項には 2 次精度中心差分を用いる．最終的に得られる差分方程式は以下のように書ける．

$$\begin{aligned}
&A_1S_n^{ijk}+A_2S_n^{i(j-2)k}+A_3S_n^{i(j-1)k}\\
&\quad+A_4S_n^{i(j+1)k}+A_5S_n^{i(j+2)k}+A_6S_n^{ij(k-2)}\\
&\quad+A_7S_n^{ij(k-1)}+A_8S_n^{ij(k+1)}+A_9S_n^{ij(k+2)}=-BS_n^{(i-1)jk}
\end{aligned} \tag{12}$$

A_1 ～ A_9 および B の具体的な表示は，付録に示す．

式 (12) の右辺の $S_n^{(i-1)jk}$ は既知であり，周波数成分 n に対して，$j=1$～J, $k=1$～K の $J\times K$ 個の連立方程式を解くことによって S_n^{ijk} を求める．J および K



(a) incident angle $\theta = 30^\circ$

(b) incident angle $\theta = 45^\circ$

Fig.3 Wave heights of uni-directional wave behind breakwaters

はそれぞれ y 軸方向の格子分割数と波向き分割数である．沖側境界条件として，任意の入射波スペクトルを与えると，i の増加する方向に順次 S_n^{ijk} を求めることができる．

計算された S_n^{ijk} を用いて，有義波高 $H_{1/3}$，有義周期 $T_{1/3}$，平均波向き $\bar{\theta}$ は，以下の式で求める．

$$H_{1/3} = 4.0\sqrt{m_0} \tag{13}$$

$$T_{1/3} = T_0\sqrt{m_0 / m_2} / \bar{T}_0 \tag{14}$$

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K}\theta_k S_n^{ijk} / m_0 \tag{15}$$

ここで，

$$m_i = \sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} f_n^i S_n^{ijk} \tag{16}$$

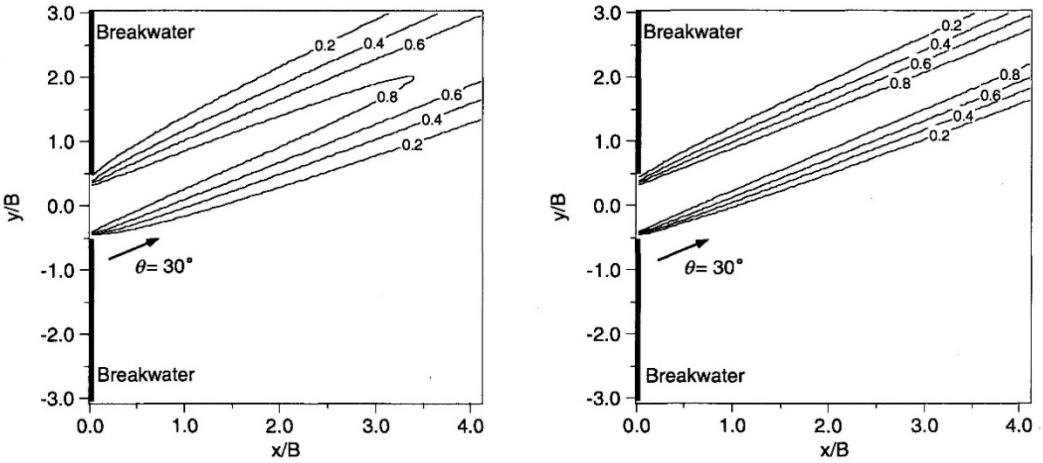
である．N は周波数分割数であり，T_0 および $\bar{T}_0$ はそれぞれ沖波の有義周期と平均周期である．砕波減衰項は，高山らの定式化[9]を用いる．

4. 開口防波堤背後の波高分布

(1) 単一成分波

1次精度風上差分による計算モデルとQUICKによる計算モデルの数値拡散について比較するため，12 m の一様水深場に設置された防波堤の開口部に，波向き $\theta = 30^\circ$ および $\theta = 45^\circ$ で波が入射する場合の防波堤背後の波高分布の計算を行った．開口部は $-0.5 < y / B < 0.5$ であり，15 分割した．計算にあたっては，差分による数値拡散の違いを調べるために，回折影響係数を $\kappa = 0$ とした．

Fig.3 は，$x/B = 0.2$ ごとの断面における入射波高に対する無次元波高分布 H/H_0 である．図中の実線は



(a) 1st-order difference

(b) QUICK difference

Fig.4 Spatial wave height distribution of uni-directional wave behind breakwaters

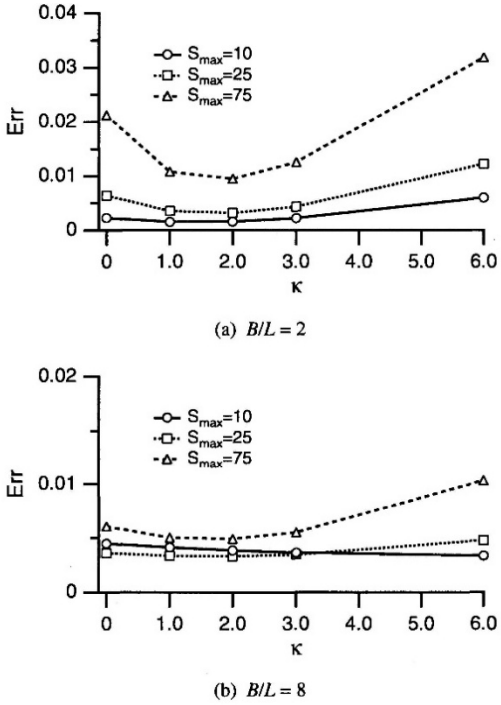
QUICK による計算結果，点線は 1 次精度風上差分による計算結果である．全く数値拡散がなければ，入射波の波高は矩形分布を保ったまま伝達される．しかし，実際の計算では数値拡散が生じる．**Fig.3** によると，実線で示される QUICK による計算結果は，点線で示される 1 次精度風上差分による計算結果より数値拡散の影響が抑えられていることがわかる．また，波の入射角が大きいほど数値拡散は大きくなる様子がみられる．波向きが $\theta = 0°$ の場合には両モデルともに数値拡散はほとんどなく，入射波高は矩形分布を保ったまま伝播した．

Fig.4 は，波向きが $\theta = 30°$ のケースについて等波高線を示したものである．波高分布の広がりは，開口部から離れるほど大きくなる．**Fig.4** からも，(b) 図の QUICK による計算結果の方が，(a) 図の 1 次精度風上差分に比べて数値拡散の影響が小さくなっていることがみてとれる．

(2) 多方向不規則波

本計算モデルには回折項が含まれているため，適切な回折影響係数 κ を与えることにより，防波堤のような構造物背後の波高変化に回折を考慮することができる．1 次精度風上差分による防波堤背後の波浪変形計算結果は，防波堤開口幅が大きく，かつ，方向分布幅が広帯域の場合には Sommerfeld の理論値と比較的よく一致するが，開口幅が小さく，また，方向分布が狭帯域の場合には，Sommerfeld の理論値と合わないことが知られている[9]．

ここでは，波長を L，防波堤の開口幅を B として，

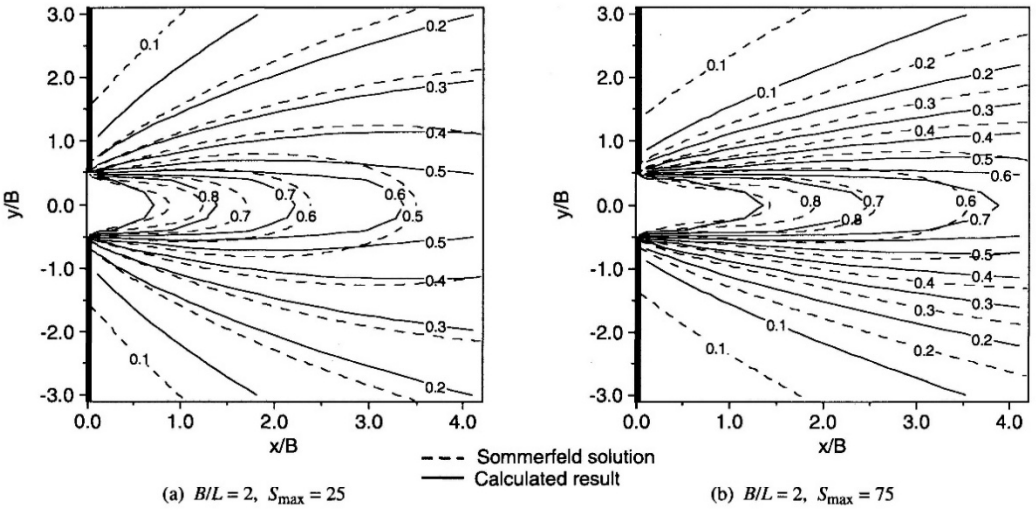


(a) $B/L = 2$

(b) $B/L = 8$

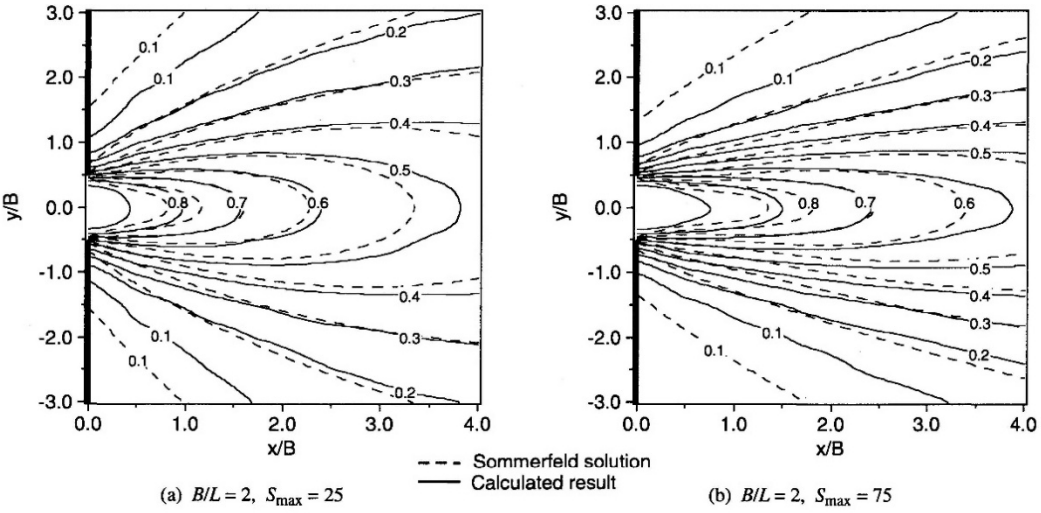
Fig.5 Error against κ

$B/L = 2$ および $B/L = 8$ の場合について，回折影響係数 κ を変化させた計算を行い，Sommerfeld の理論値と比較する．計算にあたっては，周波数スペクトルは JONSWAP 型スペクトル，方向関数は光易型方向関数



(a) $B/L = 2,\ S_{max} = 25$ (b) $B/L = 2,\ S_{max} = 75$

Fig.6 Comparison of wave height distribution calculated by 1st-order upwind difference scheme with Sommerfeld solution



(a) $B/L = 2,\ S_{max} = 25$ (b) $B/L = 2,\ S_{max} = 75$

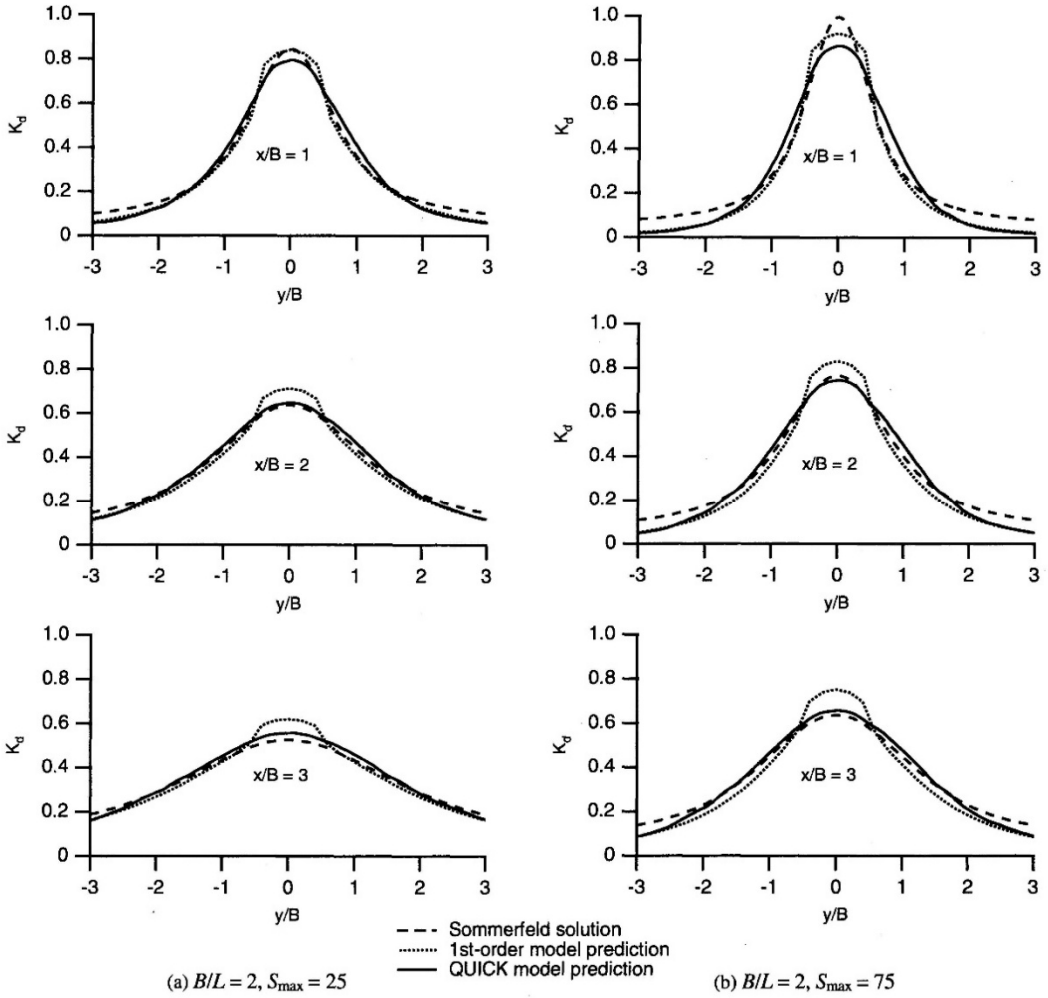
Fig.7 Comparison of wave height distribution calculated by QUICK scheme with Sommerfeld solution

を用い，$\delta x = \delta y = B/20$, $N = 10$ および $K = 36$ とした．計算結果と理論値との誤差は，次式のように定義する．

$$Err = \frac{\sum_{ij}\left(Ht_{ij} - Hc_{ij}\right)^2}{\sqrt{\sum_{ij} Ht_{ij}^2}\sqrt{\sum_{ij} Hc_{ij}^2}} \tag{17}$$

ここで，Ht および Hc はそれぞれ有義波高の理論値および計算値である．

Fig.5 は κ に対する誤差を示したものである．$B/L = 2$ の場合，方向集中度 S_{max} にかかわらず，$\kappa = 2.0$ で誤差が最小となっている．$B/L = 8$ の場合，方向集中度が大きい $S_{max} = 75$ では $B/L = 2$ と同様に $\kappa = 2.0$ で誤差が最小となっている．方向集中度が小さい $S_{max} = 10$ および $S_{max} = 25$ では必ずしも $\kappa = 2.0$ で誤差が最小となってはいないが，κ の値が変わっても Err はほとんど変化しない．これは従来いわれているように，開口幅が大きく，かつ，方向分布幅が大きい場合には，元々計算値と理論値が一致することによる．以下の計算に当たっては，回折影響係数は $\kappa = 2.0$ とする．この値は，



(a) $B/L = 2$, $S_{max} = 25$　　(b) $B/L = 2$, $S_{max} = 75$

Fig.8 Wave height distributions at three cross sections

間瀬ら[13]の 2.5 より若干小さな値である.

Fig.6 は，無次元防波堤開口幅が $B/L = 2$ の場合について，回折項を含まないエネルギー平衡方程式の 1 次精度風上差分による計算結果と，Sommerfeld の理論値を比較したものである. 実線が計算結果，点線が理論値である.

同様の計算条件で，回折項を含むエネルギー平衡方程式の QUICK による計算結果を **Fig.7** に示す. **Fig.6** と **Fig.7** を比較すると，防波堤背後の回折係数が 0.1 となる領域ではいずれの場合も一致の程度はよくないが，開口幅が狭く，かつ，方向分布幅が小さい場合にも本計算モデルによる計算結果は Sommerfeld の理論値により近くなることがわかる.

Fig.8 は，開口部が $B/L = 2$ の場合について，$x/B = 1, 2, 3$ の測線における無次元波高を示したものである. 本計算モデルによる算定結果と，現在広く用いられている回折項を含まない 1 次精度計算モデルによる算定結果および Sommerfeld の理論値とを比較した. 点線が回折項を含まない 1 次精度風上差分による計算結果，実線が本計算モデルによる計算結果，破線が理論値である. Sommerfeld の理論値は，防波堤開口部付近で 1.0 より大きくなる部分があるが，エネルギー平衡方程式の計算結果は 1.0 より大きくなることはない. そのため，$x/B = 1$ の断面ではどちらの計算結果も $y/B = 0$ の付近で一致の程度がよくない. 回折項を含まない計算結果はいずれの断面においても $y/B = 0$ の付近の波高が大きく算定される. 本計算モデルによる波高は滑らかに変化し，広範囲にわたって理論値に一致する.

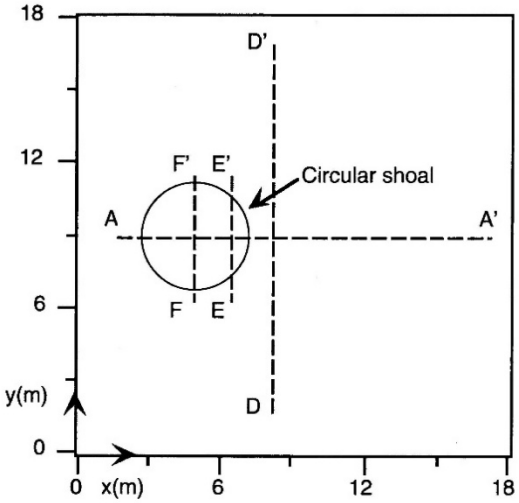


Fig.9 Layout of circular shoal

5. 球面浅瀬による波浪変形

本研究で提案する波浪変形予測モデルを，Chawla ら[14]の球面浅瀬による多方向不規則波の波浪変形実験に適用して実験結果と計算結果を比較し，本計算モデルの妥当性を検討する．

実験に用いられた球面浅瀬は，**Fig.9** に示すような，水平床に設置された半径 2.57 m，高さ 0.37 m の円形状の浅瀬である．浅瀬の中心は $x = 5.0$ m, $y = 9.0$ m である．y 軸上に造波板が設置され，入射波は主に x 軸方向に伝播する．Chawla ら[14]の計測線のうち，本研究では **Fig.9** に示した 4 測線を比較の対象とする．

実験で用いられた不規則波は，周波数スペクトルとして TMA スペクトル，方向関数は wrapped normal directional spreading function を有するものである．入射波高，方向集中度の条件を変えて実験が行われた．

数値計算に当たっては $\delta x = \delta y = 0.1$ m, $N = 20$, $K = 36$ および $\kappa = 2.0$ とした．

Fig.10 は，Test 3（波高が小さい，狭帯域方向分布のケース）について，4 測線における無次元波高 $H_s/(H_s)_0$ を示したものである．実線は計算結果，○は実験結果である．まず，y 方向断面について見てみると，E-E' 断面において波高のピークに差があるが，その他は計算結果と実験結果の一致はよい．x 方向断面 A-A' では，計算波高のピーク値が少し小さくまたその位置がずれているが，おおむね一致している．

Fig.11 は Test 4（波高が小さい，広帯域方向分布のケース）について，4 測線における無次元波高を比較したものである．y 方向断面 E-E' において計算波高のピーク値が若干小さくなっているが，それ以外ではいずれの断面においても実験結果と計算結果はよく一致している．

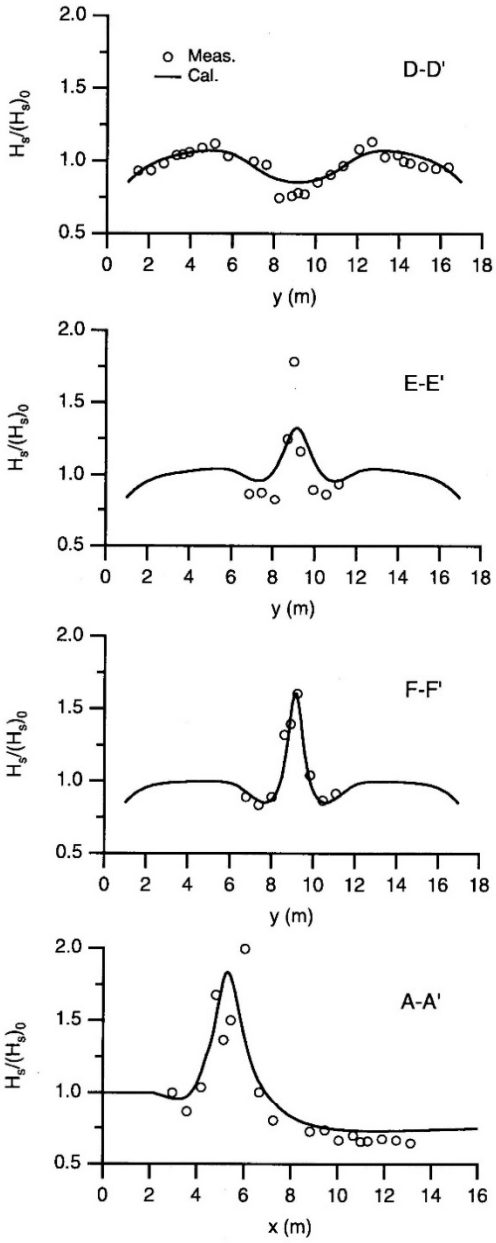


Fig.10 Comparison of calculated wave heights with experimental ones (Test 3)

Fig.12 は，Test 5（波高が大きい，狭帯域方向分布のケース）についての無次元波高を示したものである．

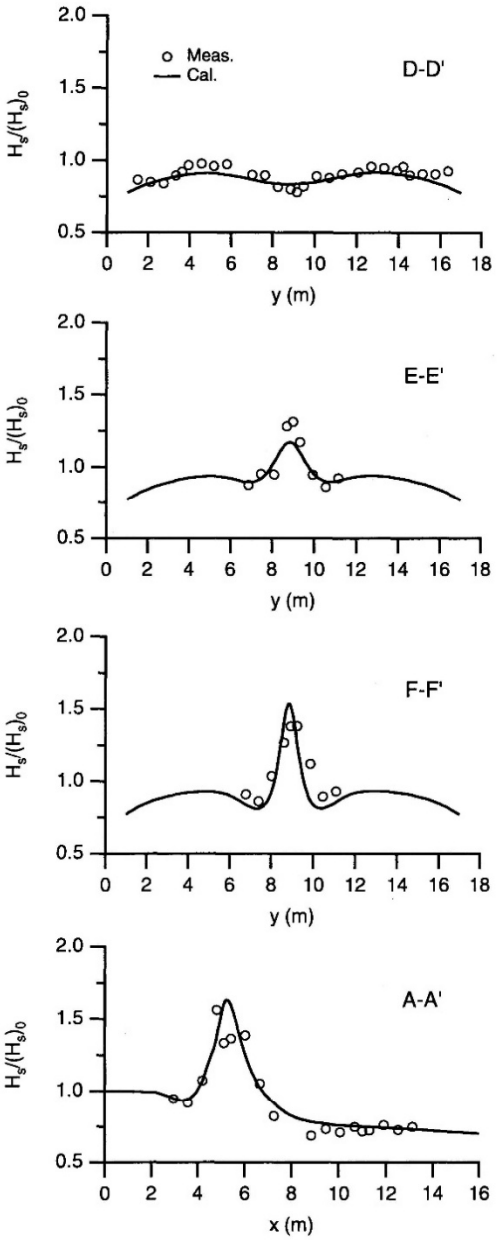


Fig.11 Comparison of calculated wave heights with experimental ones (Test 4)

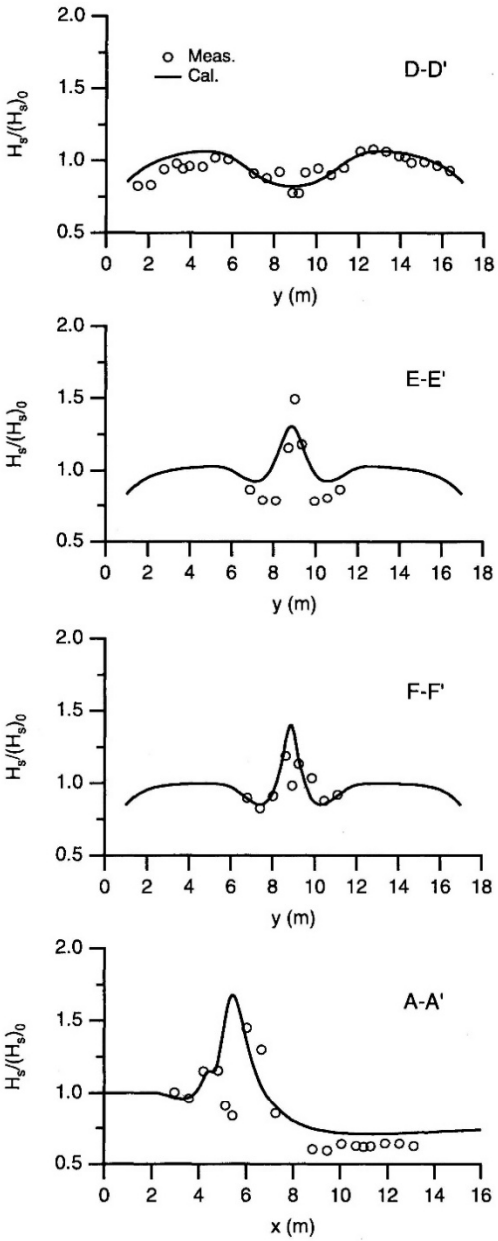


Fig.12 Comparison of calculated wave heights with experimental ones (Test 5)

Test 5 は，Test 3 よりも入射波高が大きいため，砕波減衰が顕著なケースである．D-D' 断面では計算結果と実験結果はよく一致している．E-E' 断面では計算結果のピーク値は実験結果のピーク値より若干小さく，計算結果の極小値は実験結果のそれよりも大きくなっている．F-F' 断面では計算ではピークとなっているところで，実験結果では一旦小さくなっているところが異なる．A-A' 断面では，F-F' 断面と同様に，計算結果でピークとなるところで実験結果では小さな値となっており，双山型の波高分布が再現されていない．

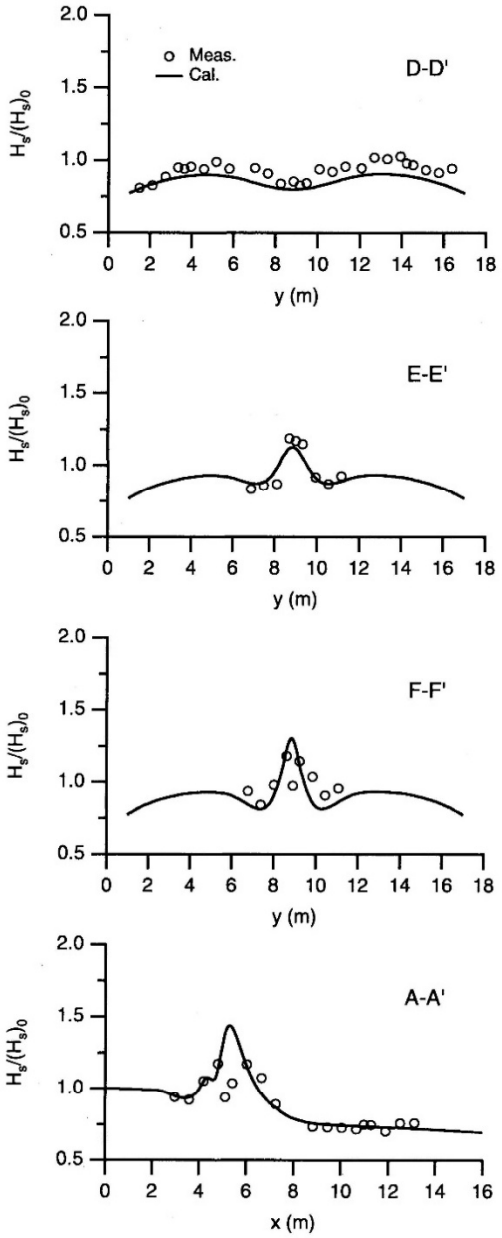


Fig.13 Comparison of calculated wave heights with experimental ones (Test 6)

Fig.13 は，Test 6（波高が大きい，広帯域方向分布のケース）についての無次元波高を示したものである．Test 6 の計算結果は，Test 5 の計算結果と同様に，球面浅瀬頂上から少し離れた背後では実験結果と一致しているが，球面浅瀬の直上および直後では双山形の実験結果が再現できていない．

Fig.12 および **Fig.13** の結果から，砕波が顕著な場合，計算結果は球面浅瀬頂上付近での波高減衰を過小評価する傾向にあることがわかった．なお，この海底地形に対しては，1 次あるいは高次差分，回折項のあり・なしのどの組み合わせによる計算結果の差異も小さかった．

6. まとめ

本研究は，砕波減衰項および回折項を有するエネルギー平衡方程式に対して高次精度の風上差分を用いた多方向不規則波の変形計算モデルを提案した．本計算モデルは数値的な拡散効果の影響を抑えた上で，回折項によって回折効果を考慮する．

まず，防波堤開口部に $\theta = 30°$ および $\theta = 45°$ の方向から単一方向規則波が進入する波浪変形計算を行い，1 次精度風上差分と QUICK による差分との数値拡散について比較した．その結果，QUICK による計算モデルは，数値拡散の影響を抑えられることがわかった．

次に，エネルギー平衡方程式に導入した回折影響係数 κ の最適値を求めるために，防波堤開口部に多方向不規則波が進入する波浪変形計算を行い，Sommerfeld の理論値と比較した．誤差が最小となる κ の値は 2.0 が適当であった．$\kappa = 2.0$ として計算を行うと，防波堤開口幅が狭く，かつ，方向分散幅が小さい場合にも計算結果は理論値とよく一致した．

最後に，本モデルの適用例として，Chawla ら[14] が行った球面浅瀬による多方向不規則波の波浪変形実験結果と計算結果の比較・検討を行った．砕波減衰が顕著なケースにおいては計算結果のピークが実験結果のそれよりも大きくなり，波高減衰を再現できない点も見られたが，両者の一致の程度は満足できるものであった．ただし，砕波減衰については，他のモデルによる検討が必要である．

謝辞：本研究に当たり，（株）ニュージェックより研究助成を受けたことを付記し，ここに 謝意を表する．また，デラウェア大学 Kirby 教授には球面浅瀬による波浪実験結果のデータ提供を頂き，謝意を表する．

付録

ここでは，式 (12) における係数 A_1～A_9 および B を

示す.

$$A_1 = v_{x_n}^{(i+1)jk}/\delta x + \varepsilon_{b_n}^{ij} + \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2}\left\{\begin{matrix}(CCg)^{i(j+1)k} + (CCg)^{ijk} \\ -(CCg)^{i(j+1/2)k}\end{matrix}\right\}\cos^2\theta_k + \frac{1}{16\delta y}\left\{9v_{y_n}^{i(j+1)k} - 9v_{y_n}^{ijk} + 3\eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right| + 3\eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} + \frac{1}{16\delta\theta}\left\{9v_{\theta_n}^{ij(k+1)} - 9v_{\theta_n}^{ijk} + 3\eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right| + 3\eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (18)$$

$$A_2 = \frac{1}{16\delta y}\left\{v_{y_n}^{ijk} + \eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (19)$$

$$A_3 = -\frac{1}{16\delta y}\left\{v_{y_n}^{i(j+1)k} + 9v_{y_n}^{ijk} + \eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right| + 3\eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (20)$$

$$A_4 = \frac{1}{16\delta y}\left\{9v_{y_n}^{i(j+1)k} + v_{y_n}^{ijk} - 3\eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right| - \eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (21)$$

$$A_5 = \frac{1}{16\delta y}\left\{-v_{y_n}^{i(j+1)k} + \eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right|\right\} \quad (22)$$

$$A_6 = \frac{1}{16\delta\theta}\left\{v_{\theta_n}^{ijk} + \eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (23)$$

$$A_7 = -\frac{1}{16\delta\theta}\left\{v_{\theta_n}^{ij(k+1)} + 9v_{\theta_n}^{ijk} + \eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right| + 3\eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (24)$$

$$A_8 = \frac{1}{16\delta\theta}\left\{9v_{\theta_n}^{ij(k+1)} + v_{\theta_n}^{ijk} - 3\eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right| - \eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (25)$$

$$A_9 = \frac{1}{16\delta\theta}\left\{-v_{\theta_n}^{ij(k+1)} + \eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right|\right\} \quad (26)$$

$$B = v_{x_n}^{ijk}/\delta x \quad (27)$$

ただし，j または k が境界となるときは，以下のようになる.

(1) j, k ともに境界の場合

$$A_1 = v_{x_n}^{(i+1)jk}/\delta x + \varepsilon_{b_n}^{ij} + \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2}\left\{\begin{matrix}(CCg)^{i(j+1)k} + (CCg)^{ijk} \\ -(CCg)^{i(j+1/2)k}\end{matrix}\right\}\cos^2\theta_k + \frac{1}{2\delta y}\left\{v_{y_n}^{i(j+1)k} - v_{y_n}^{ijk} + \eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right| + \eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} + \frac{1}{2\delta\theta}\left\{v_{\theta_n}^{ij(k+1)} - v_{\theta_n}^{ijk} + \eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right| + \eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (28)$$

$$A_3 = -\frac{1}{2\delta y}\left\{v_{y_n}^{ijk} + \eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (29)$$

$$A_4 = \frac{1}{2\delta y}\left\{v_{y_n}^{i(j+1)k} - \eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right|\right\} \quad (30)$$

$$A_7 = -\frac{1}{2\delta\theta}\left\{v_{\theta_n}^{ijk} + \eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (31)$$

$$A_8 = \frac{1}{2\delta\theta}\left\{v_{\theta_n}^{ij(k+1)} - \eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right|\right\} \quad (32)$$

$$A_2 = A_5 = A_6 = A_9 = 0 \quad (33)$$

$$\dot{B} = v_{x_n}^{ijk}/\delta x \quad (34)$$

(2) j のみ境界となるとき

$$A_1 = v_{x_n}^{(i+1)jk}/\delta x + \varepsilon_{b_n}^{ij} + \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2}\left\{\begin{matrix}(CCg)^{i(j+1)k} + (CCg)^{ijk} \\ -(CCg)^{i(j+1/2)k}\end{matrix}\right\}\cos^2\theta_k + \frac{1}{2\delta y}\left\{v_{y_n}^{i(j+1)k} - v_{y_n}^{ijk} + \eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right| + \eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} + \frac{1}{16\delta\theta}\left\{9v_{\theta_n}^{ij(k+1)} - 9v_{\theta_n}^{ijk} + 3\eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right| + 3\eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (35)$$

$$A_3 = -\frac{1}{2\delta y}\left\{v_{y_n}^{ijk} + \eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (36)$$

$$A_4 = \frac{1}{2\delta y}\left\{v_{y_n}^{i(j+1)k} - \eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right|\right\} \quad (37)$$

$$A_6 = \frac{1}{16\delta\theta}\left\{v_{\theta_n}^{ijk} + \eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (38)$$

$$A_7 = -\frac{1}{16\delta\theta}\left\{v_{\theta_n}^{ij(k+1)} + 9v_{\theta_n}^{ijk} + \eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right| + 3\eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (39)$$

$$A_8 = \frac{1}{16\delta\theta}\left\{9v_{\theta_n}^{ij(k+1)} + v_{\theta_n}^{ijk} - 3\eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right| - \eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (40)$$

$$A_9 = \frac{1}{16\delta\theta}\left\{-v_{\theta_n}^{ij(k+1)} + \eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right|\right\} \quad (41)$$

$$A_2 = A_5 = 0 \quad (42)$$

$$B = v_{x_n}^{ijk}/\delta x \quad (43)$$

(3) k のみ境界となるとき

$$A_1 = v_{x_n}^{(i+1)jk}/\delta x + \varepsilon_{b_n}^{ij} + \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2}\left\{\begin{matrix}(CCg)^{i(j+1)k} + (CCg)^{ijk} \\ -(CCg)^{i(j+1/2)k}\end{matrix}\right\}\cos^2\theta_k + \frac{1}{16\delta y}\left\{9v_{y_n}^{i(j+1)k} - 9v_{y_n}^{ijk} + 3\eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right| + 3\eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} + \frac{1}{2\delta\theta}\left\{v_{\theta_n}^{ij(k+1)} - v_{\theta_n}^{ijk} + \eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right| + \eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \quad (44)$$

$$A_2 = \frac{1}{16\delta y}\left\{v_{y_n}^{ijk} + \eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} \tag{45}$$

$$A_3 = -\frac{1}{16\delta y}\left\{v_{y_n}^{i(j+1)k} + 9v_{y_n}^{ijk} + \eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right| + 3\eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} \tag{46}$$

$$A_4 = \frac{1}{16\delta y}\left\{9v_{y_n}^{i(j+1)k} + v_{y_n}^{ijk} - 3\eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right| - \eta\left|v_{y_n}^{ijk}\right|\right\} \tag{47}$$

$$A_5 = \frac{1}{16\delta y}\left\{-v_{y_n}^{i(j+1)k} + \eta\left|v_{y_n}^{i(j+1)k}\right|\right\} \tag{48}$$

$$A_7 = -\frac{1}{2\delta\theta}\left\{v_{\theta_n}^{ijk} + \eta\left|v_{\theta_n}^{ijk}\right|\right\} \tag{49}$$

$$A_8 = \frac{1}{2\delta\theta}\left\{v_{\theta_n}^{ij(k+1)} - \eta\left|v_{\theta_n}^{ij(k+1)}\right|\right\} \tag{50}$$

$$A_6 = A_9 = 0 \tag{51}$$

$$B = v_{x_n}^{ijk} / \delta x \tag{52}$$

参考文献

1) 間瀬　肇：風波の浅水・砕波変形，第 35 回水工学に関する夏期研修会講義集，B コース，pp.B-5-1-B-5-20, 1999.

2) Madsen, P.A., Murray, R. and Sørensen, O.R. : A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, *Coastal Eng.*, Vol 15, pp.371-388, 1991.

3) Nwogu, O. : Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, *Jour. Waterways, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, Vol.119, No.6, pp.618-638, 1993.

4) Wei, G. and Kirby, J.T. : Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations, *Jour. Waterways, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, Vol.121, No.5, pp.251-261, 1995.

5) Peregrine, D.H. : Long waves on a beach, *Jour. Fluid Mech.*, Vol.27, pp.815-827, 1967.

6) 土木学会海岸工学委員会：海岸波動 －波・構造物・地盤の相互作用の解析法－，土木学会，pp.51-59,1994.

7) WAMDI group : The WAM model - a third generation ocean wave prediction model, *Jour. Physical Oceanography*, Vol.18, pp.1775-1810, 1988.

8) Booij, N., Holthuijsen, L.H. and Ris, R.C. : The "SWAN" wave model for shallow water, *Proc. 25th Int. Conf Coastal Eng.*, pp.668-676, 1996.

9) 高山知司，池田直太，平石哲也：砕波および反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告，第 30 巻，第 1 号，pp.21-67, 1991.

10) Resio, D.T. : A steady-state wave model for coastal applications, *Proc. 21st Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, pp.929-940, 1988.

11) Booij, N., Holthuijsen, L.H., Doorn, N. and Kieftenburg, A.T.M.M. : Diffraction in a spectral wave model, *Proc. 3rd Int. Symp. on Wave '97*, ASCE, pp.243-255, 1997.

12) Rivero, F.J., Arcilla, A.S. and Carci, E. : An analysis of diffraction in spectral wave models, *Proc. 3rd Int. Symp. on Wave '97*, ASCE, pp.431-445, 1997.

13) 間瀬　肇，高山知司，国富將嗣，三島豊秋：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，No.628/II-48, pp.177-187, 1999.

14) Chawla, A., Özkan, H.T. and Kirby, J.T. : Spectral model for wave transformation and breaking over irregular bathymetory, *Jour. Waterways, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, Vol.124, No.4, pp.189-198, 1998.

15) Leonard, B.P. : A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation, *Computer Methods in Applied Mech. and Eng.*, Vol.19, pp.59-98, 1979.

(2000.9.8 受付)

PHASE AVERAGING MODEL FOR MULTI-DIRECTIONAL RANDOM WAVE TRANSFORMATION BY HIGH ORDER UPWIND DIFFERENCE SCHEME

Hajime MASE, Kazuya OKI, Tomotsuka TAKAYAMA and Tetsuo SAKAI

A numerical model, based on an energy balance equation with wave breaking and diffraction effects, is proposed to predict the transformation of multi-directional random waves over a varying bathymetry. In the numerical model, a high-order difference scheme called QUICK is employed to suppress numerical diffusions. The numerical predictions were compared with the theoretical predictions of wave heights behind breakwaters and with experimental results of wave transformations due to a circular shoal conducted by Chawla et al. (1998). The comparison showed that the numerical model performs well as a whole, except a poor reproduction of abrupt decrease in the wave height due to breaking and subsequent increase near the top of the shoal.

波浪変形シミュレーション

EGWAVE

Ver.3.0

エネルギー平衡方程式法による波の浅海変形解析

（京都大学開発モデル ExEBED ／License No.C010. C011）

ユーザーズマニュアル 第一版

AQUA NET

株式会社 水域ネットワーク

www.aquanet21.co.jp