

ビジネスモデルを用いた港湾内長周期波浪場 解析のための入射波スペクトルに関する 断面2次元の検討

ONE-DIMENSIONAL CALCULATIONS ON NON-LINEAR GENERATIONS OF
LONG WAVES BY BOUSSINESQ MODEL

太田一行¹・吉田明德²・山城 賢³・小早川直紀⁴・西井康浩⁵
Kazuyuki OTA, Akinori YOSHIDA, Masaru YAMASHIRO,
Naoki KOBAYAKAWA, and Yasuhiro NISHII

¹学生会員 九州大学工学部 修士課程 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

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)

⁴学生会員 九州大学工学部 修士課程 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁵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)

As for a preliminary study on how to set incident wave spectra in order to obtain proper numerical estimations of long wave fields in harbors, one-dimensional calculations by the Boussinesq model were conducted to investigate non-linear long wave generations as random wind waves approach on shore. Random wind waves of the Bretshneider-Mitsuyasu spectra for several combinations of the significant wave heights and significant wave periods were used with respect to three different sea bottom slopes. Setting two-different boundary conditions at the end (coast), in which one is an open-boundary condition and the other is a partly reflective boundary condition, the second order long period wave fields were obtained respectively. Comparing the spectra obtained from the water surface oscillations at different depths, spatial variations of wave spectra, significant wave heights and wave periods of the long period waves were examined, and several findings for the relations between the generated long wave spectra and the significant wave height and period of the incident wind waves were obtained.

Key Words : Harbor oscillation, Boussinesq model, bound wave, free wave, long wave, ship motion

1. まえがき

港湾内の船体動揺の推定精度は波浪場算定の精度によるところが大きく、特に港湾整備に伴って顕在化する傾向にある大型係留船舶の長周期動揺の計算において、長周期波浪場をいかに精度良く算定するかは大きな問題である。長周期波浪場の推定には、不等水深海域における波の非線形伝播を取り扱えるビジネスモデルが推奨されているが、その妥当性や推定の精度について必ずしも明らかではない。数値モデルの妥当性を水槽実験で検証することは、水槽内で生じる長周期波の多重反射を制御することが難しいことから、妥当性は現地観測のデータと数値解析の結果を比較検討して議論せざるを得ない。しかし、沖合での長周期波の観測値には入射波と海岸

からの反射波が混在しており、両者を分離できないことから、数値モデルに用いる入射波スペクトルとして観測スペクトルをそのまま用いることは出来ず、「入射波スペクトルをどう与えれば妥当なのか？」という問題が残る。

長周期波浪場を数値計算によって推定する場合、用いる入射波としては次の3通り、①風波のみ ②長周期波のみ ③長周期波+風波、が考えられる(港内長周期波影響評価マニュアル検討委員会¹⁾)。 “①風波のみ” の場合は入射波スペクトルの設定は最も簡単である。しかし、風波の非線形伝播による長周期波の発生を取り扱うことから、計算海域周辺に設置するスポンジ層の必要幅は長周期波が対象となり、かつ格子サイズと時間ステップは風波が対象となる。しかも、風波の入力条件が成り立つには、

計算上の造波境界は十分水深が大きな沖合に取る必要があり、計算海域は大きくなる。加えて、定常なスペクトルを得るに要する計算継続時間に湾内水面振動の共振特性が大きく影響することから、1～2時間程度の計算継続時間ではスペクトルの変動が大きく、計算継続時間をより大きく取る必要があり、計算労力は一層膨大となる（太田ら²⁾）。

“②長周期波のみ”の場合は、長周期波のスペクトルを有する自由波を入射させることになり、格子サイズおよび時間ステップは長周期波のみが対象となる。しかしこの場合、どのようなスペクトル形を与えれば、港湾内の水面振動を妥当に再現することが出来るかが問題となる。平石ほか³⁾は、長周期波スペクトルを一定として与える標準スペクトルを提示しているが、これによって動揺解析に必要な精度の長周期波スペクトルが推定できるかは、必ずしも明らかではなく、観測値と大きく異なるスペクトルを与える場合も報告されている（西井ほか⁴⁾）。

“③長周期波＋風波”の場合は、①と②の計算上の問題点が同時に生じることになる。

浅海域における拘束長周期波と岸沖長周期自由波の発生機構については、多くの研究が積み重ねられかなりの程度知見が得られているものの（例えば、喜岡ほか⁵⁾、寛田・水口⁶⁾、関本ほか⁷⁾、関・水口⁷⁾）、多くは2成分波による波群の変形問題としての理論的あるいは実験的な検討で、港内長周期波浪場の推定に直接用い得る段階にはいたっていない。

長周期波に関する知見が十分でない現状では、インプットとしての入射波スペクトルと、アウトプットとしての湾内水面変動スペクトルとの関連を、観測値と計算値それぞれについて算定し、両者の詳細な比較検討を通して、妥当な入射波スペクトルを推定せざるを得ない。著者らは、細島港（宮崎県）と志布志港（鹿児島県）の沖合と湾内で、長期間波浪の同時連続観測を行ったデータを保有しており、これらのデータをブシネスクモデルによる解析結果と比較して、長周期波浪場の推定値の妥当性を検討することを考えている。しかしながら、全ての検討を平面波浪場の計算でおこなうことは、膨大な計算労力を要する。そこで、本研究では、これらの前段階として、港湾につながる海域で生じる長周期波の特性を数値的に検討することを目的に、いくつかの異なる海底勾配を有する断面2次元の海域を設定し、陸域からの反射波の有無や、入射波のスペクトルを変化させた計算をおこなった。

2. 計算海域の設定と計算条件

計算には平山ら⁸⁾によるNOWT-PARI Ver.4.6βを一

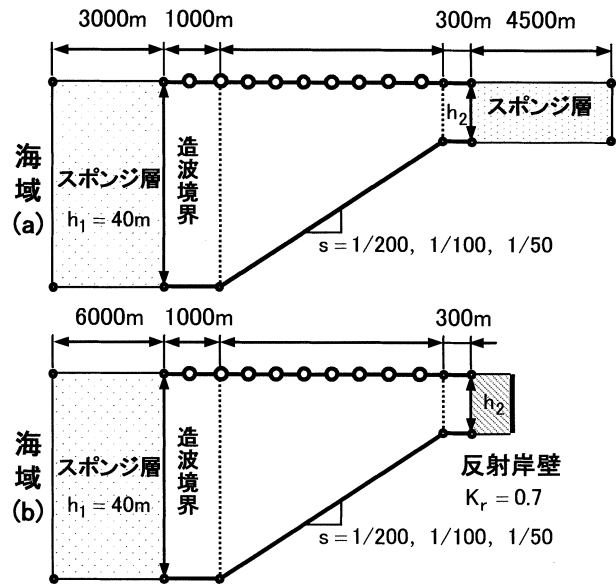


図-1 断面2次元計算海域(a)(b)

部改良したモデルを用いた。計算に用いた断面2次元の海域（図-1）は、水深40mを沖合水深に取り、造波境界から1kmの一定水深区間を経て一様勾配の海底形状を有する断面である。岸側水深 h_2 が10mの一様水深の海域に長周期波を十分に吸収消波できるスポンジ層を設置し、陸域からの反射がほとんど起こらない場合を想定した海域(a)と、現実の護岸を想定し、岸側水深 h_2 が5mの一定水深の海域に平山らの方法で風波に対する任意反射率0.7に設定したスポンジ層を配置した海域(b)の2通りを対象に、それぞれ3通りの異なる傾斜勾配（ $s=1/50, 1/100, 1/200$ ）についておこなった。なお、海域(a)で生じる反射波の割合がほぼ無視できることを確認するため、陸側水深 h_2 をさらに大きく20mに取った場合についても計算をおこなって、沖合水深36mで算定した長周期波スペクトルが同じ値をとることを確認した。入射波は修正Bretschneider-Mitsuyasu スペクトルを有する不規則波を用い、有義周期 $T_{1/3}$ を10, 12, 14, 15秒、有義波高 $H_{1/3}$ を2, 3, 4, 5, 6mについて計算をおこなった。水深の異なるいくつかのモニターポイントにおける水面変動のスペクトルと、30秒～300秒間の成分波を再合成した波形より、長周期波の有義波高 $H_{L1/3}$ 、有義周期 $T_{L1/3}$ を算定した。スペクトルを512個の等エネルギー分割した成分波で与え、計算格子は10m、時間ステップは1/200秒、計算継続時間12時間で全ての計算をおこなった。

3. 数値計算結果と考察

(1) 計算継続時間と長周期波スペクトルの変動

港湾内の長周期波浪の数値計算において、定常な

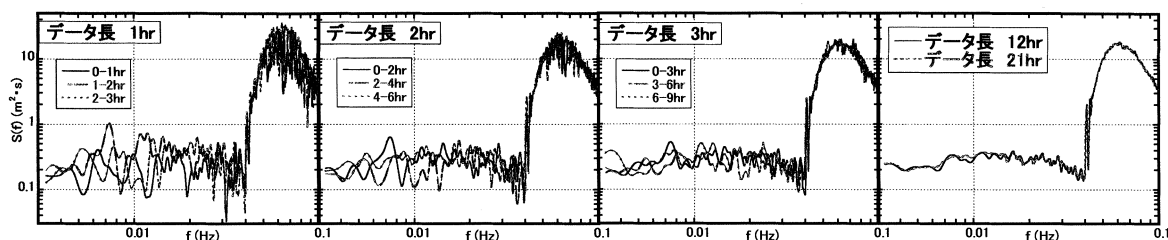


図-2 データ長(計算継続時間)によるスペクトルの変動
($H_{1/3}=3\text{m}$, $T_{1/3}=14\text{s}$, $h=16\text{m}$, $s=1/50$, 海域(a))

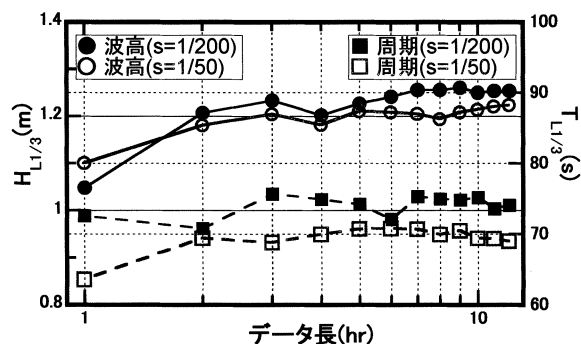


図-3 データ長による $H_{L1/3}$ と $T_{L1/3}$ の収束
(海域(a), $H_{1/3}=6\text{m}$, $T_{1/3}=14\text{s}$, $h=16\text{m}$,
実線 $H_{L1/3}$, 破線 $T_{L1/3}$)

スペクトルを得るための計算継続時間に関しては、従来十分な議論(観測値の定常性についても同様)がなされることなく、1時間ないし2時間程度の計算継続時間の結果を用いて議論がなされているようである。本計算は断面2次元計算であることから、湾内水面振動の共振特性が計算継続時間に影響することは無いが、数値計算で定常なスペクトルが得られるための計算継続時間を検討しておく必要がある。このため、計算継続時間を21時間と大きく取って得られた水面変動の時系列よりデータ長を変化させてスペクトルを算定しその変動を調べた、図-2は水深16m地点の水面変動の時系列より連続して抽出した、データ長1時間、2時間、3時間、12時間のスペクトルの変動と、21時間全部を用いた場合のスペクトルについて示している。

これより、データ長が1時間ないし2時間では、収束スペクトルとの相対誤差および抽出区間によるばらつきが大きいことがわかる。データ長12時間と21時間ではほぼ同一のスペクトルを与えることから、本研究では、計算継続時間12時間で計算をおこなっている。図-3は30秒～300秒の長周期成分を再合成し、得られた長周期波形よりゼロアップクロス法で算定した長周期波の有義波高と有義周期の変動を、用いるデータ長を変化させてプロットしたもので、12時間のデータ長はほぼ十分な収束値を与えることがわかる。

(2) 風波の進行に伴う長周期波スペクトルの変化

沖合から岸側極浅海域までの異なる水深位置におけるスペクトルの変動の様子を、入射風波の有義波高 $H_{1/3}=4\text{m}$ の場合で、有義周期 $T_{1/3}=10, 12, 14, 15\text{s}$ について図-4に示している。なおこの場合、長周期波スペクトルの微細な周波数特性を議論することが目的ではないことから、平滑化を大きく取って長周期波スペクトルの全体的な変動を示している。

まず、陸域からの反射が無い海域(a)の場合を見ると、水深が大きい沖合では長周期波のスペクトルは緩やかなピークを有する山形の分布形状をとることがわかる。このことは海底勾配によらないが、海底勾配が緩やかな $s=1/200$ の方がピーク位置が低周波数側にある。長周期波スペクトルが山形をとる傾向は、風波の有義周期が大きいほど、かつ水深が大きい沖合ほど顕著となる。陸域からの反射が生じる海域(b)でも同様に山形の分布を成すがその程度は海域(a)の場合ほどは顕著でない。海底勾配が急な $s=1/50$ の場合に、水深が浅くなると長周期波のスペクトルが波打つのは、反射によって形成される長周期重複波が陸域に近いほど明確に現れることによる。この反射波のスペクトル形は、海底勾配が緩やかな $s=1/200$ の場合には明確に現れておらず、 $s=1/50$ の場合に較べて風波の進行距離が大きく水深変化が緩やかなことから、反射自由波の形成が風波の進行とともに徐々に起こることによって考えられる。海域(a)と海域(b)のスペクトル形の大きな違いは、海域(a)では長周期波のスペクトルが風波の進行に伴って増大していくのに対して、海域(b)では長周期波のスペクトルが大きくは変動しないことである。これは陸域から沖向きの反射波(長周期自由波)が存在するため、水深位置によらず反射波のエネルギーが同程度に含まれていることによる。また、反射波が存在する場合には、風波の有義周期による長周期波スペクトルの分布形が水深によらずほぼ相似になる。

(3) 長周期波の有義波高と有義周期の変動

これらのスペクトルの変動を定量的に見るため、長周期波スペクトル30秒～300秒のフーリエ成分を使って長周期波形を合成し、ゼロアップクロス法による波別解析を行って長周期波の有義波高 $H_{L1/3}$ と有義周期 $T_{L1/3}$ を算定した。図-5と図-6は $H_{L1/3}$ の変動を

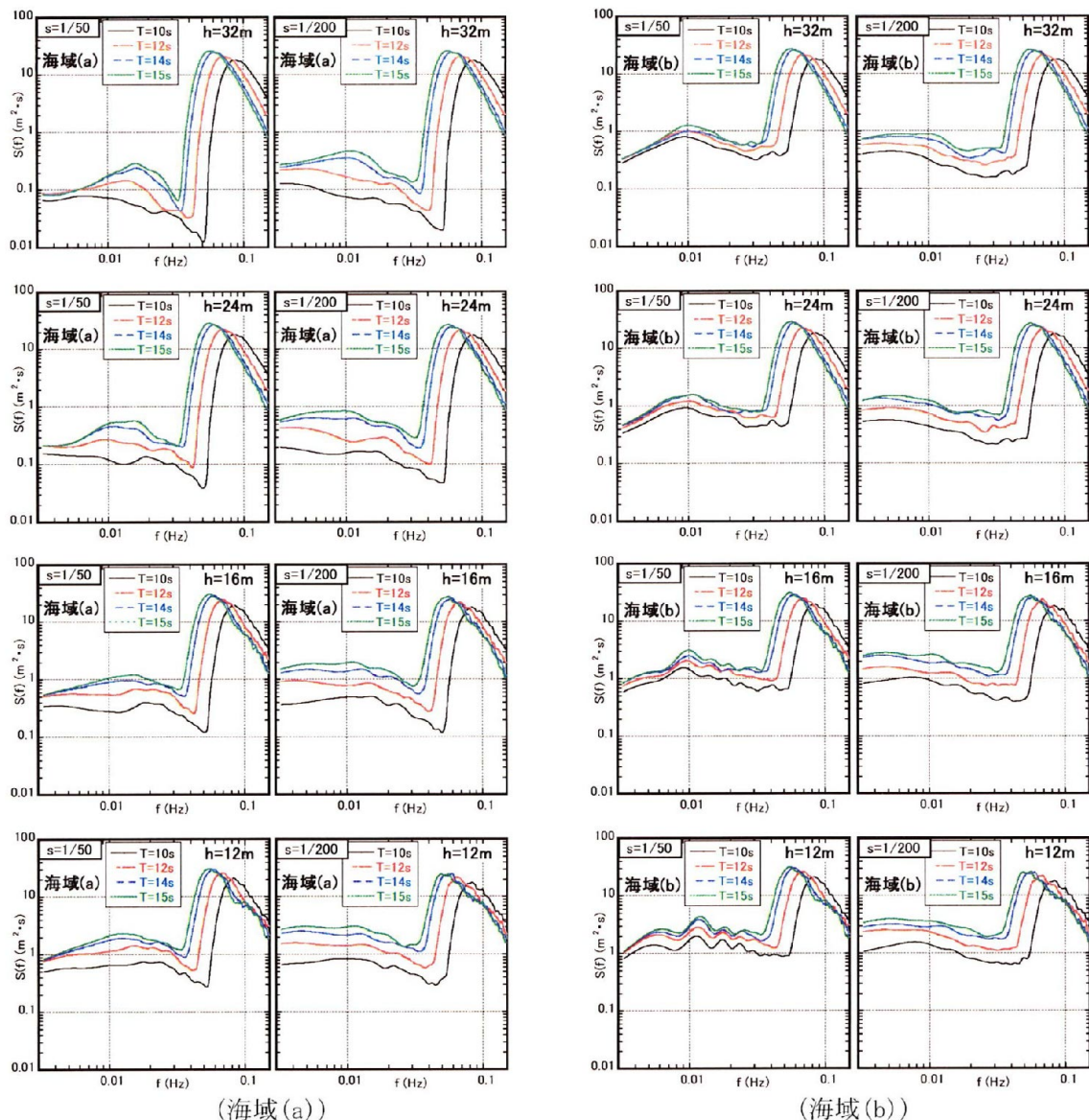


図-4 長周期波スペクトルの変化($H_{L/3}=4\text{m}$)

水深 h を横軸にとって示したもので、いずれも図中実線は海底勾配が緩やかな $s=1/200$ で破線は $s=1/50$ の場合である。図-5は反射が生じない海域(a)の場合で、 $H_{L/3}$ はほぼ拘束長周期波から構成されている。反射が無い場合には海底勾配の影響は小さく有義周期10秒の場合にはほとんど一致した値をとる。一方、図-6の拘束長周期波と反射波(自由波)が混在している海域(b)の場合には、海底勾配が緩やかな $s=1/200$ の場合の方が、 $s=1/50$ の場合よりも常に小さな値を取っており、反射波の生起の程度が勾配によって異なっている。しかも海域(a)の場合とは逆に、風波の有義周期が小さいほうがその差が大きく現れている。図-5と図-6を比較すると、海域(a)の $H_{L/3}$ には陸域からの反射波が無いことから、沖合では海域(b)の $H_{L/3}$ より小さいが、水深が浅くなるとともに海域(b)の場合の $H_{L/3}$ に急速に近づき水深12mではほぼ同じ値となる。これは有義波高で見ると、極浅海域での値は自由波の有無によらず、

ほぼ拘束長周期波の有義波高で代表させることができることを意味している。図-7と図-8はそれぞれ図-5と図-6に対応する有義周期の変動を示している。長周期有義周期については有義波高の場合ほど水深による明確な変動の傾向は現れないが、勾配が急な $s=1/50$ の場合は水深が浅くなるとともに有義周期が減少する傾向が見られる。

図-9は風波の有義周期 $T_{L/3}=14$ 秒、海底勾配 $s=1/200$ の場合について、風波の有義波高 $H_{L/3}$ による $H_{L/3}$ の変動を示したもので、図中の実線は海域(a)の場合、破線は海域(b)の場合で、水深 $h=32\text{m}$, 24m , 16m , 12m での変動を示している。図-9より、 $H_{L/3}$ が大きくなるほど、反射波の有無が $H_{L/3}$ に占める割合は小さくなることがわかる。一方、図-10は $H_{L/3}=4\text{m}$ に取り、 $T_{L/3}$ を変化させた場合の $H_{L/3}$ の変動を示している。 $T_{L/3}$ が増大すると $H_{L/3}$ はほぼ線形的に増大する。しかも増大の割合は海域(a)と海域(b)でほぼ同じで水深が浅くなるほど増大の割合が大きい。

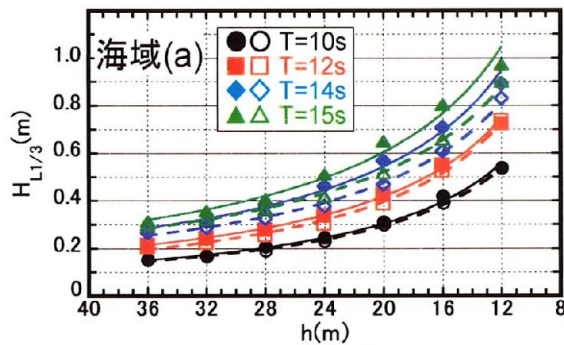


図-5 $H_{L1/3}$ の水深による変動
(海域(a), 破線 $s=1/50$, 実線 $s=1/200$)

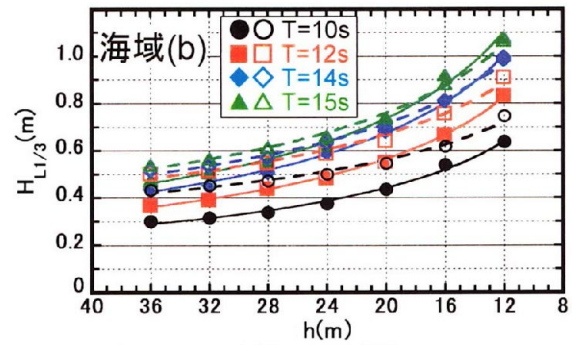


図-6 $H_{L1/3}$ の水深による変動
(海域(b), 破線 $s=1/50$, 実線 $s=1/200$)

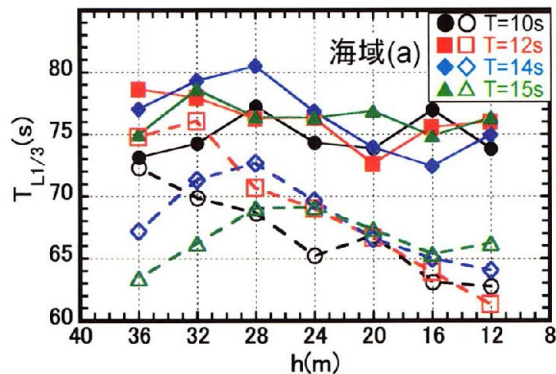


図-7 $T_{L1/3}$ の水深による変動
(海域(a), 破線 $s=1/50$, 実線 $s=1/200$)

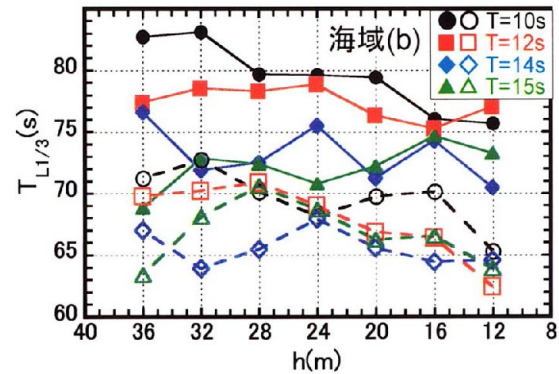


図-8 $T_{L1/3}$ の水深による変動
(海域(b), 破線 $s=1/50$, 実線 $s=1/200$)

いくつかの現地観測において、 $H_{L1/3}$ と風波の物理量 ($H_{L1/3} \cdot T_{L1/3}$) との間にはほぼ線形の比例関係があることが報告されている^{10) 11) 12)}。本解析における結果より算定した結果を図-11、図-12に示している。海域(a)の場合には長周期有義波高と入射風波の物理量 ($H_{L1/3} \cdot T_{L1/3}$) との間には二次関数の関係が見られ、特に水深が大きいほど明瞭である。一方、陸域からの反射波が存在する海域(b)の場合にはほぼ線形の関係が成り立っている。先述した観測値の報告と図-13の結果を比較するとかなりの程度合致する事から、平面波浪場の検討の際に断面計算による長周期有義波高の推定値を参考に用いることが出来るのではないかと考えられる。

4. あとがき

ブシネスクモデルによる港湾内長周期波浪場の推定精度の検証を最終的な目的に、その前段階として、陸域からの反射がほとんど起こらない場合を想定した海域(a)と、陸域からの反射が生じる現実の護岸を想定した海域(b)について、ブシネスクモデルを用いた断面2次元計算をおこなって、風波の非線形伝播によって生じる長周期波のスペクトル、および有義波高 $H_{L1/3}$ と有義周期 $T_{L1/3}$ の空間的な変動を調べた。得られた結果を要約すると以下のようである。

- (1) 長周期波スペクトルは全体として緩やかなピークをとる山形の分布形状をなし、風波の有義周期が大きいほどその程度も大きい。
- (2) 水深が浅くなるとともに、山形の分布形状は平坦な分布に近づく。
- (3) 陸域からの反射波が生じない場合は、水深が同じならば $H_{L1/3}$ は海底勾配によらずほぼ同じ値をとるが、反射が生じる場合には海底勾配による差が大きく表れ、その差は風波の有義周期が小さいほど顕著となる。
- (4) 海域(b)の $H_{L1/3}$ は、海域(a)の $H_{L1/3}$ に較べると、水深が大きな沖合で1.5～2倍程度の値を取るが、水深が浅くなるとともに両者の差は小さくなり、水深12mでの差は10%程度である。
- (5) $T_{L1/3}$ には、 $H_{L1/3}$ ほど水深変化に伴う明瞭な傾向は現れないが、海底勾配が大きいと水深の減少とともに $T_{L1/3}$ も減少する傾向にある。
- (6) 海域(b)の $H_{L1/3}$ と海域(a)の $H_{L1/3}$ の差は、入射する風波の有義波高が大きくなるとともに減少する。
- (7) 入射する風波の有義周期 $T_{L1/3}$ が増大すると、陸域からの反射の有無によらず、 $H_{L1/3}$ は線形的に増大する。
- (8) 風波の ($H_{L1/3} \cdot T_{L1/3}$) に対する $H_{L1/3}$ の変化について、既往の観測値と比較した結果、ほぼ同程度の値を与える事から、平面波浪場の検討の際に、断面計算による長周期有義波高の推定値を参考に用いることが出来ると考えられる。

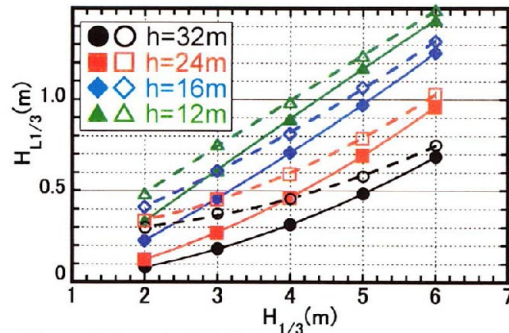


図-9 風波の有義波高 $H_{1/3}$ に対する $H_{L/3}$ の変動
($s=1/200$, 破線は海域(b), 実線は海域(a))

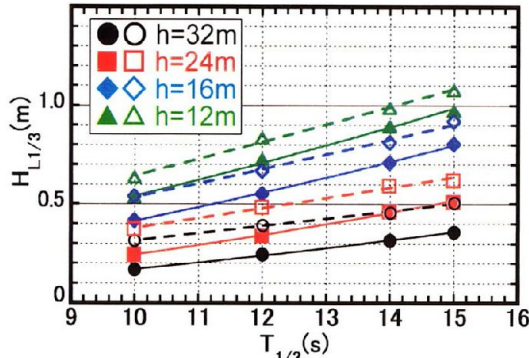


図-10 風波の有義周期 $T_{1/3}$ に対する $H_{L/3}$ の変動
($s=1/200$, 破線は海域(b), 実線は海域(a))

著者らは、志布志港（鹿児島県）の沖合と湾内で、長期間波浪の同時連続観測を行ったデータを保有している。観測データの予備的な解析をおこなった結果、数時間に渡って長周期波スペクトルがほぼ定常と見なせる状況があることから、ブシネスクモデルによる計算値と観測値との比較により、長周期波浪場推定に用いる入射波の設定について検討することができると考えられる。本研究で得られた知見は、その際の有用な指針を与えるものである。

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）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

- 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) 太田一行，吉田明徳，山城賢，小早川直紀，西井康浩：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，海岸工学論文集，第56巻，2009（投稿中）
- 3) 平石哲也，河野信二，玉城重則，長谷川準三：港内構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて，海岸工学論文集，第44巻，pp. 246-250，

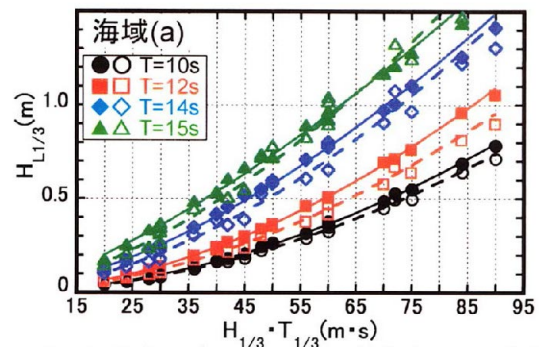


図-11 風波の $(H_{1/3} \cdot T_{1/3})$ に対する $H_{L/3}$ の変動
(海域(a), 破線 $s=1/50$, 実線 $s=1/200$)

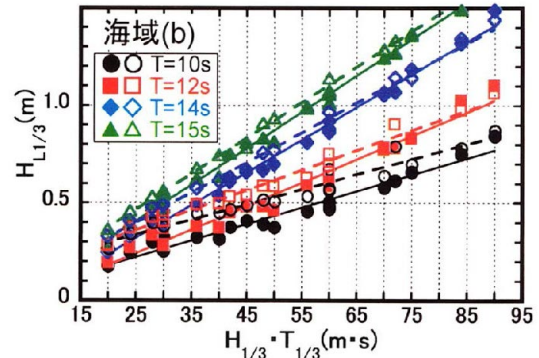


図-12 風波の $(H_{1/3} \cdot T_{1/3})$ に対する $H_{L/3}$ の変動
(海域(b), 破線 $s=1/50$, 実線 $s=1/200$)

1997.

- 4) 西井康浩，吉田明徳，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
- 5) 喜岡 渉，山根 聡，青木伸一：波群とそれに伴う長周期波の反射，海岸工学論文集，第43巻，pp. 166-170，1996.
- 6) 寛田博章，水口 優：単一波群による長周期波，海岸工学論文集，第43巻，pp. 161-165，1996.
- 7) 関本恒浩，森屋陽一，水口 優：自由長周期波の発生とその定量的評価に関する理論的考察，海岸工学論文集，第47巻，pp. 236-240，2000.
- 8) 関 克己，水口 優：自然海浜における長周期波の重複波構造と反射特性，海岸工学論文集，第51巻，pp. 131-135，2004.
- 9) 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.
- 10) 松良精三，渥美洋一，菅沼史典，宮元義憲：波群に拘束された長周期波の港内における増幅特性と船体動揺に関する現地観測，海岸工学論文集，第41巻，pp. 71-75，1994.
- 11) 堀沢真人，佐藤典之，大中 晋，青野利夫，Eric C. Cruz，早川 淳：港内外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.
- 12) 阿部光信，興野俊也，青野利夫：現地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.