

非線形波浪変形モデル（Ver.4.6）プログラム

使用説明書

平成 24 年 2 月

独立行政法人 港湾空港技術研究所
海洋研究領域 波浪研究チーム

「ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」発足の経緯と成果

港湾近傍の波浪変形計算を精度よく検討するためには、波の回折、屈折、浅水変形、砕波などを同時に計算できるだけでなく、波の非線形性による波形の歪みもある程度推定できる計算モデルが必要である。一方、特に 1990 年代前半には、世界各国の研究者によって波の非線形性と分散性を考慮できる波動方程式が盛んに提案され、この頃には、分散特性が修正され、浅海域における波浪変形計算が可能なブシネスク方程式も登場した。

このような研究状況をふまえ、運輸省港湾空港技術研究所水工部波浪研究室（当時）では、次世代の波浪変形計算モデルの開発に着手し、平成 10 年度までに、分散特性の補正項を含む Madsen 型のブシネスク方程式を基礎とするブシネスクモデルを開発した。しかしながら、港湾・海岸における実務的な波浪変形計算に対してこれを広く適用するためには、入射境界や側方境界の与え方、砕波や遡上、部分反射の扱い方など、現地の波浪、地形条件に対応したさまざまな境界処理法に、開発・改良の余地が多く残されたままであった。

そこで、平成 11 年 1 月には、「浅海域非線形波浪モデルの実務への適用性に関する検討会」を開催し、大学や民間の研究者や技術者とともに、ブシネスクモデルに関する研究・開発の現状や、実際の港湾における調査プロジェクトに適用した際の効果や課題等について、活発な議論が交された。

また、これらの業務を引き継いだ独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部波浪研究室が、平成 13 年度に実施した「現地観測データ整理と計算結果の比較検討業務」では、学識経験者を擁した委員会ならびに幹事会を開催し、実際の計算事例を通じて、ブシネスクモデルの活用が期待される実務課題や今後克服すべき問題点等について、貴重な助言を頂戴した。さらに平成 13 年 12 月には、これらの成果の普及を目的とした講習会を開催した。このとき公開されたブシネスクモデルは、「NOWT-PARI Ver4.6 β 」(Nonlinear Wave Transformation model by PARI)と呼ばれている。

さらに、平成 14 年度以降には、平成 13 年 12 月の講習会を継続・発展させた「ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」を毎年 1 回のペースで開催している。

これまでに、港湾・海岸設計の実務において、複雑な海底地形を有する港湾や海岸周辺の波浪場の推定や、風波および長周期波に対する港内静穏度解析などの適用事例が着実に蓄積されている。また最近では、ブシネスクモデルと船体動揺解析モデル、あるいは 3 次元流体解析モデルと組み合わせて、長周期波に対する係留船舶の動揺や、護岸における越波飛沫の飛散状況の再現等が試みられるなど、学術的な応用例も多くみられる。

一方、これらの適用例や応用例を通じて得られた成果や問題点は、本勉強会や学会等での発表の場を通じて開発者およびその他の利用者へフィードバックされ、更なるモデルの改良や開発に寄与している。これらは、プログラムコードのデバッグから新たな境界処理法の開発・改良まで多岐にわたり、本勉強会にて、適宜、バージョンアップ版が公開されている。

本勉強会は、平成 23 年度（平成 24 年 1 月 30 日開催）で第 10 回を数えた.

「ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」開催趣旨

(平成 13 年度講習会資料より抜粋)

近年，港湾設計ならびに港内静穏度評価に関する業務において，屈折系および回折系の波浪変形はもとより，波の非線形性を考慮した高精度な波浪変形解析プログラムである“ブシネスクモデル”に対する需要が急速に高まっている．

独立行政法人港湾空港技術研究所では，早くより当該モデルの開発業務に携わり，基本的なモデルの開発，およびいくつかの計算事例の蓄積はすでに終了している．今後は，より多くの現地適用事例の蓄積に努め，実務における計算モデルの信頼性の獲得を目指すとともに，さらなるモデル開発を行い，さまざまな計算条件および境界条件に対する適用性の向上を図る予定であり，港湾計画のツールとして広く活用されることを期待する．

このような経緯を踏まえた，本調査の目的は次の通りである．

- (1) 独立行政法人港湾空港技術研究所で開発された“ブシネスクモデル”の基本版 (Ver.4.6) を，公共の調査・設計業務への適用，および学術的な利用に関する限りにおいて，プログラムソースを関係者に公開する（営利目的への利用は認めない）．
- (2) “ブシネスクモデル”の基本概念の普及に努め，波浪変形計算に関する我が国の技術力の維持・向上に資する．
- (3) 学術的な知見や助言を広く収集し，“ブシネスクモデル”のさらなる計算精度および現地適用性の向上を目指す．

ビジネスモデル（公開版 NOWT-PARI）のリリース履歴

平成 13 年 12 月 Ver4.6β 平成13年度ビジネスモデル検討会で使用した評価版

平成 15 年 1 月 Ver4.6c デバッグ，計算結果出力方法の変更に伴うプログラム修正※1

※1 Ver4.6βに関する bug 情報の公開のみ（プログラムコードは非リリース）

- ・ 計算領域の外周スポンジ層の範囲設定に伴う bug の修正
- ・ 平均波高および有義波高の算定方法の変更（算定の可否を判断する最小波数を導入）

平成 16 年 4 月 Ver4.6c2 プログラムコードの整理に伴うプログラム修正（非リリース）

- ・ 変数の宣言における配列，型宣言，精度の統一
- ・ 変数の初期化の徹底
- ・ Y 方向運動方程式の係数算定に係る DO ループの効率化（2 重ループを跨ぐ IF 文排除）

平成 17 年 2 月 Ver4.6c3 開境界，部分反射境界の設定法の改良に伴うプログラム修正

- ・ 層流抵抗項の高次化による高次スポンジ層の導入

平成 18 年 6 月 Ver4.6c4 重大な bug が確認されたことによる緊急リリース

- ・ Ver4.6c3 において，水域と陸域の境界格子で碎波計算を行った場合に，演算の破綻を引き起こす恐れのある bug を修正

平成 19 年 2 月 Ver4.6c5a 演算の安定性や計算精度の向上に寄与するプログラム修正

- ・ 水位 E，水平流速 U，V，等の各変量の算定時刻の統一
- ・ 平均水位 EAVG の算定法の修正とそれによる波高 HRMS※2，HAKOU※3 の補正

※2 HRMS：水位の 2 乗平均と波高頻度分布との関係から算定

※3 HAKOU：ゼロアップ法による平均波高と波高頻度分布との関係から算定

- ・ 碎波計算に用いる流量振幅の定義の修正
- ・ 碎波計算に用いる渦動粘性係数の算定時刻の修正
- ・ 碎波計算に用いる係数 α_D の定義の修正
- ・ 微小振幅波理論あるいは共分散法による平均波向の算定および出力

平成 21 年 2 月 Ver4.6c6a 任意形状スペクトル造波法の導入に伴うプログラム修正

- ・ 外部プログラム（実行ファイルを提供）により作成される任意形状スペクトルに対する成分波リストを読み込み，造波するための機能の追加
- ・ 沖波の波高頻度分布の変化に対する波高 HRMS，HAKOU の算定法の対応（係数の修正）

- ・ 計算条件を設定するコントロールファイルの導入

平成 22 年 1 月 Ver4.6c7a 重大な bug が確認されたことによる緊急リリース

- ・ Ver4.6c6a において、沖側境界から沖波を入射させる際、目標波が常に正しく造波できない原因となっている bug（水面波形の表示式について、Ver4.6c5a 以前のバージョンのものに比べ、初期位相が 90° 異なるとともに、角周波数の符合が逆になっている）を以前の定義に修正（※Ver4.6c5a 以前のバージョンでは、目標波が正しく造波されることを確認している）

平成 23 年 2 月 Ver4.6d7a 任意水深の造波境界に対応

- ・ 沖側境界の水深変化に伴う波速変化を考慮した任意水深の造波境界へ対応
- ・ calcmd（コントロールファイル名）を calcmd_d へ変更し、パラメータ設定項目を再整理
- ・ 計算格子のサイズ、数に応じソースコードを変更する手間を解消するため、depth（水深データファイル）、addfd（スポンジ層データファイル）のヘッダー部にこれらの情報を追加し、それぞれのファイル名を depth_d, addfd_d へ変更
- ・ 流量 Flux (P, Q) から、同じ位置（計算格子中央）及び同時刻（各計算ステップの x-sweep 及び y-sweep）の水平 2 成分流速を算出するサブルーチン：CALCUV において、y 方向流速 v を算定する IF ブロック文に bug が確認されたことへの対応（デバッグ）

※uvavg に出力される計算結果が若干修正されるとともに、x 方向の砕波計算（サブルーチン：CALBRK）の状況にも若干影響するものの、その程度は非常に小さいと思われる。

(誤)

```
if( mod(NSTEP,1) .eq. 1 )then
  V(I,J) = Q(I,J)/DDD                                ! (x-dir) V(n)
else
  V(I,J) = ( Q(I,J)+QOLD(I,J) ) / 2.0D0 / DDD        ! (y-dir) V(n+1/2)
endif
```

(正)

```
if( mod(NSTEP,2) .eq. 1 )then    ! debug 2010/12/22
  V(I,J) = Q(I,J)/DDD                                ! (x-dir) V(n)
else
  V(I,J) = ( Q(I,J)+QOLD(I,J) ) / 2.0D0 / DDD        ! (y-dir) V(n+1/2)
endif
```

平成 24 年 1 月 Ver4.6d8a 複数方向スペクトル造波の導入に伴うプログラム修正

- ・ 外部入力する成分波リストファイル (spectdat.in) のフォーマット修正

1 行目 : 各方向スペクトル (に対応する成分波リストセット) の数 : NRP

2 行目以降 : 各方向スペクトルの成分波リストセット

ヘッダーに記載の各方向スペクトルの諸元 (NS, IWTP, GAMMA) に続いて, 各方向スペクトルの位置 (造波境界 : IO 上の沿岸方向格子番号 : J) を JRP として記載する. ただし, NRP=1 のとき (単一の方向スペクトルの場合) は記載する必要なし.

- ・ 成分波リスト作成実行ファイル (mkspe.exe) の更新

外部出力する成分波リストファイル (spectdat.in) のフォーマット修正

複数方向スペクトル造波に対応するため, 条件設定ファイル (cont.txt) に NRP を指定する項目を追加 (詳細はマニュアル参照). また, NRP>1 のとき, 条件設定ファイルと合わせて, 方向スペクトル番号と JRP との対応を規定するファイル (**.pnt) が必要.

- ・ 複数方向スペクトルを造波する場合 (NRP>1 のとき) には, 任意水深に対応した造波を自動 (強制) 選択する.

令和元年 12 月 Ver4.6d8a_r1 重大な bug が確認されたことによる緊急リリース

- ・ 外部入力する成分波リストファイル (spectdat.in) の J 番号について昇順となっていなかった場合に NOWT-PARI のプログラム内で適切に並べ替えが行われていなかった bug を修正 (※成分波リストファイルの J 番号が昇順で作成されていた場合には Ver4.6d8a の計算結果と Ver4.6d8a_r1 の計算結果は一致する)

(R1.12.01 現在)

目 次

1. 概要	1
1.1. 基礎方程式	1
1.2. 計算アルゴリズム	2
1.3. 線境界入射波法による吸収造波境界	3
(1) 線境界入射波法の概要	3
(2) 任意水深上の造波方法	4
(3) 関数スペクトルによる成分波の作成	5
1.4. ブシネスクモデルにおける計算領域の設定	7
1.5. スポンジ層による無反射境界および部分反射境界の設定	8
(1) スポンジ層による無反射境界	8
(2) スポンジ層による部分反射波境界の設定法	8
2. ブシネスクモデルの使用方法	11
2.1. プログラム構成	11
2.2. 計算領域の設定方法および計算領域サイズの設定	14
2.3. 入力データファイルの設定	15
(1) 水深ファイル (depth_d)	16
(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (addfd_d)	17
(3) 時系列データ出力格子座標ファイル (pnt)	18
(4) 計算条件設定ファイル (calcd_d)	18
(6) 成分波ファイル (spectdat.in)	21
2.4. 計算実行ファイルの作成およびプログラム実行	28
(1) フォートランコンパイラによる実行ファイルの作成	28
(2) プログラムの実行	28
2.5. 出力データファイル	29
(1) 水深ファイル (depth2)	29
(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (fd)	29
(3) 時系列波形ファイル (te)	30
(4) 水位ファイル (eta)	30
(5) 有義波高 1 ファイル (h), 有義波高 2 ファイル (h13), 平均水位ファイル (eavg) および時間平均流速ファイル (uvavg)	31
(6) 波数出力ファイル (nwave)	35
(7) 波速ベクトルおよび波向角出力ファイル (cwavg1, cwavg2)	36

(8) 砕波判定ファイル (saiha)	37
3. モデル地形による計算例.....	39
3.1. 簡単な地形に対する適用例.....	39
(1) 水深ファイル (depth)	40
(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (addfd)	40
(3) 時系列データ出力格子座標ファイル (pnt)	40
(4) 計算条件設定ファイル (calend)	40
(5) 計算結果	41
3.2. モデル港湾に対する適用例.....	46
(1) 水深ファイル (depth)	47
(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (addfd)	47
(3) 時系列データ出力格子座標ファイル (pnt)	49
(4) 計算条件設定ファイル (calend)	49
(5) 計算結果	50
3.3. 任意水深を入射境界とするモデル地形に対する適用例 (Ver.46d7a)	55
(1) 水深ファイル (depth_d)	55
(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (addfd_d)	56
(3) 時系列データ出力格子座標ファイル (pnt)	56
(4) 計算条件設定ファイル (calend_d)	57
(5) 計算結果	58
参考文献.....	60

1. 概要

本書は、「独立行政法人港湾空港技術研究所」の「非線形波浪変形モデル（Ver.4.6）プログラム」の使用説明書であり，プログラムの動作環境，基本構成，使用方法について説明している．

1.1. 基礎方程式

計算モデルの基礎方程式は，水深を場所の関数とした修正ブシネスク方程式（Madsen and Sorensen, 1992）にエネルギー吸収帯内のエネルギー減衰を与える高次エネルギー減衰項，底面摩擦項ならびに砕波減衰項を加えたモデルである．式(1.1)，(1.2)ならびに(1.3)に基礎方程式を示す．なお，詳細については，平山（2002）¹⁾を参考にして頂きたい．

連続の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1.1)$$

x 方向運動量方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \nu \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) + \frac{f}{2D^2} P \sqrt{P^2 + Q^2} \\ & + \sigma(x) \left\{ P - \mu^2 \left[\left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial y} \right\} + \left\{ \frac{h}{6} \frac{\partial h}{\partial x} \left(2 \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right) + \frac{h}{6} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial Q}{\partial x} \right\} \right] \right\} \\ & = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right) + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \\ & + h \frac{\partial h}{\partial y} \left\{ \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\} + h \frac{\partial h}{\partial x} \left\{ \frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right\} \end{aligned} \quad (1.2)$$

y 方向運動量方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \nu \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) + \frac{f}{2D^2} Q \sqrt{P^2 + Q^2} \\ & + \sigma(y) \left\{ Q - \mu^2 \left[\left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right\} + \left\{ \frac{h}{6} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{h}{6} \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + 2 \frac{\partial Q}{\partial y} \right) \right\} \right] \right\} \\ & = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 Q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial y \partial t} \right) + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} \right) \\ & + h \frac{\partial h}{\partial x} \left\{ \frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\} + h \frac{\partial h}{\partial y} \left\{ \frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right\} \end{aligned} \quad (1.3)$$

ここで、 x, y は平面座標、 t は時間、 η は水位、 P は x 方向線流量、 Q は y 方向線流量、 h は静水深、 D は全水深 ($=h+\eta$)、 f は底面摩擦係数である。 ν は砕波によって生じる乱れによる運動の混合を表す渦動粘性係数、 σ はエネルギー吸収帯の減衰係数である。

1.2. 計算アルゴリズム

本ブシネスクモデルの離散化には ADI 差分法を適用し、空間差分に対してはスタaggerド格子を用いた中央差分法を、時間差分に対しては前進差分法を用いている。

計算アルゴリズムを図 1 に示す。本モデルでは、 x, y それぞれの方向における運動方程式の時間に関する差分中心は、互いに $\Delta t/2$ ずれている。一方、連続式は x, y 方向に交互に計算され、それぞれの運動方程式によって線流量フラックス (P または Q) が求まる $\Delta t/2$ 時間ごとに水位 η が求められる。

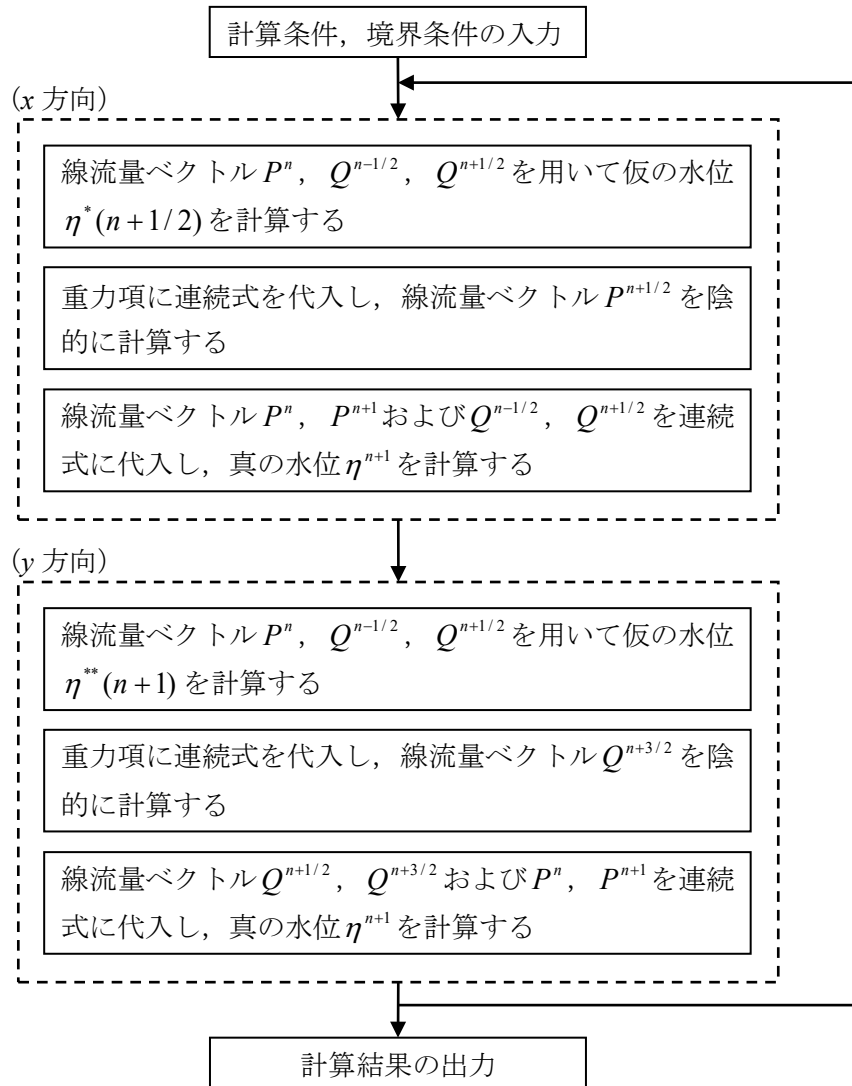


図 1 ブシネスクモデルの計算アルゴリズム

解くべき方向の運動方程式では、時間差分中心の時刻における水位 η および全水深 D ($=\eta+h$) が未知である。そこで、重力項の未知水位 η には連続式の後退差分式を直接代入し、その他の項の未知水位 η および全水深 D には連続式の前進差分式より前もって求められた仮の水位 η を代入することにより、解くべき方向の線流量フラックスのみを未知量としている。そうすることで、各時刻における線流量フラックス (P または Q) がそれぞれ連立一次方程式の解として与えられる。そして、それぞれの方向に陰的に解かれた線流量フラックス (P または Q) を用いて、時間差分中心の時刻における真の水位 η が連続式から陽的に求められる。

1.3. 線境界入射波法による吸収造波境界

(1) 線境界入射波法の概要

本ブシネスクモデルは、入射境界から解析領域に波を入射する方法として、解析領域の一端に造波境界を設け、この境界上に入射波の水位変動と水平流速を与えながら吸収造波を行う線境界入射波法²⁾を用いている。

線境界入射波法は、造波境界で線形化された波形および流速の時間変動を与えるモデルであり、解析領域内のある差分格子境界を入射波境界とし、入射境界を挟む差分式を計算する際に、それぞれの領域において入射波の水平流速や水位を加減することにより、反射波を沖側へ透過させながら入射波を岸側方向へのみ造波する。したがって、入射境界より岸側では入射波と反射波が共存する領域、沖側では入射境界を透過した反射波のみが存在する領域となる。線境界入射波法によって沖側に透過される反射波は、沖側に配置されたエネルギー吸収帯により減衰される。このような操作により、入射境界線では入射波が計算領域内に入射されるとともに、計算領域からの反射波が自由に領域外に透過する条件が満足される。

入射波の時間波形の作成方法は、シングルサンメーションとダブルサンメーションの 2 通りの方法がある。ダブルサンメーションに比べてシングルサンメーションは、目標とする多方向不規則波を生成するための成分波数を少なくすることができ、計算時間を短くすることが可能である。そのため、本ブシネスクモデルでは、式(1.4)に示すシングルサンメーションを採用している。

$$\eta = \sum_{n=1}^{N_s} a_n \sin(k_n x \cos \theta_n + k_n y \sin \theta_n - 2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (1.4)$$

式(1.4)中の添字の n は n 番目の成分波の値であることを示し、 k_n ($=2\pi/L_n$; L_n は n 番目の成分波の波長)、 f_n ならびに θ_n はそれぞれ、 n 番目の成分波の波数、周波数ならびに波向を示している。また、 N_s は成分波の総数、 t は時間であり、 n 番目の成分波の振幅 a_n は式

(1.5)から計算される.

$$a_n = \sqrt{2S(f_n)\delta f_n} \quad (1.5)$$

ここで, $S(f_n)$ および δf_n はそれぞれ, 周波数スペクトルとスペクトル幅を表す. また, ε_n は n 番目の成分波の位相差で, $0 \sim 2\pi$ の値をとる一様乱数を与える.

多方向不規則波を用いた計算を行う際には, 上記の周波数スペクトルに加え方向関数が必要となる. 本ブシネスクモデルでは, Mitsuyasu et al.³⁾が現地観測結果から導いた式を合田ら⁴⁾が改良した式(1.6)の方向関数を用いている.

$$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (1.6)$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (1.7)$$

$$S = \begin{cases} S_{\max} (f / f_p)^3 & f \leq f_p \\ S_{\max} (f / f_p)^{-2.5} & f \geq f_p \end{cases} \quad (1.8)$$

式(1.8)中の $S_{\max}$ は多方向不規則波の方向集中度を表すパラメータであり, 波向がそろっているほど大きな値をとる. $S_{\max}$ の値としては, 合田⁵⁾にならい表1に示す値を目安として用いる.

表1 方向集中度パラメータ

風波	$S_{\max} = 10$
減衰距離の短いうねり (波形勾配が比較的大)	$S_{\max} = 25$
減衰距離の長いうねり (波形勾配が小)	$S_{\max} = 75$

(2) 任意水深上の造波方法

水深が一様でない沖側境界上で斜め波を造波する場合には, 沖側境界に沿う y 方向の隣り合う計算格子で波数 (波長の逆数) が異なるために生じる, 波の位相差を考慮する必要がある. 一方, 従来のブシネスクモデルでは, この問題を回避するため, 水深一定とした造波境界と実地形との間に緩衝帯を設け, 一様勾配斜面により実地形へ適切にすりつけることが推奨されている. しかしながら, 緩衝帯に設けるすりつけ斜面は, 現実には生じない波の屈折や反射の影響を極力抑えるよう個人の注意を払って設定する必要があるため, 技

量に依るところが大きい．また，このために計算領域を沖側へ拡張する場合には，計算負荷・容量の増大を招く．そこで以下では，糸井ら（2003）の研究を参考に，斜め波の位相のずれを考慮した任意水深の造波境界上における多方向不規則波の造波方法を提案する．

すなわち，水深が一様でない造波境界上では波数 kn が y 軸に沿って変化することを考慮すると，式(1.4)は式(1.9)のように書き換えられる．

$$\eta = \sum_{n=1}^{N_s} a_n(y) \cdot \sin \left(k_n(y)x \cos \theta_n + \int_0^y k_n(y) dy \sin \theta_n - 2\pi f_n t + \varepsilon_n \right) \quad (1.9)$$

(3) 関数スペクトルによる成分波の作成

線境界入射波法の概要で述べたように，本ブシネスクモデルでは入射境界から時間変動波形を入射することで計算領域内へ入射波を与える．

シングルサンメーションを用いて時間変動波形を作成する際には，式(1.4)に示したように，規則波成分を多数重ね合わせることで不規則波形を作成する．そのため，シングルサンメーションによって不規則波を作成するには，入射波の代表量である有義波高，有義波周期，主波向ならびに方向集中度から関数スペクトルを用いて成分波を作成する必要がある．本ブシネスクモデルでは，以下の関数スペクトルを用いて成分波の作成を行うことが可能である．

[ブレットシュナイダー・光易型]

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3}^4 f^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^4] \quad (1.10)$$

[修正ブレットシュナイダー・光易型]

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^4 f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^4] \quad (1.11)$$

ここで， $S(f)$: スペクトル密度 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

$H_{1/3}$: 有義波高 (m)

$T_{1/3}$: 有義波周期 (s)

f : 周波数 (Hz)

[JONSWAP 型]

$$S(f) = \beta_J H_{1/3}^2 T_p^4 f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^4] \times \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma]} \quad (1.12)$$

$$\beta_J \doteq \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \times [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (1.13)$$

$$T_p \doteq T_{1/3} / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}] \quad (1.14)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f \geq f_p \end{cases} \quad (1.15)$$

ここで、 $S(f)$: スペクトル密度 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
 $H_{1/3}$: 有義波高 (m)
 $T_{1/3}$: 有義波周期 (s)
 T_p : ピーク周波数 ($=1.05 T_{1/3}$) (s)
 f : 周波数 (Hz)
 f_p : ピーク周波数 ($=1.0/T_p$) (Hz)
 γ : スペクトルピークの鋭さを表すパラメータ

成分波を作成する際には、エネルギー等分割方式を採用している。また、エネルギー等分割した成分波の周波数は、各区間の面積が半分となる周波数としている。ここで、ブレットシュナイダー・光易型スペクトルおよび修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルの各成分波の周波数は、式(1.16)から算出する。

$$f_m = \frac{\alpha}{T_{1/3}} \left[\ln \left(\frac{2N_s}{2m-1} \right) \right]^{-1/4} \quad m=1,2,3,\dots,N_s \quad (1.16)$$

ここで、 f_m : 分割されたスペクトルの周波数 (Hz)
 α : 係数
 ブレットシュナイダー・光易型 1.007
 修正ブレットシュナイダー・光易型 0.9306
 $T_{1/3}$: 有義波周期 (s)
 N_s : 分割数

一方、JONSWAP 型および任意のスペクトル形を用いる場合には、2.3 節で述べる方法により成分波を作成し計算に用いる。

次に各成分波の波向の決定方法について述べる。シングルサンメーションによる不規則波は、異なった周波数の成分波がそれぞれ異なった波向を持つ成分波の線型重ね合わせとして作成する。

各周波数成分の波向は、まず式(1.10)～(1.15)に示した関数スペクトルから成分波を作成した後、各成分波の方向分布関数を式(1.6)から算出する。第 n 成分の方向角は、第 n 成分の周波数 f_m における方向分布関数の累加値 $P(f_m; \theta)$ が、 $[0, 1]$ の範囲の値をランダムに一

様な確率で選ばれるように定める. 図 2 に, 第 n 成分波の方向角の決定方法の模式図を示す.

$$P(f_m; \theta_m) = \int_0^{\theta_m} G(f_m; \theta) d\theta \quad : \quad 0 \leq P(f_m; \theta_m) \leq 1 \quad (1.17)$$

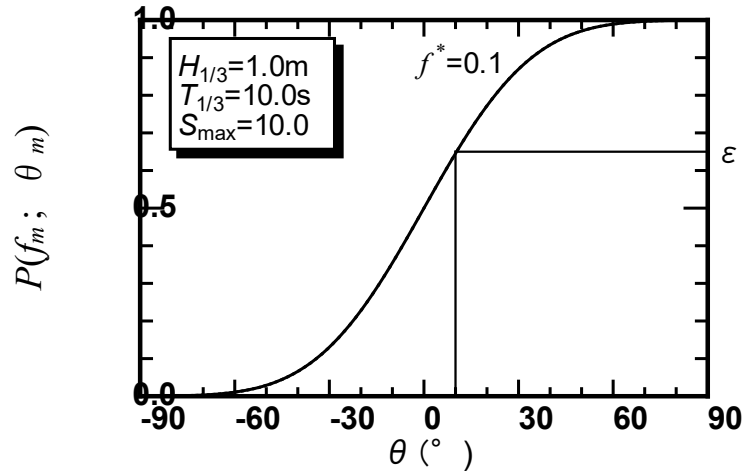


図 2 第 n 成分波の方向分布関数の累加曲線

1.4. ブシネスクモデルにおける計算領域の設定

本ブシネスクモデルでは, 線境界入射波法による多方向不規則波による波浪変形計算を実施することが可能である. ここで, 多方向波を用いて計算をおこなう場合, 多方向不規則波造波装置を用いた水理模型実験と同様に, 多方向波の有効造波領域を十分に考慮した上で計算領域を設定する必要がある. そのため, 以下では有効造波領域の考え方を概説すると共に, それを NOWT-PARI に適用方法について述べる. なお, 詳細については, 平山 ¹⁾を参照していただきたい.

Hiraisi et al. (1998) は, 成分波の到達可能範囲に関する幾何学的な検討により, 多方向波の波エネルギーの 80%以上が含まれる水域を有効造波領域として定義した場合, 有限な実験水槽に占める面積は, 多方向波の方向集中度が小さくなるほど狭くなり, また, 主波向が造波面と垂直な方向に対して傾くほど狭くなる.

そのため, ブシネスクモデルによる計算についても, 有効造波領域の考え方を踏襲する必要がある. 多方向を用いた計算を行う場合には, これら有効造波領域を考慮しつつ設定する必要がある. 有効造波領域を極力大きくするには, 沿岸方向に広く, かつ, 差分格子の軸方向が多方向波の主波向と一致するように計算領域を設定すると良い.

1.5. スポンジ層による無反射境界および部分反射境界の設定

(1) スポンジ層による無反射境界

本ブシネスクモデルによる波浪変形計算では，スポンジ層を用いて無反射境界および部分反射境界の処理を行っている．

従来のブシネスクモデルでは，線流量フラックス P ， Q を式(1.18)に示すエネルギー減衰係数によって減衰させる項を運動方程式に付加することにより無反射境界の処理を行っていた．

$$\sigma(x) = \theta \frac{r\sigma_m}{2(\sinh r - r)} \left[\cosh\left(\frac{rx}{F}\right) - 1 \right] \quad (1.18)$$

$$\begin{cases} \sigma(x)P & (x \text{ 方向}) \\ \sigma(y)Q & (y \text{ 方向}) \end{cases} \quad (1.19)$$

しかし，このスポンジ層によるエネルギー減衰量は，入射波の分散特性に大きく依存するため，1.1 節にも示したように本ブシネスクモデルでは，高次のエネルギー減衰項による高次型スポンジ層を採用している．

$$\sigma(x) \left\{ P - \mu^2 \left[\left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial y} \right\} + \left\{ \frac{h}{6} \frac{\partial h}{\partial x} \left(2 \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right) + \frac{h}{6} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial Q}{\partial x} \right\} \right] \right\} \quad (x \text{ 方向})$$

$$\sigma(y) \left\{ Q - \mu^2 \left[\left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left\{ \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right\} + \left\{ \frac{h}{6} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{h}{6} \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + 2 \frac{\partial Q}{\partial y} \right) \right\} \right] \right\} \quad (y \text{ 方向})$$

高次型スポンジ層の採用により，無反射境界を得るためのスポンジ層幅は，一波長とすることができる．

(2) スポンジ層による部分反射波境界の設定法

高次型スポンジ層を用いた部分反射波境界を設定する際には，式(1.17)のエネルギー減衰係数に対して $\theta=2.0$ と設定し，スポンジ層の幅 F のみを調整する．以下に部分反射境界の設定法について述べる．

エネルギー吸収帯の相対幅 F/L と反射率 K_r は式(1.20)または図 3 に示す関係にある．

$$K_r = 1 / \cosh\left(\frac{1}{a} \frac{F}{L}\right) \quad (1.20)$$

ここに, K_r : 反射率

a : 0.2

F : エネルギー吸収帯の幅 (m)

L : 水深 h における代表波周期の波長 (m)

したがって, エネルギー吸収帯の幅 F を算出するには, 任意の反射率 K_r に対して図 3 から求めて良いし, 式(1.21)から算定することもできる.

$$F = aL \cdot \ln \left(1/K_r + \sqrt{(1/K_r)^2 - 1} \right) \quad (1.21)$$

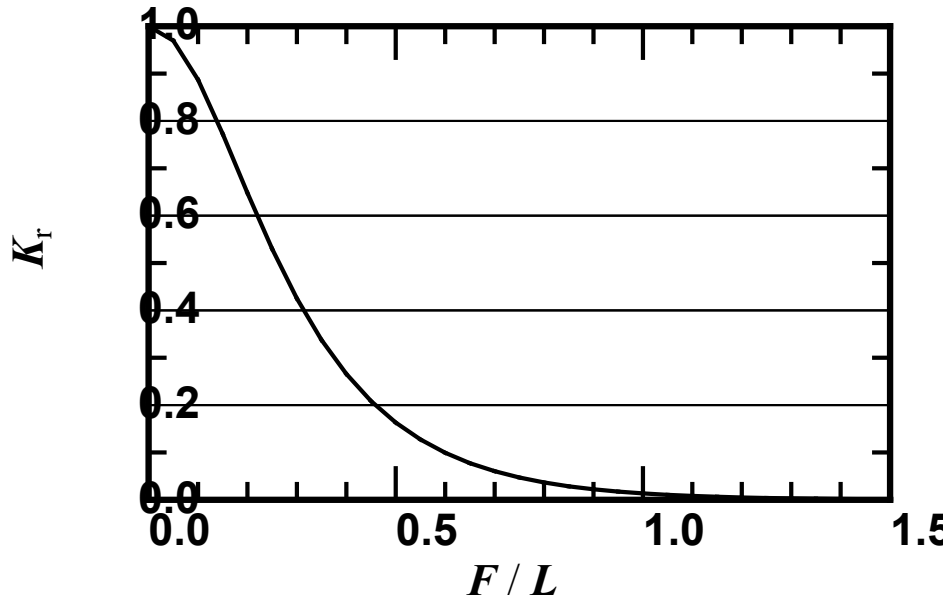


図 3 相対幅と反射率の関係

式(1.21)または図 3 からエネルギー吸収帯の幅が求まれば, 式(1.22)からエネルギー減衰係数 $\sigma(x)$ が求められる.

$$\sigma(x) = \theta \frac{r\sigma_m}{2(\sinh r - r)} \left[\cosh \left(\frac{rx}{F} \right) - 1 \right] \quad (1.22)$$

ここで、

$\sigma(x)$	:	エネルギー減衰係数
θ	:	エネルギー減衰係数の強度 (=2.0)
r	:	3.0
σ_m	:	$=\sqrt{g/h}$
F	:	エネルギー吸収帯の幅 (m)
x	:	エネルギー吸収帯設定位置の計算領域側 (海側) からの距離 (m)

2. ブシネスクモデルの使用方法

2.1. プログラム構成

本計算プログラムは, 5つの入力データファイル中で設定する計算条件を用いて計算を行い, 12個の計算結果が出力される. 図4および表2, 表3にプログラムディレクトリ構成と入力および出力データファイルの一覧を示す.

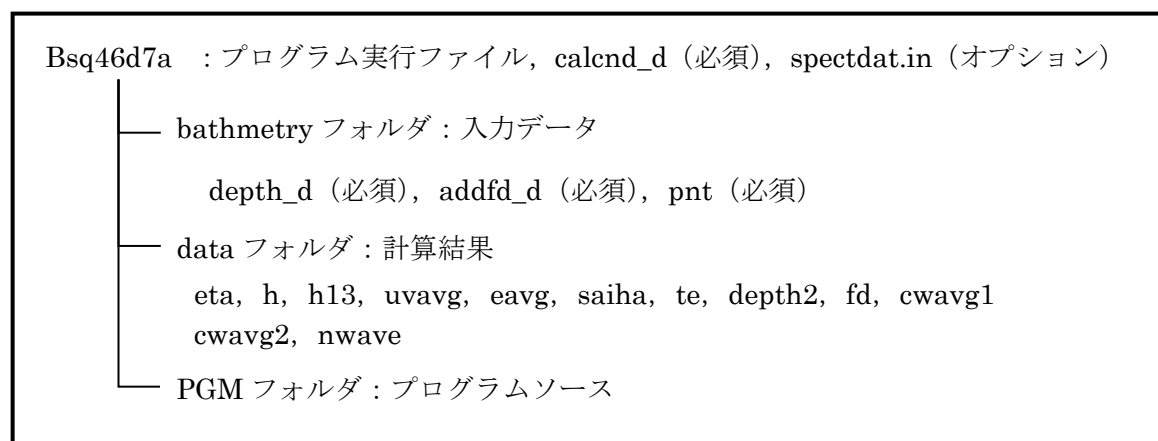


図4 プログラムディレクトリ構成

表2 入力データファイル

番号	ファイル名	内 容
13	depth_d	基準面からの水深 h . 下向きを正とする (必須)
9	addfd_d	計算領域外周以外に配置するエネルギー吸収帯の減衰係数 σ (必須)
31	pnt	水位 η および流速 u, v の時系列データを記録する格子座標の指定 (必須)
91	calend_d	計算条件 (必須)
92	spectdat.in	外部から成分波ファイルを読み込む際に使用 (オプション)

表 3 出力データファイル

番号	ファイル名	内 容
11	eta	指定した時刻における計算領域全格子点の水位 η
14	h	指定した時刻における計算領域全格子点の波高 H
17	h13	指定した時刻における計算領域全格子点の有義波高 $H_{1/3}$. 波高がレーリー分布に従うと仮定し, 水位 η の標準偏差から求めた値を有義波高 $H_{1/3}$ としている.
18	uvavg	指定した時刻における計算領域全格子点の時間平均流速
34	eavg	指定した時刻における計算領域全格子点の平均水位
21	saiha	計算終了時刻における計算領域全格子点の碎波判定フラッグ
23	te	指定した格子点における水位 η , 流速 u , v
20	depth2	計算に用いる水深データ (depth データ平滑化後の水深)
29	fd	計算に用いるエネルギー吸収帯の減衰係数
35	cwavg1	指定した時刻における計算領域全格子点の波速ベクトルおよび波向角 (微小振幅波理論を用いて計算)
36	cwavg2	指定した時刻における計算領域全格子点の波速ベクトルおよび波向角 (共分散法を用いて計算)
40	nwave	計算終了時刻における計算領域全格子点の波数

本プログラムの計算処理の流れを図 5 に示す. 本プログラムは, はじめに計算条件の設定および水深等のデータ入力を行い, その後設定した計算時間 (計算ステップ数) だけ計算を行い, 最後に計算結果を出力して終了する. 計算ループは ADI 法を用いているため, 1 ステップ内で x 方向線流量 P の計算と y 方向線流量 Q の計算を 1 回ずつ行う. その後, 碎波判定および碎波減衰を表す渦動粘性係数 ν を計算する. さらに, 計算終了時に有義波高, 平均水位, 平均流速を計算するための変数を用意して, 計算ステップ毎に水位 η , 水位の二乗 η^2 , 流速 u , v を加算する. また, 計算途中の結果を把握できるように, 設定した計算ステップ毎に水位および波高がファイル出力されるようになっている.

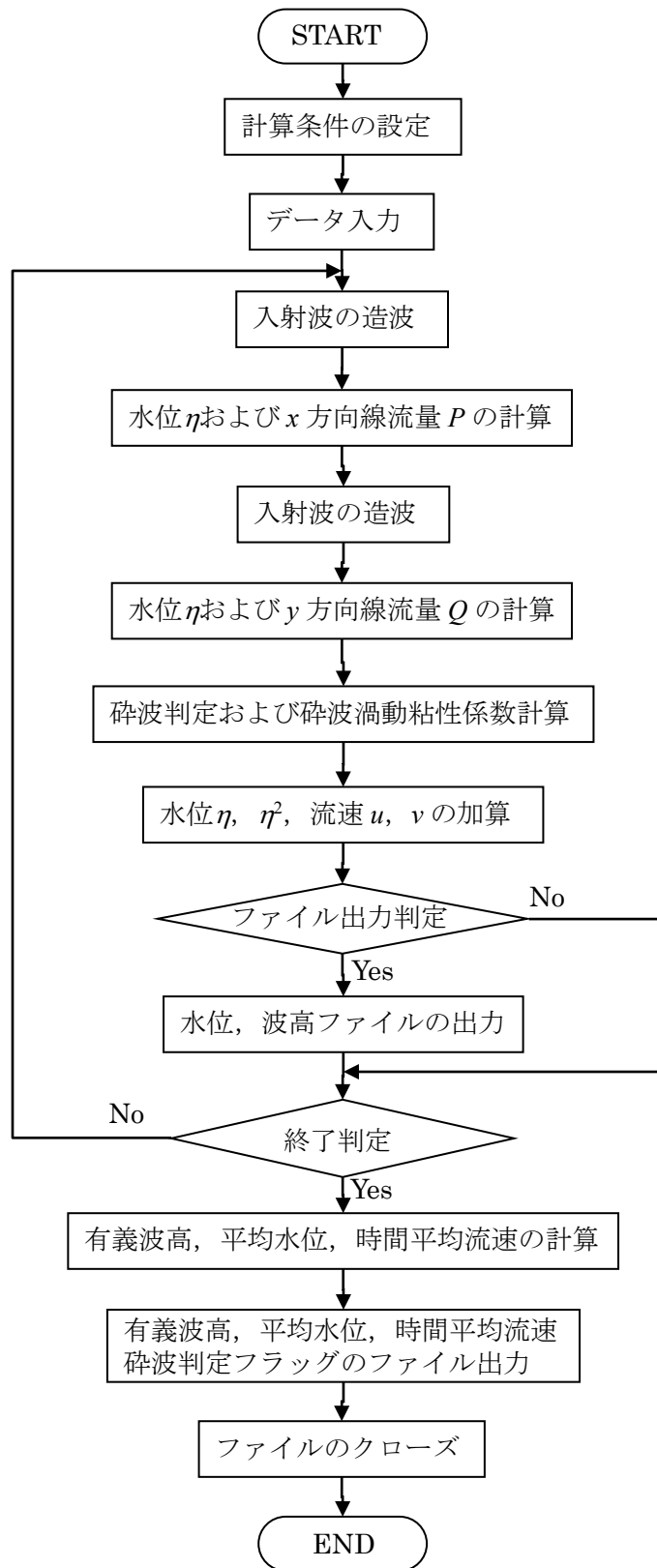


図 5 計算処理の流れ

2.2. 計算領域の設定方法および計算領域サイズの設定

計算領域に配置する水位，線流量等の変数は配列変数であり，計算プログラムメインルーチン内のパラメータで変数領域を設定する．図 6 に座標系と差分格子の定義を示す．本プログラムでは，計算領域の外周を 2 格子幅ずつ計算対象外に設定して計算を行う．変数の配置は，図 7 のように行っている．

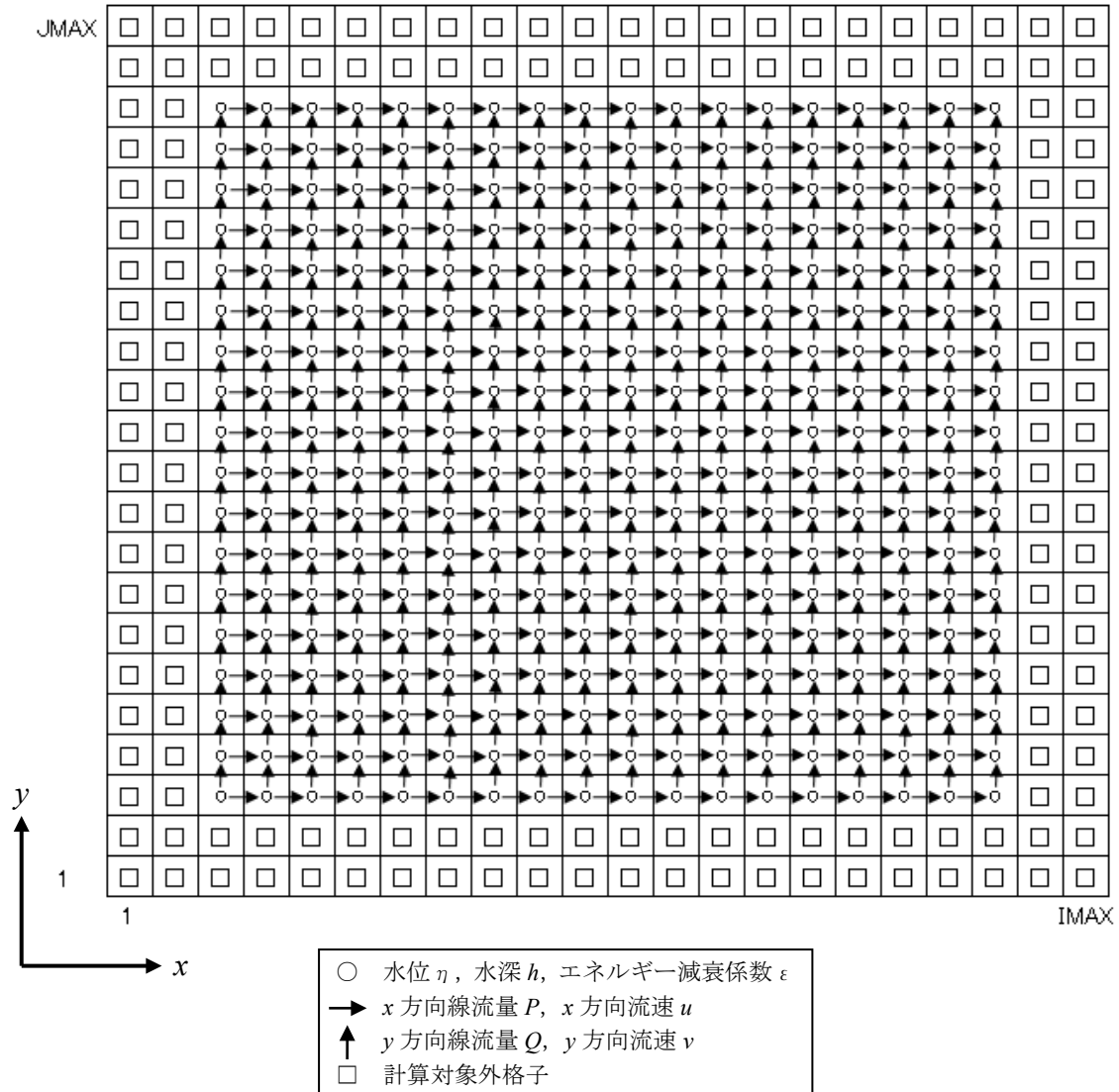


図 6 計算領域格子座標

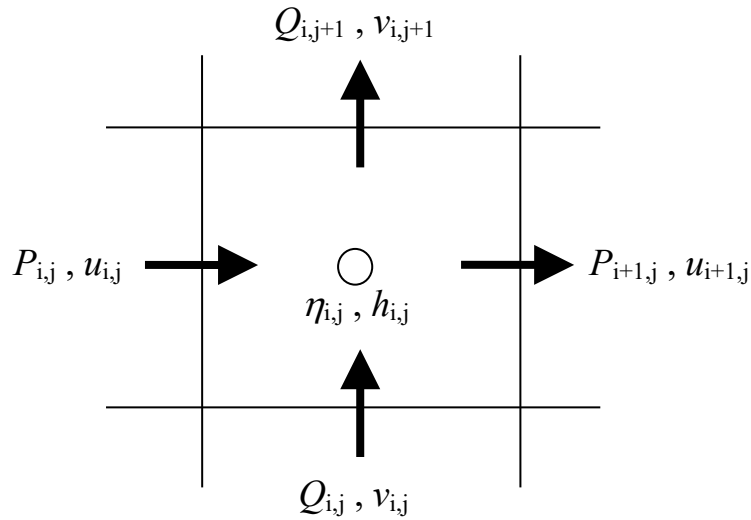


図 7 変数の配置

計算領域サイズは、bsq_bsq46c7a.inc ファイル内の IMAX および JMAX で指定する．図 6 を例にとると，IMAX=22，JMAX=22 となる．

C 計算領域の設定

C**** (IMAX=2+(IE-IS+1)+2, JMAX=2+(JE-JS+1)+2) ****

PARAMETER (IMAX = 544, JMAX = 10)

2.3. 入力データファイルの設定

計算を行うために必要な入力データファイルは，表 2 に示した 5 つのデータファイルである（成分波ファイルについてはオプション）．以下にこれらの入力データファイルの内容と書式を示す．

注 1) 図 8 に計算領域を示す．本計算プログラムでは， $I=I_0$ の位置が入射波境界に設定され，そこから x 軸の正の方向に波が伝播していくように計算がおこなわれる．また，入射境界の沖側，岸側および側方にエネルギー吸収帯が配置され，計算領域からの反射波を吸収するようにしている．図 8 の I 方向を例にとると， $IS=3$ ， $I_0=6$ ， $I_1=18$ ， $IE=20$ となる．

(1) 水深ファイル (depth_d)

このデータファイルは、差分格子全体に設定する水深を入力するためのデータファイルである。本計算プログラムでは、「差分格子の定義」に示した通り、計算領域外周の2格子を計算対象外に設定する必要がある。計算対象外の指定は、このファイルの格子点の水深を $h_{ij} < -900$ に設定すればよい。なお、 $h_{ij} < 0$ と仮定された格子は陸地として扱われ、その格子を波が伝播することはない。

データファイルの書式を以下に示す。

1 行目

IS	I0	I1	IE	DX
I10	I10	I10	I10	F10.4

IS, I0, I1, IE : x 方向格子の計算領域設定変数 (注 1 参照)

DX : 計算格子幅 (m) (DY=DX), 代表波長の 1/10~1/20 を目安として設定

2 行目

JS	J0	J1	JE
I10	I10	I10	I10

JS, J0, J1, JE : y 方向格子の計算領域設定変数 (注 1 参照)

3 行目

CC	IMAX	JMAX
A20	I10	I10

CC : 注釈 (計算には用いられない)

IMAX : x 方向格子数

JMAX : y 方向格子数

4 行目以降 格子座標

DEP(I,J), I=1, IMAX

8F10.0

DEP(I,J) : 座標 (I,J) の水深

```
READ(FILE 番号, '(20X, 2I10)') CC, IMAX, JMAX
```

```
DO 8 J=1, JMAX
```

```
READ(FILE 番号, '(8F10.0)') (DEP(I,J), I=1, IMAX)
```

```
8 CONTINUE
```

(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (addfd_d)

このデータファイルは、プログラムメインルーチン内で計算領域外周に設定された透過境界以外のエネルギー吸収帯のエネルギー減衰係数を入力するデータファイルである。このデータファイルにより、防波堤等の部分反射境界の設定を行う。計算領域の各格子点（水位 η と同じ定義位置。図 7 参照）に対し、基礎方程式(1.2)あるいは(1.3)中のエネルギー減衰係数 σ を作成して入力する。全ての格子点に対して入力する必要がない場合でも、空データを入力したファイルを作成する必要がある（この場合はすべての格子点に 0.0 を入力）。入力データファイルの書式を以下に示す。

1 行目

IS	I0	I1	IE	DX
I10	I10	I10	I10	F10.4

IS, I0, I1, IE : x 方向格子の計算領域設定変数（注 1 参照）

DX : 計算格子幅 (m) (DY=DX), 代表波長の 1/10~1/20 を目安として設定

2 行目

JS	J0	J1	JE
I10	I10	I10	I10

JS, J0, J1, JE : y 方向格子の計算領域設定変数（注 1 参照）

3 行目

CC	IMAX	JMAX
A20	I10	I10

CC : 注釈（計算には用いられない）

IMAX : x 方向格子数

JMAX : y 方向格子数

4 行目以降 格子座標

FD(I,J), I=1, IMAX

8F10.0

DEP(I,J) : 座標 (I,J) の水深

```
READ(FILE 番号,'(20X,2I10)') CC, IMAX, JMAX
```

```
DO 19 J=1, JMAX
```

```
READ(FILE 番号,'(8F10.0)') (FD(I,J), I=1, IMAX)
```

```
19 CONTINUE
```

(3) 時系列データ出力格子座標ファイル (pnt)

このデータファイルは、計算中の水位 η および流速 u 、 v の時系列値を記録する格子座標の指定を行うデータファイルである。格子座標は、水位 η の定義位置（図 6 参照）で指定する。出力される流速 u 、 v の時系列値も水位 η の定義位置における値が出力される。

データファイルの書式を以下に示す。

1行目 計算出力点数

NPMX

I10

NPMX : 指定格子点数 ($\text{NPMX} \leq 200$)

2 行目以降 格子座標の入力

NI(N)	NJ(N)
-------	-------

I10

I10

NI(N) : N 番目の格子点の I 座標

NJ(N) : N 番目の格子点の J 座標

```
READ(FILE 番号,'(I10)') NPMX
```

```
DO 4430 N=1, NPMX
```

```
READ(FILE 番号,'(2I5)') NI(N), NJ(N)
```

```
4430 CONTINUE
```

(4) 計算条件設定ファイル (calcmd_d)

この入力データファイルは、計算条件を設定するためのデータファイルである。表 4 に計算条件設定変数の一覧を示す。また、表 5 に各設定パラメータの書式を示す。

注) Ver46d7a から導入した実際の海底地形による任意水深上の造波方法を選択する場合（すりつけ斜面を設けない場合）には、 $H10=0.0$ と設定する。

(5) 表 4 設定変数一覧

変 数	Format	内 容
DIR_I	A	計算入力データ（水深他）の入力先ディレクトリ名
DIR_O	A	計算出力データの出力先ディレクトリ名
H13, T13	F10.0	有義波高(m), 有義波周期(s)
SIT0	F10.0	波向（主波向）. x 軸の正の方向が 0° . 反時計回り正
NS	I10	NS>1 : 不規則波の成分波数（一方向波 $100 \leq NS \leq 1000$ 多方向波） NS=1 : 規則波 NS<0 : 外部から成分波ファイルを読み込む
SMAX	F10.0	光易型方向関数の方向集中度パラメータ Smax=9999.0 を指定した場合，一方向波となる．
TLIMIT	F10.0	入力関数スペクトルの短周期側の境界値を設定するパラメータ．規則波計算時はダミー IWTP=1 または 2 とした場合に有効．単位：sec
WL	F10.0	潮位（基準面から上向きを正）．単位：m
H10	F10.0	入射境界水深（基準面から下向きを正）．単位：m ここで，” $H1=H10+WL$ ” であり， $H10>0$ のとき，従来どおり造波水深を $H1$ で一定とする（ $H10=0.0$ のとき，造波水深には実際的水深を用いる）
HLIMIT2	F10.0	最小水深．単位：m
IBRK	I10	砕波計算の有無（IBRK=1 のとき砕波計算を実行）
RB	2F10.0	砕波限界流速波速比
HLIMIT3	2F10.0	砕波計算時の最小水深．単位：m
FF1,FF2 FFHLM	3F10.0	底面摩擦係数 f FFHLM : 境界水深（m） 水深 $h \leq \text{FFHLM}$ 以下の水深となる格子点の場合 $f=\text{FF1}$ 水深 $h > \text{FFHLM}$ 以下の水深となる格子点の場合 $f=\text{FF2}$
DT	F10.0	計算時間間隔（= $T_{1/3}/100 \sim T_{1/3}/400$ 程度を目安として設定）．単位：sec
TDEL	F10.0	入力ファイル「pnt」で指定した格子座標の時間波形を出力する時間間隔． T または $T_{1/3}$ の $10 \sim 20$ 分割程度を目安とし，DT の整数倍となる値を設定する．単位：sec
TOUT	I10	表 3 に示す出力ファイルのうち，[te,depth2,fd]を除く出力データの出力時間．計算途中の結果を出力する場合に使用． NSTEP=INT(TOUT/DT+0.1)×2 となる計算ステップ毎にデータが出力される．0.0 とした場合，TEND の時刻の結果を出力する．単位：sec
TTIN	F10.0	緩和造波時間（0～TTIN までは入射波高を線形に増加させる） 規則波の場合 2～5 波，不規則波の場合 10～30 波程度経過した時間を目安として設定する（図 9 参照）．単位：sec
TSVE	F10.0	有義波高，平均水位，時間平均流速を求めるためのデータ収録開始時間 規則波の場合 10 波程度，不規則波の場合 100～200 波程度経過した時間を目安として設定する（図 9 参照）．単位：sec
TEND	F10.0	計算終了時間（図 9 参照）．単位：sec
KAISU	I10	水深のスムージング処理の回数．以下の処理を 2 回行うことを 1 回の処理として設定する． $h_{i,j}=(2h_{i,j}+h_{i-1,j}+h_{i+1,j}+h_{i,j-1}+h_{i,j+1})/6$
IWTP	I10	IWTP=1 : ブレットシュナイダー・光易型 IWTP=2 : 修正ブレットシュナイダー・光易型 IWTP=9 : 外部入力（JONSWAP 型，任意スペクトル）

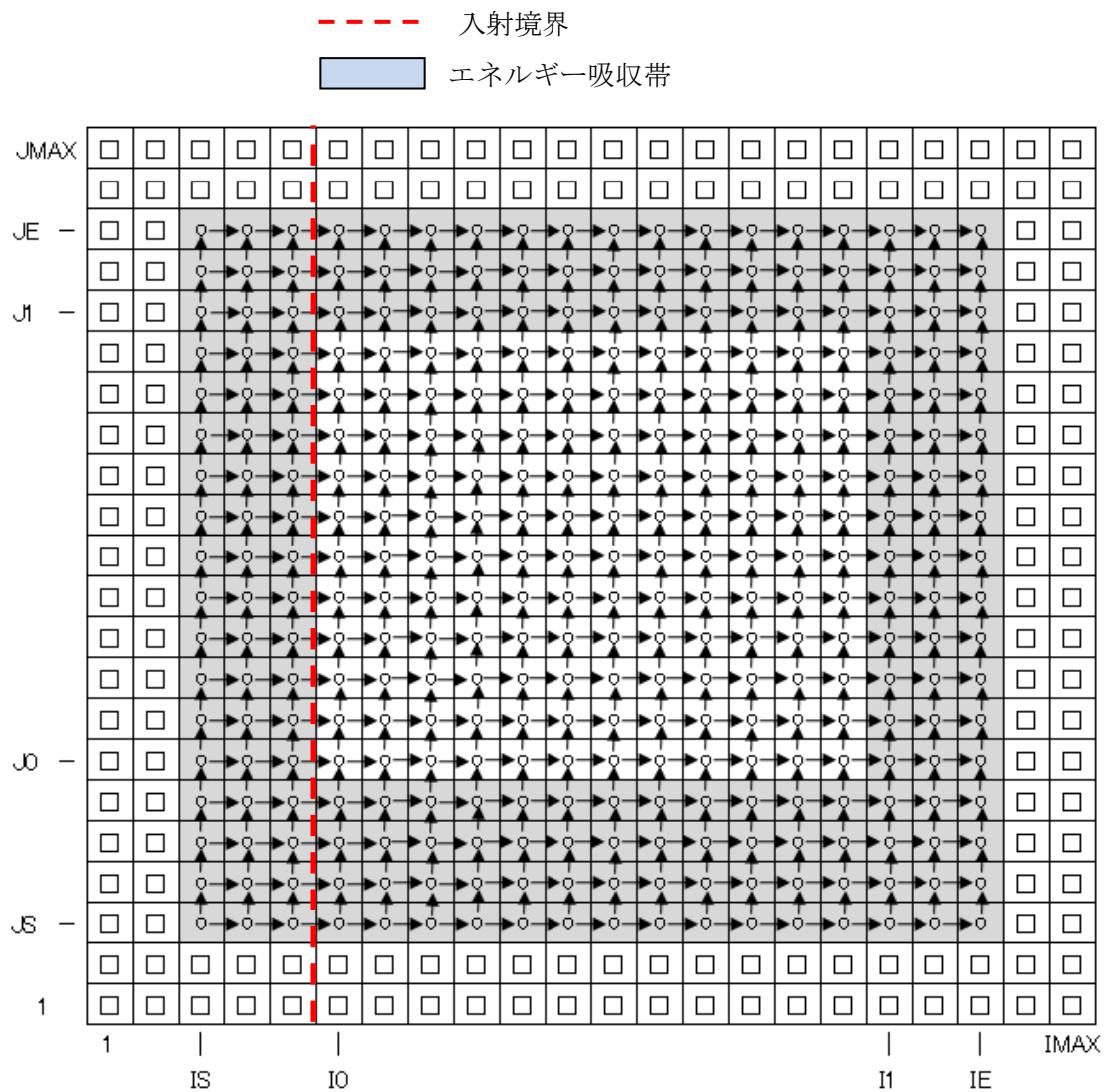


図 8 計算領域の設定

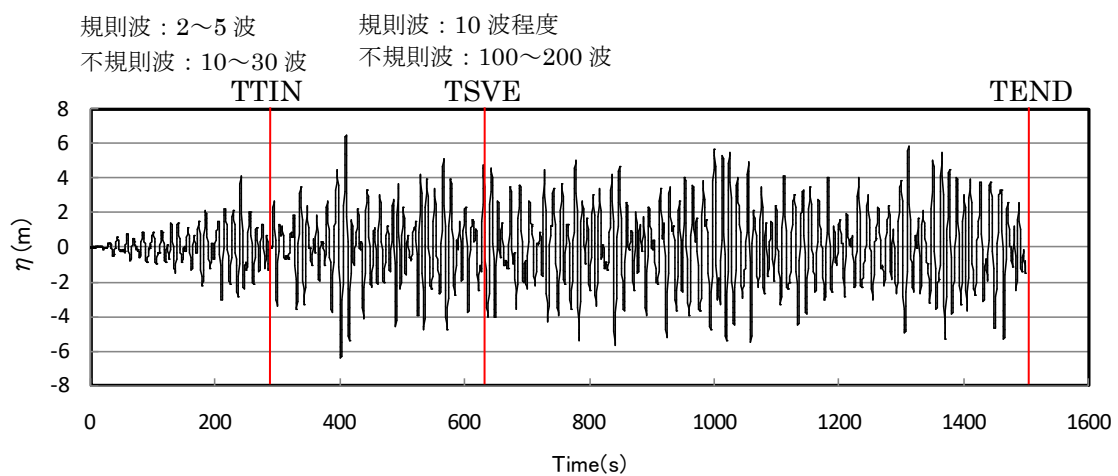


図 9 計算時間の設定

表 5 設定変数 (calend_d)

1 行目 : (A)	DIR_I				
2 行目 : (A)	DIR_O				
3 行目 : (3F10.0)	H13	T13	SIT0		
4 行目 : (I10, 2F10.0)	NS	SMAX	TLIMIT		
5 行目 : (3F10.0)	WL	H10	HLIMIT2		
6 行目 : (I10, 2F10.0)	IBRK	RB	HLIMIT3		
7 行目 : (3F10.0)	FF1	FF2	FFHLM		
8 行目 : (3F10.0)	DT	TDEL	TOUT		
9 行目 : (3F10.0)	TTIN	TSVE	TEND		
10 行目 : (2I10)	KAISU	IWTP			

(6) 成分波ファイル (spectdat.in)

成分波ファイルは、JONSWAP 型および任意スペクトルを入力条件として用いる場合に使用する。JONSWAP 型や任意スペクトルから成分波を作成するには、本計算プログラムとは別の成分波作成プログラムを使用して作成する。図 10 に、任意の周波数・方向スペクトルから成分波を作成するためのプログラムのディレクトリ構成を示す。

mkspec : mkspe.exe (実行プログラム), cont.txt (必須)
└── spectrum フォルダ : 外部入力データ

図 10 プログラムディレクトリ構成

任意の周波数・方向スペクトルから成分波を作成する際には、spectrum フォルダに現地観測またはエネルギー平衡方程式から得られた周波数スペクトルや方向スペクトルを入力データファイルとして入れた後、cont.txt で設定したパラメータを基に成分波の作成を行う。

表 6 に各設定パラメータの書式、表 7 に設定ファイル (cont.txt) の条件設定変数の一覧を示す。

表 6 成分波作成のための設定変数の書式 (cont.txt)

1 行目 : (10X,A50)	STYPE				
2 行目 : (10X,I10)	NS				
3 行目 : (10X,F10.0)	SMAX				
4 行目 : (10X,A50)	FILEIN				
5 行目 : (10X,A50)	FILEOUT				
6 行目 : (10X,4F10.0)	H13	T13	SIT0	GAMMA	
7 行目 : (10X,2F10.0)	STARTE	ENDE			
8 行目 : (10X,I10)	EPS				

表 7 パラメータの説明 (cont.txt)

変数	Format	変数の説明
STYPE	A5	入力ファイルとして用いるスペクトルデータの形式 JNS : JONSWAP Emep : 方向スペクトル Sspe : 周波数スペクトル Ene : エネルギー平衡方程式の出力スペクトルデータ (港研フォーマット)
NS	I10	成分波数 (100 : 一方向不規則波 $\leq$ NS $\leq$ 1000 : 多方向不規則波)
SMAX	F10.0	光易型方向関数の方向集中度パラメータ STYPE に JNS または Sspe を指定した場合に有効. Smax=9999.0 を指定した場合, 一方向波となる
FILEIN	A50	外部入力ファイル名 (JNS 以外で使用)
FILEOUT	A50	成分波ファイル出力名
H13,T13,SIT0 GAMMA	4F10.0	有義波高(m), 有義波周期(s), 波向(deg.), γ JONSWAP 型の成分波ファイル作成時以外は, 本パラメータを使用しない. ただし, 計算条件確認のために入力することが望ましい.
STARTE, ENDE	2F10.0	JONSWAP 型スペクトルから成分波を求める際の周波数範囲 STARTE : スタート周波数 (Hz) ENDE : エンド周波数 (Hz) ※図 11 参照
EPS	I10	式(1.4)に示す ε (位相差)を求めるための乱数初期値

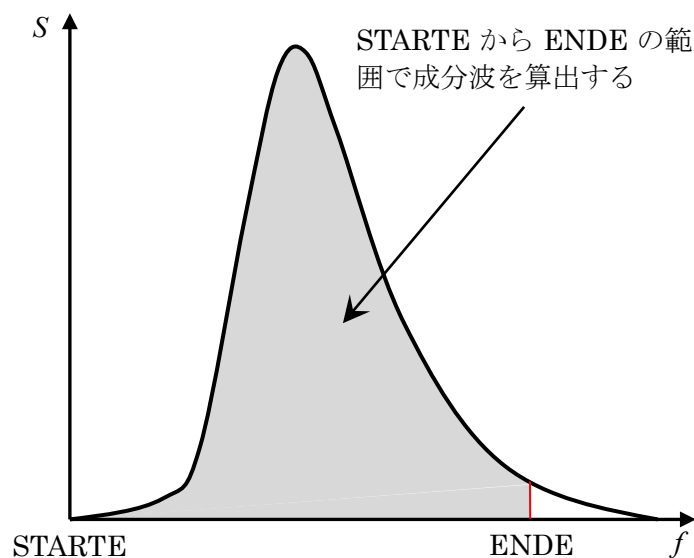


図 11 JONSWAP 型スペクトル積分範囲

cont.txt を設定後、実行プログラムにより成分波が作成される。ここで、成分波の作成にあたっては、STYPE に指定したパラメータにより別途 EMEP、エネルギー平衡方程式ならびにスペクトル解析から得られる外部入力データが必要となる。

以下に、STYPE に指定するファイルタイプ別の外部入力データの書式を示す。

[STYPE に JNS を指定した場合]

STYPE に JNS を指定した場合には、式(1.11)～(1.14)に示した JONSWAP 型の関数スペクトルから成分波を作成する。そのため、外部入力データファイルは必要とせず、cont.txt 内の FILEIN パラメータはダミーとなる。

[STYPE に Emep を指定した場合]

STYPE に Emep を指定した場合には、方向スペクトルの解析結果を外部入力データとして成分波を作成する。なお、方向スペクトルデータ（外部入力データ）は、コントロールファイル（cont.txt）において FILEIN で指定する。

複数のスペクトルを入力する際には、NOWT-PARI の（沿岸方向）格子番号を指定する必要があり、地点数と、方向スペクトルデータの保存順と同じ順序で NOWT-PARI の格子番号を保存したファイル（格子情報ファイル）を作成する必要がある。ファイル名は方向スペクトルデータファイル名[FILEIN]の後ろに「.pnt」を付けたものとする。

以下に、外部入力データとして用いる方向スペクトルデータと格子番号データ pnt ファイルの書式を示す。

一行目

CC	IDAY(5)	NSS	MDD
A15	5I5	I5	I5

CC : 注釈（プログラム中では使用されない）

IDAY : 観測日時（プログラム中では使用されない）

NSS : 周波数分割数

MDD : 方向分割数

2 行目以降 方向スペクトルデータ

FR(I)	SP(I)
E12.5	E12.5

EMEP(I,J),J=1,MDD

6E12.5

FR(I) : 周波数 (Hz)

SP(I) : パワースペクトル ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

EMEP(I,J) : 方向スペクトル解析結果

```

READ(FILE 番号,'(A15, 7I5)') CC, (IDAY(I),I=1,5), NSS, MDD
DO I = 1, NSS
  READ(FILE 番号,'(2E12.5)') FR(I), SP(I)
  READ(FILE 番号,'(6E12.5)') (EMEP(I,J), J=1, MDD)
ENDDO

```

＜格子情報ファイル書式＞

```

NUM_P
I5
JN_P(1)
I5
JN_P(2)
I5
JN_P(NUM_P)
I5

```

ファイル名は、FILEINの後ろに
「.pnt」を付加したもの

存在しない場合には、入射境界で単
一のスペクトル(スペクトル入力デ
ータの1つめ)を入射させる

NUM_P : 方向スペクトルデータの数
JN_P(K) : NOWT-PARIにおける沿岸方向格子番号

```

READ(FILE 番号,'(2I5)') NUM_P
DO K = 1, NUM_P
  READ(FILE 番号,'(2I5)') JN_P(K)
ENDDO

```

[STYLE に Ene を指定した場合]

STYLE に Ene を指定した場合には、エネルギー平衡方程式から得られた方向スペクトルを外部入力データとして成分波を作成する。なお、エネルギー平衡方程式の解析結果から得られた方向スペクトル(外部入力データ)は、コントロールファイル(cont.txt)で FILEIN として指定する。

エネルギー平衡方程式における格子番号(I_{Ene} , J_{Ene})と NOWT-PARI 計算の格子番号(I_n , J_n)の情報を与えるデータファイル(格子情報ファイル)を準備する。ファイル名は方向スペクトルデータファイル名[FILEIN]の後ろに「.pnt」を付けたものとする。ただし、 I_{Ene} は沿岸方向に共通の格子番号であるためファイルのヘッダー部分に保存することとしている。また、 I_n は入射波境界格子($I_n=I0$)であるため不要である。

以下に示すエネルギー平衡方程式から得られる方向スペクトルの書式（外部入力データの書式）は、「独立行政法人港湾空港技術研究所」保有の「波浪変形計算システム Ver.2.2R7」の計算結果から得られる方向スペクトルの出力結果に合わせた書式となっている。

CC							
A20							
NF_P			ND_P				
I5			I5				
F_P(I), I=1, NF_P							
8E10.3							
F2_P(I), I=1, NF_P							
8E10.3							
NUM_P1							
I5							
NB_P	N2_P	IENE	JENE	H_P	T_P	DIR_P	SMAX_P
I5	I5	I5	I5	H10.4	F10.4	F10.4	F10.4
D_P(J)		SP_P(I,J), I=1, NF_P					

8E10.3

CC : 注釈（プログラム中では使用されない）

NF_P : 周波数分割数

ND_P : 方向分割数

F_P(I) : 周波数（Hz）（プログラム中で使用しない）

F2_P(I) : 周波数（Hz）

NUM_P1 : データ数（収録されているデータの地点数）

NB_P : 地点番号（プログラム中で使用しない）

N2_P : （プログラム中で使用しない）

IENE : I 方向（岸沖方向）格子番号

JENE : J 方向（沿岸方向）格子番号

H_P : 有義波高（m）（プログラム中で使用しない）

T_P : 有義波周期（s）（プログラム中で使用しない）

DIR_P : 波向（deg）（プログラム中で使用しない）

SMAX_P : 方向集中度パラメータ（プログラム中で使用しない）

D_P(J) : 方向（deg.）

SP_P(I,J) : エネルギー平衡方程式から得られた方向スペクトル

READ(FILE 番号,'(A15)') CC

```

READ(FILE 番号,'(2I5)') NF_P, ND_P
READ(FILE 番号,'(8E10.3)') (F_P(I), I=1, NF_P)
READ(FILE 番号,'(8E10.3)') (F2_P(I), I=1, NF_P)
READ(FILE 番号,'(I5)') NUM_P1
READ(FILE 番号,'(4I5,4F10.4)') NB_P,N2_P,IN_P,JN_P,H_P,T_P,DIR_P,SMAX_P
DO  J = 1, ND_P
  READ(FILE 番号,'(8E10.3)') D_P(J), (SP_P(I,J), I=1, NF_P)
ENDDO

```

<Ene→NOWT-PARI データ受け渡し，格子情報ファイル書式>

NUM_P	IENE_P
I5	I5
JN_P(K)	JENE_P(K)
I5	I5

ファイル名は，FILEIN の後ろに
「.pnt」を付加したもの

存在しない場合には，入射境界で単
一のスペクトル(スペクトル入力デ
ータの1つめ)を入射させる

NUM_P : 抽出する地点の数
IENE_P : エネルギー平衡方程式における岸沖方向格子番号
JN_P(K) : NOWT-PARI における沿岸方向格子番号
JENE_P(K) : エネルギー平衡方程における沿岸方向格子番号

```

READ(FILE 番号,'(2I5)') NUM_P, IENE_P
DO K = 1, NUM_P
  READ(FILE 番号,'(2I5)') JN_P(K), JENE_P(K)
ENDDO

```

[出力データファイル書式]

成分波作成プログラム実行後，コントロールファイル (cont.txt) で FILEOUT として指定したファイル名で成分波データがファイル出力される．以下に，出力データファイルの書式を示す．

一行目

NUM_P

I5

NUM_P : 入力地点数

二行目

NS	IWTP	GAMMA	JN_P(K)
I5	I5	F5.2	I5

NS : 成分波数

IWTP : IWTP=3 : JONSWAP 型スペクトル
IWTP=9 : 任意スペクトル

GAMMA : JONSWAP 型スペクトルのピークの鋭さを表すパラメータ
STYPE に JNS 以外を指定した場合はダミー

JN_P(K) : 沿岸方向格子番号 (K : 地点番号)

三行目以降 成分波データ

FCN(I)	AMP(I, NP)	SITW(I)	EPS(I)
E20.7	E20.7	E20.7	E20.7

FCN(I) : 各成分波の周波数 (Hz)

AMP(I) : 振幅 (m)

SITW(I) : 各成分波の方向角 (rad)

EPS(I) : 位相差 ($0 \sim 2\pi$ の値を取る一様乱数)

```
DO K = 1, NUM_P
```

```
WRITE(FILE 番号, '(I5)') NS, IWTP, GAMMA, JN_P(K)
```

```
DO I = 1, NS
```

```
WRITE(FILE 番号, '(4E20.7)') FCN(I), AMP(I, K), SITW(I), EPS(I)
```

```
ENDDO
```

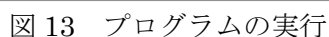
```
ENDDO
```

(1) フォートランコンパイラによる実行ファイルの作成

[実行ファイル作成例：Intel Fortran を使用する場合]



図 4 に示したディレクトリ構成に従って，所定の位置の実行ファイルおよび入力データファイルを配置した後，コマンドプロンプトから計算を実行する．図 13 にプログラムの実行状況を示す．



2.5. 出力データファイル

(1) 水深ファイル (depth2)

depth2 のデータは、潮位の加算、設定最小水深やスムージングを行った後の計算に用いる水深データである。

出力データファイルの書式を以下に示す。

1 行目

CC	IMAX	JMAX
A20	I10	I10

CC : 'depth2'

IMAX : x 方向格子数

JMAX : y 方向格子数

2 行目以降 水深データ

DEP2(I,J),I=1,IMAX

8F10.4

DAT(I,J) : 座標 (I,J) の水深

```
WRITE(FILE 番号,'(A20,2I10)') CC, IMAX, JMAX
```

```
DO 18 J=1, JMAX
```

```
WRITE(FILE 番号,'(8F10.5)') (DEP2(I,J), I=1, IMAX)
```

```
18 CONTINUE
```

(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (fd)

全差分格子のエネルギー減衰係数データがファイル出力される。fd データは addfd および計算領域設定変数で設定されたエネルギー減衰係数の両方が含まれている。

出力データファイルの書式を以下に示す。

1 行目 計算格子数

CC	IMAX	JMAX
A20	I10	I10

CC : 'FD'

IMAX : x 方向格子数

JMAX : y 方向格子数

2 行目以降 エネルギー減衰係数データ

FD(I,J),I=1,IMAX

8F10.4

DAT(I,J) : 座標 (I,J) のエネルギー減衰係数

```
WRITE(FILE 番号,'(A20,2I10)') CC, IMAX, JMAX
DO 297 J=1, JMAX
  READ(FILE 番号,'(8F10.6)') (FD(I,J), I=1, IMAX)
297 CONTINUE
```

(3) 時系列波形ファイル (te)

時系列データ出力格子座標ファイル (pnt) で指定した格子点における水位 η および流速 u , v の時系列値が, 設定変数 TDEL の時間間隔で出力される. データの出力位置は, 水位 η の定義位置である.

出力データファイルの書式を以下に示す.

E(NI(N),NJ(N))	U(NI(N),NJ(N))	V(NI(N),NJ(N))
F9.3	F9.3	F9.3

N : 水位

NI : x 方向格子数

NJ : y 方向格子数

E(N) : 水位

U(N) : x 方向格子数

V(N) : y 方向格子数

WRITE(FILE 番号,'(600F10.4)')

(E(N), N=1,NPMX), (U(N),N=1,NPMX), (V(N),N=1,NPMX)

(4) 水位ファイル (eta)

全差分格子の水位が, calcnd で設定した TSVE より後で, かつ計算開始からの計算ステップ数 $\times 2$ が設定変数 NOUT で割り切れるごとの時刻および計算終了時に出力される. 以下に出力データファイルの書式を示す.

1 行目

CC	IMAX	JMAX
A20	I10	I10

CC : 'ETA'

IMAX : x 方向格子数

JMAX : y 方向格子数

2 行目以降 水位の計算結果

DAT(I,J),I=1,IMAX

8F10.5

DAT(I,J) : 座標 (I,J) の水位 (eta)

```
WRITE(FILE 番号,'(A20,2I10)') CC, IMAX, JMAX
DO J=1, JMAX
  WRITE( FILE 番号,'(8F10.5)') (DAT(I,J) , I=1, IMAX)
ENDDO
```

(5) 有義波高 1 ファイル (h), 有義波高 2 ファイル (h13), 平均水位ファイル (eavg) および時間平均流速ファイル (uvavg)

全差分格子の有義波高 (2 種類), 平均水位および時間平均流速のデータが, calend_d で設定した TSVE より後で, かつ計算開始からの計算ステップ×2 が設定変数 NOUT で割り切れるごとの時刻, および計算終了時に出力される. また, TSVE 時刻から計算終了時までの水位 η , 流速 u , v を用いて算定される平均水位 (EAVG2), 時間平均流速 (UAVG2, VAVG2) はこれらの出力後, 同一ファイルに追加出力される.

有義波高 1 (HAKOU) は, TSVE 時刻より後で, 後述する平均水位 EAVG をゼロ線としたゼロアップクロス解析により算出する. ただし, 不規則波の場合, 有義波高は平均波高から換算して算定される. すなわち, まず, 1 つ前のゼロクロス時刻から直前のゼロクロス時刻までの間の各格子点における水位最大値および水位最小値を求め, その差を個々波の波高として定義する. 次に, それらをその時刻までに得られた波数で除して平均波高を算出する. 規則波ではこれが有義波高 1 ファイル (h) に出力される. さらに不規則波では, 表 9 に示す係数を乗じたものが有義波高 1 として出力される.

なお, 任意スペクトルおよび表 8 に示す γ 以外 (JONSWAP 型) の係数については, 式(2.1) に示すスペクトル形状パラメータ $\kappa(T_{01})$ を算出後, 図 14 に示すスペクトル形状パラメータ $\kappa(T_{01})$ と $H_{1/3}/H_{\text{mean}}$ の関係式(2.3)を用いて係数を算出している.

表 8 有義波高 1 (HAKOU) の算定に用いる係数

	規則波	ブレット シュナイ ダー・光易 型	修正ブレッ トシュナイ ダー・光易 型	JONSWAP 型			
				$\gamma=1.0$	$\gamma=3.3$	$\gamma=10.0$	$\gamma=20.0$
$H_{1/3}/\bar{H}$	1.000	1.597	1.565	1.565	1.573	1.576	1.577

$$\kappa(\bar{T})^2 = \left| \frac{1}{m_0} \int_0^\infty S(f) \cos 2\pi f \bar{T} df \right|^2 + \left| \frac{1}{m_0} \int_0^\infty S(f) \sin 2\pi f \bar{T} df \right|^2 \quad (2.1)$$

ここに,

$S(f)$: スペクトル密度 ($\text{m}^2 \cdot \text{sec}$)

$\bar{T}$: 平均周期 ($=m_0/m_1$)

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \quad (2.2)$$

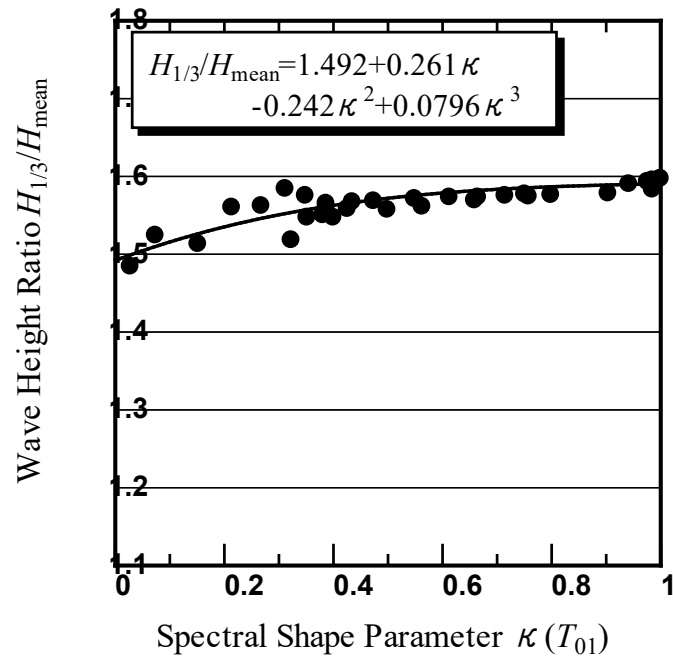


図 14 スペクトル形状パラメータ $\kappa(T_{01})$ と $H_{1/3}/H_{\text{mean}}$ の比較⁶⁾

$$H_{1/3}/H_{\text{mean}} = 1.492 + 0.261 \kappa - 0.242 \kappa^2 + 0.0796 \kappa^3 \quad (2.3)$$

有義波高 2 (HRMS) は、基本的には、TSVE から計算終了時までの水位の 2 乗平均 η_{rms} を用いて式(2.4)により算出し、有義波高 2 ファイル (h13) に出力される。しかし、NOUT 毎の時刻に出力される有義波高 2 (HRMS) は、TSVE 時刻からその時刻までの水位の 2 乗平均 η_{rms} を用いて算出される。

$$H_{1/3} = A \sqrt{\sum_{i=ns}^{ne} \eta_i^2 / (ne - ns + 1)} \quad (2.4)$$

ここで、 ns は水位データを加算し始める時間ステップ、 ne は水位データを最後に加算する時間ステップ、 A は表 9 に示す値を用いている。規則波は、表 8 に示した係数で除して平均波高に換算し、有義波高 2 ファイル (h13) に出力される。

なお、任意スペクトルおよび表 9 に示す γ 以外の係数については、式(2.1)に示すスペクトル形状パラメータ $\kappa(T_{01})$ を算出後、図 15 に示すスペクトル形状パラメータ $\kappa(T_{01})$ と有義波高と波形の標準偏差値の比率から求めた式(2.5)に示す関係式を用いて係数 ($H_{1/3} / \eta_{rms}$) を算出している。

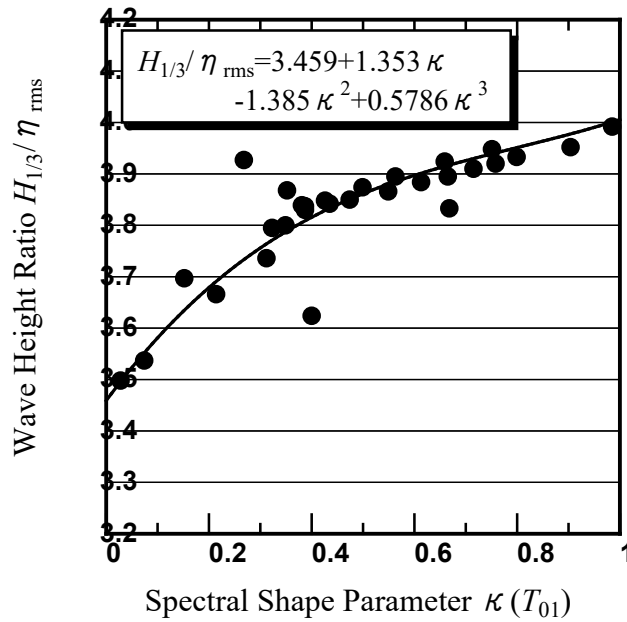


図 15 スペクトル形状パラメータ $\kappa(T_{01})$ と $H_{1/3} / \eta_{mean}$ の比較 ⁶⁾

$$H_{1/3} / \eta_{rms} = 3.459 + 1.353\kappa - 1.385\kappa^2 + 0.5786\kappa^3 \quad (2.5)$$

さらに出力時には、式(2.6)を用いて平均水位が変動することによる 2 乗平均 η_{rms} の補正を行っていることに注意されたい。ここで、HRMS2 は平均水位を補正せずに算出された水位の 2 乗平均 η_{rms} 値、EAVG は後述する平均水位である。

$$\text{平均水位補正後の 2 乗平均値 : } HRMS = \sqrt{HRMS^2 - EAVG^2} \quad (2.6)$$

表 9 有義波高 2 (HRMS) の算定に用いる係数

	規則波	ブレットシ ュ ナ イ ダ ー・光易型	修正ブレット シ ュ ナ イ ダ ー・光易型	JONSWAP 型			
				$\gamma=1.0$	$\gamma=3.3$	$\gamma=10.0$	$\gamma=20.0$
$H_{1/3}/\eta_{rms}$	2.828	4.004	3.800	3.80	3.87	3.91	3.93

なお、このように波高の確率密度分布を仮定して算出される波高分布は、全体の傾向を把握するための出力結果として理解されたい。ちなみに、一様勾配上（勾配 1/30）の波高分布の計算結果では、有義波高 1 (HAKOU) は有義波高 2 (HRMS) に比べ、波の非線形性が卓越する相対水深において、より理論値に近い値となっていることが確認されている。ただし、設計波の算出等、より正確な波高値を求める必要がある場合には、後述する時系列波形データ (te) を用い、ゼロアップクロス解析等の統計解析を行い、有義波高や最大波高などの諸元を算出することが望ましい。

平均水位 (EAVG) は、その時刻より、規則波では前 30 波、不規則波では前 100 波分の水位データを用いて、直線近似により平均水位変化のトレンドを求め、その時刻の平均水位を推定することにより算出した。また、これらの時刻に達しない計算開始直後の各時刻では、従来通り算術平均によって平均水位 EAVG を算出する。このような方法により、常に直前の最大 30 波あるいは 100 波分の水位データに対する平均水位 EAVG が算定されている。これらは、NOUT 毎の時刻や計算終了時における出力のほか、有義波高 1 (HAKOU) の算定におけるゼロ線の更新や有義波高 2 (HRMS) の算定における平均水位補正などに活用されている。なお、このトレンド算定法の詳細を付録に示す。

時間平均流速 (UAVG, VAVG) は、EAVG と同様に、各残差流成分の変化のトレンドを直線近似する方法を適用してより真値に近い値として算出され、NOUT 毎の時刻や計算終了時に時間平均流速ファイル (uvavg) に出力される。

なお、これらの算出方法の詳細については、「平成 18 年度ビジネスモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」資料 7 の 3.2 節 (p.26) を参照していただきたい。

出力データファイルの書式は有義波高 1 ファイル、有義波高 2 ファイル、平均水位ファイル、時間平均流速ファイルとも同じであるが、時間平均流速ファイルについては x 方向流速 u 、y 方向流速 v の順に以下のデータが繰り返される。

データの出力位置は、すべて水位 η の定義位置としている（時間平均流速も水位 η の定義位置になおして出力している）。

1 行目

CC	IMAX	JMAX
A20	I10	I10

CC : 有義波高 1 の場合'HAKOU', 有義波高 2 の場合'HRMS', 平均水位の場合'eavg',
 x 方向流速 u の場合'UAVG', y 方向流速 v の場合'VAVG'

IMAX : x 方向格子数

JMAX : y 方向格子数

2 行目以降 有義波高 1 の場合 HAKOU(I,J), 有義波高 2 の場合 HRMS(I,J), 平均水位
EAVG(I,J), x 方向流速 UAVG(I,J)あるいは y 方向流速 VAVG(I,J)

DAT(I,J),I=1,IMAX

8F10.5

DAT(I,J) : 座標 (I,J) の有義波高 (h13), 平均水位 (eavg) および時間平均流速 (uvavg)

WRITE(FILE 番号,'(A20,2I10)') CC, IMAX, JMAX

DO 651 J=1, JMAX

WRITE(FILE 番号,'(8F10.5)') (DAT(I,J) , I=1, IMAX)

651 CONTINUE

(6) 波数出力ファイル (nwave)

全差分格子の計算波数がファイル出力される. 出力データファイルの書式を以下に示す.

1 行目 計算格子数

CC	IMAX	JMAX
A20	I10	I10

CC : 'FD'

IMAX : x 方向格子数

JMAX : y 方向格子数

2 行目以降 波数データ

NWAVE(I,J),I=1,IMAX

8I10

NWAVE(I,J) : 座標 (I,J) の計算波数

WRITE(FILE 番号,'(A20,2I10)') CC, IMAX, JMAX

```

DO 297 J=1, JMAX
  WRITE(FILE 番号, '(8F10.6)') (NWAVE(I,J), I=1, IMAX)
297 CONTINUE

```

(7) 波速ベクトルおよび波向角出力ファイル (cwavg1, cwavg2)

全差分格子の波速ベクトルおよび波向角がファイル出力される。ここで、cwavg1 は微小振幅波理論をもとに波速および波向角（平均波向）を計算した結果であり、cwavg2 は共分散法により波速および波向角（平均波向）を計算した結果である。

なお、これらの詳細については、「平成 18 年度ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」資料 7 の 3.2 節 (p.26) を参照していただきたい。

以下に、出力データファイルの書式を示す。

[cwavg1]

1 行目 計算格子数

CC	IMAX	JMAX
A20	I10	I10

CC : コメント

IMAX : x 方向格子数

JMAX : y 方向格子数

2 行目以降 データ

AVGCWX(I,J), I=1, IMAX

8F10.4

AVGCWX(I,J) : 座標 (I,J) の x 方向平均波速 (m/s)

```

WRITE(FILE 番号, '(A20,2I10)') '          AVGCWX', IMAX, JMAX
DO 663 J = 1, JMAX
  WRITE(FILE 番号, '(8F10.5)') (AVGCWX(I,J), I = 1, IMAX)
663 CONTINUE

```

上記のセットで、以下のファイルが続けて出力される。

AVGCWX(I,J) : 座標(I,J)の y 方向平均波速 (m/s)

DIRM(I,J) : 座標(I,J)の平均波向 (deg.)

SYUKI(I,J) : 座標(I,J)の平均周期 (s)

NDIRC(I,J) : 座標(I,J)の波数

[cwavg2]

1 行目 計算格子数

CC	IMAX	JMAX
A20	I10	I10

CC : コメント

IMAX : x 方向格子数

JMAX : y 方向格子数

2 行目以降 データ

AGCWX2(I,J),I=1,IMAX

8F10.4

AGCWX2(I,J) : 座標 (I,J) の x 方向平均波速 (m/s)

WRITE(FILE 番号, '(A20,2I10)') ' AGCWX2',IMAX,JMAX

DO 7063 J = 1, JMAX

WRITE(FILE 番号, '(8F10.5)') (AGCWX2(I,J), I = 1, IMAX)

7063 CONTINUE

上記のセットで、以下のファイルが続けて出力される。

AGCWY2(I,J) : 座標(I,J)の y 方向平均波速 (m/s)

DIRM2(I,J) : 座標(I,J)の平均波向 (deg.)

(8) 砕波判定ファイル (saiha)

全差分格子点における砕波判定フラグがファイル出力される。出力される時刻は計算終了時である。砕波している場合 1, 砕波していない場合 0 が出力される。データの出力位置は、水位 η の定義位置である。

出力データファイルの書式を以下に示す。

1 行目

CC	IMAX	JMAX
A20	I10	I10

CC : 'SAIHA'

IMAX : x 方向格子数

JMAX : y 方向格子数

2 行目以降 砕波判定フラグ

BRKMESH(I,J),I=1,IMAX

20F4.1

BRKMESH(I,J) : 座標 (I,J) の砕波フラグ (saiha)

WRITE(FILE 番号,'(20A,2I10)') CC, IMAX, JMAX

DO 6121 J=1, JMAX

WRITE(FILE 番号,'(20F4.1)') (BRKMESH(I,J) , I=1, IMAX)

6121 CONTINUE

3. モデル地形による計算例

ここでは、本ビジネスモデルによる計算例を示す。一例目は、計算領域に堤体が一本配置された簡単な地形に対し、プログラムの具体的な使用方法を示す。二例目は、港湾形状の地形に対して本プログラムを適用した結果について示す。さらに、三例目は、水深が一定でない造波境界で斜め波を造波した例を示す。

3.1. 簡単な地形に対する適用例

簡単な地形に対する適用例として、図 16 に示すような矩形領域に波高 1.0m, 周期 12.0s の規則波が入射する場合の使用例を示す。

計算領域のサイズは $735\text{m}(x \text{ 軸}) \times 645\text{m}(y \text{ 軸})$ とし、外周にエネルギー吸収帯を配置する。なお、本ブシネスクモデルは、高次のエネルギー減衰項を導入しているため、エネルギー吸収帯の幅は、1 波長幅が確保されるように設定する。また、外周には 2 格子分非計算格子を設ける必要があるため、全体の格子数は x 方向 $\times y$ 方向 $= 151 \times 133$ となる。

計算領域内の水深は、入射波境界で 10m、堤体の前面で斜面勾配 $s=1/10$ で 10m から 5m に変化し、その岸側は 5m の一定水深を仮定している。また、時系列データの観測点を○印で示す位置に配置した。

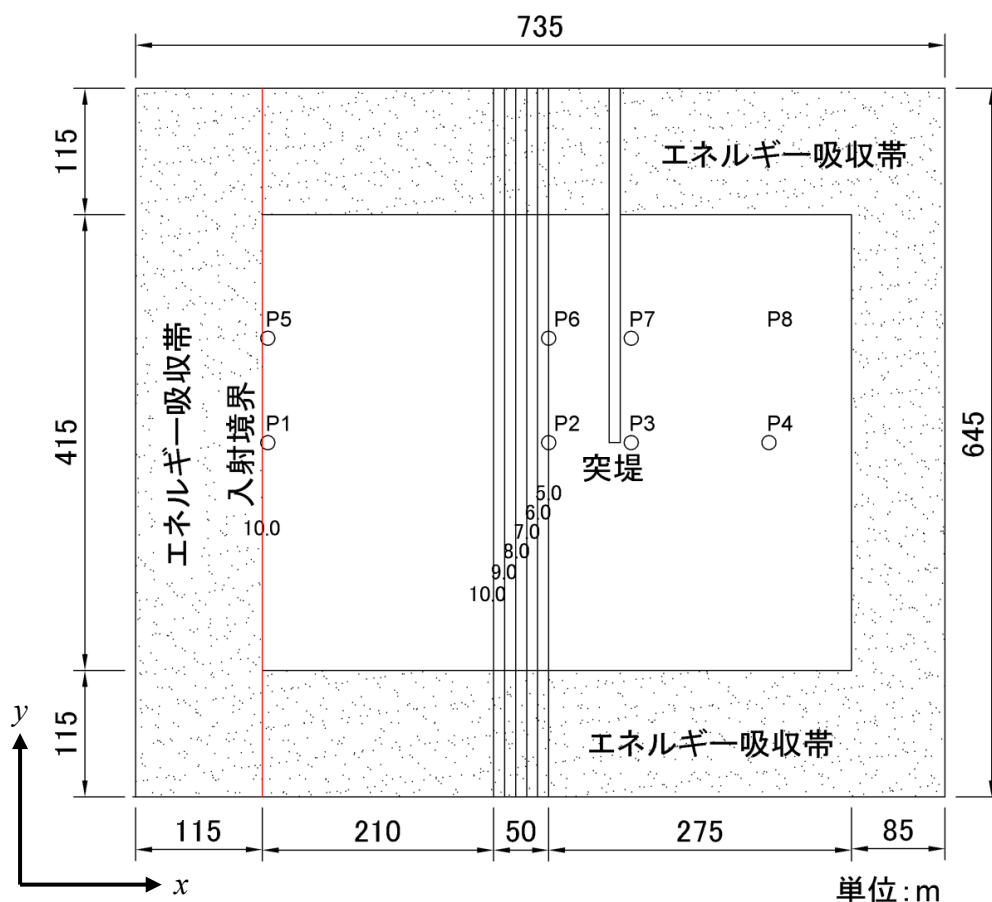


図 16 計算領域

(1) 水深ファイル (depth)

「2.3 入力データファイル」の「(1) 水深ファイル (depth)」に示した書式で各格子の水深を作成する。配列は計算領域設定ファイル内(bsq_bsq46c6a.inc)において設定した IMAX, JMAX にあわせて 151×133 とする。堤体位置の差分格子と計算領域外周の 2 格子に対して $h_{ij} = -999.0$ (- 900.0 より小さい値) を配置している。

(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (addfd)

「2.3 入力データファイル」の「(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (addfd)」に示した書式で各格子のエネルギー減衰係数を設定する。配列は IMAX, JMAX に合わせて 151×133 とする。本ケースでは、堤体を直立壁（完全反射境界）と仮定し、計算領域外周以外はエネルギー吸収帯を配置しないものとして、全ての配列要素に 0.0 を設定している。

(3) 時系列データ出力格子座標ファイル (pnt)

計算領域内に設定した時系列データ出力点の格子座標を、「2.3 入力データファイル」の「(2) 時系列データ出力格子座標ファイル(pnt)」に示した書式で作成する。本ケースでは、以下の格子点の時系列データを出力する。表 10 に本計算で用いた出力格子点を示す。

表 10 時系列データ出力格子座標 (pnt)

Point	格子番号	
	I 方向	J 方向
P1	26	67
P2	77	67
P3	92	67
P4	117	67
P5	26	85
P6	77	85
P7	92	85
P8	117	85

(4) 計算条件設定ファイル (calcnd)

計算に用いた計算条件を表 11 に示す。また、計算条件設定ファイル (calcnd) を表 12 に示す。

表 11 計算条件 (Ver.46c7a 仕様)

変 数	Format	内 容
IS, IO, I1, IE JS, JO, J1, JE	I10	IS=3, IO=26, I1=132, IE=149 JS=3, JO=25, J1=108, JE=131
DX	F10.0	5.0m (DY=5.0m)
H13, T13	F10.0	$H_{1/3}=1.0\text{m}$, $T_{1/3}=12.0\text{s}$
SIT0	F10.0	0.0°
NS	I10	Ns=1 (規則波)
SMAX	F10.0	Smax=999.0
TLIMIT	F10.0	9999.0 (ダミー)
WL	F10.0	WL=0.0m
H1	F10.0	H1=10.0m
FF1,FF2,FFHLM	F10.0	FF1=FF2=0.02 FFHLM=0.0m
DT	F10.0	DT= $T_{1/3}/50.0\text{s}$
TDEL	F10.0	TDEL=DT×2.0 s 1 周期あたり 25 点出力
TOUT	F10.0	TOUT=0.0 s 計算終了時刻の計算結果のみを出力
TTIN	F10.0	TTIN=2.0× $T_{1/3}\text{s}$
TSVE	F10.0	TSVE=10.0× $T_{1/3}\text{s}$
TEND	F10.0	TEND=30.0× $T_{1/3}\text{s}$
KAISU	I10	KAISU=0
IWTP	I10	IWTP=0

表 12 calcd ファイル (Ver.46c7a 仕様)

1 行目:	3	26	132	149	5.0
2 行目:	3	26	108	131	
3 行目:	1.0	12.0	0.0		
4 行目:	1	999.0	999.0		
5 行目:	0.0	10.0			
6 行目:	0.02	0.02	0.0		
7 行目:	0.24	0.48	0.0		
8 行目:	24.0	120.0	360.0		
9 行目:	0	0			

(5) 計算結果

計算終了時の水位分布 (eta), 波高分布 (h) ならびに時系列データ観測格子点における水位時間波形 (te) を図 17～図 19 に示す. 同様に, 波向を 15° と設定した場合での水位分布, 波高分布ならびに水位時間波形を図 20～図 22 に示す.

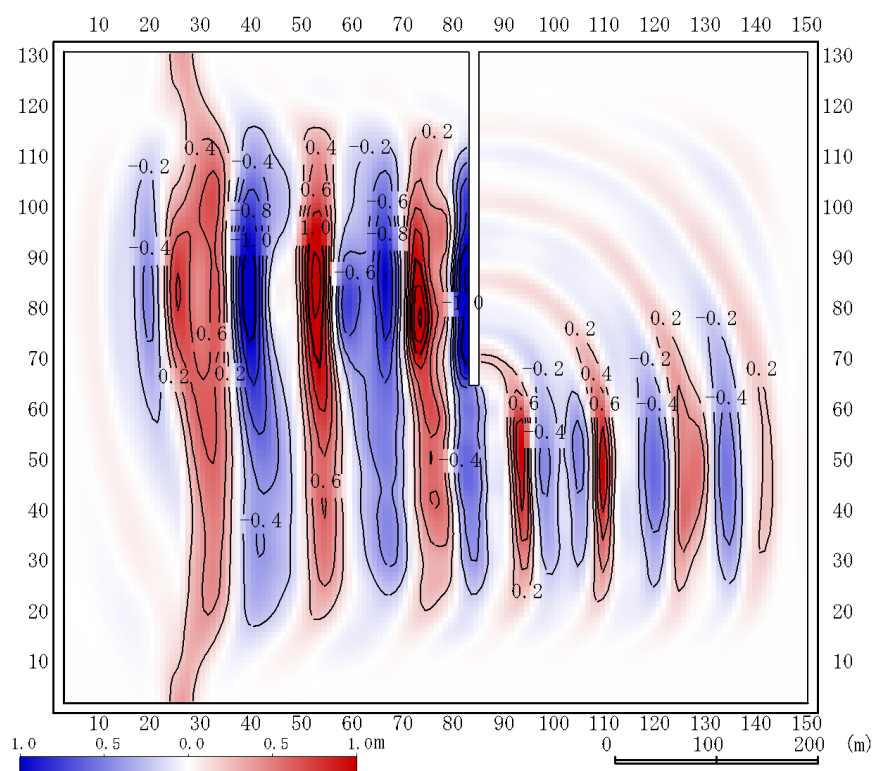


図 17 計算結果（水位分布）

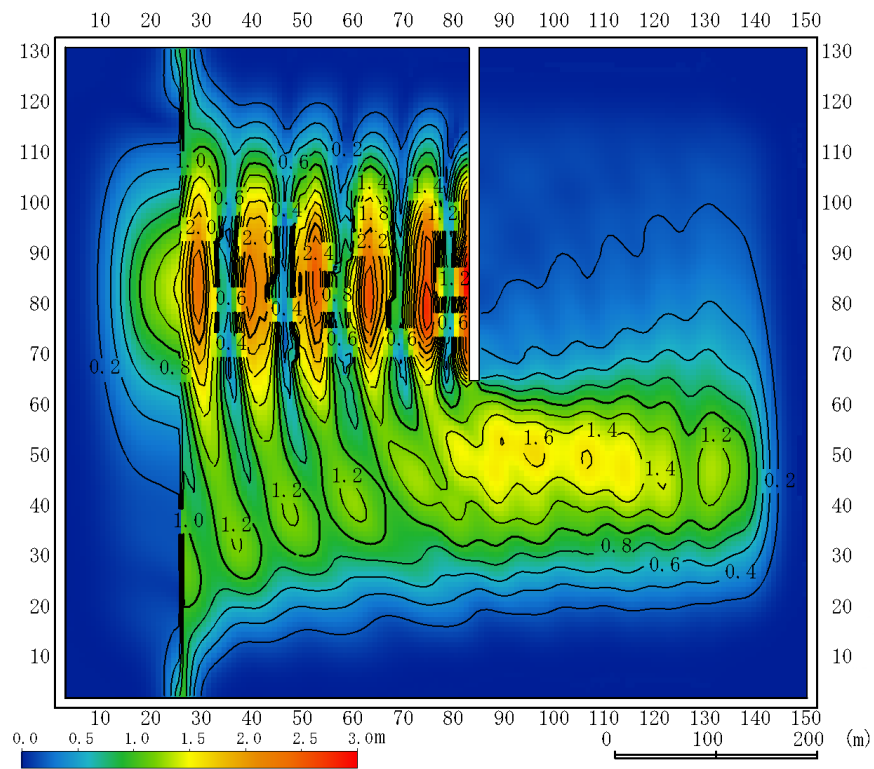


図 18 計算結果（波高分布）

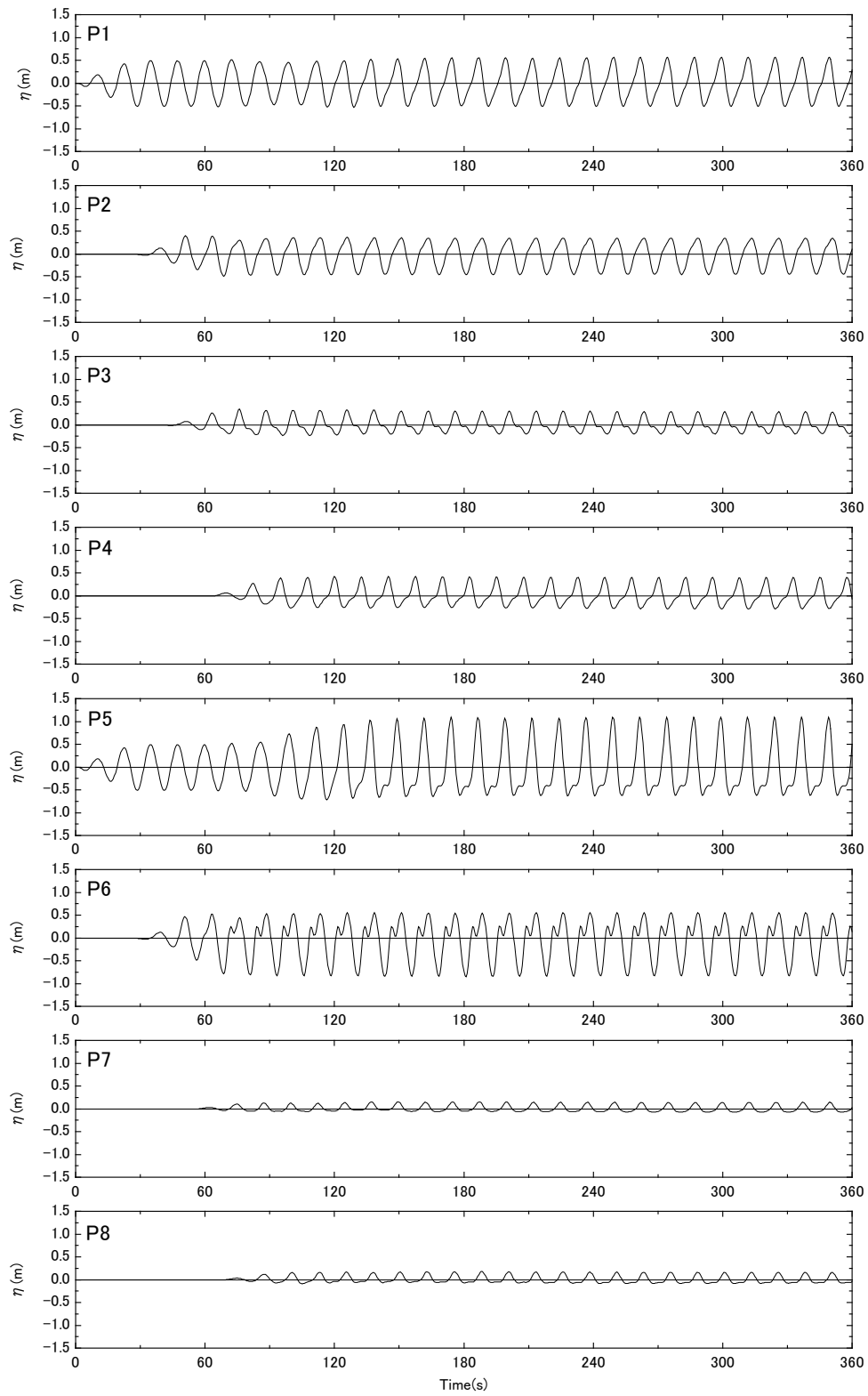


図 19 計算結果（時間波形）

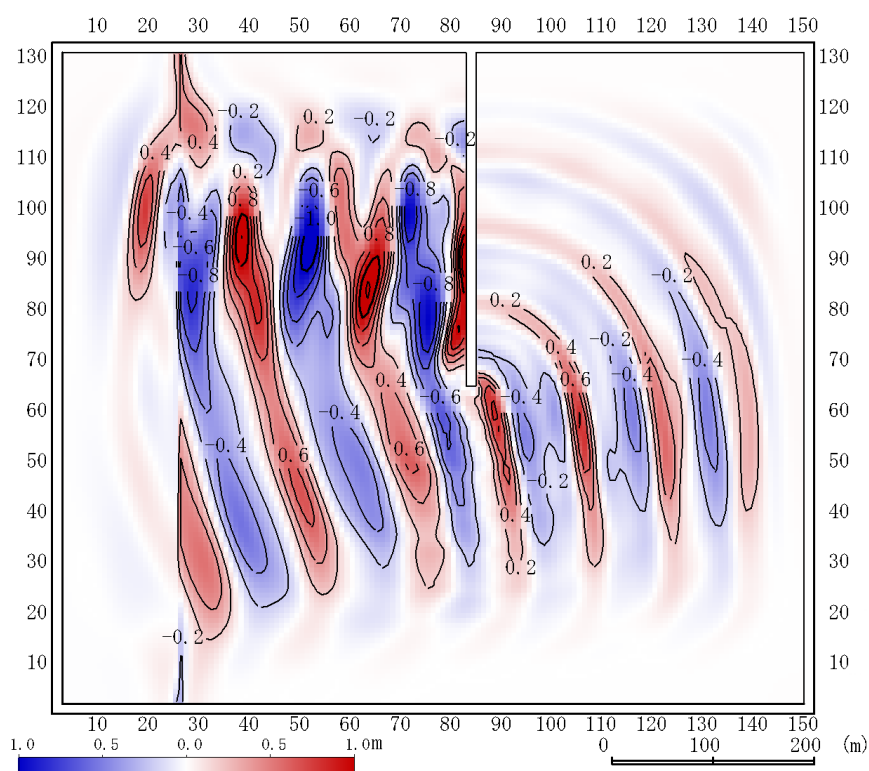


図 20 計算結果（水位分布）

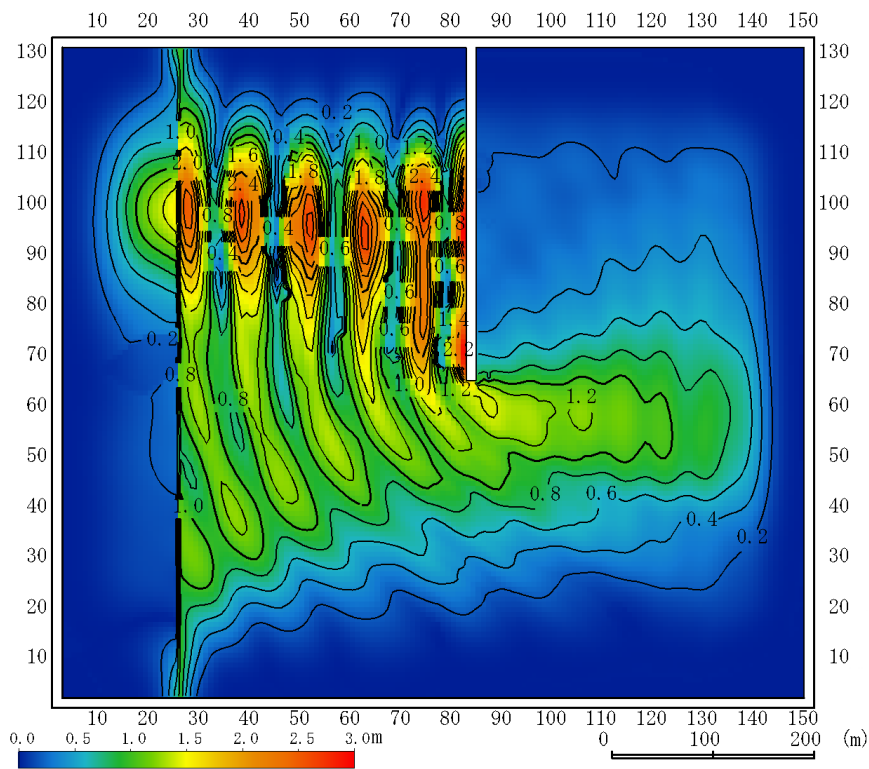


図 21 計算結果（波高分布）

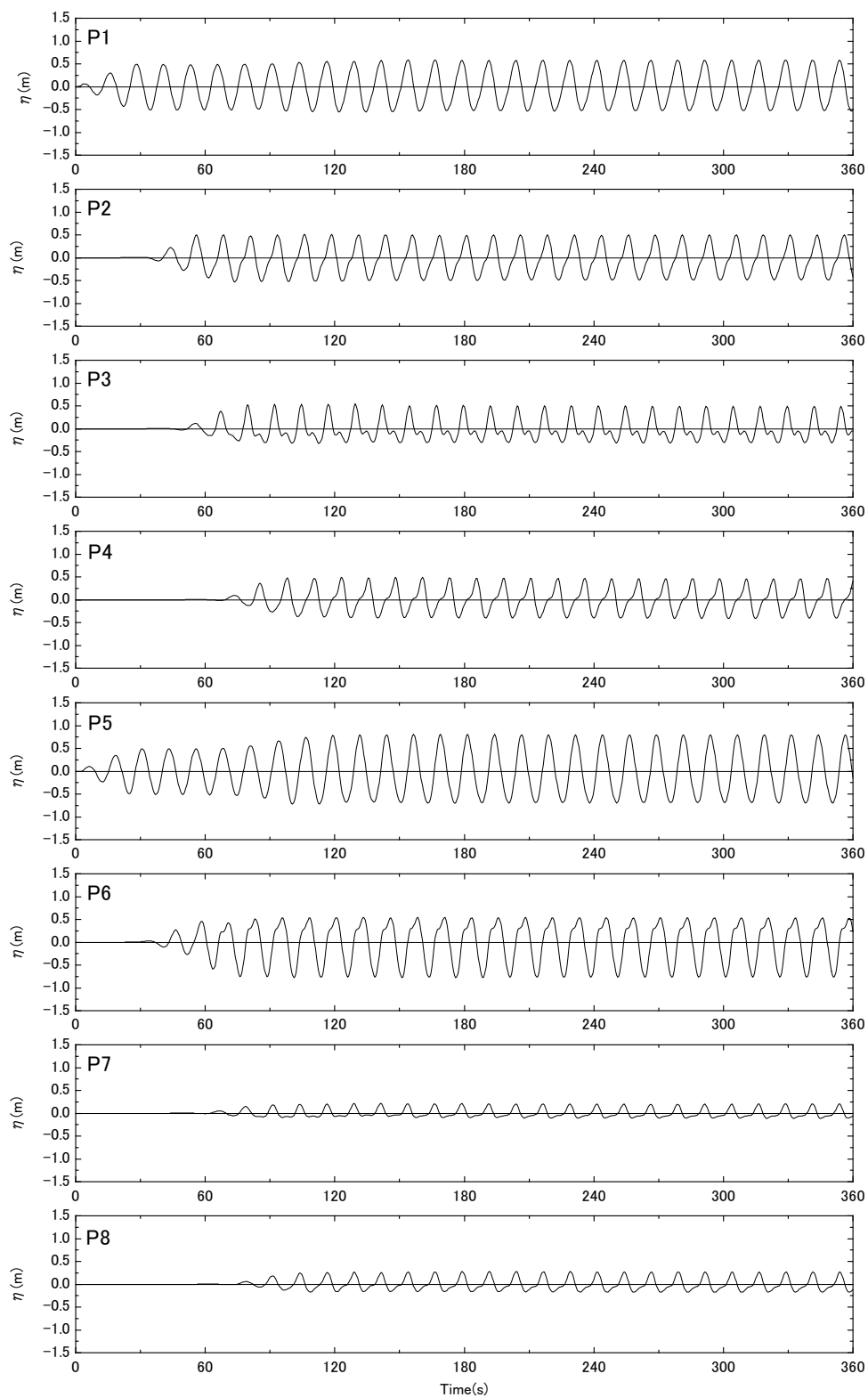


図 22 計算結果（時間波形）

3.2. モデル港湾に対する適用例

モデル港湾に対する本プログラムの適用例を示す。今回用いたモデル港湾および海底地形は、図 23 に示すように波の屈折や浅水変形を考慮するために、海岸線に平行な等深浅が水深 - 15m まで勾配 1/50 で続く海浜地形に、水深 - 12m の航路と水深 - 7m のバースや泊地が整備された港湾形状および海底地形とした。

入射境界の水深は 20.0m とし、入射波境界の沖側および側方には反射波を吸収するためのエネルギー吸収帯を設けた。なお、本モデルはエネルギー吸収帯に高次のエネルギー減衰項を導入していることから、エネルギー吸収帯の幅は入射波境界水深における 1 波長分の幅を確保している。一方、陸地側には、反射率が 0 となるようなエネルギー吸収帯を設けた。また、主および副防波堤の反射率は、 $Kr=0.4$ としている。

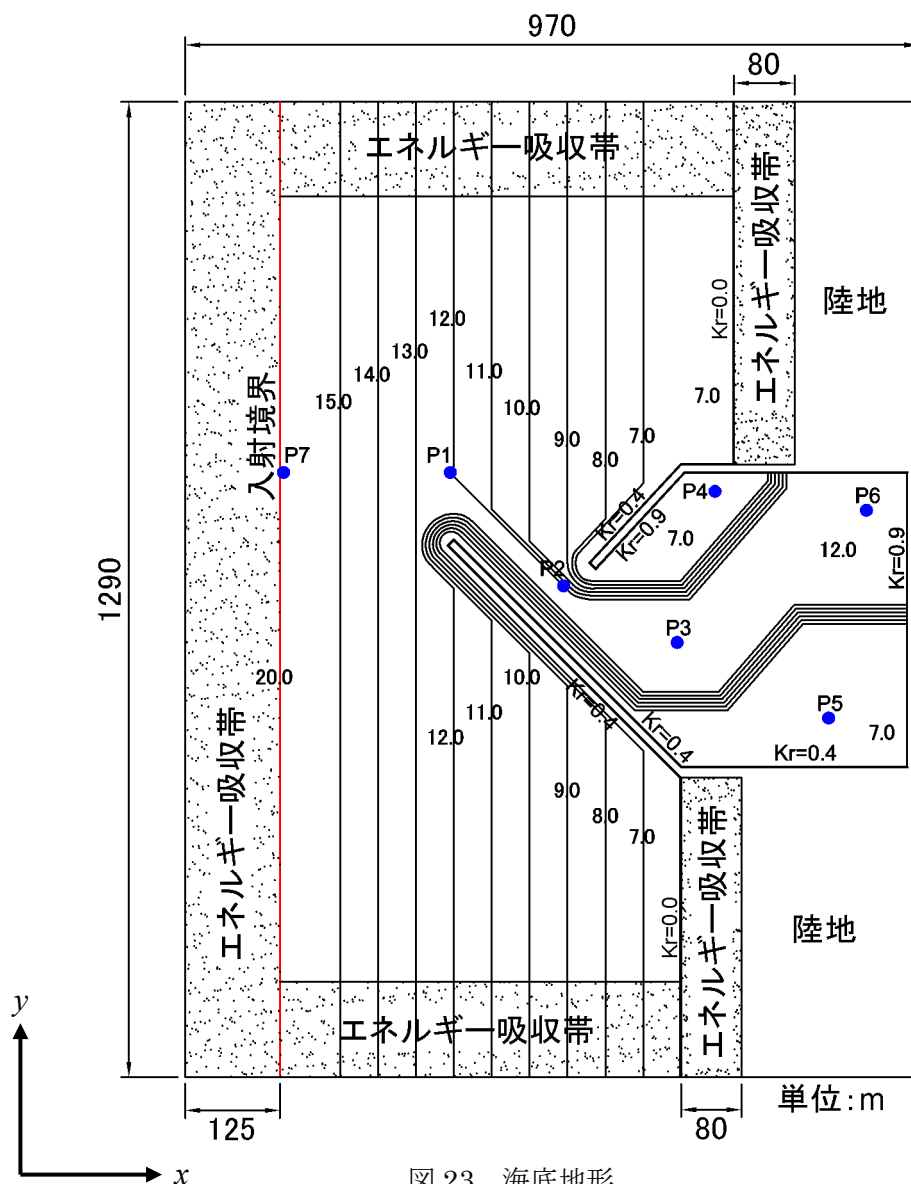


图 23 海底地形

(1) 水深ファイル (depth)

「2.3 入力データファイル」の「(1) 水深ファイル (depth)」に示された書式で各格子の水深を作成する。配列は、計算領域設定ファイル内 (bsq_bsq46c6a.inc) において設定した IMAX, JMAX にあわせて 195×262 とする。堤体位置の差分格子と計算領域外周の 2 格子に対して $h_{ij} = -999.0$ (-900.0 より小さい値) を配置する。また、本計算では、陸域部分について反射率が 0 となるようにエネルギー吸収帯を設定していることから、陸域格子のエネルギー吸収帯内の水深を 7.0m として設定している。

(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (addfd)

「2.3 入力データファイル」の「(2) エネルギー吸収帯係数ファイル (addfd)」に示した書式でエネルギー減衰係数を設定する。配列は IMAX, JMAX にあわせて 195×262 とする。本ケースでは、陸域部は反射率が 0 となるようエネルギー吸収帯を設定した、また、防波堤部分には反射率が 0.4 となるよう防波堤格子前面にエネルギー吸収帯を設定した。なお、その他の格子については 0.0 として設定した。

任意の反射率となるようにエネルギー吸収帯を設定する場合、式(2.2)または図 3 から任意の反射率となるエネルギー吸収帯幅 F を算出する。エネルギー吸収帯幅 F を算出後、式(2.3)によりエネルギー減衰係数を算出し、反射率を設定したい格子に対して addfd ファイル内において係数を設定する。以下、図 23 に示す防波堤前面および陸域部におけるエネルギー減衰係数の設定方法を示す。

[海域側にエネルギー吸収帯を設定する場合]

防波堤前面に反射率 $K_r = 0.4$ となるエネルギー吸収帯を設定する。防波堤前面の水深は 7.0m であることから、周期 10.0s に対する波長は $L = 78.92\text{m}$ となる。そのため、式(1.20)よりエネルギー吸収帯の必要幅は、

$$F = aL \cdot \ln \left(1/K_r + \sqrt{(1/K_r)^2 - 1} \right) = 24.73\text{m}$$

となる。

エネルギー吸収帯の幅を求めた後、式(1.17)より格子毎のエネルギー減衰係数を算定する。ここで、エネルギー吸収帯を海域側に設定するには、必要幅 F をもとに減衰係数を設定するための格子数を設定する。なお、格子数を設定するための距離 x は、格子座標の中心を基準として設定する。本計算例では格子幅が 5.0m であることから、3 格子として設定した場合、陸域境界からの距離が 12.5m となる。そのため、上記で求めたエネルギー吸収帯の必要幅を超えてしまうことから、図 24 に示すように今回の計算では、陸域境界から 2 格子分エネルギー減衰係数を設定した。

なお、本計算例のようにエネルギー吸収帯の幅を 2 格子として設定した場合、式(1.20)から求めたエネルギー吸収帯の必要幅 F よりも短くなる。そのため、実際の反射率は $K_r = 0.4$

より大きい可能性もある。計算格子幅は、エネルギー吸収帯の必要幅に応じて可変とすることが出来ないため、実際の計算等で現地港湾に適用する際には、設定したエネルギー吸収帯の幅に対する反射率を予備計算により把握しておくことが望ましい。

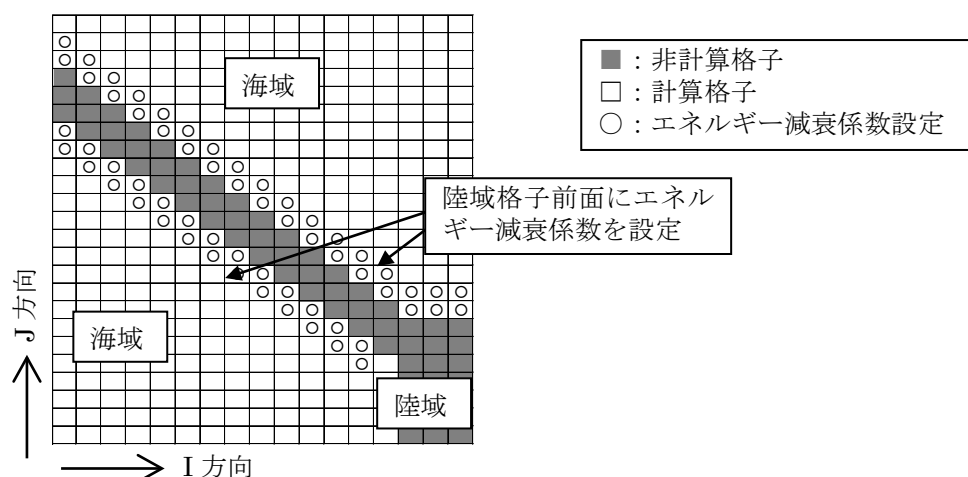


図 24 海域側にエネルギー吸収帯を設定する場合

【陸域側にエネルギー吸収帯を設定する場合】

陸域側に反射率 $K_r=0.0$ となるエネルギー吸収帯を設定する。陸域側護岸前面の水深は 7.0m であることから、周期 10.0s に対する波長は $L=78.92\text{m}$ となる。反射率を 0.0 にするためには 1 波長以上の幅のエネルギー吸収帯を設定する必要があるため、本検討では幅 80.0m（16 格子）のエネルギー吸収帯を設定する。

陸域側に吸収帯を設定する場合には、図 25 に示すように陸域の非計算格子を計算格子に変更し、その部分にエネルギー減衰係数を設定することで反射率が 0.0 となるような無反射境界を設定する。なお、今回の試計算では、反射率が 0 となるよう陸域側に波長と同じ幅のエネルギー吸収帯を設定したが、エネルギー吸収帯の幅を変えることで、陸域側においても任意の反射率を持ったエネルギー吸収帯を設けることが可能である。

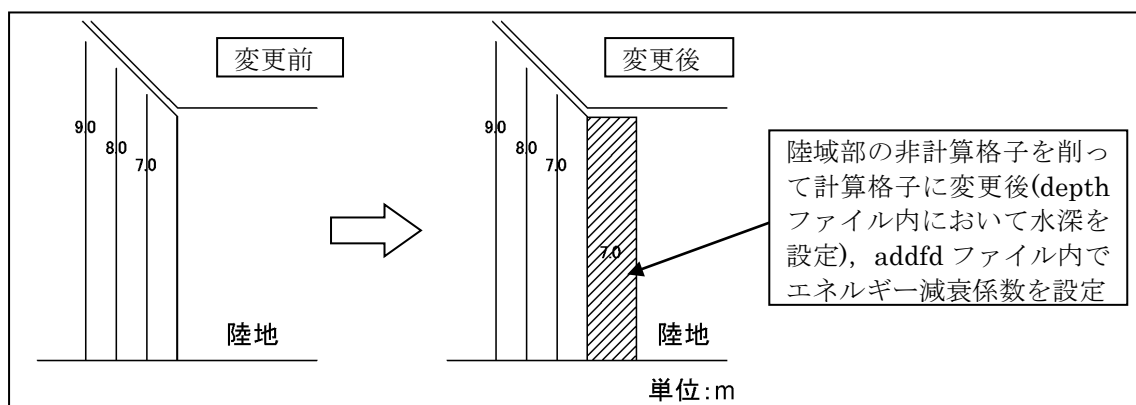


図 25 陸域側にエネルギー吸収帯を設定する場合

(3) 時系列データ出力格子座標ファイル (pnt)

計算領域内に設定した時系列データ出力点の格子座標を、「2.3 入力データファイル」の「(2) 時系列データ出力格子座標ファイル(pnt)」に示した書式で作成する. 本ケースでは, 表 13 に示す格子点の時系列データを出力する.

表 13 時系列データ出力格子座標 (pnt)

Point	格子番号	
	I 方向	J 方向
P1	70	160
P2	100	130
P3	130	115
P4	140	155
P5	170	95
P6	180	150
P7	28	160

(4) 計算条件設定ファイル (calcmd)

本計算に用いた計算条件を表 14 に示す. また, 計算条件設定ファイル (calcmd) を表 15 に示す.

表 14 計算条件 (Ver.46c7a 仕様)

変 数	Format	内 容
IS, IO, I1, IE JS, JO, J1, JE	I10	IS=3, IO=28, I1=193, IE=193 JS=3, JO=28, J1=235, JE=260
DX	F10.0	5.0m (DY=5.0m)
H13, T13	F10.0	$H_{1/3}=1.0\text{m}$, $T_{1/3}=10.0\text{s}$
SIT0	F10.0	0.0°
SMAX	F10.0	Smax=25
TLIMIT	F10.0	TLIMIT = 1.0s
NS	I10	Ns=512
WL	F10.0	0.0m
H1	F10.0	20.0m
FF1,FF2,FFHLM	F10.0	FF1=FF2=0.02, FFHLM=0.0m
DT	F10.0	DT= $T_{1/3}/400.0\text{s}$
TDEL	F10.0	TDEL=DT×20.0 s 1 周期あたり 25 点出力
TOUT	F10.0	TOUT=0.0 s 計算終了時刻の計算結果のみ出力
TTIN	F10.0	TTIN= $10.0 \times T_{1/3} \text{ s}$
TSVE	F10.0	TSVE= $100.0 \times T_{1/3} \text{ s}$
TEND	F10.0	TEND= $210.0 \times T_{1/3} \text{ s}$
KAISU	I10	KAISU=0
IWTP	I10	IWTP=1

表 15 calcmd ファイル (Ver.46c7a 仕様)

1 行目 :	3	28	193	193	5.0
2 行目 :	3	28	235	260	
3 行目 :	1.0	10.0	0.0		
4 行目 :	512	25.0	1.0		
5 行目 :	0.0	20.0			
6 行目 :	0.02	0.02	0.0		
7 行目 :	0.025	0.5	0.0		
8 行目 :	20.0	1000.0	2100.0		
9 行目 :	0	1			

(5) 計算結果

計算された港内外の波高分布を図 26 に示す。図より、計算結果を見ると、主防波堤や航路に沿って港内に波が侵入する様子が計算されている。また、主・副防波堤による波の回折では、同時にマウンドによる波の屈折や浅水変形が生じているものと考えられる。さらに、浅水変形により港外の波高分布が入射波高よりも小さくなる様子がよく計算されている。

一方、主および副防波堤前面では、反射波が生じている様子が計算されており、その反射波が側方へ広がっていく様子も計算で再現されている。

さらに、本計算モデルは、波形の変化を計算領域全体にわたり時々刻々と計算で求められる。そのため、pnt で指定した格子座標の時間波形を出力することが可能であり、この時間波形を用いて統計解析、スペクトル解析ならびに方向スペクトルを算出することが可能である。

図 27 に pnt ファイルで指定した座標格子点の時間波形を示す。また、図 28 に各ポイントの時間波形から求めた周波数スペクトルおよび 2 次元方向スペクトル $G_2(\theta)$ を示す。ここで、 $G_2(\theta)$ は式(3.1)によって定義される値を示している。

$$G_2(\theta) = \int_0^\infty S(\theta; f) df \quad (3.1)$$

また、波高変化を専用ソフトで描画することにより、空間的な波高の変化を見ることが可能であり（図 29 参照）、またある瞬間に得られる水位の空間分布を連続して再生することにより、波の伝播過程を動画でとらえることも可能である。

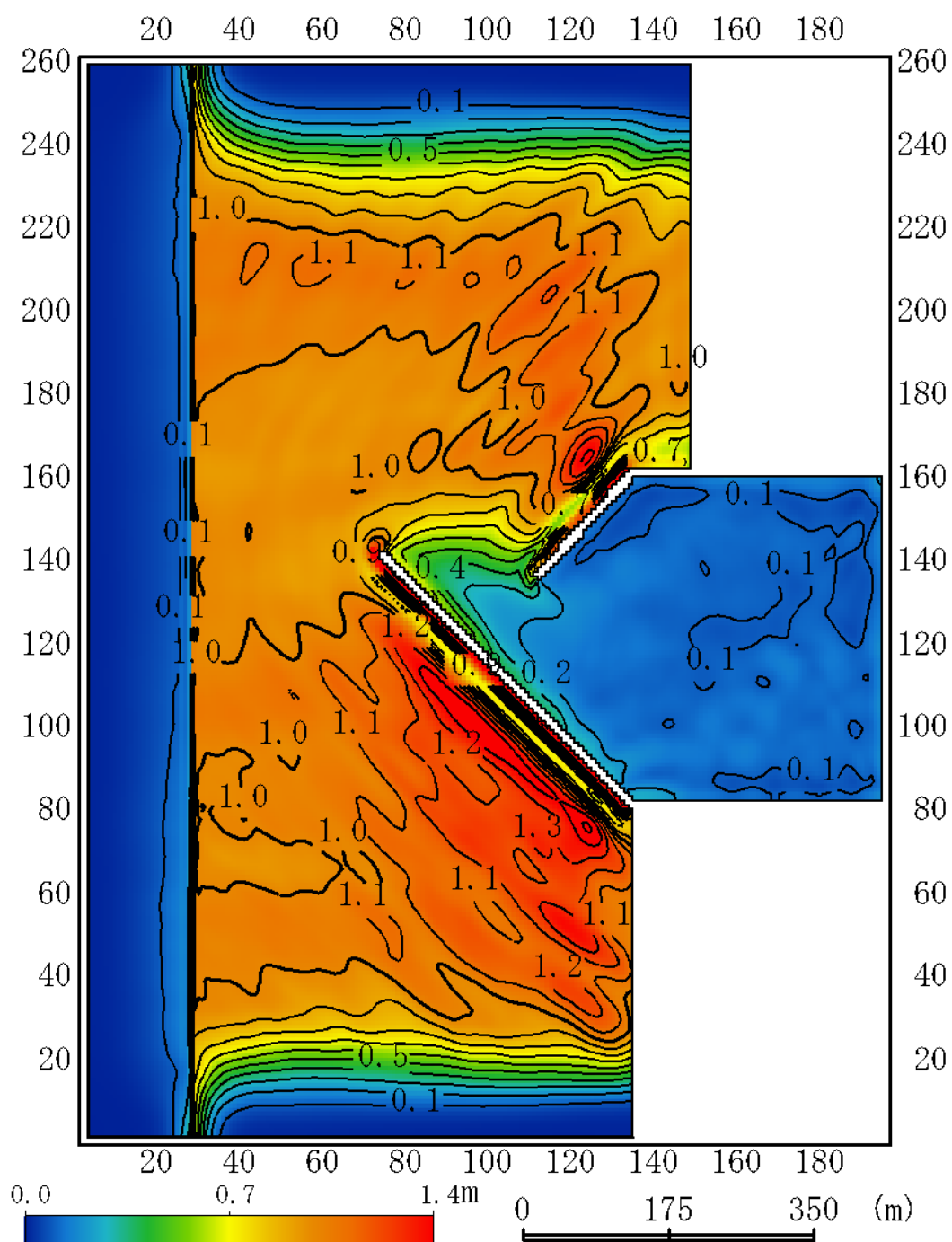


图 26 有義波高分布

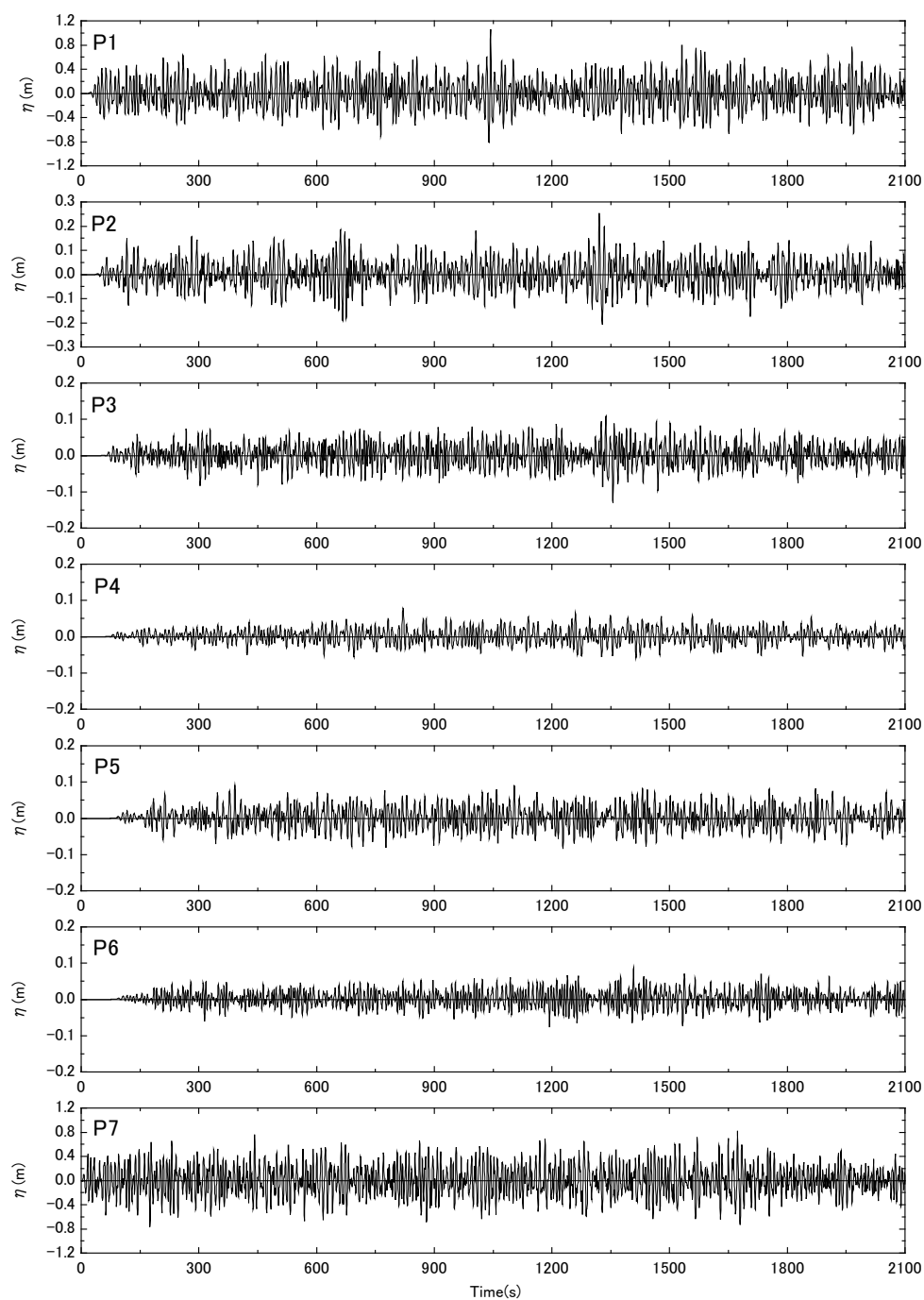


図 27 代表点における時間波形

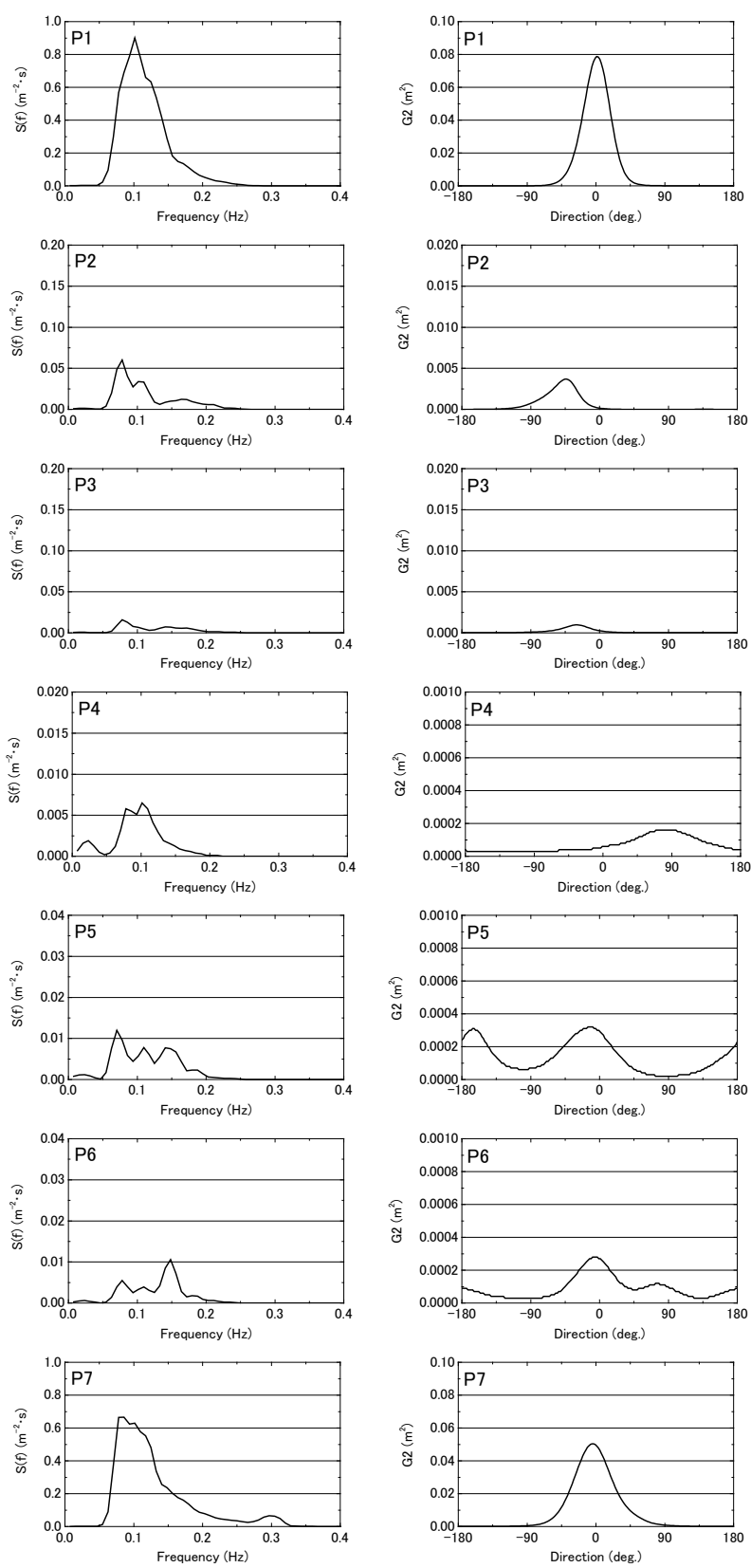


図 28 代表点における周波数スペクトルおよび 2 次元方向スペクトル

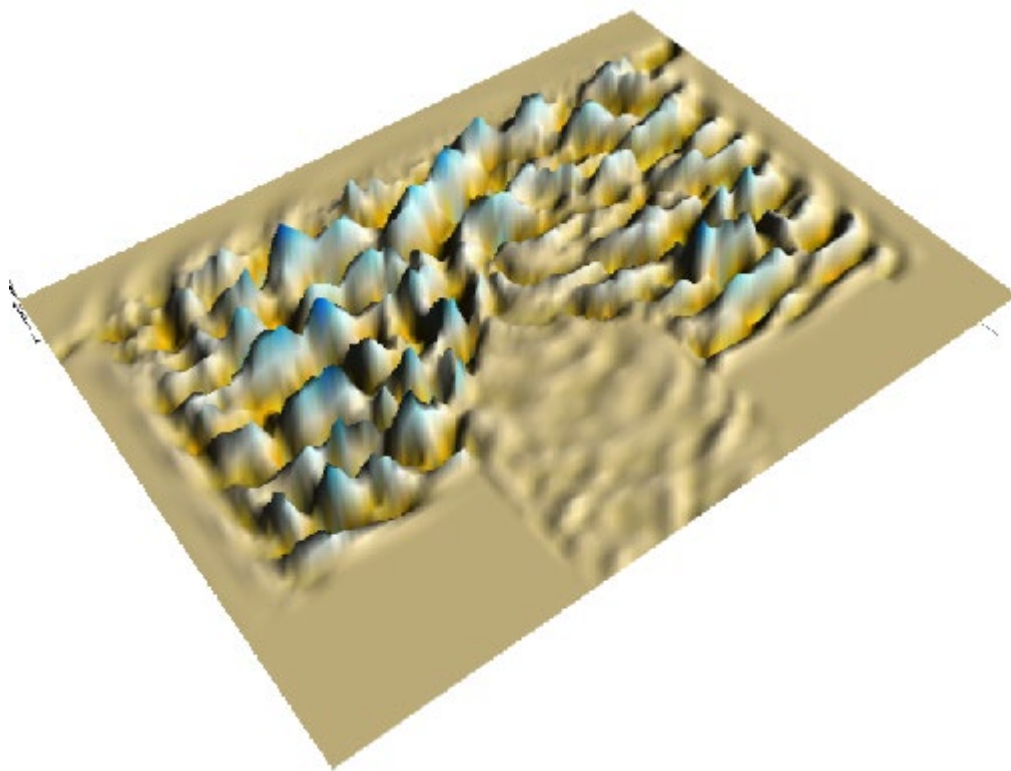


図 29 計算開始 2100s 後に観察される波形の空間分布

3.3. 任意水深を入射境界とするモデル地形に対する適用例 (Ver.46d7a)

任意水深を入射境界とする水深モデルに対する本プログラムの適用例を示す。今回用いた一様斜面を有する水深モデルの海底地形は、図 30 に示すように入射境界（赤破線）が一様斜面であるような海浜地形（最大 15m, 最小 5m）に波向き 15° で規則波を入射させた。

(1) 水深ファイル (depth_d)

「2.3 入力データファイル」の「(1) 水深ファイル (depth_d)」に示した書式で各格子の水深を作成する。配列は計算領域設定ファイル内 (bsq_bsq46c7a.inc) において設定した IMAX, JMAX にあわせて 84×84 とする。堤体位置の差分格子と計算領域外周の 2 格子に対して $h_{ij} = -999.0$ (-900.0 より小さい値) を配置している。

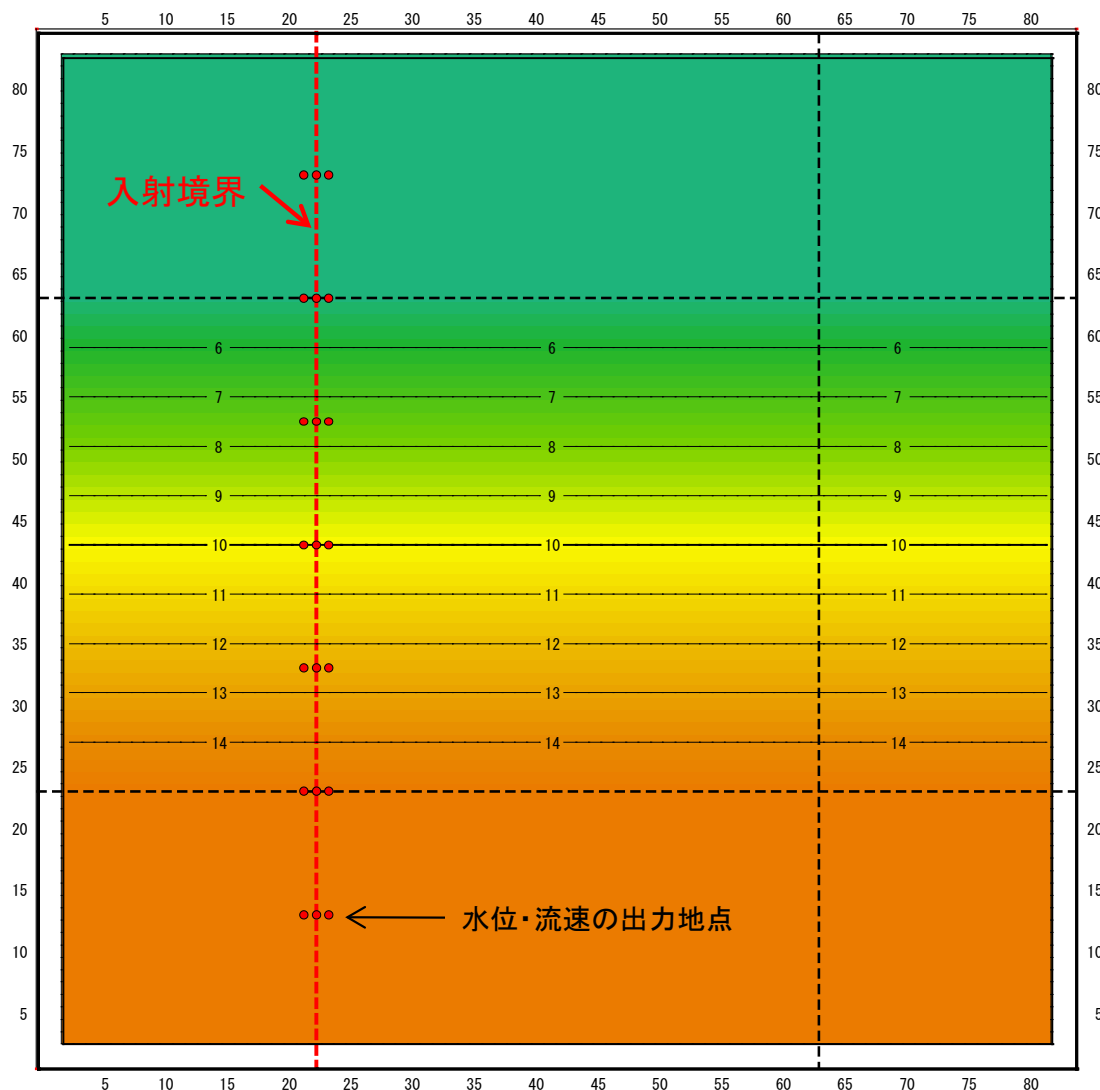


図 30 任意水深を境界条件としたモデル水深

(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (addfd_d)

「2.3 入力データファイル」の「(2) エネルギー吸収帯減衰係数ファイル (addfd_d)」に示した書式で各格子のエネルギー減衰係数を設定する。配列は IMAX, JMAX に合わせて 84×84 とする。本ケースでは、計算領域外周以外はエネルギー吸収帯 (20 格子) を配置しないものとして、全ての配列要素に 0.0 を設定している。

(3) 時系列データ出力格子座標ファイル (pnt)

計算領域内に設定した時系列データ出力点の格子座標を、「2.3 入力データファイル」の「(2) 時系列データ出力格子座標ファイル (pnt)」に示した書式で作成する。本ケースでは、以下の格子点の時系列データを出力する。表 16 に本計算で用いた出力格子点を示す。

表 16 時系列データ出力格子座標 (pnt)

Point	格子番号	
	I 方向	J 方向
P1	22	13
P2	22	23
P3	22	33
P4	22	43
P5	22	53
P6	22	63
P7	22	73
P8	23	13
P9	23	23
P10	23	33
P11	23	43
P12	23	53
P13	23	63
P14	23	73
P15	24	13
P16	24	23
P17	24	33
P18	24	43
P19	24	53
P20	24	63
P21	24	73

(4) 計算条件設定ファイル (calcnd_d)

計算に用いた計算条件を表 17 に示す。また、計算条件設定ファイル (calcnd_d) を表 18 に示す。

表 17 計算条件 (Ver.46d7a 仕様)

変 数	Format	内 容
H13, T13	F10.0	$H_{1/3}=1.0\text{m}$, $T_{1/3}=5.1\text{s}$
SIT0	F10.0	15.0°
NS	I10	NS=1 (規則波)
SMAX	F10.0	Smax=999.0 (一方向波)
TLIMIT	F10.0	0.1 (ダミー)
WL	F10.0	WL=0.0m
H10	F10.0	H10=0.0m (任意水深)
HLIMIT2	F10.0	H10=5.0m
IBRK, RB, HLIMIT3	I10,F10.0	IBRK=1, RB=0.8, HLIMIT3=0.01m
FF1,FF2,FFHLM	F10.0	FF1=FF2=0.02, FFHLM=0.0m
DT	F10.0	DT= 0.01s
TDEL	F10.0	TDEL= 0.2 s
TOUT	F10.0	TOUT=0.0 s 計算終了時刻の計算結果のみを出力
TTIN	F10.0	TTIN=0.0 s
TSVE	F10.0	TSVE=25.0 s
TEND	F10.0	TEND=51 s
KAISU	I10	KAISU=0
IWTP	I10	IWTP=9 (ダミー)

表 18 calcnd_d ファイル (Ver.46d7a 仕様)

1 行目 :	./bathymetry/gnr_sl/				
2 行目 :	./data/gnr_sl/				
3 行目 :	1.0	5.1	15.0		
4 行目 :	1	999.0	0.1		
5 行目 :	0.0	0.0	5.0		
6 行目 :	1	0.8	0.01		
7 行目 :	0.02	0.02	0.0		
8 行目 :	0.01	0.20	0.0		
9 行目 :	0.0	25.0	51.0		
10 行目 :	0	9			

(5) 計算結果

計算終了時の水位分布 (eta), 波高分布 (h) ならびに時系列データ観測格子点における水位時間波形 (te) を図 31～図 33 に示す.

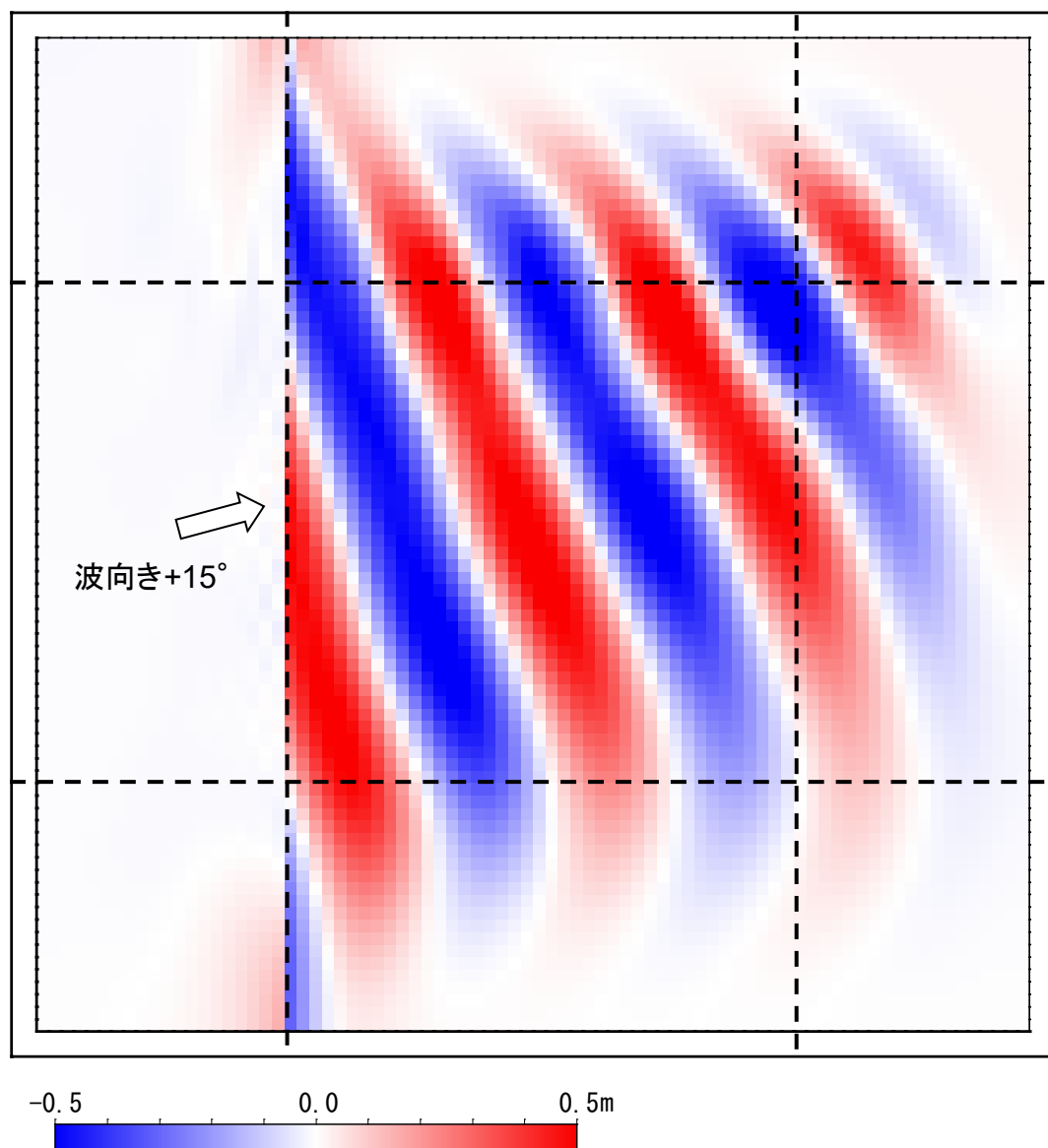


図 31 計算結果 (51 秒後の水位分布)

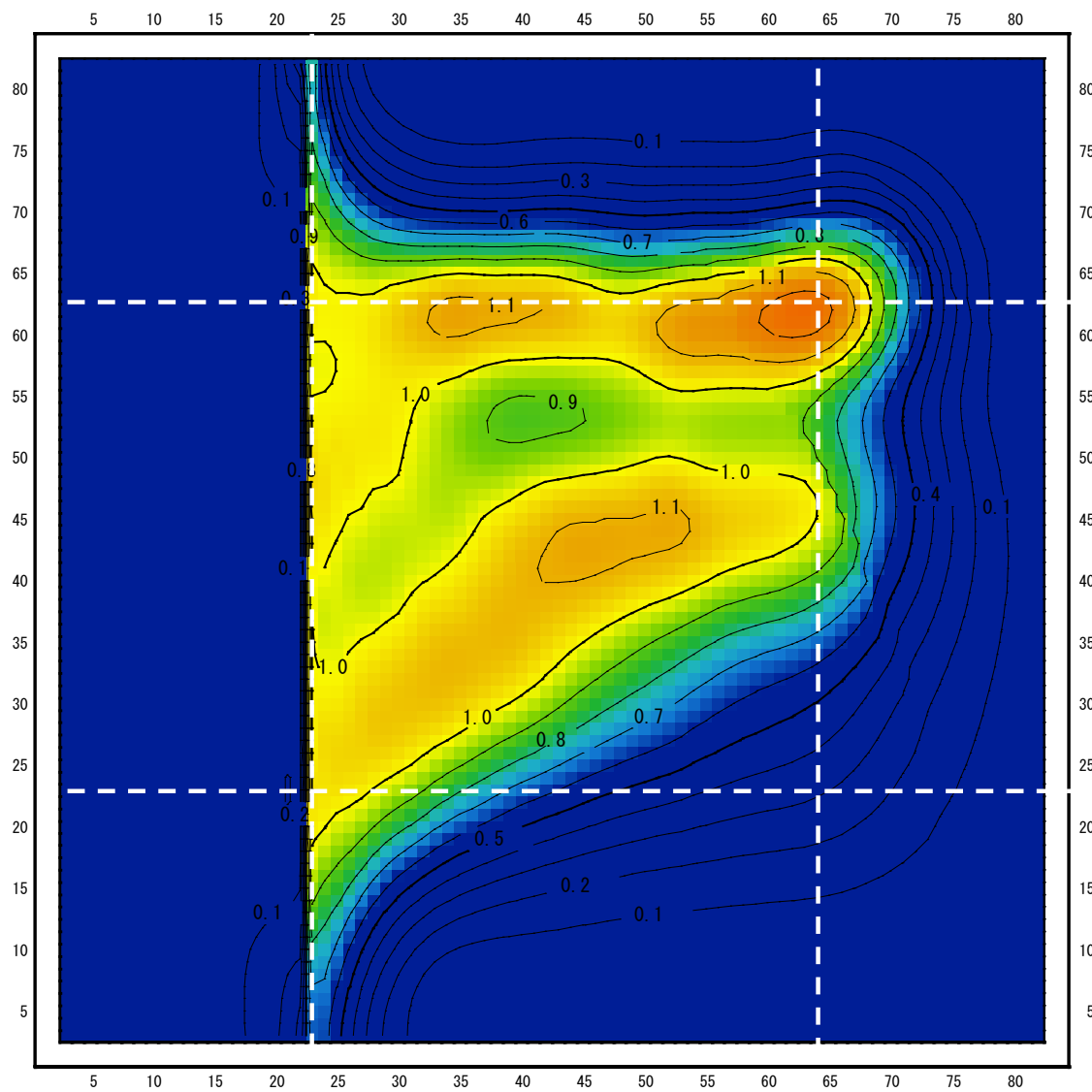


図 32 計算結果（波高分布）

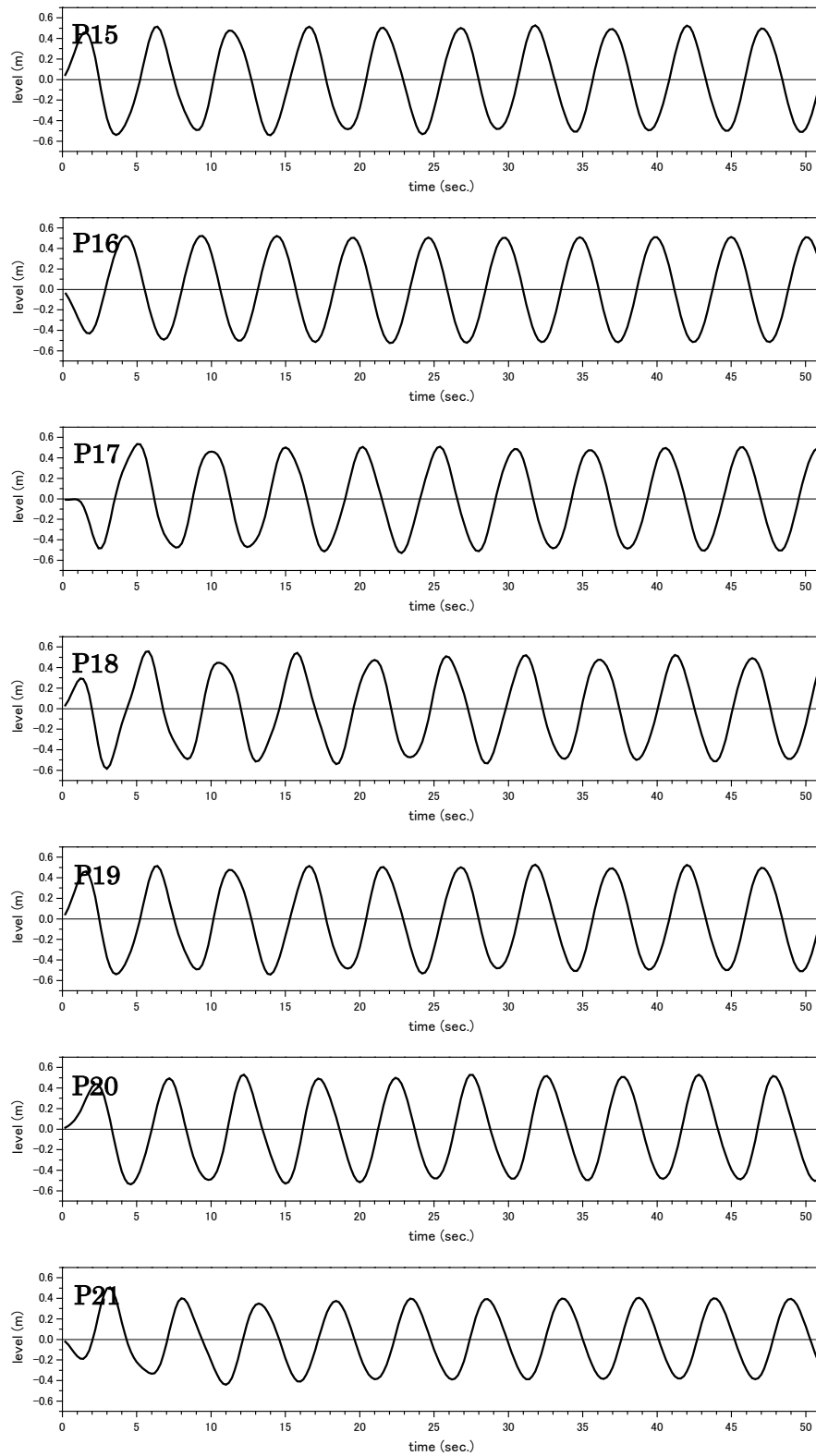


図 33 代表点における時間波形 (P15～P21)

参考文献

- 1) 平山克也 (2002) : 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1036, P.162
- 2) 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺晃 (1993) : 非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.31-35
- 3) Mitsuyasu,H.,Taseai,F.,Sahara,T.,Mizuno,S.,Ohkusu,M.,Honda,T.,and Rikiishi, K.(1975) : Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, *J. Physical Oceanogr.*, Vol.5, pp.750-760
- 4) 合田良実 (1985) : 波浪の統計的性質に関する二, 三の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第 24 巻, 第 4 号, pp.65-102
- 5) 合田良実・鈴木康正 (1975) : 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No.230, p.45
- 6) Goda,Y. and Kudaka, M. : On the role of spectral width and shape parameters in control of individual wave height distribution, *Coastal Engineering Journal* , Vol.49, No.3, 2007, pp.311-335
- 7) 平成 18 年度 ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会, 勉強会資料, 平成 19 年 2 月, 独立行政法人 港湾空港技術研究所, 海洋・水工部 波浪研究室
- 8) 平山克也・岩瀬浩之・加島寛章 (2010) : 任意水深の造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによる多方向不規則波の造波, 海岸工学論文週, 第 59 巻, pp.11-15
- 9) 糸井生夫・伍井 稔・成毛辰徳 (2003) : ブシネスクモデルの伏木富山港 (伏木地区) への適用とその課題, 平成 14 年度ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会資料, pp.7-11