

中小港湾港口部に発生する水平大規模渦による浮遊砂流入特性 に関する数値解析

——浮遊砂流入から見たハーバーパラドックス——

灘岡 和夫*・田村 仁**・飯塚 広泰***

中小港湾における港内埋没問題の原因の一つとして、数分程度の長周期波によって防波堤先端部に生成される水平大規模渦が、多量の浮遊砂を伴って港内へ進入することが指摘されている。本研究では、進入メカニズムの一つとして開口部両端で生成される大規模渦のペアの自走現象に着目し、特にその港口幅依存性に着目して解析を行った。具体的には、準三次元浅水乱流モデルおよび準三次元非平衡浮遊砂輸送モデルによって港口部に発生する水平大規模渦とそれに伴う港内への浮遊砂流入過程に関する数値解析である。その結果、港口幅と浮遊砂流入フラックスに関して、一種のハーバーパラドックスともいえる関係が存在することが示された。

1. はじめに

中小規模の漁港や港湾は、通常、浮遊砂移動の激しい砕波帯内の浅海域に位置するために、多量の浮遊砂が港内に堆積しやすく、そのため維持浚渫や、防波堤などの外郭施設の法線形状に特別の工夫を施すなどの対策を強いられることが多い。

松本ら (1993) および中山ら (1994) によって行われた千葉県飯岡漁港における現地観測により、主な浮遊砂輸送過程の一つとして、数分程度の長周期波によって防波堤先端部に生成される渦 (水平大規模渦) により連行された底質が、渦に伴う上昇流により上方に持ち上げられて高濃度の浮遊砂領域が形成され、それが更に水平方向に輸送されることで、港内に多量の浮遊砂が運び込まれるという過程が示された。この水平大規模渦 (以後、大規模渦と略記する) による浮遊砂輸送現象は、灘岡ら (2000) および田村・灘岡 (2001) によって行われた数値実験によっても確認、解析されている。

このような大規模渦の港内への輸送メカニズムの一つとして、港口部両サイドの防波堤先端部に生じた大規模渦が対を成し、形成された渦対の自走現象によって港内への輸送が起こることが考えられるが、それは渦対の相互干渉作用により生じるものであるが故に、強い港口幅依存性を有するものと予想される。港口部での渦形成に着目した研究はこれまで他にも報告されているが、その多くは港内の循環流や海水交換に着目したものが主で (例えば、大谷ら, 1995; 上野ら, 1997)、浮遊砂に着目したものはほとんどない。

本研究では、大規模渦による浮遊砂流入過程とその港口幅依存性を検討するべく、浅水域における大規模渦とその三次元構造を合理的に取り扱うことが可能な準三次

元浅水乱流モデル (灘岡ら, 2000) と、浮遊砂の非平衡輸送過程を低計算負荷で評価できる準三次元非平衡浮遊砂輸送モデル (田村・灘岡, 2001) を用いることによって、港口部に発生する大規模渦とそれに伴う港内への浮遊砂流入過程に関する数値解析を行った。

2. 数値解析モデル

(1) 準三次元浅水乱流モデルの概要

本数値解析で用いる準三次元浅水乱流モデル (SDS-Q3D モデル: 灘岡ら, 2000) は浅水乱流モデル (SDS-2DH モデル: 灘岡・八木, 1993; Nadaoka・Yagi, 1998) をもとに導出されたものである。SDS-2DH モデルでは、流れの分離スケールに関して、通常の LES で用いられる計算格子幅ではなく、浅水乱流場の物理構造上のキーとなる水深を用いることで、水深スケール以下 (SDS 乱れ) とそれ以上の水平大規模渦スケールの現象を分離して扱っている。水深スケール以下の乱れについては、その生成項も含めてモデル化し、渦動粘性係数を評価することで、大規模乱流場での水平大規模渦の直接数値計算が効率よく行える水深平均平面二次元モデルとなっている。

準三次元浅水乱流モデル (SDS-Q3D モデル) も SDS-2DH モデルと同様の乱流モデルに基づくものであるが、SDS-2DH モデルが運動量方程式に対して水深平均流速を仮定して水深積分するのに対し、SDS-Q3D モデルでは水平方向流速の鉛直分布関数を仮定し、これを用いて流速を多成分連成表示 (灘岡・中川, 1993) させ、重み付き残差法の一つである Galerkin 法を用いて、水深積分することで運動量方程式の準三次元化を行っている。

(2) 準三次元浮遊砂輸送モデルの概要

本数値解析で用いる準三次元非平衡浮遊砂輸送モデル (田村・灘岡, 2001) は、SDS-Q3D モデルと同様に灘岡らの多成分連成法の考え方を適用し、水深方向に関し、互いに独立な数個の鉛直分布関数の和によって任意の非平衡浮遊砂濃度分布を表現することができるもので、SDS-

* フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻

** 正 会 員 博(工) 日本学術振興会 特別研究員

*** 東京工業大学大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻

Q3Dモデルと容易にカップリングが可能で、かつ、低計算負荷で合理的に非平衡輸送過程を精度良く表現できる浮遊砂輸送モデルである。

3. 港口部における三次元大規模渦と底質浮遊・輸送に関する数値シミュレーション

(1) 数値計算概要

計算領域は図-1に示すように $x=100\text{ m}$ に港口部を設定し、水深 5 m とした。境界条件は、沖側境界 ($x=0$)

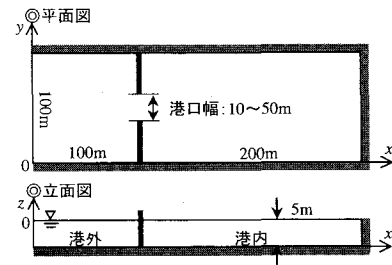


図-1 数値計算領域

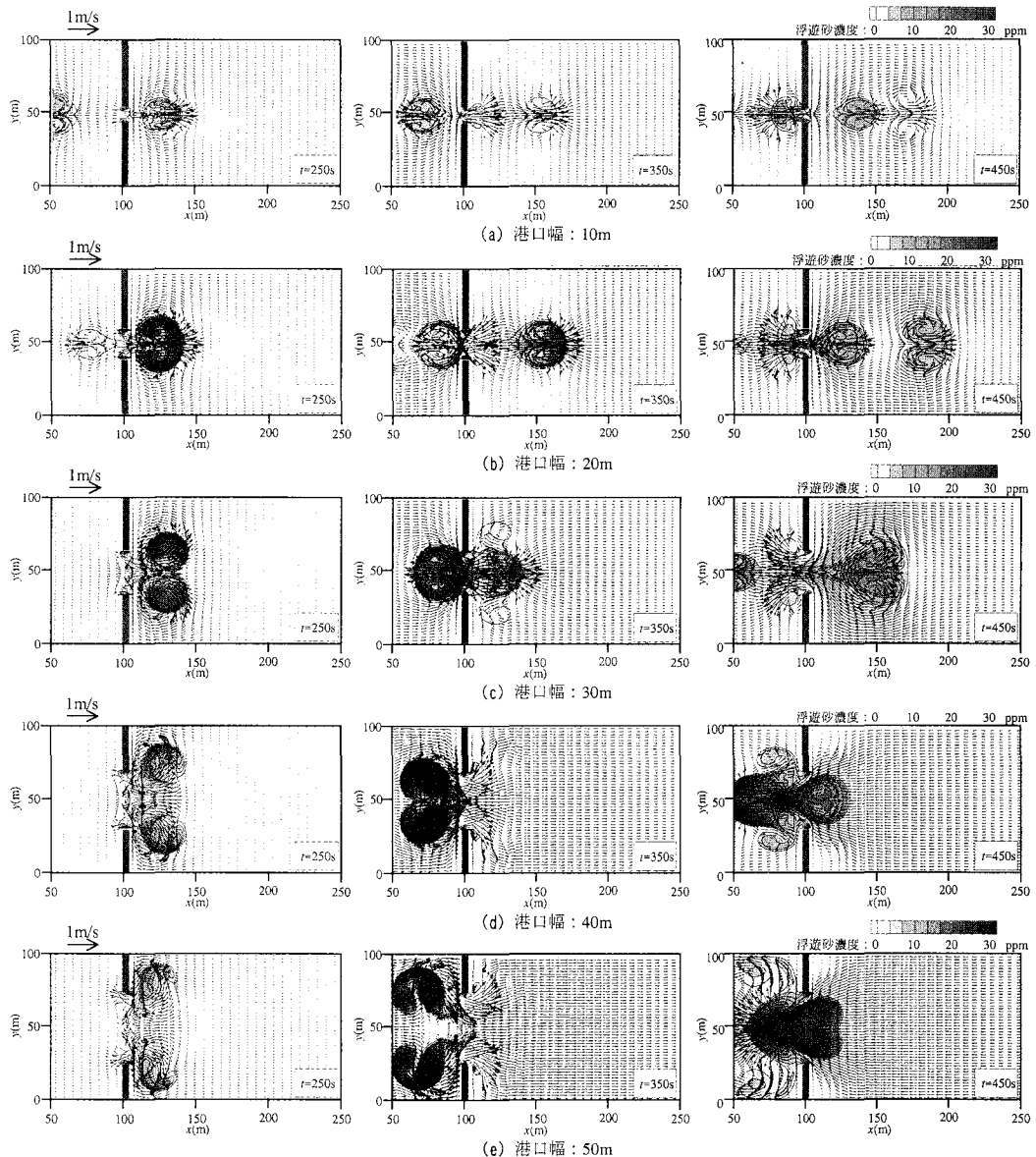


図-2 水深平均流速と浮遊砂濃度の時系列

m)での水位変動を周期 150 s、振幅 10 cm として与え、それ以外の境界では slip 壁条件として与えている。計算格子幅は、 x 、 y 方向にそれぞれ 2 m と 1 m とし、計算時間刻み幅は 0.05 s とした。流動計算には、鉛直分布関数として Legendre 多項式を用いており、連成成分数は 2 としている。また、浮遊砂輸送計算においては指数関数型の鉛直分布関数系を用いており、連成成分数を 3 としている。

本数値計算モデルでは流動計算と浮遊砂輸送計算を同時に行っているが、今回は浮遊砂による SDS 乱れエネルギーの生成や、浮遊砂輸送に伴う地形変化の流動場への影響は考慮していない。

浮遊砂輸送計算に関して、底質粒子は中山ら (1994) の観測を基に平均粒径: 0.29 mm、密度: 2.65 とし、沈降速度 w_s は Rubey の式を用いて 3.89 cm/s とした。また、浮遊砂拡散係数は渦動粘性係数を用いて評価している。浮遊砂のピックアップモデルに関しては、これまで多くのモデルが提案されてきているが、一般性のあるモデルが存在しないことから、ここでは池田ら (1992) を参照して与えた。

計算初期条件は、流動場に関しては静水状態とし、浮遊砂に関してはその濃度を 0 としている。

(2) 港口部における水平大規模渦の発生と浮遊砂輸送現象

図-2(a) から (e) は港口幅を 10, 20, 30, 40, 50 m としたときの、それぞれ計算開始 250 秒から 450 秒までの 100 秒ごとの各時刻における水深平均水平流速および中層 ($z = -2.5$ m) での浮遊砂濃度分布を表したものである。

a) 水深平均流速分布

まず図-2(a) 港口幅: 10 m に着目する。 $t = 250$ s では港口部両サイドにおいて発生した、符号が反対で強さがほぼ等しい二つの大規模渦が渦対を成している。これが互いの誘起速度によって湾内へ向かう速度を持つことで、港内へ向けての自走が起こり ($t = 350$ s), $t = 450$ s では、港口部において生成された渦対が先行していた渦対に追いついている。その後、これらの渦対は合成し、渦のスケールを増大させ、更に自走を続けていく。図-2(b) (港口幅: 20 m) 及び (c) (港口幅: 30 m) を見ると、どちらもほぼ同様のプロセスをとっていることが確認できるが、港口幅が広がるにつれ、渦対の規模が拡大している。

つぎに図-2(d) (港口幅: 40 m) 及び (e) (港口幅: 50 m) を見ると、港口部において大規模渦は生成されるものの、図-2(a) から (c) までに見られたような、明確な渦対の自走現象が現れておらず、大規模渦は港口部周辺に留まっている。これは港口幅が大きいために、大

規模渦の間隔が広がり、互いに十分な大きさの誘起速度を与えることができないためである。

b) 浮遊砂濃度分布

つぎに浮遊砂濃度分布に着目すると、港口部で生成された大規模渦中には多量の浮遊砂が含まれており、図-2(a) から (c) においては大規模渦が渦対を形成し、港内へ自走するにつれ浮遊砂雲はそれに随伴し、その規模を縮小しつつも港内へ輸送されていく様子が確認できる。一方、図-2(d), (e) においては、明確な渦対の自走現象

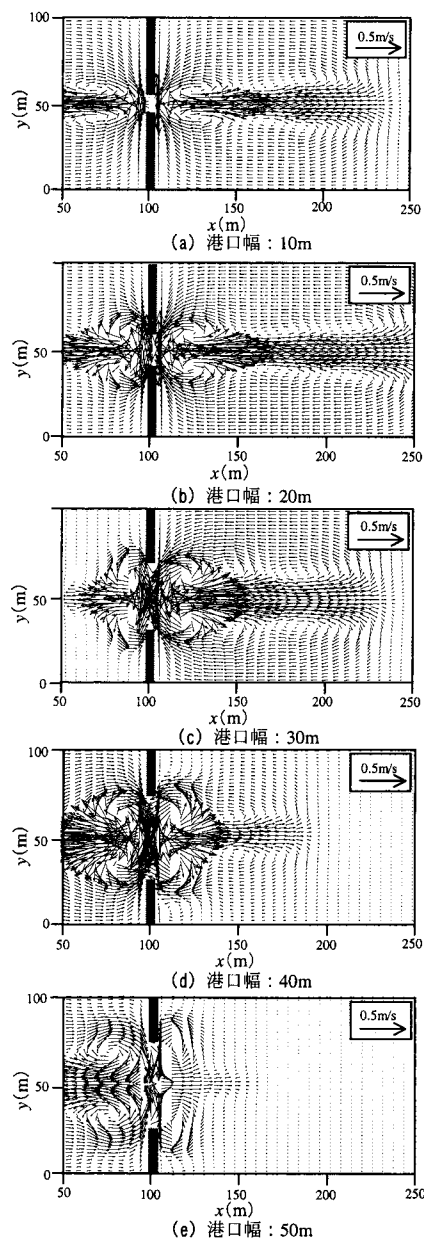


図-3 時間平均流速

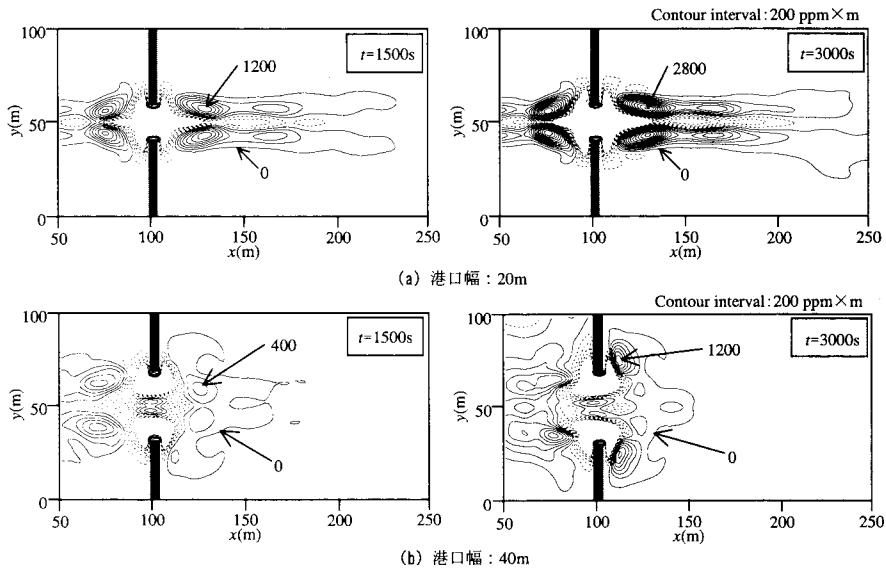


図-4 浮遊砂堆積量の時間積分値

象が見られなかったことから、港内奥への顕著な浮遊砂輸送が起っていない。

c) 渦対と残差流パターン

図-3(a) から (e) は、計算開始から $t=750$ s (5 周期分) までの各港口幅における時間平均流速 (残差流) を示したものである。これらからも図-3(a) から (c) では、渦対の港内奥への自走によって循環流が強化されており、明確な渦対の自走現象が見られなかった図-3(d), (e) とは全く異なる循環流パターンを形成していることが確認できる。

d) 浮遊砂堆積領域

図-4(a), (b) は港口幅 20 m と 40 m のケースでの、底面での pick-up 量 P_b と沈降フラックスの差を、計算開始から $t=1500$ s (10 周期分) までと $t=3000$ s (20 周期分) まで積分した値を表したものである。(破線部が侵食領域、実線が堆積領域)。図-4(a), (b) 共に $t=1500$ s と $t=3000$ s を比較するとわかるように、大規模渦の通過に伴ってその周辺で堆積が生じ、一方、港口部においては顕著な洗掘が生じる結果となっている。図-4(a) と (b) を比較すると、渦対の自走現象が見られた図-4(a) のケースでは港内奥まで広範囲かつ多量に堆積が生じているのに対し、図-4(b) では堆積が低レベルかつ港口部周辺のみにも留まっていることがわかる。これらのことから、湾内への浮遊砂輸送過程における大規模渦対の自走現象が果たす役割の重要性が確認できる。

(3) 港口幅と港内浮遊砂流入特性の関係

図-5 は港口幅と港口部全体における 1 周期平均浮遊砂フラックス (港内への流入を正) の関係を示したものの

である。ここでは、沖側境界条件として周期 100 s、振幅 20 cm を与えた時の結果 (図中点線) も併せて示している。港口幅が相対的に狭く、港口部周辺において明確な渦対の自走現象が生じているケース (図中の楕円内) においては、正味の浮遊砂フラックスレベルが高く (ただし、港口幅がかなり狭いケースにおいては、幾何学的に港口部断面積が小さいことの影響が支配的になり浮遊砂フラックスは小さくなる。)、港口幅がある程度広く、明確な渦対の自走現象が生じないケースにおいては、浮遊砂フラックスは低レベルに保たれていることが確認できる。

直感的には港口幅が広いほうが、港内への浮遊砂流入が多いものと考えがちだが、数値実験により得られた結果はその逆であり、ある程度港口幅が狭いほうが港口部

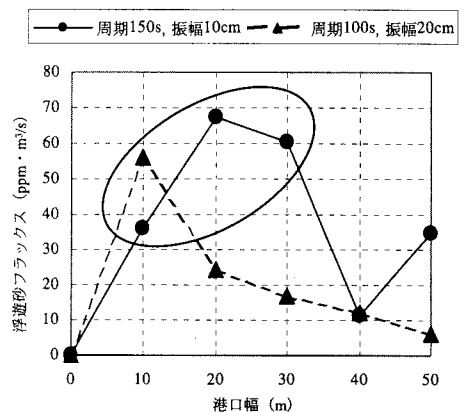


図-5 港口幅と1周期平均浮遊砂フラックス

で生成された水平大規模渦に起因する渦対の自走現象によって、より多くの浮遊砂が港内へ輸送される結果となっている。

長周期波に関する既存の研究 (Miles・Munk, 1961) では、港口幅が狭い条件のほうが港内における長周期波の振幅が増幅することが示されており、「ハーバーパラドックス」と名付けられている。そのアナロジーからすると、上記の数値解析によって見出された現象は一種の「浮遊砂流入から見たハーバーパラドックス」というべきものである。

4. おわりに

本研究では SDS-Q3D モデルおよび、準三次元非平衡浮遊砂輸送モデルによって、港口部に発生する水平大規模渦とそれに伴う港内への浮遊砂流入過程に関する数値解析を行うことで、浮遊砂輸送特性の港口幅依存性を検討した。その結果、浮遊砂輸送過程における水平大規模渦に起因する渦対の自走現象の重要性を示すと共に、港口幅が狭い方がより多くの浮遊砂が港内へ輸送されるという、一種の「浮遊砂流入から見たハーバーパラドックス」というべき現象が存在することを明らかにした。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 A (1) (一般) (研究代表者：灘岡和夫，課題番号：14205071) を得て行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 池田俊介・太田賢一・長谷川洋 (1992): 側岸部植生帯が流れ及び粒子態物質の輸送に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 447, pp. 25-34.
- 上野成三・大谷英夫・高山百合子・勝井秀博 (1997): 流動・生態系モデルを用いた剝離渦発生構造物の海水交換・水質改善効果の検討, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1221-1225.
- 大谷英夫・高山百合子・石野和男・勝井秀博・宝田盛康 (1995): 流況制御のための湾口渦と水平循環流に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1221-1225.
- 田村 仁・灘岡和夫 (2001): 準三次元非平衡浮遊砂輸送モデルの開発に基づく港口部での底質浮遊と輸送に関する解析, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 526-530.
- 中山哲厳・山本 潤・松岡道男・池田正徳・竹内聖一・灘岡和夫・八木 宏 (1994): 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, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 321-325.
- 灘岡和夫・田村 仁・八木 宏・二瓶泰雄 (2000): 準三次元浅水乱流モデルの開発に基づく三次元大規模渦構造の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 466-470.
- 灘岡和夫・中川康之 (1993): 不規則波動シミュレーションのための強分散性波動方程式の導出とその基本特性の検討, 土木学会論文集, No. 473, II-23, pp. 83-92.
- 灘岡和夫・八木 宏 (1993): 浅い水域の乱流場に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用: 土木学会論文集, No. 473, II-24, pp. 25-34.
- 松本 朗・松岡道男・中山哲厳・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, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 491-495.
- Miles, J. and Munk, W. (1961): Harbor Paradox, ASCE Journal of Waterways and Harbors Division, No. 2888.
- Nadaoka, K., Yagi, H. (1998): Shallow water turbulence modeling and horizontal large-eddy computation of river flow, J. of Hydraulics Eng., pp. 493-495.