

中小港湾港口部に発生する水平大規模渦についての現地観測

中山 哲巖* ・山本 潤* ・松岡道男**・池田正徳***
竹内聖一****・灘岡和夫*****・八木 宏*****

1. はじめに

砂浜帯における中小規模の漁港・港湾の多くが、砕波帯の内側の浅海域に位置している。砕波帯内では漂砂移動が激しく、多量の砂が港内に堆積するため、維持浚渫や防砂堤などの外郭施設の築造等対策に苦慮しているケースが多い。著者らは、この港内埋没機構の解明を目的として、1992年9月22日から10月14日にかけて千葉県飯岡漁港において現地観測を行い、その結果1分～3分程度の長周期変動による流れと濁度変動間に高い相関があること、防波堤先端部で発生する水平渦と高濁度水塊と密接な関係にあることなどを昨年報告した。前回の現地観測は、水平渦のような現象に特に注目して行ったものではなく、また計測機設置時における計測機の破損や計測期間中の計測器の信号出力不良などいくつかのトラブルに見まわれたことなど、種々の点で不十分であった。この様な点を踏まえて、特に港口部に発生する水平大規模渦と浮遊砂の関係を明らかにすることを目的として、計測機の配置、設置方法やセンサーに改良を加え、再度1993年9月13日から10月25日にかけて飯岡漁港において長期連続観測を実施した。さらに1993年10月9日に防波堤先端部で発生する水平大規模渦等の流況を観測するため、リモコンヘリコプターを用いて写真撮影・ビデオ撮影を行った。以下、その結果について報告する。

2. 観測機器及びその配置について

調査対象の千葉県飯岡漁港は、房総半島の九十九里海岸の北端、屏風ヶ浦と九十九里浜の接点に位置している。屏風ヶ浦は、大規模な海食崖で九十九里浜への漂砂の供給源となっている。飯岡漁港周辺の海底勾配は、1/100～1/200で、砂粒子の中央粒径は0.125～0.25 mmである。図-1に漁港の平面図及び観測点の位置を、表-1

に測定諸元を示す。表中の自記式記録計以外の計測機は、ケーブル式であり、仮設の観測小屋でデータを取得した。ケーブル式の計測機については、電源およびコンピュータの不調のため、データを有効に取得し始めたのは10月6日からであった。ST.1～11の水深は、L.W.Lを基準としてそれぞれ4.3, 3.6, 4.0, 3.5, 4.8, 3.1, 2.9, 2.7, 2.8, 3.0, 2.8 mである。濁度計は、ST.2, 5で下層(海底+30 cm)、上層(海底+150 cm)の2ヶ所、ST.7, 9で下層(海底+10 cm)、上層(海底+110 cm)の2ヶ所、ST.11で下層(海底+30 cm)1ヶ所に設置した。ケーブル式流速計は、ST.5で上層(海底+150 cm)、下層(海底+30 cm)の2ヶ所、ST.2, 3, 4, 10で下層(海底+30 cm)の一ヶ所に設置した。なお、ST.5の上層の流速は、計器の故障のため欠測となった。ST.6, ST.8の自記式流

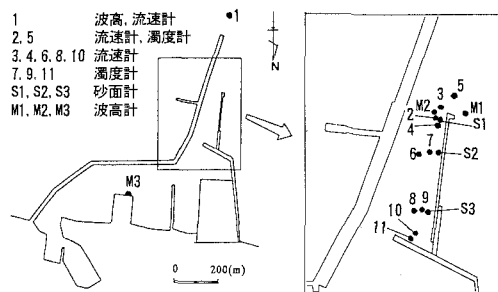


図-1 漁港平面図及び観測点の位置挿入

表-1 測定諸元

St. 名	計測器種類	計測期間	サンプル数等
1	自己式波高、流速計	93/9/13～9/21 10/2～10/25	0.5秒×5400個(3時間毎)
2, 5	ケーブル式流速計 ケーブル式濁度計	10/6～10/25 10/6～10/25	0.2秒×23936個(3時間毎) 0.2秒×23936個(3時間毎)
3, 4, 10	ケーブル式流速計	10/6～10/25	0.2秒×23936個(3時間毎)
6, 8	自己式流速計	9/13～10/25	1.0秒×1200個(3時間毎)
7, 9, 11	ケーブル式濁度計	10/6～10/25	0.2秒×23936個(3時間毎)
S1, S2, S3	光電式砂面計	9/13～10/25	1個(1時間毎)
M1, M2, M3	自己式波高計	9/13～10/25	1.0秒×1022個(2時間毎)

* 正会員 工修 水産庁水産工学研究所

** 正会員 工修 日本テトラポッド(株)応用水理研究所

*** 日本テトラポッド(株)応用水理研究所

**** 工修 日本テトラポッド(株)応用水理研究所

***** 正会員 工博 東京工業大学教授 土木工学科

***** 正会員 工博 東京工業大学講師 土木工学科

速計は、海底から約20 cm程度にセンサー部を設置した。なお、ケーブル式濁度計は、飯岡漁港周辺の砂を用いて、実験室で浮遊砂濃度について直接採水と計測機による同時測定を行うことによって検定した。

リモコンヘリコプターによる流況観測は、台風が飯岡を通過した翌日の晴天時(1993年10月9日13時~15時)に行った。防波堤周辺の流況を把握するため、上空約50 mから、染料の拡散およびフロートの移動状況をビデオカメラ、スチールカメラを用いて撮影した。

3. 観測結果と解析

(1) 観測実施時期における波浪条件

10月1~10月13日の期間の有義波高、周期の変化を図-2に示す。図中に飯岡漁港の東側に位置する銚子漁港の沖合水深27 mの地点(圧力式波高計)での波高、周期変化を示す。この図から10月7日~10月9日までの期間、飯岡漁港沖 ST.1 (水深4.3 m) では最大で2.3 mの波高が観測されている。当然ながら、この時は ST.1 で碎波していた。また、港口部周辺では、最大で約1.2 mであった。このときの銚子沖の波高は、6.5 mであった。この時期が観測期間中最も漂砂現象が激しかったと考えられる。以後、この時期の流速、水位、濁度の変化についての解析を進めることとする。

沖波については、飯岡漁港沖の観測値がないので銚子漁港のデータを用いてその特性を調べてみた。図-3に沖波のパワースペクトルおよび30秒のフィルターをかけた場合の水位変動の一例を示す。この図から、10秒前後の波浪成分のパワーが最も卓越しているが、100秒前後の周期にもピークが存在する。フィルターをかけた信号を見ても周期100秒、波高20 cm程度の長周期波があることがわかる。長周期波の波向きは、流速データがな

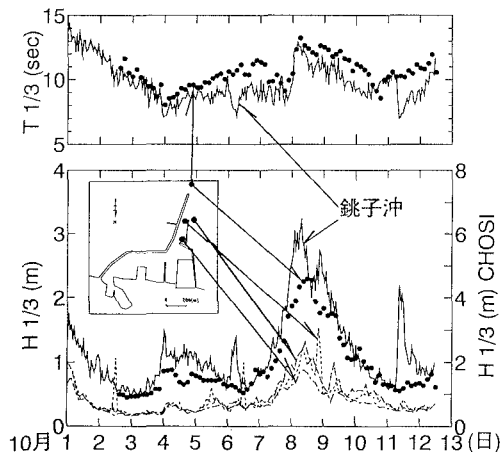


図-2 有義波高・周期の経時変化挿入

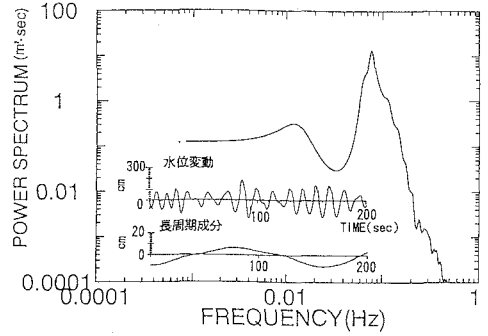


図-3 銚子漁港沖(水深27 m)のパワースペクトル

いのでわからないが、おそらく沖から来襲しているものと考えられる。このことから、沖波は既に有意なエネルギーレベルで100秒前後の長周期波成分を含んでいると考えられる。

(2) 漁港港口部周辺の流速、水位

港口部周辺での水位および流速変動のパワースペクトルの一例を図-4に示す。まず水位については、港口部沖(実線)では0.01 Hz付近にピークが存在すること、港口部(点線)では0.0035 Hz付近に不明瞭なピークがあるが、0.01 Hz付近にはピークが存在しないこと、航路部(破線)では、0.01 Hz付近に3ヶ所のうち最も大きなピークが存在することがわかる。次に流速については、港口部沖では、低周波数帯には明確なピークは存在しないこと、港口部では0.01 Hz付近に3ヶ所のうち最も大きなピークが存在すること、航路部でも0.01 Hz付近にピークがあることがわかる。以上の傾向は、総じて観測期間中で共通の傾向である。ただし、港口部沖で流速のスペクトルに0.01 Hzにピークが出現するときもある。これらのことから、0.01 Hzの周期の変動が飯岡漁港内で増幅されているものと考えられる。このことは後に述べるが飯岡漁港の湾水振動解析を行った結果からも確認できた。

(3) 港口部周辺の流速と濁度の変動

著者らの昨年の結論と今回の目視観測によると港口部付近の濁度水塊の発生は、主として防波堤付近の水平渦によるものと考えられた。この水平渦を発生させる原因は、波浪のような短周期のものではなく、より長周期の変動であると考えられる。そこで、観測された港口部周辺の流速から波動成分を取り除いた流速(12秒の数値フィルターをかけたもの)と濁度変動とを比較した。単純に数値フィルターを用いることは、波浪成分だけでなく、渦の成分までも消去してしまう可能性があるが、波浪成分のみを分離することが困難であったため、最小の数値フィルターを用いた。図-5にその一例を示す。この図から、流速については、ST.2, 3, 4は比較的相関がよい

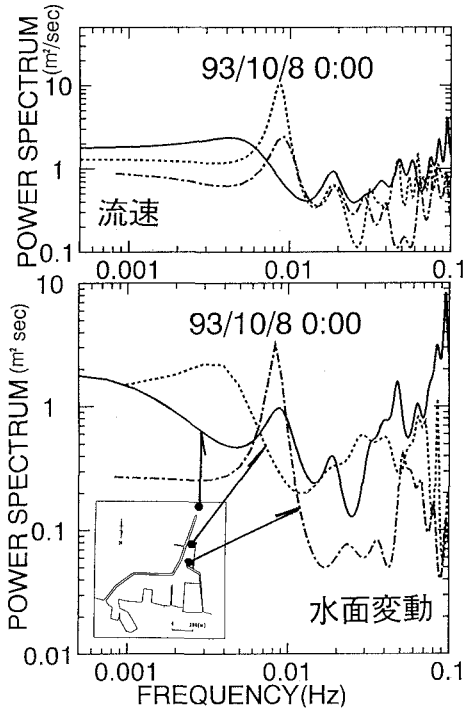


図-4 各点での水位・流速のパワースペクトル

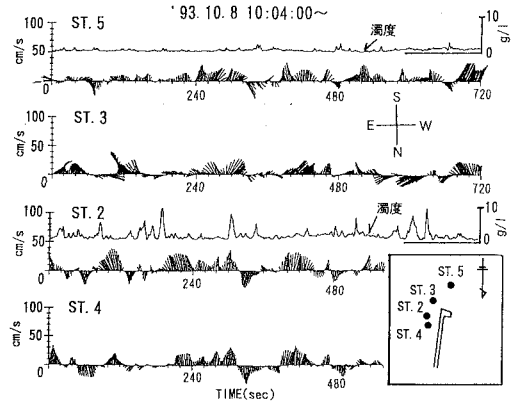


図-5 港口部周辺の流速、濁度変動

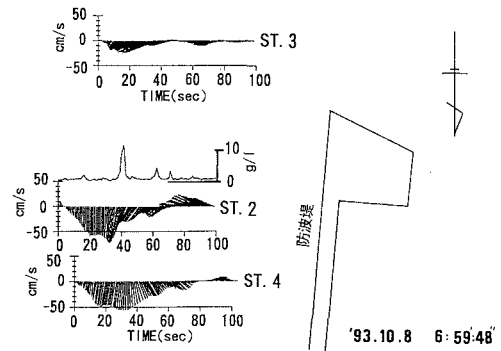


図-6 防波堤周辺の流速、濁度の時空間分布

が、ST.3は2, 4に比べて東西方向(横軸方向)にベクトルが傾いていること、ST.5は南西方向(右斜め上方)が主であることがいえる。いずれのステーションの流速変動も、100秒程度の周期変動が卓越しており、この変動に20から30秒程度の周期変動がのっている。濁度については、ST.5では比較的緩やかな変動であるのに対して、防波堤に近接しているST.2では、楔状の波形が顕著に現れており、出力も高い。ST.2の流速と濁度の関係を見ると流速ベクトルが回転しているときに楔状の波形が出現することが多い。この波形の出現間隔は不規則であるが、概ね20秒から100秒程度である。そこで、ST.2で高濁度が出現する場合の各ステーションの流速の時空間分布を調べた。図-6は、その例である。図は、ST.2, ST.3, ST.4の3点の流速変動を防波堤に対する相対的な位置に時系列で表示したものである。この図から、ST.3で流速が東北東(左斜め下向)に流れているとき、ST.2, 4ともに流速は港内側(下向)であり、40秒付近でST.2で左回り、ST.4で右回りに方向変化している。同時に濁度は高い値となる。40秒から100秒にかけてのST.2, ST.4で、明確に渦が存在することがわかる。また、濁度の最大値はST.2, 4で流速ベクトルが港内側になって増加し初めて30秒程度経過した後に現れている。これは、後に述べるリモコンヘリによる流況観測結果からも言えるが、防波堤港内側の流速が港内の向きになると水

平渦が発生・発達し、防波堤から離れ、流れと共に流下し、ST.2, 4の地点に達したためと考えられる。ST.3での流速が東北東方向の時には、明確な渦のパターンを示すことが多い。しかし、ST.3での流速が港外方向の場合や各ステーションでの流速が極端に小さい場合でも濁度が高い場合があり、その原因は波浪による浮遊砂なのか、或いは渦によって発生した浮遊砂の拡散・沈降なのかは明確ではない。しかし、波浪流速と濁度変動とは明確な相関がないことから、長周期変動や渦との相互作用を考えなければ説明できないと思われる。また、渦の強さや規模を推定するには、流速計の数が不十分であった。

(4) 湾水振動解析

100秒の周期変動の増幅率が、航路部の形状によるものか或いは他の要因によるものかを検討するため、航路部の外郭施設の形状を変えて湾水振動解析を行った。用いた計算法はChen・Mei (1974)の方法を用いたHybrid F. E. M.である。

図-7に増幅率の結果を示す。なお、水深は一様で5mとした。100秒付近の増幅率を見ると、現況に近い波除堤がある場合(実線)では周期108秒、波除堤がない場合(点

線)では101秒に共振周期があるのに対して、波除堤・防波堤間に開口部がある場合(破線)では、100秒付近では共振周期がないことがわかる。なお、飯岡漁港の現況は波除堤・防波堤間が矢板の仮設工で、一部抜け落ちた状態だが、全閉に等しい。開口部がある場合を計算したのはこの理由による。

図-8に上記3つのケースについて、100秒付近で最も増幅率の高い周期で計算した流速分布を示す。波除堤有(a)、波除堤無(b)ともに港口部および泊地と航路の境界で節が形成されている。流速は、(a)が大きく、港口部の防波堤を回り込む強い流れがある。また、波除堤周辺でも回り込む強い流れがあることがわかる。一方、波除堤・防波堤間に開口部がある場合(c)では、ほとんど流れがないことがわかる。なお、(a)の港口部周辺の流向は、観測結果とほぼ一致している。

以上から、100秒の周期変動は、航路形状と波除堤によって増幅されていると考えられる。また、計算における防波堤を回り込む強い流れは、現実には流れの剝離を起こし、渦が発生することを示唆するものと考えられる。

ここで特に注目されるのは、波除堤・防波堤間に開口部がある場合、100秒程度の周期変動の増幅がなくなることである。このことは、長周期波の共振を防ぐように外郭施設を配置することにより(例えば開口部の新設)、港内埋没を防止できることを示している。

(5) リモコンヘリコプターによる流況観測

防波堤付近に発生する水平大規模渦とこれにともなう底質の舞い上がりを可視化した。図-9は、渦の発生・発達・減衰過程を空中撮影ビデオを基に図化したものである。図中の矢印は、①~⑧までの間に移動したフロートの移動方向と距離を示している。図中の点線より外側は、濁度の高い水域である。①は、流れが港外向きから港内

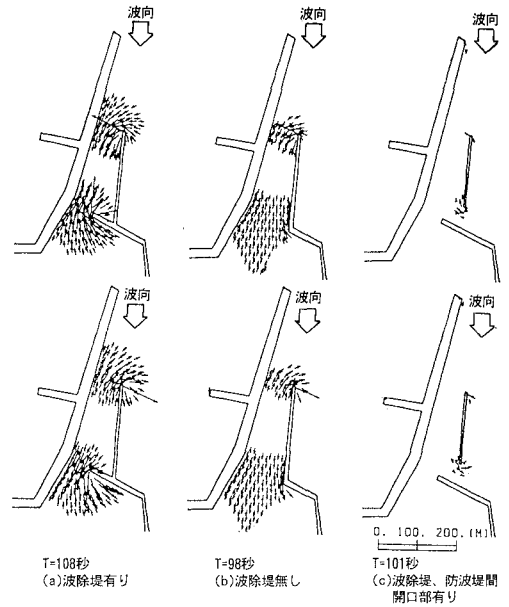


図-8 湾水振動解析による流速分布

へと反転した直後であり、防波堤先端には渦1が発生している。この渦により、底質が巻き上げられている。②で、渦1は防波堤から港内側へ放出されて、新たな渦2が発生する。この渦2が、③~④で渦1を巻き込みながら水平大規模渦として発達する。⑥~⑧で、渦が防波堤より港内側へ放出され、下方に移流されていく。⑦まで渦の中心がはっきり確認できる。この過程に要する時間は、約50秒である。渦の規模は、濁度の高い領域および水面の乱れから判断して約20m程度である。また、ここでは示していないが、流れが港外側となっても防波堤周辺で渦が発生し、底質を巻き上げており、常に防波堤周辺は高濁度の水域となっている。

図-10, 11に空中連続写真と各ステーションの流速変動との関係を示す。図-10が、各時刻における渦、濁度水塊およびフロートの移動状況を示したものであり、図-11がこの時の流速変動である。この場合、渦はST.2まで到達するが、ST.4まで達していないと考えられる。両者を見ると表層付近の高濁度の水塊がST.2に達する前(図-10の①)、既にST.2の底層で濁度が高くなっていることがわかる。このことから、渦の規模は、表層の濁度の高い領域や水面の乱れから判断されるものよりも若干大きいことが考えられる。

4. 結論

以上の検討から、次のことが言える。

(1) 流速変動や水位変動のスペクトル解析を行った結果、沖波に100秒程度の周期の成分が有意な大きさで

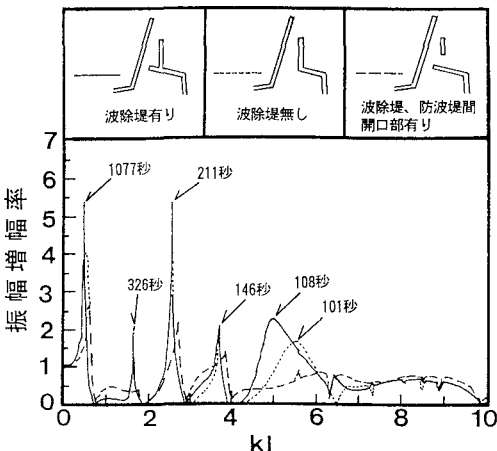


図-7 長周期波に対する飯岡漁港の増幅率

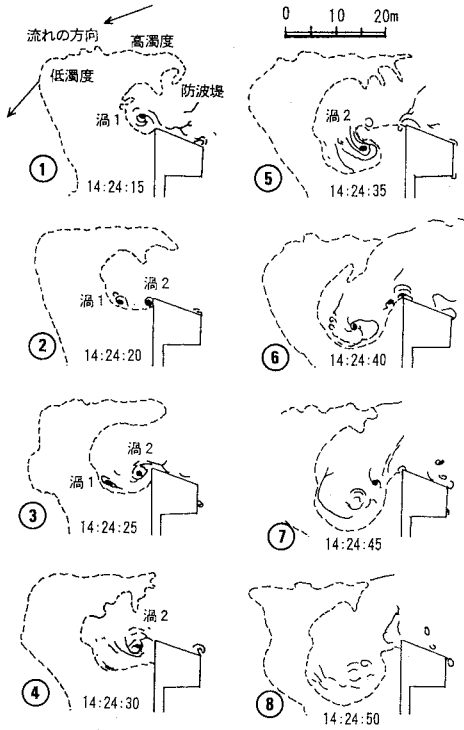


図-9 水平大規模渦の経時変化

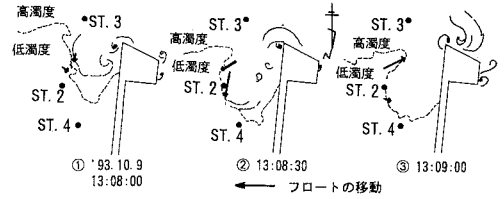


図-10 水平大規模渦の経時変化 (流速測定時)

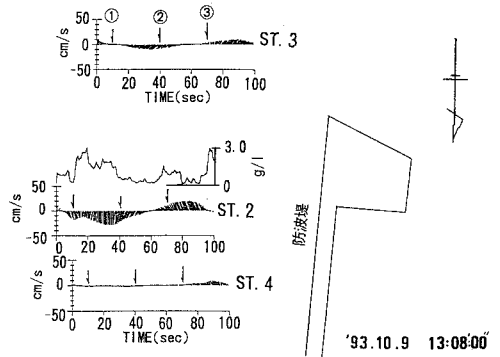


図-11 水平大規模渦発生時の流速・濁度変動

含まれていること、港口部では、これが増幅されていることがわかった。

(2) 湾水振動解析を行った結果、108秒程度の長周期波が航路部の形状及び波除堤によって共振していること、防波堤を回り込む強い流れがあり、防波堤周辺で渦が発生する可能性があることがわかった。また、外郭施設の一部に開口部を設けると共振を防止できるという、港内埋没対策工法開発のための重要な知見が得られた。

(3) 港口部に設置した複数の流速計および濁度計のデータ解析から水平大規模渦の流速変動を抽出した。

(4) リモコンヘリコプターによる空中撮影によって、水平大規模渦の発生・発達・減衰過程を可視化し、この渦が底質を巻き上げることを示した。

謝辞: 本研究を行うに当たって、現地で色々便宜をはかってくれた海匠漁業協同組合の皆様、現地での作業を担当してくれた東京工業大学大学院の塚原隆夫君ほか学生の皆さん、資料整理、図面作成をしていただいた北海道パブリックコンサルタントの田畑真一氏に深く感謝します。最後に本研究は、文部省科学研究費一般研究(C) (課題番号: 04650453, 研究代表者: 灘岡和夫) の研究成果の一部であることを付記します。

参 考 文 献

松岡道男・木下勝尊・山本正昭・森口朗彦 (1991): 長周期水理特性を考慮した港内堆砂モデルの適用性の検討, 海講論文集, 第38巻, pp. 416-420.
 松本 朗・松岡道男・中山哲巖・山本 潤・灘岡和夫・八木 宏 (1993): 中小港湾埋没機構解明に向けての長期連続現地観測の試み, 海講論文集, 第40巻, pp. 491-495.
 Chen, H. S. and C. C. Mei (1974): Oscillations and wave forces in an offshore harbor, Ralph M. Parsons Lab., Report No. 190, M. I. T., 215p.