

技術者のための  
**海岸工学**



山本吉道 著

理工図書

技術者のための  
**海岸工学**

山本吉道 著

理工図書

# 始めに

港湾・船舶に係わる技術は、その記録や遺跡が紀元前から残っているが、海岸工学が学問として体系付けられたのは、20世紀になってからのことである。海岸工学の中で潮汐理論と波動理論の研究は比較的早く、Newtonが1687年に「Principia」で平衡潮汐理論を発表したが、実際の潮汐運動を上手く説明出来ず、Kelvin (W. Thomson) が1879年に、平衡潮汐理論による起潮力によって発生した長波の共振現象として動力的潮汐理論を発表した。波動に関しては、Gerstnerが1802年にトロコイド波理論を発表したのが最初であり、Airyが1845年に現在でもよく使われている微小振幅波理論を発表し、Stokesが1847年に有限振幅波理論を発表した。さらに、孤立波について Boussinesq が1871年に、Rayleigh が1876年に理論的裏付けを発表し、極浅海域の波の理論(クノイド波理論)を Korteweg and de Vries が1895年に発表した。このように波の基礎理論は1800年代にほぼ揃い、1900年代に入ると、Gaillardが1905年に動水圧公式を、広井が1919年に砕波後の波圧公式を、Sainflauが1928年に重複波の波圧公式を、Bagnoldが1939年に衝撃波圧の発生機構を発表した。また、1930年代には、海岸侵食に関する研究が、米国陸軍工兵隊海岸侵食局(Beach Erosion Board)などで本格化し、波浪の発生・発達理論や伝播理論も本格的に研究されるようになり、Svedrup and Munk が1942年に有義波法を開発し、1946年と1947年に発表した。

そして、1950年に、カルフォルニア大学バークレー校の O'Brien が、海岸に関する問題を総合的に議論する場が必要と考えて、カルフォルニア州ロングビーチ市で第一回海岸工学講演会を開催し、海岸に関する工学に対して“**Coastal Engineering (海岸工学)**”と言う名称を用いた。この講演会は、“**International Conference on Coastal Engineering (国際海岸工学会議)**”と改称されて、現在も隔年で開催されている(1966年の第10回国際海岸工学会議は東京で、1994年の第24回目は神戸で開催された)。我が国でも、第二次世界大戦以降の相次ぐ台風災害を受けて海岸防災等への関心が高まり、土木学会が海岸工学講演会を1954年から毎年開催するようになった。さらに、日本国政府は「海岸法」を1956年に制定公布し、本格的な海岸防災事業を行う様になった。

1950年以降の海岸工学に関する研究は、1950年代に、Bretschneiderが有義波法の改良を行ない、Pierson等がスペクトル法を発表し、Minikinが衝撃波圧式を、Morisonが柱への波力式を、Hudsonが捨石安定計算式を、佐藤やSavilleが遡上高評価法を提案した。1960年代に入ると、スペクトル解析の研究が進み、Longuet-Higgins and Stewartが海浜流に係わるラディエーション応力理論を発表し、漂砂移動の限界水深式や漂砂量公式など、漂砂に関する研究も本格化してきた。1970年以降は、合田らによる波力算定式などの各種評価式の提案に加えて、コンピュータの計算能力の急激な向上に合わせ、波浪の発生・発達・伝播、波の遡上・越波、海浜流、高潮・吹送流・津波、さらには、各種構造物への波力、波や流れによる地形変化などの数値計算モデルの研究が急速に進んできた。

以上の研究成果をまとめた我が国に於ける専門書としては、基本的な波動理論や潮汐理論についてならば、昭和8年初版の物部長徳の「水理学」(岩波書店)に続いて、石原藤次郎・本間仁編集の「応用水理学」全5巻(丸善、昭和32年~33年初版)など、複数の水理学の大著で、水理学の一部として記述されてきた。土木学会でも、昭和23年初版の「水理公式集」で、波動、漂砂、潮汐などを水理学の海岸・港湾分野としてまとめ、その後も、学会内の水工学委員会が中心となって、新しい研究成果を取り入れた改訂版を10年~20年の間隔で発刊し続けている。

海岸の水力学と工学を中心にまとめた専門書としては、永田豊・彦坂繁雄・宮崎正衛の「海洋物理Ⅲ」(東海大学出版会、昭和46年初版)、堀川清司の「海岸工学」(東京大学出版会、昭和48年初版)、淵秀隆・松本次男・斎藤晃の「海の波」(地人書館、昭和51年初版)、富永政英の「海洋波動」(共立出版、昭和51年初版)、合田良實の「港湾構造物の耐波設計」(鹿島出版会、昭和52年初版)、岩垣雄一・樫木亨の「海岸工学」(共立出版、昭和54年初版)、本間仁監修・堀川清司編集の「海岸環境工学」(東京大学出版会、昭和60年初版)など、さらに、木村晃の「海岸工学」(森北出版、平成26年初版)、増田光一・居駒知樹・惠藤浩朗・相田康洋の「水波工学の基礎」(成山堂書店、平成28年初版)、近藤一郎・佐伯浩・佐々木幹夫・佐藤幸雄・水野雄三の「海岸工学概論」(森北出版、平成30年初版)、柴山知也編集の「海岸工学 よくわかる海岸と港湾」(森北出版、令和3年初版)など十数冊あるが、前半の書籍は重要な知識を網羅しているが、現時点では新しい知識が不足しており、後半の書籍には新しい知識が含まれているが、入門書的な位置付けにある。

一方、土木学会では、昭和32年初版の「海岸施設設計便覧」で、海岸施設の設計に必要な海岸工学の知識をまとめ、その後も、学会内の海岸工学委員会が、新しい研究成果を取り入れた改訂版を十数年ごとに発刊し続けている。さらに、海岸



工学委員会は、波動・地形変化の数値モデルについてまとめた「海岸波動」を平成 6 年に、「新しい波浪算定法とこれからの海域施設の設計法」を平成 13 年に、波動の新しい数値モデルについてまとめた「数値波動水槽」を平成 24 年に発刊した。また、建設省（国土交通省の前身）・運輸省（国土交通省の前身）・農林水産省・水産庁は合同で、「海岸保全施設築造基準解説」を関連協会経由で昭和 35 年に発刊し、その後も 15 年程度の間隔で改訂しており、現在の国土交通省・農林水産省・水産庁合同による「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」（関連協会）に引き継がれている。さらに、運輸省港湾局は「港湾構造物設計基準」を昭和 42 年・43 年に 2 分冊で発刊し、これの後続として「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（日本港湾協会、昭和 54 年初版）を十数年間隔で改訂し続け、国土交通省港湾局が引き継いでいる。水産庁も「漁港構造物標準設計法（全国漁港協会、昭和 45 年初版）を概ね十数年間隔で改訂し続けて、技術更新を図っている。

以上の様に、第一線で活躍している技術者のための調査・設計解説書ならば、土木学会や各政府機関が十数年間隔で最新の知識を提供している。また、初心者のための入門書も近年出版されている。しかし、これらの間を繋ぐ中間レベルの新しい知識を含む技術者のための教科書的な書が不足している様に思われ、本書の出版に至った。

そして、本書の付録として、波による地形変化を予測出来る数値計算モデル（①汀線変化数値予測モデル、②高波による海浜変化数値予測モデル、③津波による地形変化数値予測モデル）のプログラムとマニュアルの一式を用意した。

①の数値モデルは、直線的海岸での構造物の影響を考慮した広範囲・長期間の汀線変化予測に使える。

②の数値モデルは、遡上域も含めた不透過・透過構造物設置下での不規則波による平面二次元的海浜地形変化予測に使える。

③の数値モデルは、陸上浸水域も含めた津波による平面二次元的地形変化予測に使える。

また、幾つかの利用価値の高い数値計算モデルの紹介とダウンロード URL も、該当テーマの節で記している。

それから、専門用語に出来るだけ英語表現を併記するのは当然のサービスであるが、それらを実際の英語文に用いる際には、可算名詞と不可算名詞のどちらで用いるべきかを常に確認する必要がある。それゆえ、可算名詞として使うのが一般的な場合は冠詞を付けたり、複数形が一般的な場合は複数形で表した。

関心を持って本書「技術者のための海岸工学」を手にした読者が、有用であると

思ってしまったならば、幸甚の極みである。

最後に、理工図書株式会社の皆様方による、本書出版のためのご尽力に感謝の意を表します。

2022年12月

山本 吉道

# 目次

## 第1章 波浪の統計的性質と発生機構

### 1.1 波浪の統計的性質／2

- 1) 規則波の基本的表現と合成／2
- 2) 不規則波と波群性／4
- 3) 波別解析法による取扱い／4
- 4) スペクトル解析法による取扱い／7

### 1.2 波浪の発生機構／17

- 1) 波浪の発生理論の基礎／17
- 2) 波浪推算モデル／20

## 第2章 海の波の変形と伝播

### 2.1 微小振幅波理論／42

- 1) 誘導のための仮定／42
- 2) 水粒子の流速式の誘導／43
- 3) 波長と波速の関係式／45
- 4) 水粒子の加速度と軌道／47
- 5) 動水圧と波高の測定法／48
- 6) 波のエネルギー／49
- 7) 群速度と波のパワー／50
- 8) 重複波／52
- 9) 部分重複波／53

### 2.2 有限振幅波理論／55

- 1) 有限振幅波の特徴と適用範囲／55
- 2) ストークス波／56
- 3) クノイド波／58

### 2.3 波の変形と伝播／59

- 1) 波の浅水変形と屈折変形／59

- 2) 波の回折変形／63
  - 3) 波の透過と反射／65
  - 4) 砕波／71
  - 5) 海底摩擦などによる波高減衰／82
- 2.4 波浪場の数値計算モデル／85**
- 1) エネルギー保存則に基づくモデル／85
  - 2) 運動方程式または緩勾配方程式に基づくモデル／85

## **第3章 波の遡上・越波と波力**

### **3.1 波の遡上と越波／94**

- 1) 遡上波への不規則波の影響／94
- 2) 波群性に起因する長周期重力波／96
- 3) 波の打上げ高（遡上高）の算定法／101
- 4) 越波量の算定法／109

### **3.2 波力／120**

- 1) 直立壁に作用する波力／120
- 2) 傾斜堤被覆石または被覆ブロックの安定性検討／129
- 3) 柱状構造物に作用する波力／133

## **第4章 海の流れ**

### **4.1 海浜流／142**

- 1) Radiation 応力／142
- 2) 砕波帯内外での平均水位／144
- 3) 海浜流の平面構造／145
- 4) 沿岸流について／145
- 5) 離岸流について／148
- 6) 海浜流の数値計算モデル／150

### **4.2 吹送流／151**

### **4.3 海流／154**

### **4.4 潮汐流／156**

- 1) 潮汐／156



- 2) 潮汐の調和解析／158
- 3) 潮汐流の予測／159

## 第5章 高潮と津波

### 5.1 高潮／164

- 1) 高潮の発生／164
- 2) 高潮災害の実態／164
- 3) 高潮時の潮位算定法 /165
- 4) 副振動／167

### 5.2 津波／170

- 1) 津波の発生／170
- 2) 津波災害の実態／173
- 3) 津波の各種評価法／176

## 第6章 海岸地形変化

### 6.1 海浜断面変化／196

- 1) 海浜断面地形／196
- 2) 海浜断面地形変化／196
- 3) 海浜安定断面の設定法／200

### 6.2 漂砂／205

- 1) 漂砂の移動形態／205
- 2) 移動限界水深／205
- 3) 掃流砂量 (a bed load rate) の算定式／206
- 4) 浮遊砂量 (a suspended load rate) の算定式／208
- 5) 砂の連続式／210

### 6.3 海岸地形変化予測法／212

- 1) ライン・モデルと岸沖漂砂による断面変化モデル／213
- 2) 海浜流による水深変化モデル／218

### 6.4 海岸侵食／223

- 1) 海岸侵食の原因／223
- 2) 海岸侵食対策の基本的考え方／227

## 6.5 洗堀と吸出し／229

- 1) 高波による洗堀 (scouring by large waves) ／229
- 2) 吸出し (suction, sand outflow) ／232
- 3) 津波による洗堀／239

## 6.6 飛砂／240

- 1) 飛砂の限界摩擦速度／240
- 2) 摩擦速度と飛砂量の算定式／241

# 第7章 海岸構造物と各種対策法

## 7.1 海岸構造物／252

- 1) 海岸に於ける施設／252
- 2) 港湾・漁港に於ける施設／256

## 7.2 高波対策／258

- 1) 高波発生の実態／258
- 2) 高波被害の特徴／258
- 3) 高波対策の考え方／260
- 4) 波力対策／261
- 5) 越波対策／263
- 6) 海岸侵食・港内埋没対策／264
- 7) 洗堀と吸出し対策／271
- 8) 飛沫と飛砂の対策／273

## 7.3 高潮対策／275

- 1) 高潮被害の特徴／275
- 2) 高潮対策／276

## 7.4 津波対策／278

- 1) 津波被害の特徴／278
- 2) 津波対策／282

## 7.5 性能設計と信頼性設計法／291

- 1) 性能設計／291
- 2) 信頼性設計法／292

## 第8章 環境保全と波力発電

### 8.1 海域の水質保全／302

- 1) 水質悪化の実態／302
- 2) 水質保全のための対応／304

### 8.2 海岸漂着ごみ／306

- 1) 漂着ごみの実態／306
- 2) 漂着ごみ対策／309
- 3) 漂着海藻・海草の腐敗臭への対策／310

### 8.3 波力発電の普及／314

- 1) 再生可能エネルギー／314
- 2) 波力発電の種類と実例／316
- 3) 波力・小規模水力発電普及のための一考／325

終わりに／337

## 付録 数値計算モデルの解説

1. 高波による汀線変化数値予測モデル／340
2. 高波による海浜変化数値予測モデル／359
3. 津波による海岸地形変化数値予測モデル／381

索引／403

## 本書籍に付属の数値計算プログラムについて

- 1) プログラミング言語は主に Fortran 90 です.
- 2) Windows でのみコンパイル可能です.
- 3) 動作環境は, Windows10, Intel Parallel Studio XE 2019 (Intel 社のコンパイラ) で確認しております.
- 4) Fortran コンパイラは本書籍に付属しておりませんので, ご用意ください.
- 5) 付属の数値計算プログラムの場合, コンパイラには余り時間が掛からないはずですが, PC の性能によっては, テストランに時間が掛かるでしょう.
- 6) 描画ソフトは本書籍に付属しておりませんので, ご用意ください.

付属の数値計算プログラムは, 適切なデータを入力する限り, 概ね適切な計算結果を出すことを確認しておりますが, このプログラムによる計算結果から生じる全ての結果に対して, 著者と出版社が責任を負うことは出来ないことをご理解の上で, お使い下さい.

また, 科学技術計算に有利なプログラム言語として, C++と Fortran 90 を推薦出来ます. そして, プログラミング経験の無い技術者にとって, C++の学習は相当に難しいものになりますから, 付属の数値シミュレーション・プログラムは Fortran 90 をベースに書かれています.

### 本書籍に付属の数値計算プログラム・データセットのダウンロードの方法

「理工図書」ホームページより (1) 書籍検索中の書籍タイトルに「技術者のための海岸工学」を入力し「検索する」をクリック (2) 表示された画面中の「詳細を見る」をクリック (3) 表示された画面中の「追加情報タブ」をクリックすると3つのプログラムデータセット名が表示されます.

理工図書ホームページ (<https://www.rikohtosho.co.jp/>)





第 1 章

# 波浪の統計的性質と 発生機構

海の波には、風が発生原因である**波浪** (waves), 強い海底地震が発生原因で周期が数分以上の**津波** (a tsunami), 台風による強風と低気圧が原因で周期が数時間の**高潮** (a storm surge), 天体の運行が原因で周期が半日と1日の**潮汐波** (tidal waves) などがあるが、ここでは波浪の統計的性質と発生理論、および予測法について説明する。なお、波浪は、周期が0.1秒以下の**さざ波** (ripples), 周期が0.1~30秒以下の**風波** (wind waves) と**うねり** (swells), そして、**長周期重力波** (long-period gravity waves, infragravity waves) と呼ばれる周期が30秒~数分の成分波から成る。

## 1.1 波浪の統計的性質

### 1) 規則波の基本的表現と合成

#### (1) 規則波の基本的表現

図-1.1 に示す規則波の場合、山から山までの長さを**波長** ( $L$ , wavelength, a wavelength), 山から谷までの水面高を**波高** ( $H$ , wave height, a wave height) と定義し、静水面からの水面上昇高 (水面高)  $\eta$  を次の余弦関数で表すことが出来る。

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) = \frac{H}{2} \cos(\kappa x) \quad (1.1.1)$$

ここに、 $x$  は水平座標であり、 $\kappa=2\pi/L$  は**波数** (a wave number) と呼ばれる。

さらに、図-1.1 において、波が通過して次の波が来るまでの時間、すなわち、一波長が通過する時間を**周期** ( $T$ ) と定義し、 $x$  方向に進行する波を次式で表すことが出来る。

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) = \frac{H}{2} \cos(\kappa x - \omega t) = \frac{H}{2} \cos \kappa(x - ct) \quad (1.1.2)$$

ここに、 $t$  は時間であり、 $\omega=2\pi/T$  は**角周波数** (an angular frequency) または**角振動数**,  $c=L/T=\omega/\kappa$  は**波の伝播速度** (wave velocity) または**波速** (wave celerity) と呼ばれる。

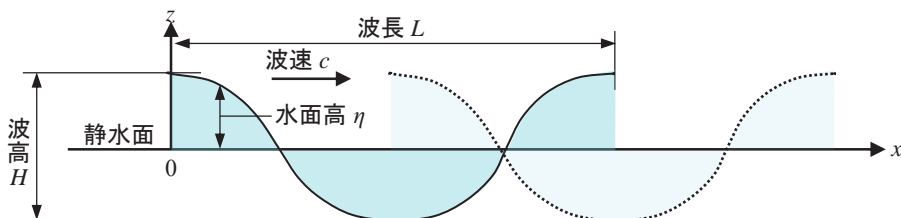


図-1.1 波形の定義



## (2) 規則波の合成

簡単のために波数を無視して、波高  $H_1$  で周期  $T_1$  の規則波と、波高  $H_2$  で周期  $T_2$  の規則波の合成を考える。この場合の静水面からの水面上昇高（水面高） $\eta$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{H_1}{2} \cos \frac{2\pi}{T_1} t + \frac{H_2}{2} \cos \frac{2\pi}{T_2} t = (H_+ + H_-) \cos(T_+ + T_-) + (H_+ - H_-) \cos(T_+ - T_-) \\ &= H_+ [\cos(T_+ + T_-) + \cos(T_+ - T_-)] + H_- [\cos(T_+ + T_-) - \cos(T_+ - T_-)] \end{aligned} \quad (1.1.3)$$

$$\text{ここに、} \left. \begin{aligned} H_+ &= \frac{H_1/2 + H_2/2}{2}, & H_- &= \frac{H_1/2 - H_2/2}{2} \\ T_+ &= \frac{2\pi t/T_1 + 2\pi t/T_2}{2}, & T_- &= \frac{2\pi t/T_1 - 2\pi t/T_2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1.1.4)$$

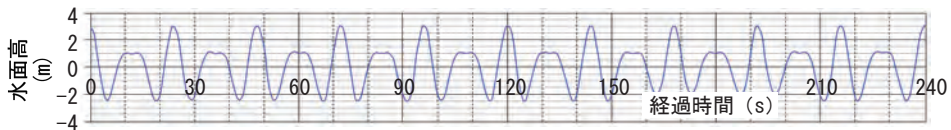
さらに、加法定理を用いると、式 (1.1.3) は次式の様になる。

$$\begin{aligned} \eta &= H_+ (\cos T_+ \cos T_- - \sin T_+ \sin T_- + \cos T_+ \cos T_- + \sin T_+ \sin T_-) \\ &\quad + H_- (\cos T_+ \cos T_- - \sin T_+ \sin T_- - \cos T_+ \cos T_- - \sin T_+ \sin T_-) \\ &= 2H_+ \cos T_+ \cos T_- - 2H_- [\cos(T_+ - T_-) - \cos T_+ \cos T_-] \\ &= (2H_+ + 2H_-) \cos T_+ \cos T_- - 2H_- \cos(T_+ - T_-) \end{aligned} \quad (1.1.5)$$

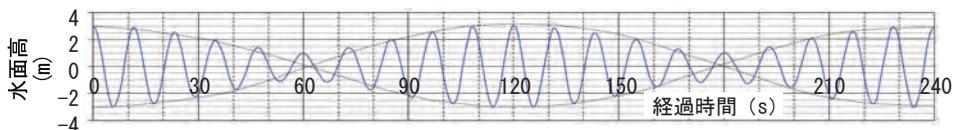
そして、式 (1.1.5) に式 (1.1.4) を代入し直すと、式 (1.1.6) を得る。

$$\eta = H_1 \cos \left[ \frac{2\pi}{2T_1 T_2 / (T_2 - T_1)} t \right] \cos \left[ \frac{2\pi}{2T_1 T_2 / (T_2 + T_1)} t \right] - \frac{H_1 - H_2}{2} \cos \frac{2\pi}{T_2} t \quad (1.1.6)$$

波高 4.0m で周期 12.0s の規則波と、波高 2.0m で周期 8.0s の規則波の合成結果を [図-1.2](#) に、波高 4.0m で周期 12.0s の規則波と、波高 2.0m で周期 10.9s の規則波の合成結果を [図-1.3](#) に示す。規則波を合成させると、[図-1.2](#) に示されるように不規則性を増すが、周期の差が小さい規則波を合成させると、式 (1.1.6) の右辺一番目の余弦関数の周期  $[2T_2/(T_2 - T_1)]$  が長周期になるため、[図-1.3](#) に示されるようにビート波（唸っている波）になる。



[図-1.2](#) 合成波の例（周期 12.0 s と周期 8.0 s の 2 つの規則波の場合）



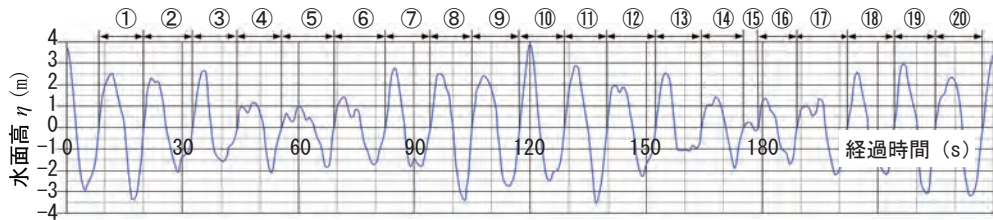
[図-1.3](#) 合成波の例（周期 12.0 s と周期 10.9 s の 2 つの規則波の場合）

## 2) 不規則波と波群性

実際の海の波浪は規則波でなく、[図-1.4](#)に示すような不規則波であり、小さな波から徐々に大きな波になって、再び小さな波に戻る10波前後の連なりを有しているのが普通である。この性質を**波群性** (wave groupiness) と呼び、港湾や浮遊構造物の共振、傾斜堤の捨石・ブロックの安定性、汀線付近の平均水面変動や波の打上げ・越波などの問題に影響を及ぼすことが分っている。

波の数え方は、規則波ならば、山から山、または、谷から谷を一波と定義して問題無いが、実際の波浪の場合は、[図-1.4](#)の左端から5・6番目の二山の様に、この定義では、水面高  $\eta$  が一波の中で静水面 ([図-1.4](#)の水面高 0 m の平面) を横切らない波が出来るため、水面高  $\eta$  が静水面を横切って上昇し、再び静水面を横切って上昇するまでを一波と定義する**ゼロアップ・クロス法**か、水面高  $\eta$  が静水面を横切って降下し、再び静水面を横切って降下するまでを一波と定義する**ゼロダウン・クロス法**を用いて行われる。国際的には、ゼロダウン・クロス法も多用されているが、我が国では、ゼロアップ・クロス法が主流である。

この不規則波の取扱いには、**波別解析法**と**スペクトル解析法**の2つがある。



[図-1.4](#) 海の波浪の模擬波形とゼロアップ・クロス法による波の数え方

## 3) 波別解析法による取扱い

波の定常性を確保するため、20分間程度の連続記録（波数で200波程度）を用いて、1波ごとの波高や周期などの出現確率の分布を扱う方法を波別解析法と呼び、非線形性の強い波浪にも適応できる。

水面高  $\eta$  の出現確率密度の分布は、平均値が0で、分散が1の場合の正規分布 (a normal distribution, Gaussian distribution) に従い、式 (1.1.7) で表される。

$$p(\eta/\sigma_\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\eta}{\sigma_\eta}\right)^2\right\} \quad (1.1.7)$$

読者にとって分かりにくい次の数式表現について、ここで解説しておく。

$$y = A \times \exp\{B\} \quad (\text{a. 1})$$

この式は、ネイピア数 ( $e = 2.71828182\dots$ ) を用いた次の式と同じである。

$$y = A \times e^B \quad (\text{a. 2})$$

ここで、指数  $B$  が複雑な式の場合、式 (a.2) の表現では、指数部が読みにくくなるため、 $\exp\{B\}$  の表現を採用する。

ここに、 $\sigma_\eta$  は水面高  $\eta$  の標準偏差で、データ数  $n$  を用いて式 (1.1.8) で定義される。

$$\sigma_\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \eta_i^2}{n}} \quad (1.1.8)$$

そして、Longuet-Higgins [1] によると、波高  $H$  の出現確率密度の分布は、**図-1.5** に例を示すレイリー分布 (Rayleigh distribution) に従い、式 (1.1.9) で表される。

$$p(H) = \frac{H}{4\sigma_\eta^2} \exp\left\{-\frac{1}{8}\left(\frac{H}{\sigma_\eta}\right)^2\right\}, \quad p\left(\frac{H}{H}\right) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H}{H^2} \exp\left\{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{H}\right)^2\right\} \quad (1.1.9)$$

さらに、ある波高  $H$  より大きな波高が出現する確率 (超過発生確率) は、式 (1.1.9) を  $H$  から  $\infty$  にかけて積分すればよいので、式 (1.1.10) で求まる。

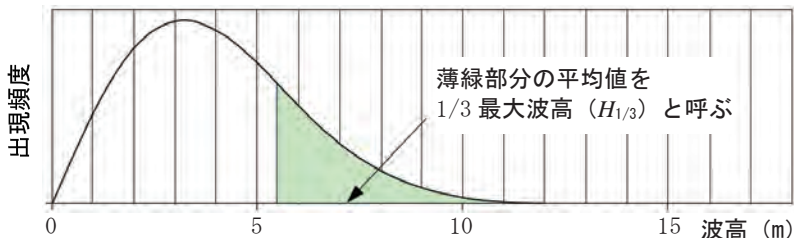
$$P(H) = \int_H^\infty p(H) dH = \exp\left\{-\frac{1}{8}\left(\frac{H}{\sigma_\eta}\right)^2\right\} = \exp\left\{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{H}\right)^2\right\} \quad (1.1.10)$$

ここに、 $\bar{H}$  は次式で表される平均波高である。

$$\bar{H} = \frac{\int_0^\infty H \cdot p(H) dH}{\int_0^\infty p(H) dH} = \sqrt{2\pi} \sigma_\eta \quad (1.1.11)$$

### (1) 1/3 最大波と有義波

**図-1.5** に示す様に、測定波  $n$  個の中から、波高の大きい順に  $n/3$  個を選んで、これらの波高と周期を各々算術平均した値を 1/3 最大波高 (the highest one-third



**図-1.5** 波高のレイリー分布の例と有義波高の説明

wave height;  $H_{1/3}$ ) と 1/3 最大周期 (the highest one-third wave period;  $T_{1/3}$ ) と呼び、この波を 1/3 最大波 (the highest one-third wave) と呼ぶ。これらの値は、人間が目視観測で得た測定値の平均にほぼ等しいこと (人間が目視観測する場合、半分以上の小さな波を見逃していることを意味する) から、各々有義波高 (the significant wave height;  $H_s$ )、有義周期 (the significant wave period;  $T_s$ )、および、有義波 (the significant wave) とも呼んでおり、実際の波浪に対して単に波高、周期と呼ぶときは、有義波のそれらを指して、各種検討で多用されている。

有義波高と平均波高の関係は、レイリー分布の仮定の下、次の様になる。

$$H_{1/3} = H_s = 1.597 \dots \times \bar{H} \doteq 1.60 \times \bar{H} \quad (1.1.12)$$

### (2) 1/10 最大波

波高の大きい順に  $n/10$  個を選んで、これらの波高と周期を各々算術平均した値を 1/10 最大波高 ( $H_{1/10}$ ) と 1/10 最大周期 ( $T_{1/10}$ ) と呼び、この波を 1/10 最大波と呼ぶ。1/10 最大波高と有義波高、および、平均波高との関係は、レイリー分布の仮定の下、次の様になる。

$$H_{1/10} \doteq 1.271 \times H_s \doteq 2.031 \times \bar{H} \quad (1.1.13)$$

### (3) 最高波

波高が最大の波を最高波 (the highest wave) と呼び (最大波とも呼ばれているが、1/10 最大波などと混同されるので、避けた方がよい)、これの波高と周期を各々最高波高 ( $H_{\max}$ )、最高周期 ( $T_{\max}$ ) と呼び、港湾構造物や海洋構造物の設計に用いる。

最高波高と有義波高の関係は、これらの比の度数分布の最多値として式 (1.1.14)、度数分布の平均値として式 (1.1.15) の様になる。

$$\text{最多値の場合: } \frac{H_{\max}}{H_{1/3}} \doteq 0.706 \sqrt{\ln(n)} \quad (1.1.14)$$

$$\text{平均値の場合: } \frac{H_{\max}}{H_{1/3}} \doteq 0.706 \left\{ \sqrt{\ln(n)} + \frac{r}{2\sqrt{\ln(n)}} \right\} \quad (1.1.15)$$

ここに、 $r$  はオイラーの定数 (= 0.5772, Euler's constant) である。

式 (1.1.14) や式 (1.1.15) から、港湾構造物の場合は、波数  $n$  として 600 個相当を採用している。

$$\text{港湾構造物の場合: } H_{\max} = 1.8 \times H_{1/3} \quad (1.1.16)$$

さらに、海洋構造物の場合は、波数  $n$  として 3,000 個相当を採用している。

$$\text{海洋構造物の場合: } H_{\max} = 2.0 \times H_{1/3} \quad (1.1.17)$$

#### (4) 平均波

全測定波を算術平均した平均波高 ( $\bar{H}$ ) と平均周期 ( $\bar{T}$ ) は式 (1.1.18) で求められる。

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n}, \quad \bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (1.1.18)$$

また、全測定波高の二乗値を算術平均した値の平方根は、**波高の二乗平均平方根** ( $H_{rms}$ ) と呼ばれ、式 (1.1.19) で定義される。波浪エネルギーは波高の二乗に比例することから、波浪エネルギーに注目する検討の場合に用いられる。

$$H_{rms} = \sqrt{\overline{H^2}} = \left\{ \frac{\int_0^{\infty} H^2 \cdot p(H) dH}{\int_0^{\infty} p(H) dH} \right\}^{1/2} = \sqrt{8}\sigma_{\eta} = \sqrt{\frac{4}{\pi}}\bar{H} \quad (1.1.19)$$

#### (5) 周期の分布


Bretschneider [2] によると、風波の周期  $T$  の出現確率密度の分布は、式 (1.1.20) で表される。

$$p(T) = 2.7 \frac{T^3}{\bar{T}^4} \exp \left\{ -0.675 \left( \frac{T}{\bar{T}} \right)^4 \right\} \quad (1.1.20)$$

しかし、風波とうねりの合成など、ピークが2つある周期分布が顕著になる場合もあり、波高の場合の様な一般形は無い。それゆえ、実測データの解析から、次の様に見なされる。

$$T_{\max} \doteq T_{1/10} \doteq T_{1/3} \doteq (1.1 \sim 1.2) \bar{T} \quad (1.1.21)$$

### 4) スペクトル解析法による取扱い

波高 (4 m ~ 0.4 m) と周期 (12 s ~ 3 s) から成る規則波 (成分波 1 ~ 5) を重ね合わせした -1.6 に示す例のように、規則波を合成することで、波群性を有する不規則波を作り出せる。この様に、不規則波を様々な波高と周期を持った成分波の合成と考え、光のスペクトルと類似の概念から、各成分波が持つエネルギーの周波数上の分布で不規則波を表す方法を、**スペクトル解析法** (the spectral analysis method) と呼び、線形波に適用出来る。

#### (1) 周波数スペクトル

海の波浪を多様な波高と周期を有する成分波 (規則波) の重ね合せで考え、各々の成分波の持つエネルギーを周波数の関数として表したものを**周波数スペクトル** (a frequency spectrum) と呼ぶ。



図-1.6 規則波の合成による不規則波の表現

不規則波の水面高  $\eta$  を式 (1.1.22) に示す無数の規則波の合成で表す。

$$\eta = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(2\pi f_i t + \varepsilon_i) \quad (1.1.22)$$

ここに、 $a_i$ 、 $f_i$ 、 $\varepsilon_i$  は  $i$  番目の成分波の振幅 ( $=H/2$ )、周波数、および、位相であり、各成分波の振幅は小さく、成分波間の相互干渉は無く、位相はランダムに分布していると仮定する。

そして、第2.1節で解説する微小振幅波理論から、 $i$  番目の成分波 (規則波) の単位面積当りの全エネルギー  $E(f_i)$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2 \times \text{m}/\text{m}^2 = \text{N} \times \text{m}/\text{m}^2$ ] は式 (1.1.23) で表される。

$$E(f_i) = \frac{1}{8} \rho g H_i^2 = \frac{1}{2} \rho g a_i^2 \quad (1.1.23)$$

それゆえ、周波数  $f$  から  $f + df$  間の成分波の全エネルギーの程度を次式で表す。

$$\sum_{i=f}^{f+df} \frac{1}{2} a_i^2 = S(f) df \quad (1.1.24)$$

ここに、 $S(f)$  は、単位 [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ] で表された、周波数  $f$  に対応した単位周波数当りの波エネルギーの程度と言え、**周波数エネルギースペクトル密度関数** (a frequency energy spectral density function), 略して**周波数スペクトル**と呼ぶ。



## (2) 周波数スペクトルと代表波の関係

不規則波の平均エネルギー  $\bar{E}$  は、水面高  $\eta$  の経時変化データを用いて、式 (1.1.25) から求められる。

$$\bar{E} = \rho g \frac{\int_0^{T_{term}} \eta^2 dt}{T_{term}} = \rho g \overline{\eta^2} = \rho g \sigma_\eta^2 \quad (1.1.25)$$

ここに、 $\rho$  は海水の密度、 $g$  は重力加速度、 $T_{term}$  は水面高の観測時間、 $\sigma_\eta$  は水面高の標準偏差である。

式 (1.1.23)、式 (1.1.24) と式 (1.1.25) を比較すれば、波の周波数スペクトルを全周波数に渡って積分し、 $\rho g$  を掛けると、式 (1.1.25) に等しくなることが分かる。それゆえ、次式を得る。

$$\overline{\eta^2} = \sigma_\eta^2 = \int_0^\infty S(f) df \quad (1.1.26)$$

すなわち、周波数スペクトルが分かれば、式 (1.1.26) から水面高の標準偏差が求まり、式 (1.1.11)～式 (1.1.17) および式 (1.1.19) から各種代表波の波高を求められる。

さらに、平均周波数  $\bar{f}$  と平均周期  $\bar{T}$  は次の様に定義される。

$$\bar{f} = \left[ \frac{\int_0^\infty f^2 S(f) df}{\int_0^\infty S(f) df} \right]^{1/2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (1.1.27)$$

$$\bar{T} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (1.1.28)$$

ここに、 $m_0$  は  $f$  に対する 0 次モーメント  $\left( = \int_0^\infty S(f) df \right)$  であり、 $m_2$  は  $f$  に対する 2 次モーメント  $\left( = \int_0^\infty f^2 S(f) df \right)$  である。

ただし、波高データから求まる平均周期は、式 (1.1.28) から求まる値の 1.2 倍になる。

また、波高がレイリー分布に従うならば、式 (1.1.11)、式 (1.1.12)、および、式 (1.1.26) から、次の関係式を得る。周波数スペクトルの分布が求まれば、本式から有義波高を求められる。

$$H_{1/3} \doteq 4.004 \sqrt{\int_0^\infty S(f) df} = 4.004 \sqrt{\overline{\eta^2}} = 4.004 \eta_{rms} \quad (1.1.29)$$

ここで、 $\eta_{rms}$  は水面高の二乗平均平方根を意味する。

### (3) 代表的な周波数スペクトル

風が吹き続けると、風からエネルギーが水面近くの水塊に供給され、さざ波から波高と周期の大きな波へ発達する。この波の発達に係わる重要な物理量は、水面でのせん断力の大きさを支配する風速以外に、吹き続ける時間と距離が長くなるほど波の発達に繋がることから、吹送時間 (duration time) と吹送距離 (fetch) である。

ある吹送距離で、風波が定常状態まで発達するために必要な時間を最小吹送時間と呼ぶが、これ以降では、最小吹送時間に達しているものとして解説する。

#### (a) 光易Ⅱ型周波数スペクトル

光易 [3] は実験と実測データを用いて、有限吹送距離での風波の周波数スペクトル  $[m^2 \cdot s]$  を次の様に表した。これを光易Ⅱ型周波数スペクトル (the Mitsuyasu Type II frequency spectrum) と呼ぶ。

$$S(f) = 0.000858 g^2 f^{-5} \left( \frac{gF}{u_*^2} \right)^{-0.312} \times \exp \left\{ -1.25 \left( \frac{gF}{u_*^2} \right)^{-1.32} \left( \frac{u_* f}{g} \right)^{-4} \right\} \quad (1.1.30)$$

ここに、 $g$  は重力加速度、 $f$  は周波数、 $F$  は吹送距離、 $u_*$  は摩擦速度で式 (1.1.31) から求まる。

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{r_{10}^2 \rho_a U_{10}^2}{\rho_a}} = \sqrt{r_{10}^2} U_{10} \quad (1.1.31)$$

ここに、 $\tau$  は風による水面でのせん断力、 $\rho_a$  は空気の密度、 $r_{10}^2$  は摩擦係数 ( $U_{10}$  が 15 m/s 以上の場合、 $r_{10}^2 \doteq 0.0026$ )、 $U_{10}$  は海面上 10 m の平均風速である。

光易Ⅱ型周波数スペクトルの分布例を [図-1.7](#) に示す。吹送距離が長くなるほど、波のエネルギーが大きくなる (波高が大きくなる) と共に、エネルギーがピークになる周波数 (ピーク周波数と呼ぶ) が小さくなる。すなわち、ピークの周期が長くなる。

#### (b) プレットシュナイダー・光易周波数スペクトル

光易 [3] の式 (1.1.30) を、ピーク周波数  $f_p$  と有義周期との関係式 (1.1.32)、および、前出の式 (1.1.29) を用いて、設定が容易な有義波高と有義周期から周波数スペクトル  $[m^2 \cdot s]$  を求められるように書き直したのが、式 (1.1.33) である。

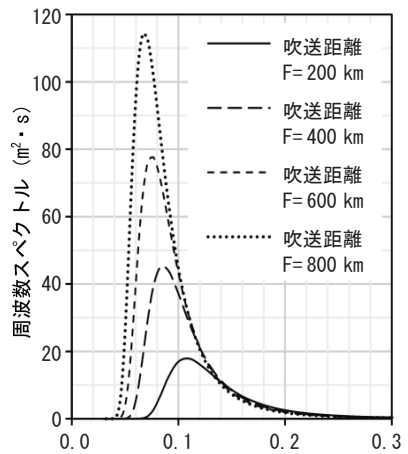
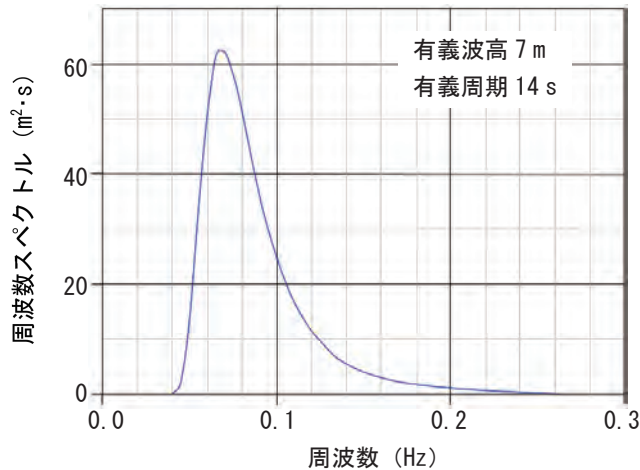


図-1.7 光易Ⅱ型周波数スペクトルの例  
(10 m 上空の風速が 15 m/s の場合)

$$T_{1/3} = \frac{1}{1.05 f_p} \quad (1.1.32)$$

$$S(f) = 0.258 H_{1/3}^2 (T_{1/3}^{-4} f^{-5}) \times \exp\{-1.03(T_{1/3} f)^{-4}\} \quad (1.1.33)$$

式 (1.1.33) は、Bretschneider [4] が提案した有限吹送距離での風波の周波数スペクトルの式と一致することから、**ブレットシュナイダー・光易周波数スペクトル** (the Bretschneider-Mitsuyasu frequency spectrum) と呼ばれ、有義波高 7 m, 有義周期 14 s の場合の例を **図-1.8** に示す。



**図-1.8** ブレットシュナイダー・光易周波数スペクトルの例

### (c) ピアソン・モスコビッチ周波数スペクトル

風波の波高と周期は、一定風速の下、吹送距離の増加と共に大きくなるが、やがて砕波などによるエネルギー損失と、低周波数側から高周波数側へのエネルギー非線形伝達によって、風から供給されるエネルギーとの間でエネルギー平衡状態になる。Pierson and Moskowitz [5] は、北大西洋での観測データを用いて、十分に発達してエネルギー平衡状態になった風波の周波数スペクトル  $[m^2 \cdot s]$  を次式で表した。

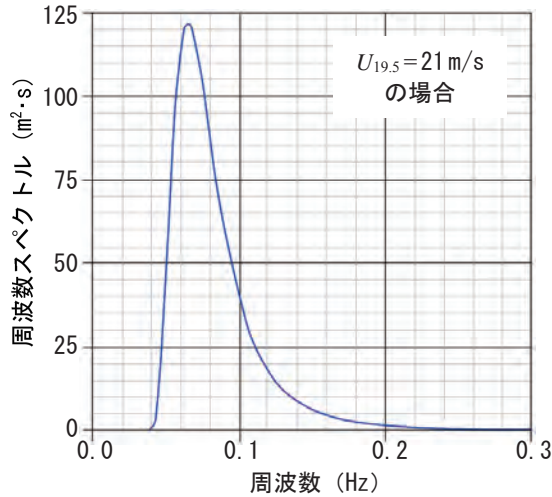
$$S(f) = \frac{0.00810}{(2\pi)^4} g^2 f^{-5} \times \exp\left\{-0.74 \left(\frac{g}{2\pi U_{19.5} f}\right)^4\right\} \quad (1.1.34)$$

ここに、 $U_{19.5}$  は海面上 19.5 m 上空の平均風速であり、式 (1.1.35) を用いて求められる。

$$U(z) = U_{10} \left(1 + 5.75 \sqrt{r_{10}^2} \log \frac{z}{10}\right) \quad (1.1.35)$$

ここに、 $z$ は海面上の高さ [m]、 $U_{10}$ は $z=10$  mでの風速、 $r_{10}^2$ は摩擦係数 ( $U_{10}$ が15 m/s 以上の場合、 $r_{10}^2 \doteq 0.0026$ ) である。

式(1.1.34)は、ピアソン・モスコビッチ周波数スペクトル (the Pierson-Moskovitz frequency spectrum) と呼ばれ、海面上 19.5 m 上空の風速が 21 m/s の場合の例を **図-1.9** に示す。



**図-1.9** ピアソン・モスコビッチ周波数スペクトルの例

(d) 合田による修正ジョンスワプ周波数スペクトル

Hasselmann et al. [6] は、北海で観測された波浪データを用いて、JONSWAP 周波数スペクトルと呼ばれる風波に対するスペクトル密度関数を提案したが、合田 [7] は不規則波数値シミュレーション結果を踏まえて、設定が容易な有義波高と有義周期で周波数スペクトル [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ] を表せる式 (1.1.36) を提案した。本式は、式中のスペクトルの先鋭度を表す指標  $\gamma$  を選ぶことで、広範囲のスペクトル形状に使用でき、十分に発達した風波に対しては  $\gamma=1$  を、数千 km 伝播したうねりに対しては  $\gamma=10$  を選べば良い。

$$S(f) = \frac{0.06238(1.094 - 0.01915 \times \ln \gamma) \gamma^\alpha}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \times H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \times \exp\left\{-1.25(T_p f)^{-4}\right\} \quad (1.1.36)$$

ここに、 $\alpha$  は式 (1.1.37) から求まる指数、 $T_p$  は式 (1.1.38) から求まるピーク周期、 $\beta$  は式 (1.1.39) で設定できる係数で、 $f_p$  はピーク周波数 ( $T_p$  の逆数) である。

$$\alpha = \exp\left\{\frac{-(T_p f - 1)^2}{2\beta^2}\right\} \quad (1.1.37)$$

$$T_p = \frac{T_{1/3}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}} \quad (1.1.38)$$

$$\beta = \begin{cases} 0.07 & : f \leq f_p \\ 0.09 & : f \geq f_p \end{cases} \quad (1.1.39)$$

式(1.1.36)は、修正ジョンスワプ周波数スペクトル (the Modified JONSWAP frequency spectrum) と呼ばれ、有義波高 7 m、有義周期 14 s の場合の例を図-1.10 に示す。

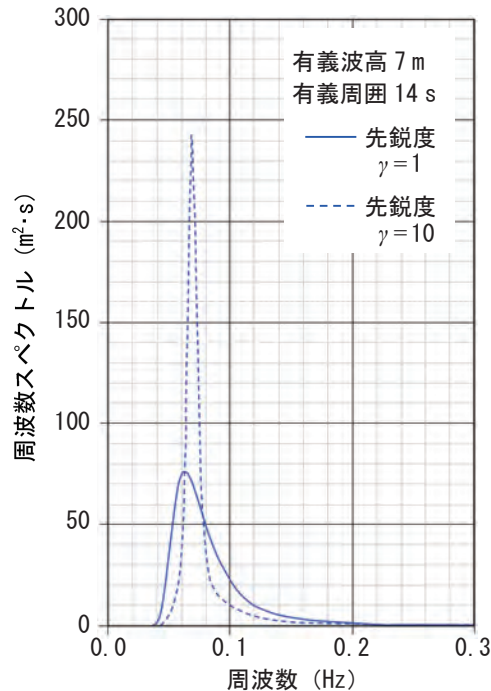


図-1.10 修正ジョンスワプ周波数スペクトルの例

#### (e) 二山ピークの周波数スペクトル

風波とうねりが共存するため、ピークが二つある周波数スペクトルになる場合がある。この場合は、一山ピークの広範囲のスペクトル形状に適用できる修正ジョンスワプ周波数スペクトルや、Huang et al. [7] が提案したワロップス周波数スペクトル (the Wallops frequency spectrum) を用いて、風波とうねりの周波数スペクトルを各々求め、線形的に重ね合わせるにより表現出来る。実施例には種本ら [8] や Ochi and Hubble [9] の研究がある。

#### (4) 方向スペクトル

実際の波浪は、波高と周期だけでなく、波向についても異なる成分波を合成したものになる。それゆえ、波浪の持つエネルギー（波高の二乗に比例する）を周波数

と波向の関数として表したものを波浪の**方向スペクトル** (a directional spectrum) と呼ぶ。

この方向スペクトルは、式 (1.1.40) に示す様に、前出の周波数スペクトル  $S(f)$  と波向角  $\theta$  方向の分布状況を表す**方向分布関数**  $G(f, \theta)$  の積で定義できる。

$$S(f, \theta) = S(f) \times G(f, \theta) \quad (1.1.40)$$

方向分布関数については、Arthur [10] など幾つかの研究が有るが、ここでは Longuet-Higgins et al. [11] が提案し、光易 [12] が補強した方向分布関数を紹介する。

方向分布関数は次元を持たず、式 (1.1.41) を満足するように決定する必要があるが、Longuet-Higgins et al. [11] が、外洋で観測したデータから、式 (1.1.42) を提案した。

$$\int_0^{2\pi} G(f, \theta) d\theta = 1 \quad (1.1.41)$$

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2S} \frac{\theta}{2} \quad (1.1.42)$$

ここに、 $S$  はエネルギー方向分布の集中度を表すパラメータ、 $G_0$  は  $G(f, \theta)$  を正規化するために式 (1.1.43) で定義される係数であり、 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$  が  $-\pi \sim +\pi$  の場合は、式 (1.1.44) になる。

$$G_0 = \left\{ \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S} \left( \frac{\theta}{2} \right) d\theta \right\}^{-1} \quad (1.1.43)$$

$$G_0 = \frac{1}{\pi} 2^{2S-1} \frac{\{\Gamma(S+1)\}^2}{\Gamma(2S+1)} \quad (1.1.44)$$

ここに、 $\Gamma(\ )$  はガンマ関数である。

そして、光易ら [12] は、実測データを用いて式 (1.1.42) の妥当性を確認すると共に、エネルギー方向分布の集中度パラメータ  $S$  を求めるために次式を提案した。

$$S \doteq \begin{cases} 14 f_{p^*}^{-6.7} f_*^4 & (f_* \leq f_{p^*}) \\ 14 f_*^{-2.7} & (f_* > f_{p^*}) \end{cases} \quad (1.1.45)$$

ここに、 $f_*$  は式 (1.1.46) で定義される無次元周波数、 $f_{p^*}$  は式 (1.1.47) で定義される無次元ピーク周波数である。

$$f_* = \frac{2\pi f U_{10}}{g} \quad (1.1.46)$$

$$f_{p^*} = \frac{2\pi f_p U_{10}}{g} \doteq 18.8 \times \left( \frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{-0.330} \quad (1.1.47)$$



ここに、 $U_{10}$ は海面上 10 m の平均風速、 $F$ は吹送距離である。

さらに、合田・鈴木 [13] は、エネルギー方向分布の集中度パラメータ  $S$  を、周波数、ピーク周波数、および、光易らの実測データから求められた式 (1.1.48) で定義される集中度パラメータの最大値  $S_{\max}$  で表す式 (1.1.49) を提案した。ここで、ピーク周波数  $f_p$  は、有義周期を用いて式 (1.1.50) から求められる。

式 (1.1.42)、式 (1.1.44)、および、式 (1.1.48)～式 (1.1.50) から求まる方向分布関数を、**光易型方向分布関数**と呼び、有義波高 7 m、有義周期 14 s で、 $S_{\max}$  が 25 の場合の例を **図-1.11** に示す。

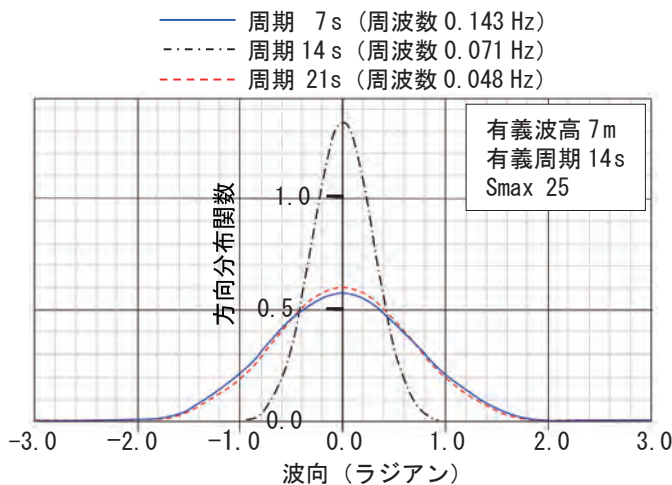
$$S_{\max} = 11.5 \left( \frac{2\pi f_p U_{10}}{g} \right)^{-2.5} \tag{1.1.48}$$

$$S = \begin{cases} S_{\max} \times (f/f_p)^5 & (f \leq f_p) \\ S_{\max} \times (f/f_p)^{-2.5} & (f > f_p) \end{cases} \tag{1.1.49}$$

$$f_p = \frac{1}{1.05T_{1/3}} \tag{1.1.50}$$

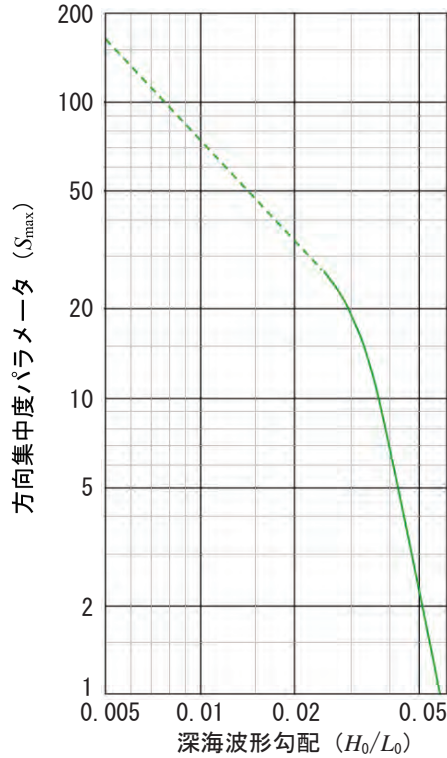
式 (1.1.48) の精度は十分に確認されておらず、対象波に対する適切な  $U_{10}$  の設定も簡単でないことから、合田は、集中度パラメータの最大値  $S_{\max}$  として、次の値を使うことを推薦している。

- ❖ 風波の場合 ----- 10
- ❖ 減衰距離の短いうねりの場合（波形勾配が比較的大きい） -- 25
- ❖ 減衰距離の長いうねりの場合（波形勾配が比較的小さい） -- 75

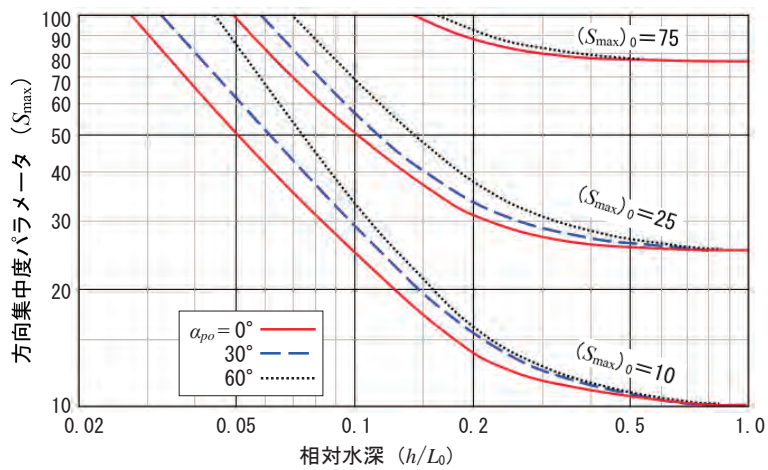


**図-1.11** 光易型方向分布関数の例

また、合田・鈴木が求めた集中度パラメータの最大値と波形勾配との関係を **図-1.12** に、同最大値と相対水深との関係を **図-1.13** (図中の  $\alpha_{po}$  は沖側の等深線に対する不規則波の卓越入射角であり、 $(S_{max})_0$  は沖側の等深線での集中度パラメータの最大値である) に示す。



**図-1.12** 方向集中度パラメータと波形勾配との関係 (合田・鈴木 [13] より)



※図中の  $\alpha_{po}$  は沖側の等深線に対する不規則波の卓越入射角であり、 $(S_{max})_0$  は沖側の等深線での集中度パラメータの最大値である。

**図-1.13** 方向集中度パラメータと相対水深との関係 (合田・鈴木 [13] より)

### 3.3 本数値計算の実行方法

#### 1) プログラムの実行方法

数値計算を実行するためには、ソース・プログラムから作られた実行形式プログラムと、計算条件等必要なデータが書き込まれた入力データ群と、出力された計算結果のファイルを蓄えるためのサブホルダー**output**（空ホルダー）を用意しなければならない。

そして、本数値計算用ホルダーの中に実行形式プログラムと入力データ群と空ホルダー**output**を置いて、この実行形式プログラムをダブルクリックすれば計算が始まり、計算結果はサブホルダー**output**内に蓄えられる。あるいは、同ホルダーの中で、実行形式プログラムの名前と命令文“**pause**”を書込んだバッチ・ファイルを作って、これをダブル・クリックすれば計算が始まり、サブホルダー内に蓄えられるだけでなく、異常終了した場合にエラーメッセージが残され、原因究明に役立つ。このバッチ・ファイルは、複数種の計算を自動的に実行する場合にも有効である。

対象のソース・プログラムのファイル名は、計算プログラム **ts\_runupscour5.for** と配列を制御するヘッダーファイル **runupscour5.h** であり、Intel などの最新 FORTRAN コンパイラを用いて、実行形式プログラムを作れる。ただし、**runupscour5.h** の中で、コンピュータのメモリ容量を必要以上に取らない様にするため、岸沖方向の格子最大数(**nx**)を 1100、沿岸方向の格子最大数(**ny**)を 1600 としているが、これより広い領域で計算する場合には、**parameter** 文の **nx** と **ny** を 1100 と 1600 から希望の数値へ変える必要がある。このように、**runupscour5.h** の格子数を変えた場合や、**ts\_runupscour5.for** の中身を変えた場合は、これらのヘッダーファイルと計算プログラムが同じホルダーにある状態でコンパイルして、新しい実行形式プログラム（既存の実行形式プログラムは **fd=0.01gn2d.exe** と **fd=1.0gn2d.exe** であるが、新しいプログラムは名前を変えた方が、混乱しなくて良い）を作り直さなくてはいけない。そして、全入力データ群と **output** が存在するホルダーに移す必要がある。

なお、コンパイル法には、**debug モード**と **release モード**があり、ソース・プログラムにミスが無いことが分かっている場合は、**release** モードでコンパイルした方が、計算速度が速くなる。

そして、入力データの作成法は以下の通りである。

#### 2) 入力データの作成法

##### (a) 標高（水深・地盤高）の格子データ

水位がほぼ一様と見なせる沖合（最大津波高の 2 倍より十分に深い水深）から、陸側浸水限界域（最大津波高の 2 倍より十分に高い地盤高）までの標高の格子データを作成する。本数値プログラムでは、図-A.3.3 に示す様に、沖側に座標原点を置き、岸沖方向を **x** 軸とし、沿岸方向を **y** 軸とする。格子間隔は堤防の厚みや家屋の密集度の違いを考慮出来るように 5m~20m 程度とする。基準高は計算対象時間の平均潮位などにすれば良い。



## (b) その他の格子データ

地表面粗度・建物密集度（土地利用）・地形変化計算範囲情報・掃流砂量係数・底質中央粒径の分布状況を考慮したい場合は、標高データと同じフォーマット（格子間隔長、x方向とy方向の格子数が同じでなくてはいけない）で、下記のように作成する。

- ① 地表面粗度：マンシングの粗度係数の二乗のことで、耕地なら  $0.06 \times 0.06$ 、道路ならば  $0.027 \times 0.027$ 、荒地ならば  $0.05 \times 0.05$  が妥当である。
- ② 建物占有率：各格子面積に占める建物等による非浸水部の面積比のことで、ビルディング密集地で70%程度、民家で30%程度、森林で5%程度、荒地で1%が妥当である。
- ③ 地形変化計算範囲情報：地形変化を計算したい範囲を示す情報で、標高の格子データに対応させて、計算する格子には0を立て、計算しない格子には1を立てる。
- ④ 掃流砂量係数：各格子に対して、0～60の数値を設定する。
- ⑤ 底質中央粒径：各格子に対して、入力データの桁数を減らすために、mm単位の値を10倍して、粒径値を設定する。すなわち、0.005mmならば0.05、0.2mmならば2を設定する。そして、データ読み取り時に1/10に戻される。

## (c) 計算コントロール用データ

計算を制御するための基本条件（計算時間間隔  $\Delta t$  の上限値、計算時間、出力間隔、水位分布の経時変化、読み込むべき格子データの名前など）のデータファイルを作成する。

水位分布の経時変化データは、浅海域を含む浸水計算をおこなうために、沖側境界（x方向の格子番号  $i=1$ 、y方向の格子番号  $j=1 \sim ny$ ）から入力する水位データで、対象海岸に近い観測所の潮位記録や、既存の数値計算結果から作成出来る。

なお、海岸堤防・護岸または海岸自然崖から越流量を線流量として入力させて、陸側だけの浸水計算を行えるように数値プログラムを修正することは容易である。しかし、海岸堤防・護岸からの戻り流れの排水処理が、計算プログラム上困難であることに注意する必要がある。この場合の越波量の算定は、「海岸事業の費用対効果分析手法（旧四省庁編集：平成9年度版）」などで紹介する算定式や算定図が使える。

## 3) 入力データ設定の具体例

下リストの赤枠の全てが、計算実行のために同一ホルダーに用意すべき実行形式プログラム（ $f_a=0.01gn2d.exe$  か、 $f_a=1.0gn2d.exe$  のどちらか一つが良い；前者は陸上の抵抗係数を  $0.01gn^2/d^{1/3}$  で計算する場合、後者は同係数を  $gn^2/d^{1/3}$  で計算し、同係数が0.1以上の時に0.1に固定する場合）と入力データファイル（7種類、ただし、本例では、地表面粗度係数の二乗値の分布データ **rough2.mdt** を無視している）、および、出力データを蓄えるサブホルダー

(output) である。checkwrite.dat と depth.mdt は、コンピュータが計算時に自動的に作る確認用ファイルである。

サブホルダーおよびファイルの名前	サブホルダーおよびファイルの内容
output	計算結果出力用のサブホルダーで、計算前に作っておく
01now.mdt	計算範囲指定データファイル(0 は地形変化計算する, 1 は計算しない)
brate.mdt	格子毎の建物占有率データファイル (耕作地 1% ~ 市街地 90%)
checkwrite.dat	ctl ファイルが正しく読まれたかを確認するために作られるファイル
csednow.mdt	掃流砂量係数データのファイル
d50now.mdt	底質の中央粒径データのファイル
depth.mdt	標高データが正しく読まれたかを確認するために作られるファイル
groundnow.mdt	標高 (水深・地盤高) データファイル
fd=0.01gr2d.exe	$f_d$ の式(A-3-4)の $\alpha$ が 0.01 の場合の実行形式プログラム
fd=1.0gr2d.exe	$f_d$ の式(A-3-4)の $\alpha=1, f_d < 0.1$ の場合の実行形式プログラム
runupscour.ctl	数値計算に必要な基本条件ファイル
runupscour5.h	計算プログラム用ヘッダーファイル
ts_runupscour5.for	フォートランの計算プログラム

図-A.3.4 本数値計算用ホルダーの例

#### (a) output (出力サブホルダー)

計算出力データである地盤高 (bed\_.mdt, 単位は m), 地盤高変化量 (dbed\_.mdt, 単位は m), 水深・浸水深 (eta\_.mdt, 単位は m), 岸沖方向流速 (u\_.mdt, 単位は m/s) を収めるサブホルダーであり, **output** という名前で計算実行前に本数値計算用ホルダーの中で必ず用意する。

#### (b) 標高 (水深・地盤高) データ

本データファイルの例が **groundnow2.mdt** (図-A.3.5 参照) であり, 1 行目に  $x$  方向 (岸沖方向) と  $y$  方向 (沿岸方向) の格子数 (例では,  $1085 \times 1501$ ), 原点の  $x$  方向と  $y$  方向の座標 (通常は 0.0,0.0), 格子間隔長 (通常は  $\Delta x=5 \sim 20\text{m}$ ) を設定する。2 行目以降に水深・地盤高 (水面上プラス値と水面下マイナス値が標準, 単位は m) を設定する。

なお, 付属の本数値計算プログラムと一緒にあるサンプルデータは, 格子間隔長が 12m の **groundnow2.mdt** では計算時間が非常に長くなるので, 格子間隔長 25m (格子数  $521 \times 721$ ) の **groundnow.mdt** に合わせて用意してある。

計算プログラムでの読み込みフォーマットは次の通りである：



```

read(1,*) imax,jmax,xor,yor,dx
do i = 1, imax
read(1,'(10f8.2)') (bed(i,j,2),j=1,jmax)
enddo

```

### (c) 建物占有率データ

建物占有率は、格子内の建物や木が格子の全面積 ( $\Delta x \times \Delta x$ ) に対して占める比率(1~99%)であり、運動方程式の中で粗度として評価される。本データファイルの例が **brate.mdt** (図-A.3.6 参照)であり、1行目には中身の確認用に標高データと同じ情報を設定すれば良いが、計算実行時には読み飛ばす。2行日以降に建物占有率 (1~99, 単位は%) を設定する。読み込みフォーマットは次の通りである：

```

read(1,*)
do i = 1, imax
read(1,'(10f8.2)') (bldr(i,j),j=1,jmax)
enddo

```

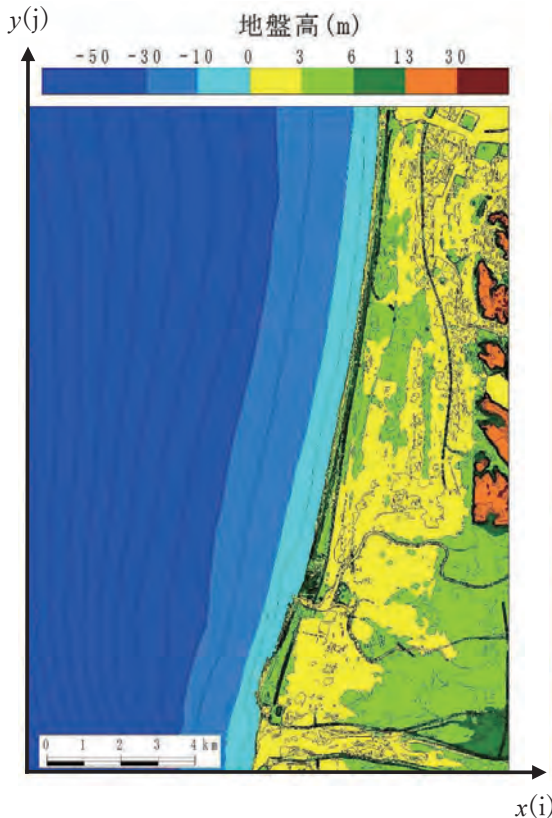


図-A.3.5 標高 (水深・地盤高) 分布の例

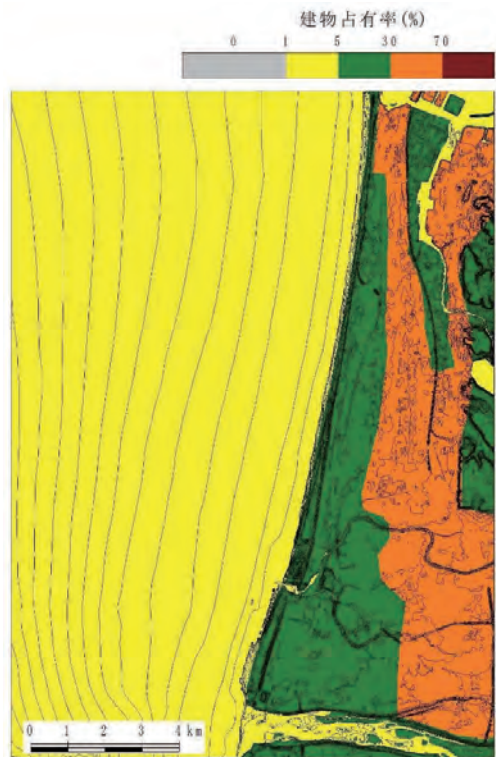


図-A.3.6 建物占有率分布の例



#### (d) 計算範囲指定データ

本データファイルの例が **01now.mdt** (図-A.3.7 参照) であり, 1 行目は読み飛ばすので, 2 行目以降に 0・1 データ (地形変化を計算する場合は 0, 計算しない場合は 1, 単位は無し) を, 標高データに対応して設定する. 読み込みフォーマットは次の通りである:

```
read(1,*)
do i = 1, imax
read(1,'(10f8.2)')(s_l(i,j),j=1,jmax)
enddo
```

#### (e) 掃流砂量係数データ

掃流砂量係数  $C_B$  は, 実測データを使う検証シミュレーションから求めるか, 図-A.3.1 と 図-A.3.2 より求めた係数  $C_b$ ,  $C_l$ ,  $C_2$  を使って式(A-3-16)から求める. 本データファイルの例が **csednow.mdt** (図-A.3.8 参照) であり, 1 行目は読み飛ばすので, 2 行目以降に掃流砂量係数 (1~60, 単位は無し) を設定する. 読み込みフォーマットは次の通りである:

```
read(1,*)
do i = 1, imax
read(1,'(10f8.2)')(sedc(i,j),j=1,jmax)
enddo
```

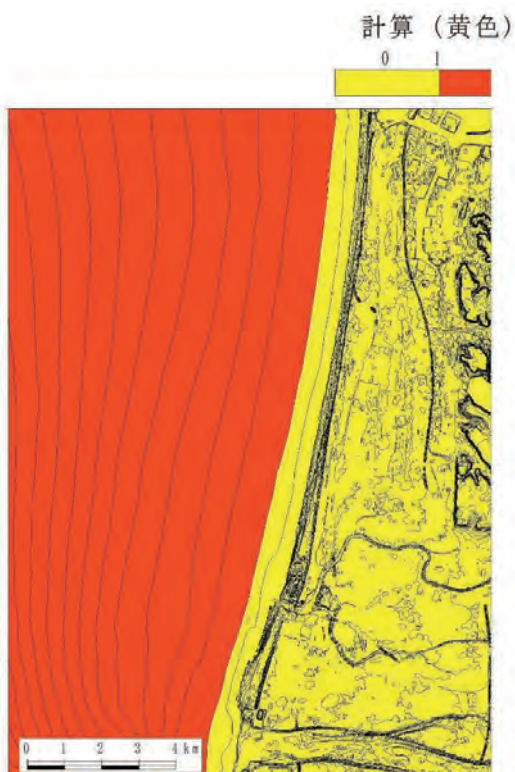


図-A.3.7 計算範囲指定データ(01)分布の例

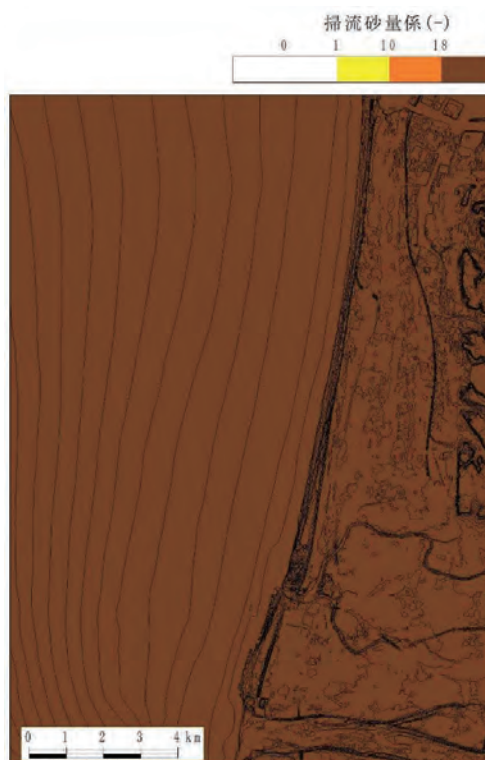


図-A.3.8 掃流砂量係数分布の例

### (f) 底質の中央粒径データ

本データファイルの例が **d50now.mdt** (図-A.3.9 参照) であり, 1 行目は読み飛ばすので, 2 行目以降に底質の中央粒径 (mm 単位での中央粒径値を 10 倍する, 例えば 0.005mm ならば 0.05, 0.2mm ならば 2 を入力) を設定する. データ読取り時に 1/10 に戻される. 読み込みフォーマットは次の通りである:

```
read(1,*)
do i = 1, imax
read(1,'(10f8.5)')(d50(i,j),j=1,jmax)
enddo
```

### (g) 計算コントロール用データ

数値計算をコントロールするためのデータファイルの例が **runupscour.ctl** で, 中身は次のリストの通りである:

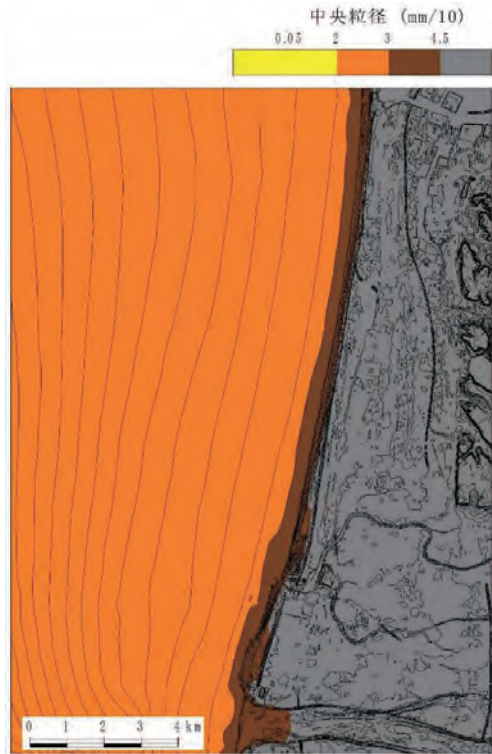


図-A.3.9 底質の中央粒径 (mm/10) 分布の例

```
0.5 1980. 60.0 dt-upper limit(sec), duration(sec), output interval(sec)
8.00 6.00 11 water height(m) at j=1 & max, the discreted number of an incident wave
0.0 0.15 0.3 1.0 0.53 0.15 0.15 0.24 0.05 -0.10 -0.14 time-series of the incident wave
groundnow.mdt ground height data (m)
0 iground, if the seaward of ground height data is minus, iground=0
0 0.0025 iksw, square of roughness coefficient in the case of iksw=0
rough2.mdt data of the quare of roughness coefficient that are used in the case of iksw=1
1 1.0 irsw, mean ratio (%) of building area in a mesh in the case of irsw=0
brate.mdt ratio (%) of building area in each mesh that is used in the case of irsw=1
yes ! sediment transport option, yes or no
0|now.mdt ! '0' is a mesh where topographical change is calculated, '1' is a mesh where isn't calculated
1 11.0 ! ksedc, mean value of sediment rate coefficient in the case of ksedc=0
csednow.mdt ! sediment rate coefficients that are used in the case of ksedc=1
0.0002 ! mean value of median grain size (m) in the case of ksedc=0
d50now.mdt ! median grain sizes (mm/10) that are used in the case of ksedc=1
0.4 ! mean porosity of the sand layer
2:58 ! relative density of sand
```

- ① “0.5sec”は時間間隔  $\Delta t$  の上限値であり, 安定した計算結果を得るために 0.5sec 以下で設定する.
- ② “1980sec”は対象計算ケースの全計算時間であり, 必要時間に合わせて設定する.
- ③ “60sec”は出力間隔であり, 記憶容量オーバーにならないよう, かつ, 使用目的を考えながら設定する. 通常は 60~300sec の間であろう.

- ④ “8.00m”と“6.00m”は沖側境界  $(i,j) = (1,1)$  と  $(i,j) = (1,最大値)$  での入力津波の最大水位であり、沖側境界上で内挿分布させる。
- ⑤ “11”は入力津波の水位経時変化の分割数であり、最大“20”まで増やせる。
- ⑥ “0.0, 0.15, 0.3, 1.0, . . .”は入力津波の沖側境界での計算開始から終了までの水位と最大水位との比を用いた経時変化データであり、その総数は上記の分割数（現在は“11”）と一致する必要がある。また、この経時変化データの全時間が上記の“1980sec”と一致する。最大水位で正規化する理由は、時間的な水位変化のパターンはオープンな海岸で100km 離れてもあまり変化しないと見なせるが、沖側境界の水深が変われば、水位そのものは相当に変化するはずで、この変化を最大水位で制御することで、省力化を図った。
- ⑦ **groundnow.mdt** は標高データファイルである。1行目で岸沖方向(x)と沿岸方向(y)の格子点数、原点座標(通常は  $x,y=0.0,0.0$ )、および、格子間隔(通常は 5~20m)を読み込む。2行目以降で、水深・地盤高データ(単位は m)を読み込む。また、別の名前を付けた標高データファイルを用いる場合は、その名前に書き変える必要がある。
- ⑧ “iground”は、標高データが水面上でプラス、水面下でマイナスの場合に、“0”とする。逆の場合は“1”とする。
- ⑨ “iksw”は、地表面粗度係数の分布を細かく設定しない場合、“0”とする。ただし、標準的な地表面粗度係数の二乗として、この“0”の右側に必ず“0.0025”程度を入力しておく。
- ⑩ **rough2.mdt** は、“iksw”が“0”の場合、使わずに読み飛ばされるので、中身は空で構わないが、行がズレルことを防ぐためカットしてはならない。一方、“iksw”が“1”の場合は、このデータファイル(地表面粗度係数の二乗値の分布)を読みに行くので、底質の中央粒径データファイルと同じフォーマットで格子毎の粗度係数の二乗値の分布データを作って、標高データ等のファイルの取まったホルダーに入れておかねばならない。
- ⑪ “irsw”は、格子毎の建物占有率の違いを考慮しない場合、“0”とする。ただし、平均的建物占有率を、この“0”の右側に必ず設定する。現在の平均的建物占有率は荒地の場合の“1.0”になっているが、“irsw”が“1”の場合は読み飛ばされる。
- ⑫ **brate.mdt** は、“irsw”が“0”の場合、使わずに読み飛ばされるので、中身は空で構わないが、行がズレルことを防ぐためカットしてはならない。一方、“irsw”が現在の様に“1”の場合は、このデータファイル(建物占有率の細かな設定情報)を読みに行くので、事前に作って、標高データ等のファイルの取まったホルダーに入れておかねばならない。
- ⑬ “yes”は地形変化計算を希望する時に設定する。希望しない場合は“no”を設定すれば、以下のデータを読み飛ばし、地形変化計算を実行しなくなる。
- ⑭ **01now.mdt** は全計算領域内で地形変化計算を行う範囲を指定するデータファイルであり、“0.0”が立っている格子では計算し、“1.0”が立っている格子では計算しない(コンクリートやアスファルトで被覆されている場合など、地形変化を無視できる領域を想定)。

- ⑮ “ksedc”は、格子毎の掃流砂量係数と中央粒径の違いを考慮しない場合、“0”とする。ただし、平均的掃流砂量係数を、この“0”の右側に必ず設定する。現在の平均的掃流砂量係数は細砂の場合の“11”になっているが、“ksedc”が“1”の場合は読み飛ばされる。
- ⑯ **csednow.mdt** は、“ksedc”が“0”の場合、使わずに読み飛ばされるので、中身は空で構わないが、行がズレルことを防ぐためカットしてはならない。一方、“ksedc”が現在の様に“1”の場合は、このデータファイル（掃流砂量係数の細かな設定情報）を読みに行くので、事前に作って、標高データ等のファイルの収まったホルダーに入れておかねばならない。
- ⑰ “0.0002m”は、底質の平均的中央粒径であり、“ksedc”が“0”の場合に使われ、“ksedc”が“1”の場合は読み飛ばされる。ただし、行がズレルことを防ぐためカットしてはならない。
- ⑱ **d50now.mdt** は、“ksedc”が“0”の場合、使わずに読み飛ばされるので、中身は空で構わないが、行がズレルことを防ぐためカットしてはならない。一方、“ksedc”が現在の様に“1”の場合は、このデータファイル（中央粒径の細かな設定情報）を読みに行くので、事前に作って、標高データ等のファイルの収まったホルダーに入れておかねばならない。
- ⑲ “0.4”は砂層の空隙率である。
- ⑳ “2.58”は底質の密度である。

ただし、付属の本数値計算プログラムと共に用意したサンプルデータは、実際の計算に用いた格子間隔長 12m のデータ (**groundnow2.mdt** など) では計算時間が非常に長くなるので、格子間隔長 25m (格子数 521×721) で作られている。



#### 4) 出力結果の具体例

サブホルダー **output** に収められた出力ファイルの内部は、1行目に、 $x$  軸方向と  $y$  軸方向の格子点数、原点の  $x$  座標と  $y$  座標（単位は m）、格子間隔（単位は m）が書かれている。2行目以降に、 $i=1$  の  $j=1$  ~ 最大値での計算値、次に  $i=2$  の  $j=1$  ~ 最大値での計算値、以下この順番で計算値（単位は m や m/s）が出力されている。

図-A.3.10~A.3.12 は、標高データに **groundnow2.mdt** を用いて計算した結果の一部を図化したものである：

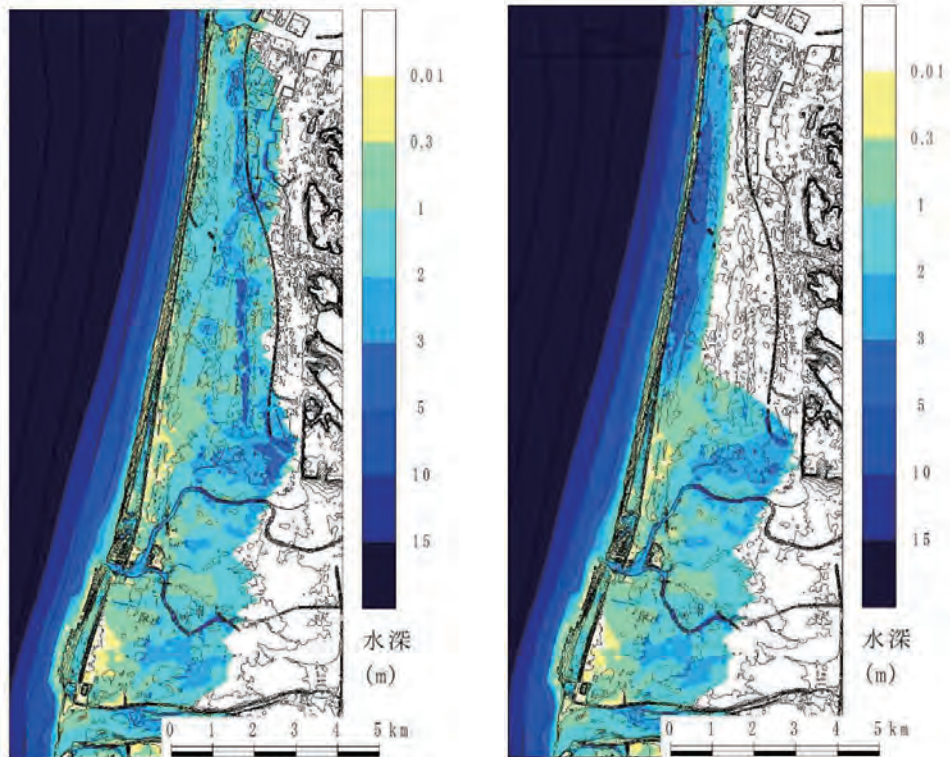


図-A.3.10 計算開始 22 分後の水深・浸水深（左図は  $f_d=0.01gn^2/d^{1/3}$ ，右図は  $f_d=gn^2/d^{1/3}<0.1$ ）の例

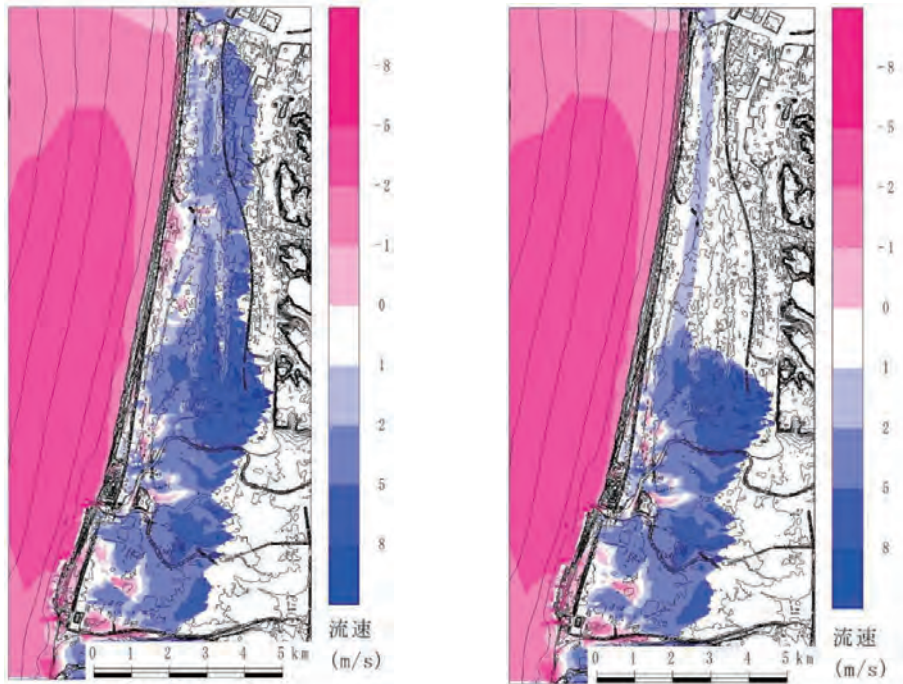


図-A.3.11 計算開始 22 分後の岸沖方向流速(左図は  $f_d=0.01gn^2/d^{1/3}$ , 右図は  $f_d=gn^2/d^{1/3}<0.1$ ) の例

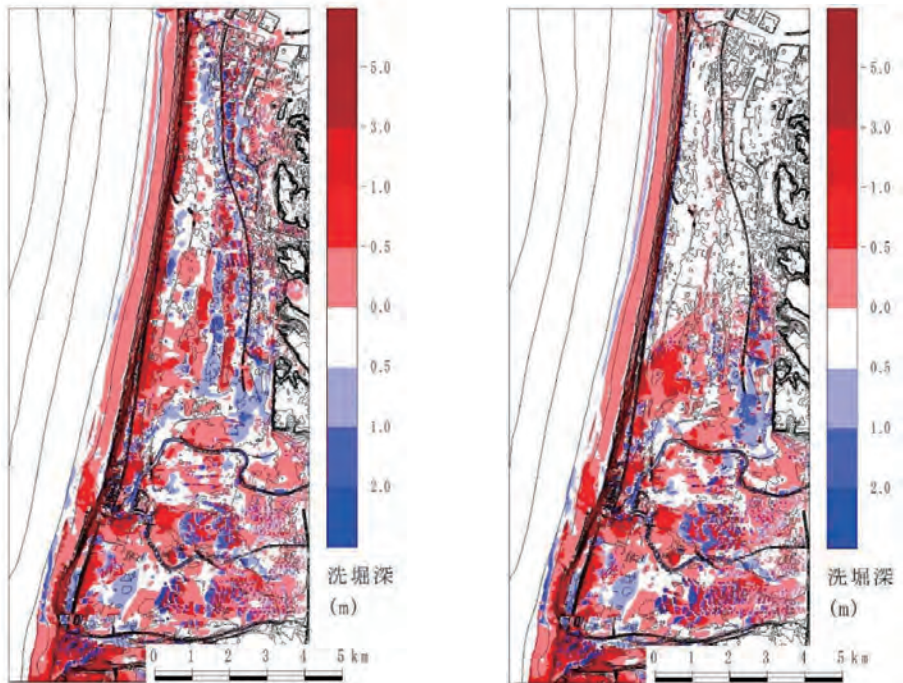


図-A.3.12 計算開始 33 分後 (津波の遡上モード終了後) の地盤高変化量 (左図は  $f_d=0.01gn^2/d^{1/3}$ , 右図は  $f_d=gn^2/d^{1/3}<0.1$ ) の例

### 3.4 津波による海岸地形変化数値予測モデルの参考文献

- 1) Yamamoto, Y. : Design Process of Coastal Facilities for Disaster Prevention, *Proceedings of School of Engineering of Tokai University*, Vol.31, 2006, pp.11-19.
- 2) 山本吉道, ウィブール ウッチャン, 有川太郎 : 津波による海岸被害の予測方法の改良, 土木学会海岸工学論文集, 第55巻, 2008, pp.301-305.
- 3) 山本吉道, 成吉兼ニ, ブタンカ : 津波の戻り流れによる海岸洗掘・侵食予測方法の改良, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.B2-65, 2009, pp.511-515.
- 4) 成吉兼ニ, 山本吉道, 石井俊輔 : 津波による護岸前面洗掘と海底地形変化の予測モデルの改良, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.4, 2012, pp.I\_1179-I\_1185.
- 5) 山本吉道, 早川眞粹, S M Ahmadi : 巨大津波に対する浸水被害検討法と陸側洗掘被害予測法, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, 2018, pp.I\_193-I\_198.
- 6) 山本吉道, 早川眞粹, S M Ahmadi : 巨大津波による陸上地形変化の合理的な数値予測法の提案, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.75, No.2, 2019, pp.I\_697-I\_702.
- 7) Ahmadi, S.M., Yamamoto, Y. and Ca, V.T. : Rational Evaluation Methods of Topographical Change and Building Destruction in the Inundation Area by a Huge Tsunami, *J. Mar. Sci. Eng.*, 2020, 8, 762. doi:10.3390/jmse8100762







## 索引

- 和文**
- あ**
- アーセル数……………54  
 アウターライズ型……………170  
 青潮……………302  
 赤潮……………302  
 上げ潮……………157  
 アスペリティ……………181  
 圧電素子……………316  
 後浜……………196  
 安政3年の大風……………165
- い**
- 1日2回潮……………157  
 移動限界水深……………205  
 イリバレン数……………67
- う**
- ウェーブ・セットアップ……………144  
 ウェーブ・セットダウン……………144  
 うねり……………17
- え**
- 永祚の風……………165  
 エクマン・スパイラル……………153  
 エクマン輸送……………153  
 エネルギー損失率……………65  
 沿岸砂洲……………196  
 沿岸漂砂移動高……………213  
 沿岸流……………145
- お**
- オイラー的取扱い……………42  
 大潮……………157  
 大津波警報……………290  
 沖合装置……………316  
 沖波波高……………60  
 沖浜……………196
- か**
- カーネル……………222  
 海岸線……………196  
 海岸法……………165  
 海岸流……………142
- 海溝……………173  
 海溝型……………170  
 回折係数……………63  
 海藻……………310  
 海草……………310  
 海浜流……………142  
 海浜流による水深変化モデル……………218  
 海流……………142  
 化学的酸素要求量……………303  
 角周波数……………2  
 角振動数……………2  
 可航半円……………22  
 滑動……………205  
 緩勾配方程式……………86  
 換算沖波波高……………65  
 完全流体……………42  
 乾燥密度……………200  
 干潮……………156  
 干潮汀線……………196  
 かなな流し……………225
- き**
- 既往最高潮位……………261  
 既往最大潮位偏差……………261  
 危険半円……………22  
 気候変動に関する政府間パネル……………277  
 岸沖漂砂……………213  
 岸沖漂砂による断面変化モデル……………212  
 気象潮……………156  
 気象庁マグニチュード……………174  
 起潮力……………156, 157  
 基本水準面……………158  
 許容応力度設計法……………292  
 近海岸装置……………316  
 均等係数……………200
- く**
- 屈折係数……………60  
 クノイド波理論……………55  
 グリーンの法則……………176  
 群速度……………51
- け**
- 傾斜型……………121  
 傾度風……………20  
 結合伝播モデル……………29  
 結合ハイブリッドモデル……………29  
 限界状態設計法……………292
- こ**
- 弘安の役台風……………165  
 向岸流……………145  
 小潮……………157  
 個別要素法……………221  
 コリオリ力……………43, 152  
 孤立波……………59  
 混成型……………121  
 混成防波堤……………68
- さ**
- 災害対策基本法……………165  
 サイクロン……………164  
 最高周期……………6  
 最高波……………6  
 最高波高……………6  
 再生可能エネルギー……………314  
 砕波帯相似パラメータ……………73, 148  
 朔望平均満潮位……………261  
 下げ潮……………157  
 さざ波……………2, 17  
 三次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル……………220  
 サンド・バイパス……………269  
 サンド・リサイクル……………270
- し**
- シーボルト台風……………165  
 シールズ数……………207  
 シールズの相似則……………199  
 質量輸送……………57  
 質量輸送速度……………57  
 修正ジョンスワブ周波数スペクトル……………13  
 周波数エネルギースペクトル密度関数……………8  
 周波数スペクトル……………7, 8  
 重複波……………52  
 重力式……………121

- 消波堤……………66  
 白波砕波……………19  
 浸食……………224, 264  
 侵食……………224, 264  
 信頼性設計法……………293
- す**  
 吹送距離……………10  
 吹送時間……………10  
 吹送流……………142  
 数値波動解析法……………85  
 ストークス波理論……………55  
 砂の連続式……………210  
 砂浜勾配……………201, 202  
 スペクトル解析法……………4, 7  
 スラリー輸送……………269
- せ**  
 正常海浜……………197  
 静振……………168, 172  
 性能設計……………291  
 生分解性……………308  
 赤道低圧帯……………164  
 セットアップ……………276  
 ゼロアップ・クロス法……………4  
 ゼロダウン・クロス法……………4  
 洗堀……………224  
 浅水係数……………60  
 洗流砂……………205
- そ**  
 相対水深……………54  
 相対波高……………54  
 掃流砂……………205  
 速度ポテンシャル……………43  
 外浜……………196  
 ソリトン分裂……………183
- た**  
 ダイナミックオーバーシュート現象……………172  
 台風……………164  
 颱風……………164  
 太平洋高気圧……………164  
 たかし高潮……………2, 164
- ち**  
 地衡風……………20  
 中央粒径……………200, 202  
 潮位の調和解析……………158  
 潮位偏差……………276
- 長周期重力波……………2, 94  
 潮汐……………156, 157  
 潮汐波……………2  
 潮汐流……………142, 156  
 潮汐力……………156  
 直立型……………121  
 直下型地震……………172
- つ**  
 津波……………2  
 津波警報……………290  
 津波注意報……………290
- て**  
 底質の比重……………200  
 底質粒径……………201  
 汀線変化モデル……………212, 213  
 汀段……………197  
 天端……………66  
 転動……………205  
 電場応答高分子型人工筋肉……………316, 324  
 天文潮……………156  
 天文潮位……………276
- と**  
 透過率……………65  
 等深線変化モデル……………212  
 東北地方太平洋沖地震……………171  
 突堤……………226  
 トラフ……………173, 196  
 ドリフト現象……………57
- な**  
 流れ関数法……………55  
 波の回折……………63  
 波の屈折……………59  
 波の浅水変形……………59  
 波の伝播速度……………2
- ね**  
 熱帯収束帯……………164  
 粘り強い施設……………283  
 粘着力……………200
- は**  
 バーム……………197  
 波群……………17  
 波群性……………4  
 波形勾配……………54  
 波高……………2
- 波高水深比……………54  
 波向線法……………85  
 波高の二乗平均平方根……………7  
 波数……………2  
 波速……………2  
 波長……………2  
 波別解析法……………4  
 浜……………196  
 ハリケーン……………164  
 波浪……………2  
 波浪推算……………19  
 反射率……………65
- ひ**  
 ピアソン・モスコビッチ周波数スペクトル……………12  
 ピーク周波数……………10  
 飛砂……………240  
 微小振幅波理論……………43  
 非定常緩勾配方程式……………86  
 漂砂……………205  
 漂砂量保存則……………210  
 費用便益比……………282  
 表面粗度……………200  
 表面張力……………43
- ふ**  
 風波……………2, 17  
 副振動……………168  
 部分重複波……………53  
 浮遊砂……………205  
 ブルーカーボン……………304  
 プレート境界型……………170  
 プレート内型地震……………172  
 プレットシュナイダー・光易周波数スペクトル……………11  
 分散関係式……………46  
 分離伝播モデル……………29
- へ**  
 ヘッドランド工法……………268
- ほ**  
 方向スペクトル……………14  
 方向分布関数……………14  
 暴風海浜……………196  
 放物型波動方程式……………86
- ま**  
 マイクロ・プラスチック……………308  
 前浜……………196

前浜勾配 ..... 202  
満潮 ..... 156  
満潮汀線 ..... 196

## み

密度 ..... 200  
光易Ⅱ型周波数スペクトル ..... 10  
光易型方向分布関数 ..... 15

## も

モーメントマグニチュード .. 174

## や

躍動 ..... 205

## ゆ

有義周期 ..... 6  
有義波 ..... 6  
有義波高 ..... 6  
有脚式 ..... 121  
有限振幅波理論 ..... 43

## ら

ライン・モデル ..... 212  
ラグランジュ的取扱い ..... 42  
ラディエーション応力 ..... 98

## り

離岸堤 ..... 66, 226  
離岸流 ..... 145  
陸棚波 ..... 166  
離散相互作用近似 ..... 32, 34  
理想流体 ..... 42  
流砂 ..... 205  
粒子法 ..... 221

## れ

レベル1 ..... 282  
レベル2 ..... 282

## わ

ワロップス周波数スペクトル  
..... 13

## 英文

## A

Allowable Stress Design ..... 292  
angular frequency ..... 2  
anoxia ..... 302  
asperity ..... 181  
astronomical tide ..... 156  
astronomical tide level ..... 276

## B

B/C ..... 282  
back beach ..... 196  
back shore ..... 196  
Basic Act on Disaster Management  
..... 165  
beach ..... 196  
beach face ..... 196  
bed load ..... 205  
berm ..... 197  
biodegradability ..... 308  
block mound breakwater ..... 66  
Blue Carbon ..... 304  
blue tide ..... 302  
Bretschneider-Mitsuyasu frequency  
spectrum ..... 11  
Bruun 則 ..... 203

## C

C.D.L. .... 158  
cardinal datum level or the  
standerd sea level ..... 158  
Chemical Oxygen Demand .. 303  
closure depth ..... 213  
cnoidal wave theory ..... 55  
Coast Act ..... 165  
coastal current ..... 142  
coastline ..... 196  
COD ..... 303  
composite breakwater ..... 68  
composite type ..... 121  
continental shelf waves ..... 166  
Coriolis force ..... 43  
Coriolis' Force ..... 152  
Cost Benefit Ratio ..... 282  
Coupled Discrete Model ..... 29  
Coupled Hybrid Model ..... 29  
crest ..... 66  
critical depth ..... 205  
cross-shore sediment transport  
..... 213

crown ..... 66  
cyclone ..... 164

## D

Decoupled Propagation Method  
..... 29  
Delft3D ..... 221  
DEM ..... 221  
density ..... 200  
detached breakwater ..... 66, 226  
DIA ..... 34  
diffraction coefficient ..... 63  
directional spectrum ..... 14  
Discrete Interaction  
Approximation ..... 32  
dispersion relation formula ..... 46  
distinct element method ..... 221  
drift current ..... 142  
drift phenomenon ..... 57  
drifting sand ..... 205  
dry density ..... 200  
duration time ..... 10

## E

earthquake in plate-boundary  
..... 170  
ebb tide ..... 157  
Ekman spiral ..... 153  
Ekman transport ..... 153  
Electroactive Polymer Artificial  
Muscle ..... 316, 324  
encroachment ..... 224  
energy loss rate ..... 65  
EPAM ..... 316, 324  
equivalent deepwater wave height  
..... 65  
erosion ..... 224  
Eulerian method ..... 42

## F

FABM ..... 305  
fetch ..... 10  
finite amplitude wave theory .. 43  
Finite Volume Community Ocean  
Model ..... 305  
flood tide ..... 157  
flowing sand ..... 205  
fore shore ..... 196  
Framework for Aquatic  
Biogeochemical Models ..... 305  
frequency energy spectral

- density function ..... 8  
 frequency spectrum ..... 7  
 FSSM モデル ..... 220  
 FVCOM ..... 305
- G**  
 geostrophic wind ..... 20  
 gradient wind ..... 20  
 gravity type ..... 121  
 Green's low ..... 176  
 groin ..... 226  
 group velocity ..... 51
- H**  
*H* ..... 2  
 harmonic analysis of tide ..... 158  
 headland construction method  
 ..... 268  
 Healy の方法 ..... 69  
 high tide ..... 156, 164  
 high tide shoreline ..... 196  
 highest high storm tide ..... 261  
 highest high water level ..... 261  
 highest wave ..... 6  
 $H_{\max}$  ..... 6  
 $H_{\text{rms}}$  ..... 7  
 hurricane ..... 164
- I**  
 ideal fluid ..... 42  
 Incompressible SPH 法 ..... 222  
 infragravity waves ..... 2, 94  
 Intergovernmental Panel on  
 Climate Change ..... 277  
 Intertropical Convergence Zone  
 ..... 164  
 IPCC ..... 277  
 Iribarren number ..... 67  
 ISPH 法 ..... 222
- J**  
 J-ALERT ..... 290
- K**  
 $K_d$  ..... 63  
 kernel ..... 222  
 $K_r$  ..... 60  
 $K_R$  ..... 65  
 $K_s$  ..... 60  
 $K_T$  ..... 65
- L**  
*L* ..... 2  
 Lagrangian method ..... 42  
 legged type ..... 121  
 limit depth for sediment movement  
 ..... 205  
 littoral drift ..... 205  
 longperiod gravity waves ..... 2, 94  
 longshore bar ..... 196  
 longshore currents ..... 145  
 low tide ..... 157  
 low tide shoreline ..... 196  
 LTA ..... 34  
 Lumped Triad Approximation ( )  
 ..... 34
- M**  
*M* ..... 174  
 mass transport ..... 57  
 mass transport velocity ..... 57  
 mean monthly-highest water level  
 ..... 261  
 median grain diameter ..... 200  
 median grain size ..... 200  
 meteorological tide ..... 156  
 microplastics ..... 308  
 mild slope equation ..... 86  
 Mitsuyasu Type II frequency  
 spectrum ..... 10  
 Modified JONSWAP frequency  
 spectrum ..... 13  
 moving particle semi-implicit  
 method ..... 221  
 MPS 法 ..... 221  
 multi-line model ..... 212  
 Mw ..... 174
- N**  
 neap tide ..... 157  
 nearshore current ..... 142  
 Near-shore devices ..... 316  
 normal beach ..... 197  
 normal seashore ..... 197  
 numerical wave analysis method  
 ..... 85
- O**  
 ocean current ..... 142  
 ocean trench earthquake ..... 170  
 offshore ..... 196  
 Offshore devices ..... 316
- one line model ..... 212, 213  
 on-offshore sediment movement  
 ..... 213  
 outer-rise earthquake ..... 170
- P**  
 Pacific High ..... 164  
 parabolic wave equation ..... 86  
 PARISPHERE ..... 223  
 partial standing waves ..... 53  
 particle implemented simulator  
 for physical and engineering  
 research ..... 223  
 particle method ..... 221  
 perfect fluid ..... 42  
 Performance-based Design ..... 291  
 Pierson-Moskovitz frequency  
 spectrum ..... 12  
 piezoelectric device ..... 316  
 piezoelectric element ..... 316  
 PNJ 法 ..... 28
- R**  
 radiation stress ..... 98  
 radiation 応力 ..... 142  
 ratio of wave height to water depth  
 ..... 54  
 red tide ..... 302  
 reflection coefficient ..... 65  
 refraction coefficient ..... 60  
 relative water depth ..... 54  
 relative wave height ..... 54  
 Reliability-based Design ..... 293  
 renewable energy ..... 314  
 resilient facilities ..... 283  
 rip currents ..... 145  
 ripples ..... 2  
 rolling ..... 205
- S**  
 salutation ..... 205  
 sand bypass method ..... 269  
 sand recycling method ..... 270  
 SBEACH モデル ..... 212, 217  
 scouring ..... 224  
 seaweed ..... 310  
 secondary undulation ..... 168  
 sediment ..... 205  
 seiche ..... 168  
 semidiurnal tide ..... 157  
 setup ..... 276

- SFM ..... 55  
 Shields number ..... 207  
 Shields'law of similarity ..... 199  
 shoaling coefficient ..... 60  
 shoreface ..... 196  
 shoreward currents ..... 145  
 significant wave ..... 6  
 significant wave height ..... 6  
 significant wave period ..... 6  
 sliding ..... 205  
 slope type ..... 121  
 slurry transportation ..... 269  
 small amplitude wave theory .. 43  
 smoothed particle hydrodynamics method ..... 221  
 soil cohesion ..... 200  
 solitary wave ..... 59  
 soliton fission ..... 183  
 specific gravity ..... 200  
 spectral analysis method ..... 7  
 SPH法 ..... 221  
 spring tide ..... 157  
 standing waves ..... 52  
 step ..... 197  
 STOC ..... 182  
 Stokes wave theory ..... 55  
 storm surge ..... 2, 164  
 storm tide ..... 276  
 stormy beach ..... 196  
 stormy seashore ..... 196  
 stream function method ..... 55  
 subduction zone earthquake ..... 170  
 surf similarity parameter ..... 73, 148  
 surface roughness ..... 200  
 surface tension ..... 43  
 suspended load ..... 205
- T**
- tidal current ..... 142, 156  
 tidal deviation ..... 276  
 tidal force ..... 157  
 tidal waves ..... 2  
 tide ..... 156, 157  
 tide generating force or tidal force ..... 156  
 $T_{\max}$  ..... 6  
 transmission coefficient ..... 65  
 trench ..... 173  
 trough ..... 173
- tsunami ..... 2, 170  
 typhoon ..... 164
- U**
- uniformity coefficient ..... 200  
 unsteady mild slope equation ..... 86  
 upright type ..... 121  
 Ursell number ..... 54
- V**
- velocity potential ..... 43
- W**
- Wallops frequency spectrum .. 13  
 wash load ..... 205  
 wave absorbing breakwater .. 66  
 wave action density ..... 18  
 wave celerity ..... 2  
 wave diffraction ..... 63  
 wave groupiness ..... 4  
 wave height ..... 2  
 wave number ..... 2  
 wave prediction ..... 19  
 wave ray method ..... 85  
 wave refraction ..... 59  
 wave setback ..... 144  
 wave setup ..... 144  
 wave shoaling ..... 59  
 wave steepness ..... 54  
 wave velocity ..... 2  
 wavelength ..... 2  
 waves ..... 2  
 wind waves ..... 2  
 wind-blown sand ..... 240
- X**
- XBEACHモデル ..... 219

# 技術者のための海岸工学

2023年1月15日 初版第1刷発行



著者 山本吉道

発行者 柴山斐呂子

発行所 理工図書株式会社

〒102-0082 東京都千代田区一番町27-2  
電話 03 (3230) 0221 (代表)  
FAX 03 (3262) 8247  
振替口座 00180-3-36087 番  
<http://www.rikohtosho.co.jp>

© 山本 吉道 2023 Printed in Japan ISBN978-4-8446-0923-0

印刷・製本 丸井工文社

〈日本複製権センター委託出版物〉

※本書を無断で複写複製（コピー）することは、著作権法上の例外を除き、禁じられています。本書をコピーされる場合は、事前に日本複製権センター（電話：03-3401-2382）の許諾を受けてください。

※本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上の例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

★自然科学書協会会員★工学書協会会員★土木・建築書協会会員