

バンコック港航路の埋没とその予測

榎 亨*・出口 一郎**・小野 正順***
Sucharit Koonlanakulvong****

1. ま え が き

バンコック港は、チャオプラヤ河河口から上流 56 km の間に様々な港湾施設が点在する河港である。チャオプラヤ河は、162000 km² の流域面積をもち、雨期においては最大 4000 m³/s に及ぶ河川水をシャム湾に流出する。河口部では、流出土砂によって形成されたバンコックバーと呼ばれる広大な浅瀬が存在する。

1951 年から 1954 年にかけて、バンコック港へのアプローチ航路としてこのバーを横断する長さ 18 km の航路が建設された。しかし、チャオプラヤ河からの流出土砂あるいはバー周辺の漂砂移動による激しい航路埋没のため、年間約 $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ に及ぶ継続的な維持浚渫を余儀なくされている。この航路埋没は、河口流出流、潮流及び波浪が重畳した非常に複雑な流体運動によって引き起こされることから、全長 18 km に及ぶ航路全域における埋没の原因については、完全に解明されていない。

本研究の目的は、バンコックバー航路の深淺測量、浚渫記録及び河口部におけるシルテーション濃度の実測結果に基づき、航路埋没の原因と機構を明らかにし、埋没量の推定方法について検討を加えることである。

2. バンコックバー航路の概略と自然条件

(1) バンコックバー航路の概略

図-1 にバンコックバー航路周辺の地形を示す。この航路は、1951 年から 1954 年にかけて浚渫されたもので、河口原点から 3 km-7 km の間に大きな湾曲部を持つ。当初の施工断面は、水深 MSL-8.5 m、側面勾配 1/10 で、航路幅は、ほぼ直線部が 100 m、湾曲部が 200 m である。航路建設のために行われた浚渫土砂量は、 $16.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ である。

この航路が、チャオプラヤ河河道内の幅 200 m-400 m、水深 MSL-8.5 m の航路に接続している。河口上流 21.5 km までは、喫水 8.2 m 以下で 10000 dwt-12000 dwt、LOA 565 ft 以下の船舶の航行が可能である。

(2) 自然条件

・降雨と流出： チャオプラヤ河流域の大部分は、熱帯雨林帯に属し、気候はモンスーンによって支配されている。すなわち、平均的には 12 月から 3 月は NE モンスーンが卓越し、降雨量は少なく(乾期)、5 月～10 月は、SW モンスーンが卓越し、雨期となる。流域の年平均降水量は、1000 mm-1500 mm 程度である。4 月及び 11 月はそれぞれ遷移期である。

チャオプラヤ河の流量も、これに対応し、6 月から流量が増大し、10 月に最大流量 (3000 m³/s-4000 m³/s) に達し、1 月から 5 月の間は高々 100 m³/s の流出量となる。

・潮位と潮流： 河口原点より下流 14 km の航路上と 28.5 km 上流のバンコック港における潮位変動は、K1、O1 及び M2 という 3 種類の分潮に支配された複雑な変動を示すが、大潮は 6 月と 12 月、小潮は 3 月と 9 月に生ずる。MHHWL、MHW、MLW 及び MLLWL は、それぞれ MSL+1.18 m、+0.94 m、-0.78 m 及び -1.26 m に対応する。

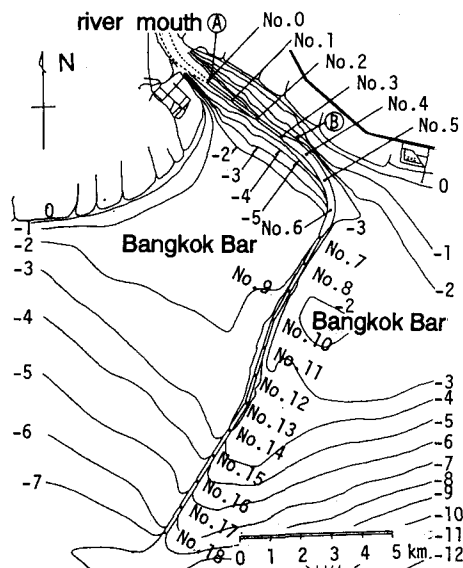


図-1 バンコックバー航路周辺地形

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科

**** 正会員 工博 チュラロンコン大学助教授 工学部水資源工学科

このような潮汐によって発生する潮流は、河口流出流によって大きな影響を受ける。しかし、航路周辺の流向は、流出流の存在に係わらずほぼ航路と平行となるが、引き潮時には図-1に示す航路湾曲部 (No. 6-No. 10) にかけて航路を西から東に横断する流れが観測されている (NEDECO, 1965)。その流速は 0.3 m/s - 1 m/s で、河口流出がある場合の方が大きい。また、乾期の下げ潮及び上げ潮時に、航路沖側部分 (No. 12-No. 18) において西から東及び東から西に航路を横断する流速 0.3 m/s 程度の流れが存在することも確認されている (NEDECO, 1965)。

・波浪特性： チャオプラヤ河口周辺は、卓越する2つの季節風に対して遮蔽領域となり、河口周辺に高波浪をもたらすのは、唯一南からの風である。航路先端から約4 km 沖にあるパイロットステーションにおいて、1981年-1988年の間に行われた波浪観測によると、年間を通じて1.25 m以上の波向を持つ波浪の出現時間は、波高1.25 m以上が200時間、1.5 m以上が30時間、2.0 m以上が1時間である。このような比較的大きい波浪の発生は、5月-8月のSW モンスーン期と4月である。

・底質特性： 航路周辺の底質は、平均粒径 $d_{50} = 0.001 \text{ mm}$ - 0.1 mm の粘土から細砂にわたる広範な分布を示す。しかし、大部分の領域では、シルト分が卓越し、一部の領域 (図-1に示す No. 8-No. 13の東側) でのみ細砂が卓越する。これらの底質の乾燥密度は、 2700 kg/m^3 - 2800 kg/m^3 である。航路周辺での海底における平均的な底質 (シルト) 濃度は、300 ppt - 400 ppt、rigidity は 4 N/m^2 - 12 N/m^2 である。また、これらの底質にたいする濃度300 ppmにおける浮上限界及び沈降限界摩擦速度 u_{*c} , u_{*d} は、それぞれ 2.04 cm/s 及び 1.26 cm/s となることが報告されている (NEDECO, 1965)。

3. 検討項目と解析方法

1989年8月-1991年8月の間にPAT (Port Authority of Thailand) によって行われたバンコックバー航路の深浅測量結果と浚渫量データに基づき、航路内で生じた水深変化量の統計解析と埋没量の解析を行った。深浅測量は、月2回、航路縦断方向200 m間隔に設けられた横断方向測線上20 m間隔で測深することによって行われている。この時、航路沿いに設けられた1 km間隔のブロック内で、各測量期間内に行われた浚渫土砂量の資料も用いた。

以上の解析結果と、同一期間のチャオプラヤ河口における流出量及び風資料 (波浪実測結果が無い場合) 時系列を対応させることによって、航路埋没に及ぼす流出土砂及び波浪の影響について考察した。同時に、航路を横断する流れと波によって生ずる非平衡状態のシルテ

ションによる航路断面変形に関する数値計算を行い、航路埋没に及ぼす波と流れの影響について検討した。

また、1991年8月22日-23日にかけて航路周辺の2地点 (図-1に示す測点A及びB) において流速シルテーション濃度の実測を行った。この結果と既往の研究成果に基づき、流出土砂量の推定を行っている。

4. 航路内水深変化の特性

(1) 解析対象期間のチャオプラヤ河流量時系列

図-2は、チャオプラヤ河河口原点から約60 km上流にあるBang Saiにおいて測定された解析対象期間におけるチャオプラヤ河流量の時系列である。参考のため、通常時の平均的な流出時系列の代表として、1957年-1963年における平均流出量の時系列を図-3に示す。

対象期間内では、流出のピークは3回あり、このうち、9月から11月にかけての流出は、通常の流出であるが、6月から7月にかけての流出は、1990年特有の流出である。ピーク流量は、いずれも $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ に満たない。

一方、風観測資料によると、NE モンスーンの卓越時期は、10月-11月に限定され、S-SWのモンスーンが卓越するのは2月-9月であり、いずれも過去の平均よりも1-2ヵ月早く遷移し、さらに、NE モンスーンの継続時間も短い。また、日最大風速は、ほとんどが3 knot以下であるが、8月から10月にかけては、しばしば4 knotを越える風速が観測されている。

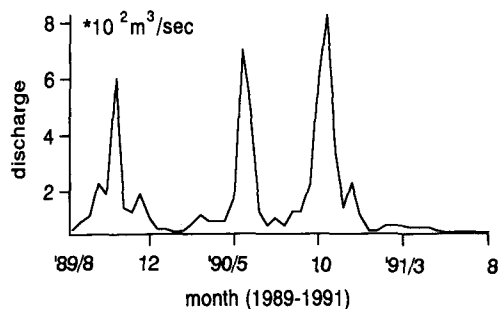


図-2 チャオプラヤ河流量時系列 (1989-1991)

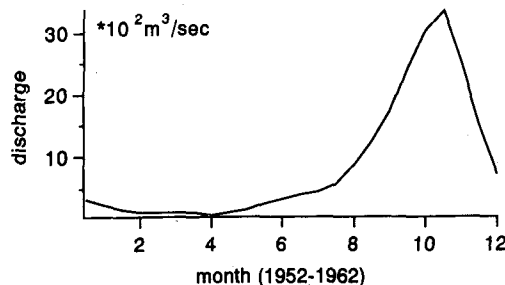


図-3 チャオプラヤ河平均流量時系列 (1957-1963)

(2) 航路内の堆積土量の時間変化

河口流出とそれ以外の外力が、航路埋没に及ぼす影響を検討するため、航路全長を上流部(No. 1-No. 7)、中流部(No. 7-No. 13)及び下流部(No. 13-No. 19)の3つの部分に分けて全堆積土量 ΔV の計算を行った。ただし、 ΔV は、実測された水深変化量から計算される航路内の土量変化量 ΔV_m と対応する期間における同一区間の浚渫土量 ΔV_d の和として求めた。図-4と5は、3区間の全堆積土量 ΔV と浚渫土量 ΔV_d の時間変化を示したものである。また、1957年-1963年にかけて行われた同様の調査に基づき、6年間平均の ΔV の時間変化を図-6に示す。

まず、図-4及び2を比較して明らかにように、航路上流及び中流における全堆積土量は、流出流量の時系列と対応した変化を示し、この傾向は、流出量の大きい1957年-1963年の全堆積土量の時系列(図-3と6)により顕著に現れている。

なお、河口付近におけるシルテーション濃度は、河口流出量がピークとなる時間の約1ヵ月前に最大となるという観測結果が報告されている(NEDECO, 1965)が、

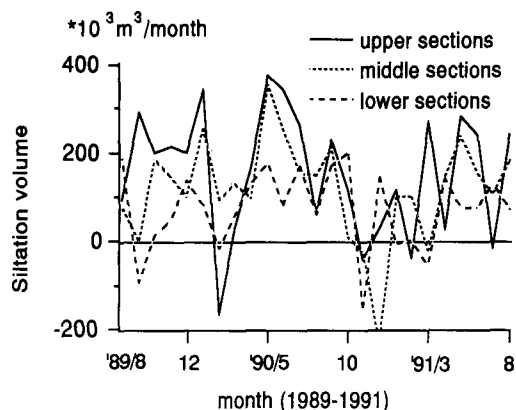


図-4 航路内全堆積土量の時間変化 (1989-1991)

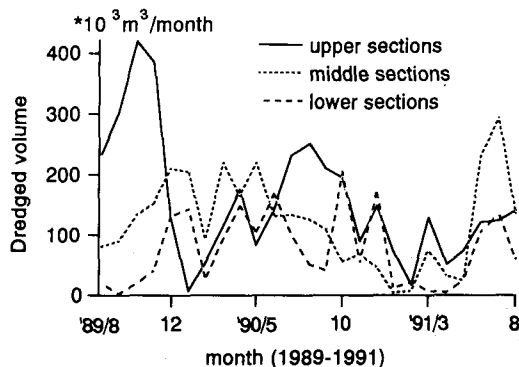


図-5 浚渫量の時間変化 (1989-1991)

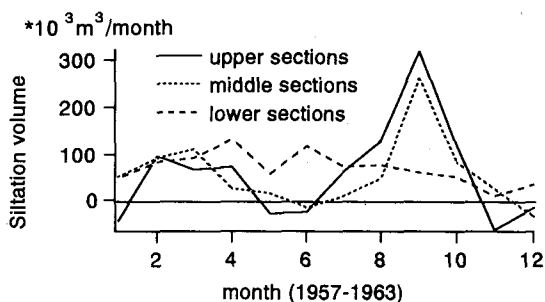


図-6 航路内全堆積量の時間変化 (1957-1963)

図-3と6の比較から、航路内の堆積土量が最大となるのは、流量が最大となる時期より約1ヵ月早く、シルテーション濃度が最大となる時期と一致する。

以上の結果及び別途行った測線1-19における1km間隔に計算された堆積土砂量の経験的固有関数での解析結果より、河口流出土砂の影響は、航路湾曲部を越えて航路中流部にも及ぶこと、航路中・下流部では、波浪によるシルテーションの影響を受けることが明らかになった。

(3) 流出土砂量の推定

図-4に示す全堆積土砂量は、図-5に示す浚渫土量とほぼ一致し、航路内堆積土砂量の大部分は、浚渫作業によって取り除かれ、継続的な浚渫によってようやく航路断面が維持されていることがわかる。なお、1989年8月から1991年7月の2年間における全浚渫土砂量は $8.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ である。

一方、1992年8月に行った河口部における流速とシルテーション濃度の実測結果より、下げ潮時の断面平均濃度 C は、断面平均流速 U と次式で関係づけられることがわかった。

$$C(\text{ppm}) = 400 \times U(\text{m/s}) \dots\dots\dots (1)$$

先に述べたように、増水時と減衰時においては、同じ流量でも流送土砂量が異なることが指摘されているが、式(1)に基づいて流出土砂量の概算を行う。河口流水断面積を、 A 、流量を Q とすると、流出土砂量 Q_s は、 $Q_s = 400 \times Q^2 / A$ ($\text{ppm} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$) となる。河口流量時系列を 1000 t/sec のピーク流量を持ち、2ヵ月にわたる3角形分布で近似し、 $A = 2000 \text{ m}^2$ とすると、この流出に対する流出土砂量は、約 $1.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ と概算される。これは、解析対象とした2年間の年平均浚渫土量 ($4.25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$) より少ない。

(4) 航路内での水深変化のパターン

図-7は、1989年8月から1990年7月に行われた24回の航路内の深浅測量結果に基づいて、水深変化量の分散(前回の測深結果との差の2乗平均)を計算し、等値線で示したものである。図より、水深の変化は、航路東

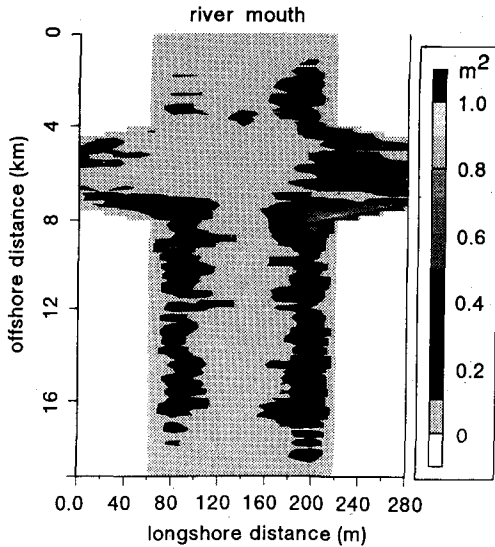


図-7 航路内の水深変化強度

側斜面、特に流出土砂と波浪の両方の影響を受ける中流部で大きく、航路底面では、全域で高々 0.1 m^2 程度のみしか示さない。この結果は、航路斜面上で顕著な堆積が生じ、盛んに浚渫が行われていることを示すものである。

5. 航路断面変形に関する数値予測

(1) 数値予測手法の概略

前節で考察したように、バンコックパー航路の中央及び下流域においては、河口流出土砂以外に波浪による埋没も無視できない。一方、航路内の水深変化は、航路断面の中央部ではなく、航路側面（斜面）上で大きい。

そこで、航路を横断する波と流れによって生ずる浅海域におけるシルテーションによって、いかなる航路断面の変形が生じ、その埋没量がどの程度になるにかということの数値計算を行うことによって検討した。

バンコックパー航路周辺における底質の移動形態としては、mud flow 状態 (turbidity current) の輸送あるいは浮遊状態の輸送が考えられる。シルテーション濃度の実測結果によると、水面近くの上層まで高い濃度が記録されている。従って、ここでは、波と流れによって生ずる浮遊状態のシルテーションのみを考慮した解析を行う。この時、考慮しなければならない点は、航路周辺での急激な水深変化によって生ずる浮遊シルテーション濃度の空間的な非平衡性である。著者ら（出口他，1992）は、既にこのような状態にける浮遊漂砂による航路埋没予測計算手法を開発し、実験結果に基づいてその適用性を検証している。ここでは、その手法を適用する。

簡単のため、波と流れが同一平面にあり、航路を直角に横断する状況を考え、アプローチ部の断面平均流速

$U=30 \text{ cm/s}$ の平均流と同じ方向に伝播する波高 $H=1.5 \text{ m}$ 、周期 $T=6 \text{ s}$ の波浪による航路断面変形を対象とした計算を行った。底質粒径は、 $d_{50}=0.01 \text{ mm}$ 、沈降速度はフロキュレーションを考慮して $W_f=0.1 \text{ cm/s}$ とした。

非平衡状態のシルテーション濃度の計算は、以下に示す2つの方法で計算を行った。1つは断面平均濃度 C に対する移流拡散方程式を解く方法 (method 1) で、もう1つは、底面からの距離の関数としての濃度 C を解く方法 (method 2) である。それぞれ、流下方向に x 軸、底面から鉛直上方に z 軸を取った座標系で、式 (2) 及び (3) で表される。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + U \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \Delta Q_s \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} - W_f \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad \dots (3)$$

前者の方法であらかじめ与えなければならない諸量は、水位 η 、水平方向断面平均流速 U 、水平方向の分散係数 K_x 及び底部での境界条件としての鉛直方向フラックス ΔQ_s である。波浪変形は、エネルギー保存測に基づいて計算し、水位及び断面平均流速は、いわゆる海浜流基礎式を2-step Lax-Wendroff 法で差分化 ($\Delta x=5.0 \text{ m}$) し、上流端での流量と水位を与えることによって数値的に解いて与えた。この時、時間平均された底部せん断力 τ は、波流れ共存場における底部乱流境界層方程式の厳密解を用い、分散係数は τ から計算される摩擦速度 u^* と水深の積に比例する形で与えた。

底部における鉛直方向フラックス ΔQ_s は、底質の沈降速度 W_f 、 u^* 及び海底面を基準点とする基準点濃度 C_0 を用いて表される次式に基づいて与えた。

$$\Delta Q_s = (1-r) C_0 W_f (1-u^*/W_f) + \alpha \bar{C} W_f$$

$$r=0: u^*/W_f > 1, \quad r=1: u^*/W_f < 1 \quad (4)$$

ここに、 α は、浮上と沈降フラックスの比を調整する定数で、10のオーダーの値を取る。

式 (2) は、流れの計算と同じ格子上で差分化し、時間間隔 $\Delta t=2 \text{ s}$ で数値解を求めた。水深の時間変化は、式 (4) で求められる ΔQ_s に比例した形で計算される。

一方、水深の関数としてシルテーション濃度を計算する場合は、水位及び平均流の鉛直分布と水平・鉛直方向拡散係数 K_x 、 K_z 及び底部境界条件としての濃度あるいはフラックスを与える必要がある。平均流の鉛直分布は、先の方法で計算された断面平均流速から、底部境界層方程式を解いて求められる鉛直分布を用いた。鉛直方向の拡散係数は、摩擦速度と境界層厚の積に、水平方向拡散係数は、摩擦速度と水深に比例した形で与えた。底部境界条件は、次式で求められる基準点濃度で与えたが、式 (4) の ΔQ_s の計算を行う場合もこの式を用いた。

$$C_0 = \beta(\phi - \phi_c)^{1.77} \{d_{50} / (W_f T f_w)\}^{1.77} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 ϕ は摩擦速度を用いて表される Shields 数、 ϕ_c は浮上限界 Shields 数、 β は定数、 f_w は摩擦係数である。

なお、式(3)の計算は、鉛直方向 $\Delta z = 0.2\text{ m} - 0.8\text{ m}$ 、水平方向 $\Delta x = 5\text{ m}$ で差分化し、Split-operator approach 法を適用して数値解を求めた。計算の時間間隔は、 $\Delta t = 0.02\text{ s}$ である。水深変化速度は、上記の方法で求められたシルテーション濃度から計算される、シルテーションの水平方向フラックスの勾配として与えられる。

上流側でのシルテーション濃度の境界条件は、いずれの場合も、定常状態の鉛直1次元拡散方程式の解として求められる濃度あるいはその断面平均値を与えた。

(2) 予測結果

図-8は、それぞれ航路水深8.5m、アプローチ部の水深3m及び5mの場合の航路(航路幅100m)上で1時間に生ずる水深変化量の計算結果を示したものである。いずれの計算結果も、シルテーション濃度に非平衡性が現れる航路上流端から堆積が生ずる。アプローチ部の水深の浅い図-8(a)に示す結果では、式(4)の鉛直方向フラックスに基づいて計算される水深変化(method 1)航路斜面上で最大値を示した後に急激に減衰するのに対し、シルテーション濃度の鉛直分布に基づいて計算される水深変化(method 2)では航路全域にわたって堆積が生じている。上記2つの方法で予測された水深変化量の差異は、砂質海岸における航路周辺の水深変化予測結果には、認められなかった(出口他, 1992)。

式(3)の鉛直方向フラックスで底部境界条件を与える method 1 の計算では、シルトの浮上、沈降限界を容易に考慮した計算が行えるのに対し、method 2 では境界条件を濃度で与えたため、特に沈降限界について考慮することが出来なかったこと等が両者の計算結果の差異の原因と考えられる。この点については、さらに数値的な検討を加える必要がある。

上記2つの計算方法のどちらが妥当かと言うことはさておき、いずれにしろ流れに重疊した波浪によって生ずる航路埋没も無視できないことは明らかである。先に述べたように、波高1.5mを持つ波浪の1年における継続時間は、約30時間である。図-8(a)に示す method 2 による堆積量から航路単位長さ(1m 当たり)の年間堆積量を計算すると約500 m³/mと推定される。さらに図-1において、アプローチ部の水深が3m以浅となる航路中流部(No. 7-No. 13)の6kmの区間で図-8(a)と同様

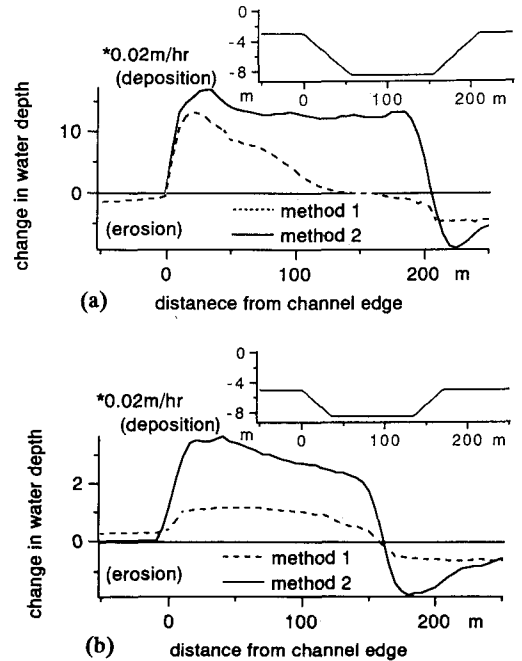


図-8 航路内水深変化の予測結果

の堆積が生ずると仮定すると、その年間堆積量は約3×10⁶m³となる。このオーダーは、流出の少ない時期におけるチャオプラヤ河河口流出土砂量と等しい。

6. おわりに

バンコックバー航路の埋没は、非常に複雑な流体運動によって生じている。本研究では、河口流出土砂のみではなく、発生頻度は少ないが年間を通じて30時間程度発生する波浪によって生ずる埋没も無視できないことを明らかにした。しかしその検討に用いた、水深変化予測手法にまだ検討の余地があることも明らかになった。今後、この点についてさらに数値的な検討を加え、予測精度の向上を図っていくつもりである。最後に、本研究は、文部省科学研究費(国際学術研究、代表榎木亨)によって行われたものであることを付記する。

参考文献

- 出口一郎・小野正順・榎木亨・裏基成(1992): 航路の副断面化に伴う航路埋没低減効果, 海洋開発論文集, Vol. 8, pp. 457-462.
- NEDECO (1963): A study on the siltation of the Bangkok Port Channel, 474p.