

設計波の算定について

— 浅海波浪変形予測の理論と数値解析手法 —

ESTIMATION OF DESIGN WAVES - WAVE THEORIES AND NUMERICAL METHODS FOR NEARSHORE WAVE PREDICTION -

間 瀬 肇

Hajime MASE

正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

This paper shows the development of wave theories and numerical methods for random wave transformations in nearshore sea. When estimating wave conditions acting on coastal structures, a suitable wave model should be chosen, depending on the situation. This paper also describes criteria for selecting wave models and shows several examples of wave predictions.

Key Words : random waves, design waves, wave theory, numerical wave models, wave transformation

1. はじめに

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

本論文は、設計波の算定手法に関して、波浪変形理論および数値解析手法の発展過程について整理するとともに、目的に応じた解析モデルの選択基準、実際の応用例を示す。

2. 浅海不規則波浪変形に関する理論および数値解析手法の発展

平面的な波浪変形を対象とする場合、浅水・砕波変形に加え、屈折、回折、屈折・回折、構造物が存在する場では反射を考慮しなければならない。

不規則波の諸変形および波の作用を取り扱う方法として、波別解析法と理論解析法がある。波別解析法は、時間波形から求めた個々波や波列の代表波に規則波の理論を適用する。理論解析法は、非線形方程式あるいはナビア・ストークス方程式を直接解いて不規則

波の変形を求める方法であり、図-1に示すように、理論式を時間領域において解く時間領域モデル、周波数空間上で解く周波数領域モデル、確率素分としての個々波の波高変化を求める確率法に分けられる。

この理論解析モデルにおいては、砕波によるエネルギー減衰は理論的に扱えず何らかのモデリングが必要となり、種々のモデルが提案されている。波浪解析モデルと砕波減衰モデルは適当に組み合わせることができる。図-2は、こうした理論解析モデルの構成を示したものである。

不規則波浪変形に関する理論および数値解析手法の発展過程の詳細は、間瀬¹⁾を参照されたい。

3. 沖波波浪の設定

海岸・港湾構造物の設計、あるいは漂砂制御施設の設計に当たっては、対象とする計画波(沖波波浪)を設定しなければならない。対象地点における波浪資料が十分揃っていれば、それらを用いて極値統計解析により、再現確率波浪を算定することができる。しかし、多くの場合十分な波浪資料はなく、波浪推算により沖波波浪を推定し、それらの推算資料を用いて極値統計解析を行うのが通常である。

現在、波浪推算法としてWAMと呼ばれる数値計算モデルが世界的に用いられている。WAMは、大スケール(例えば地球規模)における波浪推算を行え

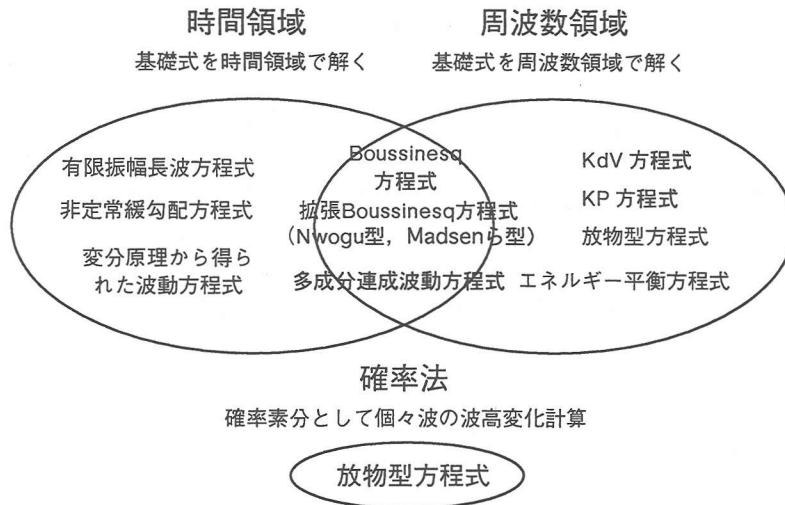


図-1 理論解析法の種類

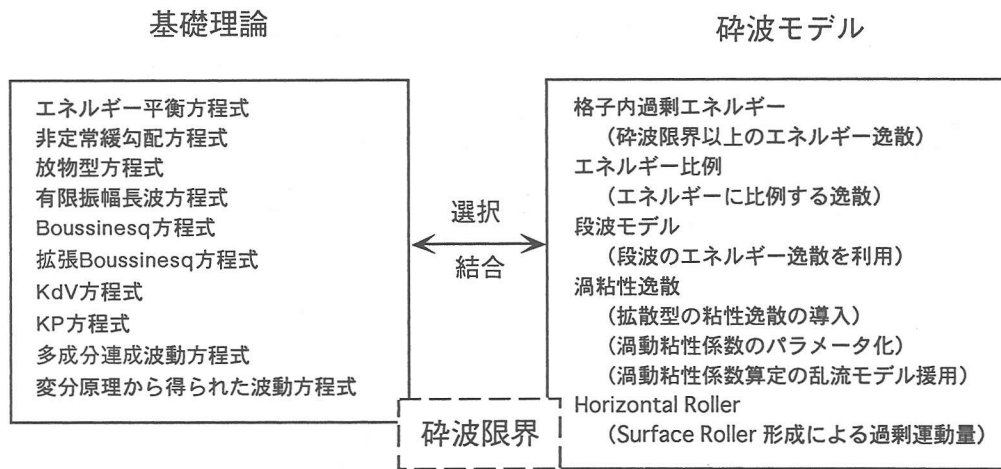


図-2 モデルの構成

る。最近では、日本沿岸での波浪推算にも用いられるようになってきている。また、浅海に適用可能な波浪推算モデルとしては、デルフト工科大学で開発されたSWANがある。これを用いると、図-3のように、全領域における風条件の入力、対象とする小領域のみの水深データを入力して波浪推算が容易に実行できる。

4. 設計波浪計算モデルの選択

Boussinesq 方程式は、弱非線形・弱分散性を考慮した方程式系であり、浅海域における波浪の基本的な変形（浅水変形、屈折、回折、反射）を表現可能な理論式である。この理論式を用いることにより、波浪の非線形性により生じる諸現象を解析することが可能であり、たとえば、海浜流、平均水位変化量を波浪場と同時に計算することができる。さらに、波動運動を時系列的に追跡するというこの方程式系の性格上、多方

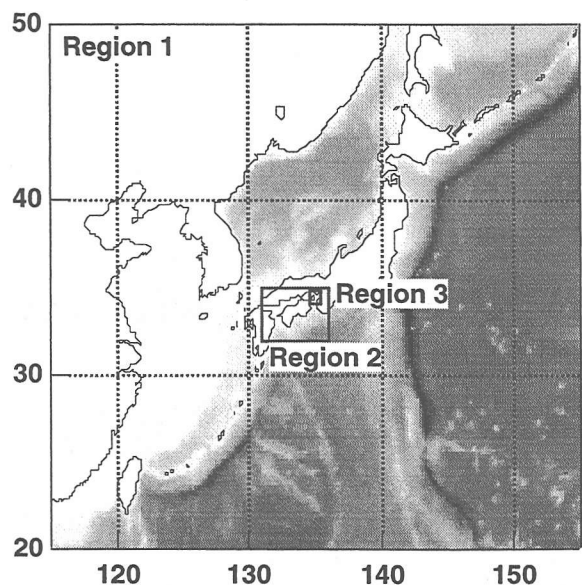


図-3 計算領域

向不規則波の変形を追跡することも可能である。また、理論式を拡張することにより、碎波や流れの影響あるいは地盤の透水性などを考慮することも可能である。こうした優れた特徴を有する Boussinesq 方程式は、近年、波浪予測や海浜流の数値モデルとして広く利用されていることに加え、底質が波浪に及ぼす影響や海底移動に伴う波浪の発生・解析等、広範な問題に対してその適用が図られつつある。

位相平均量としてのエネルギーの場所的变化を計算するモデルは、格子間隔を大きくとることができる。平衡式を用いる方法は、実用的なモデルとして広く使われている。

設計波浪計算モデルは、対象計算領域、対象海域の物理的特性、計算回数、要求される波浪情報によって取捨選択する必要がある。

1) 唯一つの沖波波浪に対して設計波算定計算を行う場合、計算領域が大きければ位相平均された諸量である波エネルギーあるいは振幅の変化を計算する数値モデルを用い、計算領域が小さければ水位・流速変動を計算する数値モデルを用いる。

2) 対象海域で特徴的な物理現象があれば、それを考慮できる計算モデルを選択しなければならない。例えば、屈折・回折が同時に生じる海域であれば、屈折・回折現象を考慮できるモデルを選択する。

3) レベル III の信頼性設計においては、沖波波浪や潮位を確率的に変化させて設計波を算定するので、数千回・数万回の設計波計算が要求される。こうした場合、計算時間が短い位相平均モデルを選択することになる。

4) 海岸構造物設計における波情報としては、有義波高、周期、波向の情報が最低限必要である。しかし、方向スペクトル、時間変動波形、波高分布、峰高分布

が必要とされる場合には、それを算定することができる設計波計算モデルを選択しなければならない。

5. 計算モデルの適用事例

図-4 は大阪湾に侵入するうねりの変化を計算したものである。計算領域が大きいためエネルギー平衡方程式に基づく波浪変形計算モデルを用いて計算した。(a)図は回折効果を入れてない計算結果で、(b)図は回折効果を含めた計算結果である。

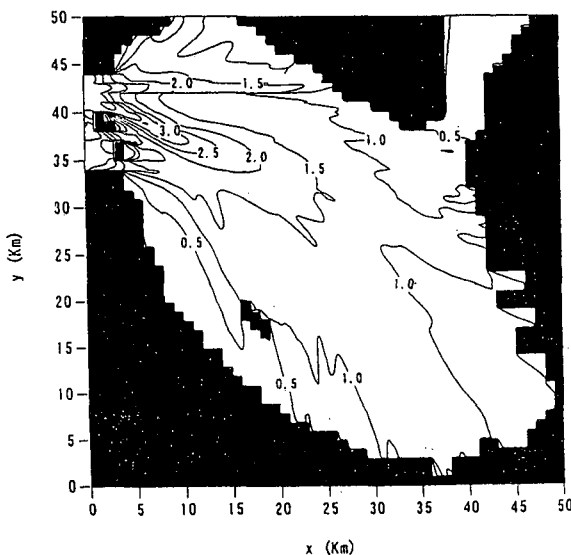
ここで用いた波浪計算モデルは、任意のフォルダに以下のファイルを入れ、実行ファイルによって計算を行うようになっている。

1) 入力ファイル

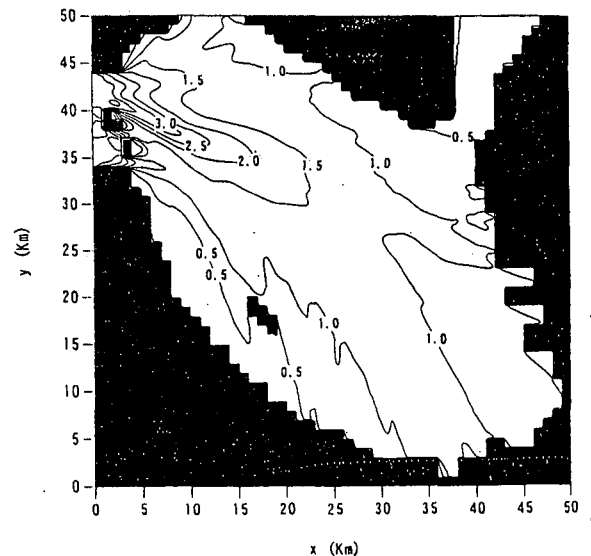
- ・ファイル名設定ファイル (filenames.dat)
- ・計算条件ファイル (ファイル名は filenames.dat 内で設定)
- ・水深データファイル (ファイル名は filenames.dat 内で設定)
- ・格子条件ファイル (ファイル名は filenames.dat 内で設定)

2) 出力ファイル

- (ファイル名は filenames.dat 内で設定)
- ・有義波高
 - ・有義波高 xy 成分 (ベクトル表示用)
 - ・有義波周期
 - ・伝播角
 - ・反射有義波高
 - ・反射有義波高 xy 成分 (ベクトル表示用)
 - ・全波高 (入射・反射を含めた波高)
 - ・反射有義波周期



(a) 回折を考慮しない場合



(b) 回折を考慮した場合

図-4 大阪湾内のうねりの波高変化の計算結果

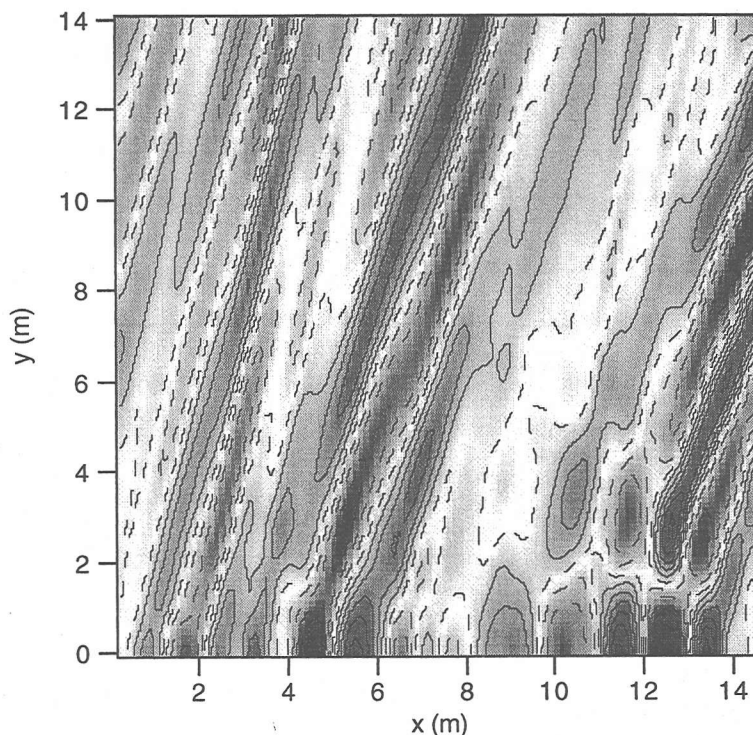


図-5 鉛直壁前面に斜め入射する不規則波の水位分布の計算結果

- ・ 反射伝播角
- ・ スペクトル

図-5は、空間発展型周波数領域モデルを用いて、不規則波のマッハ反射の計算をしたものである。 $y=0$ mに鉛直壁があり、その前面にステム波が発達する。海底地形は現地海域をシミュレートしたものである。入有義波高および周期はそれぞれ5.0 cm および1.34 s、入射波向は20度である。鉛直前面の有義波高分布に関する実験値と計算結果を図-6に示す。

ハイブリッド平面2次元浅海不規則波浪変形プログラム（空間発展型周波数領域モデル）を用いることにより、非線形性を考慮した波浪変形計算が行える。以下に計算例を示す。

対象とした海域は、京都大学防災研究所白浜海象観測所田辺中島高潮観測塔周辺の海底地形をモデル化し

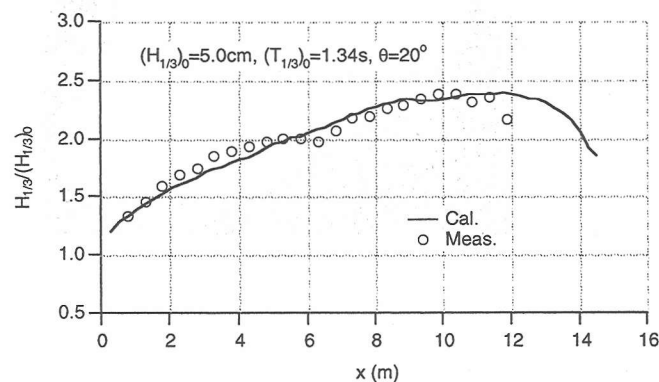


図-6 鉛直壁前面の波高分布に関する実験値と計算結果の比較

たものであり、図-7に示すような、30 mの一様水深に半径150 mの円形底面および半径25 mの円形上面を持つ高さ20 mの隆起がある。このような円錐浅瀬地形に有義波高10 m、周期15 sのBretschneider-光易型スペクトルを有する不規則波が来襲したときの波浪変形計算を行った。

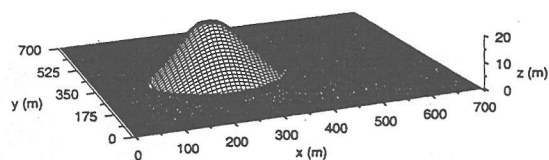


図-7 モデル海底地形

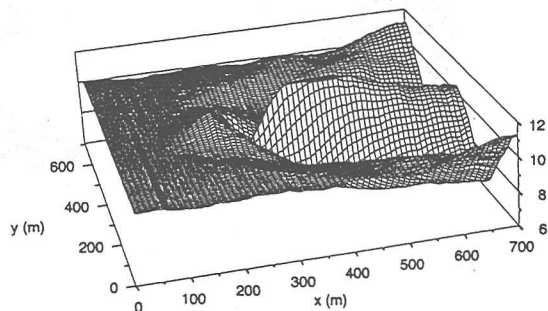


図-8 円錐浅瀬周辺の有義波高の空間分布

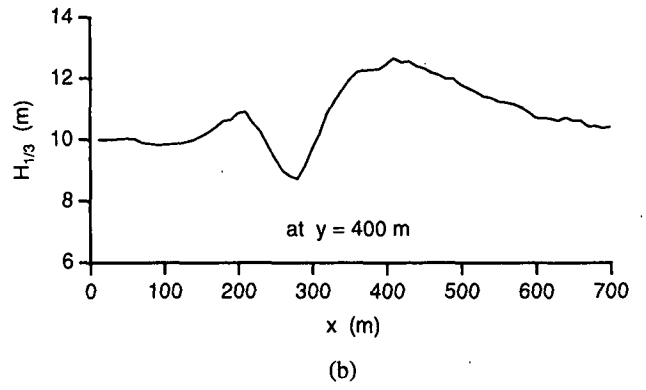
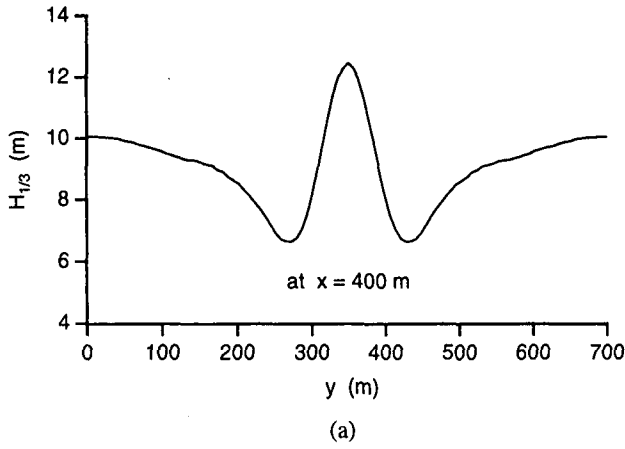


図-9 特定断面における有義波高の空間分布

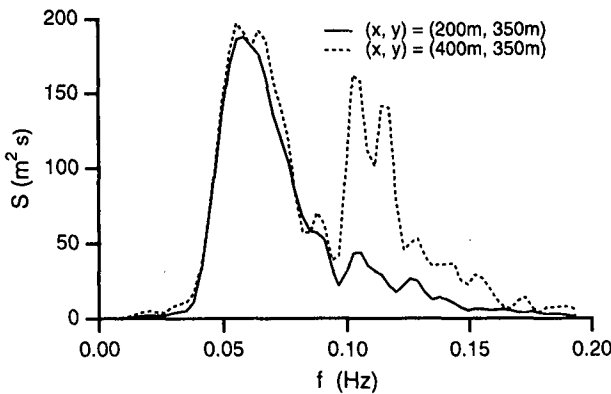


図-10 エネルギースペクトルの非線形計算結果

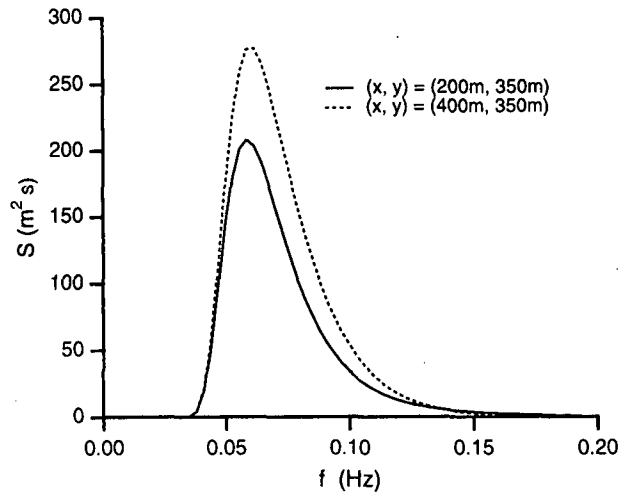


図-11 エネルギースペクトルの線形計算結果

図-8 は計算された有義波高の空間分布を示したものである。また、図-9 (a) および (b) には、それぞれ $x = 400 \text{ m}$ と $y = 400 \text{ m}$ の断面に沿っての有義波高の空間変化を図示した。これらの図から、波は円錐の斜面でその波高が増大し、砕波が生じるようになると波高が減少するが、円錐浅瀬の後方には屈折によって曲がり込んできた波が集中するために波高が増加する様子が見られる。

図-10 は 2 地点のエネルギースペクトルの計算結果を示したものである。初期には単峰型のスペクトルであったものが、 $(x, y) = (200 \text{ m}, 350 \text{ m})$ の砕波が生じていない円錐斜面上ではピーク周波数の 2 倍周辺のエネルギー密度が増加している。より水深が小さくなると、高周波領域のエネルギー密度が非線形干渉により増大する。砕波が生じるとピーク周波数周辺のエネルギー密度が減少するが、円錐浅瀬の後方では波の集中によりピーク周波数のエネルギー密度が増加するので、 $(x, y) = (400 \text{ m}, 350 \text{ m})$ の地点ではピーク周波数周辺および 2 倍周波数付近のエネルギー密度がともに大きくなったスペクトル形となる。

各成分波ごとに線形の式を用いてその結果を重ね合

わせた結果においても、有義波高の空間分布は図-8 とほとんど同じであった。しかし、エネルギースペクトルを調べたところ、その形状は図-11 に示すように、非線形解析の結果とかなり異なるのがわかった。すなわち、2 地点のスペクトル形は相似形を保ったように変わらない。

6. おわりに

本論文は、設計波の算定手法について、波浪変形理論および数値解析モデルの発展過程について整理するとともに、目的に応じた解析手法の選択基準、実際の応用例を示した。

7. 参考文献

- 1) 間瀬 肇：風波の浅水・砕波変形—計算モデルの特徴、共通点、相違点—、第 35 回水工学に関する夏期研修会講義集、B コース、土木学会、pp.B.5.1-B.5.20、1999。