

河床形状と船舶の有効積載重量に関する研究
東南アジア地域における事例研究

Study on bed topography and Vessel's Payload
South-East Asia Case Study

ファン・フォン・ソン*・赤塚 雄三**・有田 正光***・浅枝 隆****・山本 隆一*****

By Phan Hong Son, Yuzo AKATSUKA, Masamitsu ARITATakashi ASAEDA, Ryuichi YAMAMOTO

The natural hydrology has decisive influence on waterways in South-East Asia. Many rivers in the region take meandering courses in their low reaches. The natural bed topography with alternative bar of the meandering rivers was considered from the navigation point of view. The Ikeda and Nishimura's mathematical model(1986) was applied to define the lateral bed topography in three case studies for Irrawaddy river, Chao Phraya river and Mekong river. It was found that the water level available for navigation in dry season could not afford to full load of the operating vessels. The payload of operating vessels over the year before and after local dredging has been predicted.

Key words: Vessel's payload, Meandering river, Irrawaddy river, Cho Phraya river, Mekong river

1. はじめに

東南アジア地域における河川を使用した船舶による物資の運搬は地域経済活動上重要である。また、船舶による物資の輸送は車両による陸上輸送に比較して明らかに地域環境に対するインパクトが小さい。従って、地域経済の活性化および環境保全の観点から河川を航行しうる各種船舶の積載可能重量評価とそれをより大きくする手法を提案することの工学的意義は大きい。

東南アジア地域の内陸航路の船舶の航行は水文学的条件によって大きな影響を受ける。モンスーンが同地域の気候の特徴であり6ヶ月間隔で北東もしくは南西向の弱い季節風が吹く。雨期は5月頃から9月下旬頃まで、乾期は11月頃から3月頃までである。同地域の河川流量は雨量によって支配され雨季と乾期の河川流量の差は世界の他の地域に比較して非常に大きい。また、乾期の流量は極めて小さいので同期の河川水深は浅い。従って、乾期においては船舶による物資の運搬が制限されて地域の経済活動および環境に多大の影響を与えることとなる（Suppataratarn¹⁾, The World Bank²⁾, Alcausin³⁾, UN(1964)⁴⁾, UN(1968)⁵⁾, UN(1968)⁶⁾, UN(1985)⁷⁾, Akatsuka-Asaeda-Brooks⁸⁾を参照）。

沖積地河川における流路形態は、直線流路、蛇行流路、網状流路の3種に大きく分類される。東南アジア地域の各河川の沖積地においては蛇行流路の流路形態をとることが一般的である。蛇行は河川中に形成される交互砂州が原因となって発生する。逆にいえば、交互砂州は蛇行河川中には常に観察されるものである。また、

*	学生員	工修	埼玉大学大学院	理工学研究科生物環境科学専攻	(〒338埼玉県浦和市大久保)
**	正会員	工博	埼玉大学教授	工学部建設工学科	(〒338埼玉県浦和市大久保)
***	正会員	工博	東京電機大学教授	理工学部建設工学科	(〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町)
****	正会員	工博	埼玉大学助教授	理工学研究科	(〒338埼玉県浦和市大久保)
*****	学生員		東京電機大学	理工学部建設工学科	(〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町)

交互砂州は河川流量が大きく、河川の水位が高い雨期に河川中に形成され、乾期においても河川中に残されている。この雨期に形成された交互砂州による河床変動は乾期の船舶の航行に大きな障害を与えることとなる。

本研究においては東南アジア地域にみられる雨季と乾季で河川流量が大きく変化する蛇行河川中を航行する各種船舶の有効積載重量（各種船舶が航行するために積載しうる物資の重量）の評価法について検討する。また、蛇行河川中の河床を一部浚渫することによって有効積載重量を飛躍的に高める工学的手法について検討する。提案される手法の有効性はイラワディ川、チャオブラヤ川、メコン川の三河川についてのケーススタディにより検証する。なお、本論文における蛇行河川中の交互砂州による河床形状の予測は Ikeda-Nishimura ⁹⁾ によって提案されているモデルを使用して実施する。

2. 理論的考察

河川の流路形態を予測する為の研究は数多く実施されている。図-1に Parkar ¹⁰⁾ による河川流路形態分類図を示す。図中において、H は河川水深、B は河川幅、S は河床勾配、F は河川の流れのフルード数であり $F=U/(gH)^{1/2}$ 、U は河川流速、g は重力の加速度、である。同図より河川流路形態が $S/F-H/B$ 平面内で直線流路領域 (Straight Regime)、蛇行流路領域 (Meandering Regime)、網状流路領域 (Braided Regime) の3領域に精度良く領域分割されている事が分かる。

次章のケーススタディで取り上げる東南アジア地域の3河川、つまり、イラワディ川、チャオブラヤ川、メコン川の雨期における諸条件を図-1中にプロットしている。同図よりいずれのケースも蛇行流路領域に属することが分かる。従って、本章においては蛇行流路の場合について船舶の有効積載重量を見積もるための理論的考察を実施する。

Ikeda-Nishimura ⁹⁾ は浮遊砂を考慮して蛇行河川中の三次元流れと河床形状に関する理論的検討を実施している。彼らは蛇行河川中の三次元流れを水深方向に平均化された二次元流れの成分と二次流の成分に分離して考察した。また、掃流砂および浮遊砂の輸送フラックスおよび方向についての考察を実施して河床形状予測モデルを提案している。以下に彼等の理論の概略を示す。

図-2に示す様な蛇行流路を考える。同図に示すように曲線座標において、河川の中心線上に沿って s, s に直行する方向に n, n 、鉛直方向に z をとる。また、蛇行流路の流路中心線の曲率半径 R は次式で与えられると仮定している。

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} \cos ks \tag{1}$$

ここに、 R_0 は水路中心線上の最小曲率半径、である。式中の蛇行波形の波数 k の値は Ikeda-Parkar-Sawai ¹¹⁾ によって次式で与えられる。

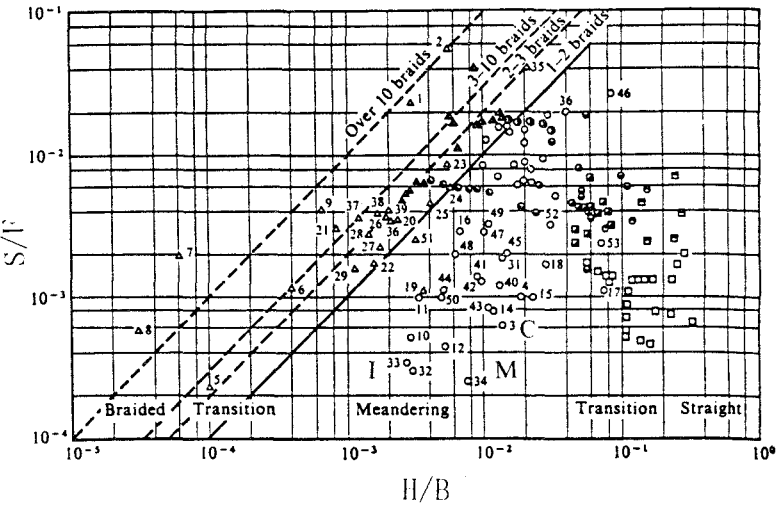


図-1 Parkar¹⁰⁾による流路形態分類図
(I：イラワディ川、C：チャオブラヤ川、M：メコン川)

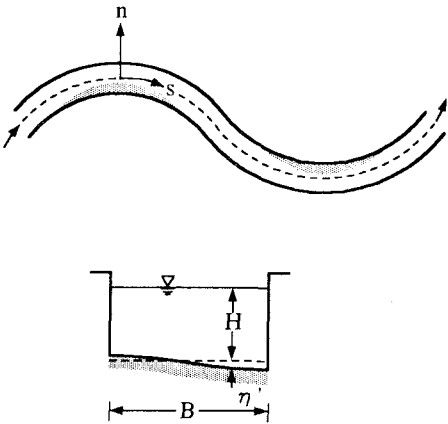


図-2 蛇行河川の模式図

$$kH=1.5C_r \quad (2)$$

ここに、 C_r は抵抗係数であり、 $C_r=gHS/H$ 、で与えられる。一方、河床の状態が平衡状態に達している場合の掃流砂のおよび浮遊砂の連続の式は次式で与えられる。

$$\frac{R}{r} \frac{\partial}{\partial s} (q_{Bs}+q_{Cs}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial n} [r(q_{Bn}+q_{Cn})]=0 \quad (3)$$

ここに、 r は局所的曲率半径であり $r=R+n$ 、 q_{Bs} は s 方向の単位幅掃流砂量、 q_{Bn} は n 方向の単位幅掃流砂量、 q_{Cs} は s 方向の単位幅浮遊砂量、 q_{Cn} は n 方向の単位幅浮遊砂量、である。

Ikedo-Nishimura は理論的考察の結果、蛇行流路の平均河床高からの河床高の変位量 η' (図-2参照)を次式で与えている。

$$\frac{\partial \eta'}{\partial n} = - \frac{\frac{R}{r} \int \frac{\partial}{\partial s} (q_{Bs}+q_{Cs})dn + q_{Cn} + q_{Bs} \tan \delta}{5.38(\tau_{*c}/\tau_{*})^{1/2} q_{Bs}} \quad (4)$$

ここに、 τ_{*} はシールズの掃流力、 τ_{*c} は限界掃流力、 δ は河床近傍の流向と s 方向のなす角度、である。

次章のケーススタディにおいて式(4)を使用すれば n 方向の河床形状の予測は可能となる。なお、計算に当たっては平均河床高さは流下方向に変化しないものとする。さらに、同式中の q_{Bs} 、 q_{Bc} ...等の諸量は Ikeda-Nishimura の検討結果を使用して計算する。

蛇行流路の安定解析を念頭に置けば雨期に形成された河床形状は乾期においても維持されると考える事は妥当である。従って、雨期における河床形状が計算できれば月間平均水位の観測データを使用して各月の河川の n 方向の水深が予測できることになる。

表-1は東南アジア地域の内陸河川において使用される積載可能重量50t ～700t の船舶(はしけ)が水深が限られた河川中を航行する場合に積載しうる物資の重量を示すものである。よって、既述の方法によって計算された河川水深と表-1を比較する事によって蛇行河川中を航行する事が可能な船舶の種類とそれに積載しうる物資の重量が定まることとなる。

Water depth (m)	50 tons deadweight tons	80 tons deadweight tons	300 tons deadweight tons	700 tons deadweight tons
1.5	27	27	120	240
1.7	34	34	167	297
1.9	42	48	200	355
2.1	50	59	233	413
2.3	50	69	267	471
2.5	50	80	300	529
3.1 and over	50	80	300	700

表-1 与えられた水深毎の各種船舶に積載しうる物資の重量

3. 東南アジア三河川におけるケーススタディ

本章においてはミャンマーのイラワディ川のマンダレー地点、タイのチャオブラヤ川のチャオブラヤダム地点、カンボジアのメコン川のクラティエ地点の3河川3地点についてのケーススタディを実施する。なお、本ケーススタディにおける議論に使用する観測データおよび河床形状の予測に使用する基礎データは Suppataratarn¹⁾、The World Bank²⁾、Alcausin³⁾、UN(1964)⁴⁾、UN(1968)⁵⁾、UN(1968)⁶⁾、UN (1985)⁷⁾より引用している。

これらの3地点はいずれも雨期と乾期の存在が顕著である東南アジア特有の気象条件となっている。イラワディ川における雨期は5月～10月の6ヶ月間、乾期は12月～3月の4ヶ月間である。その他の河川のケースもほぼ同様の時期に雨期と乾期が訪れる。チャオブラヤ川およびメコン川においては河川水位は5月～6月に上昇し始める。水位は8月～9月に最高水位に達した後に急激に低下する。また、乾期には水深は徐々に低下し、4月に最低水位を記録する。雨期の最大流量と乾期の最低流量の差は極めて大きく、マンダレー地点ではその比は200倍、チャオブラヤ地点では22倍、クラティエ地点では20倍、程度となっている。

これらの各河川の各地点における雨期の諸条件を図-1にプロットすると、第2章に既述したようにいずれのケ

ースも河川の流路形態は蛇行流路領域に属する。これより、本章のケーススタディでは第2章に既述のモデルを使用して河床形状の予測計算を実施する。なお、計算の初期条件はイラワディ川がマンダレー地点、チャオプラヤ川がチャオプラヤダム、メコン川がクラティエ地点において設定して下流方向に計算する。

提案されたモデル計算による雨期における右岸、左岸の河床高の計算結果と月平均水位の観測データを図-3に示す。図中の L は計算始点より下流方向にとられた距離である。同図より交互砂州が原因となって最大河床高が右岸と左岸で下流方向に交互に出現している事が分かる。蛇行河川中を航行する船舶は河川の最深部を選択して航行できるので船舶の航行に最も障害が生ずるのは蛇行方向の転換部（右岸と左岸の河床高が一致する地点、つまり、流路の直線部）である。

図-3より月平均水深は、月平均水深=月平均水位の観測データ-河床高の計算結果、で与えられる。このようにして計算される蛇行転換部の乾期における月平均水深はイラワディ川で1.0～2.2m、チャオプラヤ川で1.2～2.5m、メコン川で0.9m、と極めて小さな値となる（図-3参照）。

表-1に示す各種船舶の河川水深毎の積載可能な物資の重量と上述の乾期の蛇行転換部における月平均水深の計算結果より、各種船舶が水深が限られた河川を航行するための各月の積載可能な物資の最大重量(以下、有効積載重量、という)を求める事ができる。これと河川水深が深く、十分な喫水が確保しうる場合の各種船舶の積載重量(以下、最大積載重量、という)との比：有効積載重量比=有効積載重量/最大積載重量×100%、を求めた結果を図-4に示す。

図-4より最大積載重量50t～700tの船舶が物資を満載して航行可能なのは雨期の数ヶ月である事が分かる。また、乾期の最も水位の低い時期においては、イラワディ川およびメコン川では50tの小型船舶さえも航行不能になる事が分かる。さらに、乾期から雨期に至る季節には各種船舶の有効積載重量比は0%～100%の範囲で大きく変化する事が分かる。つまり、乾期から雨期に至る季節、特に乾期においては河川を使用した東南アジア地域の内陸部の物流は著しく困難なものとなる事が分かる。

ところで、河川蛇行転換部に生ずる浅瀬部分は蛇行水路全体の中では比較的短い区間であり、そこを浚渫して船舶の航行を容易なものとする事の工学的意義は大き

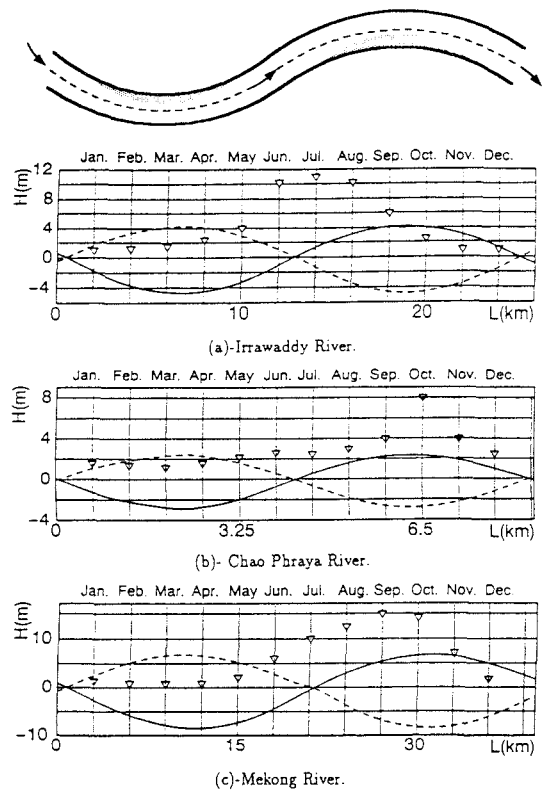


図-3 河床形状の計算結果と月平均水位の観測データ
(—：右岸側、-----：左岸側)
▽：月平均水位の観測値

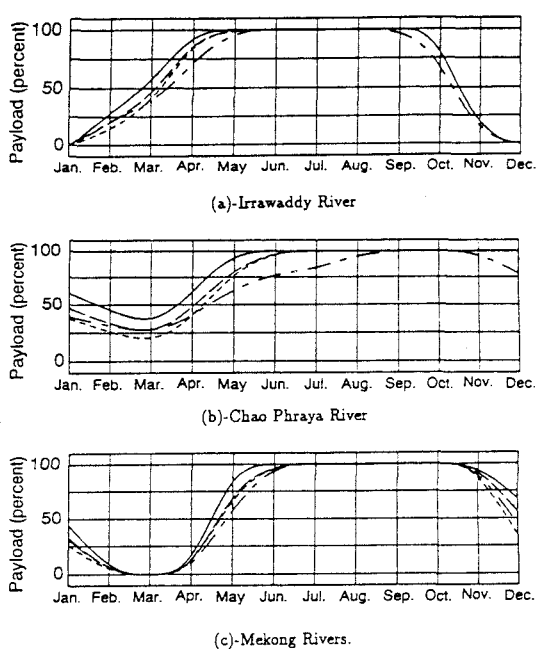


図-4 月毎の各種船舶の有効積載重量比
——：50t ——：80t
.....：300t -.-.-.-：700t

い。

ケーススタディとして浅瀬部分を1 m 浚渫するケースを考える。月平均水深の計算結果を使用すれば1 m の浚渫によって乾期最低水深はイラワディ川で2.0m, チャオブラヤ川で2.2m, メコン川で1.9m となる。その結果として得られる有効積載重量比を図-5に示す。同図より最大積載重量300t の船舶の場合、乾期の最低水位時には有効積載重量比がイラワディ川で65%, チャオブラヤ川で85%, メコン川で60%程度となる事が分かる。浚渫を実施しない場合(図-4参照), 乾期の最低水位時にイラワディ川およびメコン川においては50t 船舶さえ航行不能になるという結果と比較すれば、僅か1 m の浚渫でも極めて有効である事が分かる。なお、同様な計算によれば300t の船舶が物資を満載して航行する為にはイラワディ川で1.5m, チャオブラヤ川で1.3m, メコン川で1.6m, それぞれ浚渫する必要がある事が分った。

4. おわりに

東南アジア地域の内陸部においては河川を利用した船舶による物資の運搬が地域経済の活性化および環境保

全の観点から重要である。本研究は同地域の河川に特徴的な蛇行流路中に見られる交互砂州による河床変動が乾期において船舶による物資の輸送を制限もしくは困難なものとしている事をケーススタディとして取り上げた3河川の河床形状の予測計算結果をもとにして明らかにした。また、蛇行方向の転換部に生ずる浅瀬を僅かに浚渫するだけで船舶の航行が極めて容易となり物資輸送量が飛躍的に増大する事が明らかにされた。

本研究の手法および結論の概略はケーススタディの3河川のみならず、広く東南アジア地域の各河川に適用可能なものである。

謝辞：本研究に使用したデータの収集に当たってはアジア工科大学の Vongvisessomjai, S 教授の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Supparatarn, P: Modeling of river networks, A dissertation for D. E., AIT Lib, 1990.
- 2) The World Bank Thailand staff appraisal report inland waterways and coastal ports projects, Project department East Asia and Pacific regional office, 1980.
- 3) Alcausin, E.: Salinity intrusion in the Mekong estuarine system, M. E. Thesis, AIT Lib, 1980.
- 4) UN: Methods of hydrological forecasting for the utilization of water resources, Economic commission for Asia and the Far East World Meteorological Organization, 1964.
- 5) UN: Principaux cours d'eau internationaux de la region de la ceaeo, Commission economique pour l'asie et l'extreme-orient, N29, 1968.
- 6) UN: Water legislation in Asia and the Far East, Part I, Water resources series, N35, 1968.
- 7) UN: Report of the inland water transport programming mission, Economic and social commission for Asia and the Pacific, 1985.

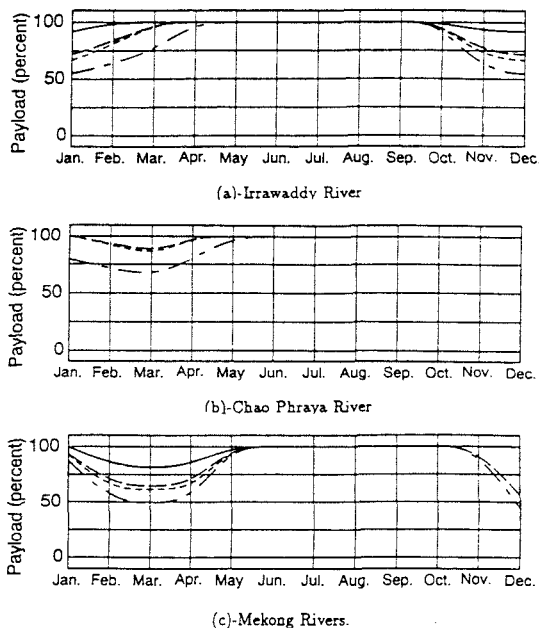


図-5 1mの浚渫を実施した場合の
各種船舶の有効積載重量比

— :50t - - - :80t
..... :300t - · - · :700t

- 8) Akatsuka, Y., Asaeda, T. and Brooks, J.: The Outlook for research in Asian inland water transport, Proc. PIANC Congress, pp. (83/84)124-130, 1994.
- 9) Ikeda, S. and Nishimura, T.: Flow and bed profile in meandering sand silt rivers, J. Hy. Div., ASCE, Vol. 112, pp. 562-579, 1986.
- 10) Parker, G.: On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers, J. Fluid Mech., Vol. 76, pp. 457-480, 1976.
- 11) Ikeda, S., Parker, G. and Sawai, K.: Bend theory of river meanders, Part I, Linear development, J. Fluid Mech., Vol. 112, pp. 363-377, 1981.