

ブ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

STUDY ON BASIC CONDITIONS FOR LONG WAVE SIMULATION IN HARBORS WITH BOUSSINESQ'S MODEL

西井康浩¹・吉田明德²・太田一行³・山城 賢⁴・加嶋武志⁵
Yasuhiro NISHII, Akinori YOSHIDA, Kazuyuki OTA, Masaru YAMASHIRO
and Takeshi KASHIMA

¹正会員 (株) 三洋コンサルタント 調査部 (〒802-8534北九州市小倉北区京町3-14-17)

²正会員 工博 九州大学准教授 工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³学生会員 九州大学工学府 修士課程 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁴正会員 博(工) 九州大学助教 工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁵正会員 工修 日本工営株式会社 (〒102-8539 東京都千代田区麹町5丁目4)

To estimate long period ship motions in harbors, specific wave information like long wave spectrum is more useful than the mean value like information such as the significant wave height and the significant wave period. As for wave field calculations in harbors, so-called Boussinesq's model seems to be widely used because of its versatile features. However, it hasn't been clarified yet about how large the sponge layer should be taken to simulate open-sea condition; how long the computation should be continued to obtain statistically stable spectrum; what size of the computational area should be considered, etc. In this study these basic conditions were investigated by conducting wave field simulations by Boussinesq's model. Useful information was obtained such as: the data length, from which the spectrum is calculated, need to be longer than at least 5 to 6 hours to get a stable spectrum; the length of the sponge layer could be much less than the length expected from one-dimensional calculations; the size of computational area doesn't affect the results so much if it is as large as the one empirically taken in computations.

Key Words : Boussinesq's model, harbor, long wave, ship motion, sponge layer, spectrum

1. まえがき

港湾内係留船舶の長周期動揺は、係留位置での波の周波数特性の影響を大きく受けることから、動揺量の精度良い推定を行なうには、有義波高や有義周期のような平均量ではなく、港湾内の任意点における長周期波のスペクトルを精度良く推定することが必要である。波動場の計算には非線形効果を考慮できるブシネスクモデルによる計算が推奨¹⁾されており、長周期波浪場の再現性に関しても多くの研究がなされてきている²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

しかしながら、港湾を含む対象海域の大きさ、開境界に設けるスポンジ層の条件、スペクトル形が平衡状態に達するに要する計算継続時間、等が長周期波スペクトルにどの程度影響するのかについては必ずしも明確な指針が示されているとは言えない。

本研究は、以上の観点から、ブシネスクモデルに

よる長周期波浪場の再現性についての基礎的な検討をおこなったものである。

2. 用いたブシネスクモデルとモデル港湾

計算に用いたブシネスクモデルは平山⁸⁾によって提供されている NOWT-PARI Ver. 4.6 β を一部改良したモデルを用いた。計算は鹿児島県志布志港を対象に、沖合の造波境界を直線状の陸境界から約 6.2km に固定し、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て簡略化した仮想港湾(図-1)を用いた。これは港湾地形を単純化することによって、条件設定と結果との関連を明確化することを意図したためである。

入射波スペクトルは、志布志港沖合のビロウ島近傍に設置されている海底波高計(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)

を元に、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⁹⁾）。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に示す入射境界より一方向入射波（造波境界に垂直）として入射させ、計算格子間隔25m、タイムステップ0.25秒で計算を行った。

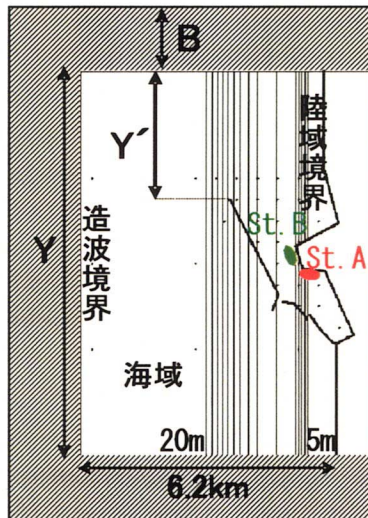


図-1 単純化したモデル港湾（志布志港）

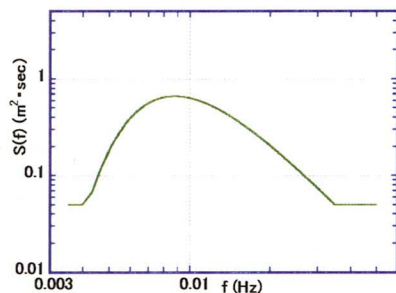


図-2 計算に用いた長周期スペクトル（西井ら⁹⁾）

なお、陸域境界および防波堤と護岸は完全反射境界に設定し、また、図-1中の Y で示す側方境界間の距離は、通常は $Y=9\text{km}$ に固定し、海域サイズの検討をおこなう場合のみ、防波堤先端と側方境界との距離 Y' に応じて変化させた。

3. 条件設定による湾内スペクトルの変動

(1) 無反射境界（スポンジ層）の影響

通常風波のみを対象とする計算では、陸境界や防波堤からの反射波を吸収するためのスポンジ層厚は有義波長の2倍程度にとって計算が行なわれることが多い。長周期波を対象とする場合には当然ながら対象となる波長に応じてスポンジ層厚は大きくとることが必要で計算領域は著しく増大する。西井ら¹⁰⁾

は一次元水路を用いたブシネスクモデルによる数値実験を行なって、スポンジ層に垂直入射する長周期波を対象に、その波吸収機能を調べている。その検討結果によれば、スポンジ層からの反射をほぼ0にできるスポンジ層厚は対象となる周期とスポンジの硬度によって幾分変動するものの対象周波数の波長の2倍程度必要で、本計算における最長周期300秒に当てはめると造波境界（水深20m）に必要なスポンジ層厚は8400mにもなる。しかしながら、実際の計算は二次元波動場であるためスポンジ層に入射する各成分波はある角度を持って入射することや、設定されたスポンジ層は周波数成分に応じて異なった波吸収機能を発揮することから、設定されたスポンジ層厚が長周期の平面不規則波浪場の計算結果にどのように影響するかについては必ずしも明確ではない。そこで計算海域の大きさを固定し、スポンジ層厚を変化させた計算を行なって、湾内でのモニター点（図-1中のSt. AおよびSt. B）における水面変動のスペクトルの変動の程度を検討した。スポンジ層厚は4200m、3500m、2100m、1400m、700mおよび風波を対象とする200mについておこない、そのうち4200m、2100m、1400m、200mの場合のスペクトルの比較を図-3(a)と図-3(b)に示している。

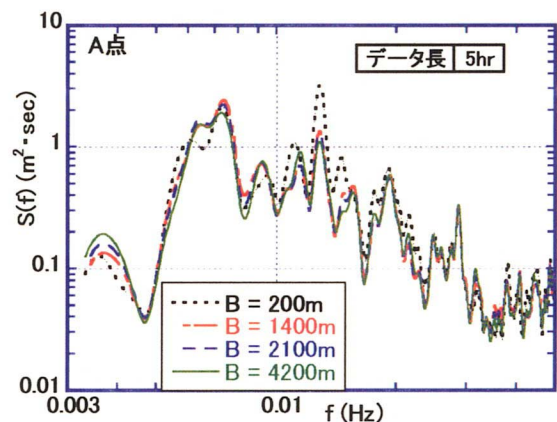


図-3(a) スポンジ層厚によるスペクトルの変動

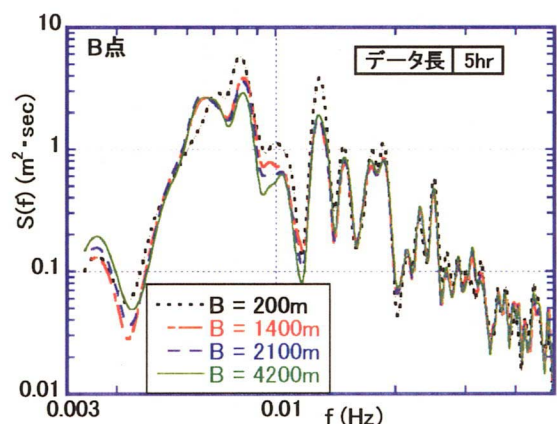


図-3(b) スポンジ層厚によるスペクトルの変動

スポンジ層厚が最長の 4200m は周期 300 秒の 1 波長に当たり、周期 100 秒の成分波に対しては、波長に対するスポンジ層厚の比（相対スポンジ層厚）は 3 となって十分な厚さを有するが、周期が 200 秒の成分波の場合は相対スポンジ層厚は 1.5 で、西井ら¹⁰⁾の結果を参照するとスポンジ層に入射する波の 3 割程度の波高の波が吸収されずに海域に再反射される。従ってスポンジ層厚がさらに小さい 2100m や 1400m ではより大きな反射が生じ、スポンジ層厚によるスペクトルの変動がかなりの程度大きくなると予測されたが、図-3(a)(b)に示すようにスポンジ層厚の影響はあまり大きくない。特に船舶の長周期動揺の対象となる周期 30 秒から 120 秒の周期帯では、風波を対象とした 200m の場合を除くと、スポンジ層厚によらずほぼ同じ値のスペクトル値が得られていることが分かる。スポンジ層厚が最大 4200m でのスペクトルを基準のスペクトルとして異なるスポンジ層厚で得られたスペクトルとの偏差を St.A について図-4 に示している。

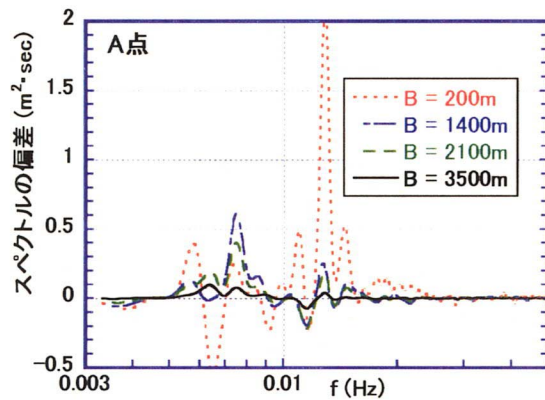


図-4 基準のスペクトル (B=4200m) との偏差

スポンジ層厚が大きいほど偏差は小さくなっており、3500m の場合は基準値の 4200m の場合とほとんど差が無いことがわかる。さらに図-4 の偏差を基準のスペクトルで無次元化した相対偏差を求め、その自乗平均を算定してプロットしたものを図-5(a)と図-5(b)に示している。図より相対偏差はスポンジ層厚が大きくなるとともに指数関数的に減少しており、スポンジ層厚による計算結果の変動は、1 次元水路で検討された波吸収機能から推定される必要スポンジ層厚よりもかなり小さくても良いと言え、計算遂行上は大変有利な結果である。この理由はよくは分からないが、先述したように、平面場での計算ではスポンジ層に入射する波は、スポンジ層に何らかの角度を持って入射するため、入射する波に対して、設定されたスポンジ層厚は相対的に大きな層厚を有していることが大きく影響していると考えられる。

なお、計算の結果は港内の 2 点についてそれぞれ比較検討したが、図-3(a)と図-3(b)および図-5(a)と図-5(b)に示したと同様、後述する他の計算条件についての検討においても、検討点の位置によって検

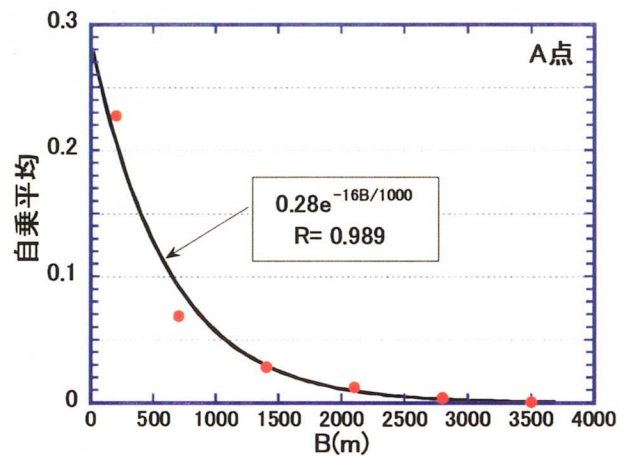


図-5(a) スポンジ層厚と相対偏差の自乗平均との関係（回帰曲線と相関係数 R ）

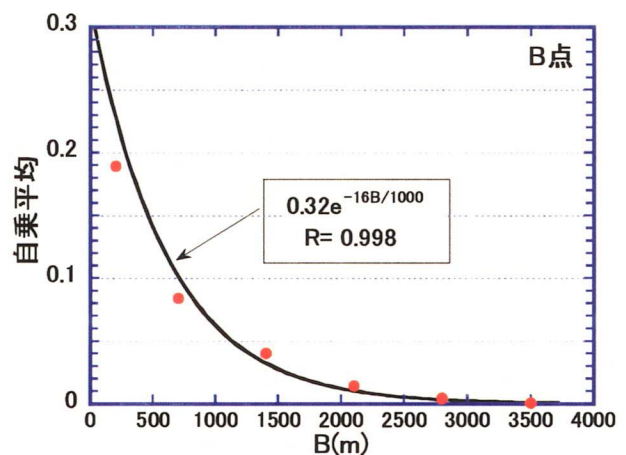


図-5(b) スポンジ層厚と相対偏差の自乗平均との関係（回帰曲線と相関係数 R ）

討条件の結果に違いは見られないため、以後の検討結果は St.A についてのみ示すこととする。

(2) 計算継続時間の影響

船舶の長周期動揺の推定には、有義波高や有義周期のような平均量ではなく長周期スペクトルの周波数特性が重要である。ただし、得られたスペクトル特性が統計的に信頼できるためには、風波の場合よりも長い計算継続時間を必要とする。そこで、長周期波スペクトルが平衡状態に達するために要する時間についての検討を行った。

まず、計算継続時間を 24 時間と非常に大きく取った計算を行い、モニター点での水位変動の時系列について、データ長を 40 分、60 分、80 分、100 分、2 時間、3 時間、4 時間、5 時間とした FFT 解析により、それぞれのデータ長ごとにランニングスペクトルを求めた。図-6、図-7、図-8 はその中よりデータ長が 1 時間、3 時間、5 時間の場合について連続するランニングスペクトル 4 個を比較したもので、データ長が 1 時間の場合（図-6）は 24 時間の時系列から得られた

22個のスペクトルの内の最初の4時間分に対応する。これらの結果を比較すると、データ長が1時間の場合のスペクトルは各スペクトルの周波数特性が大きく変動しているのに対し、データ長5時間の場合はほぼ一定の周波数特性に収束していることが見て取れる。

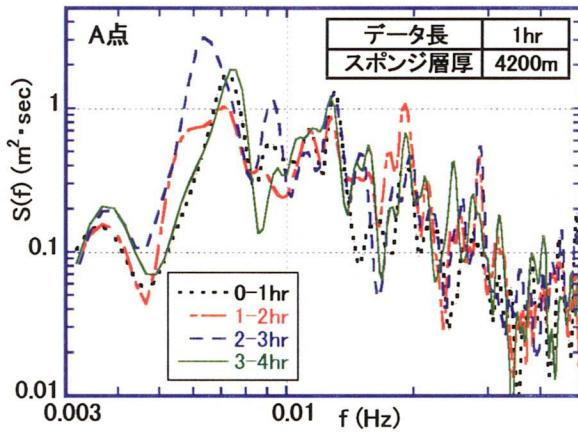


図-6 スペクトルの変動（データ長1時間）

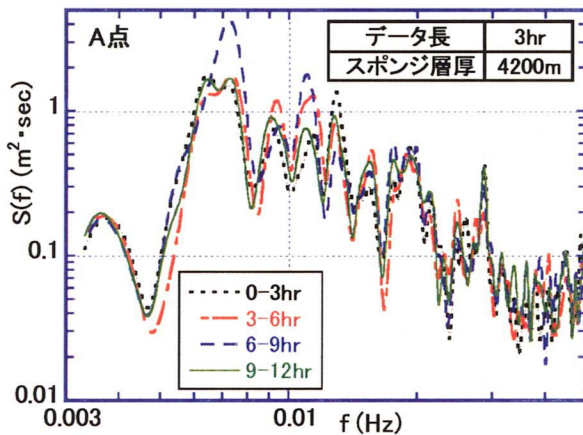


図-7 スペクトルの変動（データ長3時間）

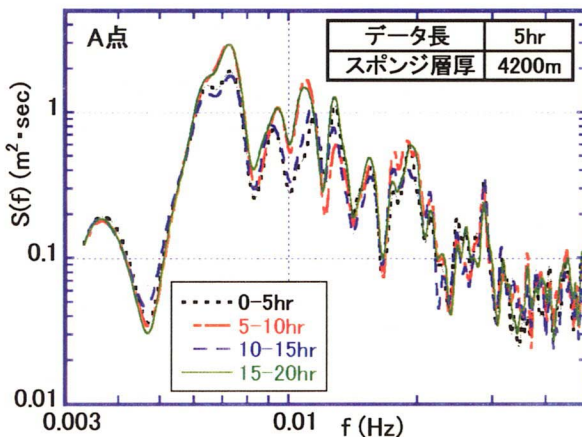


図-8 スペクトルの変動（データ長5時間）

そこで、データ長が5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と仮定し、この収束値と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-9に示す。図中の線は自乗平均値より算定した回帰曲線で、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、データ長が短い場合はスペクトルごとの自乗平均値の変動が大きく、変動幅の小さい推定結果を得るためには3時間ないし4時間程度の計算継続時間が必要であることが分かる。

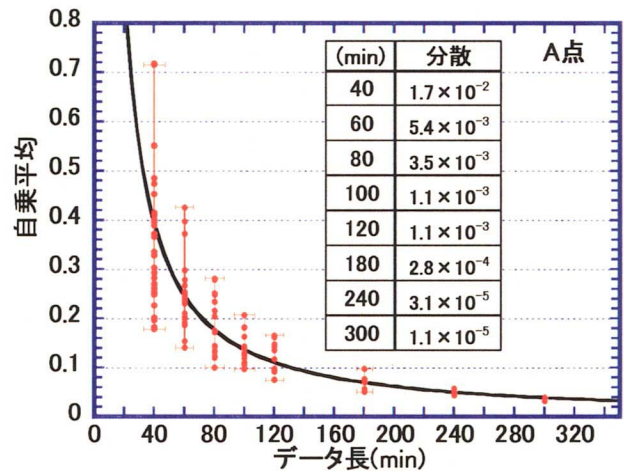


図-9 相対偏差の自乗平均値の分布と計算継続時間との関係

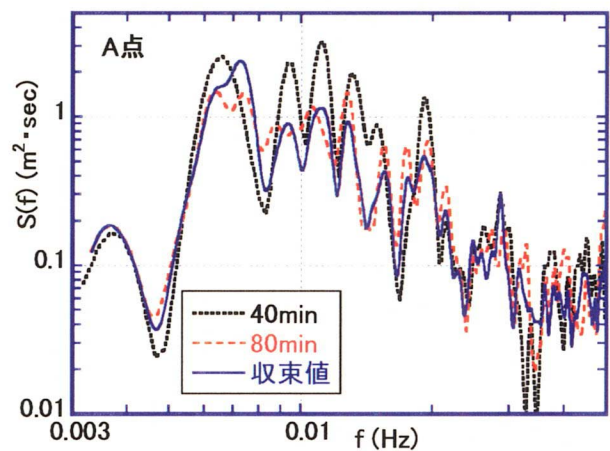


図-10 自乗平均最大値を与えるスペクトルと収束スペクトルとの比較

図-10はデータ長40分、80分のスペクトルから、それぞれ自乗平均値が最大となるスペクトルを収束スペクトルと比較して示したもので、高々80分程度の計算継続時間では、このような大きな差異が生じる可能性があるといえる。このことは、シミュレーションの結果を、有義波高や有義周期のような平均量ではなく、長周期スペクトルそのものについて、

観測値と比較して再現性を議論する場合に、大いに注意を要する点であると考えられる。

(3) 計算海域の大きさの影響

港湾を含む海域の大きさは計算量を勘案して経験的に決められることが多いようである。防波堤開口部先端と開境界の側方スポンジ層との距離（図-1 中 Y' で示す）によって港湾内に進入する波エネルギーの大きさが異なり、したがって港湾内の水面変動が異なることは明らかで、海域サイズについての検討を行なって海域の大小が計算結果に及ぼす影響の程度を把握しておくことが必要である。

そこで、本計算では沖合の造波境界までの距離 7100m は十分な大きさであると仮定して図中 Y' で示す防波堤先端と側方開境界との距離を、最小の 1950m から最大の 9300m まで 9 通りに変えた計算を行なった。

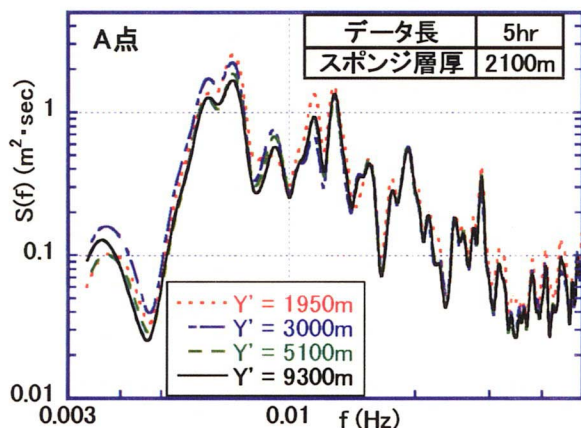


図-11 海域のサイズによるスペクトルの変動

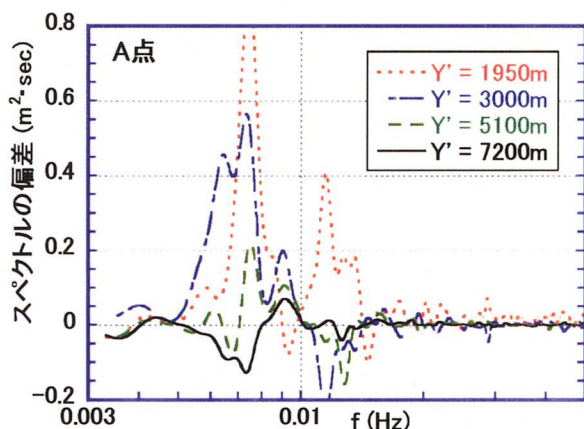


図-12 海域最大時 ($Y' = 9300\text{m}$) のスペクトルとの偏差

図-11 はそのうちの 4 通りの距離について得られたモニター点でのスペクトルを比較したもので、当然ながら海域のサイズによる差異は、周波数が小さくなるにつれて大きく現れてくる。より明確にする

ため、最大距離の $Y' = 9300\text{m}$ の場合のスペクトルを基準に取り、図-11 中に示した各スペクトルとの偏差を図-12 に、またその相対偏差の自乗平均を図-13 に描いている。

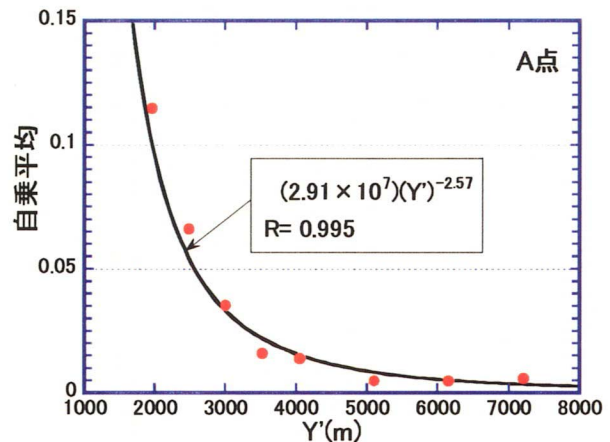


図-13 相対偏差の自乗平均値と海域サイズ (Y') との関係 (回帰曲線と相関係数 R)

これらより周期 60 秒程度以下の成分波については海域サイズの影響は小さいが、周期が大きくなるとともに海域の大きさを制限した影響が大きく現れてくることが分かる。ただし、その現れ方は、スペクトルの周波数に対する変動特性は変化せず、単にピーク周波数におけるスペクトル値が増減する変化となって現れている。

4. あとがき

ブシネスクモデルを用いて港湾内の長周期波浪場を算定する際の、スポンジ層厚、計算継続時間の影響、計算海域のサイズについて検討を行ない、次の様な知見を得た。

(1) 西井ら¹⁰⁾による一次元水路を用いた数値実験の結果からは、スポンジ層によって十分に波を吸収するためには、周期 300 秒では波長とスポンジ層厚の比(相対スポンジ層厚)が 3 程度必要、100 秒から 200 秒の波では 2 程度が必要という結果が得られているが、平面波浪場ではスペクトルに及ぼすスポンジ層からの反射の影響は想定したよりも小さく、スポンジ層厚を周期 100 秒の波の 1 波長程度と比較的小さく設定しても計算領域内で多重反射などが生じることもなく安定した計算結果が得られることが分かった。

(2) 平衡状態の長周期スペクトルを得るためには、少なくとも 5~6 時間の計算継続時間(データ長)を必要とする。これは図-2 に示した入射波スペクトルのピーク周期 120 秒の波が 150~200 波程度含まれる時間に相当する。データ長が 40 分から 100 分程度では、データによるスペクトルの変動が大きく、平衡状態の長周期スペクトルとは大きく異なるスペクトルが得られる場合があり、シミュレーションの結

果と観測値とを比較して長周期波浪場の再現性を検討するような場合には注意を要する点である。

(3) 現実の長周期波浪場が平衡状態に達するような場合があるかについては、明らかにされてはいないと考えるが、著者らが得ることが出来た、数週間にわたる台風通過時の波浪の連続観測結果より、長周期波の有義波高と有義周期の変動を見ると（西井ら⁹⁾）、それらが大きくは変動せず、比較的一定した期間が数時間にわたって現れる場合がある。現時点で言えることは、先述したように、数値計算による長周期波浪場の再現性を観測値と比較して議論する場合、用いる観測値は、平衡状態に近いと考えられ、かつ出来るだけ長い期間の観測データを用いることが必須であって、本文図-9 に示すように、少なくとも平衡状態が 3 時間のデータと 60 分のデータとでは、得られるスペクトルのばらつき(分散)に 2 オーダーもの差異が生じることを踏まえた議論が必要である。

(4) 計算海域の大きさによってスペクトル形が変動するが、この変動は周波数の小さいところほど大きく現れる。また、スペクトルの周波数特性そのものは変化せず、ピーク周波数におけるスペクトル値が増減する変化となって現れる。港口防波堤の先端と海域側方境界(スポンジ層)までの距離が 3km 程度確保されておれば、スペクトル値に大きな影響は生じない。

(5) スポンジ層厚、計算継続時間の影響、計算海域のサイズについて、それぞれの理想的な条件（実務計算上）に対するスペクトルの相対偏差の自乗平均の変動を互いに比較すると、計算継続時間についての自乗平均値が圧倒的に大きい事がわかる。すなわち、計算継続時間を十分大きく取らない限り(少なくとも 3 時間以上)、スポンジ層厚と計算海域のサイズの影響を云々しても意味が無いとも言える。

ブシネスクモデルを用いた港湾内の長周期波動場の再現性については、多くの研究が行われて来ているものの、十分な知見が得られているとは言えない。今後とも、観測値と計算値の詳細な比較を通して検討する必要がある、本研究の結果は、その際の計算

条件の設定に関しての基礎的な知見をあたえるものと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するに当たっては、ブシネスクモデル計算プログラムの改良や、その他の計算処理に関して、石川美晴氏((株)吉井システムリサーチ社友)の多大な助力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 港内長周期波影響評価マニュアル検討委員会：港内長周期波影響評価マニュアル，（財）沿岸技術研究センター，2004
- 2) 平石哲也，平山克也：港湾における波浪変形計算の活用，海洋開発論文集，VOL.19，pp.65-70，2003
- 3) 藤畑定生，秦 禎勝，森屋陽一，中山晋一，関本恒浩：現地観測による港内長周期波浪流速特性とその予測方法に関する検討，海岸工学論文集，第 45 巻，pp.306-310，1998
- 4) 堀沢真人，佐藤典之，大中 晋，青野利夫，Eric C. Cruz，早川 淳：港内長周期波の現地観測とその予測手法，海岸工学論文集，第 45 巻，pp.301-305，1998
- 5) 阿部光信，興野俊也，青野利夫：現地連続観測に基づく港湾内の長周期波の伝播特性に関する検討，海岸工学論文集，第 46 巻，pp.311-315，1999
- 6) 中畑 禎，落合敏浩，柏原裕彦，花山格章，関本恒浩：冬季日本海の現地観測に基づく浅海域への入射長周期波の評価，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.256-260，2001
- 7) 中畑 禎，落合敏浩，柏原裕彦，花山格章，森屋陽一，関本恒浩：現地観測に基づく長周期波の沿岸方向特性，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.261-265，2001
- 8) 平山克也：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.69-89，2002
- 9) 西井康浩，吉田明德，山城 賢，小野貴也：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.256-260，2007
- 10) 西井康浩，吉田明德，山城 賢：長周期波再現計算における境界処理法の基礎的な検証について，海洋開発論文集，VOL.23，pp.153-158，2007