

# 港湾内長周期波浪場の数値計算における 計算継続時間とスペクトルの変動

## Computation Time and Spectral Variation on Numerical Estimation for Long Wave Field in Harbors

太田一行<sup>1</sup>・吉田明德<sup>2</sup>・山城 賢<sup>3</sup>・小早川直紀<sup>4</sup>・西井康浩<sup>5</sup>

Kazuyuki OTA, Akinori YOSHIDA, Masaru YAMASHIRO, Naoki KOBAYAKAWA and Yasuhiro NISHII

Sufficient computation time to obtain stationary results for long wave oscillations in harbors by Boussinesq model was investigated. For different data lengths (computation times), wave spectra and significant wave heights of long waves were computed with a model harbor and several incident wave spectra. It was found that the length of the computation time to obtain stationary values are significantly influenced by frequency characteristic of amplification factor of water surface oscillations and the periods of the beats consisting of adjacent components of the incident random waves, and that the time length is generally much longer than that which is expected from random wave statistics.

### 1. まえがき

港湾の静穏度は係留船舶の長周期動揺によって評価されることが望ましい。動揺計算を精度良く行うためには、係留船舶近傍の長周期波浪場の周波数特性（長周期波浪スペクトル）が精度良く算定されねばならない。著者らはこれまで、波の非線形伝播を取り扱えるブシネスクモデルを用いて、長周期波浪場の算定をおこなう際の、開境界に設置するスポンジ層、計算海域のサイズ、計算継続時間等、基本的な設定条件が解の変動に及ぼす影響について検討し（西井ら、2008）、さらに、ブシネスクモデルによる波浪場の算定結果を、動揺計算に引き継ぐための、波強制力の算定法を提案した（吉田ら、2008）。

しかしながら、数値計算によってスペクトルの推定をおこなう際に、どの程度の計算継続時間を必要とするかについては、必ずしも十分明らかにされてはおらず、西井らの研究においても、計算継続時間が統計的にはほぼ十分と考えられる計算継続時間3～5時間を超えても、スペクトルや有義値が十分収束しない場合が見られた。

本研究は、ブシネスクモデルを用いて得られた港湾内の長周期波の時系列から、計算継続時間と長周期波浪場の変動の関係を明らかにすることを目的におこなったものである。

### 2. 計算条件

計算には平山ら（2002）によるブシネスクモデルNOWT-PARI Ver.4.6  $\beta$  を一部改良したモデルを用いた。地形は鹿児島県志布志港をモデルに、陸線境界を直線状に取り、海底地形を汀線に平行な等水深線に取った仮想港湾（図-1）を用いた。開境界に設置するスポンジ層の厚さを、西井ら（2008）の検討を基に4200mに取り、計算海域からの反射波をほぼ完全に吸収できるようにした。入射波スペクトルは、志布志港沖合のピロウ島近傍に設置されてい

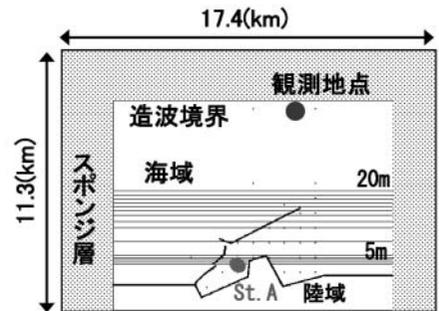


図-1 モデル港湾（志布志港）

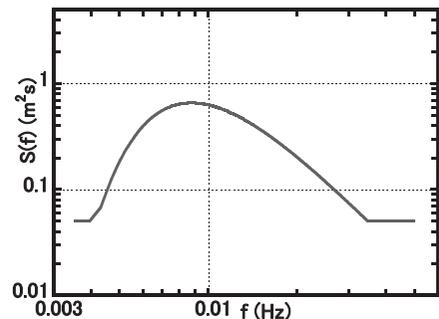


図-2 計算に用いた長周期スペクトル

1 学生会員	九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
2 正会員 工博	九州大学大学院准教授工学研究院
3 正会員 博(工)	九州大学大学院助教工学研究院
4 学生会員	九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
5 正会員 博(工)	(株)三洋コンサルタント調査部長

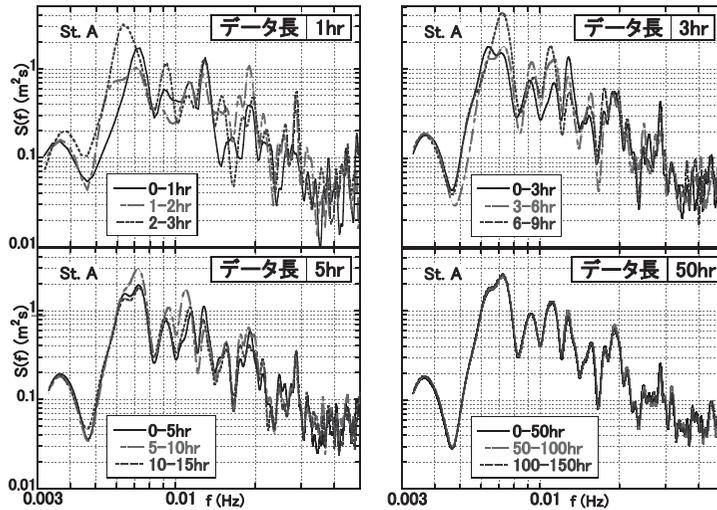


図-3 データ長によるスペクトルの変動

る、海底波高計(ナウファス)で観測された波高の長周期スペクトル(20秒~300秒)をもとに、スペクトルのピーク周波数を極大値を持つ指数関数形で近似したスペクトルを用いた(図-2;西井ら,2007)。この長周期スペクトルを、各周波数成分の受け持つエネルギーが同じとなるように512個の成分波に分割し、各成分波の位相を正規乱数で与えた不規則長周期波を、図-1に示す造波境界より一方向入射波(造波境界に垂直)として入射させた。計算格子間隔を25m、タイムステップは0.25秒にとり、計算継続時間200時間の計算をおこなって、港湾内の係留地点数点と、沖合の地点における水面変動の時系列を得た。なお、本研究で検討したのは、長周期波を自由波として入射させる場合の計算継続時間の検討で、風波による非線形成分としての長周期波、および風波と長周期自由波を混在させる場合は対象としていない。

### 3. 計算結果と考察

#### (1) データ長によるスペクトルの変動

港湾内のモニター点A(図-1)で得られた200時間の水位変動の時系列より、40分から50時間までの12通りのデータ長についてデータを抽出し、FFT解析をおこなってデータ長ごとにランニングスペクトルを求めた(40分では300個、50時間では4個のスペクトル)。図-3はその中より、データ長が1時間、3時間、5時間、50時間の場合について、連続するランニングスペクトル3個を比較したもので、データ長が増大するに従い、ランニングスペクトルの変動は小さくなり、データ長50時間ではデータ抽出区間によらず同じスペクトルが得られることが見て取れる。データ長50時間のランニングスペクトル4個の平均をスペクトルの収束値 $S(f)$ とし、それぞれのデータ長のスペクトルとの相対偏差の自乗平均値を求めた結

果を図-4に示す。図中の線は自乗平均値より算定した回歸曲線で、図中に示す分散はデータ長ごとに求めた自乗平均値のばらつきの程度を示している。これより、従来特段の根拠なく用いられていることが多い1~2時間程度の計算継続時間では解の変動が大きく、実際とは大きく異なる長周期波スペクトルを算定してしまう可能性が大きいことが分かる。

#### (2) データ長による長周期有義波高・周期の変動

港湾内の長周期波の程度については、長周期有義波高や有義周期で議論されることも多い。計算継続時間によって長周期波スペクトルが変動する事から、有義波高・周期も変動すると考えられる。また、この変動の程度をより定量的に把握するために、1時間から20時間まで7通りのデータ長を用いて、ゼロアップクロス法により水面変動の時系列から長周期有義波高 $H_{L1/3}$ と有義周期 $T_{L1/3}$ を算定し、その変動性を調べた。図-5は長周期有義波高のデータ長による変動を示しており、データ長1時間では最大値と最小値で18cm程度の差が生じ、ほぼ40cmの収束値に対して、最大で25%ほどの差異を持つ推定値を与える可能性が有ることがわかる。

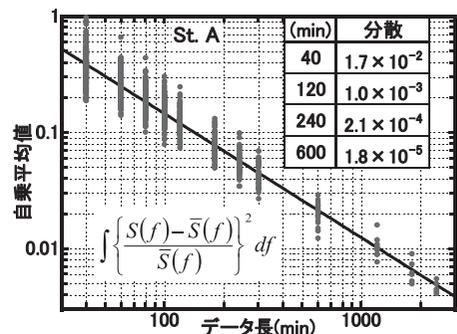


図-4 データ長によるスペクトルの相対偏差の自乗平均

図-3に示すスペクトルの収束値からは、水面変動には周波数0.007~0.014Hzの範囲に4つの周波数で大きなピークが表れている。データ長が4~5時間あればこの範囲の周期の波が最低でも100波以上含まれ、風波の統計理論（例えば合田，2008）から類推して、有義値はほぼ収束値が得られると推定されるが、図-5を見る限りデータ長4~5時間では十分な収束値が得られているようには見えず、データ長を10時間にとっても数cmもの変動が残る。そこで、データ長を3時間と5時間の場合について、データの抽出区間を30分ずつずらしながら有義波高の時系列を算定した。その結果をデータ長3時間の場合について図-6に示す。これを見ると、水面変動には不規則波として統計的な信頼性を得るに必要な時間を越える、長時間の変動が大きく含まれていることが見て取れる。

(3) 水面変動の自己相関と共振特性との関係

図-6に見られる長時間の周期的な変動の原因を調べるため、モニター点における水位変動の時系列 $\eta(t)$ を用いて自己相関係数（無次元量）を求めた。図-7はこの結果で、まず、ずらし時間①6.5~8.0時間、②8.5~9.6時間、③9.6~10.0時間で相関が大きく現れており、これ以降も相関値が大きくなるずらし時間が繰り返し現れている

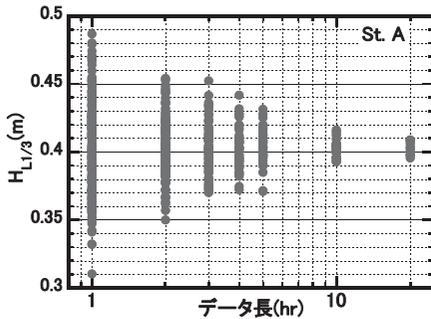


図-5 データ長による長周期有義波高の変動

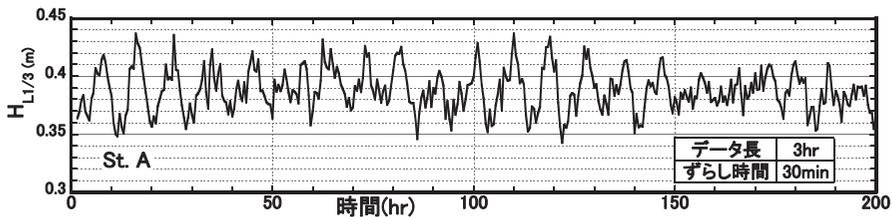


図-6 長周期有義波高のデータ抽出区間による変動

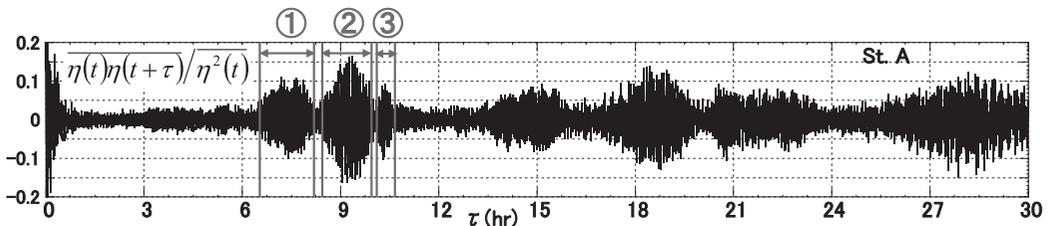


図-7 湾内水面変動の自己相関

が、よく見ると、これら①②③の周期間隔での繰り返しとなっている。このような自己相関の変動が現れる理由として以下のことが考えられる。

図-2に示すような極大値を有するスペクトルを等エネルギー分割して数値計算に用いる成分波を定めると、スペクトルの極大値に近いほど隣合う成分波の周波数差が小さくなり、異なる成分波間で形成される包絡波形（ビート）の周期は長くなる。一方、港湾形状と接岸位置によって定まる水面変動は、図-3のスペクトルに見られるように、特定の周波数の波を選択的に増幅するため、選択された周波数の成分波を搬送波とする包絡波形が、水面変動に大きく現れることが推測される。

図-8は、本計算で用いた512個の隣合う成分波が形成するビート周期と成分波周波数との関係（上図）と、A点での水面変動の共振特性（下図：図-3のスペクトル）を比較して示したもので、共振特性のピーク周波数に対応するビート周期と、図-7の自己相関に現れた周期成分①②③が、ほぼ対応することが見て取れる。

(4) 単純化したモデル港湾による検証

上述したように、港湾内波浪場に現れる長時間の変動は、港湾内水面変動の共振特性と、入射波スペクトルの成分波分割による、ビート周期の周波数分布によって定まると考えられる。この点を明確に示す目的で、単純化したモデル港湾（図-9）を対象とした計算をおこなった。モデル港湾は、図-2の入射波スペクトルより得られるビート周期の、最大値を与える周波数近傍のみに大きな共振周波数を有するように設定した。このモデル港湾に対し、図-2の入射波スペクトル（スペクトル1）に加えて、最大ビート周期が生じる周波数を、水面振動の共振周波数から外した入射波スペクトル2を設定し、それぞれのスペクトルが入射する場合について、計算継続時間を24時間とした計算をおこない、湾内のモニター点の水位変

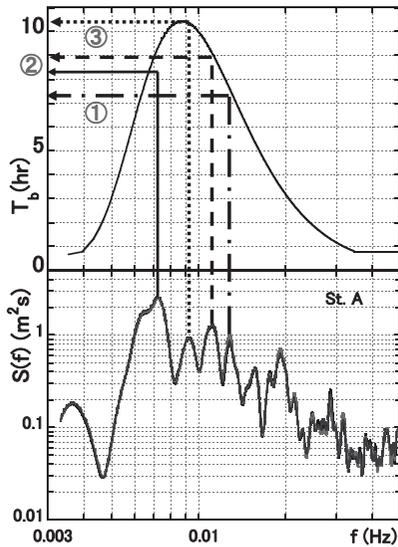


図-8 隣合う周波数成分波によるビート周期と港湾における共振特性の関係

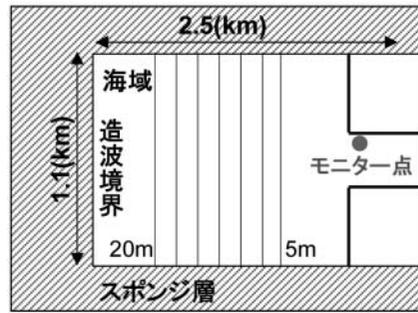


図-9 単純モデル港湾

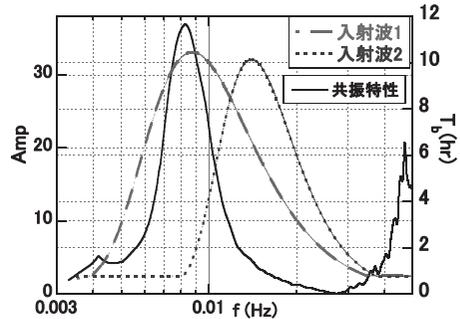


図-10 ビート周期と共振特性の関係

動より有義波高と有義周期を算定して、それらのデータ長による収束の様子を比較した。図-10は、各入射波スペクトルで形成されるビート周期の周波数分布とモデル港湾のモニター点における共振特性（モニター点での増幅率 $A_{mp}$ ：水面振動のスペクトル÷入射波のスペクトル）を比較して示している。入射波スペクトル1では、最大のビート周期（約10.4時間）を形成する周波数が共振の第一モードに近く、入射波スペクトル2では、最大ビート周期を形成する周波数は第一モードと第二モードの共振周波数の間にあり、第一モードの共振周波数におけるビート周期は0.8～1.0時間程度で、入射波スペクトル1に比べて非常に小さい。

それぞれのスペクトルより得られた水面変動の自己相関係数を図-11に示す。入射波スペクトル1の場合、ずらし時間が第一共振モードの周波数に対応するビート周期（約10.4時間）に近づくと、相関係数は急激に増大し、ずらし時間10.4時間で最大値を取っている。一方、入射波スペクトル2では、ビート周期（0.8時間）に対応するずらし時間で小さい相関が見られるが、それ以外に特に大きな相関は生じていない。

図-12には水面変動の時系列について、データ長を1時間から20時間まで、1時間ごとに増大させて長周期有義波高と長周期有義周期を算定した結果を示している。入射波スペクトル2の場合の有義波高は、データ長6時間でほぼ一定となり、3時間程度であっても一定値との差は3～4cm程度と小さい。一方、入射波スペクトル1の場合には、データ長が10時間を越えても変動が残ることがわかる。また、有義周期についても、変動の程度は小さいものの、同様の傾向が言える。

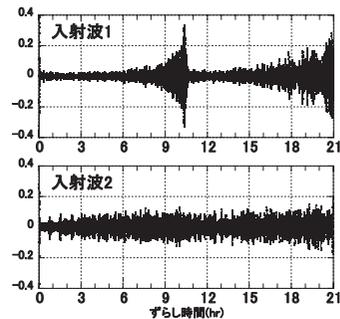


図-11 水面変動の自己相関係数

さらに、24時間の水面変動の時系列から抽出した、8通りのデータ長（40分から5時間まで）について、データ長ごとの複数のデータそれぞれより長周期有義波高を求め、各データ長での変動係数を求めた結果を図-13に示している。全てのデータ長において、ばらつきの程度は入射波スペクトル2の方が小さくなっており、入射波スペクトル2では、データ長が2時間を越えると変動係数は小さくほぼ一定値となっているのに対し、入射波スペクトル1の場合には、変動係数も大きく、しかもデータ長によって大きく変動する様子が見られる。

#### 4. あとがき

港湾内長周期波浪場の数値計算をおこなって得られる水面変動の時系列から、定常なスペクトルや有義波高・有義周期が得られるためには、計算の継続時間（データ

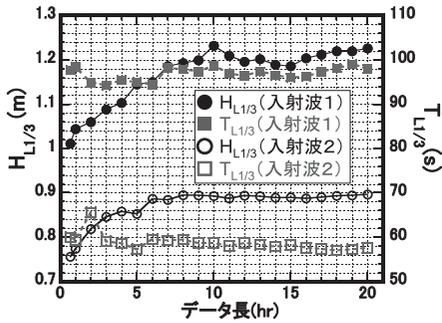


図-12 データ長による長周期有義波高・周期の収束の様子

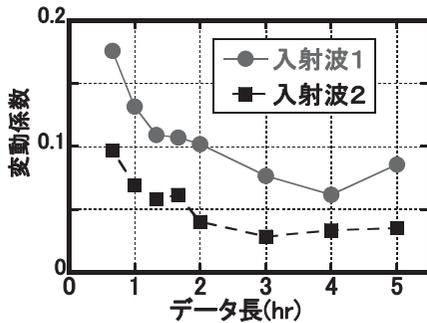


図-13 データ長に対する変動係数の変化

長)をどの程度長く取る必要があるかについて検討をおこない、次のような知見を得た。

- a) 長周期波に対する数値計算で得られた港湾内水面振動の時系列から定常なスペクトルを得るには、従来、特段の根拠なく用いられていることが多い1～2時間程度の計算継続時間よりも格段に大きな計算継続時間を要する。本計算で設定した長周期入射波とモデル港湾で得られた水面変動の有義波高では、計算継続時間が1時間程度では、継続時間を十分大きくとった場合の収束値に対し最大で25%程度の差異が生じた。
- b) これらの変動が生じる原因のひとつは、計算継続時間に含まれる波の個数の多寡による統計的な変動性によるもので、例えば周期100秒の波を例にとると、計算継続時間に100～200波が含まれるためには3～5時間は必要ということになる。
- c) しかしながら、たとえ、3～5時間のデータ長を用いても、スペクトルや有義値がデータ抽出区間によって大きく変動する。この理由は、湾内の水面変動は港湾形状によって特定の周波数成分が選択的に増幅される(共振特性を有する)ため、選択された周波数を搬送波とするビート(包絡)波形の周期が水面変動の時系列に大きく現れることになり、ビート周期よりも小さいデータ長でスペクトルや有義値を算定すると、データの抽出区間に

よって値が大きく変動することによる。

- d) 個々の入射成分波が形成するビート周期の最大値は、隣り合う2つの成分波の周波数間隔で決まる。したがって、少なくとも港湾内水面振動の共振周波数に対応する成分波のビート周期以上には、計算継続時間を設定することが必要となる。
- e) 港湾の共振周波数に対応する成分波のビート周期が1～2時間程度と短かければ、波の統計的な変動性のみ留意すればよく、3～5時間程度の計算継続時間で安定した計算結果が得られる。
- f) 入射波スペクトルの成分波分割を粗く取れば、変動に現れるビート周期は小さくなり、従って必要な計算継続時間は少なくとも済むが、あまり粗く取ると水面振動の共振特性の推定値の精度が落ちることになるため、最適な成分波の分割についてはさらに検討が必要である。

なお、最近Bellotti (2007) が、港湾内水面振動の周波数特性を時間領域の計算をおこなって推定する際に、Helmholtzモードの周波数特性に十分漸近するために必要な計算継続時間について検討し、水面振動の増幅率が急峻なピークを取るモードでは、数十時間を要する場合があることを報告している。本論文で述べたスペクトルの変動は、上述したように、これとは全く異なる理由によって生じるものである。

謝辞：プシネスクモデルによる数値計算に関しては、石川美晴氏(吉井システムリサーチ社友)の助力を得た。記して感謝の意を表わします。

なお、本研究は主に九州大学情報基盤研究開発センターの研究用計算機システムを利用しました。

参考文献

西井康浩・吉田明德・太田一行・山城 賢・加嶋武志(2008)：プシネスクモデルによる港湾内波浪場(長周期波)の再現性に関する基礎的検討，海洋開発論文集，第24巻，pp.429-434

吉田明德・西井康浩・山城 賢・加嶋武志・太田一行(2008)：プシネスクモデルの波浪場解析結果を用いた浮体動揺計算における波強制力の算定法，海岸工学論文集，第55巻，pp.801-805

平山克也(2002)：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1036，pp.69-89

西井康浩・吉田明德・山城 賢・小野貴也(2007)：長周期波スペクトルの提案と現地観測との比較検証，海岸工学論文集，第54巻，pp.256-260

合田良實(2007)：耐波工学—港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp.217-258

Giorgio Bellotti(2007)：Transient response of harbours to long wave under resonance conditions，Coastal Engineering，54，pp.680-693