

多点観測による港内外の波浪特性と港内係留船舶の 長周期動揺特性について

土田 充* ・ 灘岡和夫** ・ 西村剛士***
佐藤恒夫**** ・ 山口孝市***** ・ 平石哲也*****

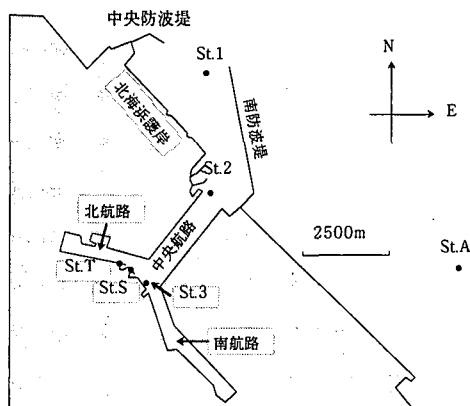
1. はじめに

港内が静穏であるにも関わらず船体が長周期で大きく動揺し、係留索の破断や荷役の中止が引き起こされる現象が近年各地で報告されている。例えば、能代港（田端ら、1995）や九州電力（株）の苓北発電所専用港湾（朝崎ら、1996）においては、港湾の副振動が励起される周期で、港外に対して港内の長周期波高が数倍程度増幅し、波浪の選択的な増幅周期と係留系の固有周期が一致することにより船体の長周期動揺が発生するとしている。また、苫小牧東港（松良ら、1994）においては、長周期波がほとんど減衰せずに港内に侵入するため、長周期波が特定の副振動周期だけでなく、比較的広い周期帯で高い波高レベルを保持しており、係留系の固有周期がこの周期帯域に存在する場合には、共振のために船体が長周期で大きく動揺すると指摘している。鹿島港においても、こうした長周期動揺が報告され「底うねり」と呼ばれている。鹿島港では、防波堤などの効果により長周期波が港内でかなり低減されるが、さらなる稼働率向上のために具体的な対策の必要性が検討されている。そこで本研究では、港内外に設置された波高計・流速計により得られたデータに基づき、まず、港内外長周期波の特性について述べ、次に、ビデオ撮影により船体動揺特性を明らかにした。最後に、数値波動解析を用いて、港内の平面的な波動特性と構造物配置による長周期波高の低減の可能性を検討した。

2. 港内外長周期波の特性

（1）港内外長周期波の変動レベルと平均波群周期

図一1中の St. A では通年、St. 1～3 では 96 年 9、10 月および 97 年 2、3 月に水面変動と流速変動の長期連続観測が行われた。まず、St. A で得られた水面変動データを用いて長周期波と短周期波の水面変動の 2 乗平均値で



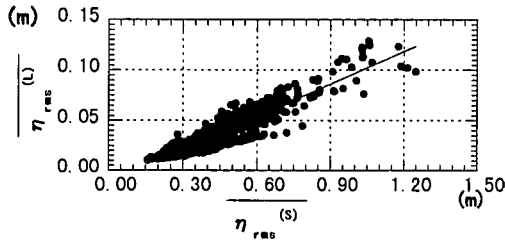
図一1 鹿島港の平面形状と測点位置

ある $\overline{\eta_{rms}^{(L)}}$ と $\overline{\eta_{rms}^{(S)}}$ の相関を図一2(a)に示した。ただし、図中の実線は回帰直線である。ここでは、水面変動データを幅 30 秒の移動平均を用いて長周期成分と短周期成分に分離した。これによると長周期と短周期波間に相関はあるが、 $\overline{\eta_{rms}^{(S)}}$ が大きい場合には $\overline{\eta_{rms}^{(L)}}$ は回帰直線から大きく外れることがわかる。次に、 $\overline{\eta_{rms}^{(S)}} \cdot T_g$ と $\overline{\eta_{rms}^{(L)}}$ の相関をとった結果を図一2(b)に示す。ただし、 T_g は平均波群周期である。これから、両者には強い相関があり、 $\overline{\eta_{rms}^{(S)}} \cdot T_g$ が大きい場合でも $\overline{\eta_{rms}^{(L)}}$ は回帰直線から大きく離れることはないことがわかる。さらに、St. 3 で得られる $\overline{\eta_{rms}^{(L)}}$ と St. A での $\overline{\eta_{rms}^{(S)}} \cdot T_g$ の相関を図一2(c)に示す。図一2(b)と同様、 $\overline{\eta_{rms}^{(S)}} \cdot T_g$ が大きい場合でも両者に強い相関があり、港外の平均波群周期と短周期波の平均水面変動レベルから港内の長周期波成分の水面変動レベルを経験的に予測することができる。図一2(c)に示す。

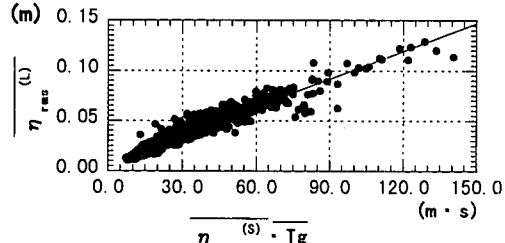
（2）長周期波中に含まれる拘束長波

ここでは、港内外の長周期波に拘束波と自由波がどの程度含まれているかを検討する。ここで用いるのは 1996 年 9 月 13 日に各測点で観測された水面変動データであり、港外の有義波高は 1.6 m である。この水面変動データより求めた各測点のパワースペクトルを図一3に示す。このパワースペクトルのうち周波数 0.05 以下の長周期変動成分を除いた水面変動のパワースペクトルから 2 次非線形不規則波理論を用いて拘束長周期波のパワース

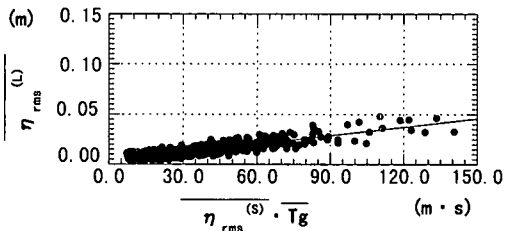
* 正会員 工修 東京工業大学院情報理工学研究所博士課程
** 正会員 工博 東京工業大学院情報理工学研究所教授
*** 日揮株式会社
**** 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局鹿島港湾工事事務所所長
***** 運輸省第二港湾建設局鹿島港湾工事事務所
***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長



(a) St. A での $\overline{\eta_{rms}^{(L)}}$ と $\overline{\eta_{rms}^{(S)}}$ の相関



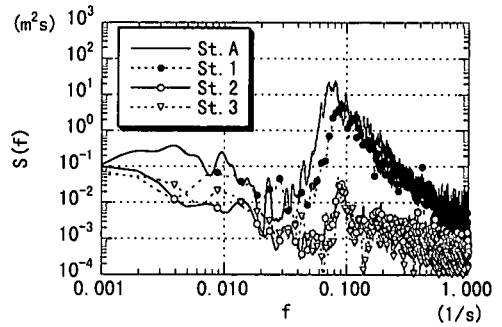
(b) St. A での $\overline{\eta_{rms}^{(S)}} \cdot T_g$ と $\overline{\eta_{rms}^{(L)}}$ の相関



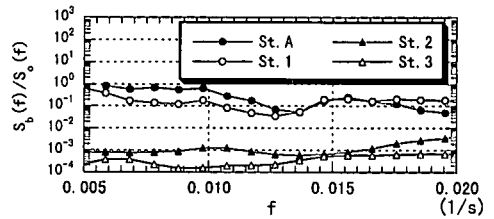
(c) St. A での $\overline{\eta_{rms}^{(L)}}$ と St. A での $\overline{\eta_{rms}^{(S)}} \cdot T_g$ の相関

図一 港外短周期波と港内外長周期波の相関

ペクトルを各測点ごとに求め、これと実測値との比をとり図一に示した。ここで、図中 $S_o(f)$, $S_o(f)$ は、それぞれ計算値および実測値である。ただし、ここでは各測点で得られた水面変動データは、単一方向進行波と仮定している。これによると、St. A においては、 $S_o(f)/S_o(f)$ は 0.1~1.0 の値であり、自由長波と拘束長波が同オーダーの大きさであることがわかる。これは、港外波の長周期が主として拘束長波であるとする仙台新港（永井ら，1996）の場合と異なり、鹿島港では、港外長周期波が拘束長波だけでなく自由長波もかなり含んでいることを意味している。本検討に用いた港外波の有義波高は 1.6 m とあまり大きくないために自由波の占める割合が多いとも考えられるが、港外波の有義波高が 2.7 m と比較的大きく、船体が大きく動揺したと報告されている 9 月 17 日のデータを用いて検討を行っても、今回と同様に長周期波中にかなりの自由波が存在することが確認されている。また、同図より $S_o(f)/S_o(f)$ は St. A では比較的大きく、St. 1 ではやや小さくなり、St. 2, St. 3 においてさらに小さくなることからわかる。これは、港外の長周期成



図一 各測点での水面変動のパワースペクトル



図一 長周期波中に含まれる拘束長波の比

分のうち拘束長波が、まず防波堤の影響を受けその一部が拘束を解かれ自由波となり、さらに港内で反射を繰り返して徐々に拘束が解け、ついに、ほぼ完全に自由長波となる過程を表していると考えられる。

3. 船体動揺特性と港内外長周期波特性

1996 年 9 月 19 日に St. S でビデオ撮影による船体動揺観測を行った。対象とした船舶は、船長 223 m、船幅 32.3 m、喫水 6.4 m で 9 月 17~20 日に停泊した。観測はサージおよびヒープ方向について行ったが、ここでは、動揺振幅が大きいサージ方向の動揺量 η_o の経時変化の一例を図一に示した。このケースでは 40 分程度の連続観測が行われており、最大全振幅 0.9 m 程度動揺している。この船体動揺のパワースペクトル $S_o(f)$ と St. 3 での水面変動のパワースペクトル $S_o(f)$ を図一に示す。 $S_o(f)$ は周期 100 s 付近よりも 200 s 付近のほうが高いエネルギーレベルを持つのに対して、 $S_o(f)$ が高いエネルギーレベルを持つのは周期 100 s 付近においてである。これは係留系の固有周期が 100 s 付近にあるためと考えられ、これを明らかにするために、St. 3 における水面変動を船体に作用する外力とみなした場合の応答関数 $R(f) = \sqrt{S_o(f)/S_o(f)}$ を図一に示した。これによると、周期 100 s 付近にピークが存在し、係留系の固有周期が 100 s 付近に存在することがわかる。

次に、船体の長周期動揺という観点から港内外長周期波特性を考える。パース管理者により、動揺観測を行っ

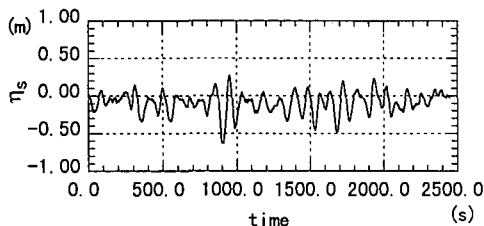


図-5 船体動揺変位の経時変化

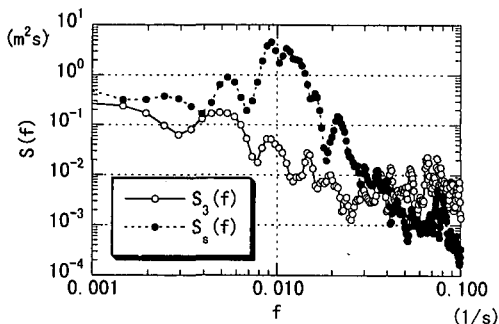


図-6 船体動揺と St. 3 での水面変動のパワースペクトル

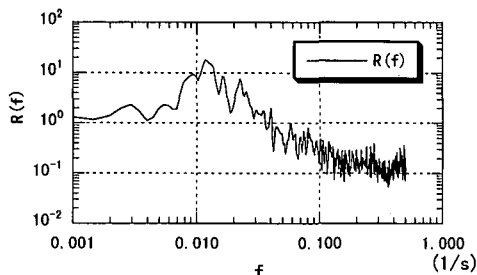


図-7 船体動揺の応答関数

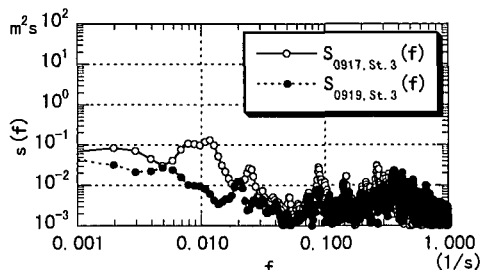


図-8 水面変動レベルが船体動揺量に与える影響

た9月19日より9月17日の方が船体動揺量が多いことが報告されているので、ここではこれに着目することとする。17日と19日の St. 3 より得られる港内波のパワースペクトル $S_{0917, St. 3}(f)$, $S_{0919, St. 3}(f)$ を図-8 に示す。両者を比較した場合、全周波数帯域において $S_{0919, St. 3}(f)$ より $S_{0917, St. 3}(f)$ のエネルギーレベルが高く、係留系の固有周期付近において特にその傾向が強い。これより動揺量が多い場合には、長周期波のエネルギーレベルが高いことがわかる。特に、このケースについては、係留系の共振周期と波高の増幅周期が一致しており、動揺がさらに強く励起されている。しかし、別に行った船体動揺観測によると、波高の増幅周期と係留系の共振周期は必ずしも一致せず、特定の周期だけでなく長周期全般の波高レベルが高いことが船体動揺の原因となっているようである。また、港外波に対する港内波の応答の一例として、 $R_{0917}(f) = \sqrt{S_{0917, St. 3}(f) / S_{0917, St. A}(f)}$ を図-9 に示す。ただし、 $S_{0917, St. A}(f)$ は、St. A での実測データより得られた水面変動のパワースペクトルである。これによると、応答関数は短周期成分において非常に小さく、長周期成分においては比較的大きい。以上のことから考えると、鹿島港における「底うねり」は、以下のように説明できる。つまり、港外に比較的高いエネルギーレベルを有する波浪が来襲し、短周期波に関しては、港内に侵入する際に防波堤や消波材のためにエネルギーレベルを大きく低減されるため港内で十分な静穏度を確保している。これに対して長周期波は比較的高いエネルギーレベルを保持し

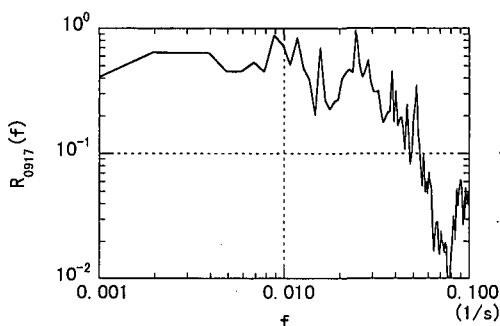


図-9 港外に対する港内波高の応答

たまま湾奥の船体に入射し係留系の固有周期付近で選択的に大きく動揺を励起し、「底うねり」を発生させることになる。

4. 港内長周期波の平面的特性と港湾形状変化による改善効果

(1) 港内長周期波の平面的特性

鹿島港における「底うねり」の発生頻度は、バース位置により大きく異なり、たとえば、St. S では隣接する St. T よりも比較的発生しやすいことがバース管理者から報告されており、強い平面特性が存在すると考えられる。ここでは、この観点から数値波動解析を用いて、鹿島港

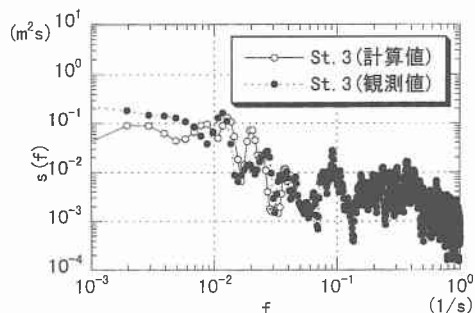


図-10 水面変動のパワースペクトルに関する現地データと数値計算結果との比較

内の長周期波の平面的特性を把握する。ただし、港内においては自由波が支配的であることを考慮して、緩勾配方程式に基づいた有限要素法を用いた。まず、数値波動解析の現地への適用性を確認するために、St. 3で観測された水面変動のパワースペクトルとの比較を行い、その結果を図-10に示した。ただし、図中の計算結果については、St. Aで観測された水面変動の方向スペクトルより求めた入射波の各成分波のパワーを波高に換算し、この換算波高に数値波動解析より得られる入射波高比を乗じて港内の各成分波に対する換算応答波高 H_i として求め、 $H_i = \sqrt{\sum (H_{i\theta})^2}$ より各方向成分波をエネルギー的に重ねあわせる。最後に、 H_i をパワースペクトルの形に戻して算出した。ただし、 $H_{i\theta}$ は周波数 f_i 、入射方向 θ_i の成分波の換算波高である。これによると、周期 200 s 以上の範囲では観測値の方が大きいエネルギーレベルを示すが、計算値と実測値は概ねよく一致している。

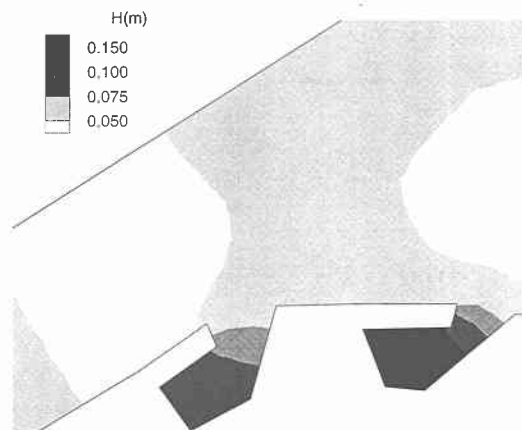
次に、この数値計算より得られた港内各点での周期 50 秒以上の長周期成分の換算応答波高をエネルギー的に重ね合わせた結果を図-11(a)に示す。ただし、図中において $H = \sqrt{\sum (H_i)^2}$ である。これによると、港外および港口部付近では概ね 0.1 m 程度以上の波高であるのに対して、中央航路および南航路・北航路においては 0.1 m 程度以下の波高となっている。さらに詳細に St. S と St. T 付近を図-11(b)に拡大すると、長周期の波高レベルが St. S 前面バースの波高の方が St. T 前面バースよりも大きいことがわかる。これは St. S の方が「底うねり」の発生頻度が高いというバース管理者の報告を定性的に説明するものとなっている。

(2) 波除堤設置による長周期波高の低減の可能性の検討

波高の低減を図るための最も普遍的な手法は消波材の設置と防波堤の延長工である。しかし消波工は、波長が構造物の規模に比較して同程度以下である場合には有効であるが、長周期波の対策工としては不適であり、防波堤延長による改善の方が望ましいと考えられる。ここで



(a) 換算応答波高 H の平面分布



(b) 換算応答波高 H の St. S, ST. T 付近の拡大図

図-11 数値計算による波高分布図

は、現状の中央防波堤と南防波堤を港湾計画に従い、各々 700 m および 400 m 程度延長した場合の長周期波に対する改善効果を検討する。そこで、周期 50 秒以上の長周期成分の波高をエネルギー的に重ね合わせた結果を図-12(a)に示す。これによると、全体的に波高が低減し防波堤延長による改善効果が表れる。特に南航路では波高が大きく低減するが、北航路においては長周期波高が逆に増大する可能性を示している。そこで、ここでは港口から侵入し北海浜護岸で反射し、さらに南防波堤で再反射した後に中央航路に侵入する波浪を想定して、北海浜護岸に港口に対面した形で波除堤を設置することによる長周期波高低減の可能性を検討した。その結果、図-12(b)に示すように中央航路および南北両航路全体にわたり長周期波高が低減し、波除堤の効果がみられることがわかる。波除堤の効果については、北海浜護岸に侵入した長周期波を港外に反射させるといったメカニズムも考えられるが、実際の港湾に襲来する波浪は多様な方向・周期

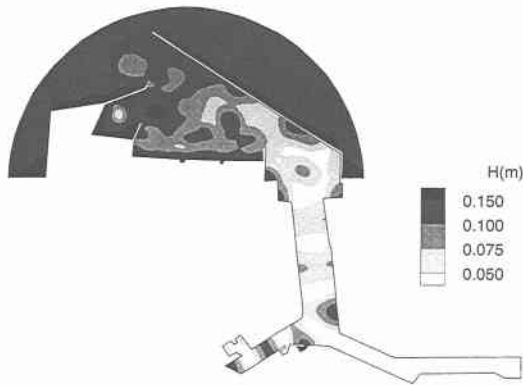
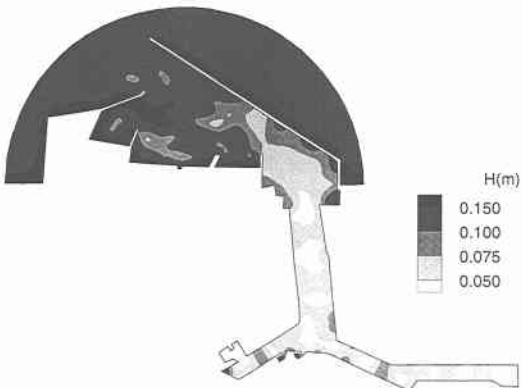

 (a) 防波堤延長による H の改善効果

 (b) 防波堤延長による H の改善効果

図-12 港湾形状による長周期波高の改善効果

で港内に侵入し、反射等の影響により複雑な挙動をする。それにも関わらず、このような比較的小規模の波除堤で大きな効果があることを説明するには、このメカニズムだけでは十分といえず、さらなる検討が必要である。

5. おわりに

本研究の主な結論を以下に示す。

1) 港内長周期波の水面変動レベルは、平均波群周期と港外短周期水面変動レベルを用いて経験的に予測できることを示した。

2) 港外の長周期波には、自由波と拘束波が同程度の大きさで存在することや拘束波が港内に侵入する際に回折・反射などにより徐々に拘束が解かれ自由波になっていく過程を実測データにより明らかにした。

3) 港内の係留船舶の長周期動揺の原因は、港口部で拘束を解かれた拘束長波と港外に由来する自由長波が港内に侵入し、短周期波と比較して高い波高レベルを維持したまま中央航路内に侵入し、これが係留系の共振周期で動揺を選択的に励起することにあることを明らかにした。

4) 港内に進入した長周期波を港外に反射させるために波除堤を設置し、港内長周期波高を低減できる可能性を示唆した。

本論文では、以上の結論が得られたが、港内長周期波と港外の拘束長波とを経験的に関連付けられる1)の結論と港外の長周期波に自由波がかなり含まれている2)の結論との整合性についてさらに検討することが今後の課題となる。また、波除堤設置により港内の長周期波高にかなりの改善効果がみられたが、そのメカニズムについては本研究では明確にできなかったため、さらなる検討を行う予定である。

参考文献

- 朝崎勝之・松尾憲親・藤畑定生・鶴飼亮行・清水琢三 (1996): 港内副振動に関する現地観測と長周期波を考慮した荷役稼働率の評価, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 886-890.
- 田端竹千穂・田所篤博・平石哲也・玉城重則 (1995): 港湾における長周期波の増幅現象に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 301-305.
- 永井紀彦・橋本典明・清水勝義・平井宜典・伊藤一教・東江隆夫 (1996): 長期連続観測による沖合長周期波の変動特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 216-220.
- 松良精三・渥美洋一・菅沼史典・宮本義憲 (1994): 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.