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

Accuracy of Long Wave Simulation in Harbors by Boussinesq Model

太田一行¹·吉田明德²·山城 賢³·安藝友裕⁴·西井康浩⁵

Kazuyuki OTA, Akinori YOSHIDA, Masaru YAMASHIRO, Tomohiro AKI and Yasuhiro NISHII

Accuracy of numerical simulations by Boussinesq model for long waves in harbors was investigated through a comparison between numerical and observed long wave spectra at two stations in Shibushi harbor, Kagoshima prefecture, Japan. To reduce the computational load, which is formidably large in two-dimensional computations for long waves accompanied by wind waves, one-dimensional Boussinesq model computation was conducted first, and incident wave spectra at a point closer to the harbor were estimated from the observed spectra. It was found that the long waves in harbors can be well predicted by using the model at least in terms of long wave spectral power and overall frequency distributions.

1.まえがき

港湾内係留船舶の長周期動揺の精度良い推定には,船 体に作用する波強制力を算定するための波浪場が精度良 く算定されていることが前提となる(吉田ら,2008). 港湾内長周期波浪場の算定には,波の非線形伝播を取り 扱うことが出来るブシネスクモデルの使用が推奨され, 実務において多用されている(平山,2002).しかし, 多くは長周期波のみを入射波とする便宜的な計算がおこ なわれており,(風波+長周期波)の計算によって,ど の程度の精度で長周期波浪場の推定がおこなえるかにつ いては,いくつかの報告(例えばEricら,1998;藤畑ら, 1998;堀沢ら,1998;平山ら,2002)がなされているが 必ずしも明らかではない.

ブシネスクモデルを用いた港湾内長周期波浪場の再現 性の検証には次の難しさがある.(1)計算は定常な入射 波スペクトルを仮定しており,不規則波の統計的変動を 勘案すると最低でも3~5時間程度の計算継続時間を要 する(太田ら,2009).したがって検証に用いる波浪の 観測値も同様の時間に亘ってスペクトル形が定常とみ なせる場合でなければならず,長期間の連続観測であ っても検証に用い得るデータが得られるとは限らない. (2)観測値には海岸からの長周期反射波が含まれるため, 観測スペクトルをそのまま入射波スペクトルとして用い ることが出来ない.(3)計算の格子サイズとタイムステ ップは風波で規定され,スポンジ層を含め計算領域のサ

1	正会員	修(工)	九州大学大学院工学府海洋システム工学
			専攻(現在,(財)電力中央研究所)
2	正会員	工博	九州大学准教授大学院工学研究院
3	正会員	博(工)	九州大学助教大学院工学研究院
4			九州大学工学部地球環境工学科
			(現在,香川県庁)
5	正会員	博(工)	(株)三洋コンサルタント調査部次長

イズは長周期波で規定される.しかも計算継続時間は 格段に大きくとる必要があることから計算量が膨大と なる.

本研究は, 鹿児島県志布志港における港内外の連続波 浪観測(港内2箇所, 沖合1箇所; 図-1)の結果から長周 期波と風波が4時間以上ほぼ定常と見なせる時間帯を抽 出して検証データとし,これを対象に,志布志港近傍の 平均海底形状についての一次元計算(ブシネスクモデル) の結果を援用して,観測スペクトルから任意水深での入 射波スペクトルを推定し,それを用いた平面計算をおこ なって観測スペクトルと比較し,ブシネスクモデルによ る港湾内の長周期波スペクトルの再現性を検証したもの である.

2. 現地観測の概略

平成16年(2004)に、図-1に示す志布志港若浜埠頭の 2地点(A点とB点)において、国土交通省九州地方整備 局志布志港湾事務所により、8月21日から10月5日まで 実質43日間にわたり、波浪計(協和商工製DL-2型)を 用いた波高(水圧式)と成分流速の連続観測がサンプリ ング間隔0.5秒で行なわれている.この観測期間中、枇



図-1 志布志港における波浪観測位置



椰(ビロウ)島近傍の海底波高計(ナウファス;水深 36m)についても波高(超音波式と水圧式)と成分流速 を連続観測に切り替え,途中の停電や機器の不具合によ る欠測期間を除いた,8月22日から9月14日までの約24 日間のデータが得られている。

3. 検証用データの抽出

得られた観測データが無条件に数値シミュレーション の検証に用い得るものではない点に注意が必要で、計算 での仮定と同様, 観測データも定常状態を保っているこ とが比較検証に用いるための前提となる.このため、沖 合の観測値と港内の観測値から風波と長周期波の有義波 高と有義周期の時系列を算定し、それらの変動がともに 4時間程度,設定した閾値(有義波高の変動;風波20cm, 長周期波3cm)以下となる期間を抽出し、検証データと して用いることとした. 有義波高と有義周期の算定は, データ長を風波1時間,長周期波3時間,ずらし時間30 分でおこなった. 図-2にその一例を示す. このようにし て全観測期間から計7個の検証データ区間を抽出したが、 これらの観測スペクトルは、例として図-3(a) に示すよ うな風波に急峻なピーク周波数を有するスペクトルと, 図-3(b) に示すようなうねりと風波とにそれぞれピーク を有するスペクトルに大別された.後者のタイプは風波 とは別起源のうねりが同時に侵入していることが考えら れることから、検証には前者のタイプのスペクトルを有 する4期間の観測データを用いることとした.



4. 一次元計算による入射波スペクトルの推定

観測値には海岸からの長周期反射波が含まれるため, 観測スペクトルをそのまま入射波スペクトルとして用い ることが出来ない.しかも,計算格子のサイズは風波を 対象に小さくとらざるを得ず,計算領域と計算継続時間 は長周期波を対象に大きくとらざるを得ないため,計算 労力を考えるとビロウ島付近を造波境界とする平面計算 をおこなって種々の検討をすることは実際上難しい.

これらの問題点を解決(便宜的ではあるが)するため,



h=10m以浅は一定水深にとり,長周期波を吸収するスポ ンジ層を設定して,陸域からの反射がほとんど起こらな いようにした海域①と,h=5mに反射岸壁を設けて,長 周期波成分がほぼ完全に反射するようにした海域②につ いて(図-4参照),ブシネスクモデルによる一次元計算を おこない,それらの結果より入射波スペクトルの推定と 計算領域の削減をおこなった.用いる海底形状は,図-1 中に示すように,海図上で主たる波向(SSE)に3本の 線を引き,それらの線に沿う海底地形を平均したものを 用いた.計算には平山らによるNOWT-PARI Ver.4.6βを 改良したモデルを用い,計算格子幅は10m,時間ステッ プは風波有義周期の1/270とし,計算継続時間は4時間と した.

これらの海域に対して、抽出した4個の観測スペクト ルを入射波(風波部分のみ)とする計算を行い、水深の 異なるいくつかのモニターポイントにおいて、水面変動 のスペクトルと長周期波の有義波高・有義周期を算定し た. 一例として, 図-5に8月28日3~6時の風波を入射さ せた場合の, h=50m, 36m, 28m, 16mにおける海域①と 海域②のスペクトルを示す.実際の観測スペクトルには 陸域からの異なる方向への長周期反射波が含まれている と考えられるが、一次元計算による観測位置での海域① と海域2)のスペクトル比を観測スペクトルに乗じること で,便宜的に入射波スペクトルを推定することができる. 計算の沖合境界(造波境界)を観測地点に取れば、この 推定入射波スペクトルを用いることで、観測値と計算値 の比較が可能となる.しかし、造波境界と港が大きく離 れているため計算領域が大きく,計算には比較的高速の PCを用いても1ケースの計算に十数日を要し、種々の条 件について検討することは難しい. そこで一次元計算の 結果をさらに用い、任意の水深位置における入射スペク トルの推定を行い、造波境界を港に近く取った計算領域 について平面計算をおこなうこととした.図-6は、一次 元計算でのモニター点のスペクトルより算定した長周期 有義波高の変動を、h=48m地点での有義波高に対する比 として、4個の入射波(風波)についてそれぞれプロッ トし,回帰曲線を描いたもので,水深変化に伴う長周期



有義波高の増大の割合は、風波の有義波高によらずほぼ 同一の曲線で与えられることが分かる.そこで、観測地 点での長周期波部分のスペクトルを、この曲線を用いて 任意水深での値に補正し、これを平面計算の入射波とし て用いることとした(風波部分は観測地点でのスペクト ルをそのまま用いる).

実際におこなった検証計算では、造波境界をh=20mの 地点に設定することとし、まず、海域②の計算結果より、 h=20mとh=36m(観測水深)での長周期スペクトルの比 を観測スペクトル(長周期)に乗じてh=20mでの観測ス ペクトルを推定した.ついで、その観測スペクトルに h=20mでの海域①と海域②のスペクトル比(長周期)を 乗じることによって反射波の影響を除去した入射波スペ クトルを推定した.図-7は8月28日15~18時の観測値に



図-8 平面計算の領域

表-1 言	†算に用い	いた反射率

	反射率
直立壁 (崖)	1.0
直立消波構造物	0.5
異形消波ブロック堤	0.4
砂浜海浜	0.2

ついて推定した入射波スペクトル(*h*=20m)と,同水深 における一次元計算の結果を比較したものである.反射 波を含まない海域①のエネルギーレベルに近いことが確 認できる.

5. 平面計算による観測値との比較検討

h=20m地点を造波境界とする計算領域(図-8)につい て平面計算をおこない,港内のA点とB点でのスペクト ルを,同地点で得られている観測スペクトルと比較する ことで,数値シミュレーションの精度を検討した.沿岸 方向の計算領域サイズは著者らの検討の結果(西井ら, 2008)を参考に設定している.平面計算に当たっては, まずスペクトルの風波部分のみに着目して計算値と観測



値の比較をおこない、港湾内護岸や海浜境界の反射率, 入射波スペクトルの方向分散についての妥当な設定値を 検討した.この際の計算継続時間は40分で打ち切ってい る. その結果, 消波護岸や砂浜海浜については一般的に 用いられている反射率(合田, 2008)を参考に表-1に示 す値を使用し、方向分散はSmax=25を採用した。消波護岸 および砂浜海浜については、設定値からの若干の変動に よるスペクトルの変化はほとんど無かったのに対し、港 内の直立壁護岸については,通常推定されている反射率 Kr=0.9程度の設定では、スペクトルが小さめに推定され ることから、直立壁はすべて完全反射の1.0に設定した. これらの設定条件のもとで、最後に抽出した4個の観測 スペクトルそれぞれについて、計算継続時間を3時間と した計算をおこなって計算結果と観測結果を比較した. 図-9(a) はA点, 図-9(b) はB点における比較を示して おり、8月28日15~18時のデータに関しては比較のため、 直立壁の反射率Krを0.9に設定した結果も合わせて示し ている.計算値と観測値の合致の程度は、4個のデータ について必ずしも同じではなく、またA点とB点によっ ても異なっているが、長周期波部分のスペクトルのパワ ーおよびその周波数特性について,数値シミュレーショ ンの結果は、観測値を比較的良く再現しているといえる. ただし、計算による推定値と観測値とのこれらの差異の 程度が、係留船舶の動揺にどのように影響するかについ ては、動揺解析をおこなって評価することが必要である.

1ケースのみだが、造波水深を観測水深(h=36m)に 取った計算もおこなってみた.計算量は著しく増大する が、入射波スペクトルを推定する際に、水深位置を浅く 取るための近似が不要で、観測スペクトルから反射波の 影響を除去するだけで済むことから、より妥当な比較を おこなうことが可能で、造波水深を港に近く取ることに





図-10 造波水深を観測水深(h=36m)に取った計算結果

よる精度の低下を評価することを期待したものである. 結果を図-10に示すが,予想に反して,全体的に計算値 が観測値を過小評価する結果を得た.この理由は必ずし もよく分からないが,一次元計算では入・反射波の波向 きが固定されるのに対して,平面計算では防波堤や海岸 からの反射が多方向に生じるため,一次元計算の結果を 用いて反射波の影響を除く際に,陸域に近い点のほうが, 一次元計算の仮定がより妥当なことも一つの理由として 考えられる.

6. あとがき

本研究では、志布志港で測得された港内外の連続波浪 データとの比較により、ブシネスクモデルによる長周期波 浪場の再現性を検討した.その結果、以下の知見を得た.

- a)比較検証に用いる波浪観測データは3~5時間程度ほ ぼ定常状態を保っていることが必要である.沖合と港 内の観測値から有義波高と有義周期の時系列を算定 し、それらの変動がともに4時間程度,設定した閾値 以下となる期間を抽出したところ、長周期有義波高が 有意な値(40cm程度)を示す時間帯でいくつかの検証 データを抽出することが出来た.
- b) ブシネスクモデルによる一次元計算を援用して、沖 合の観測スペクトルから造波境界を設定する任意水深 位置での入射波スペクトルを推定し、平面計算をおこ なって港内の観測値と比較した.その結果、長周期ス ペクトルのパワーおよびその周波数特性について計算

値は観測値を比較的良く再現することがわかった.

- c) 平面計算においては、まず風波部分のみに着目して 港湾内護岸や海浜境界の反射率の妥当な設定値を検討 した.この際、消波護岸や海浜については、通常用い られている設定値内での若干の変動による変化はほと んど無いのに対し、直立壁護岸については通常推奨さ れている反射率0.9程度の設定では、風波部分のスペ クトルが小さめに推定され、長周期波部分も70秒程度 以上の周期を除くと小さめに評価する結果となること から、直立壁はすべて完全反射の1.0に設定した。
- d) 1ケースのみだが、造波水深を観測水深(h=36m)に 取った計算をおこない、造波水深を港に近づけて取る ことによる精度低下の評価を試みたが、予想に反し、 計算値が観測値を過小評価する結果を得た.一つには 一次元計算の結果を用いた入射波スペクトルの推定に おいて、陸域に近い点のほうが、一次元計算の仮定が より当てはまることが考えられるが、さらに検討が必 要である.

謝辞:ブ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)および小野貴也 氏((株)三洋コンサルタント)の助力を得た.記して 感謝の意を表わします.

参考文献

- 太田一行・吉田明徳・山城 賢・小早川直紀・西井康浩 (2009):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,土木学会論文集B2(海岸工 学), Vol.B2-65, No.1, pp.231-235
- 合田良實(2008):耐波工学―港湾・海岸構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 217-258
- 西井康浩・吉田明徳・太田一行・山城 賢・加嶋武志 (2008): 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,海洋開発論文集,第 24巻, pp. 429-434
- 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
- 平山克也・上原 功 (2002):消波構造物に作用する波浪の消 波機構を考慮した港内波浪変形計算,海岸工学論文集, 第49巻, pp. 671-675
- 藤畑定生・秦 禎勝・森屋陽一・中山晋一・関本恒浩 (1998):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
- 堀沢真人・佐藤典之・大中 晋・青野利夫・Eric C. Cruz・早 川 淳(1998):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
- 吉田明徳・西井康浩・山城 賢・加嶋武志・太田一行 (2008): ブ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
- Eric C.Cruz · 青野利夫 · 堀沢真人 · 早川 淳(1998) : 拡張ブ ーシネスク方程式を用いた港内長周期波の解析,海岸工 学論文集,第45巻, pp. 266-270