

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1337 September 2017

浅海変形後の多方向不規則波の造波とその特性
-水深一定の造波面に沿う複数の方向スペクトルによる造波-

平山 克也
相田 康洋
中村 聡孝

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. デュアルフェースサーペント造波装置の改良	4
2.1 造波装置の改良内容	4
2.2 造波装置の改良効果	6
3. 一様水深場における浅海変形後の多方向不規則波の造波方法	6
3.1 浅海変形後の多方向不規則波の造波手順	7
3.2 エネルギー平衡方程式法 (L048p) の活用	8
4. 一様水深場における浅海変形後の多方向不規則波の造波実験	11
4.1 島防波堤背後の回折波スペクトルの再現性	11
4.2 球面浅瀬背後の屈折波スペクトルの再現性	13
5. まとめ	15
6. おわりに	15
参考文献	15
記号表	15

Generation and Characteristics of Multi-directional Waves in Shallow Water - For Distributed Directional Spectra along Linear Boundary in Constant Depth -

Katsuya HIRAYAMA*

Yasuhiro AIDA**

Akinori NAKAMURA***

Synopsis

Generally, random waves are generated by a serpent-type wave maker for a representative offshore wave spectrum determined with spectral and directional functions. Moreover, its transformation in shallow water are reproduced on a bathymetry model installed in physical, however, its range is restricted with both an area of the wave basin and an applicable model scale considering the scale effect. Therefore, it may be much effective to expand the wave test area in virtual. To do this, the transformed random waves are generated with deformed and spatially distributed directional spectra estimated by using energy balance equation model in this paper.

Though the wave heights and periods generated by the newly installed generation method are little smaller than ones generated by the normal method due to revised target directional spectra, wave diffraction behind a virtual breakwater in offshore can be reproduced without any physical experimental model. Therefore, it is expected that the newly improved wave maker can expand the offshore boundary of test area in virtual, which is restricted due to the size of the physical basin. However, it is difficult to reproduce wave refraction on a virtual spherical shoal because the nonlinear effects in deformed directional spectra estimated by using energy balance equation model must be not considered.

Key Words: serpent-type wave maker, multi-directional wave, shallow water, wave transformation

* Head, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Department

** Researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Department

*** Ex-researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 e-mail:hirayama@pari.go.jp

浅海変形後の多方向不規則波の造波とその特性

－ 水深一定の造波面に沿う複数の方向スペクトルによる造波 －

平山 克也*・相田 康洋**・中村 聡孝***

要 旨

多方向不規則波を対象とした平面模型実験では、実験波がほぼ沖波とみなせる水深で造波し、それ以降の浅海変形は水槽内に設置した海底床模型上で再現される。しかし一方で、実験対象範囲は有限な平面水槽の大きさや縮尺効果等による制約を受ける。そこで本研究では、波浪変形計算により算定された沿岸方向に一樣でない浅海変形後の方向スペクトルを直接造波できるよう既存のサーペント型造波装置を改良した。具体的には、98+2枚の造波板（長辺側69+1枚、短辺側29+1枚、端部の造波板を含む）が設置された全100台の造波機からなる従来の駆動機構はそのままに、1枚で8台の造波機を制御することができる新型制御基板を新たに導入し、同時に造波できる多方向不規則波の成分波数を1000波から2000波に倍増させた。また、造波ソフトウェアにおいては、これらの成分波の構成を各造波機で共有しつつ、各造波板位置で異なる方向スペクトル形状に応じて各成分波の振幅を自在に調整するための機能を新たに開発・導入した。さらに、これらの振幅調整を適切に実施するエネルギー平衡方程式法ベースの支援ソフトウェアを新たに作成し、造波システムの一部として実装した。これらの改良により、実験範囲の縮小による実験コストの削減や模型縮尺の拡大による実験精度の向上が期待される。

そこで、この新たな方法による造波特性を明らかにするために、沖波としての多方向不規則波に加え、造波装置の沖側に仮想的に設けた島防波堤及び球面浅瀬背後でみられる浅海変形後の多方向不規則波を一樣水深場で造波した。その結果、エネルギー平衡方程式法による出力スペクトルを用いる新たな造波法では、従来の造波法に比べ、造波波高及び周期が僅かに小さくなることに留意すべきであるものの、平面水槽内に防波堤模型を設置することなく、港内の回折波の伝播状況を比較的良好に再現できることが確認された。しかしながら、屈折波スペクトルを与えて造波した多方向不規則波は、球面浅瀬背後の波の取れん等の波浪場を必ずしもうまく再現できなかった。この原因はエネルギー平衡方程式法により算定される波浪変形では波の非線形性が考慮されないためと考えられるため、造波面の沖側に仮想的に設置する海底地形は、沖波が非線形変形しない程度までの水深に留めるべきであることが示唆された。なお、造波面で一樣でない造波スペクトルに対する造波検定の効率化・高精度化に関する検討は、今後の課題である。

キーワード：サーペント型造波装置、多方向不規則波、浅海域、波浪変形

* 海洋研究領域 波浪研究グループ長

** 海洋研究領域 波浪研究グループ研究官

*** 元海洋研究領域 波浪研究グループ研究官（現北陸地方整備局 新潟港湾・空港整備事務所）
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:hirayama@pari.go.jp

1. はじめに

大水深域を伝播する多方向不規則波は、ある1つの方向スペクトルに対する成分波セットを互いに異なる位相で同時に造波することにより、その線形重ね合わせとして平面水槽内に再現される。これは、波長が水深に依存しない深海波では近隣の方向スペクトルが空間的に一様とみなせるため、斜め波を造波するために平面水槽内に並べた各造波板（造波面）位置で同じ成分波セットを共有することによる。一方、浅海域では水面波の分散関係に従い水深に応じて波長が変化するため、各地点の方向スペクトル形状及びそれらに対応する各成分波セットには沿岸方向に違いがみられるようになる。したがって、多方向不規則波を対象とした平面模型実験では通常、実験波がほぼ沖波とみなせる水深で造波し、それ以降の浅海変形は水槽内に設置した海底床模型上で生じさせる必要があるが、実験対象範囲と模型縮尺との兼ね合いによっては平面水槽の深さや岸沖方向長さが大きな制約条件となり得る。

そこで本研究では、沿岸方向に一様でない浅海域での方向スペクトルを直接造波できるよう既存の造波装置を改良し、その結果期待される効果や活用方を提案した。また、波浪変形計算におけるスペクトル法と波動モデルとのカップリング法を援用した造波手順を概説するとともに、一様水深場における浅海変形後の多方向不規則波に関する具体的な造波方法とその際の留意点を解説した。さらに、その造波特性について、造波装置の沖側に仮想的に設けた島防波堤及び球面浅瀬背後でみられる多方向不規則波を造波することにより考察した。

2. デュアルフェースサーペント造波装置の改良

平成8年度に導入され、平成9年度から運用を開始した改良前のデュアルフェースサーペント造波装置では、沖の多方向不規則波に加え、主波向が異なる風波とうねりが重畳した二方向波浪や、津波、あるいは、予め指定した場所・時刻に発生する極大波、等の造波機能が新たに導入された（平石ら、1998）。本章では、これらの造波機能はそのまま維持しつつ、新たに追加された浅海変形後の多方向不規則波の造波機能について、それを実現するためのハード・ソフト上の改良点やその支援ツールを紹介するとともに、実海域を対象とした平面模型実験への活用方策やその効果について述べる（平山ら、2016）。

2.1 造波装置の改良内容



写真-2.1 改良後のデュアルフェースサーペント造波装置（写真右奥：水槽脇には制御基板・アンプユニットが並ぶ）

ここでは、平成27年度に導入され運用を開始した改良後のデュアルフェースサーペント型造波装置について、そのハード・ソフト上の改良点、及び造波信号作作用PCに実装された造波ソフトウェアの支援ツールを紹介する。

(1) ハード上の改良点

改良したサーペント型造波装置を写真-2.1に示す。幅0.6m、高さ1.3mの造波板が平面水槽の長辺側（ファーストフェース）に69枚、短辺側（セカンドフェース）に29枚設置され、板の上下で互いにヒンジ結合された部分が全100台の造波機によってそれぞれ前後に駆動するというデュアルフェースサーペント型造波装置の基本構造はそのままに、従来の機能を引き継いだ新型制御基板を新たに導入することにより、同時に造波できる多方向不規則波の成分波数が1000波から2000波に倍増した。また、この新型制御基板は、1枚で最大8台の造波機を制御することができるため、造波機1台につき1枚必要であった旧型制御基板に比べ、設置枚数が従来の1/8程度に削減された。これは、いずれか1枚が故障することによる造波装置全体のシステム障害のリスクを大幅に削減するとともに、この結果コンパクトになった制御基板ユニット（制御基板を収めた箱）を水槽脇のプラットフォーム上に集約して集中的に冷却・防塵対策を行うことを可能とし、特に夏場には高温多湿となり、また海底床模型等の製作・解体時には粉塵対策としてブルーシート等による養生が不可欠な水槽内に比べ、基盤自体の故障リスクを下げることも大いに貢献するものと期待される。

なお、これに伴い、造波機モータのサーボアンプと制御基板との通信距離が増大することによるノイズ混入等のリスクを回避するため、従来は水槽内の造波機上に設

置していた、全100台のサーボアンプを小分けして収めた各アンプユニットもそれぞれ、制御基板ユニットに近接するよう移設した。

(2) ソフト上の改良点

浅海変形後には平面水槽内の造波面に沿って空間分布する、複数の方向スペクトルに対する多方向不規則波を造波する機能を追加するために、波浪変形計算におけるスペクトル法と波動モデルとのone-wayカップリング法(平山ら, 2010)を適用した造波ソフトウェアを新たに開発・導入した。これは、3.1節で概説するように、スペクトル法で算定された各地点の異なる方向スペクトルに対し、これらを構成するすべての成分波を各地点で共有しつつ、それらの振幅は各地点の方向スペクトル形状に応じたゼロ以上の増幅率(振幅調整値)を乗じ調整することにより、地点毎に成分波構成が異なる多方向不規則波の波形を造波面で発生させるものである。したがって、この場合には、ある1つの代表方向スペクトルに対する多方向不規則波を造波する従来の造波法に比べ、より多くの成分波を同時に造波することが必要となるため、この造波法は、成分波数が倍増した新型制御基板の能力を最大限引き出せる機能の1つと言える。

また、同時に造波できる成分波数が倍増したことは、当該造波装置が従来から有している機能のうち、拘束長周期波の造波精度(加島・平山, 2010)をさらに高めることにも寄与するものと期待される。すなわち、静水に対して波群を造波した際には、波群に拘束された長周期波による水位変動を妨げるかのように水槽内で自由波が自然発生する。この自由波を能動的に制御するためには別途、これとは逆位相の波を波群と同時に造波する必要があるが、従来はこのために必要な成分波数を確保するため、本来造波したい波群を構成する成分波数を大幅に制限せざるを得なかった。したがって、波群をより多くの成分波で造波することにより、不要な自由波を打ち消しつつ波群に拘束された長周期波のみをより正確に造波できるようになる。

(3) 造波支援ツールの実装

前項で述べたように、浅海変形後の複数方向スペクトルに対する多方向不規則波の造波においては、各造波機で造波すべき網羅的な成分波リスト及び各造波機で設定すべき各成分波の振幅調整値リストを必要とする。これらは、近隣の方向スペクトルが一樣とみなせる深海域から平面水槽内の造波面位置に相当する沿岸域までの、実海域における波浪変形計算を予め実施して設定しなけれ

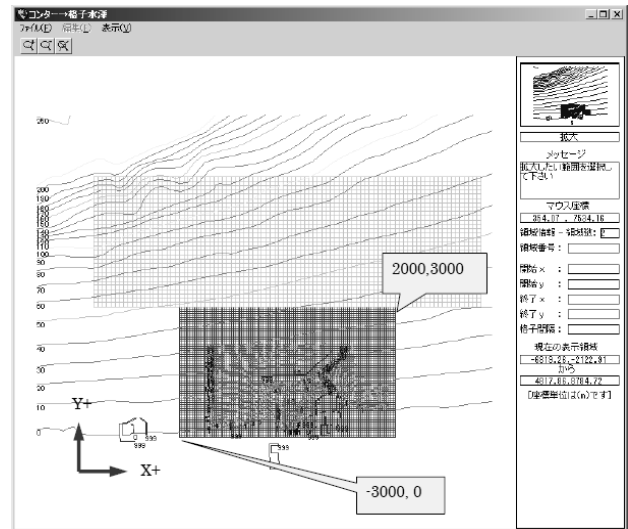
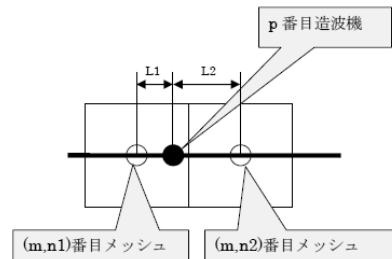


図-2.1 エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算



(a) 水槽内の模型縮尺, 原点位置及び回転角, 等の指定



(b) 水槽内の造波板位置での方向スペクトルの内挿補間

図-2.2 計算格子と水槽内の造波板位置との対応

ばならないが、造波面位置で未だ波の非線形変形が卓越する状況でない限りは、これより沖の波浪変形計算には、(必要に応じて波の回折変形を考慮した)エネルギー平衡方程式法を適用することができる(例えば、間瀬ら, 1999)。そこで、改良後の造波ソフトウェアに対する支援ツールとして、各造波板位置で算定された方向スペクトルに対する成分波・振幅調整値リストを出力する、エネルギー平衡方程式法ベースの支援ソフトウェアを新たに作成し、造波システムの一部として実装することとした。

海図等の水深データを取り込んで実施するエネルギー平衡方程式法による波浪変形計算(図-2.1)には、通常、現地スケールが用いられる。また、算定された浅海変形

後の方向スペクトルは予め指定した任意の計算格子上で出力可能であるが、これらは計算格子サイズに依存して離散的に得られるため、水槽内の各造波板位置との対応を図るためにはそれらの内挿補間を必要とする。そこで、成分波・振幅調整値リストの出力時までには、水槽内に設置された模型の縮尺、計算座標系に対する原点位置と回転角、及び造波板の初期位置（シフト量）を入力（図-2.2(a)）するとともに、出力時には、図-2.2(b)に示す通り、現地スケールに換算された水槽内の各造波板位置を内包する2つの計算格子間で、離隔距離 $L1$, $L2$ による方向スペクトルの重み付き補間を行うこととした。ここで、 p は造波機番号($p=1-100$)、 $(m, n1)$, $(m, n2)$ はエネルギー平衡方程式法による波浪変形計算で設定した最も岸側の計算領域における計算格子番号を示す。なお、各造波機に与える方向スペクトルに対する多方向不規則波は最大2048個の成分波を重ねて造波されるため、出力される成分波リストには2048成分の波高、周期、波向及び初期位相が、振幅調整値リストには100機×2048個の振幅増幅率がそれぞれ記載されることになる。

2.2 造波装置の改良効果

ここでは、今回の造波装置改良により新たに追加された浅海変形後の多方向不規則波の造波機能について、実海域を対象とした平面模型実験への活用方策やその効果と課題について考察する。

(1) 実験範囲の縮小による実験コストの削減

平面模型実験を実施する際には、実験波の造波や実験結果の計測・整理等に要する労力・費用もさることながら、造波した波を水槽内で適切に浅海変形させるための海底床模型の製作・設置及び解体・撤去にも、多くの時間・労力及び費用を必要とする。そこで、造波範囲を実験対象施設周辺に限定した平面模型実験を行うことにより、海底模型床の取り扱いに要する実験コストを最小限に抑えることが可能になると期待される。しかしながら、その際に造波する波は従来に比べより複雑になるため、特に造波検定の精度向上及び効率化をさらに進めることが課題になると考えられる。

(2) 模型縮尺の拡大による実験精度の向上

造波実験に通常多く用いられるフルードの相似則は、造波実験に用いる水の粘性による影響を無視しているため、重力による作用に比べこの影響が無視できなくなるほど小さな模型縮尺を用いた場合には、実際の現象との相似性が保てなくなり、実験精度の低下を招く恐れがあ

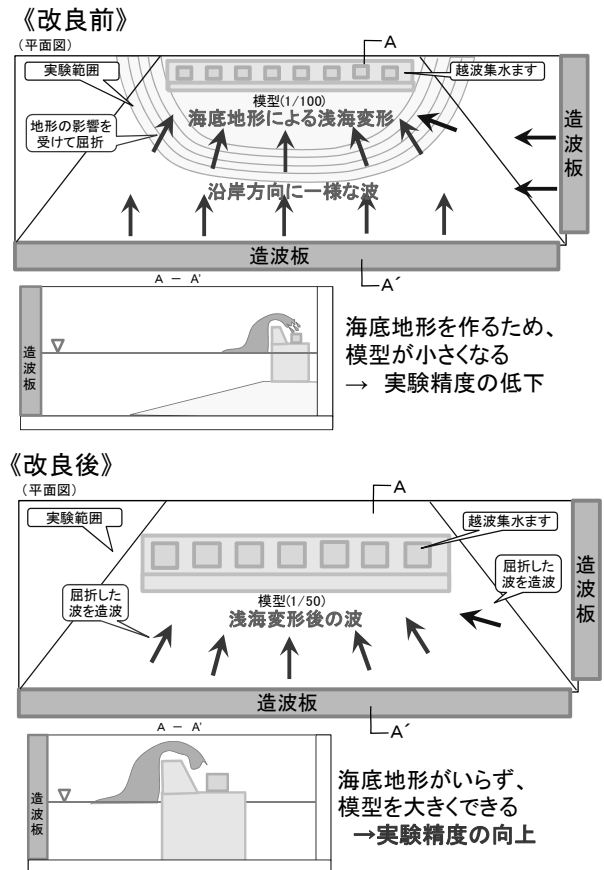


図-2.3 デュアルフェースサーペント造波装置の改良効果

る。例えば、越波実験などは、水の表面張力による影響がほぼ無視できる縮尺1/50程度以上で行うことが望ましい。また、波高計などの計測機器による計測対象の分解能は有限であるため、対象となる変位等が微小なほど計測精度が劣化してしまう。したがって、造波範囲を実験対象施設周辺に限定することは、より大きな模型縮尺の設定を可能とし、実験精度の向上にも役立つと考えられる（図-2.3）。しかし一方で、造波装置には通常、水面波の碎波限界とは別に、仕様上造波できる限界の最大波高が存在するので、浅海変形後の造波波高がこの値を超えないようにする等、実験計画の策定にあたってはこれらのバランスを図ることが肝要である。因みに、デュアルフェースサーペント造波装置における設計上の造波限界波高は、最大水深である1.0mに対し規則波で40cmである。なお、不規則波では造波する波数にもよるが、造波限界となる有義波高は概ねこの半分程度と考えられる。

3. 一様水深場における浅海変形後の多方向不規則波の造波方法

平面水槽に設置されたサーペント型造波装置で多方向不規則波を造波する際には、一般に、入射波の代表量である有義波高、有義波周期、主波向きならびに方向集中度から、関数スペクトル及び方向分布関数を用いて方向スペクトル形を決定し、周波数及び方向毎に分割された成分波の重ね合わせによって入射波形を作成する。このとき対象とする沖波方向スペクトルは代表的なただ1つであり、沖側境界上の造波水深は一定である。しかし、実海域の比較的浅い海域で観測される波の方向スペクトルは、海底地形や島などの影響を受け、その形状は変形し、それらの沿岸分布も一様でないことが多い（任意形状かつ複数の方向スペクトル）。

ところで、平山ら（2012）は、エネルギー平衡方程式法によって算定された浅海変形後の複数の方向スペクトルをビジネスモデルに入力し、直線状に設定した沖側境界でこれらに対応する多方向不規則波を造波するという、両者のカップリング手法（片方向接続法）を開発した。ここで、沿岸域の波浪場を詳細に再現するビジネスモデルの計算領域を平面水槽に置き換えれば、このカップリング手法は浅海変形後の多方向不規則波の造波方法としてそのまま応用することができる。そこで、本章では、波浪変形計算におけるスペクトル法と波動モデルとのカップリング法を援用した造波手順を概説するとともに、一様水深場における浅海変形後の多方向不規則波に関する具体的な造波方法について述べる。

3.1 浅海変形後の多方向不規則波の造波手順

ここでは、エネルギー平衡方程式法によって算定された浅海変形後の複数の方向スペクトルを用いて、これらに対応した多方向不規則波を直線状に配置されたサーペント型造波装置で造波する方法について述べる。なお、この造波イメージを図-3.1に示す。

(1) 任意形状スペクトルの造波

平山・宮里（2009）は、関数スペクトルによらない任意形状の方向スペクトルに対して、繰り返し法に基づく数値計算アルゴリズムを用いてエネルギー等分割を行い、式(1)に示すシングルサンメンション法によって多方向不規則波を造波する方法を提案した。

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

ここで、 x は直交平面座標のうち岸向きを正とする座標軸、 y は x 軸を右に見る向きを正とする沿岸方向の座標

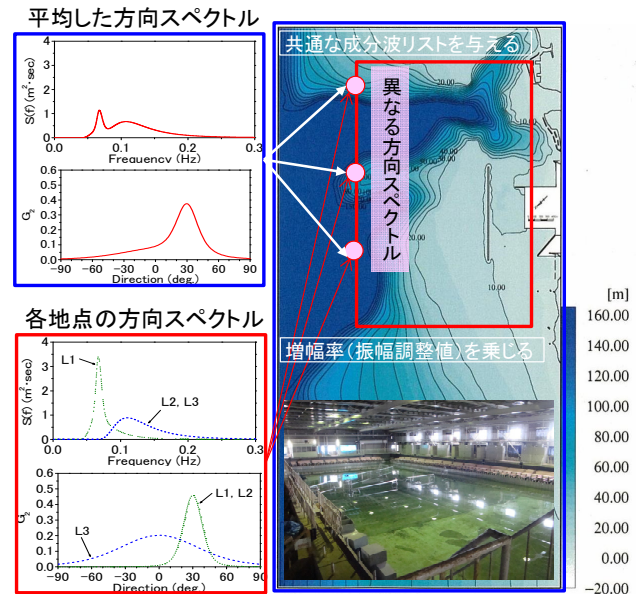


図-3.1 浅海変形後の方向スペクトル分布のイメージ

軸、 t は時刻である。また、 a_n は各成分波の振幅、 k_n は波数、 f_n は周波数、 θ_n は波向（反時計回りを正、単位は[rad]）、 ε_n は初期位相（ $0 \sim 2\pi$ ）であり、添字 n は n 番目の成分波であることを表す。 N_s は成分波数である。このうち、周波数スペクトル $S(f)$ に対する各成分波の振幅は、式(2)によって算出することができる。

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

なお、周波数スペクトルをエネルギー等分割することによって生成された各成分波は、一般に、互いに独立であるため、長時間にわたり不規則な波形を造波することが可能である。これに対し、周波数等分割により造波される不規則波形では、成分波の最小周波数に依存して同じ波形が繰り返されるため、長時間の造波に際してはより多くの成分波数を必要とする。

また、シングルサンメンション法では、各成分波の波向は、方向分布の累積曲線に対して乱数を当てはめ、各周波数に対してただ1つ割り当てられる。一方、ダブルサンメンション法では、各周波数に対し、方向分布に応じた複数の波向が割り当てられるため、前者に比べ、より多くの成分波数を必要とする場合が多いと考えられる。

(2) 複数方向スペクトルの造波

平山ら（2012）は、前項で述べた任意形状スペクトルに対する造波方法を利用して、シングルサンメンション法に基づき、ビジネスモデルの造波境界上で与えた複数の方向スペクトルに対する多方向不規則波の造波方法

を提案した。具体的な手順を以下に示す。

- ① 造波境界上の複数の代表地点（例では L1, L2, L3 の 3 地点）で与えた任意形状の方向スペクトル（図-3.1 下段）を平均し、造波境界全長に対し仮想的な方向スペクトルを1つ作成（図-3.1 上段）。ここで、 G_2 は二次元方向分布であり、周波数方向に積分した方向スペクトルとして定義される。
- ② ①で作成した仮想方向スペクトルに対しエネルギー等分割法を適用し、各成分波の代表周波数を決定。さらに、各周波数に対する方向分布の累積曲線に乱数を当てはめ、各成分波の波向を決定。
- ③ ②で決定した各成分波の代表周波数を用いて、代表地点で与えた周波数スペクトルを分割し、式(2)に従い、代表地点における各成分波の振幅を決定。
- ④ 代表地点間の各計算格子上（平面水槽では各造波板位置）で与える各成分波の振幅を、線形補間により決定。ただし、②で決定した周波数、波向に加え、初期位相は各計算格子（各造波板）で共通。
- ⑤ ④で得た各計算格子上（各造波板位置）の各成分波諸元を用いて、従来の線境界入射法（反射波吸収造波法）により、式(3)に従い、複数の方向スペクトルからなる1つの多方向不規則波を造波。

$$\eta = \sum_{n=1}^{N_s} a_n(y) \sin(k_n x \cos \theta_n + k_n y \sin \theta_n - 2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (3)$$

上記のうち、手順③は、各地点の方向スペクトルを厳密にエネルギー等分割するものではないが、それぞれのピーク周波数付近で細かく分割する各成分波が得られるなどの利点はそのまま維持している。また、手順④で得られる成分波諸元は、十分な成分波数に対して代表地点で与えた任意形状の方向スペクトルを比較的良好に表すと同時に、隣接する計算格子（造波板）間で波峰線が揃った、より現実的な水面波形を造波できると考えられる。なお、これらの手順は、ブシネスクモデル：NOWT-PARIにおいて、エネルギー平衡方程式法等で算定された複数の任意形状スペクトルに対する多方向不規則波の造波に用いられ、NOWT-PARIユーザーならばWeb上で入手できる入射波作成プログラム「mkspec」によって再現される。

ただし、サーペント型造波装置の設置水深は一樣であるため、これを自由に設定できる数値計算とは異なり、造波面に接する海底床模型の水深は沿岸方向にほぼ一樣とみなせることが望ましい。

3.2 エネルギー平衡方程式法（L048p）の活用

ここでは、2.1節で述べたエネルギー平衡方程式法ベースの造波支援ツールにより生成される、浅海変形後の多方向不規則波の造波信号が有する特徴について述べる。なお、「L048p」とは港空研プログラムライブラリに納められている高山ら（1991）によるエネルギー平衡方程式法を指し、現行のパソコン版プログラムライブラリでは「P025」から利用可能となっている。ただし、これらのプログラムライブラリのサポートはすでに終了しているため、本研究においてはこれらの入出力を一部改造するに留まっている。

以下では、平面水槽内に造波する実験波の模型縮尺を1/50と設定し、フルードの相似則に従い代表的な沖波諸元として有義波高 $H_{1/3}=8.0\text{cm}$ （現地量：4.0m）、有義波周期 $T_{1/3}=1.13\text{s}$ （現地量：8.0s）、主波向 $\theta_p=0$ 度（造波面に対して垂直な向き）、方向集中度 $S_{\max}=10$ （風波に相当）を想定して、エネルギー平衡方程式法（L048p）（以下では単にL048pという）を介して出力される造波スペクトルの特徴について考察した。なお、造波水深は0.80m（現地量：40m）で一定とし、入力する沖波の関数スペクトルには、ブレットシュナイダー・光易（BS）型周波数スペクトル及び光易型方向関数を用いた。

(1) 出力スペクトルによる多方向不規則波の造波

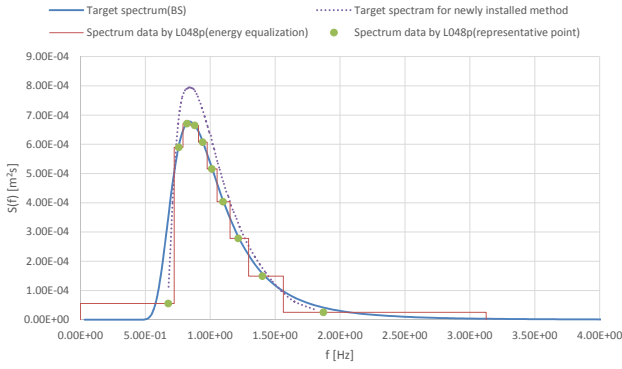
L048pを用いて一樣水深場の波浪変形計算を実施すると、各地点で同じ方向スペクトルが出力される。例として、周波数分割数 $M=10$ とした場合にL048pで出力される周波数スペクトルを、入力した沖波の連続スペクトルとともに、図-3.2(a)に示す。ここで、出力スペクトルのうち階段状グラフの各段幅は、L048pにおいてエネルギー等分割された離散スペクトルの各周波数帯を表し、各プロットは次式で算定される i 番目の代表周波数、及びスペクトル値を表している。

$$f_i = \frac{1.007}{T_{1/3}} \{ \ln[2M/(2i-1)] \}^{-1/4} \quad (4)$$

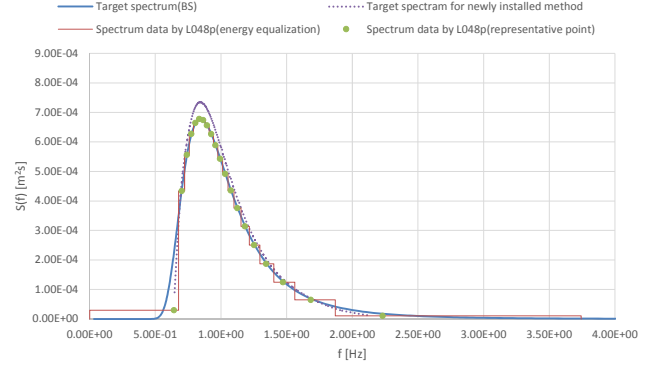
また、 i 番目の代表周波数に対する周波数帯の上限値 $f_{i,\text{end}}$ （= $i+1$ 番目の代表周波数に対する周波数帯の下限値 $f_{i+1,\text{start}}$ ）及び周波数帯幅は、それぞれ次式で算定されている。

$$f_{i,\text{end}} = \sqrt[4]{\frac{1.03/T_{1/3}^4}{\ln(M/i)}} \quad (5)$$

$$\Delta f_i = f_{i,\text{end}} - f_{i,\text{start}} \quad (6)$$



(a) 周波数分割数 $M=10$



(b) 周波数分割数 $M=20$

図-3.2 L048pによる出力スペクトルとその補正，縦軸：パワースペクトル，横軸：周波数，階段グラフ及びプロット：出力スペクトルの離散幅と代表周波数，実線：沖波スペクトル，点線：補正後の造波スペクトル

ところで，線形波理論に基づくエネルギー平衡方程式による計算結果では，一様水深場を伝播する波は変形しない。したがって，出力スペクトルは実線で示した入力スペクトルと一致すべきであるが，出力スペクトルのうち両端のプロットは入力スペクトルから大きく外れていることがわかる。これは，L048pにおいて，離散スペクトルのうち両端の代表周波数 f_i 及び f_M が受け持つ周波数帯の最小周波数 $f_{i,start}$ または最大周波数 $f_{M,end}$ が，入力した沖波スペクトルに応じて調整されるようプログラミングされていないことによるものである。すなわち，最小周波数はゼロ ($f_{i,start}=0$)，最大周波数はその1つ低周波数側の代表周波数が受け持つ周波数帯の上限値の2倍 ($f_{M,end}=2f_{M-1,end}=2f_{M,start}$) として便宜的に設定され，それぞれの周波数帯が過大となるために，等分割された元の波エネルギーと等しくなるようこれらの代表周波数に対するスペクトル値が見かけ上小さくなる。しかし，この場合にも波エネルギーは保存されているので，通常の波浪変形計算においては，これは大きな支障とはならない。

ところが，このような出力スペクトルを多方向不規則波の造波スペクトルとして用いる際には，次のような点に留意しなければならない。すなわち，前節で述べた造波手順で用いるシングルサンメンション法では周波数スペクトルの分割数を1000分割程度とする必要があるため，L048pで出力された離散スペクトルに対しては何らかのスムージング処理を施して用いる必要がある。すると，この波エネルギーは元の離散スペクトルに比べて小さくなるため，この減少分を補正しなければならない。

そこで，本研究では，L048pによる出力スペクトルをスプライン補間するとともに，その波エネルギー及び分割後の各周波数幅を式(2)に代入して得られる各成分波の振幅に対し，次式で算定される補正係数 α を一律に乘じるこ

とにより，図中の点線で示すように造波スペクトルを補正した。ここで， E_{in} ：出力スペクトルの波エネルギー， E_{spl} ：スプライン補間して得られたスペクトルの波エネルギーである。

$$\alpha = \sqrt{E_{in}/E_{spl}} \quad (7)$$

さらに，周波数分割数 $M=20$ とした場合にL048pで出力される周波数スペクトルを，同様に図-3.2(b)に示す。周波数分割数 $M=10$ とした場合に比べ，スプライン補間して得られたスペクトルは入力スペクトルに近づき，式(7)で算定される補正係数もより1に近づくことが推察される。因みに，L048pで設定できる周波数分割数は最大25分割である。

なお，L048pで出力される有義波高 $H_{1/3}$ ，有義波周期 $T_{1/3}$ はそれぞれ次式で算定される。ただし，合田・永井(1974)による現地観測データの解析例では，式(9)の係数“1.32”は0.9~1.4のように幅があり，また，周波数スペクトルの形によりある程度変化するようである(合田，2008)。したがって，これらの平均的な値1.2からすると，L048pで出力される有義波周期は若干長めであり，計算結果が設計上安全側となるよう意図されていることが推察される。

$$H_{1/3} \approx H_{m0} = 4.004 \sqrt{\int_0^{\infty} S(f) df} \quad (8)$$

$$T_{1/3} = 1.32 \bar{T} \quad \bar{T} = \sqrt{\int_0^{\infty} S(f) df / \int_0^{\infty} f^2 S(f) df} \quad (9)$$

(2) 単一方向スペクトルの造波特性

改良後のデュアルフェースサーペント型造波装置にお

いて、平面水槽の長辺側に配置した造波面（ファーストフェース）のみを用い、これに垂直な主波向 $\theta_p=0$ 度を有する方向集中度 $S_{max}=10$ の単一方向スペクトルに対する多方向不規則波を造波した場合に期待される平面水槽内の有効造波領域を、**図-3.3**に示す。ここで、有効造波領域は平石ら（1998）に従い、造波する波エネルギーの80%以上が含まれる範囲とした。したがって、この範囲内で計測される有義波高は造波する目標波高の89.4%以上となる事が期待される。そこで、図には合わせて、容量式波高計4本を星形に配置した5つの波高計アレイP1～P5の設

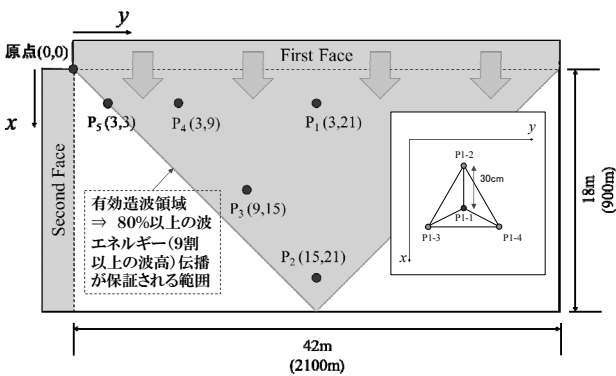
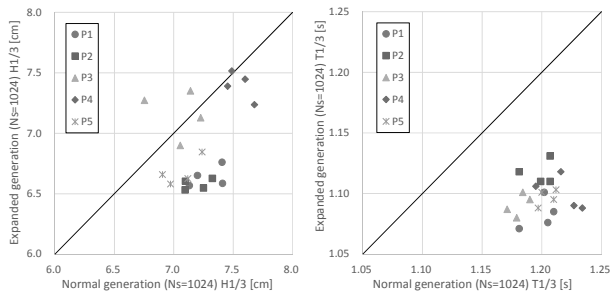
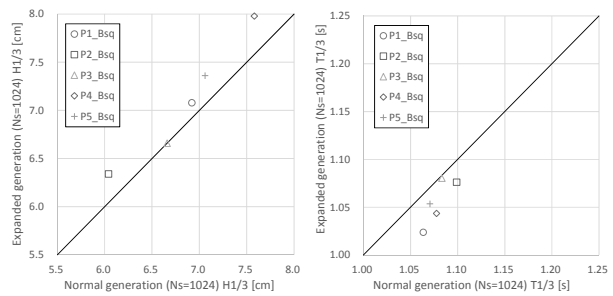


図-3.3 単一方向スペクトルに対する有効造波領域



(a) 有義波高 (b) 有義波周期

図-3.4 L048pによる造波法と従来法の比較（平面水槽）、縦軸：L048pを介した造波法、横軸：従来法の造波法



(a) 有義波高 (b) 有義波周期

図-3.5 L048pによる造波法と従来法の比較（NOWT-PARI）、縦軸：L048pを介した造波法、横軸：従来法の造波法

置位置を示す。

有義波高 $H_{1/3}=8.0\text{cm}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=1.13\text{s}$ を有する沖波の関数スペクトルに対する多方向不規則波を、シングルサンメンション法によって従来通り造波して計測された各地点の有義波高・周期を、前項のようにL048pを介して出力された造波スペクトルに対する各計測値と比較した結果を、**図-3.4**に示す。なお、成分波数はいずれも $N_s=1024$ とし、L048pにおける周波数分割数は20分割とした。

図-3.4(a)において、有効造波領域内に位置するアレイP3及びP4の各波高計で計測された両造波法による有義波高は、目標波高のそれぞれ90%及び94%であり、ほぼ期待通りの波エネルギーが造波されていることが確認できる。一方、有効造波領域の外縁上に位置するアレイP5及び造波面から遠く離れたアレイP2では、従来の造波法による計測波高が目標波高の90～92%程度であるのに対し、L048pを介した場合の計測波高はそれぞれ83%程度であった。さらに、造波面近傍のアレイP1でもこれと同様な現象が生じていることから、これらは有効造波領域による影響というよりはむしろ、造波システムにおいて、L048pによる出力スペクトルに対して作成された各成分波諸元を読み込む際に、特に振幅値の桁落ちによる物理的な若干の打切り誤差が生じていることが疑われる。

次に、**図-3.4(b)**において、アレイP1～P5の各波高計で計測された従来の造波法による有義波周期は、目標周期に比べ若干長めであることが確認できる。一方、L048pを介した造波法による計測周期は目標周期に比べ若干短い。これは、**図-3.2**からも予想されるように、造波スペクトルの波エネルギーを補正する過程において、高周波数（短周期）成分に比べ低周波数（長周期）成分の波エネルギーの減少がより顕著に生じるためと考えられる。

したがって、L048pを介した新たな造波法を用いる場合には、従来の造波法に比べ、造波波高及び周期が僅かに小さくなることに留意すべきであることが判明した。

なお、デュアルフェースサーペント型造波装置に代えて、NOWT-PARIを用いて同様な検討を実施した結果を**図-3.5**に示す。ここで、計算格子幅は10cm、差分時間間隔は3.5msとした。また、計算領域において、アレイを構成する各波高計の位置を正確に表現することは困難であるため、計測値に対する計算値の比較は、各アレイの中心の波高計位置においてのみ実施した。

平面水槽での計測結果を示した**図-3.4**に比べ、この場合には、L048pを介した新たな造波法において算定波高が小さくなる傾向は認められない。これは、NOWT-PARIによる成分波諸元の読み込み時には、振幅値の打切り誤差が生じていないためと考えられる。一方、L048pを介した

造波法による算定周期が従来に比べ短くなる現象及びその理由は平面水槽と同様であるが、従来の造波法に比べ造波スペクトルがより狭帯域化するために(図-3.2参照),各成分波の差分誤差が小さくなり、特にP4地点ではほぼ目標通りの波高が算定されたものと考えられる。

4. 一様水深場における浅海変形後の多方向不規則波の造波実験

L048pを介した造波法は、本来、造波装置よりも沖で生じる浅海変形を考慮した多方向不規則波を造波する際に用いることを想定して開発したものである。そこで、本章では、仮想的に設けた島防波堤及び球面浅瀬による波浪変形を考慮し、その後でL048pにより出力される複数の方向スペクトルに対する多方向不規則波を平面水槽内で造波した。なお、L048pに入力する沖波スペクトルの各諸元、及び一様水深場で造波した多方向不規則波を計測する波高計アレイの配置等は、前章で用いたものと同様である。特に、これらの造波実験は、海底地形や防波堤などの物理的な模型を平面水槽内に一切設置せずに実施していることに留意されたい。

4.1 島防波堤背後の回折波スペクトルの再現性

平面水槽の長辺側に配置した造波面(ファーストフェース)の沖側に仮想的に設置した、島防波堤及びその背後で生じる沖波スペクトルの回折変形を算定するために設定したL048pの計算領域を、沖波に対する平面水槽内の造波面及び有効造波領域とともに、図-4.1に示す。ここで、前章と同じ沖波スペクトルはL048pの計算領域に図の真上から入射させ、島防波堤背後の回折波スペクトルは造波面上の各計算格子及び各アレイ中心の波高計位置で出力した。なお、L048pの周波数分割数は $M=20$ とした。

このうち、造波面上の各回折波スペクトルは造波支援ツールによって各造波板位置での造波スペクトルに内挿補間(図-2.2(b)参照)される。そこで、成分波数を $N_s=2048$ として回折変形後の多方向不規則波を造波し、平面水槽内のアレイP1~P5の各波高計で計測した有義波高・周期を、これらの地点で出力されたL048pによる算定値と比較した。これらの結果を図-4.2に示す。ただし、L048pによる有義波高は式(8)、有義波周期は一般にスペクトル周期と呼ばれる次式を用いて算定した。

$$T_{1/3} \approx T_{m-1,0} = \int_0^{\infty} f^{-1} s(f) df / \int_0^{\infty} s(f) df \quad (10)$$

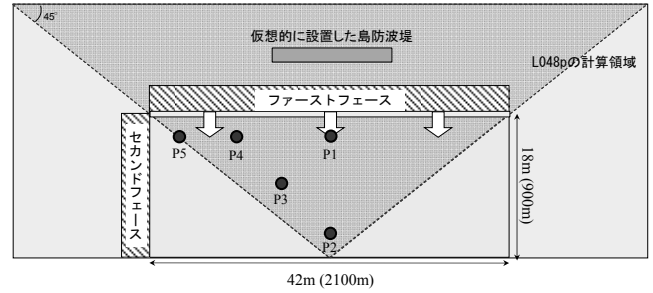


図-4.1 回折波スペクトルの造波範囲

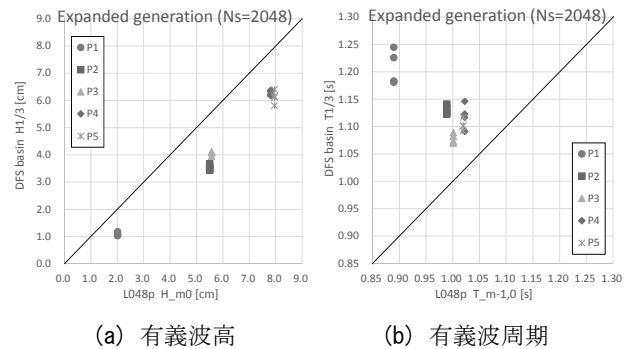


図-4.2 回折波スペクトルの造波(L048pとの比較), 縦軸: 平面水槽, 横軸: L048p

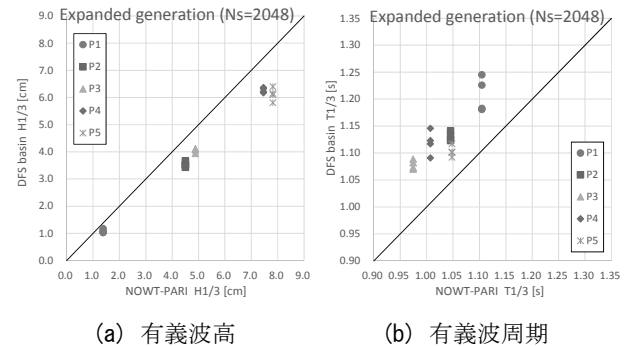


図-4.3 回折波スペクトルの造波(NOWT-PARIとの比較), 縦軸: 平面水槽, 横軸: NOWT-PARI

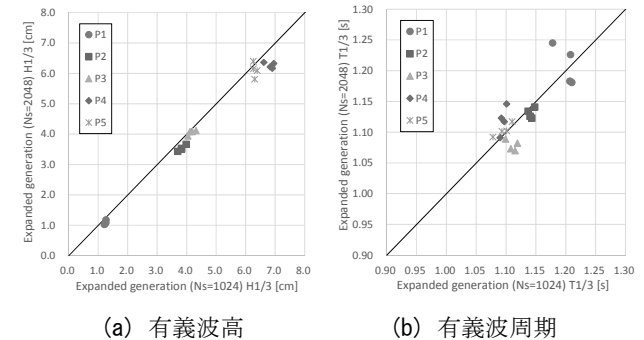
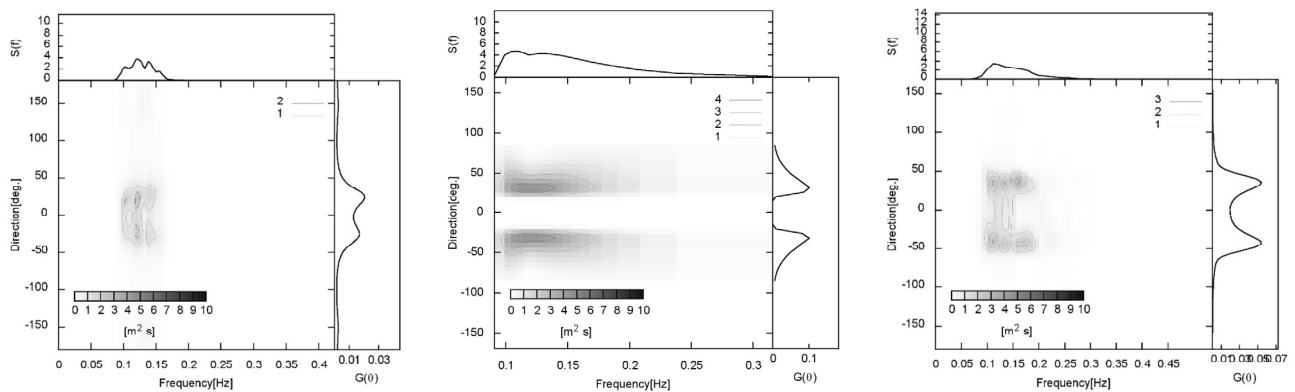


図-4.5 回折波スペクトルの造波における成分波数の違い, 縦軸: 成分波数 $N_s=2048$, 横軸: 成分波数 $N_s=1024$



(a) 平面水槽

(b) L048p

(c) NOWT-PARI

図-4.4 解析または算定された回折波の方向スペクトル (P2地点), 縦軸: 波向, 横軸: 周波数

図-4.2(a)において, L048pで算定された有義波高は, 沖の島防波堤による遮蔽域から外れたP4及びP5で大きく沖波の有義波高と同程度であるのに対し, 島防波堤両端からの回折波が重畳するP2及びP3では波高が減衰し, 両端からの回折波が到達し難い島防波堤直背後のP1で非常に小さくなる. 一方, 平面水槽内の各アレイ地点で計測された有義波高でもこれらの傾向はよく再現されているが, 波エネルギーの少なくとも80%以上を含むように設定した有効造波領域による影響や, 造波システムにおける成分波諸元の読み込み時の打ち切り誤差のために, 計測波高は全体的にやや小さくなるようである.

次に, このとき得られる有義波周期の関係を示した図-4.2(b)をみると, 島防波堤直背後のP1を除き, 平面水槽内の各アレイ地点で計測された有義波周期は沖波周期と同程度であるのに対し, L048pで算定された有義波周期は沖波周期に比べかなり短い. P1ではさらに短い有義波周期が算定されていることから, これは, 波の回折変形に対するL048pの適用限界によるものとも考えられるが, 式(10)により算定されるスペクトル周期の妥当性については別途検討が必要と思われる. なお, 平面水槽内のP1で計測された有義波周期が沖波周期に比べ長くなっているのは, 成分波のうちより回折し易い低周波数成分の伝播が支配的であったためと考えられる.

さらに, 平面水槽内のアレイP1~P5の各波高計で計測した有義波高・周期を, L048pによる算定値に代えて, NOWT-PARIによる各アレイ中心の波高計位置での算定値と同様に比較した結果を図-4.3に示す. ここで, 計算格子幅は10cm, 差分時間間隔は0.71msとした.

NOWT-PARIによる算定値のうち, アレイ地点毎の有義波高の出現傾向についてはL048pによる算定結果と概ね同様であるが, 島防波堤による遮蔽域での有義波高は

L048pによる算定値に比べて小さいことが, 図-4.2(a)と図-4.3(a)との比較から見て取れる. また, アレイ地点毎の有義波周期にも違いがみられるようになり, 若干短めではあるがこれらは平面水槽内の各アレイ地点で計測された有義波周期と比較的よく対応している. したがって, この両者の相互補完的な関係から, L048pにより島防波堤背後で出力される回折波スペクトルを用いて造波される多方向不規則波は, それより港内側の波浪場を比較的良好に再現しているものと考えられる.

ここで, これらの再現結果のうち, 島防波堤両端からの回折波が重畳するアレイP2の位置で解析または算定された方向スペクトルを並べて, 図-4.4に示す. 平面水槽内のP2地点に設置した4本の波高計で計測した水位変動データに対し, EMLM法を適用して得られた方向スペクトルの解析結果では, $\pm 30^\circ$ 程度の波向を有する回折波が重畳した二方向波浪が生じていることが見て取れる. また, L048pから直接出力した方向スペクトルでも同様な状況が確認されるが, 回折変形を疑似的に表現する差分計算上の数値分散があまり生じていないために, かなり極端な方向分布が算定されている. さらに, NOWT-PARIによりP2地点で算定された水位及び水平2成分流速の時間変動データに対し, EMEP法を適用して得られた方向スペクトルの解析結果は, 平面水槽で得られたものと比較的良好に似ている. 平面水槽内の造波面またはNOWT-PARIの造波境界に与えた回折波スペクトルは, ともにL048pで出力されたものであるため, この結果は, NOWT-PARIによるL048pとのカップリング計算が, 平面水槽内でも同様に実現されたことを示していると言える.

ところで, これらの回折波スペクトルを造波する際に用いる成分波数による影響を確認するために, $N_s=1024$ として平面水槽内のアレイP1~P5の各波高計で計測された

有義波高・周期を、同様に $N_s=2048$ として得られたものと比較した。結果を図-4.5に示す。

造波システムでは、成分波諸元の読み込み時に打ち切り誤差が生じるため、成分波数が増加し成分波1波当たりの振幅が小さくなるほど、この影響を受け易くなる。この様子は各アレイ地点で計測した有義波高を比較した図-4.5(a)でも僅かに見て取れるが、有義波周期を比較した図-4.5(b)では両者に顕著な違いはみられない。したがって、これらの回折波スペクトルの造波においては、通常の方方向不規則波の造波に用いるよりも成分波数を増加させる必要性は、それほど高くないようである。

4.2 球面浅瀬背後の屈折波スペクトルの再現性

平面水槽の長辺側に配置した造波面（ファーストフェース）の沖側に仮想的に設置した、球面浅瀬及びその背後で生じる沖波スペクトルの屈折変形を算定するために設定したL048pの計算領域を、沖波に対する平面水槽内の造波面及び有効造波領域とともに、図-4.6に示す。ここで、前章と同じ沖波スペクトルはL048pの計算領域に図の真上から入射させ、球面浅瀬背後の屈折波スペクトルは造波面上の各計算格子及び各アレイ中心の波高計位置で出力した。なお、L048pの周波数分割数は $M=20$ とした。

このうち、造波面上の各屈折波スペクトルは造波支援ツールによって各造波板位置での造波スペクトルに内挿補間(図-2.2(b)参照)される。そこで、成分波数を $N_s=2048$ として屈折変形後の多方向不規則波を造波し、平面水槽内のアレイP1~P5の各波高計で計測した有義波高・周期を、これらの地点で出力されたL048pによる算定値と比較した。これらの結果を図-4.7に示す。なお、L048pの出力結果から有義波高・周期を算定する方法は前節で述べたものと同様である。

図-4.7(a)において、L048pで算定された有義波高は、沖の球面浅瀬地形から外れたP4及びP5では沖波の有義波高と同程度であるのに対し、球面浅瀬直背後で波の収れんが生じるP1で増大し、そのために沖波が直接到達し難いP2及びP3では減衰する。しかし、平面水槽内の各アレイ地点で計測された有義波高においてこれらの傾向が確認されるのはせいぜいP1及びP3のみであり、球面浅瀬の影響を受けずに沖波が到達するP4及びP5では、目標波高に比べ、有効造波領域による影響や造波システムにおける成分波諸元の打ち切り誤差だけでは説明できないほどの波高の低減がみられる。したがって、P2での波高がこれらに比べ大きいことから推測されるように、屈折波スペクトルを与えて平面水槽内に造波した多方向不規則波は、残念ながら、球面浅瀬背後の波浪場を必ずしも再

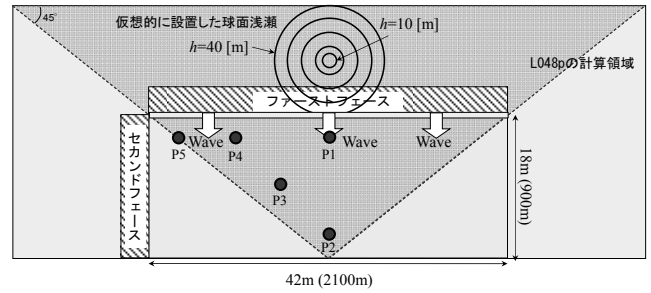


図-4.6 屈折波スペクトルの造波範囲

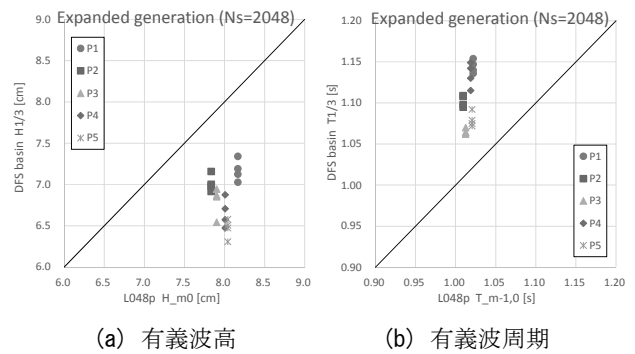


図-4.7 屈折波スペクトルの造波 (L048pとの比較), 縦軸: 平面水槽, 横軸: L048p

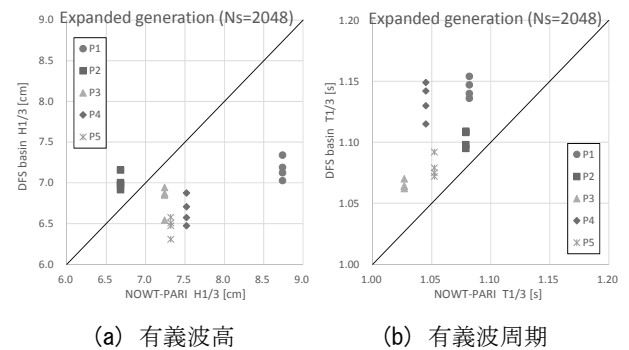


図-4.8 屈折波スペクトルの造波 (NOWT-PARIとの比較), 縦軸: 平面水槽, 横軸: NOWT-PARI

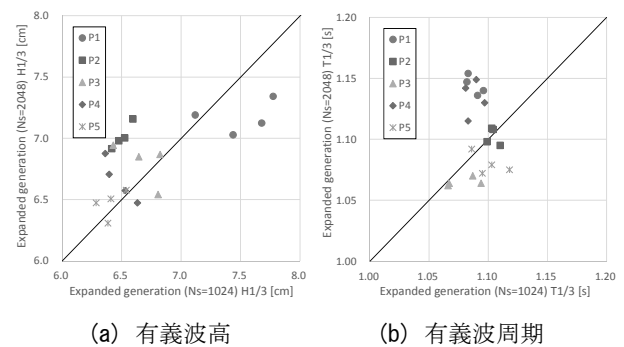
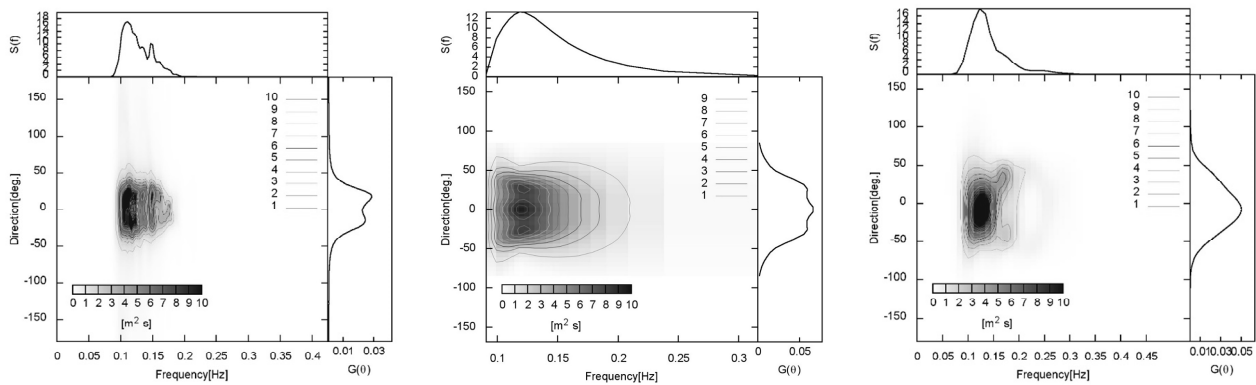


図-4.10 屈折波スペクトルの造波における成分波数の違い, 縦軸: 成分波数 $N_s=2048$, 横軸: 成分波数 $N_s=1024$



(a) 平面水槽

(b) L048p

(c) NOWT-PARI

図-4.9 解析または算定された屈折波の方向スペクトル (P1地点), 縦軸: 波向, 横軸: 周波数

現できていないことが疑われる。

次に, このとき得られる有義波周期の関係を示した図-4.7(b)をみると, 島防波堤背後の回折波と同様, 平面水槽内の各アレイ地点で計測された有義波周期は沖波周期と同程度であるのに対し, L048pで算定された有義波周期は沖波周期に比べかなり短い。したがって, L048pによる出力スペクトルに対して式(10)を適用し, スペクトル周期を算定することの妥当性については, 今後より注視する必要があると考えられる。

さらに, 平面水槽内のアレイP1~P5の各波高計で計測した有義波高・周期を, L048pによる算定値に代えて, NOWT-PARIによる各アレイ中心の波高計位置での算定値と同様に比較した結果を図-4.8に示す。ここで, 計算格子幅は10cm, 差分時間間隔は3.5msとした。

NOWT-PARIによる算定値のうち, アレイ地点毎の有義波高の出現傾向についてはL048pによる算定結果と概ね同様であるが, それらの値のアレイ地点毎の違いはL048pによる算定値に比べかなり大きいことが, 図-4.7(a)と図-4.8(a)との比較から見て取れる。このことから, L048pで算定される球面浅瀬背後の波浪場と, 出力した屈折波スペクトルを用いてNOWT-PARIで造波される多方向不規則波はそれなりに対応しているものの, L048pでは球面浅瀬による波浪変形のうち波の非線形性が考慮されないため, 波の取れん等の再現性が十分でないことが推測される。したがって, このような屈折波スペクトルを与えて造波した多方向不規則波もこの影響を大いに受けていると考えられるが, NOWT-PARIで算定された各アレイ地点の有義波周期は, 若干短めではあるが, 平面水槽内の各地点で計測された有義波周期と比較的よく対応している。

ここで, これらの再現結果のうち, 球面浅瀬直背後で波が取れんするアレイP1の位置で解析または算定された

方向スペクトルを並べて, 図-4.9に示す。平面水槽内のP1地点に設置した4本の波高計で計測した水位変動データに対し, EMLM法を適用して得られた方向スペクトルの解析結果では, 2山型の方向分布が得られている。しかし, L048pから直接出力した方向スペクトルでは, 左右に比べ中央が僅かに高い3山型の方向分布がみられる。さらに, NOWT-PARIによりP1地点で算定された水位及び水平2成分流速の時間変動データに対し, EMLM法を適用して得られた方向スペクトルの解析結果は, L048pの方向分布において中央部の波エネルギーが大きくなり, 左右のピークをも包含したような1山型の方向分布となっている。したがって, 平面水槽内の造波面及びNOWT-PARIの造波境界に与えた屈折波スペクトルは, ともにL048pで出力されたものであるが, デュアルフェースサーペント型造波装置による造波では, 過小評価された球面浅瀬背後での波の取れん効果を造波信号に十分に反映できなかった可能性がある。

ところで, これらの屈折波スペクトルを造波する際に用いる成分波数による影響を確認するために, $N_s=1024$ として平面水槽内のアレイP1~P5の各波高計で計測された有義波高・周期を, 同様に $N_s=2048$ として得られたものと比較した。結果を図-4.10に示す。

球面浅瀬背後で波が取れんするP1では, 成分波数を減らし成分波1波当たりの振幅が大きくなると, 成分波諸元の読み込み時に生じる打ち切り誤差が緩和されるために, 計測される波高や周期が増大する。しかし, その背後で広く分布する波向の波が交わるP2などでは, 成分波数を減らすことでそれらの波をきめ細かく造波することが困難となるため, 計測波高が低減する。したがって, これらの屈折波スペクトルの造波においては, 打ち切り誤差の影響に十分留意しつつも, 通常が多方向不規則波の造波

に用いるよりも多くの成分波数を設定して造波するのが良いと思われる。しかし、その場合にもL048pで出力した造波スペクトルで考慮されていない波の非線形性を補うことにはならないため、造波面の沖側に仮想的に設置する海底地形は、沖波が非線形変形しない程度までの水深に留めるべきであると思われる。

5. まとめ

本研究では、デュアルフェースサーペント型造波装置のうち制御基板等を改良し、沿岸方向に一樣でない浅海域での方向スペクトルを直接造波した結果、期待される実務上の効果や活用方を提案した。また、このような造波手法について概説するとともに、造波装置の沖側に仮想的に設けた島防波堤及び球面浅瀬背後でみられる多方向不規則波を造波する際の留意点、及びその造波特性について考察した。

浅海変形後の多方向不規則波に対する造波検定の効率化・高精度化が今後の課題であるが、平面水槽の大きさに伴う物理的制約を克服することを目的とした新たな造波機能は、実験範囲の縮小による実験コストの削減や、模型縮尺の拡大による実験精度の向上、等の効果が期待される。

6. おわりに

本研究では、平成27年度に導入され運用を開始した改良後のデュアルフェースサーペント型造波装置において、その改良内容と効果、新たに導入された機能による造波手順とその内容、及び一樣水深場におけるそれらの造波特性についてとりまとめた。

最後に、今後の運用や維持管理にも関係すると思われる事項をまとめて以下に示す。

- 1) 新型制御基板は1枚で最大8台の造波機を制御することができるため、造波機毎に必要な旧型制御基板に比べ設置枚数が従来の1/8程度となり、システム障害のリスクが大幅に削減された。
- 2) 制御基板ユニット（制御基板を収めた箱）を水槽脇のプラットフォーム上に集約して集中的に冷却・防塵対策を行うことを可能とし、基盤自体の故障リスクを下げることに成功した。
- 3) 造波機の設置水深は一樣であるため、数値計算とは異なり、造波面に接する海底床模型の水深は沿岸方向にほぼ一樣とみなせることが望ましい。
- 4) エネルギー平衡方程式法によって算定された防波堤背

後の回折波スペクトルの空間分布を与えて造波したところ、実際に防波堤模型を設置しなくても、港内の回折波の伝播状況を平面水槽内に再現できることが確認された。

(2017年4月25日受付)

参考文献

- 加島寛章・平山克也（2010）：大型平面水槽における波群に拘束された長周期波の造波制御システムの導入，海洋開発論文集，第26巻，pp.1263-1268.
- 合田良実・永井康平（1974）：波浪の統計的性質に関する調査・解析，港研報告，Vol.13，No.1，pp.3-37.
- 合田良実（2008）：耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp.31-32.
- 高山知司・池田直太・平石哲也（1991）：砕波および反射を考慮した波浪変形計算，港空研報告，Vol.30，No.1，pp.21-67.
- 入射波作成プログラム「mkspec」：<http://www.pari.go.jp/unit/haro/bsnsq/nowtpari/download/>より入手可（認証あり）.
- 平石哲也・平山克也・丸山晴広（1998）：デュアル・フェース・サーペント型造波装置の適用性，港空研報告 Vol.37，No.4，pp.3-35（英文）.
- 平山克也・宮里一郎（2009）：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，港空研報告，Vol.48，No.2，pp.199-214.
- 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，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.11-15.
- 平山克也・岩瀬浩之・加島寛章（2012）：造波境界上の水深と方向スペクトルの空間変化を考慮した多方向不規則波の造波とその特性，港空研報告，Vol.51，No.1，pp.3-22.
- 平山克也・中村聡孝・相田康洋（2016）：浅海変形後の多方向不規則波を造波するための造波装置改良，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.72，No.2，pp.I_1765-I_1770.
- 間瀬 肇・高山知司・北野利一・森安里夫（1999）：位相平均波浪変形解析モデルへの回折効果のモデリングと適用性に関する研究，海岸工学論文集，第46巻，pp.66-70.

記号表

E_{in} : 出力スペクトルの波エネルギー (m^2)

E_{spl} : スプライン補完スペクトルの波エネルギー (m^2)

$H_{1/3}$: 有義波高 (m)
 H_{m0} : スペクトル有義波高 (m)
 M : 周波数分割数
 N_s : 成分波数
 a_n : n番目の成分波の振幅 (m)
 f_i : i番目の代表周波数 (1/s)
 $f_{i,end}$: i番目の周波数幅の上限値 (1/s)
 $f_{i,start}$: i番目の周波数幅の下限値 (1/s)
 f_n : n番目の成分波の周波数 (1/s)
 k_n : n番目の成分波の波数 (1/m)
 t : 時刻 (s)
 x : 直行平面座標のうち岸向きを正とする座標
 y : 直行平面座標のうち岸向きを正とする座標
 $S(f)$: 周波数スペクトル (m^2*s)
 \bar{T} : スペクトル平均波高 (m)
 $T_{1/3}$: 波の有義波周期 (s)
 $T_{m-1,0}$: スペクトル有義波周期 (s)
 α : 波エネルギーの補正係数
 Δf_i : i番目の周波数幅
 Δf_n : n番目の周波数幅
 η : 水位変動 (m)
 ε_n : n番目の成分波の初期位相
 θ_n : n番目の成分波の波向 (rad)

港湾空港技術研究所資料 No.1337

2017.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2017) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。