

平成 22 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

勉強会資料

平成 23 年 2 月

独立行政法人 港湾空港技術研究所
海洋・水工部 波浪研究チーム

目 次

はじめに	1
「ビジネス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	2
「ビジネスモデルによる波浪変形計算に関する勉強会」開催趣旨	3
ビジネスモデル（公開版 NOWT - PARI）のリリース履歴	4
1. セッション 1 ーNOWT-PARI の波浪研究・実務への適用例ー	
1.1 複数方向スペクトルに対する不規則波形の波浪統計量	6
(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 ○岩瀬浩之・平山克也	
1.2 うねり性波群に伴う水位の長周期変動の空間分布の算定	11
(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 加島寛章	
1.3 青森港におけるビジネスモデル（NOWT-PARI Ver.4.6c5a）を用いた 港内反射波対策の検討	17
国土交通省東北地方整備局 青森港湾事務所 中本隆 国土交通省東北地方整備局 青森港湾事務所 佐々木均 株式会社エコー 防災水工部 ○峯村浩治	
2. セッション 2 ーNOWT-PARI 演算の高速化に向けた取り組みー	
2.1 2次元配列変数の1次元化による演算の高速化について	22
(株) エムエーシー 松島三郎	
2.2 GPU による NOWT-PARI の高速化について	28
①NOWT-PARI の GPU 化	
プロメティック・ソフトウェア(株) 川上 浩	
②オリジナルとの比較計算	
日本データサービス(株) 袖野宏樹・○蒔田俊輔・三船修司	
3. セッション 3 ーユーザー講習会（入門・復習編）ー	
3.1 NOWT-PARI の基礎と実用性	52
(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 平山克也	
質疑・応答	66

はじめに

独立行政法人港湾空港技術研究所波浪研究室が主催し、平成14年度より年1回のペースで開催してまいりました本勉強会は、皆様の熱心かつ温かいご支援のもと、今年度で第9回を迎えることができました。

おかげさまで、本勉強会を通じて、港湾・海岸設計の実務に対する適用事例の蓄積や問題点の抽出がなされ、継続的に改良が加えられてきたNOWT-PARIは、いまや、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の推定などの実務に、欠かせない存在となりつつあります。特に本年度からは、各地方整備局等の技術職員を対象とした港内静穏度解析研修が開始されたところです。

ところで、本勉強会資料の巻頭には、昨年度と同様、本勉強会発足の経緯とこれまでの成果、開催趣旨を掲載させていただきました。これらにもあるように、過去8回の勉強会では、NOWT-PARIプログラムの計算精度ならびに実務への適用性の向上を主たる目的としておりましたが、活用が広がるにつれて、計算負荷の削減や計算時間の短縮という視点も非常に重要となってきています。

幸いにも、このような課題に真摯に取り組んでこられた方々のご厚意により、本年度の勉強会では、計6編のご発表を2つのセッションに分け、NOWT-PARIの研究・実務への適用例に加えて、演算の高速化に向けた取り組みについても、ご議論いただけることとなりました。セッションでの質疑やコーヒープレイクなどをご活用いただき、お互いに活発な意見交換がなされることを期待しています。なお、3つ目のセッションでは、NOWT-PARIの概要とその使用方法について見聞または復習できるような発表も用意いたしました。

また、本年度の勉強会では、造波境界上の水深を一定とせず実際の海底地形のまま計算ができるように改良したバージョン：Ver46d7aをリリースさせていただきます。勉強会資料には、これを含め、本勉強会を通じて公開してまいりましたNOWT-PARIプログラムのバージョンとその内容の履歴を掲載いたしました。引き続き、皆様からのご支援を賜り、更なる成果を積み重ねることができれば、大変幸いに存じます。

最後に、本勉強会の趣旨にご賛同いただき、本日まで出席されている皆様方は、日頃より、多くの難問に対してさまざまな解析手法を取り入れてご検討されているものと存じます。その際には本勉強会の成果が一助となり、ご活用いただければまことに幸いに存じます。

独立行政法人 港湾空港技術研究所
海洋・水工部 海洋研究領域
波浪研究チーム リーダー 平山克也

「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、ヴァージョンアップ版が公開されている。

本勉強会は、平成 22 年度(平成 23 年 2 月 4 日開催)で第 9 回を数える。

「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 Ver4.6 β 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 Ver4.6 β 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砕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

- ・ 砕波計算に用いる流量振幅の定義の修正
- ・ 砕波計算に用いる渦動粘性係数の算定時刻の修正
- ・ 砕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
 - ・ `calcnd` (コントロールファイル名) を `calcnd_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` 方向の碎波計算 (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
```

(H23.02.04 現在)

1.1 複数方向スペクトルに対する不規則波形の波浪統計量

1.1.1 はじめに

2008年2月に寄り回り波と呼ばれる周期14sを超えるうねりが来襲した伏木富山港(図-1)では、海底谷が入り組んだ複雑な海底地形上の波浪変形により局所的に波高が集中し、防波堤ケーソンが大きく滑動するなどの被害が生じた。この原因究明や対策検討の報告は既に数多くみられ、有用な成果が得られている。ところが、その後示された平山ら(2010)の研究によると、浅海域で造波される被災波の入射スペクトルを、観測された波浪諸元等をもとにただ1つに代表させて実施した波浪変形計算では、例えばそれが危険側の推定値であっても、入射境界上での方向スペクトルの空間分布を考慮した算定結果に比べ来襲波高を過小評価する海域が存在し得ることが指摘されている。

そこで本研究では、観測スペクトルの先鋭度、入射境界上の水深変化及び方向スペクトルの空間分布に着目し、入射境界から対象施設に至るまでの波浪場をより精緻に再現することを試みるとともに、有義波高の空間分布のみならず、各地点における波高頻度分布の出現特性の違いを示し、被災過程の検討や施設設計に用いられる $H_{\max}$ ($H_{1/20}$) や $H_{1/10}$ 等の波浪統計量への影響について考察する。

1.1.2 入射条件の設定

(1) エネルギー平衡方程式による有義値の算定

ブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver5.354d)による計算を行うための入射条件を設定するため、エネルギー平衡方程式による計算を実施した。エネルギー平衡方程式での計算領域は、図-2に示す様な格子間隔30mと10mの2つの領域で構成されている。

NOWPHAS地点で観測値(2008年2月24日14:00, $H_{1/3}=4.22\text{m}$, $T_{1/3}=14.2\text{s}$)と一致するように入射条件(波高, 周期, 波向および $S_{\max}$)を調整し、ブシネスクモデルの沖側入射境界に位置する線上の方向スペクトルを抽出した。図-3は、そのときの波高分布と方向スペクトルの抽出位置(赤実線)を示したものである。ブシネスク計算の沖側入射境界上のNW側では波高は小さい傾向にある。また、SE側の方向スペクトルの形状がほぼ対称であるのに対し、NW側の方向スペクトルの形状は、長周期成分が水深に伴う屈折の影響によりNE方向へ歪んでおり、ブシネスクモデルの沖側境界上で方向スペクトルの分布は一様ではない。

(2) 観測スペクトルの尖鋭度の推定

ブシネスクモデルでは、スペクトル形状としてJONSWAP型スペクトルを与える。ここで、JONSWAP型スペクトルの尖鋭度 γ は、観測スペクトルから推定する。JONSWAP型スペクトルによる γ 値とスペクトルから算出されるスペクトル形状パラメータ κ との



図-1 伏木富山港の位置

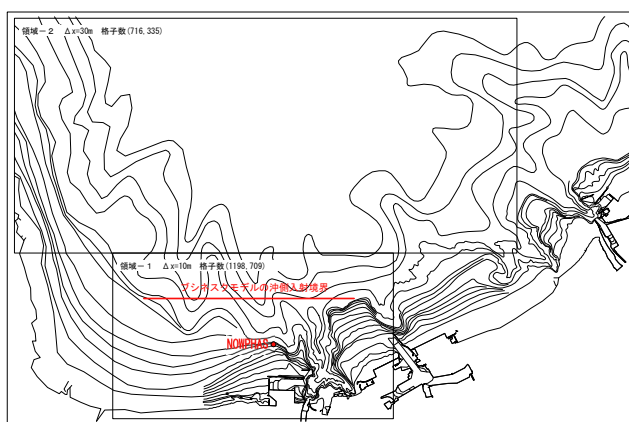


図-2 エネルギー平衡方程式の計算領域

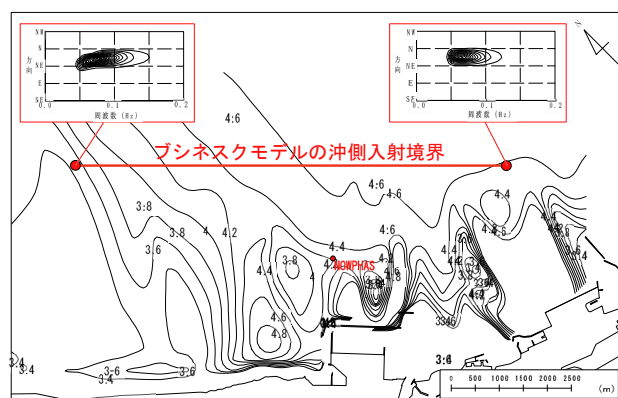


図-3 エネルギー平衡方程式による波高分布

間には、図-4に示す様な関係がある。観測スペクトルから算出された κ 値は0.44となり、同図から γ 値は1.5と推定される。観測スペクトルと $\gamma=1.5$ のJONSWAP型スペクトルの比較を図-5に示す。両者を良く一致をしていることから、観測点でのスペクトル形状は、 $\gamma=1.5$ のJONSWAP型スペクトルとして近似できる。

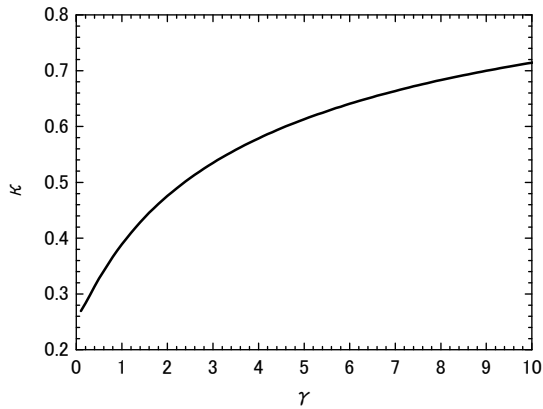


図-4 γ と κ の関係

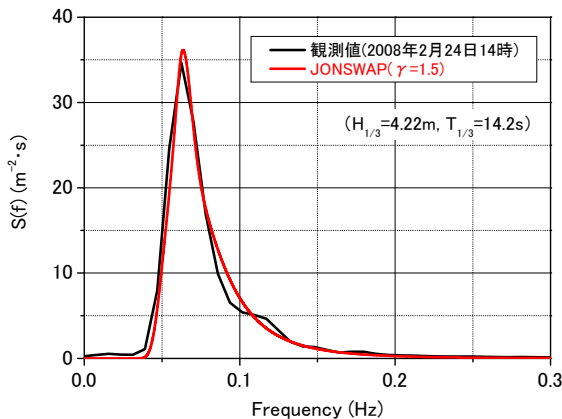


図-5 γ と κ の関係

(3) ブシネスクモデルの入射条件

ブシネスクモデルでは、先のエネルギー平衡方程式により算出された有義値と推定された $\gamma=1.5$ によるJONSWAP型スペクトルを初期条件とし、非線形や反射波の影響を加味し、後述する2つの造波方法により再度ブシネスクモデルによって観測値との合わせ込みを実施する。

1.1.3 ブシネスクモデルによる解析

(1) 入射境界における造波方法

被災波に対してほぼ深海域とみなせる水深150m以深の沖合に入射境界を設定し、ブシネスクモデルを用いて、対象とする防波堤に至るまでの波浪変形計算を実施した。また、造波方法の違いによる計算結果の差を検証するため、①入射境界上の水深を150m一定かつ1/5のスロープに設けた地形とし、ただ1つの代表スペクトルを造波する方法、②入射境界上の地形をさらに水深200mまで再現し、エネルギー平衡方程式法を用いて入射境界上に分布する複数の方向スペクトルを与える方法、の2種類とした。ケース②では、入射境界上の任意水深の変化に伴う波数の変化を考慮した以下の多方向不規則波の造波方法を用いた。

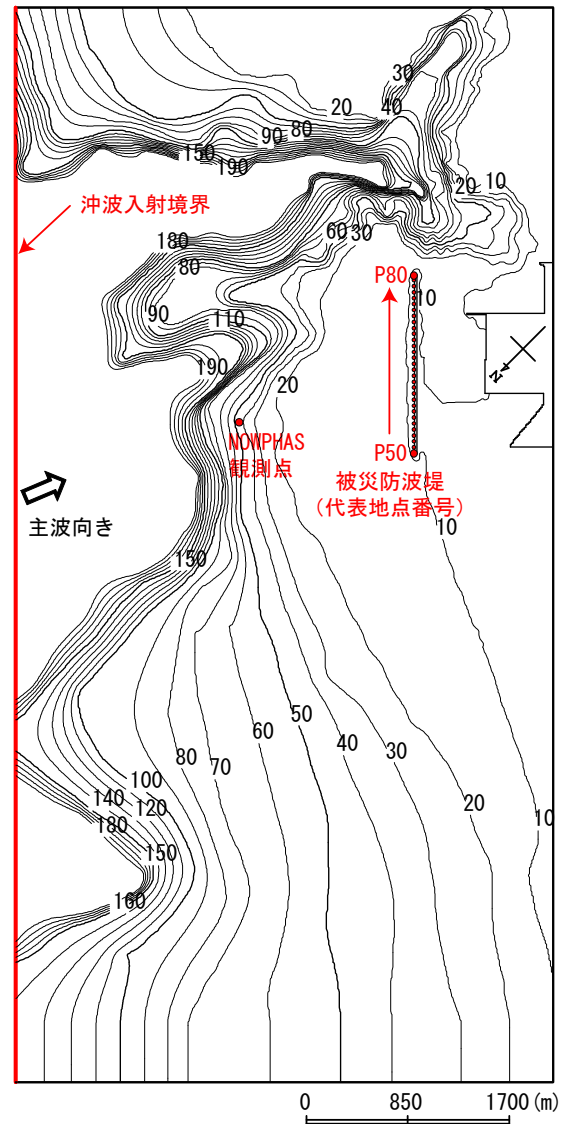


図-6 ブシネスクモデルの計算領域と水深分布

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

(2) 計算条件

ブシネスクモデルにおける計算領域内の海底地形及び波高頻度分布を算定する代表地点（NOWPHAS地点を含む）の配置を図-6に示す。空間格子は、エネルギー平衡方程式における第2領域と同じ $\Delta x=10\text{m}$ とし、時間間隔を $\Delta t=0.05\text{秒}$ とした。なお、方法①における波向および代表スペクトルの $S_{\max}$ は、既往の検討結果にならない、波向NNEおよび $S_{\max}=75$ と設定した。また、方法②のNW側の造波境界では、被災波に対し僅かに浅海域となる海底岬上からの造波となる。

観測値の波高および周期を再現したブシネスクモデルの入射条件を表-1に示す。

表-1 沖側で与える単一方向スペクトルの諸元

造波方法	潮位 TP+m	造波境界		入射条件				今回の計算		
		方向SP	水深	波高 (m)	周期 (秒)	γ	Smax	波高 (m)	周期 (秒)	γ
①	0.21	単一	一定	4.12	13.5	1.5	75	4.20	14.1	1.4
②	0.21	複数	任意	エネ法からの逆算 比率を乗じる		1.5	75	4.26	14.7	1.4

(3) 観測値の波高出現頻度の比較

図-7は、観測地点における波高の出現頻度分布を比較したものである。なお、同図中の実線はレイリー分布を示したものである。方法①の造波方法に比べ方法②の造波方法による波高の出現頻度は平滑化され観測値（赤線）と良く一致している。特に、方法②の造波方法では、方法①の造波方法に比べ大きな波高ランクが再現され、観測結果に近い頻度分布となっている。

(4) 波高分布の比較

図-8は、それぞれの造波方法によって計算した1/3有義波高（および波向）分布を示したものである。水深に伴う屈折により、波は沖防波堤に対しほぼ垂直に進入し、重複波の影響により波高が高くなる。いずれの造波方法でも、NW側の波高分布の方が高い傾向にある。

被災を受けたSE側の前面に着目すると、方法②の造波方法による波高分布の方が方法①の造波方法に

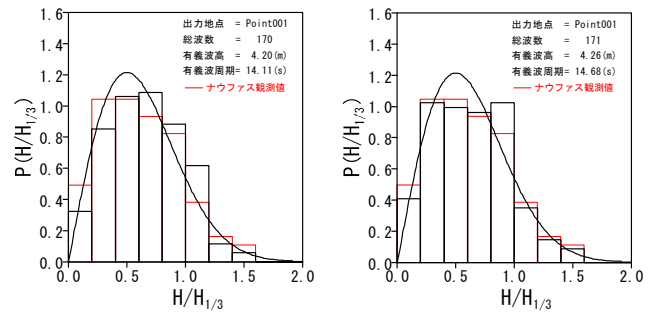


図-7 観測地点における波高の頻度分布の比較

よる波高分布に比べ高くなっており、造波方法の違いによる波高分布の差が確認できる。

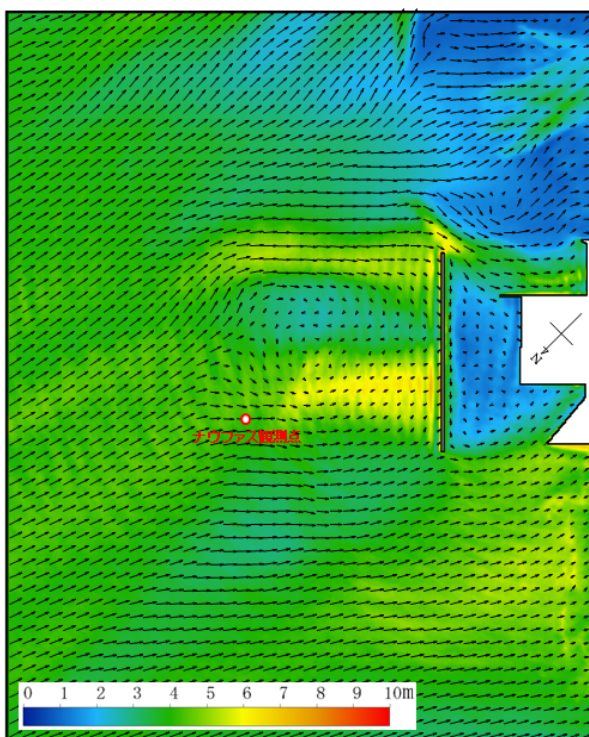
1.1.4 波浪統計量の算出

(1) 進行波による波高分布

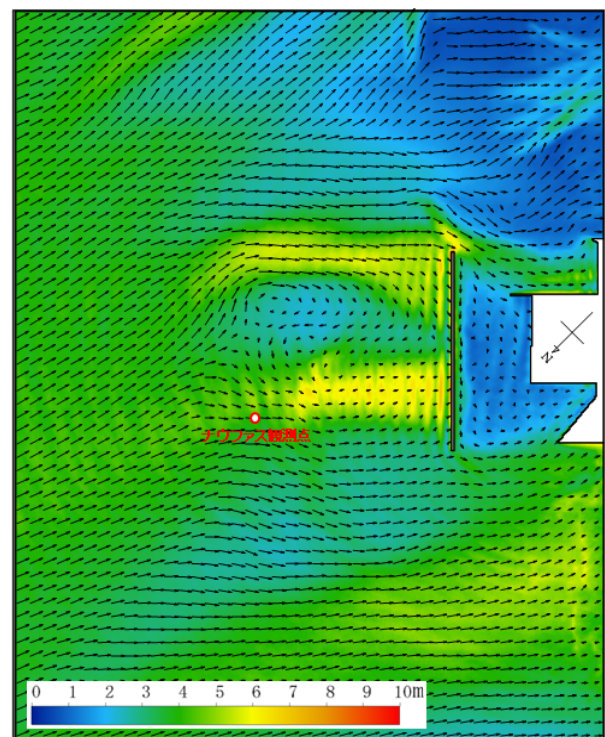
沖防波堤前面における波浪統計量の算出のため、進行波による計算を実施した。図-9に進行波による1/3有義波高（波向）分布を示す。図-8と同様に、被災を受けたSE側の前面では、方法②の造波方法による波高分布の方が方法①の造波方法による波高分布に比べ高くなっている。

(2) 波浪統計量の比較

図-10は、沖防波堤前面のP50～P80（図-6参照）に位置する地点の水位時系列を対象に、1/3有義波



(a) 方法①



(b) 方法②

図-8 ブシネスクモデルによる波高比分布

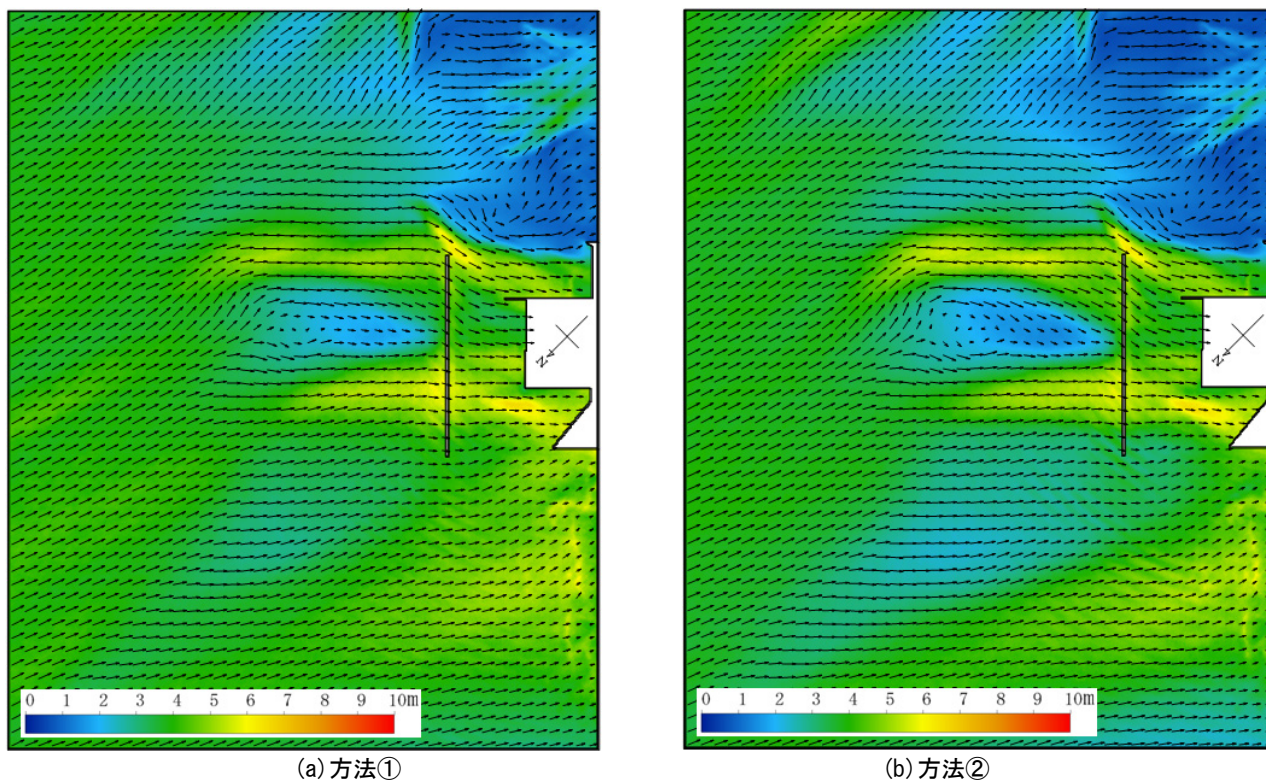


図-9 ブシネスクモデルによる波高比分布（進行波）

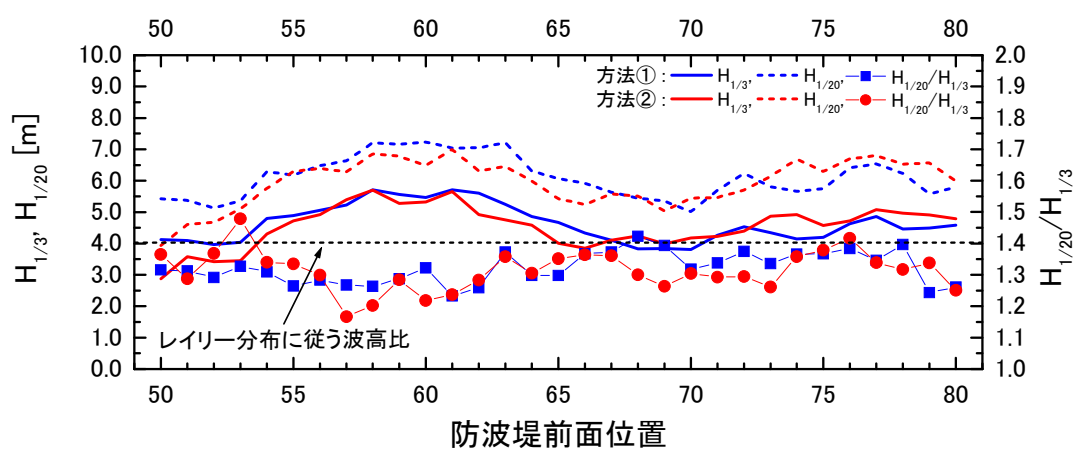


図-10 防波堤前面位置における波浪統計量の比較

高 $H_{1/3}$ 、 $1/20$ 有義波高 $H_{1/20}$ およびこれらの波高比 $H_{1/20}/H_{1/3}$ の分布の比較を示したものである。図中には黒破線にてレイリー分布に従う波高比 $H_{1/20}/H_{1/3}$ の値も示した。

方法②の造波方法では、方法①の造波方法に比べ一部で波高比が小さくなる地点もみられるが、 $H_{1/20}$ は、 $H_{1/3}$ が大きいSE側では大きく、 $H_{1/3}$ が同程度または小さいNW側ではより小さくなっている。ケーソンの滑動は波群中の高波浪により発生することから、これらは実際の被災状況をより明確に示していると考えられる。

1.1.5 おわりに

富山湾における寄り回り波を対象に、観測されたスペクトルの尖鋭度 γ に合わせたJONSWAP型スペクトルを利用し、複数方向スペクトルによる多方向不規則波の波浪統計量について検討を行った。

検討対象とした沖防波堤前面の波浪統計量に対して、複数方向スペクトルかつ任意水深とした方法②の造波方法では、従来の単一スペクトルかつ一定水深による造波方法である方法①と異なる結果となった。特に、実際に被災をした区間では、方法②の造波方法の方が $H_{1/20}$ が大きくなり、造波方法の違いによる波浪統計量に差を生じることが明らかになった。

た．この結果は，方向スペクトルの空間的な偏りによって生じたものと推測できる．

今後は，方向スペクトルの空間的な偏りによって波浪統計量に差違が生じたメガにズムについて明らかにすることが重要となる．

参考文献

- 1) 平山克也・岩瀬浩之・加島寛章：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，2010，pp. 11-15.

1.2 うねり性波群に伴う水位の長周期変動の空間分布の算定

1.2.1 はじめに

近年、我が国沿岸部において地球温暖化の影響と思われる台風の巨大化や経路変化に伴い、甚大な波浪被害が発生している。たとえば、2006年9月に発生した岩手県久慈港護岸の越波被害や2007年9月に発生した神奈川県西湘海岸の護岸崩壊、2008年2月に発生した下新川海岸の越波・浸水被害や伏木富山港の防波堤ケーソンの滑動被害などが挙げられる。これらは、設計波を超える長い周期を有するうねり性波浪の来襲によるものが多い。

田島ら¹⁾や深瀬ら^{2), 3)}は、海底地形が複雑に急変する地域を対象に、うねり性波浪の波高増幅機構について検討を行い、沿岸域の複雑な地形の影響を受けて局所的な波高の集中が発生するとともに、強い海浜流や長周期変動を発達させることを確認した。著者らは、修正ブシネスク方程式に基づく平面2次元数値モデルNOWT-PARI⁴⁾ (Nonlinear Wave Transformation model by Port and Airport Research Institute)により、風波およびうねり性波浪が急変な海底地形を有する海岸に来襲する場合の波高集中の違いについて検討を行った⁵⁾。また、著者らは14sを超えるような周期の長いうねり性波浪に着目し、その護岸越波特性を断面実験により検討してきた⁶⁾。その中で、うねり性波浪の直立護岸に対する越波流量は、通常的设计波よりも周期が長いことに十分配慮することにより、既存の越波流量算定図を用いて算定することが可能であることが確認された。さらに、うねり性波浪に顕著な波群に伴う水位の長周期変動の影響を受けて短時間に発生する越波流量が増大する危険性があることが示唆された。これらの研究では、うねり性波浪の平面波浪変形特性や断面越波特性を別々に検討しており、両者を同時に考慮した平面波浪場に対するうねり性波浪に顕著な波群に伴う水位の長周期変動特性やそれが護岸越波流量に与える影響については検討されていない。

一方、波の浅水変形・屈折・回折を同時に解析可能であり、計算領域内の波高分布や沿岸域の波・流れ場の算定に対して高い実績を有している修正ブシネスク方程式に基づく平面2次元数値モデルNOWT-PARIは、開発以来、平山・平石⁷⁾や平山ら⁸⁾により碎波や遡上、越流公式を利用した越波の計算に関するモデルの改良が進められてきた。近年では、任意形状のスペクトルを有する波浪の造波（平山・宮里⁹⁾）や任意水深場や複数の方向スペクトルを有する波浪の造波（平山ら¹⁰⁾）が可能となり、実現現象をより精緻に表現できるようになってきている。しかしながら、水槽実験では、一様水深でかつ1つのスペクトルを有する代表波を造波するようになっており、実現現象あるいは数値計算と水槽実験において造波境界の取り扱いにより波浪伝播特性が異なることが懸

念される。

そこで、本研究では、複雑に急変する海底地形を有する富山県下新川海岸で発生した越波・浸水被災事例を対象に、NOWT-PARIを用いてうねり性波浪に顕著な波群に伴う水位の長周期変動の平面特性について検討を行った。まず、造波境界問題について検証した。次に、進行波としてのうねり性波浪の伝播特性を把握した。最後に、うねり性波浪の波群に伴う水位の長周期変動やこれが護岸越波流量に与える影響について検討を行った。

1.2.2 造波境界の影響について

ここでは、実現現象あるいはNOWT-PARIに代表される数値計算と水槽実験における造波境界の取り扱いの違いによる波浪変形への影響について検討した。検討では、造波方法および計算領域の異なる2種類のNOWT-PARIを用いた数値計算を実施した。

(1) 数値計算概要

異なる2種類の数値計算の造波方法および計算領域について表-1に示す。計算領域の大きい計算（case1）では、実現現象の波浪場がより精緻に計算されるように、平山ら¹⁰⁾により改良された任意水深場でかつ複数の方向スペクトルを入力条件とする造波方法を使用した（図-1（a））。本計算の入力波の設定方法として、まず被災箇所周辺にある田中観測所で観測された被災時の波浪を再現するような沖波相当波を、エネルギー平衡方程式を用いた逆推定により算定した。次に、この沖波相当波を入力波としたエネルギー平衡方程式による波浪変形計算を行い、本計算の入射境界線に位置するすべての計算格子に対する方向スペクトルを算出し、それらを入力波に設定した。また、エネルギー平衡方程式では、スペクトル形状がJONSWAP型スペクトルの尖鋭度 $\gamma=1$ に対応しているため、うねり性波浪が有するスペクトル形状として平石ら¹¹⁾が報告している $\gamma=4$ に相当するスペクトルに置き換えている。

計算領域の小さい計算（case2）では、水槽実験等による造波を想定し、最大水深90mの一樣水深場から1つのスペクトルを有する代表波を与えた（図-1（b））。本計算では、case1と同様に入射境界線に位置する代表計算格子における波浪諸元を算出し、それを入射波に設定した。その時の入射波諸元は、有義波高5.97m、有義波周期13.9sであった。また、主波向は、この入射境界線に位置するすべての計算格子の平均波向の平均値（N18.5W度）に設定し、スペクトル尖鋭度は $\gamma=4$ に設定した。

潮位は被災当時に伏木富山観測所で観測された

表-1 造波境界の取り扱い

case	計算領域	最大水深	造波方法	
	(km*km)	(m)	水深	スペクトル
1	3.5*5.5	400	任意	複数
2	2.0*4.0	90	一樣	単一

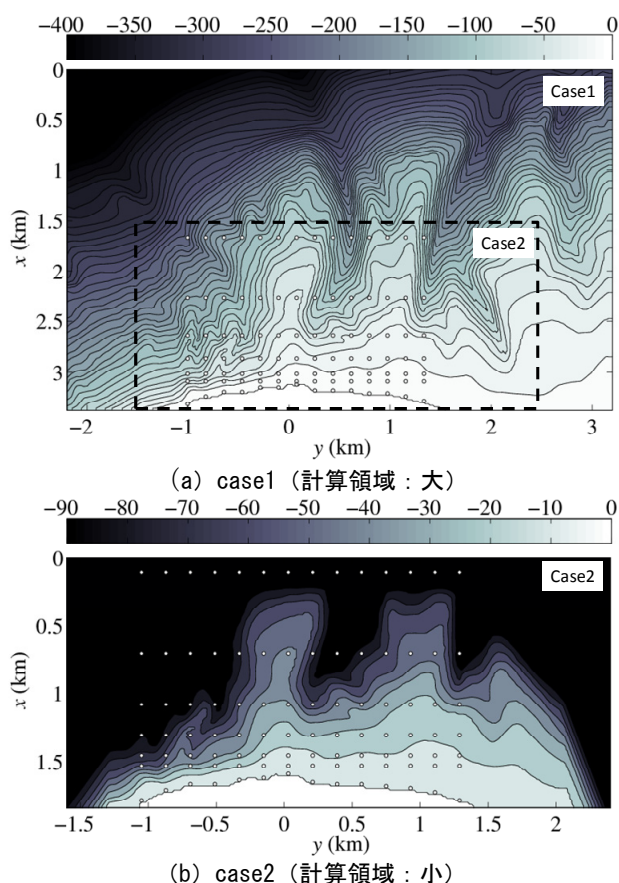


図-1 水深地形図 (○：計算出力地点. 濃淡：水深値 (m))

D.L. +0.21mに設定し、計算格子幅は15.0m、サンプリング時間間隔は0.4s、解析データ数は8192点とした。本検討では、造波境界の影響に着目しているため、陸域部の水深を0.0m（潮位を考慮しない場合）に設定することにより進行波を対象波浪とし、同一の計算出力地点における有義波統計量を比較した（図-1参照）。

(2) 造波境界の影響に関する考察

まず、図-2に2種類の計算領域において算出された有義波高の平面分布を示す。図中の濃淡は有義波高値である。図-2 (a) より、計算領域の大きいcase1の場合では、 $x=0.0\text{km}$ よりも沖側の浅海波に相当する海域（水深が90～150m程度の海域）の海底地形の影響を受けてcase2の造波境界周辺において波高の変動が生じている。一方、計算領域の小さいcase2の場合では、一様水深をもつ入射境界線に沿って同一のスペクトルをそれぞれの計算格子に与えて造波しているため、造波境界周辺における波高がほぼ一様に分布している（図-2 (b)）。また、case2の入射波向を造波境界線上の波向の平均値に設定しているため、波高のピーク値やその位置に差異がみられる。しかしながら、地形の影響による波高の増大あるいは減少する傾向は定性的に一致していることが確認される。

次に、これらの差異についてより明確に把握する

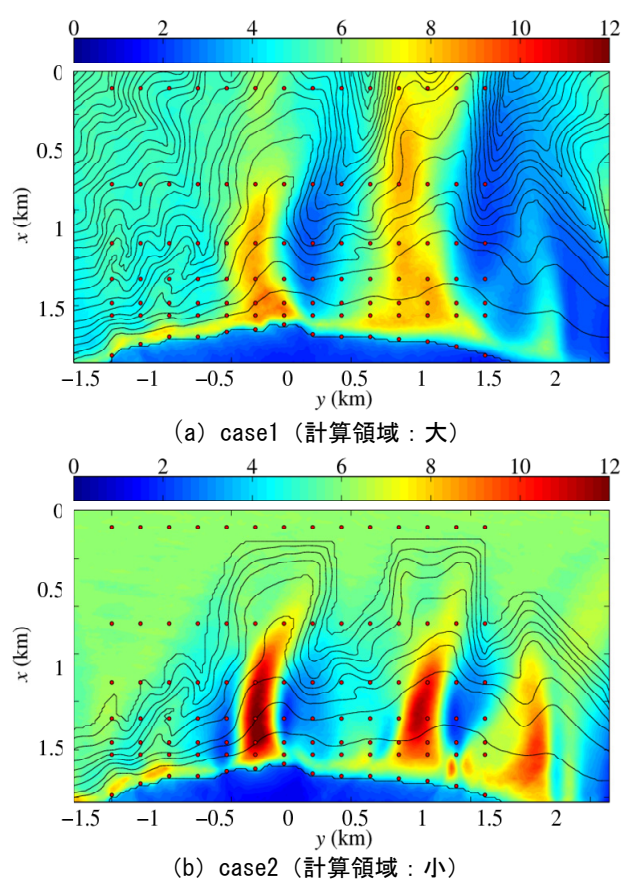


図-2 有義波高の平面分布 (○：計算出力地点. 濃淡：有義波高値 (m))

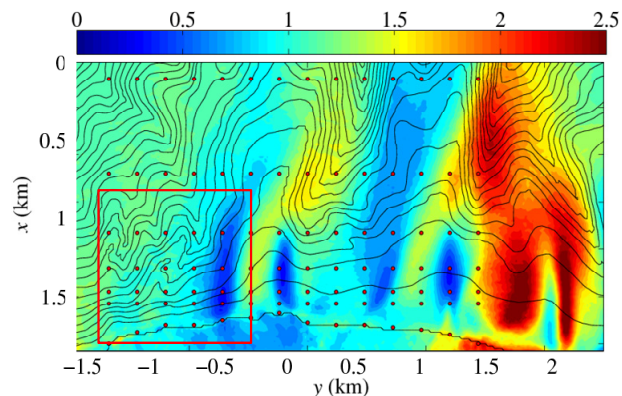


図-3 有義波高比の平面分布 (○：計算出力地点. 濃淡：有義波高比)

ため、計算領域の大きいcase1に対する計算領域の小さいcase2の有義波高の比を算出した（図-3）。図中の赤枠は被災箇所を示している。これより、造波境界近傍では波高比が大きく変動しているが、被災箇所周辺ではこれらの波高比はほぼ1であり、造波方法および計算領域の違いによる影響がほとんど生じていないことがわかる。

1.2.3 進行波としてのうねり性波浪特性

ここでは、被災波の伝播特性の把握・検証や設計波算定などの施設設計を行うために必要となる、構造物や陸域による反射の影響がない進行波の波浪変

形計算を実施し、その特性について検討を行った。

(1) 数値計算概要

本計算では、前節の計算領域の小さいcase2の造波方法および計算領域の計算を対象とし、より詳細に越波・水深被災が発生した箇所周辺の波浪場を把握できるように、計算格子間隔を10.0m、計算出力地点を密に再設定した(図-4)。それ以外の条件については同様に設定した。また、本計算と比較的同等な条件下における水槽実験の結果と比較することにより、進行波を対象とした波浪変形計算の妥当性を確認した。

(2) 波浪変形特性とその妥当性について

進行波に対する波浪場を把握するため、来襲波の短周期変動や長周期変動、平均水位上昇量について検討を行った。各計算出力地点で得られた水位変動の時系列データに平均化操作を施し、その水位変動データにFFT解析を適用して周期30s未満の短周期変動成分と周期30s以上の長周期変動成分に分割し、それぞれの変動成分に対してゼロアップクロス解析により有義波相当の波高を算出した。また、上記の平均化操作により平均水位上昇量を抽出した。

図-5にこれらの物理量を計算出力地点間で補間することにより得られた平面分布を示す。これらの図より、来襲波浪の短周期変動についてみると、波高は海底岬上で10.0mを超え、海底谷では3.0m程度であり、複雑な海底地形の屈折の影響により波高の増大や減少が生じていることがわかる。また、 $y=-0.7$ km付近の被災箇所前面の小さな海底岬においても屈折による波高の増大(6.0m以上)が確認され、被災箇所前面では高波浪が来襲しうる危険性があることが示唆される。一方、周期30s以上の長周期変動についてみると、海底岬の尾根を中心に陸域前面にかけて、波高の高い領域(1.0m以上)が広がっている。これは来襲波の波群によって励起される長周期変動が関係しているものと考えられる。また、平均水位上昇量についてみると、沖合では水位上昇はみられず、海底岬の尾根近傍で碎波の影響とみられる平均水位の上昇が確認される。

このように、被災箇所周辺では、6.0m以上の高波

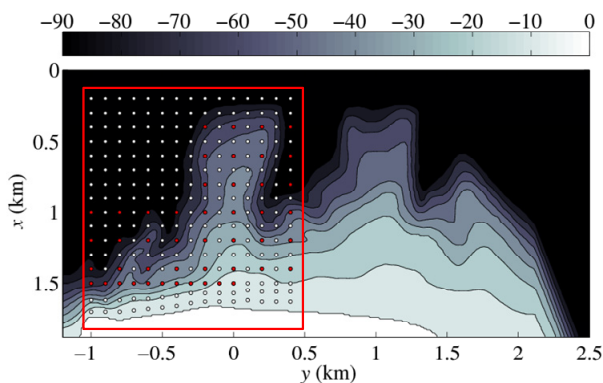
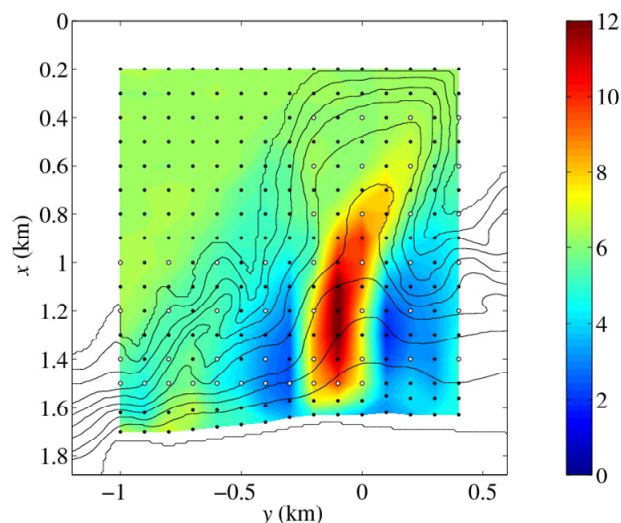


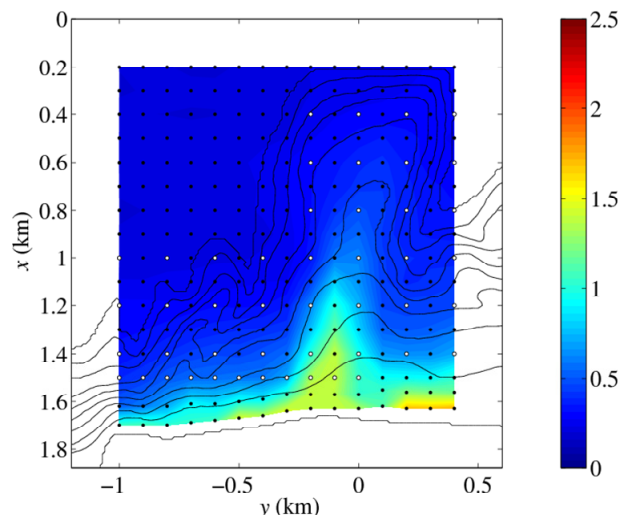
図-4 水深地形図 (○：数値計算の計算出力地点、赤●：水槽実験の計測地点、濃淡：水深値(m))

浪の来襲および1.0m以上の長周期変動が発生する危険性を有していることがわかった。

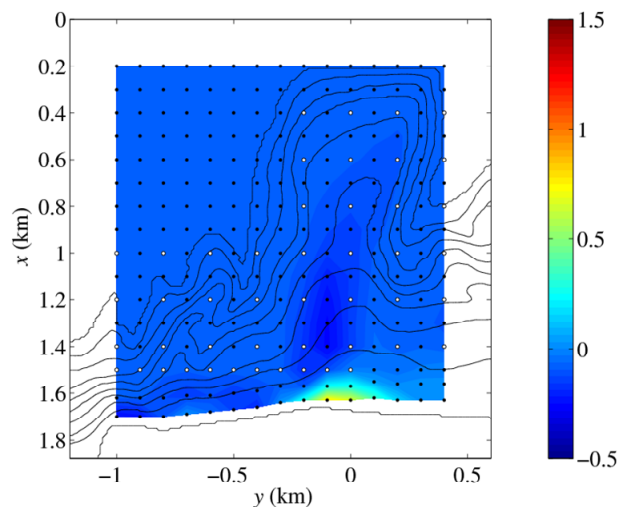
次に、陸域部前面に消波工を設置して進行波状態を想定した水槽実験の結果との比較検証を行った。



(a) 短周期変動(周期30s未満)の波高



(b) 長周期変動(周期30s以上)の波高



(c) 平均水位上昇量

図-5 波浪統計量の平面分布 (○：計算出力地点、濃淡：各波浪統計値)

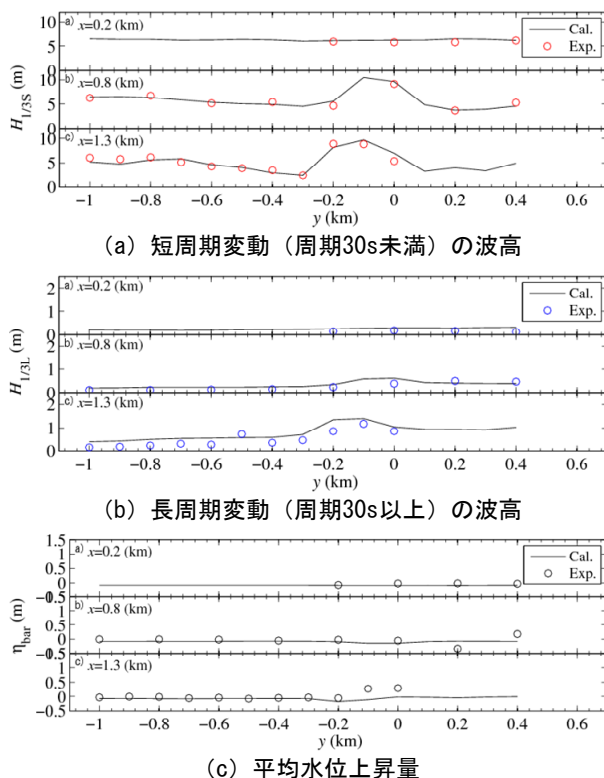


図-6 計算結果と実験結果の比較（実線：計算値，○：実験値）

図-6はその結果である。上から順に、短周期変動、長周期変動、平均水位上昇量を表しており、各物理量に対して比較的沖合に位置する地点（ $x=0.2\text{km}$ ）、海底勾配が急変部に差し掛かる地点（ $x=0.8\text{km}$ ）、陸域部前面（ $x=1.3\text{km}$ ）の結果を示している。これらの図より、計算値は実験値を比較的良好に再現していることがわかる。しかしながら、陸域部前面における水位の長周期変動や平均水位上昇量についてみると、計算結果と実験結果に差異がみられる。この原因の一つとして、数値計算と水槽実験での進行波の定義が異なることが考えられる。すなわち、数値計算では護岸前面の海底斜面の遡上や陸域部（潮位を含んだ水深 0.21m の水域部）の波の通過を許容しているのに対し、水槽実験では護岸前面に消波工を設置して波を消波して進行波を与えている。

1.2.4 うねり性波浪に伴う長周期変動特性

2008年2月に発生した下新川海岸の越波・浸水被害事例を対象に、うねり性波浪に伴う長周期変動に着目して、その特性について検討した。以下では、被災時の波浪特性や波群に起因する長周期変動特性、さらには長周期変動と海岸護岸の越波特性の関係について考察を行った。

(1) 数値計算概要

本計算では、前節の進行波の計算をもとに、陸域部前面に緩傾斜護岸や消波護岸、離岸堤および潜堤を導入して被災当時の水深地形を再現した（図-7）。なお、離岸堤および潜堤の透過率が不明であったた

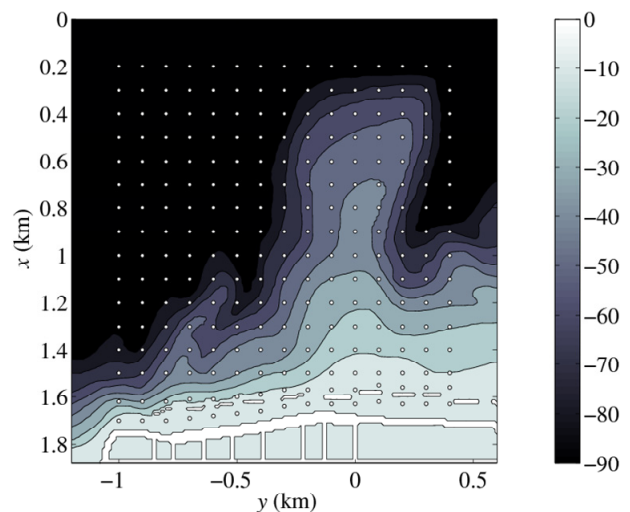


図-7 被災時の水深地形図（○：計算出力地点。濃淡：水深値（m））

め、これらは「不透過構造物」として扱った。水深・地形以外の計算条件については、進行波の計算条件と同様に設定とした。

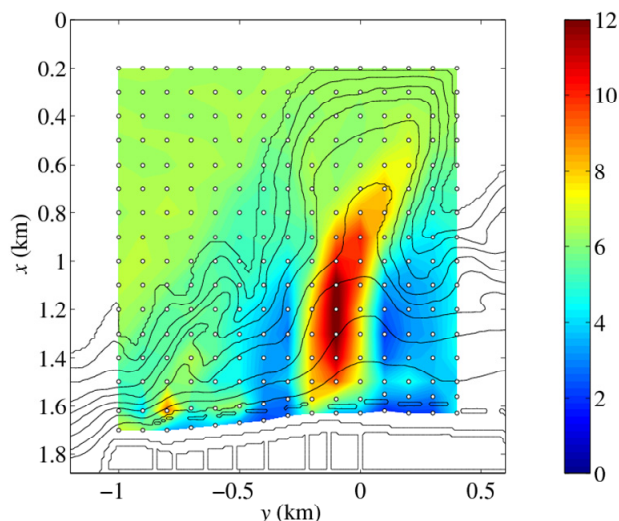
(2) 被災時の波浪特性

図-8に被災当時の来襲波を推定した結果を示す。図の説明については、図-5と同様である。図-8(a)より、短周期変動についてみると、進行波の結果と同様に、海底岬の尾根において急勾配斜面地形による屈折の影響により波高の増大が生じている。また、被災護岸前面では小さな海底岬の影響により、離岸堤前面において波高が増大している。しかしながら、離岸堤を設置することにより離岸堤背後における波高は、進行波の場合に比べて減少し、 4.0m 以下となっている。

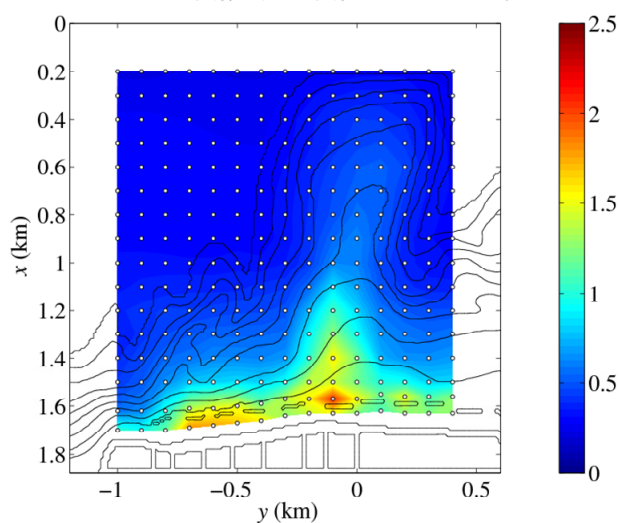
一方、長周期変動についてみると、進行波の結果と同様に海底岬上において長周期変動が卓越している。また、被災護岸前面の離岸堤と緩傾斜護岸に挟まれた水域において長周期変動が卓越し、 2.0m 程度となっている。平均水位上昇量についてみると、離岸堤背後において進行波の結果では確認されなかった平均水位の上昇が確認される。これは、来襲波が潜堤で碎波することにより平均水位の上昇が促進されたものと考えられる。

これらの物理量をもう少し詳細に考察するため、図-9に計算出力地点で得られる各物理量の沿岸方向分布の岸沖変化を示す。上段の図は短周期変動の波高、中段の図は長周期変動の波高、下段の図は平均水位上昇量を表している。図-9(a)より、沖側の海域では、 $x=0.2\text{km}$ から $x=1.0\text{km}$ までの伝播過程において海底地形の影響を受けて屈折することにより、短周期変動のピーク位置が $y=0.1\text{km}$ から $y=-0.1\text{km}$ へ移動し、それに伴って長周期変動のピーク位置も同方向に移動している。また、平均水位上昇量については顕著な変化は見られない。

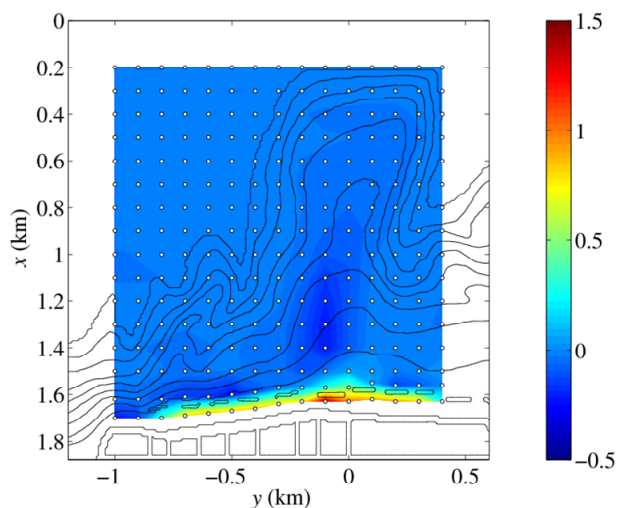
図-9(b)より岸側の海域では、短周期変動についてみると、浅水変形や屈折による波高集中で



(a) 短周期変動（周期30s未満）の波高



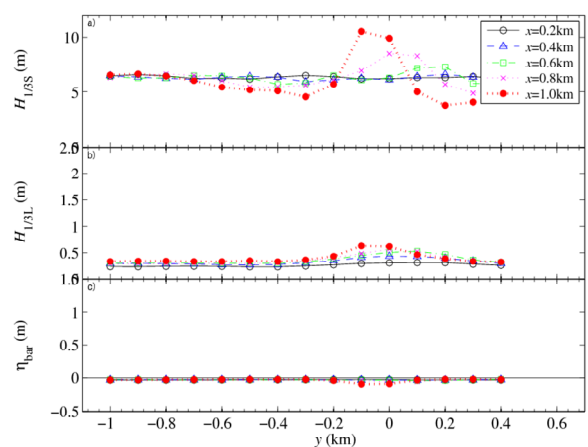
(b) 長周期変動（周期30s以上）の波高



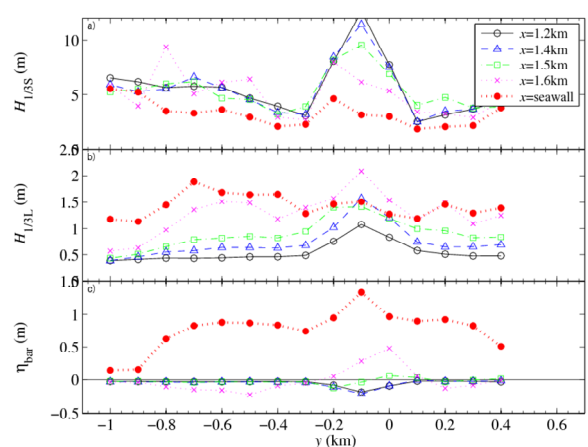
(c) 平均水位上昇量

図-8 被災時における波浪統計量の平面分布（○：計算出力地点、濃淡：各波浪統計値）

10.0m以上の高波高が生じている。しかし、水深10m以浅の海域（ $x=1.5\text{km}$ より岸側）では、砕波の影響により波高が減衰し、緩傾斜護岸前面では3.0～5.0m程度である。一方、長周期変動についてみると、



(a) 沖側（ $x=0.2\sim1.0\text{km}$ ）



(b) 岸側（ $x=1.2\sim$ 護岸前面）

図-9 波浪統計量の沿岸分布の岸沖変化（上から順に、短周期変動の波高、長周期変動の波高、平均水位上昇量）

来襲波の伝播とともに、それに追従した長周期変動が海底岬の尾根（ $y=-0.1\text{km}$ ）でピークを示し、その値は増大する傾向にある。一方、護岸前面ではそのピークの位置は被災した護岸側（ $y=-0.7\text{km}$ ）に移動していることがわかる。この時の長周期変動の波高は2.0mにまで達している。また、平均水位上昇量についてみると、 $x=1.2\sim1.4\text{km}$ において、短周期変動の波群によるウェーブセットダウンが生じている。護岸前面においては、砕波や離岸堤が設置されていることによる閉塞効果により、1.0m程度の水位上昇が促進され、沖合に比べて有意な値をとっていることがわかる。

このように、被災時には、被災護岸前面では来襲波の短周期変動だけでなく、水位の長周期変動や平均水位の上昇が顕著に発生していたことが推察される。

(4) 水位の長周期変動が越波流量に与える影響

ここでは、上述した水位の長周期変動や平均水位上昇量が護岸越波流量に与える影響について検討した。

通常、護岸設計で用いられる越波流量は、屈折と回折の影響を考慮した換算沖波波高を便宜的に使用

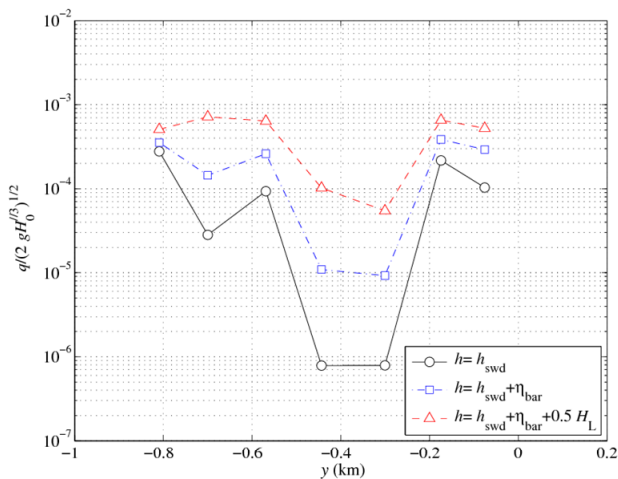


図-10 水位の長周期変動と護岸越波流量の関係

して算定される¹²⁾。また、この算定方法では、対象護岸前面に離岸堤等の構造物がない状態を前提条件としている。一方、本研究で対象となる護岸の前面には離岸堤や潜堤がある。そこで、本研究では、離岸堤や潜堤による波高減衰効果を取り入れた換算沖波波高を新たに定義し、これを通常の護岸越波流量の算定方法に用いる換算沖波波高に代用させて、護岸越波流量を推定した。

図-10に示すのは、水位の長周期変動や平均水位上昇量の有無による護岸越波流量を比較したものである。図中の○は水位が静水位の状態、□は平均水位上昇量のみを考慮した状態、△は平均水位上昇量に加えて水位の長周期変動量も考慮した状態における越波流量を表している。

これらより、自明ではあるが、平均水位上昇量や水位の長周期変動を考慮することにより護岸越波流量が増大していることがわかる。また、静水位の状態では、被災した護岸 ($y=-0.7\text{km}$) における越波流量は 10^{-5} オーダーであり、最大値を示していないが、平均水位上昇量や水位の長周期変動を考慮することにより、この地点における護岸越波流量が最大値をとるようになる。このように、水位の長周期変動や平均水位上昇量が要因となって越波・浸水被害の規模を拡大させることが示唆された。

1.2.5 まとめ

本研究では、複雑に急変する海底地形を有する富山県下新川海岸で発生した越波・浸水被災事例を対象に、うねり性波浪が有する波群に起因する水位の長周期変動特性について検討を行い、NOWT-PARIによりうねり性波浪の急変部による波浪変形を適切に表現可能であることがわかった。また、うねり性波浪のように顕著な波群を有する来襲波に対し、護岸越波流量は水位の長周期変動の有無が大きく影響を与えることがわかった。

今後は、本計算では扱っていなかった越波モデルの改良を行うとともに、越波を対象とした水槽実験との比較検証を行う予定である。

本研究は、(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構・運輸分野における基礎的研究推進制度による研究課題「長周期巨大波浪の発達・変形機構と減災対策」による研究成果の一部であることを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 田島芳満・石指裕章・佐藤慎司：地形急変部周辺における長周期変動を伴う波・流れ場の局所集中機構，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.65，No.1，pp.211-215，2009.
- 2) 深瀬祐太郎・Suminda Ranasinghe・田島芳満・佐藤慎司：下新川海岸におけるうねり性巨大波浪の変形機構，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.65，No.1，pp.1411-1415，2009.
- 3) 深瀬祐太郎・佐藤慎司・田島芳満・Suminda Ranasinghe：沿岸域地形急変部における長周期うねり性波浪の集中と対策，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.21-25，2010.
- 4) 平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1036，162p，2002.
- 5) Kashima, H and K. Hirayama: Effects of bottom topography characteristics on transformations of long period swell, in: Proceedings of the 4th SCACR - International Short Conference on applied coastal Research, pp.197-205, 2009. Barcelona, Spain.
- 6) 加島寛章・平山克也：長周期うねりの護岸越波量および作用波圧特性に関する実験的検討，港湾空港技術研究所資料，No.1218，26p，2010.
- 7) 平山克也・平石哲也：ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法とその適用性，海岸工学論文集，第51巻，pp.11-15，2004.
- 8) 平山克也・長谷川準三・長谷川巖：越流を考慮したブシネスクモデルによる不規則波の越波量に関する数値計算，海岸工学論文集，第53巻，pp.706-710，2006.
- 9) 平山克也・宮里一郎：任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案，港湾空港技術研究所報告，第48巻，第2号，pp.199-214，2009.
- 10) 平山克也・岩瀬浩之・加島寛章：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，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.65，No.1，pp.11-15，2009.
- 11) 平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎：偶発波浪荷重による被害例とその特性，海岸工学論文集，第55巻，pp.981-985，2008.
- 12) 合田良実・岸良安治：不規則波による低天端型護岸の越波特性実験，港湾技術研究所資料，No.242，28p，1976.

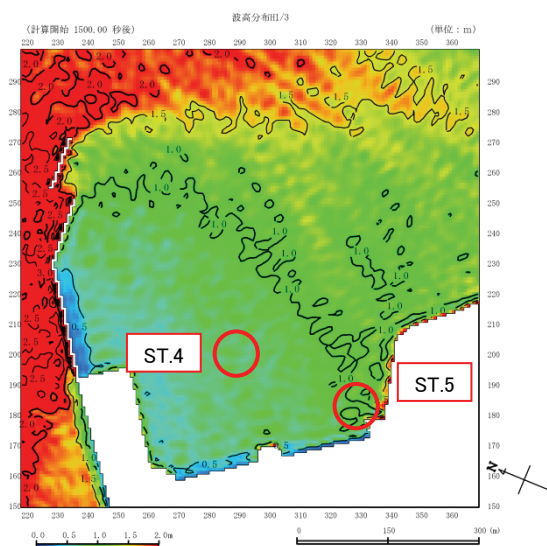


図-3 波浪観測時港形における有義波高分布（波向NNW）

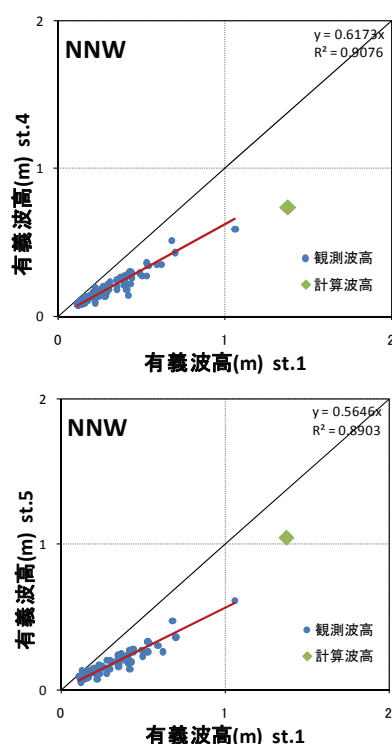


図-4 観測波高とブシネスク波高との比較
（横軸：沖波st.1, 縦軸：港内st.4およびst.5）

1.3.5 仮置堤撤去時期の検討

仮置堤の最適な撤去可能時期を検討するため、現況港形（仮置堤あり）の波高分布から既定計画港形に対して防波堤（第一北）整備延長を変化させた複数ケースの静穏度解析を実施し、現況港形の波高分布と同等になる延長を求めた。その結果、フェリーバース水域における静穏度は、防波堤（第一北）の施工延長360mの整備時点で現況港形と同等の静穏度を確保出来ることが確認された（図-5）。これにより、防波堤（第一北）の施工延長が360m以上となる平成23年度以降で仮置堤を撤去し、防波堤（東）の延伸のためにケーソンを移設することが可能となることが解った。

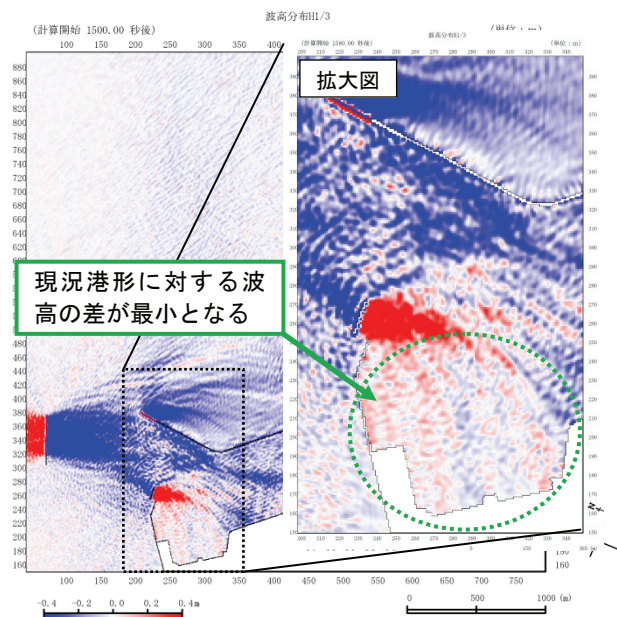


図-5 現況港形に対する平成22年度延長港形の差図
（青：波高低減域, 赤：波高増大域）

1.3.6 港内反射波対策（防波堤（西））

(1) 完成時港形における静穏度

ブシネスクモデルにより完成時港形における港内波高を確認すると、外郭施設の延伸により港内に大きな反射面が形成されることから、図-6のように現況よりも港内波高が増大する水域が航路および回頭域に現れることが確認された。

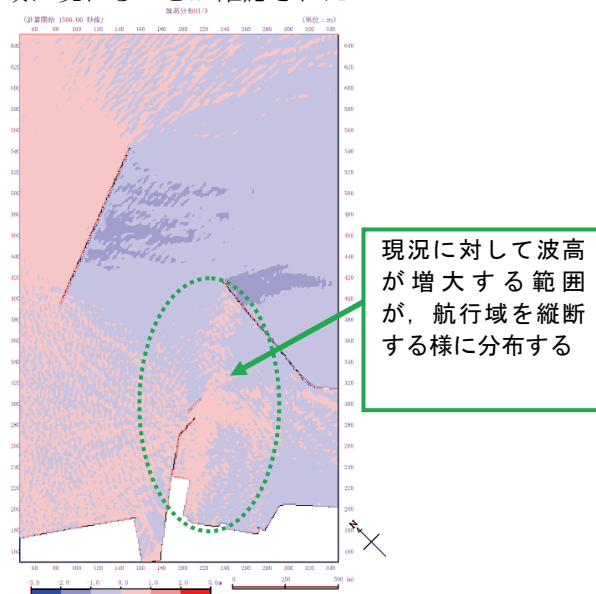


図-6 現在港形に対する計画港形の波高差図（波向NW）

(2) 完成時港形における航路・回頭域の静穏対策

ブシネスクモデルの解析結果から航路・回頭域の静穏度低下の原因を検討した。ブシネスクの波高分布から波向別の波高差を確認した結果、図-7に示すような特定の波向において港内で多重反射が発生し、現況よりも静穏度を低下させることが解った。

そこで、多重反射の基点となる防波堤（西）に反射波低減のための対策工を設置することで、図-8に

示すような航路周辺の波高低下の効果が得られることが確認できた。したがって、防波堤（西）に反射波対策を施すことにより航路・回頭域に対する静穏度を現況レベルに確保することが可能で、航路を含めた全ての水域に対して静穏度を低下させることなく、港湾整備を進めることが可能となった。

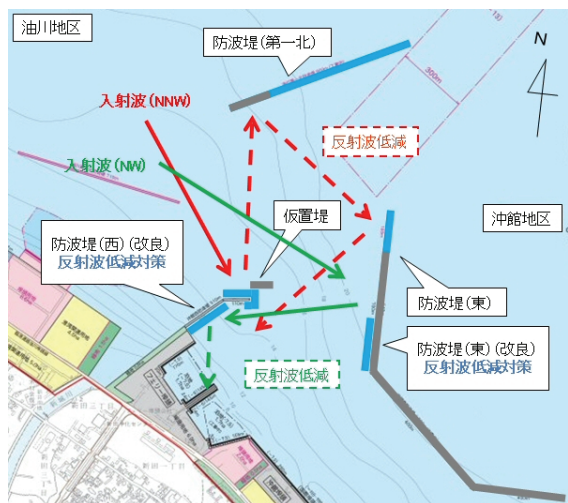


図-7 波向NWに対する多重反射の形成と反射波対策概要

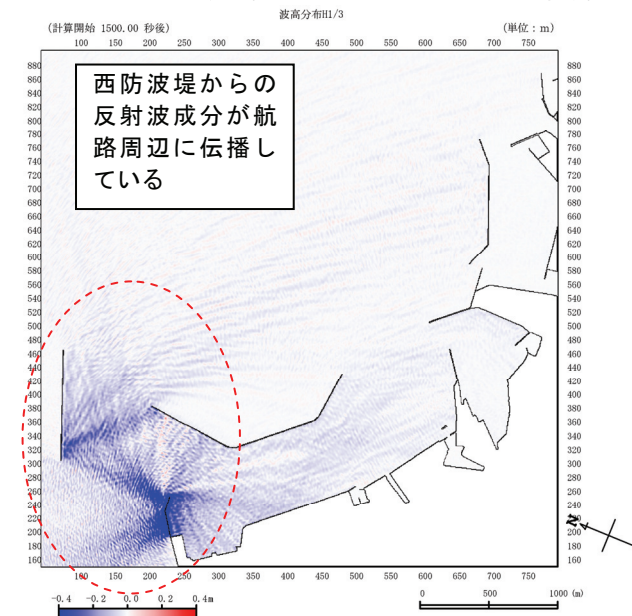


図-8 防波堤（西）の反射波対策による波高低減範囲

1.3.6 フェリーバース稼働率向上のための 反射波対策（防波堤（東））

(1) 完成時港形における荷役稼働率

ブシネスクモデルにより多重反射や重複波を考慮した解析により、フェリーバースの一部で目標稼働率（97.5%）を満足しないことが解った。これは低波高であるが出現頻度の大きな波向NNWおよびNWに対しての波高低減効果が不足していることが原因であった。これは冬期に多く発生し航路および泊地の静穏性を低下させる原因としても挙げられる冬期風浪による波である。よって、この波向に対して第一反射面となる防波堤（東）港内側に反射波低減の対

策を施すことが港内静穏度を向上させるうえで効果的であると考えられた。

(2) 対策施設の最適配置

港内反射波の対策施設として防波堤（東）の港内に反射波低減施設の最適延長をブシネスクモデルにより検討した。ここで、最適延長の検討では、対策工の延長を150mおよび550m施工した2ケースの静穏度解析による波高比を元に、50mピッチでの整備延長に応じて稼働率を線形補間により算出して、整備延長に対するフェリーバースの荷役稼働率を算出した。その結果を図-9, 10に示す。これにより目標稼働率97.5%を満足する対策延長は350mとなり、これを最適施設延長として提案した。ただし、冬期の目標稼働率（95%）を満足させるためには延長500mが必要となり、冬期の利用性向上のための対策が今後の課題として挙げられる。

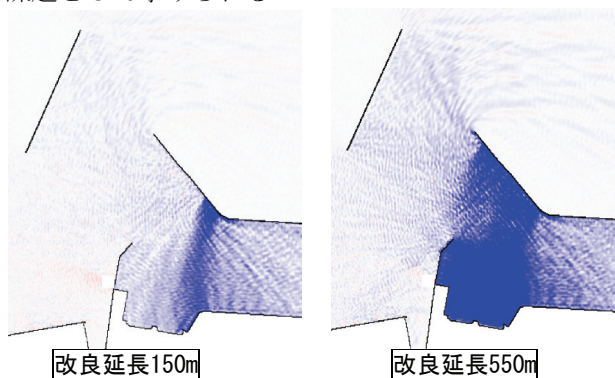


図-9 対策配置の波高低減範囲

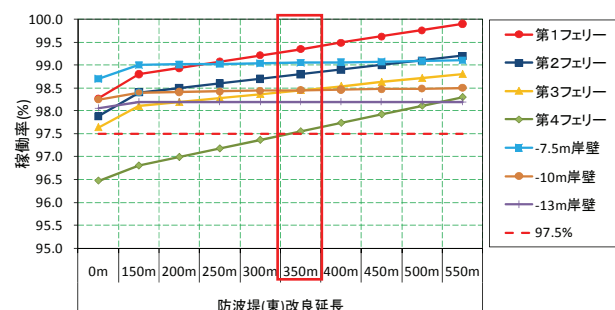


図-10 対策施工延長に対する荷役稼働率の変化

(3) 反射波対策施設の設計外力の検討

対策工の設計外力を算定するため、青森港における設計沖波を対象に、堤前における設計波高の解析を行った。特に港内側に作用する入射波成分を解析する必要があることから、港内における回折および多重反射を考慮可能なブシネスクモデルを用いることとした。ここで、設計における堤前波は設計対象物からの反射成分を除いた入射波成分のみの波高と

する必要があることから、図-11に示すように、対象施設前面に無反射境界を配置して入射波成分のみの波浪を抽出した。

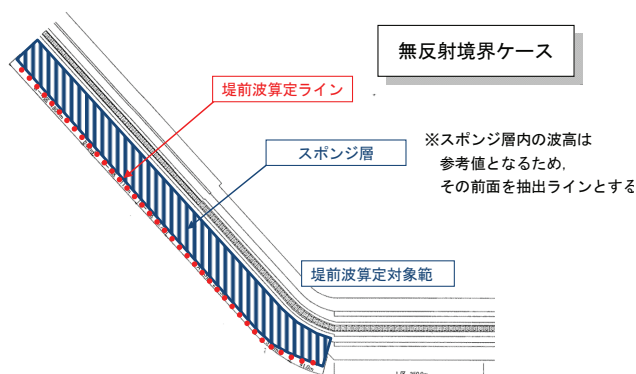


図-11 堤前波高算定の無反射境界層の設置

また、港内波高は港湾整備が進むに従い静穏性が高くなることから、完成時港形における50年確率波が来襲した場合、現在の整備途中において10年確率波相当が作用した場合で、波高を比較し安全側の設定となるように選定した。図-12に示す防波堤周辺の波高分布から、設計対象区間毎に最大波高を整理した結果が図-13であり、最大となる波高を設計堤前波高として採用した。

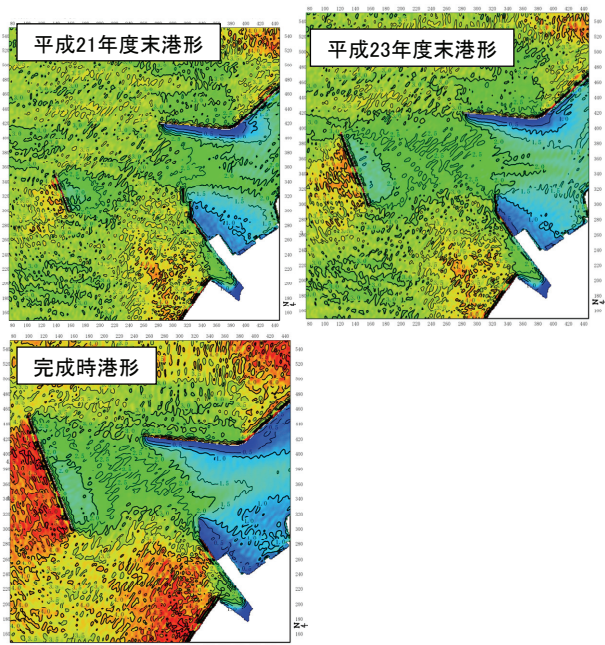


図-12 反射波対策工の堤前波高分布

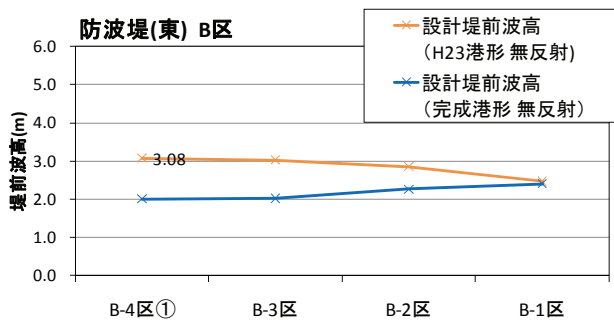


図-13 区間毎の設計波高

(4) 対策施設の基本断面

前述の設計波に対する反射波対策の対策断面は、フェリー航路の供用を行いながら、整備工事を行うことが必要である。よって、港外からクレーン付き台船による施工を前提として、複数の対策構造案の中から経済的で施工性に優れた消波ブロック被覆による断面を提案した。対策基本断面を図-14に示す。

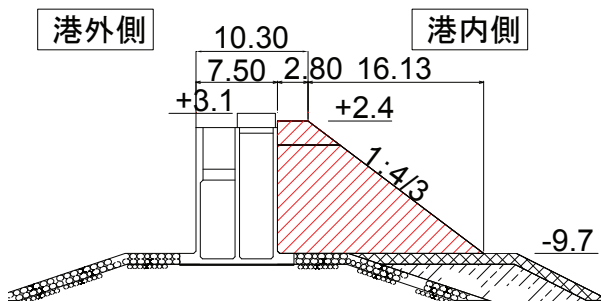


図-14 反射波対策施設の基本断面(B区)

1.3.7 青森港における港湾整備計画の提案

(1) 完成時港形に対する荷役稼働率の確認

反射波対策を含めた完成時港形に対する荷役施設の稼働率を図-15に示す。これにより、反射波対策の最適延長において、想定した稼働率が現れることを確認し、全ての施設に対して目標稼働率を満足していることを確認した。

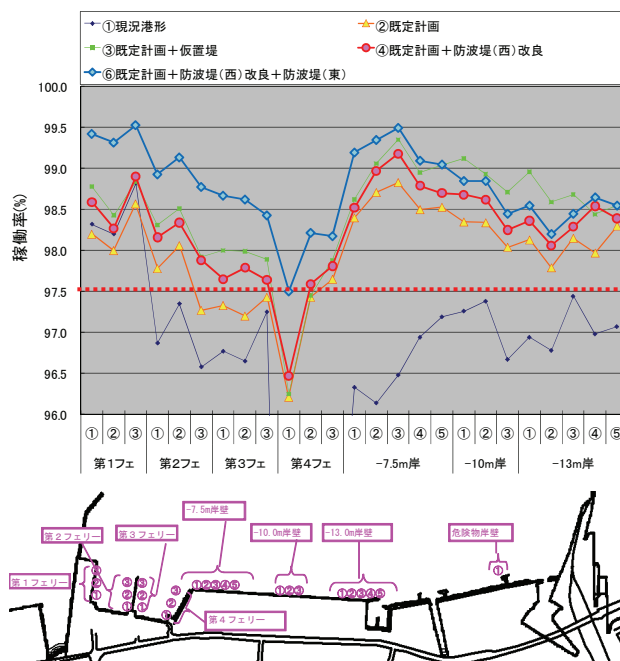


図-15 完成港形における荷役稼働率

(2) 施工計画の検討

年度施工計画の策定の基礎資料とするため、効果的な整備手順の検討を行った。図-15に示した稼働率の算定結果から、フェリーバースに対する各整備施設の整備効果を稼働率の向上値で評価し、整備効果の高い順に整理した。このとき、仮置堤を撤去するのは防波堤(第一北)が延伸されるまでは出来ないことや、防波堤(東)の延伸は仮置堤の撤去後になること等の基本的な施工条件を勘案する必要がある。

ある。また、施工に必要な工事区域についても、工事船舶のアンカーの設置範囲まで考慮し、工事区域とフェリーの航行範囲とが輻輳しないことも確認するため、図-16に示すように「AIS（自動船舶認識装置）による航行履歴データ」を用いて航跡図を描くことにより、航行範囲を評価し設定した工事範囲と大きく輻輳しないことを確認した。

これらの結果から、効果的な整備優先順位として表-3のような施工手順を提案した。そして、この施工手順によりフェリーバースの稼働率は経年的に向上することも確認し、効率的で効果的な港湾整備を行うことが可能となることを示した。（図-17）

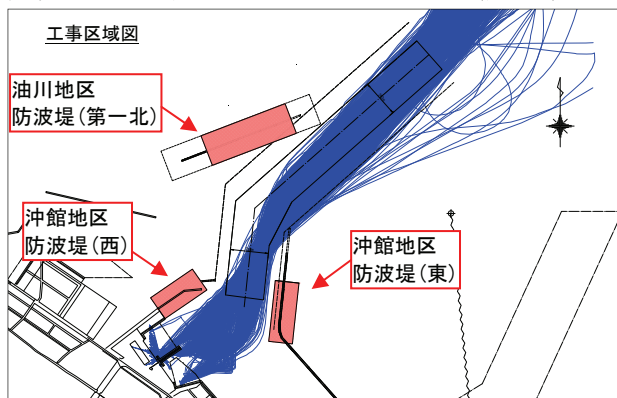


図-16 航行域と工事区域範囲
（青線が航跡，赤枠内が工事区域）

1.3.8 今後の課題

港内静穏度を評価する場合には、屈折・回折をはじめ多重反射および波の収斂等を考慮することが可能なブシネスクモデルを用いることにより、定量的な評価と適切な対策工の検討が可能となりその適用事例として青森港の例を紹介した。

今後、全国の港湾において外郭施設の整備が進行すると、港内の反射波の増加により港の利用上の問

題が数多く発生してくるものと予想される。そのため、ブシネスクモデルを活用する機会がますます増えてくるものと考えられる。

最後に、本調査において懸案となった、港湾計画を策定する上での技術的課題を以下にまとめる。

(1) 港内静穏度計算の精度確認および精度向上のための現地波浪観測データの蓄積

ブシネスクモデルによる解析結果の妥当性を確認するためには、現地における波浪データや水理模型実験による確認が必要である。そのための基礎データを蓄積することが重要となる。

(2) フェリーバースに対する目標稼働率の設定

一般的な目標稼働率は97.5%となっており多くの港湾施設の整備レベルとして設定されている。ただし、青森港のように24時間稼働するフェリーバースに対しての利便性を考えた場合には97.5%以上の目標値を設定することが必要となる。ただし、現行の設計基準およびマニュアルでは、この場合の目標稼働率を明確な数値で示しておらず、高頻度の稼働バースに対する整備レベルおよび季節特性を考慮した整備レベルの明確化が必要であると思われる。

(3) 反射波低減工法の開発

防波堤や護岸の堤体の整備が完了した後は、港の供用がはじまっており、改良工事のために供用を一次的に停止することが困難な場合がある。このため、工事区域を狭小化させ、効果的な反射波低減のための構造物形式の開発が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 平山克也：非線形不規則波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.1036,2002.
- 2) 合田良実：増補改訂 港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会
- 3) (社)港湾技術協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説

表-3 効果的な整備手順（案）

地区	施設	完了	1力年	2力年	3力年	4力年	5力年	6力年	7力年	8力年	9力年	10力年
沖館地区	防波堤（東）	8力年										
	防波堤（東）（改良）	8力年			■	■		■	■	■	■	
	防波堤（西）（改良）	5力年										
油川地区	防波堤（第一北）	10力年										
年度別港内静穏度の推移（%）	フェリー埠頭平均		95.9	96.1	96.8	97.2	97.5	97.9	98.2	98.5	98.5	98.5
	フェリー第4バース		90.9	91.7	92.6	93.9	94.7	95.5	96.7	97.5	97.5	97.5
	沖館埠頭平均		97.1	97.4	97.7	97.8	98.1	98.3	98.3	98.6	98.6	98.6

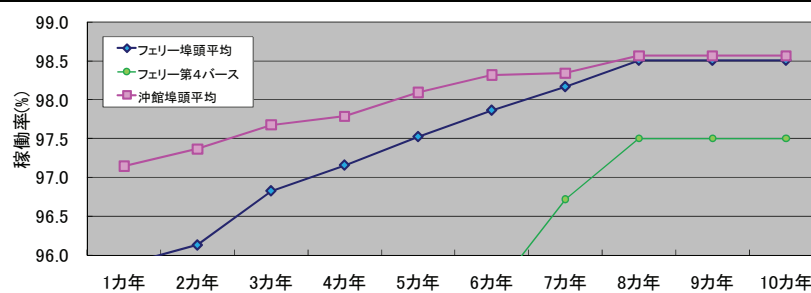


図-17 整備年次毎のフェリーバースの稼働率の向上効果

2. 二次元配列変数の一次元化による演算の高速化について

1. はじめに

ビジネス計算プログラムは近年、港湾以外でも一般的に使われるようになっており、また静穏度の検討では1件で数十ケース実行することも多々あります。

そこで計算の速度を上げることが重要な課題となっています。

2. 1次元化による改良

今回はフォートランコンパイラのベクトル化機能を有効に使うためデータ配列の1次元化を行ってみました。

これは配列を使用するときに計算機のメモリー上で隣り合った位置に順次アクセスするほうが処理速度が向上するという点に着目したものです。

たとえばH(IMAX, JMAX)という2次元配列に対してI方向が1つずつ変化していけば隣り合ったメモリーにアクセスすることになりますが実際には途中で陸地があったりして連続性が途切れます。

そこでH(ISIZE)という1次元配列にして海の部分だけをこの配列に入れるという方法を考えます。2次元のH(I, J)が1次元のH(II)となったときIIがいくつであるかを別にインデックスとして持ちます。

ソースコードの1部を示して説明します。

2次元型では

```
ALLOCATE ( H(IMAX, JMAX) )
```

これを

```
read( 13, '( A20, 2I10 )' ) cc, imax, jmax
```

```
allocate( wk(imax, jmax) )    ! 水深の分だけアロケート
```

```
do j = 1, jmax
```

```
  read( 13, '( 8F10.0 )' ) ( wk(i, j), i = 1, imax )
```

```
end do
```

```
isz = 0                      ! 水深のあるメッシュ数をカウントする
```

```
do i = 1, imax
```

```
do j = 1, jmax
```

```
  if ( wk(i, j).gt.hlandfix ) isz = isz + 1
```

```
end do
```

```
end do
```

c インデックス

```

        allocate( ixy(imax, jmax) )
        allocate( kl(isz,4), kls(isz,6), ix(isz), jy(isz), iex(0:isz),
+             lxsw(isz), lysw(isz) )
c   データ
        allocate( h(0:isz), e(0:isz) )
c
c   インデックスの作成
c
        knt = 0
        do j = 1, jmax
        do i = 1, imax
            ixy(i, j) = 0
            if ( wk(i, j).gt.hlandfix ) then
                knt = knt + 1
                ixy(i, j) = knt
            end if
        end do
        end do
        knt = 0
        do j = 1, jmax
        do i = 1, imax
            if ( wk(i, j).gt.hlandfix ) then
                knt = knt + 1
                do k = 1, 4
                    kl(knt, k) = 0
                end do
                if ( j.lt.jmax ) kl(knt, 1) = ixy(i, j+1)      ! 上
                if ( j.gt.1 ) kl(knt, 2) = ixy(i, j-1)      ! 下
                if ( i.gt.1 ) kl(knt, 3) = ixy(i-1, j)      ! 左
                if ( i.lt.imax ) kl(knt, 4) = ixy(i+1, j)    ! 右
            end if
        end do
        end do
c
つまり

```

従来型の $h(i, j)$ は 1次元型 $h(ixy(i, j))$ となります。

また kl というインデックスを使うことにより

$h(ii)$ の右は $h(kl(ii, 4))$ 左は $h(kl(ii, 3))$ となります。

データ配列を $h(0:isz)$ としたのはインデックスが 0 の場合があるからです。

3. 計算例

以下の4つの exe で図-1 に示す領域で計算を行いました。

PG-1 従来型の静的配列

PG-2 同上をアロケーション型にしたもの

PG-3 1次元配列型

PG-4 同上を並列処理オプションで作成したもの

以下に計算時間の比較を示します。

	時間	秒	比
PG-1	3 時間 22 分	12155	1.00
PG-2	3 時間 27 分	12478	1.03
PG-3	2 時間 59 分	10792	0.89
PG-4	2 時間 29 分	8948	0.74

(各ケースとも2回実行して平均時間をとりました)

なお、上記4ケースの結果は hrms の波高では100%一致しています。

また、今回のモデルでは比較的陸地が多かったなので、実行時の使用メモリーは

2次元型 245 KB

1次元型 159 KB

でした。

PC のスペック

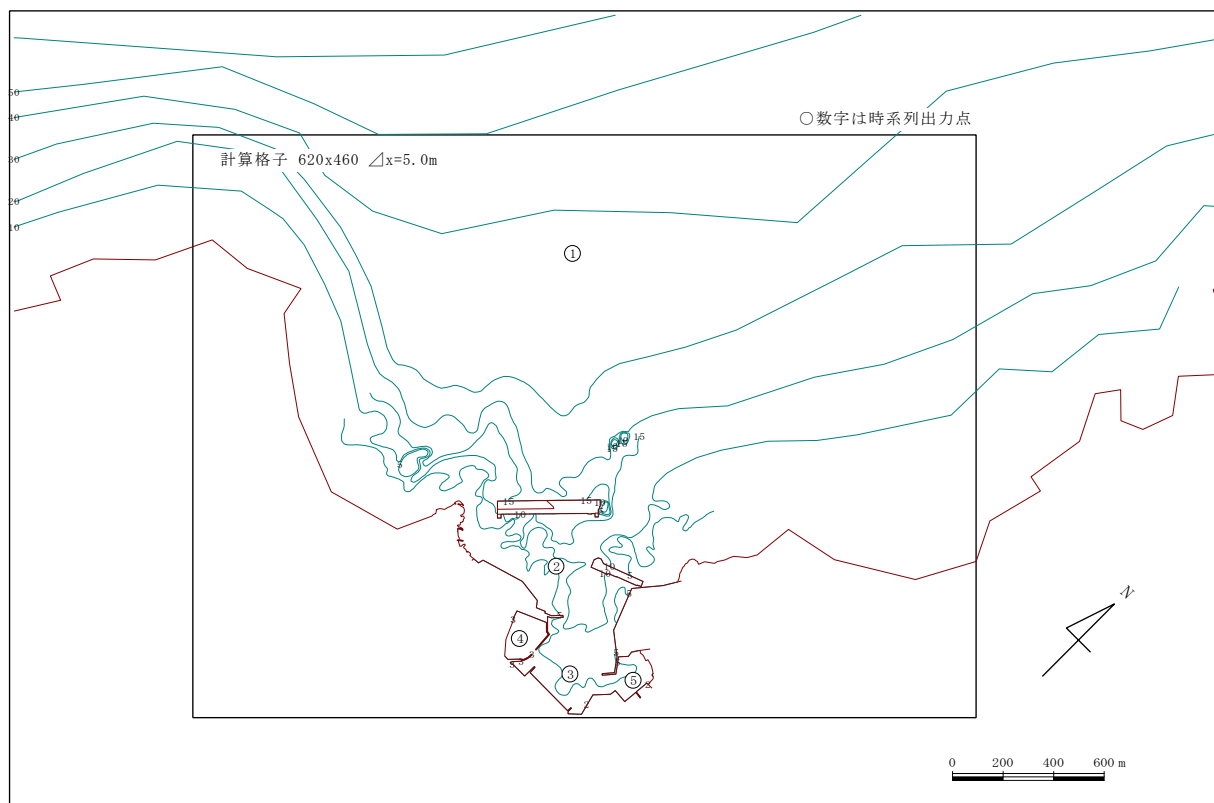
OS Microsoft Windows Server 2003 R2 Enterprise x64

CPU Intel(R) Core(TM) i7 950 3.07GHz 11.9GB RAM 4Core

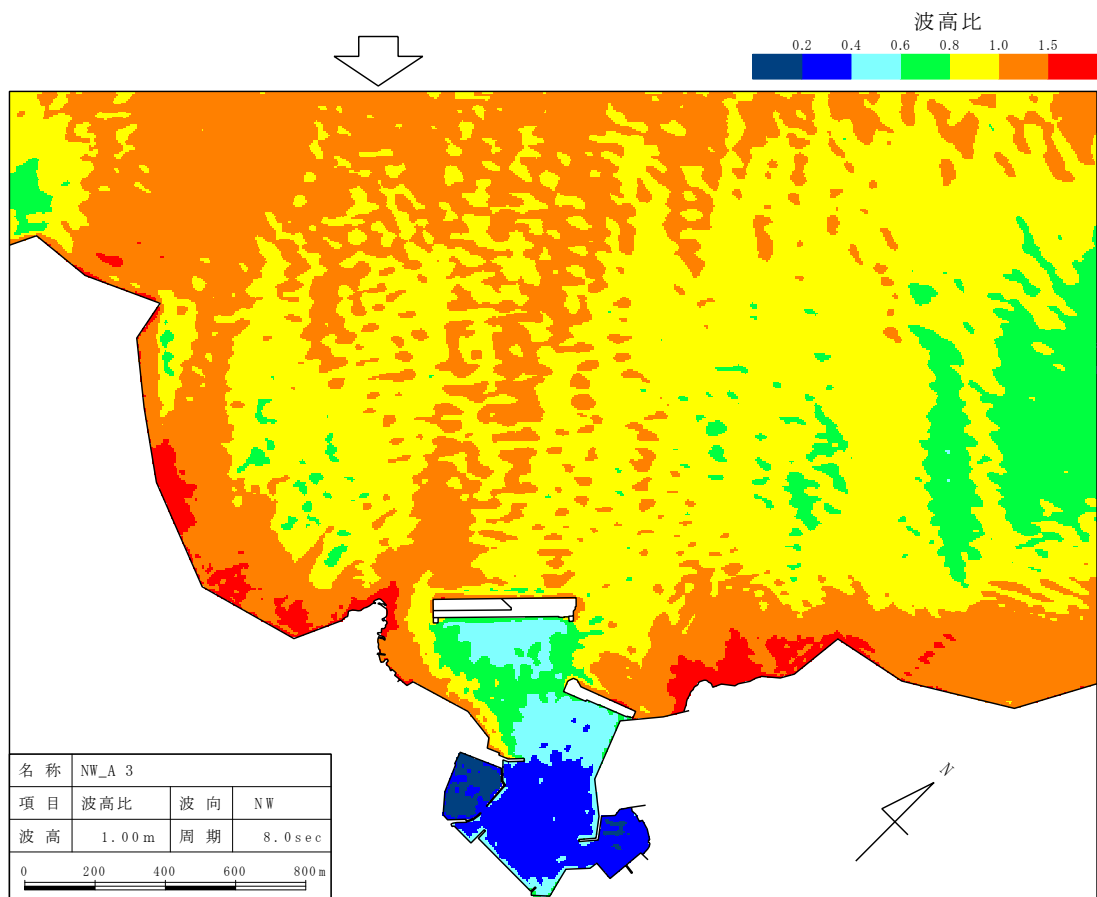
フォートランコンパイラ

Intel(R) 64Conpiler Version11.0

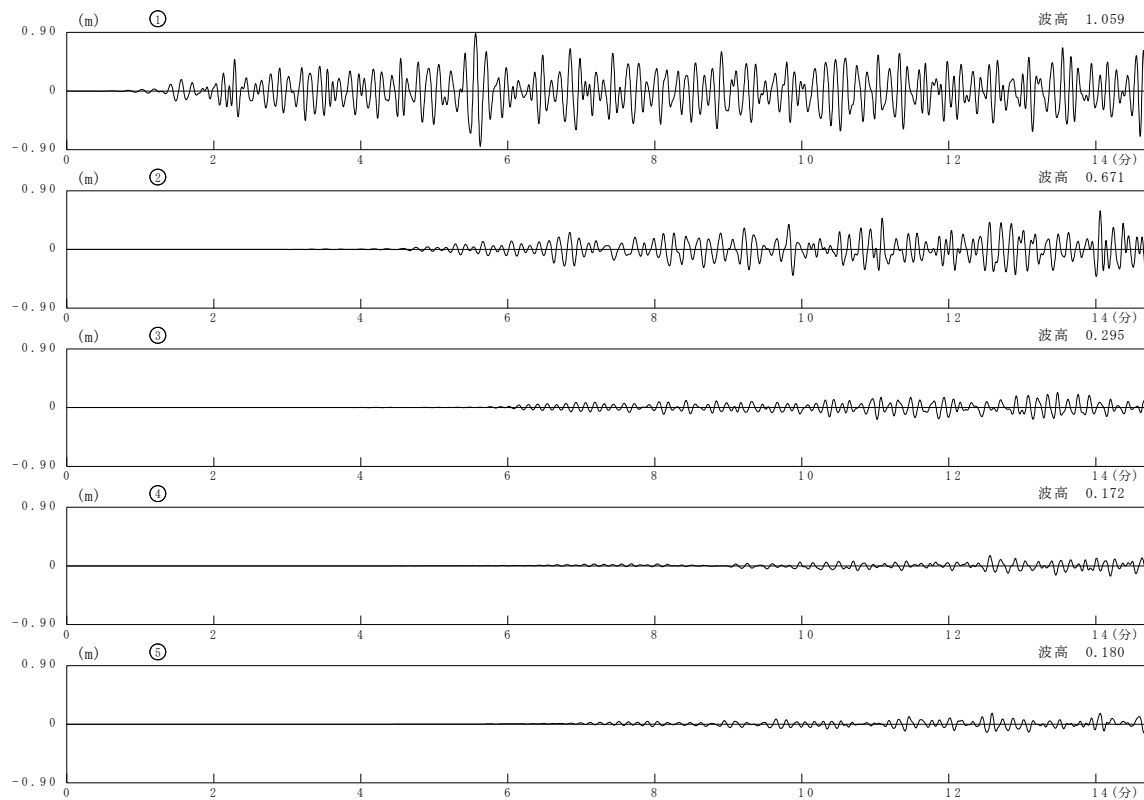
■ 計算領域図



■ カラー図



■ 時系列図



水位の時系列図 (NW_A 3)

4. 複数ケースの同時実行

使用している PC は 4 コア 8 スレッドです。

この PC で同時に 6 本のプログラムを実行して比較を行いました。

(8 本実行することが可能ですが I/O ネックがおこりエクスプローラも立ち上がらず Ctrl_C 等のキー入力も効かなくなりました)

以下に 6 本実行したときの 1 本あたりの平均計算時間を示します。

比は 1 本のみ PG-1 を 1.0 としたときの値です。

	時間	秒	比	比/6
PG-1	4 時間 52 分	17536	1.44	0.24
PG-2	5 時間 0 分	18007	1.48	0.25
PG-3	4 時間 26 分	15984	1.32	0.22

比/6 からわかるようにこの PC で 6 本の同時実行を行うと実質の計算速度は 1 ケースずつ実行するよりも 4 倍程度速くなります。

PG-4 は並列処理オプションが付いているので単体で実行したときもほぼ 100% の CPU を使ってしまう。6 本実行すると数十時間かかり 2 本でも 4 時間程度かかり、複数ケースの同時実行には適しません。

5. まとめ

ソースコードを改良することにより 10% 程度ではあるが計算の高速化が図れました。ただし、今回の 1 次元化では I 方向の連続アクセスができる 1 次元配列としており J 方向が先に回るループでは連続アクセスとなっていません。これらの点を踏まえてさらにソースコードを改良する余地があります。

また、複数のケースを計算するには現在のマルチコアのパソコンでは同時実行をすることにより計算時間の短縮が図れます。

プログラムの改良と計算機の能力を活用することにより計算時間のさらなる短縮が図れるものと考えられます。

2-2 GPU によるNOWT-PARI の 高速化について



①NOWT-PARIのGPU化

プロメテック・ソフトウェア(株)
川上 浩

目次

1. GPUコンピューティング技術の概要
2. 高速化の目的
3. パフォーマンス結果
4. NOWT-PARIのGPU化による高速化の課題
5. まとめ

GPUコンピューティング技術の概要

「GPUによるシミュレーションの高速化」:

GPUとは、スパコン並みの性能をデスクトップPCで実現することが可能な演算プロセッサ。従来はグラフィック描画用途に用いられていたが、近年は汎用的な計算への活用が始まり、NVIDIA社のTesla、AMD社のFireStreamなど汎用計算用チップが市販され、金融、医療、画像処理などの市場で活用事例が報告されつつある。Intel社のLarrabeeや、AMD社のFusionなどが2009から2010年にかけて市販が開始されており、今後のシミュレーション市場がチップにより持続的かつ飛躍的に発展する可能性がある。

「技術のメリット・デメリット」:

「メリット」

- ・ ハイパフォーマンス
 - ✓ コア数が多い(CPUが4コア程度なのに対し、GPUは~512コア)
 - ✓ 1度に多数の点の計算を実行することが得意
- ・ ローコスト
 - ✓ 1枚数万円程度から。汎用PCに設置可能
 - ✓ 1台の市販PCに複数枚のチップを設置可能
 - ✓ ポーティング・チューニングにより複数枚GPUの演算で超高速演算も可能

「デメリット」

- ・ 現況では、スキルの高いプログラマーが必要
 - ✓ 拡張されたC言語と並列計算等に精通したプログラマーが必要

(参考)

➤ http://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/2_0/docs/NVIDIA_CUDA_Programming_Guide_2.0.pdf

← 今回報告は1枚GPUの計測結果



高速化の目的

NOWT-PARIをCUDAプログラムに書き換えGPUによる計算速度の高速化を図る事により、より実務的な事象の解析が通常PC環境で実現させることを目的とする。

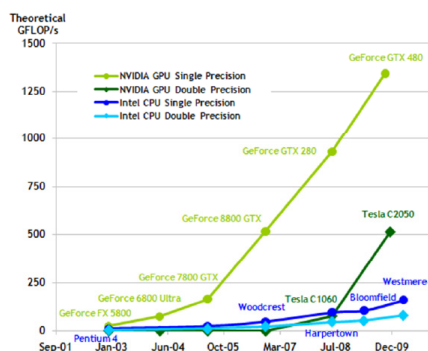
「現状認識」

- ・ 近年、グラフィックボードの浮動小数点演算性能がCPUを遥かに上回り、CPUのアルゴリズムより数倍から数十倍程度高速化されているアルゴリズムが報告されている

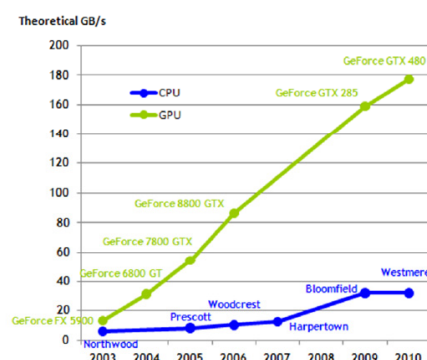
「CPU vs. GPU」

- ・ 浮動小数点演算性能とデータ転送速度の比較

浮動小数点演算性能^{*1}



データ転送速度^{*1}



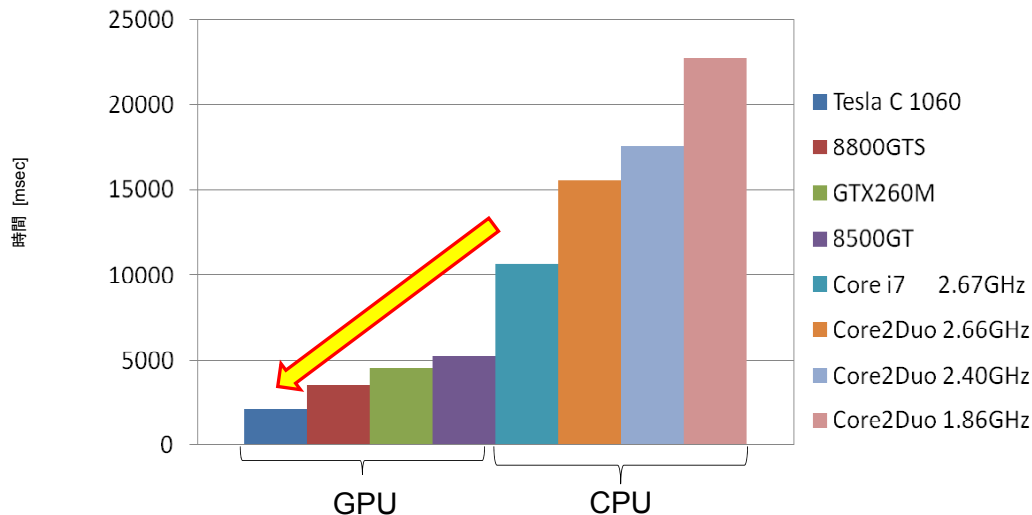
*1 http://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/2_0/docs/NVIDIA_CUDA_Programming_Guide_2.0.pdf



パフォーマンス結果(1)

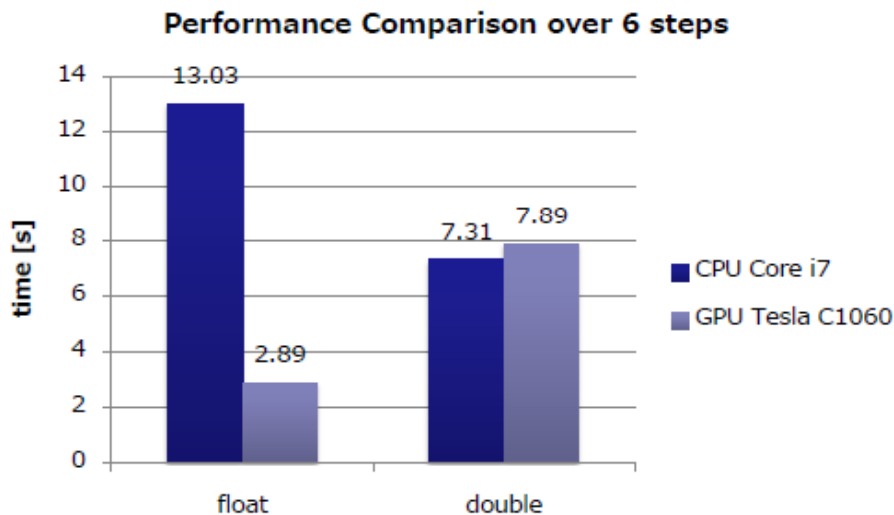
※NDS様ご提供のサンプルデータ
(6タイムステップの計算時間)

NOWT-PARIをCUDAで実装し、GPU(TeslaC1060)が既存CPU(Core2Duo1.86GHz)に対して**約11倍高速**に動作する結果となった。最新のCPU(Intel Core i7)と比較すると**約5倍**の性能となっている。ただし、チューニングの余地はまだ残っており、さらなる高速化の可能性がある。



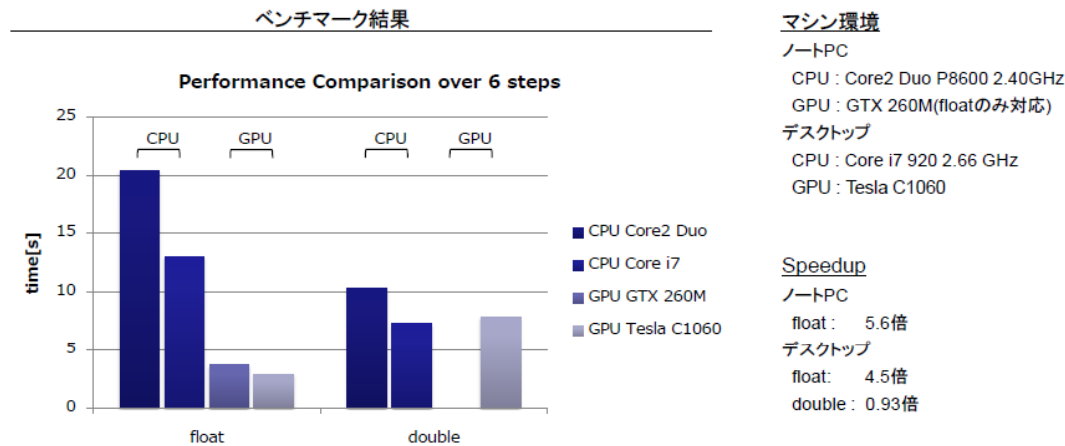
パフォーマンス結果(2)

※NDS様ご提供のサンプルデータ
(6タイムステップの計算時間)





パフォーマンス結果(3) ※NDS様ご提供のサンプルデータ (6タイムステップの計算時間)

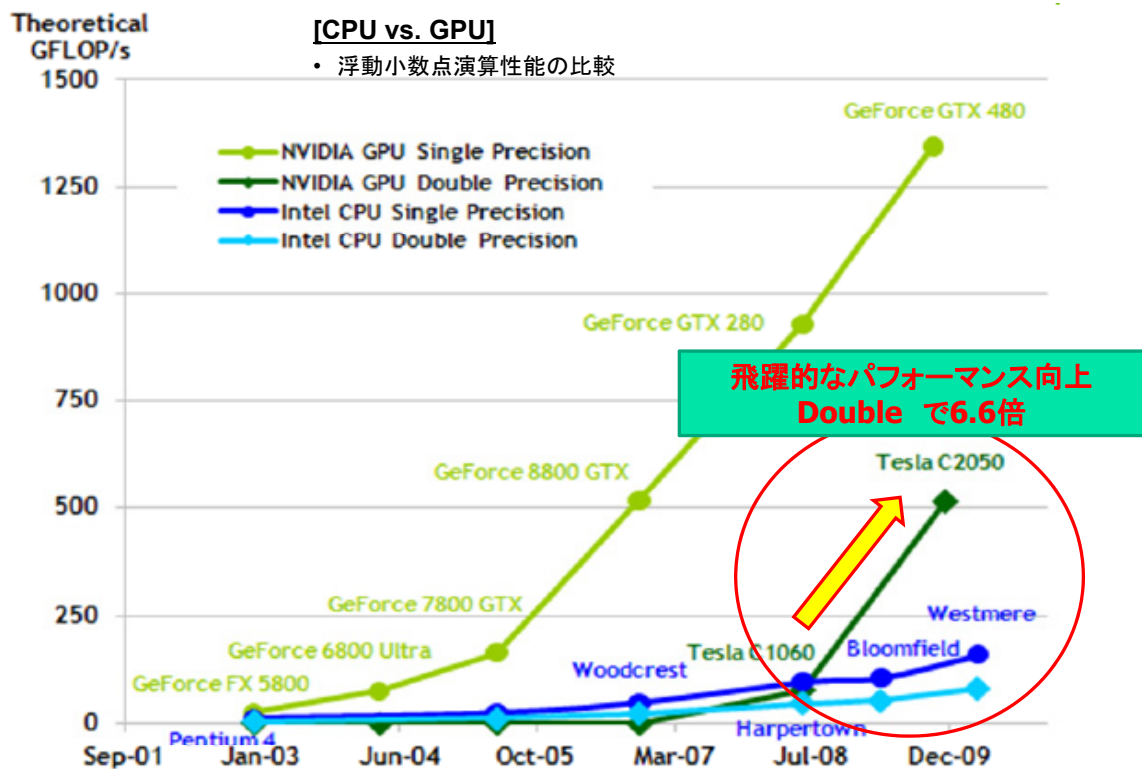


※ CPU計算でdoubleの方がfloatより速くなっていますが、これはfloat版で内部的にfloat->doubleの変換が発生することや、コンパイラの最適化に違いがあることが原因として考えられます。

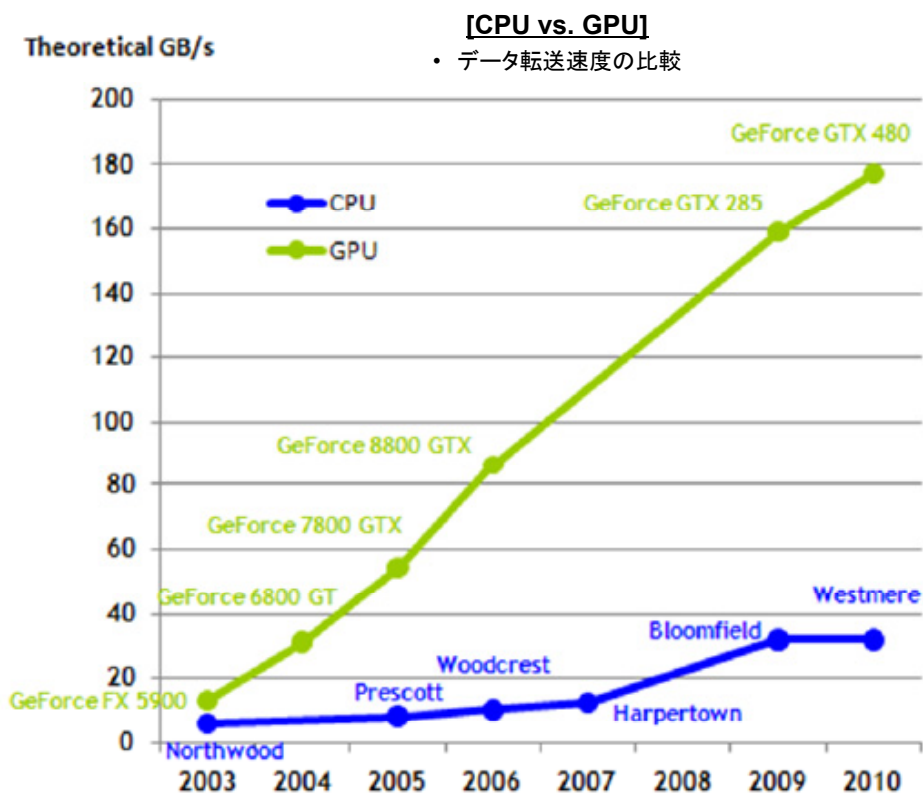


NOWT-PARIのGPU化による高速化の課題

- 倍精度(double精度)の演算が単精度(float精度)程パフォーマンス程に向上が見られない。
 - GPUボードの仕様問題で現在は解決済み
- GPU-CPU間のデータ転送コスト
 - 理想はGPU-CPU間のデータ転送回数を少なくし、一回あたりのデータサイズを小さくする事である。NOWT-PARIでは計算手順の問題から、1部をCPUで処理する必要があり、CPUメモリ-GPUメモリ間でのデータ転送のオーバーヘッドが発生している。
- 条件分岐のコスト
 - NOWT-PARIでは条件分離が多い為、条件分離の苦手なGPUで速度低下が発生している。
- 計算領域のサイズ
 - NOWT-PARIでは計算領域が限定される事が多く、GPUの演算コアを全て使いきれていない可能性がある。



http://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/3_2_prod/toolkit/docs/CUDA_C_Programming_Guide.pdf



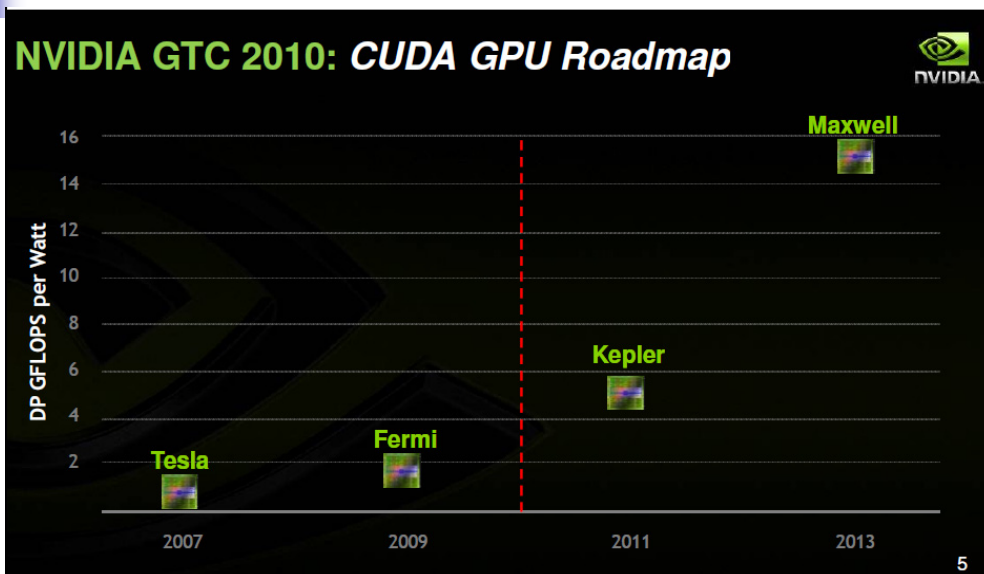
http://developer.download.nvidia.com/compute/cuda/2_0/docs/NVIDIA_CUDA_Programming_Guide_2.0.pdf

GPUコンピューティングボード



日本GPUコンピューティングパートナーシップ <http://www.gdep.jp/page/view/17>

GPUコンピューティングボード



Prometech Techno Forum 秋 NVIDIA様講演配布資料より抜粋

GPUコンピューティングボード

How Tesla GPUs are Deployed in HPC Systems



	Data Center Products		Workstation
	Tesla M205 / M2070 Adapter	Tesla S2050 1U System	Tesla C2050 / C2070 Workstation Board
			
GPUs	1 Tesla GPU	4 Tesla GPUs	1 Tesla GPU
Single Precision	1030 GigaFlops	4120 GigaFlops	1030 GigaFlops
Double Precision	515 GigaFlops	2060 GigaFlops	515 GigaFlops
Memory	3 GB / 6 GB	12 GB (3 GB / GPU)	3 GB / 6 GB
Memory B/W	148 GB/s	148 GB/s	144 GB/s

6

Prometech Techno Forum 秋 NVIDIA様講演配布資料より抜粋

まとめ

- NOWT-PARIはGPU演算する事で、最新CPU演算よりも手軽に高速演算する事が可能になる。
 - GPU演算が可能なPCを導入するだけ。(GPUボードの導入のみ可)
 - GPU開発リリースのロードマップに則して、GPU差替えて自動的に演算スピードUP
 - GPUボードの世代交代は早い
- 【注意】日本データサービス様のチューニングモジュールが必要
- チューニング作業でさらなる高速化も可能となる。
 - GPU-CPU間のデータ転送を少なくする。
 - 条件分岐を避ける。
 - 全てのGPUコアを使用計算できるようにアルゴリズムを変更する。
 - 複数枚GPU対応へのチューニングを施す。

2-2 GPU によるNOWT-PARI の 高速化について



②オリジナルとの比較計算

日本データサービス(株)
袖野宏樹 ○蒔田俊輔 三船修司



目次

1. 検討目的	1
2. モデル地形による比較	2
2.1 計算条件	2
2.2 Case1 風波 陸境界反射率 1.0	3
2.3 Case2 風波 陸境界反射率 0.3	10
2.4 Case3 長周期波 陸境界反射率 1.0	16
2.5 モデル地形による評価	22
3. 実地形による比較	23
3.1 計算条件	23
3.2 計算時間の比較	24
3.3 波高分布・平均流速分布の比較	25
3.4 水位変動・流速変動比較	26
3.5 実地形での評価及び課題	31



1. 検討目的

➤検討目的

GPU化したNOWT-PARIの実務への適用性を判断することを目的に、モデル地形と実地形を対象に波高分布、流速分布及び水位・流速変動をオリジナルとの比較検討を行った。

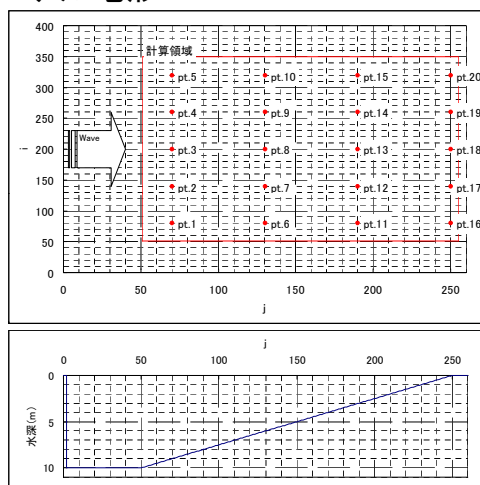
Program	CPU/GPU	RAM	精度
Original版	Opteron 3 GHz	4 GB	Double
CPU版	Xeon 2.4 GHz	4 GB	Double
GPU版	Xeon 2.4 GHz + Tesla C1060	4 GB	Double
CPU版	Xeon 2.4 GHz	4 GB	Float
GPU版	Xeon 2.4 GHz + Tesla C1060	4 GB	Float



2. モデル地形による比較

2.1 計算条件

➤モデル地形



➤計算条件

解析領域	205 × 300 mesh
格子間隔	5 m
計算時間間隔	有義周期/200
波種	風波/長周期波
成分波数	512
方向集中度/パラメータ	25
有義値算出波	300~400
最小水深	1.0 m

➤計算ケース

Case	波種	波高	周期	陸境界反射率
Case 1	風波	3.0 m	8.0 sec	1.0(完全反射)
Case 2	風波	3.0 m	8.0 sec	0.3
Case 3	長周期波	0.1 m	20.0 sec	1.0(完全反射)

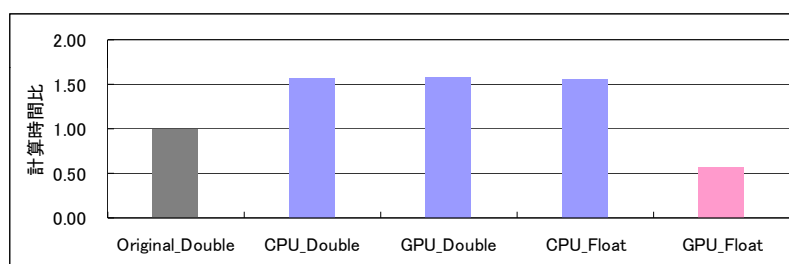
*反射率1.0(完全反射)のCaseは反射率データを設定していないCaseである。

2. モデル地形による比較

2.2 Case 1 風波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤ 計算時間

Program	CPU/GPU	RAM	精度	計算時間	計算時間比
Original版	Opteron 3 GHz	4 GB	Double	5h57m	1.00
CPU版	Xeon 2.4 GHz	4 GB	Double	9h22m	1.57
GPU版	Xeon 2.4 Ghz + Tesla C1060	4 GB	Double	9h25m	1.58
CPU版	Xeon 2.4 GHz	4 GB	Float	9h13m	1.56
GPU版	Xeon 2.4 GHz + Tesla C1060	4 GB	Float	3h23m	0.57

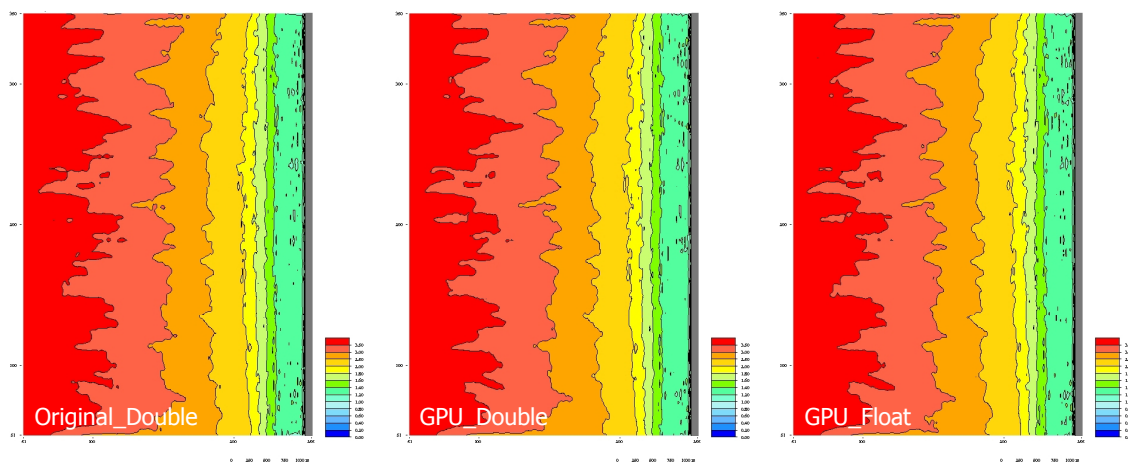


GPU_Floatでは計算時間はOriginalの0.57倍に短縮される

2. モデル地形による比較

2.2 Case 1 風波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤ 波高分布

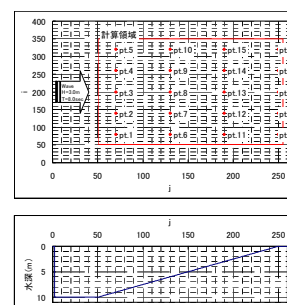
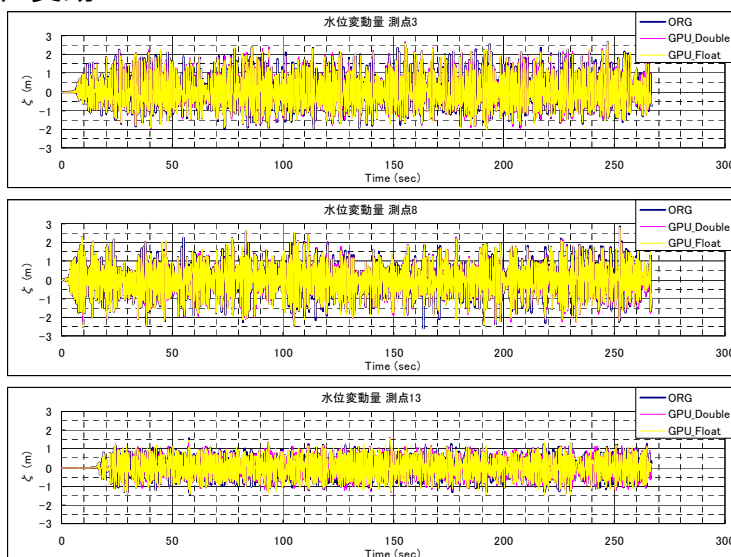


3ケースともほぼ同等の計算結果である

2. モデル地形による比較

2.2 Case 1 風波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤水位変動

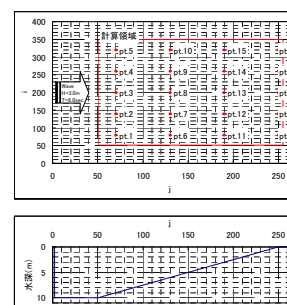
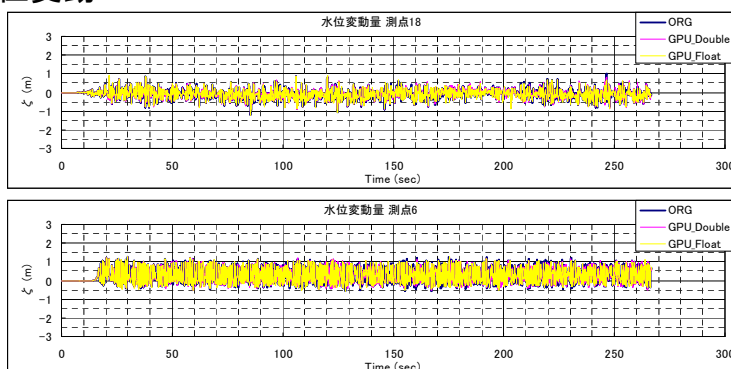


水位変動はほぼ一致している

2. モデル地形による比較

2.2 Case 1 風波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤水位変動

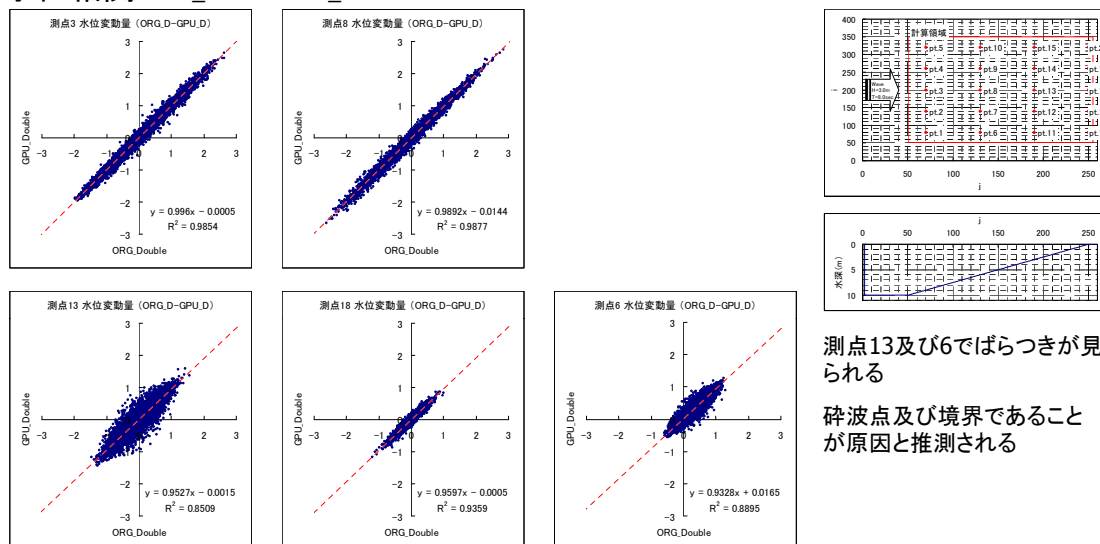


水位変動はほぼ一致している

2. モデル地形による比較

2.2 Case 1 風波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

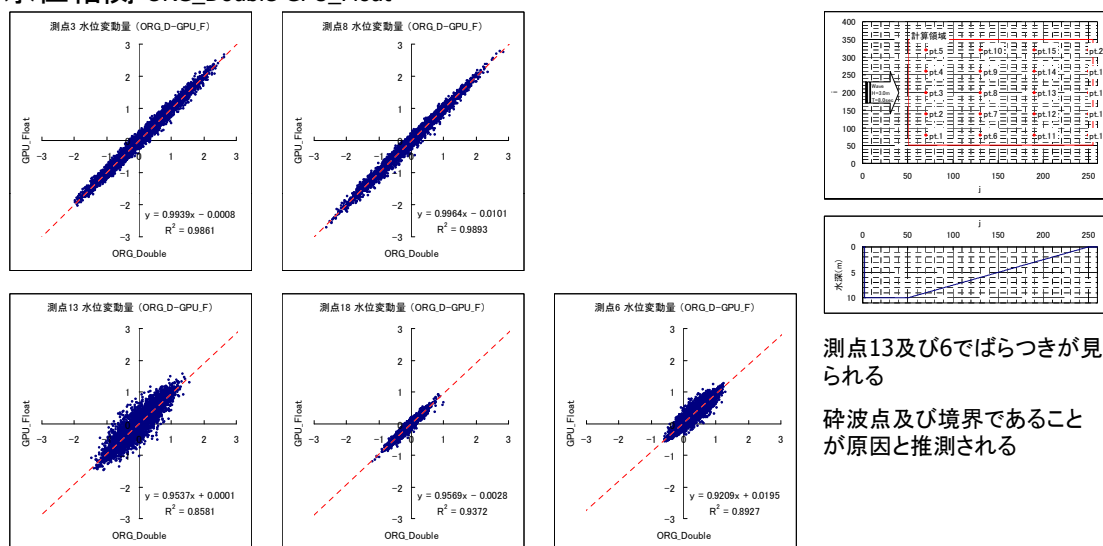
➤水位相関 ORG_Double-GPU_Double



2. モデル地形による比較

2.2 Case 1 風波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤水位相関 ORG_Double-GPU_Float



2. モデル地形による比較

2.2 Case 1 風波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤Originalとの比較

Program	測点	HMax	H1/3	H1/10	rms	相関式	相関係数
Original	3	4.312	3.717	3.208	0.872		
	8	4.646	3.758	3.160	0.826		
	13	2.649	2.263	1.991	0.536		
	18	1.776	1.204	0.930	0.246		
	6	1.652	1.503	1.331	0.393		
GPU_Double	3	4.179 (0.9692)	3.720 (1.0008)	3.231 (1.0072)	0.875 (1.0037)	$y=0.9960x-0.0005$	0.9854
	8	4.727 (1.0173)	3.757 (0.9997)	3.137 (0.9925)	0.823 (0.9961)	$y=0.9892x-0.0144$	0.9877
	13	2.922 (1.1028)	2.329 (1.0289)	2.038 (1.0233)	0.558 (1.0414)	$y=0.9527x-0.0015$	0.8509
	18	1.782 (1.0037)	1.199 (0.9956)	0.922 (0.9922)	0.245 (0.9949)	$y=0.9597x-0.0005$	0.9359
	6	1.511 (0.9149)	1.431 (0.9524)	1.292 (0.9709)	0.385 (0.978)	$y=0.9328x+0.0165$	0.8895
GPU_Float	3	4.286 (0.9938)	3.728 (1.0030)	3.213 (1.0014)	0.874 (1.0019)	$y=0.9939x-0.0008$	0.9861
	8	4.776 (1.0279)	3.766 (1.0020)	3.142 (0.9943)	0.828 (1.0027)	$y=0.9964x-0.0101$	0.9893
	13	2.842 (1.0728)	2.355 (1.0406)	2.065 (1.0372)	0.555 (1.0351)	$y=0.9537x+0.0001$	0.8581
	18	1.754 (0.9881)	1.197 (0.9941)	0.936 (1.0073)	0.243 (0.9852)	$y=0.9569x-0.0028$	0.9372
	6	1.627 (0.9847)	1.420 (0.9446)	1.280 (0.9614)	0.377 (0.9582)	$y=0.9209x+0.0195$	0.8927

*括弧内は対Original比 赤字:最大 青字:最小

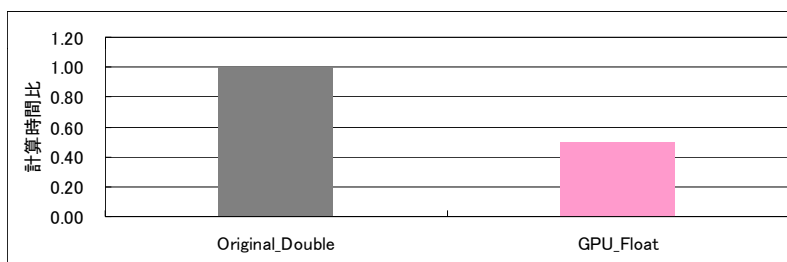
*赤字:0.9以下

2. モデル地形による比較

2.3 Case 2 風波 陸境界反射率 0.3

➤計算時間

Program	CPU/GPU	RAM	精度	計算時間	計算時間比
Original版	Opteron 3 GHz	4 GB	Double	6 h 44 m	1.00
GPU版	Xeon 2.4 GHz + Tesla C1060	4 GB	Float	3 h 19 m	0.49

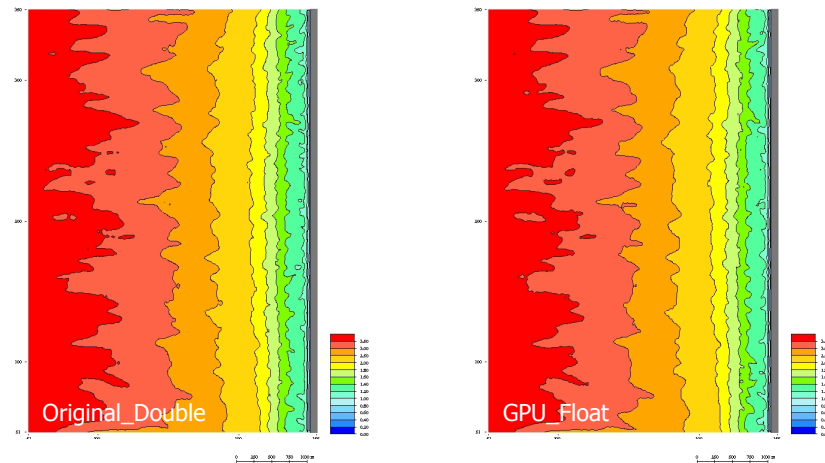


GPU_Floatでは計算時間はOriginalの0.49倍に短縮される

2. モデル地形による比較

2.3 Case 2 風波 陸境界反射率 0.3

➤波高分布

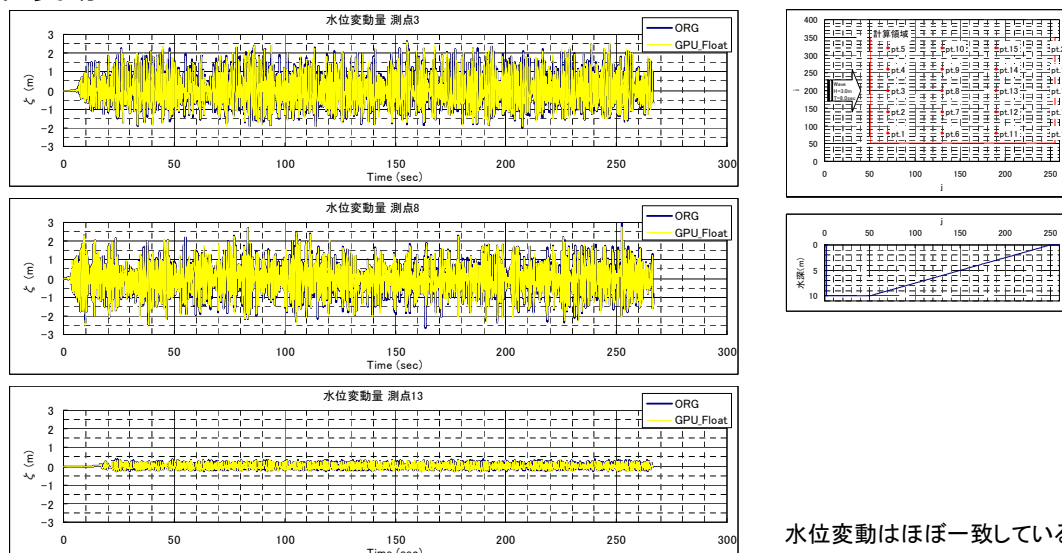


ほぼ同等の計算結果である

2. モデル地形による比較

2.3 Case 2 風波 陸境界反射率 0.3

➤水位変動

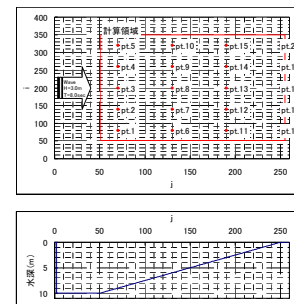
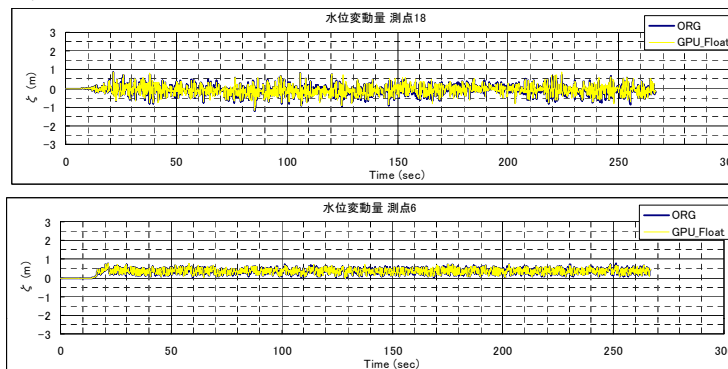


水位変動はほぼ一致している

2. モデル地形による比較

2.3 Case 2 風波 陸境界反射率 0.3

➤水位変動

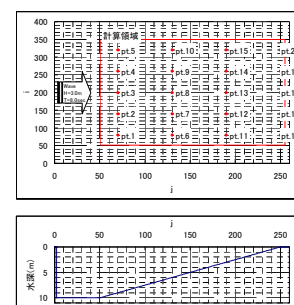
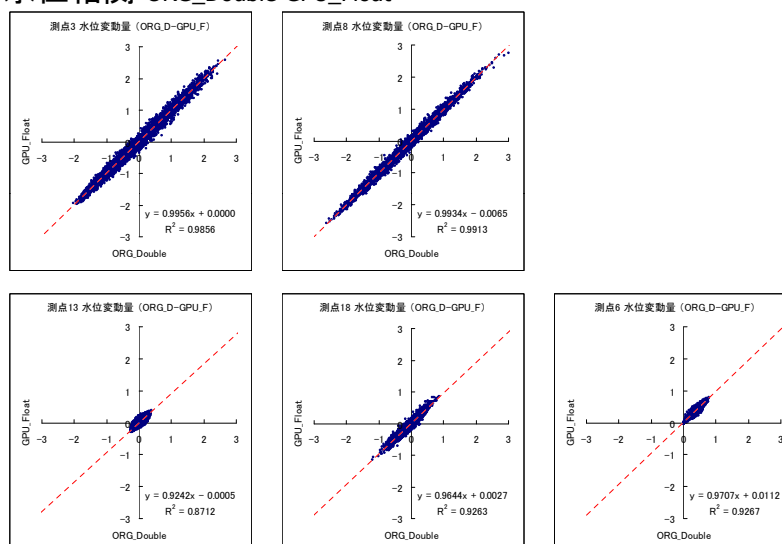


水位変動はほぼ一致している

2. モデル地形による比較

2.3 Case 2 風波 陸境界反射率 0.3

➤水位相関 ORG_Double-GPU_Float



測点13でばらつきが見られる

反射率1.0のケースと比較して有意な精度の低下はみられない

2. モデル地形による比較

2.3 Case 2 風波 陸境界反射率 0.3

➤Originalとの比較

Program	測点	HMax	H1/3	H1/10	rms	相関式	相関係数
Original	3	4.184	3.688	3.202	0.869		
	8	4.867	3.771	3.148	0.826		
	13	0.591	0.556	0.516	0.152		
	18	1.751	1.165	0.918	0.243		
	6	0.618	0.549	0.476	0.142		
GPU_Float	3	4.202 (1.0043)	3.730 (1.0113)	3.232 (1.0092)	0.874 (1.0066)	$y=0.9956x-0.0000$	0.9856
	8	4.842 (0.9949)	3.742 (0.9924)	3.127 (0.9934)	0.821 (0.9945)	$y=0.9934x-0.0065$	0.9913
	13	0.609 (1.0298)	0.557 (1.0016)	0.511 (0.9895)	0.150 (0.9866)	$y=0.9242x-0.0005$	0.8712
	18	1.767 (1.0090)	1.201 (1.0309)	0.910 (0.9911)	0.244 (1.0047)	$y=0.9644x+0.0027$	0.9263
	6	0.644 (1.0421)	0.539 (0.9822)	0.473 (0.9948)	0.143 (1.0035)	$y=0.9707x+0.0112$	0.9267

*括弧内は対Original比 赤字:最大 青字:最小

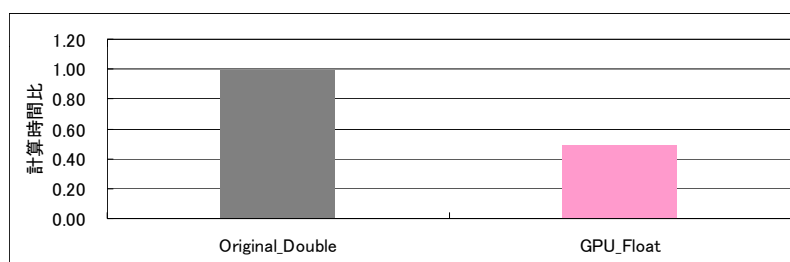
*赤字:0.9以下

2. モデル地形による比較

2.4 Case 3 長周期波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤計算時間

Program	CPU/GPU	RAM	精度	計算時間	計算時間比
Original版	Opteron 3 GHz	4 GB	Double	6 h 41 m	1.00
GPU版	Xeon 2.4 GHz + Tesla C1060	4 GB	Float	3 h 17 m	0.49

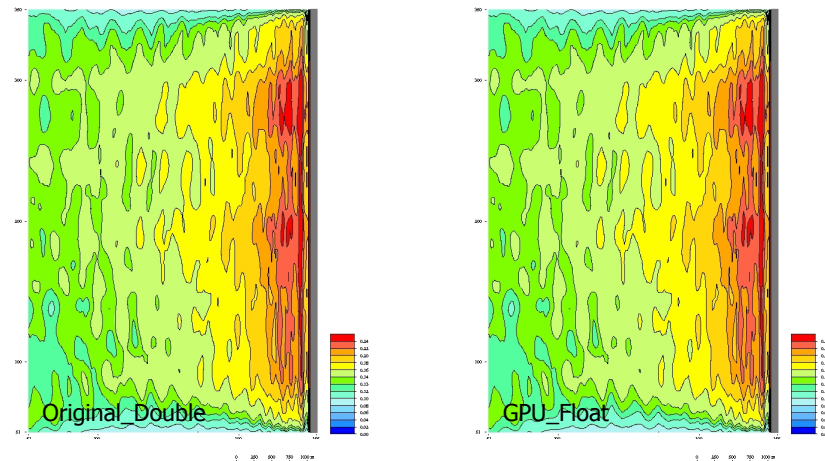


GPU_Floatでは計算時間はOriginalの0.49倍に短縮される

2. モデル地形による比較

2.4 Case 3 長周期波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤波高分布

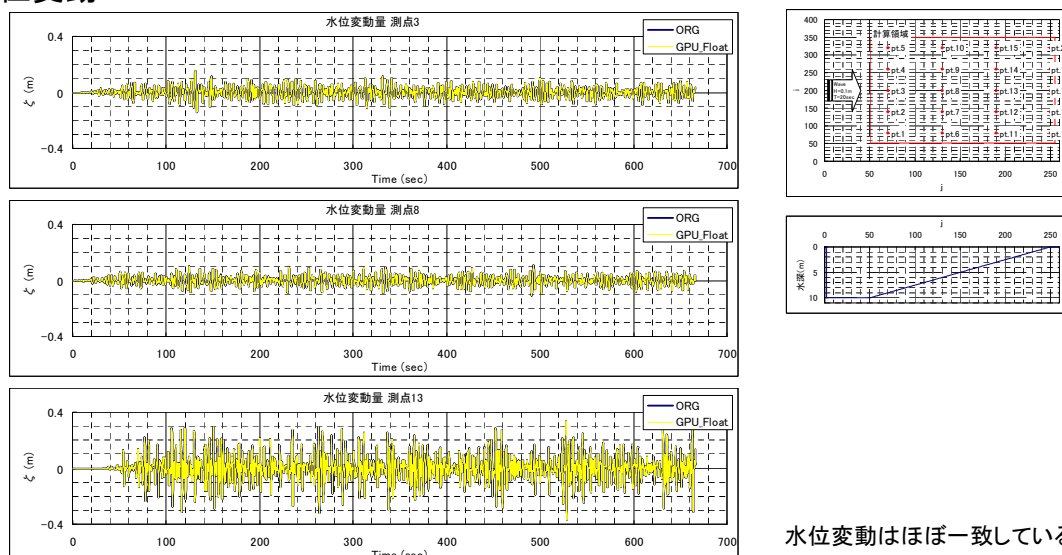


ほぼ同等の計算結果である

2. モデル地形による比較

2.4 Case 3 長周期波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤水位変動

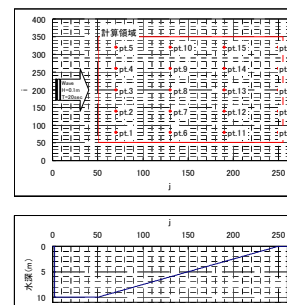
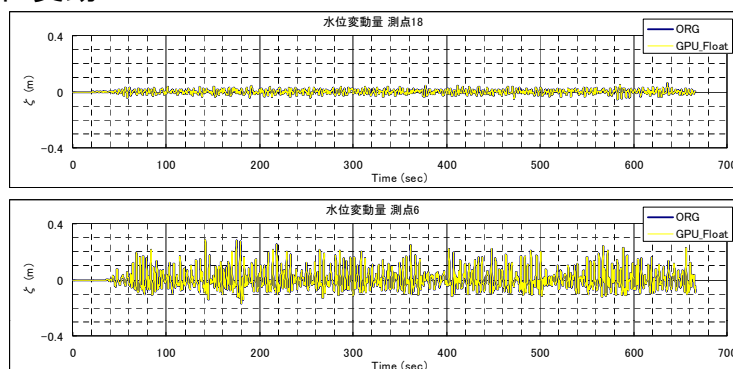


水位変動はほぼ一致している

2. モデル地形による比較

2.4 Case 3 長周期波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤水位変動

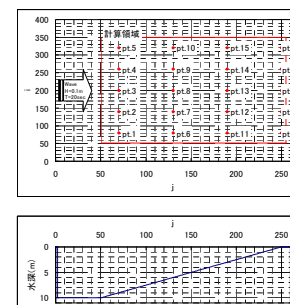
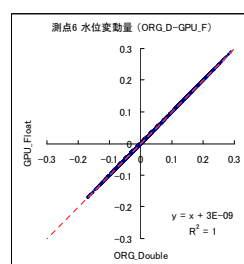
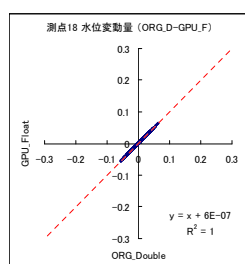
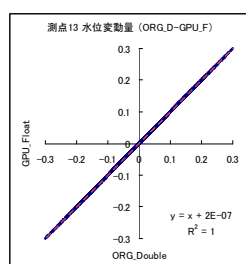
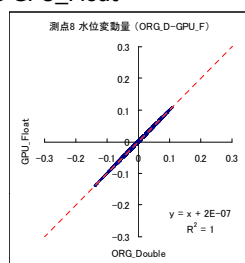
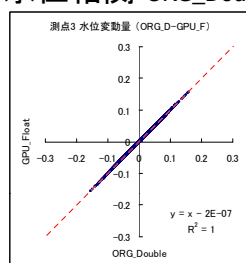


水位変動はほぼ一致している

2. モデル地形による比較

2.4 Case 3 長周期波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤水位相関 ORG_Double-GPU_Float



非常によい相関である

2. モデル地形による比較

2.4 Case 3 長周期波 陸境界反射率 1.0(完全反射)

➤Originalとの比較

Program	測点	HMax	H1/3	H1/10	rms	相関式	相関係数
Original	3	0.26190	0.18583	0.14386	0.03788		
	8	0.23050	0.15754	0.12473	0.03290		
	13	0.76490	0.49756	0.35399	0.08181		
	18	0.10730	0.07389	0.05871	0.01578		
	6	0.43820	0.34028	0.27223	0.06816		
GPU_Float	3	0.26190 (1.0000)	0.18583 (1.0000)	0.14386 (1.0000)	0.03787 (0.9997)	$y=x-2E-07$	1
	8	0.23060 (1.0004)	0.15753 (0.9999)	0.12472 (0.9999)	0.03290 (1.0000)	$y=x+2E-07$	1
	13	0.76490 (1.0000)	0.49754 (1.0000)	0.35398 (1.0000)	0.08180 (0.9999)	$y=x+2E-07$	1
	18	0.10730 (1.0000)	0.07388 (0.9999)	0.05860 (0.9981)	0.01578 (1.0000)	$y=x+6E-07$	1
	6	0.43820 (1.0000)	0.34027 (1.0000)	0.27223 (1.0000)	0.06816 (1.0000)	$y=x+3E-09$	1

*括弧内は対Original比 赤字:最大 青字:最小

*赤字:0.9以下

2. モデル地形による比較

2.5 モデル地形による評価

➤まとめ

1. 計算時間は、CPU_Float、CPU_Double及びGPU_DoubleでOriginalの1.5倍程度、GPU_Floatでは0.5倍程度である。
2. 風波のケースにおいては、複数の測点で水位変動の相関係数が0.9を下回る。原因としては測点位置より、砕波・境界等の影響が予想される。
3. 陸境界反射の設定(スポンジ層の設定)による精度の低下は見られない。
4. 長周期波のケースにおいては、OriginalとGPU_Doubleとの結果に有意な差異は見られない。

➤課題

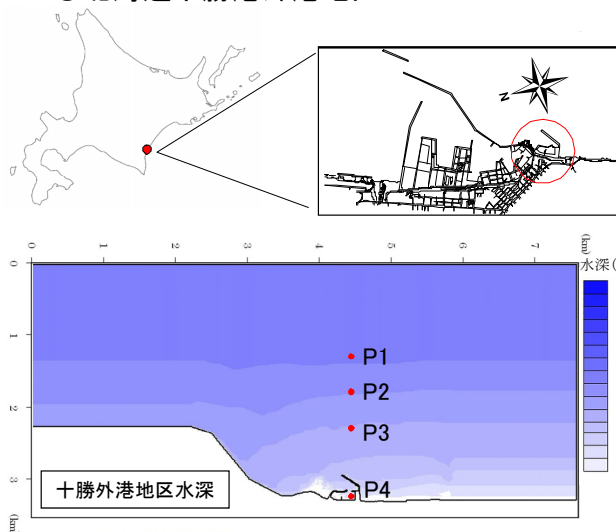
1. 計算時間は、更なる高速化が求められる。ただし、使用したGPUはTesla C1060であり、現行機種Tesla C2050では倍精度でTesla C1060の6.6倍の処理能力がある。
2. 風波で相関が悪くなる原因の究明及び問題の解消が求められる。
3. 陸境界反射の影響は、実地形を対象とした更なる評価が求められる。
4. 長周期波では相関は良いが、実地形を対象とした評価が求められる。

3. 実地形による比較

3.1 計算条件

➤対象海域

○北海道十勝港外港地区



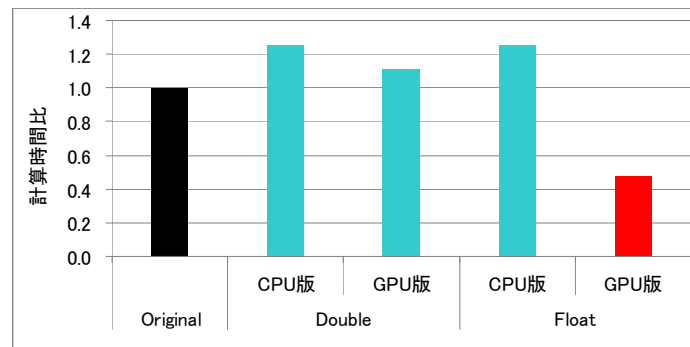
(2) 主要な条件

解析領域	3500m×7580m
モデル領域	2100m×5200m
格子間隔	10.0m
有義波高	0.4m
有義周期	長周期 90.0s
計算時間間隔	有義周期の1/400
スペクトル分布	B-M型
方向集中度	10
有義値算出波	200～300波

3. 実地形による比較

3.2 計算時間の比較

Program	CPU/GPU	RAM	精度	計算時間	計算時間比
Original	Opteron 3GHz	4GB	Double	22h45m	1.0
CPU版	Xeon 2.4GHz	4GB	Double	28h10m	1.25
GPU版	Xeon 2.4GHz+Tesla C1060	4GB	Double	25h46m	1.11
CPU版	Xeon 2.4GHz	4GB	Float	28h40m	1.25
GPU版	Xeon 2.4GHz+Tesla C1060	4GB	Float	10h46m	0.48

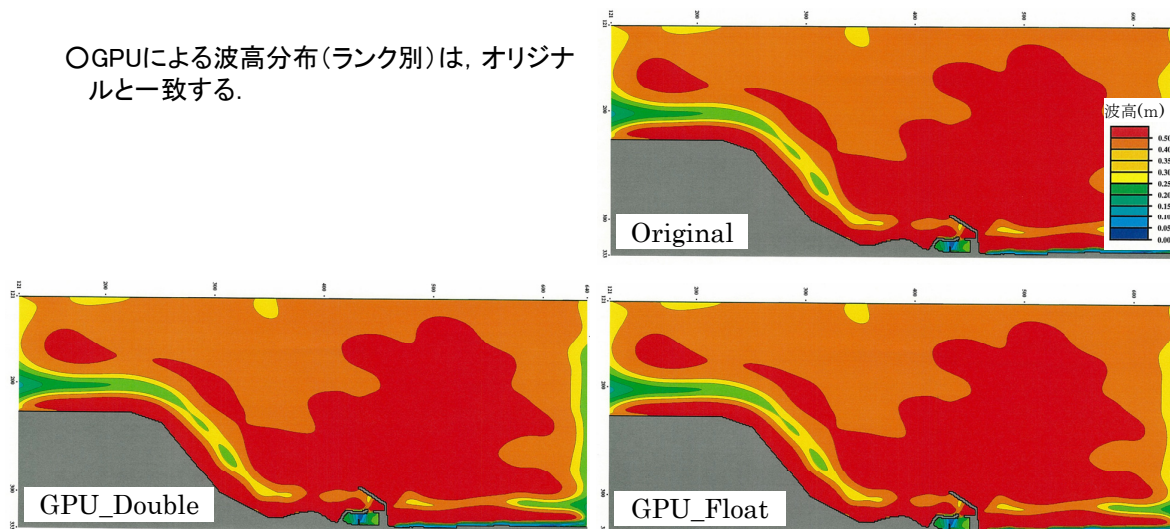


3. 実地形による比較

3.3 波高分布・平均流速分布の比較

➤波高分布比較

○GPUによる波高分布(ランク別)は, オリジナルと一致する.

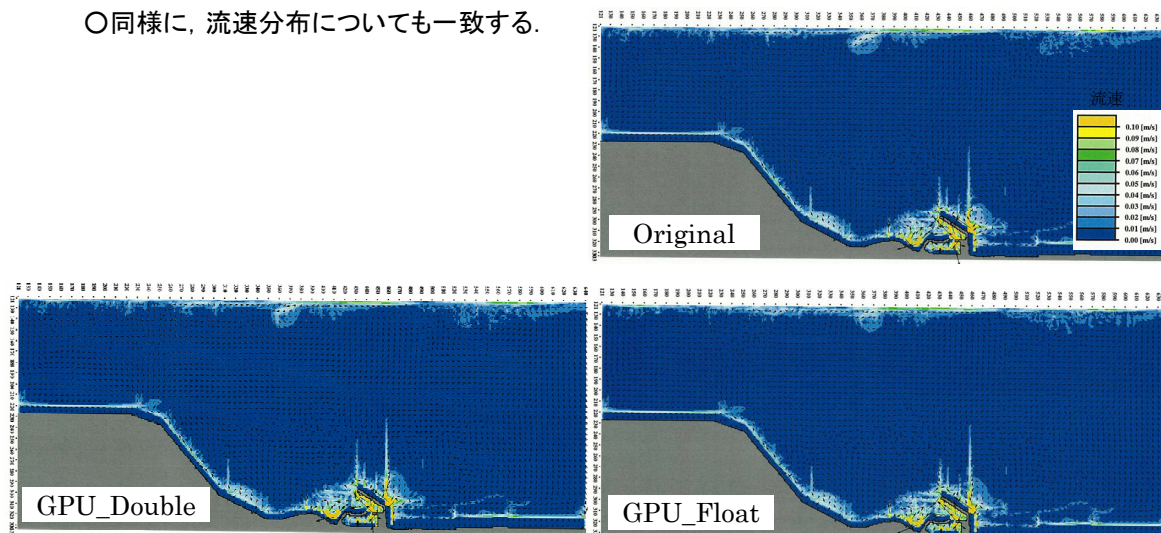


3. 実地形による比較

3.3 波高分布・平均流速分布の比較

➤流速分布比較

○同様に, 流速分布についても一致する.

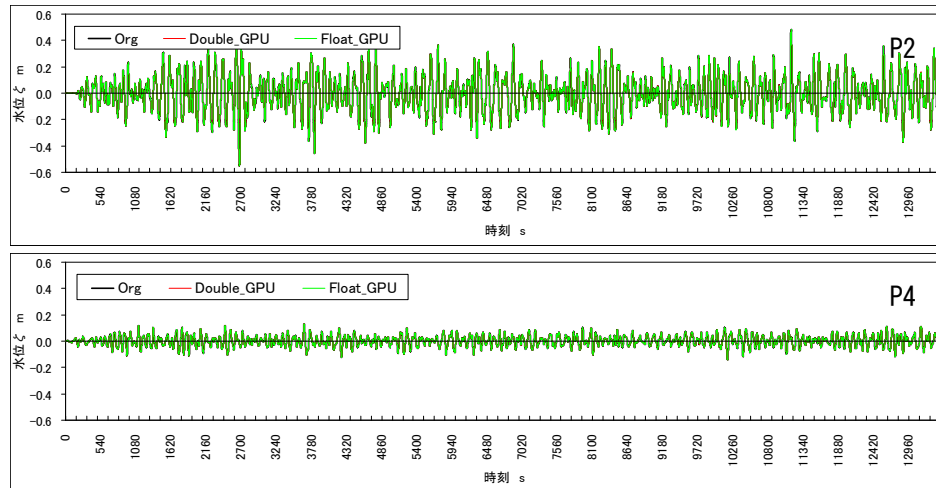
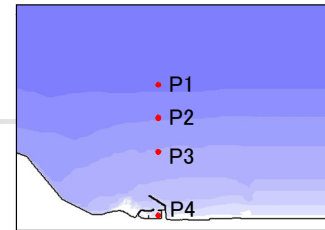


3. 実地形による比較

3.4 水位変動・流速変動比較

➤ 水位変動比較

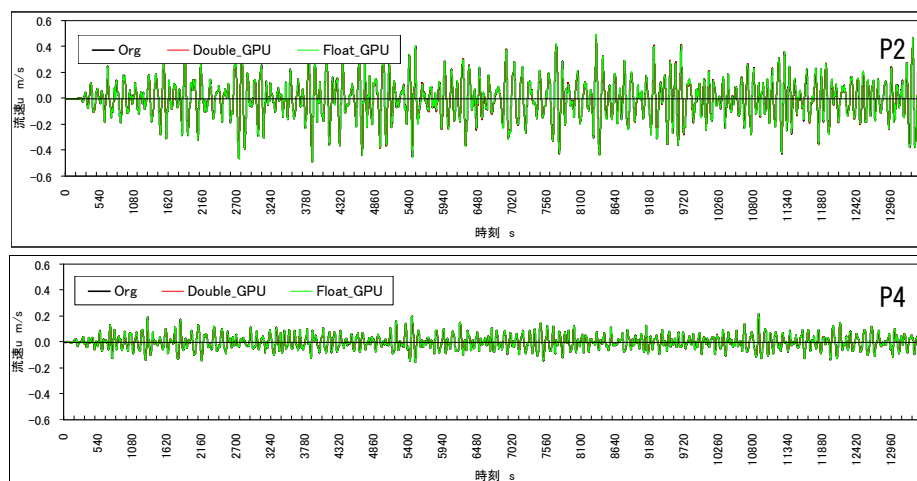
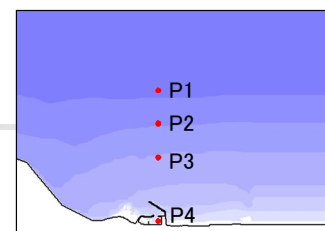
○時間変動もDouble,Floatともに一致する。



3. 実地形による比較

3.4 水位変動・流速変動比較

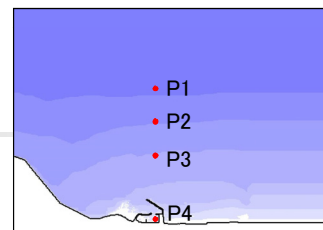
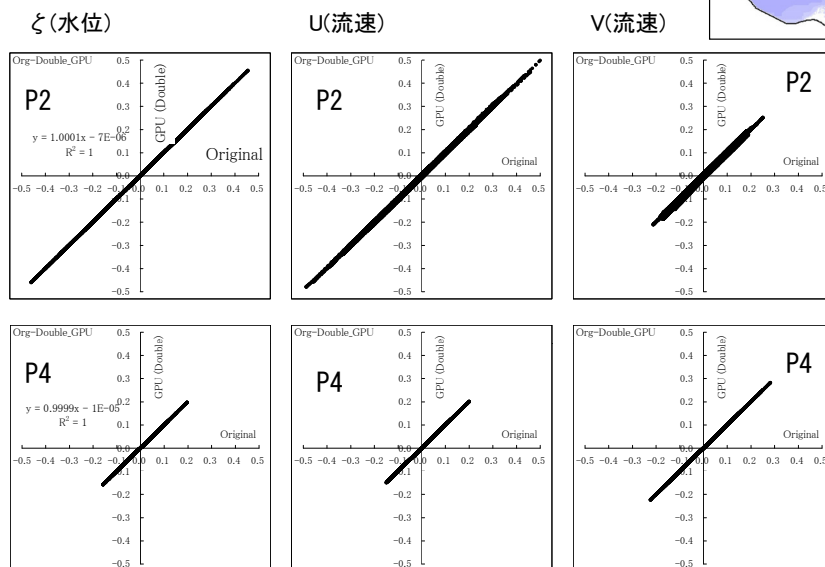
➤ 流速変動比較



3. 実地形による比較

3.4 水位変動・流速変動比較

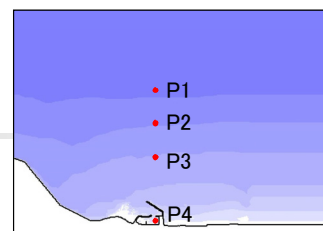
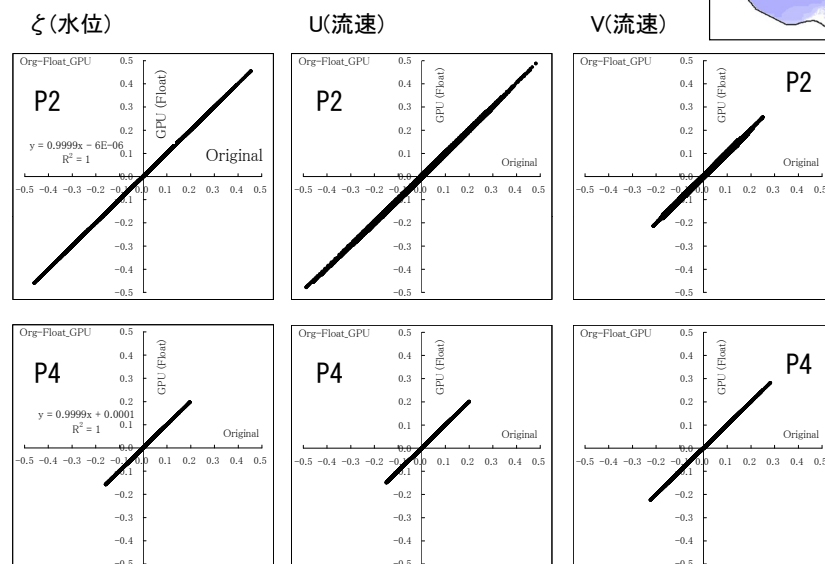
➤ 散布図(Original-Double_GPU)



3. 実地形による比較

3.4 水位変動・流速変動比較

➤ 散布図(Original-Float_GPU)



3.4 水位変動・流速変動比較

➤数値比較

- オリジナルに対する相関式の傾きは、0.99931~1.00537(上表).
○オリジナルに対する統計量の比は、0.9916~1.0169 (下表).

		散布図相関							
		P2				P4			
		相関式	相関係数(R ²)	相関式	相関係数(R ²)	相関式	相関係数(R ²)	相関式	相関係数(R ²)
	ξ	y=1.00006x	1.00000	y=0.99988x	1.00000				
	U	y=1.00063x	0.99928	y=0.99999x	0.99999				
	V	y=1.00353x	0.99657	y=0.99995x	0.99999				
	ζ	y=0.99992x	1.00000	y=1.00014x	0.99998				
	U	y=0.99931x	0.99933	y=1.00003x	1.00000				
	V	y=1.00537x	0.99780	y=0.99940x	0.99867				
		統計量 (内はオリジナルに対する比)							
		P2				P4			
		max	1/10	1/3	rms	max	1/10	1/3	rms
Original	ξ	0.8564	0.70149	0.59177	0.15575	0.331	0.20678	0.15687	0.04326
	U	0.9096	0.72515	0.60982	0.14803	0.3493	0.26752	0.22338	0.0567
	V	0.4628	0.37348	0.32523	0.0849	0.4856	0.38813	0.30252	0.07614
Double-GPU	ξ	0.8556	0.70149	0.59174	0.15576	0.3309	0.20674	0.15685	0.04325
		(0.9991)	(1.0000)	(0.9999)	(1.0001)	(0.9997)	(0.9998)	(0.9999)	(0.9998)
	U	0.9124	0.72448	0.60472	0.14817	0.3492	0.26747	0.22338	0.0567
		(1.0031)	(0.9991)	(0.9916)	(1.0009)	(0.9997)	(0.9998)	(1.0000)	(1.0000)
Double-Float	V	0.4617	0.37777	0.32743	0.08535	0.4857	0.38812	0.30251	0.07613
		(0.9976)	(1.0115)	(1.0068)	(1.0053)	(1.0002)	(1.0000)	(1.0000)	(0.9999)
	ξ	0.8563	0.70141	0.59172	0.15574	0.3309	0.20678	0.15685	0.04325
		(0.9999)	(0.9999)	(0.9999)	(0.9999)	(0.9997)	(1.0000)	(0.9999)	(0.9998)
Double-Float	U	0.9197	0.72603	0.60897	0.14797	0.3491	0.26746	0.22339	0.0567
		(1.0111)	(1.0012)	(1.0002)	(0.9996)	(0.9994)	(0.9998)	(1.0000)	(1.0000)
	V	0.4706	0.37823	0.32816	0.0855	0.4857	0.38816	0.30252	0.07614
		(1.0169)	(1.0127)	(1.0090)	(1.0071)	(1.0002)	(1.0001)	(1.0000)	(1.0000)

3. 実地形による比較

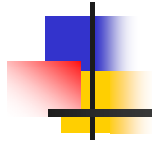
3.5 実地形での評価及び課題

➤評価

1. 本検討では長周期波を入射波とした.
2. オリジナルとGPU化プログラムの計算結果は、波高分布・流速分布および水面・流速変動ともほぼ一致した.
3. オリジナルとの相関式の傾き、および各統計量も一致した.
4. 以上より、長周期波については、実務に適用できると判断される.

➤課題

5. 今後、通常波についても、実務への適用性を検討していく予定である.



NOWT-PARIの基礎と実用性

(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
海洋研究領域 波浪研究チーム

チームリーダー 平山克也

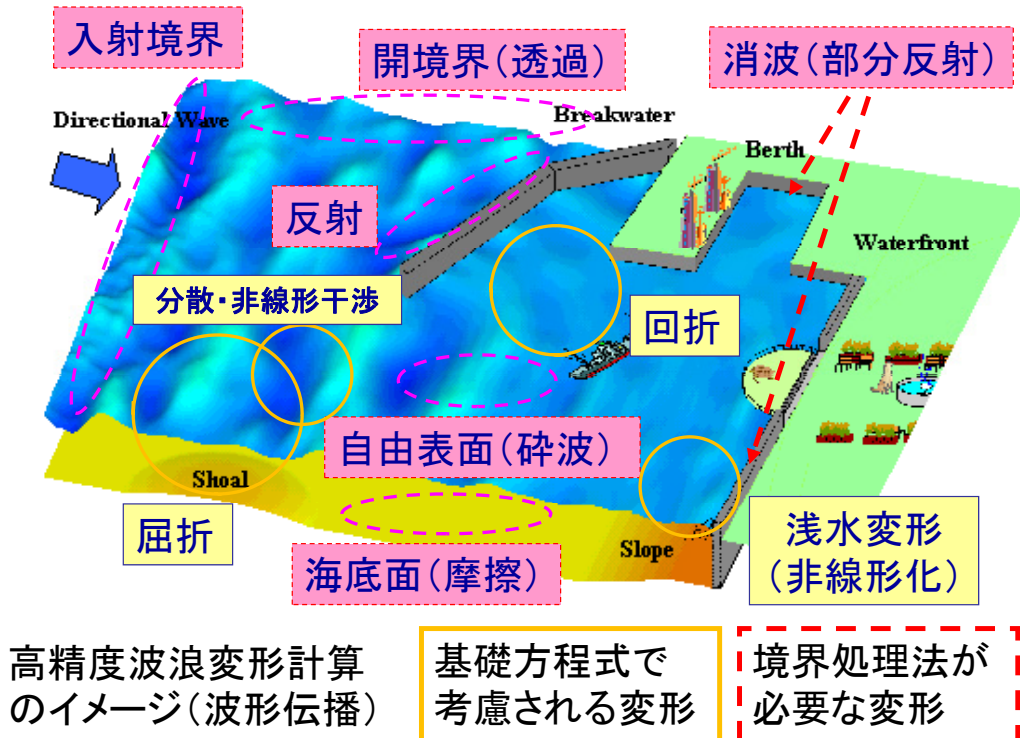


本日の話題

- ブシネスクモデルの適用範囲, NOWT-PARIの位置づけ
- NOWT-PARIの基礎式, 境界処理法
- NOWT-PARIの計算手順, データ入出力時の注意事項

ビジネスモデル“NOWT-PARI”の概要

NOlinear Wave Transformation model by Port and Airport Research Institute



ビジネスモデル“NOWT-PARI”の概要

NOlinear Wave Transformation model by Port and Airport Research Institute

■ NOWT-PARI Ver4.6 (基本プログラム)

- 現地港湾を対象としたとき、**最低限必要な境界処理法**を導入
 - 造波境界・・・吸収造波(線境界入射法)
 - 反射境界・・・完全反射, 無反射・目標反射率(高次スポンジ層)
 - 底面摩擦境界・・・流速の2乗に比例する摩擦抵抗($f=0.02$)
 - 碎波計算・・・流速波速比, 渦動粘性係数(一様勾配斜面を仮定)

■ ビジネス勉強会の開催

- 平成13年度・・・実務への適用性検討会
- 平成14年度・・・第1回ビジネス勉強会
 - **港湾・海岸設計の実務への適用**と普及, 問題点の把握・改善を図る
 - 年1回(2月頃)開催し, **平成22年度(2011/02/04)**で**第9回**を数える
 - 大学・民間企業を中心に, 延べ400名以上の参加者(参加費無料)
 - 参加者・事務局による発表, **プログラムコード(Ver4.6)の配布・更新**
- 平成21年度日本港湾協会技術賞(代表者: 高橋主監)



ビジネスモデル“NOWT-PARI”の概要

NOWT-PARI Ver5.x

- ・ 数年後の汎用化を目標
 - ・ 現在は非公開 (Ver4.6と併存)
 - ・ (独)港空研の受託業務で使用

○平成13年度

- ・ Ver5.1 任意反射境界
 - ・ 透水層を用いて、消波工による反射変形を客観的に再現

○平成15年度

- ・ Ver5.2 砕波・遡上モデル
 - ・ 段波・乱流モデルに基づく砕波
 - ・ 越流公式を応用した波の遡上

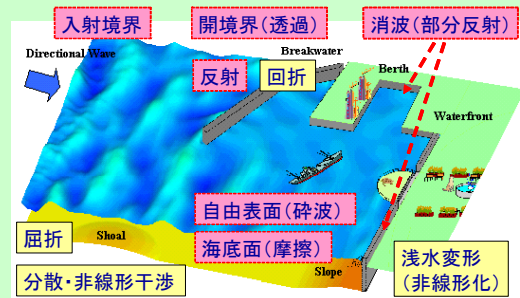
○平成17年度

- ・ Ver5.3 遡上・越波モデル
 - ・ 越流係数 (相対天端高で変化)
 - ・ 短時間越波量の算定

平成21年度国土技術開発賞入賞 (平山・平石)

NOWT-PARIの計算イメージ

港内外の様々な波浪変形を一度に考慮できる (港湾・海岸)



高精度波浪変形計算のイメージ (波形伝播) 基礎方程式で考慮される変形 境界処理法が必要な変形

(消波構造物) (海浜・リーフ等) (防波堤・護岸)

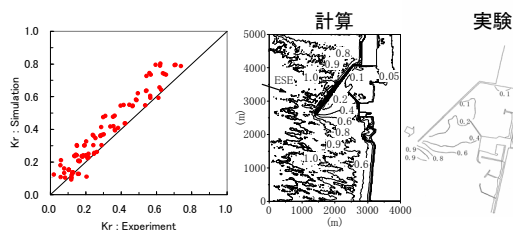
● 部分反射 ● 砕波・遡上 ● 遡上・越波
⇒ 透水層モデル ⇒ 砕波モデル ⇒ 遡上・越波モデル



実務計算へ対応する適用範囲の拡張 ～3つのモデル開発(Ver5.x)～

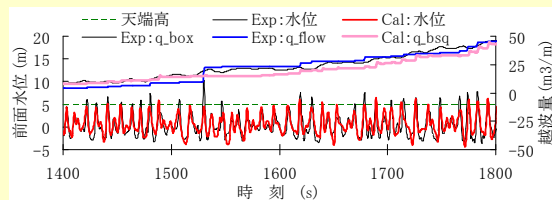
透水層モデル (⇒消波工による反射)

- ・ 消波工による静穏度向上 (事業効果の検証)



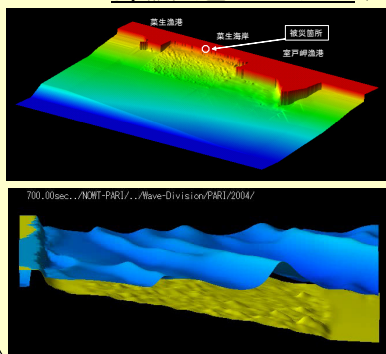
遡上・越波モデル (⇒防波堤・護岸等)

- ・ 防波堤, 護岸上の1波毎の越波量算定
- ・ 親水施設の利用, 海岸防災へ活用できる

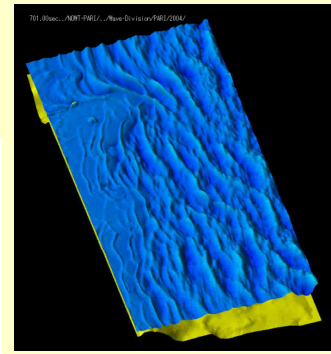
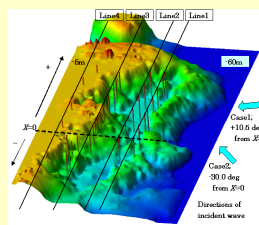


砕波・遡上モデル (⇒海浜・リーフ・岩礁帯等)

- ・ 珊瑚礁や岩礁上に設置される構造物の設計波算定 (設計への活用)



- ・ 被災波の推定 (海岸災害の検証)



初期のブシネスク方程式 (流量flux表示)

■ 連続式 $\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$ 流量flux

$$(P, Q) = \int_{-h}^{\eta} \bar{u} dz = (u(\varepsilon\eta + h), v(\varepsilon\eta + h))$$

■ 運動方程式

■ Abbott et al. (1978)

全水深

$$D = \eta + h$$

非線形項 (移流項)	分散項
$\left\{ \frac{\partial P}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) \right] \right\}$	$= \mu^2 \frac{h^2}{3} \left(\frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right)$
$\left\{ \frac{\partial Q}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \varepsilon \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{D} \right) \right] \right\}$	$= \mu^2 \frac{h^2}{3} \left(\frac{\partial^3 P}{\partial x \partial y \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial y^2 \partial t} \right)$
=0; 線形長波方程式	=0; 非線形長波方程式

- 適用範囲は, $0 < h/L < 0.06$ 程度の浅い海域に限られる.

分散項が補正されたブシネスク方程式

■ 連続式 $\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$

B : 分散特性の補正係数

■ 運動方程式 (Madsen and Sørensen, 1992) ($B=1/15$)

	$\frac{\partial P}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) \right\}$	非線形項
分散項	$= \mu^2 \left[\left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right) + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \right. \\ \left. + h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right) + h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \right]$	
	$\frac{\partial Q}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \varepsilon \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{D} \right) \right\}$	非線形項
分散項	$= \mu^2 \left[\left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 P}{\partial x \partial y \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial y^2 \partial t} \right) + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} \right) \right. \\ \left. + h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right) + h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \right]$	

- 適用範囲は, $0 < h/L < 0.5$ 程度 (最大). 水深変化を考慮.

NOWT-PARIの基礎方程式 (Ver4.6)

Madsen and Sørensen (1992) による式に, 摩擦項, 粘性項を加える

■ 連続式 $\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$

エネルギー減衰項

■ 運動方程式

底面摩擦項

砕波減衰項

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

境界処理法 (開境界・部分反射境界) (Ver4.6)

■ スポンジ層によるエネルギー吸収帯 (構造)

■ エネルギー減衰係数 (Cruzら, 1993)

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

$$F = 2 \sim 3 \text{ 波長}, \quad \sigma_m = \theta \sqrt{g/h}, \quad r = 3, \quad \theta = 1.0$$

■ (低次) エネルギー減衰項

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

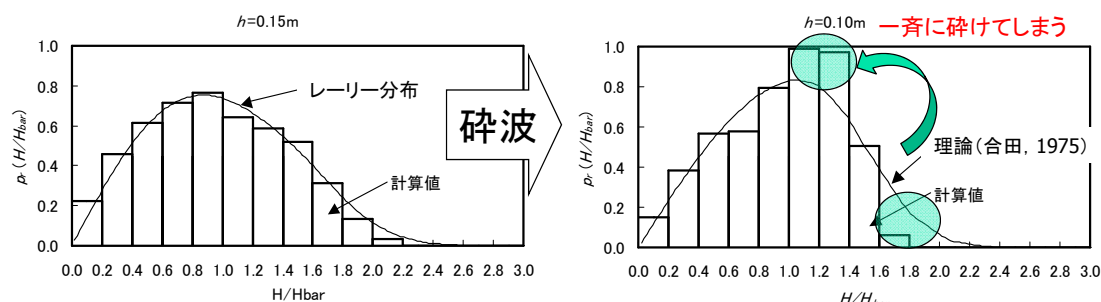


■ (高次) エネルギー減衰項 (平山, 2001)

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

砕波モデルの問題点 (Ver4.6)

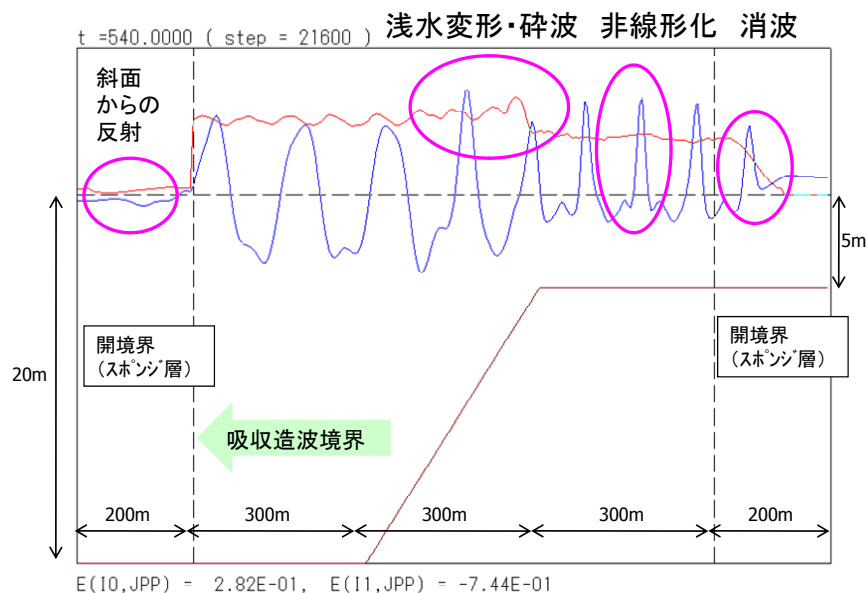
- 砕波モデル(斜面上の砕波のみ適用可)の計算精度
 - 理論値; 砕波波高変化モデル(合田, 1975)



- 新たな砕波モデルの開発(⇒ Ver5.2以降で導入済み)
 - 客観的な砕波判定 ⇒ 灘岡ら(1996)による鉛直方向圧力勾配
 - 砕波現象の直接計算 ⇒ 大山・長谷部(2001)による乱流モデル
 - 水深積分型の波動モデルと乱流モデルを組み合わせた砕波計算法
 - 砕波減衰の定量化 ⇒ 平山・平石(2004)による段波・乱流モデル
 - 砕波メカニズムを解析する代わりに、砕波減衰を空間的に捉える

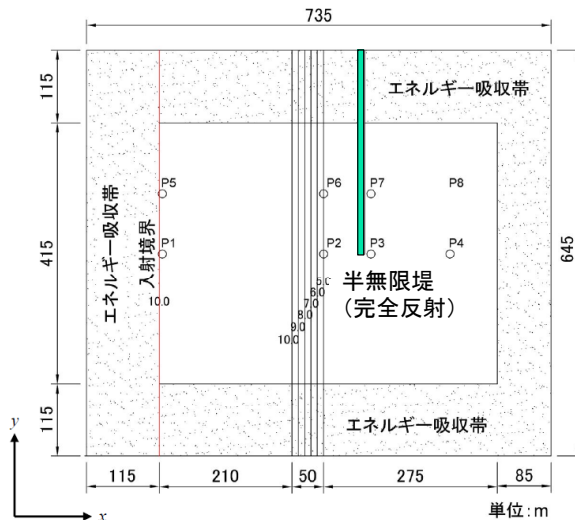
テスト計算 (Ver4.6)

- ステップ地形(一様水深+斜面)上の浅水・砕波変形
 - 造波水深20m, 岸側水深5m, 斜面勾配1/20, 格子間隔5m
 - 入射波(規則波): 波高5m, 周期12s

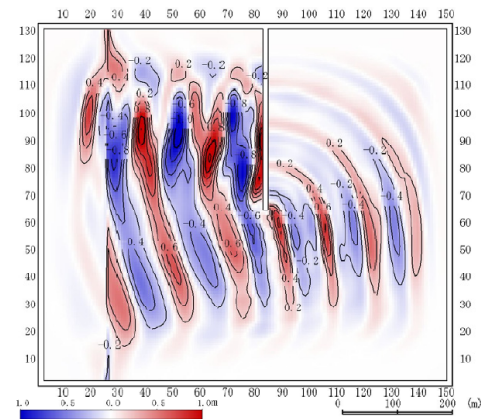


テスト計算 (Ver4.6)

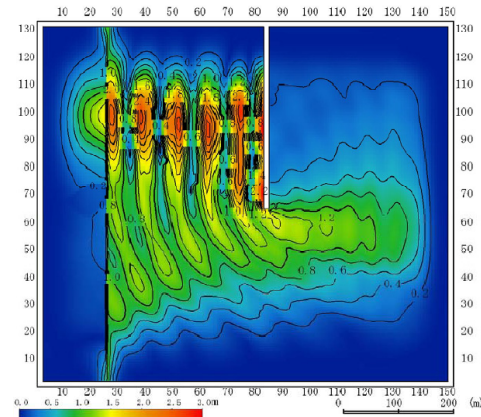
- 半無限堤周辺の回折・反射
 - 造波水深10m, 岸側水深5m, 斜面勾配1/10, 格子間隔5m
 - 入射波(規則波):
 - 波高1m, 周期12s, 波向15度



ある時刻の水面波形



波高分布



これまでのまとめ

- ブシネスク方程式に限らず波動方程式を用いた波浪変形計算法の開発と実用化に向けた取組は、現在も続けられている。
 - (目標)
 - 着目する水理学的な事象をいかに効率的かつ高精度に解くか
 - (観点)
 - 基礎方程式の厳密性
 - 差分計算法, 境界処理法の妥当性
 - 計算実行の容易さ
- NS方程式の直接解法も含め、実海域で生じるすべての水理現象を完全に再現する計算モデルは未だ開発されていない。
 - 例えば, CADMAS-SURFは構造物周辺の複雑な波浪変形を解くことができるが, その計算コストは膨大であり, 港湾全体を対象とすることはできない。
- 計算モデルの研究・開発, 実務計算等への応用に際して,
 - 計算モデルの信頼性と計算に要するコストについて十分に熟知・考慮
 - 課題に応じて, 計算モデルを適切に選択

NOWT-PARIの計算手順

ーデータ入出力時の注意事項ー

独立行政法人 港湾空港技術研究所
海洋・水工部海洋研究領域
波浪研究チームリーダ 平山克也

はじめに

NOWT-PARIによる波浪変形計算の手順

- ・実験模型を用いた造波実験とよく似ている

<実験模型を用いた造波実験>

- (1) 沖波の設定
 - ・設計沖波, 沖波出現頻度の代表波, 等
- (2) 造波する波浪諸元の設定 (エネ法等)
 - ・沖から造波位置までの波浪変形計算
- (3) 模型範囲の設定
 - ・縮尺効果, 有効造波領域, 等を考慮
- (4) 実験模型の設計, 作成, 設置
 - ・海底地形, 防波堤, 護岸, 等の地形
 - ※造波水深 (一定) と地形のすりつけ
 - ※水槽周囲の壁面からの反射抑制
 - ・消波工, 砂浜, 等による反射率調整
 - ・波高計, 流速計, 等の設置
- (5) 造波および計測
 - ・実験条件 (波, 潮位), 計測時間の設定
- (6) 計測データの解析・整理
 - ・統計・スペクトル解析, 描画, 映像, 等

共通

<NOWT-PARIによる数値計算>

- (1) 沖波の設定
 - ・設計沖波, 沖波出現頻度の代表波, 等
- (2) 造波する波浪諸元の設定 (エネ法等)
 - ・沖から造波位置までの波浪変形計算
- (3) 計算領域の設定
 - ・差分間隔, 有効造波領域, 等を考慮
- (4) 計算データの設計, 作成, 入力
 - ・海底地形, 防波堤, 護岸, 等の地形
 - ※造波水深 (一定) と地形のすりつけ
 - ※計算領域の境界からの反射抑制
 - ・消波工, 砂浜, 等による反射率調整
 - ・出力地点 (波, 流れ, 等) の設置
- (5) 計算および出力
 - ・計算条件 (波, 潮位), 計算時間の設定
- (6) 計算データの解析・整理
 - ・統計・スペクトル解析, 描画, 動画, 等

対応

➤数値計算では, バーチャルな実験水槽で造波実験を行っている (得られる情報量が多い)

はじめに

NOWT-PARIによる波浪変形計算の手順

- 実験模型を用いた造波実験とよく似ている

<実験模型を用いた造波実験>

(3) 模型範囲の設定

- 縮尺効果, 有効造波領域, 等を考慮

・縮尺効果

造波実験ではフルード則を利用. 小さな縮尺では, 水の粘性が無視できなくなる.

・模型縮尺

造波装置の能力(造波可能な波高, 周期)や縮尺効果により, 採用可能な模型縮尺は制約される.

・再現範囲

水槽の大きさと模型縮尺により, 水槽内に再現可能な実海域の範囲は, 自ずから限定される.

対応

<NOWT-PARIによる数値計算>

(3) 計算領域の設定

- 格子分割, 有効造波領域, 等を考慮

・縮尺効果

数値計算では, 実スケールのバーチャル水槽を採用. 水の粘性は考慮していない.

・差分間隔

計算格子幅は対象とする波長の $1/10$ 程度以下, 差分時間は周期の $1/200$ 程度を基本とする. これらは演算時間等に影響.

・再現範囲

計算機的能力(記憶容量, 処理速度)と許容待ち時間により, 水槽内に再現可能な実海域の範囲は自ずから限定される.

➤PCを24時間フル稼働させると, 格子数 500×500 で200波程度の波浪伝播が計算される.

はじめに

NOWT-PARIによる波浪変形計算の手順

- 実験模型を用いた造波実験とよく似ている

<実験模型を用いた造波実験>

(3) 模型範囲の設定

- 縮尺効果, 有効造波領域, 等を考慮

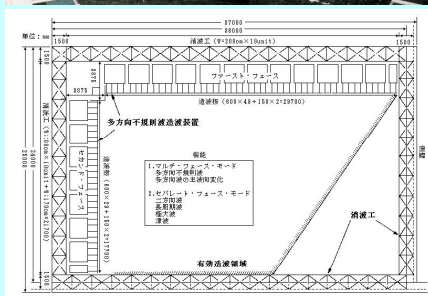
対応

<NOWT-PARIによる数値計算>

(3) 計算領域の設定

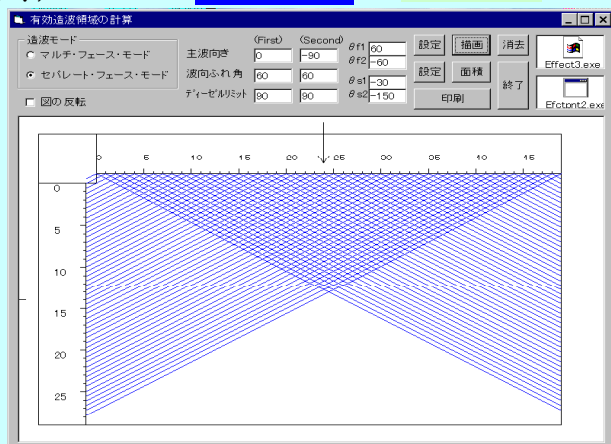
- 格子分割, 有効造波領域, 等を考慮

・有効造波領域(デュアルフェースサーペント)



主波向 0度

Smax=10



➤サーペント水槽と同様に, Smaxが小さいほど, 多方向波の有効造波領域が狭くなる.

はじめに

NOWT-PARIによる波浪変形計算の手順

- 実験模型を用いた造波実験とよく似ている

＜実験模型を用いた造波実験＞

(3) 模型範囲の設定

- 縮尺効果, 有効造波領域, 等を考慮

対応

＜NOWT-PARIによる数値計算＞

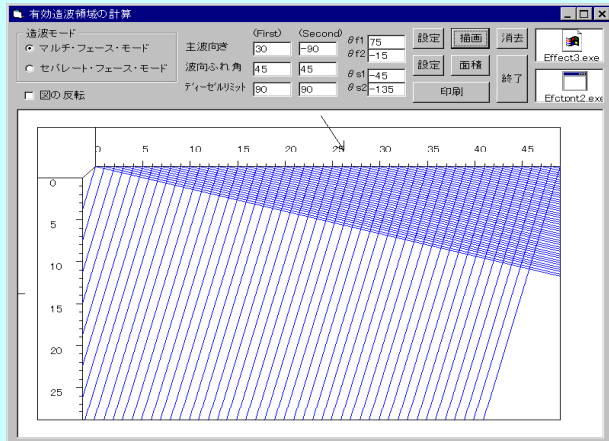
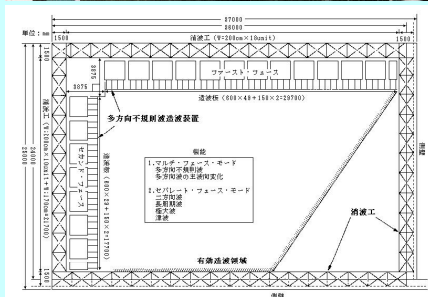
(3) 計算領域の設定

- 格子分割, 有効造波領域, 等を考慮

・有効造波領域 (デュアルフェースサーペント)

主波向 30度

Smax=25



➤サーペント水槽と同様に, 主波向きが傾くほど, 多方向波の有効造波領域が狭くなる。

はじめに

NOWT-PARIによる波浪変形計算の手順

- 実験模型を用いた造波実験とよく似ている

＜実験模型を用いた造波実験＞

(4) 実験模型の設計, 作成, 設置

- 海底地形, 防波堤, 護岸, 等の地形
※造波水深 (一定) と地形のすりつけ
- ※水槽周囲の壁面からの反射抑制
- 消波工, 砂浜, 等による反射率調整
- 波高計, 流速計, 等の設置

対応

＜NOWT-PARIによる数値計算＞

(4) 計算データの設計, 作成, 入力

- 海底地形, 防波堤, 護岸, 等の地形
※造波水深 (一定) と地形のすりつけ
- ※計算領域の境界からの反射抑制
- 消波工, 砂浜, 等による反射率調整
- 出力地点 (波, 流れ, 等) の設置

・模型床

- 水槽床との段差を防ぐため斜面で接続
- 水槽周囲には消波工が備え付けられる

・構造物模型

- 前面に消波ブロック模型等を設置

・計測機器・ビデオ

- 位置とサンプリング間隔の設定

・水深データ

- 造波水深を一定とするため斜面で接続
- 計算領域の周囲にスポンジ層幅を設定

・境界データ

- 前面にスポンジ層パラメータを設定

・時系列・平面データ出力

- 位置とサンプリング間隔の設定

➤数値計算では, 出力地点の設定や出力項目の指定を容易・安価に行える。

はじめに

NOWT-PARIによる波浪変形計算の手順

- 実験模型を用いた造波実験とよく似ている

＜実験模型を用いた造波実験＞

(4) 実験模型の設計, 作成, 設置

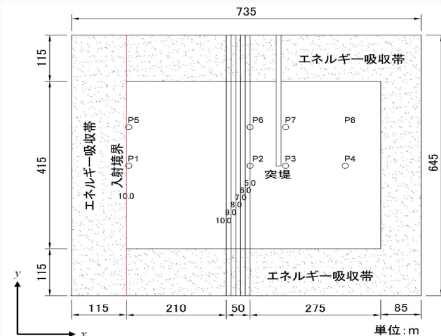
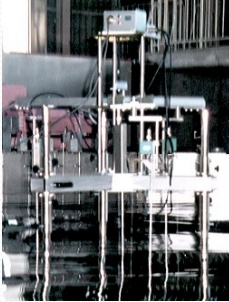
- 海底地形, 防波堤, 護岸, 等の地形
※造波水深(一定)と地形のすりつけ
- ※水槽周囲の壁面からの反射抑制
- 消波工, 砂浜, 等による反射率調整
- 波高計, 流速計, 等の設置

対応

＜NOWT-PARIによる数値計算＞

(4) 計算データの設計, 作成, 入力

- 海底地形, 防波堤, 護岸, 等の地形
※造波水深(一定)と地形のすりつけ
- ※計算領域の境界からの反射抑制
- 消波工, 砂浜, 等による反射率調整
- 出力地点(波, 流れ, 等)の設置



＞数値計算では, 出力地点の設定や出力項目の指定を容易・安価に行える。

はじめに

NOWT-PARIによる波浪変形計算の手順

- 実験模型を用いた造波実験とよく似ている

＜実験模型を用いた造波実験＞

(5) 造波および計測

- 実験条件(波, 潮位), 計測時間の設定

(6) 計測データの解析・整理

- 統計・スペクトル解析, 描画, 映像, 等

対応

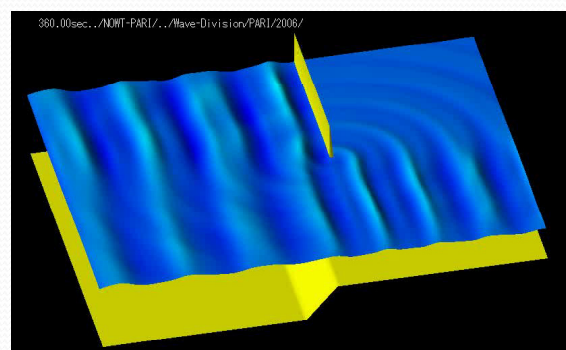
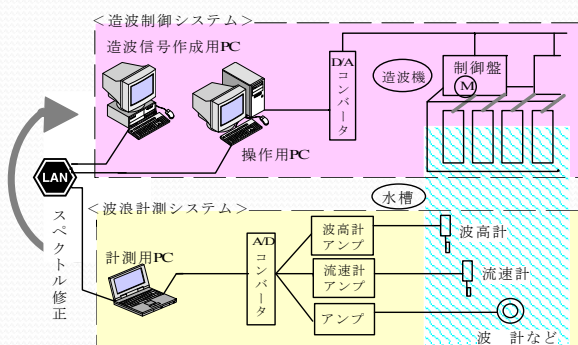
＜NOWT-PARIによる数値計算＞

(5) 計算および出力

- 計算条件(波, 潮位), 計算時間の設定

(6) 計算データの解析・整理

- 統計・スペクトル解析, 描画, 動画, 等



＞数値計算では, 演算時間が計算時間(波浪変形の実時間)より長いことが少なくない。

NOWT-PARIによる波浪変形計算の手順

(5) 計算および出力

・ 計算条件(波, 潮位)の設定

条件	項目	備考
入射波 (方向スペクトルの設定と波形の造波)	有義波高(m)	波形勾配の上限は $H/L=0.04$, 相対水深の上限は $h/L=0.5$ までとする. それ以前に発散する可能性あり
	有義波周期(s)	
	主波向(度)	造波境界に直入射する向きを0度, 反時計回りを正
	Smax	一方向波は, $S_{max}=999$ とする
	成分波数	規則波は1, 不規則波は100~1000程度を目安とする
	成分波の最小周期	周波数スペクトルの周期範囲(最大値)を設定する
潮位	スペクトル型	BS, 修正BSを選択, または成分波を外部入力できる
	潮位(m)	D.L.+om(地形データの基準面)からの潮位
	造波水深(m)	D.L.+om(地形データの基準面)での静水深
海底地形 (計算の安定化に寄与)	底面摩擦係数	標準値は, $f=0.02$
	最小水深(m)	干上がりによる発散を防ぐ. 目安は入射波高程度
	地形平滑回数	急激な水深変化を平滑化する. 目安は3回程度まで

NOWT-PARIによる波浪変形計算の手順

(5) 計算および出力

・ 計算時間の設定

条件	項目	備考
計算時間	緩造波時間(s)	計算開始時に, 入射波の振幅を徐々に増加させる
	収録開始時刻(s)	計算領域内に波が十分伝播するまでに要する時間
	計算終了時刻(s)	収録開始時刻から100~200波程度を目安とする
差分条件	差分時間間隔(s)	有義波周期の $1/100 \sim 1/400$ 程度を目安とする
出力条件	地点出力間隔(s)	代表点の時系列データの出力時間間隔. 必ず差分時間の整数倍でなければならない
	平面出力間隔(s)	平面出力される波浪統計量(平均波高・水位・流速)および各時刻の水位・流速の出力時間間隔. 標準値のゼロでは, これらは計算終了時のみに出力される
	アニメーション出力	動画作成用に, 指定時刻の水位・流速を出力できる

➤ 造波開始からの水面波形が時々刻々と計算されるので, 波待ち時間や統計的に十分な計測時間およびデータサンプリングの設定などには, 模型実験と同様なノウハウを要する.

(6) 計算データの解析・整理

・ 出力結果の種類

出力時刻	項目	備考
指定時刻	水位の平面分布	指定した時刻における瞬間値
	平均水位の平面分布	指定した時刻における瞬間値(トレンド時間まで)
収録開始後の指定した各時刻	平均水位の平面分布	トレンドによる推定値(計算終了時刻まで) 収録時間の平均値(真値)(計算終了時)
	平均流速の平面分布	トレンドによる推定値(計算終了時刻まで) 収録時間の平均値(真値)(計算終了時)
	有義波高①の平面分布	ゼロクロス法による平均波高×係数A ₁ (1.6)
	有義波高②の平面分布	2乗平均水位×係数A ₂ (4.0)
	平均波速ベクトル①	微小振幅波理論を用いた算定法
	平均波速ベクトル②	共分散法
指定した出力時間間隔	代表地点の水位・流速の時系列データ	指定した出力時間間隔での時系列変化(有義波高(真値), スペクトル, 等を解析可能)

NOWT-PARIパッケージ版

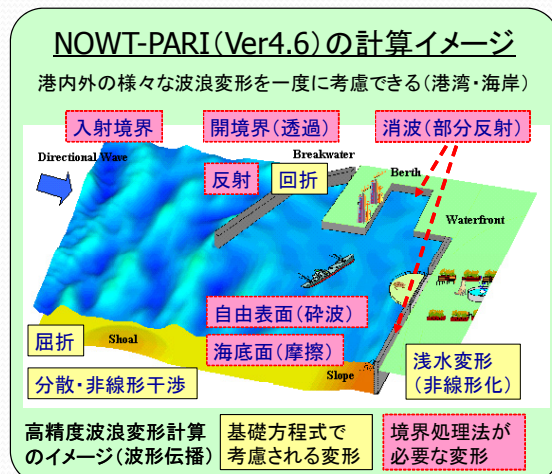
目的

- 独法港空研が開発し、勉強会等を通じてソースコードを公開しているNOWT-PARI(Ver4.6シリーズ)の最新版を対象として、グラフィカルユーザインタフェース(GUI)を整備し、プログラム開発言語に関する知識を有さない使用者でも、NOWT-PARIを用いた港内波浪変形計算を実施できるようにするためのソフトウェアを開発する。

● 全体システム

- 入力データの作成, 編集, 設定
- プログラムの実行
- 出力データの解析, 図化处理
- サンプルデータ(テストラン)

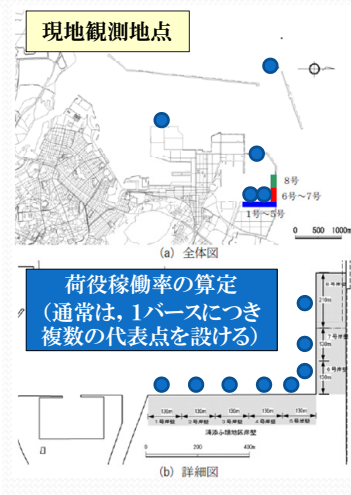
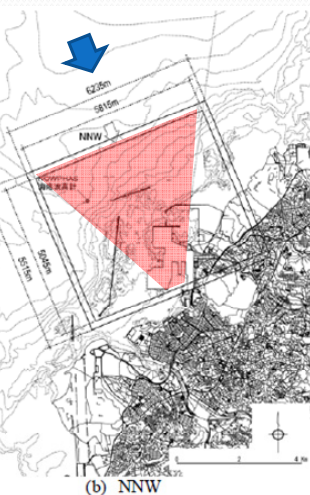
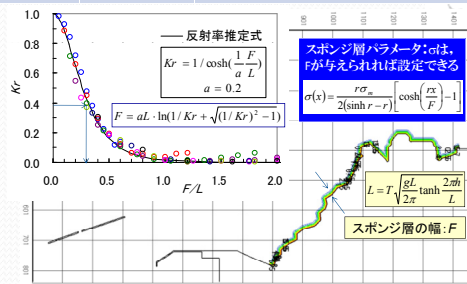
● 使用マニュアル



入力データの作成, 編集, 設定

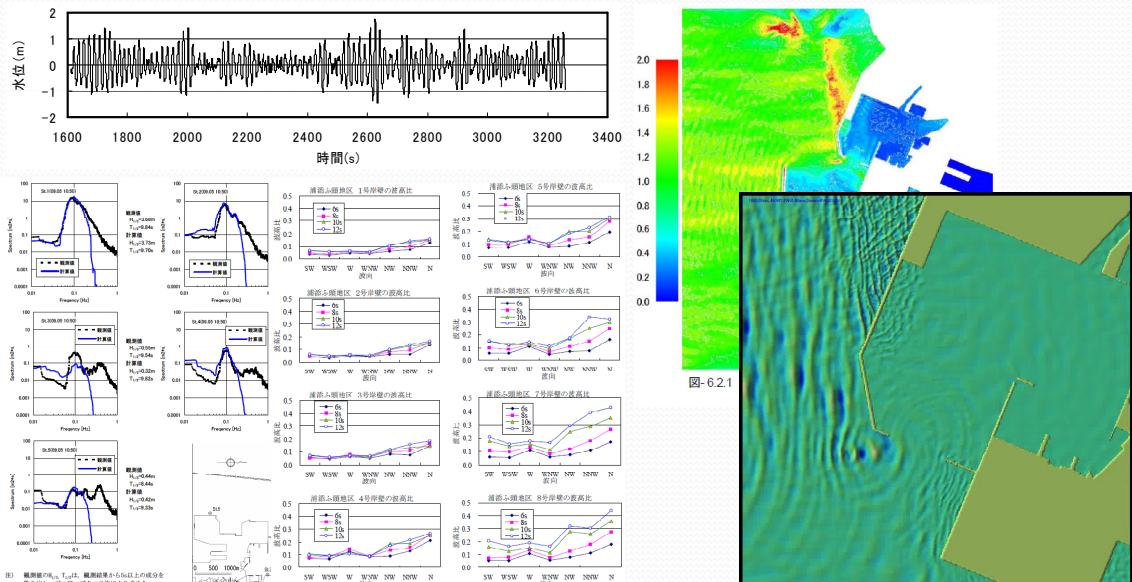
- 計算条件の設定(入射波, 差分条件, 計算時間)
- 水深コンターデータの読み込み(水深データベース等)
- 計算領域の設定・格子データへの変換(編集機能を含む)
- 境界条件データの設定(各施設の反射率等)
- 代表出力点の設定(統計・スペクトル解析を行う時系列データ)

条件	項目	備考
計算時間	緩造波時間(s)	計算開始時に, 入射波の振幅を徐々に増加させる
	収録開始時刻(s)	計算領域内に波が十分に伝播するまでに要する時間
	計算終了時刻(s)	収録開始時刻から100~200波程度を目安とする
差分条件	差分時間間隔(s)	有義波周期の1/100~1/400程度を目安とする
	地点出力間隔(s)	代表点の時系列データの出力時間間隔, 必ず差分時間の整数倍でなければならない
出力条件	平面出力間隔(s)	平面出力される波浪統計量(平均波高・水位・流速)および各時刻の水位・流速の出力時間間隔, 標準値のゼロでは, これらは計算終了時のみに出力される
	アニメーション出力	動画作成用に, 指定時刻の水位・流速を出力できる



出力データの解析, 図化处理

- 平面分布図(波高, 周期, 波向, 平均水位, 平均流速, 等)
- 統計・スペクトル解析(有義波高・周期, 周波数・方向スペクトル)
- 水面波形のアニメーション(数波程度の短時間に限る)



セッション 1 –NOWT-PARI の波浪研究・実務への適用例–

1.1 複数方向スペクトルに対する不規則波形の波浪統計量（岩瀬）

永井：最後の図面を見て感じたことですが、 $H_{1/3}$ と H_{max} の比が 1.4 以下と比較的小さいのは前面で相当波が砕けている影響が出ているものだと思うので、出力するポイントの水深を付けて表示すると良いです。

平山：この検討で使用したバージョンは 5 シリーズであり公開していません。公開版プログラムについては、任意水深には対応していますが、複数スペクトルの入力についてはいずれ公開すると思います。

1.2 うねり性波群に伴う水位の長周期変動の空間分布の算定（加島）

成毛：通常波浪と長周期波浪が同時に変動する様な場合において、反射の制御（エネルギーを吸収する回りの緩衝帯）はどの様に設定していますか？

回答：今回の計算では、長周期変動成分を予め求めています。波浪性の波を与えていますので拘束波が発生します。その拘束波に対応する周期に対してエネルギー吸収帯を設定していますので、周期の長い成分に対しては消えていると考えています。

永井：寄り回り波の委員会に参加していろいろ議論しましたが、現地の越波流量を再現するのにどうも合わなかったことを記憶しています。と言うのも、長周期変動成分がどれくらいあるか分からず、ナウファスの観測地点でもあまり長周期の変動成分が表れていませんでした。今回の計算では、ナウファス観測地点ではどの程度のオーダーの長周期変動成分があったと推定していますか？

回答：この計算では、ナウファス観測地点での合わせ込み等の検証はしておりません。

平山：この計算領域内では田中観測所（河川局）のデータがあるので、そのデータが解析することができれば分かるかと思います。

平山：この計算で進行波の計算の時は護岸を置かずに遡上境界で計算しており、通常の壁を設定するよりは長周期波は反射していないものと考えています。沖側ではスポンジ層が十分に設定してあれば問題ないと思うが、昨年の勉強会でもあったが長周期波を対象としたスポンジ層の設定には十分に注意を払う必要があると思います。

1.3 青森港におけるビジネスモデル（NOWT-PARI Ver. 4.6c5a）を用いた港内反射波対策の検討（峯村）

成毛：この計算では周期 5 秒と言うかなり波長の短い波で $4\text{km} \times 5\text{km}$ の膨大な範囲を計算されて大変だったとは思いますが、周期と言う波に対して 5m メッシュはかなりギリギリ条件で、広い範囲を短い周期で計算するのは苦勞するのですが、何か工夫していることはありますか？

回答：周期 5 秒の波はビジネスの解析ではかなり厳しい条件です。港全体をカバーするような計算をしようとする、多量のメッシュ数が必要となりますし、造波境界からの伝播距離が長くなるので数値減衰による波高減衰が起こることが考えられます。今回の場合は、同じ計算範囲でエネルギー平衡方程式による計算をしており、港口部において同じくらいの波高であることは確認していますので、大きな減衰はあったとは考えていません。

平山：東防波堤の反射対策の長さを変えられているのはどちら側からの長さですか？

回答：根元部分からの長さです。NNW からの反射波が計算で確認できるのは東防波堤までで、その先は波が分散して良く分からない状態ですが、反射の角度から少なくともふ頭へ入ってくる成分があると考えられます。

平山：反射率はどれくらいですか？また、スポンジ層の幅はどれくらいですか？

回答：反射率 0.4 で設定しています。幅は 2 メッシュ程度で約 10m です。

平山：スポンジ層で反射率を設定する場合、特にスポンジ層の幅を沢山付くような時に真っ直ぐ入って来る波の場合は良いが、斜めから波に対して分厚いスポンジ層が付いてしまうと結構減衰する可能性があるかと心配していますが、今回は周期も短いのでスポンジ層の幅も短くその影響は小さいであろうと思います。

回答：計算領域に対して防波堤が斜めにある場合はスポンジ層も斜めに設定するので難しく一定の格子数にはならないので、もう少し精査する必要があると考えています。

セッション 2 —NOWT-PARI 演算の高速化に向けた取り組み—

2.1 2次元配列変数の1次元化による演算の高速化について（松島）

柴木：別のプログラムを1次元化したことがありますあまり変わりませんでした。if 文が do ループの中に入っているとベクトル化ができないのではないかと？

回答：if 文が入っていてベクトル化ができないと言うことはありません。ただし、ベクトル化されたから必ずしも速くなっているかは分かりませんが、if 文は少ない方が良いと思います。インデックスを利用すれば、ほとんど if 文を利用することがありません。

成毛：1次元配列と2次元配列の自動並列化オプションで比べると2次元配列の方が利きが良いみたいなのですが、その様なことは確認なされていますか？

回答：行っていません。

成毛：実務上は沢山のケースを流したいので PG-3 にあたるものを1つのノードに複数投入する場面が多いと思うので、反映されたら非常に有効であると思います。

平山：このプログラムはお預かりしていますので、試してみたい方がおられましたら事務局までご連絡頂ければ対応致します。

2.2 GPU による NOWT-PARI の高速化について（川上，蒔田）

柴木：風波の時は一致しないとのことですが、碎波のコードの部分で何かあるような感想です。碎波のコードは並列化向きで無い処理をしているはずなので、その辺を見れば改善できるかもしれません。

回答：碎波の部分で非線形性が卓越する様な所で調整が出来ていないのかと想像しております。

平石：確認なのですが、テスト計算では陸側の水深がゼロまでとのことですが、オリジナルのプログラムでは水深がゼロになると止まってしまうので、何処かで水深が確保できるような設定になっていると思いますが、最低水深の設定はどうなっていますか？

回答：確認します。

宮里:今計算しているモデルのソースコードは並列化されているものですか？オプションのみの並列化ですか？ソースコードを並列化するとさらに速くなりますか？

回答：プログラム自体はご提供頂いたものをそのまま利用しています。GPU で並列化がどのように効いてくるかは今後検討します。

岩瀬:今回の計算では長周期波も風波もメッシュの大きさは同じですが、風波の計算でメッシュの大きさを細かくすれば相関は良くなりますか？

回答：メッシュを細かくしたり、タイムステップを短くすれば、より正しい結果にはなると思います。今後詰めてゆく予定です。

松島：計算条件で陸境界反射率 0.0 とありますが、これは完全反射という意味の誤りですか？

回答：スポンジ層を指定しないという意味でした。

松島：計算時間の比較で、オリジナル版は FORTRAN ですが、GPU 版も FORTRAN ですか？

回答：GPU 版は FORTARN ではありません。GPU 版の FORTRAN コンパイラやライブラリーは出し始められています。

松島:計算時間の比較表中で CPU 版に Xeon が掲載されている意味が分からないのですが、CPU 版から見ると GPU 版(Float)は 3 倍近く速くなっているという認識でよろしいでしょうか？

回答：Original 版は UNIX, CPU 版は Windows で使用しているコアが異なります。CPU 版に比べると GPU 版(Float)は 3 倍近く速くなります。

平山:Original 版と CPU 版の実行したプログラムは同じ FORTRAN によるプログラムですか？

回答：同じプログラムです。