港域内アンカレッジの適正規模配置に関する研究 —港域内船舶流動シミュレーションによる評価—

井上 欣三*・安田 克**・田村 孝夫***

Simulation Assessment on Reasonable Arrangement of Anchorages in Harbour

Kinzo INOUE, Masaru YASUDA and Takao TAMURA

Abstract

A Reasonable number of anchorages should be arranged for the ships which are obliged to wait for a berth to become available in an appropriate position in the harbour. The necessary number of anchorages changes with the number of ships, the number of berths and the existence of time restrictions on the time for entering port.

In the present paper, a simulation model is proposed to clarify the demand of anchorages, taking the present and future conditions of port activities mentioned above into account. The model is made up of five sub-models: port sub-model, ship sub-model, quarantine sub-model, time restriction sub-model and anchorage allocation sub-model. Information from the simulation results is useful for the design of reasonable anchorage arrangements.

1. はじめに

船舶が港に入港しようとするとき、バース待ち、検疫、夜間の入港制限などのため港外待機を必要とする場合がある。その際、船舶は原則として港長から錨地の指定を受けて所定のアンカレッジで錨泊待機することになる。そのため、それぞれの港湾では、待機を要する船舶の需要に見合う規模のアンカレッジを防波堤外に用意することになる。しかしながら、近年各港においては大水深港を目指した港湾施設の埋め立て沖出しが活発化し、それに伴い港域内アンカレッジの配置の再検討が必要な情勢となっている。元来、この種のアンカレッジは、港湾機能の充実の程度とその活動状況に見合った規模で適正に配置されるのが合理的である。

そこで本研究では、入港船舶数、港湾の規模、バース稼働状況、入出港時間制約等々の付与条件と設置すべきアンカレッジの妥当な規模との関連性を考慮に入れたシミュレーションモデルを構築し、これを用いて港域内アンカレッジの適正規模配置のあり方について検討を行った。

2. 港域内船舶流動シミュレーション

2.1 対象船舶

対象船舶は、岸壁荷役を目的とした 500GT 以上の船舶とし、フェリー、旅客船、危険物積載船は対象外とした。また、入渠待ち、沖修理やスケジュール調整等の特別な事情による数日間に及ぶ錨泊待機は考

* 正会員 神戸商船大学 (〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

** 正会員 神戸商船大学大学院 (〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

*** 正会員 ㈱日本海事検定協会 (〒104 東京都中央区八丁堀 1-9-7)

慮されていない。

2.2 シミュレーションモデルの基本的な考え方

このシミュレーションモデルでは、港域内を防波堤外錨泊地水面、港内航路、港内バース群の3つのエレメントに大別し、各構成エレメント間の船舶流動を図1のフローに示すような考え方にしたがって模擬している。その行動の基本的な流れは目的バースに空きがあれば入港着岸して所定の時間停泊し、目的バースに空きがなければそのバースが空くまで港外で錨泊待機するというものであるが、実際の港域内での船舶流動をモデル化するために、具体的なシミュレーションの実行に際しては次の5つのサブモデルによって船の行動をコントロールしている。

2.3 サブモデルの構成

① 港湾サブモデル

検討対象港のプロフィールをバース数とその配置によって特徴付ける。すなわち、実在バースを地理的隣接性と扱い貨物の種類、定期不定期の別などを考慮して、いくつかのバース群にグルーピングして配置する。ここでは在来船バース群とコンテナ船バース群の2種に大別する。

② 到着船サブモデル

港外への到着船舶を発生させる。年間入港船舶総数、到着船の月間、旬間、週間変動、時刻変動などを考慮して船舶発生条件を与え、併せて到着船舶の船種、船型構成を設定する。船種については在来船、コンテナ船の2種に大別し、船型についてはL船型(大型船)、M型船(中型船)、S船型(小型船)の3タイプに大別する。また、発生した船舶ごとの行き先バースとそのバースでの停泊時間もこのサブモデルのなかで割り当てる。

③ 検疫船サブモデル

港外検疫が行われる港において検疫錨地における船舶の行動をモデル化したもので、その受検行動は実状に合わせて設定する。

④ 着岸行動サブモデル

港内の目的バースに空きができたときの船舶の入港着岸行動を律するためのもので、このサブモデルの中でバース側における受入れ準備のための時間調整や荷役作業時間帯との調整、さらには夜間着岸の時間制約といった入港着岸に伴う行動制約を実情に合わせて考慮する。

図2に夜間着岸の時間制約の実態を考慮に入れて設定した入港着岸行動のモデルを示す。図の横軸は時刻、縦軸はその時刻に到着した船舶がダイレクトに入港着岸することが可能な割合を表している。6時から17時までは、在来船、コンテナ船ともバースに空きがあるかぎり常に入港着岸可能であるが、それ以後夜半にかけては、本船側の意図または港湾側の理由により、バースに空きがあっても入港を翌朝に延期する割合が増加するようなモデルになっている。ただしコンテナ船については、在来船よりもさらに遅い時間帯まで入

図1 シミュレーションフロー

図2 入港着岸行動のモデル化

港着岸する状況を考慮に入れてモデル設定を行っている。

次に船舶が錨泊待機する場合、投錨時の時間帯によって錨泊時間が異なるのが当然であるが、ここでは表1に示すように錨泊しようとする時刻帯に応じて錨泊して待機する時間を設定することにした。

⑤ 錨地割当サブモデル

港外で錨泊待機する船舶に対する錨地指定の手続きをモデル化したもので、指定錨地は大きさL(大型船用), M(中型船用), S(小型船用)を用意する。これらは原則として錨地指定を受ける船舶の大きさに応じて使い分け、そして目的バースへの出入りに使用する航路に近い錨地から順に割り当てる。ただし、割り当てられた錨地が一杯である場合は当該錨地の規模より上位の規模の錨地を割り当てる。

3. 神戸港を対象としたシミュレーションモデルの検証

3.1 シミュレーション条件の設定

5つのサブモデルから構成される港域内船舶流動シミュレーションモデルが現状と比較してどの程度再現能力があるかを神戸港を対象港として検証を行った。設定したシミュレーション条件は、表2にまとめたとおりである。

3.2 検証結果

3.2.1 平均錨泊時間と平均抜錨時刻による検証

図3-1は指定錨地における到着時刻別の平均錨泊時間を表したもので、図の横軸は到着時刻、縦軸は平均錨泊時間を表している。これは各到着船舶ごとの錨泊時間を到着時刻別に積算し、これを3カ月間の1隻あたりの平均値として求めたものである。また、図3-2は、到着時刻に平均錨泊時間を加算して求まる平均的な抜錨時刻を実態と比較したものである。図中△は実態調査の結果を表し、■はシミュレーションの結果を表している。これより日中に到着した船舶は比較的錨泊時間が短く、17時以降に到着した船舶は錨泊時間が長くなる様子がよくわかる。

図3-1 平均錨泊条件

表1 錨泊待機時間のモデル化

船 種	錨泊待機時間: TQ	錨泊に移ろうとする時刻: TA
コンテナ船	$TQ = (6 - TA) + K_1$	$0.0 \leq TA \leq 0.6$
	$TQ = K_1$	$0.6 < TA < 2.2$
	$TQ = 2.4 + (6 - TA) + K_1$	$2.2 \leq TA < 2.4$
在来船	$TQ = (6 - TA) + K_2$	$0.0 \leq TA \leq 0.6$
	$TQ = K_2$	$0.6 < TA < 1.7$
	$TQ = 2.4 + (6 - TA) + K_2$	$1.7 \leq TA < 2.4$

※ K_1, K_2 : 着岸のための時間遅れで指数分布に従う乱数項として与える

表2 シミュレーション条件

シミュレート期間 : 3ヵ月 ランニングタイム : 10日間 【錨地利用のようすが安定するまでの空回し期間】	
関連モデル	設定条件
港湾サブモデル	バース数 : 在来船バース数 130バース コンテナ船バース数 30バース
到着船サブモデル	年間総入港隻数 11739隻 船種構成比率 在来船: 61% コンテナ船: 39% 船型構成比率 L船型(船長200m以上): 19.8% M船型(130~200m): 33.8% S船型(130m以下): 46.4%
検査船サブモデル	検査実施時間 : 0900~1800 検査所要時間 : 2時間 (ただし検査実施時間以外に到着した検査船は9時まで錨泊待機し9時に受検を終了するものとする) 検査船割合 : 5% 検査後他港へ出港する割合: 42.7%
着岸行動サブモデル	夜間入港制約 : 在来船 1700~0600 時間帯 コンテナ船 2200~0600

図3-2 平均抜錨時刻

3.2.2 時刻別平均錨泊隻数分布による検証

図4-1は指定錨地における時刻別の平均錨泊隻数を表したもので、各1時間内に港外錨地に平均的に何隻の錨泊船が錨泊していたかを示している。図の棒グラフは実態を表し、実線はシミュレーションの結果を表している。これより夕刻17時以降から徐々に錨泊船が増え始め、その増加は6時頃にピークを迎え、その後一斉に抜錨している様子がシミュレーションでも良く再現されている。また、図4-2は検疫錨地における時刻別の平均錨泊隻数を表している。この場合も本モデルは実情をよく再現していることがわかる。図4-3と図4-4はコンテナ船と在来船の船種別にみた場合、図4-5、図4-6、図4-7はL錨地、M錨地、S錨地の錨地規模別にみた場合の比較結果を表している。いずれの場合も本モデルの現状再現性は良好であることがわかる。

3.2.3 最大錨泊隻数出現分布による検証

図5-1は指定錨地において一日を単位としてその間に発生した最大錨泊隻数の3カ月間における出現頻度の分布を表したもので、図の横軸は一日の間に発生した最大錨泊隻数、縦軸はその出現率を表している。図の棒グラフは実態を表し、実線はシミュレーションの結果を表している。また、図5-2は検疫錨地において1日の間に発生した最大錨泊隻数の出現分布を表している。いずれの場合もよい一致を示している。

以上に述べた結果より、本シミュレーションモデルから得られる港外錨泊地での船舶滞留の様子は現状を良く再現しており本モデルの整合が取れていることが分かる。

図4-1 平均錨泊隻数(指定錨地)

図4-2 平均錨泊隻数(検疫錨地)

図4-3 船種別にみた平均錨泊隻数(在来船)

図4-4 船種別にみた平均錨泊隻数(コンテナ船)

図 4-5 錨地規模別にみた平均錨泊隻数 (L 錨地)

図 4-6 錨地規模別にみた平均錨泊隻数 (M 錨地)

4. シミュレーション結果とアンカレッジ規模の設計

港域内アンカレッジは港湾への入港船舶数、港内バース数、各バースの稼働状況、入出港時間制約等々の条件を考慮にいて、妥当な規模で適正に配置されなければならない。ここに提案した港域内船舶流動シミュレーションモデルは、これらの付与条件をすべてサブモデルの中でパラメータとして含ませているので、このシミュレーションを実行することにより、港湾の機能充実の程度と活動状況に見合った所要のアンカレッジ数を見いだすことができる。

図 4-1～4-7 に示した一連の時刻別平均錨泊隻数の出力図は、港外で錨泊待機した船舶、すなわち、港外におけるアンカレッジ需要の平均的な値を示すものである。いま、指定錨地に関してみれば明け方 6 時頃が需要のピークとなるが、このような潜在需要を満たすために必要となるアンカレッジの数は、図 4-1 に示したシミュレーション結果のピークの高さから判断できる。また、図 4-3～図 4-7 に示したシミュレーション結果に着目すれば、在来船、コンテナ船などの船種別に、さらに、大型、中型、小型などの船型別に配置されるべきアンカレッジの数が把握できる。

ただし、図 4-1～4-7 をもとにして得られるアンカレッジ需要の判断情報は、平均的な需要を対象にしたものである。しかし、一方では、アンカレッジの長期にわたる需要の変動にも対処できる検討も必要となる。これについては、図 5-1～図 5-2 に示した 1 日ごとの最大錨泊隻数の出現頻度分布の出力図が参考になる。すなわち、年間を通じて需要のピークをどの程度までカバーできるアンカレッジ数を配置するかをこれらの出力図をもとに設定することにより、アンカレッジの機能充実の程度が明確になるので合理的なアンカレッジ規模の設計が可能となる。

図 4-7 錨地規模別にみた平均錨泊隻数 (S 錨地)

図 5-1 最大錨泊隻数の出現分布 (指定錨地)

図 5-2 最大錨泊隻数の出現分布 (検査錨地)

5. 本シミュレーションモデルによるケーススタディー

5.1 神戸港をモデルとしたケーススタディー

将来における港湾活動の量的、質的変革に伴い、入港隻数の増加や船型の大型化、コンテナ化や入港時間制約解除、港湾施設の拡大や再配置など、今後、港湾の活動形態にも大きな変化が予想される。特に、本研究においてモデル港湾として取り上げた神戸港では、埋め立てによる港湾施設の沖出し、港奥部港湾施設の再開発、港域内における新空港の計画などがあり、港湾当局としても港域内アンカレッジの配置の再検討を迫られている。そこで、ここでは神戸港をモデルとしたケーススタディーを実施して、今後の港湾活動の変化に伴い港域内アンカレッジの需要にどのような波及が予想されるかについて検討を行った。

5.2 入港船舶隻数の増加とアンカレッジ需要との関連性

表2に示したシミュレーション設定条件を現状の港湾活動を表すものとして、これを基準に入港船舶隻数の増加に伴うアンカレッジ需要への影響について検討を行った。現状の3カ月間総入港船舶隻数 11,739 隻を基準として、在来船とコンテナ船をともに 20% ずつ増加させて3カ月間総入港船舶隻数を 14,087 隻とした場合と、在来船は現状のままとしてコンテナ船のみを増加させ総入港船舶隻数を 14,087 隻とした場合の比較を行った。

図6にそれぞれのシミュレーション結果の比較を示す。コンテナ船のみを増加させた場合と現状とを比較するとアンカレッジ需要の増加影響はさほど顕著ではない。これはコンテナ船は停泊時間が短く、また、夜間の入港時間制限も短時間のためである。一方、コンテナ船と在来船をともに 20% ずつ増加させた場合は、アンカレッジ需要の増加影響が顕著となる。これは、在来船の入港時間制約がコンテナ船より長時間であることや、1隻あたりの停泊時間が長いことなどの影響によるものである。また、図7は、最大錨泊隻数分布を表したものである。この図からも在来船とコンテナ船をともに 20% ずつ増加させた場合には山のピークが右側に移動し、アンカレッジの潜在需要がかなり大きくなることがよくわかる。

5.3 夜間入港時間制約の解除とアンカレッジ需要との関連性

国内では横浜、東京、名古屋の各港では入港時間制約はなく 24 時間対応となっているが、ここでは、神戸港においてバースが空いていれば時間に無関係に終日入港着岸が可能となるように入港時間制約を解除し

図 6 入港船舶隻数の増加と平均錨泊隻数の関係

た場合のアンカレッジ需要への波及について検討を行った。

図 8 は、コンテナ船のみを増加させ総入港船舶隻数を 14,087 隻とした場合をベースに、夜間の入港時間制約を解除したときのアンカレッジ需要への波及の様子を示している。入港時間制約のある場合とそれを解除した場合とを比較すると、夕刻から明け方にかけてのアンカレッジ需要が極端に減少する様子がよくわかる。そして、この場合のアンカレッジ需要の様子は昼間の潜在需要に左右されることになる。また、図 9 に示すように、最大錨泊隻数出現分布において、夜間の入港時間制約を解除するとピークが左側に移動し一日の最大錨泊隻数が極端に少なくなる。また、図 9 の右側の棒グラフは総入港隻数に対する錨地利用隻数の割合を表したもので、これから港外で錨泊待機する船舶の割合が減少する様子がよくわかる。このように夜間の入港時間制約の解除は港外におけるアンカレッジ需要の減少に大きな効果を与えることがわかる。

図 7 入港船舶隻数の増加と最大錨泊隻数出現分布の関係

図 8 夜間入港時間制約の解除と平均錨泊隻数の関係

図 9 夜間入港時間制約の解除と最大錨泊隻数出現分布の関係

5.4 港内バース数の減少とアンカレッジ需要との関連性

最近の港湾においては、大水深バース確保のための埋め立てによる港湾施設の沖出しが図られ新規バースの増設計画が活発化しているが、その反面、港奥部の在来バースの遊休化に伴う再整備や水際線の市民への開放の面からバースの公園転換が図られるなど、港湾施設の再配置への動きが著しい。神戸港においてもこの動きは例外ではない。そこで、ここでは問題を簡略化して、神戸港内に現在用意されているバースの数を単純に減少させていった場合のアンカレッジ需要への波及効果について検討を行った。

3 カ月間総入港船舶隻数を 11,739 隻とした現状の条件のもとで、現在 130 バースある在来船バースを減少させながら順次シミュレーションを行い、その結果から総入港船舶隻数に対するアンカレッジ利用隻数の割合を求めた。

図 10 は、その結果をとりまとめたものである。図の横軸はバースの減少率を表し、縦軸は総入港船舶隻数に対するアンカレッジ利用隻数の割合を表している。バース数が現状の 65.4%に減少するまでは港外におけるアンカレッジの需要には変化は見られない。しかし、それ以降さらにバース数を減少させるとア

ンカレッジ利用隻数の割合は急激に増加し始め、港外におけるアンカレッジの需要増加の影響が現れてくる。港内バースの絶対数が不足し、その結果、目的バースに空きがないためにアンカレッジで錨泊待機を余儀なくされる場合は、そのときの錨泊時間は先船の停泊時間の長さに依存して長くなる。このシミュレーションにおいてもバースが極端に不足してくると、長いときは数日間に及ぶ錨泊待機の例も見受けられた。このように、港内バース数と入港船舶隻数のアンバランスは港外沖待ち船の数を増やす結果となることがよくわかる。

6. 港湾形状を考慮したアンカレッジの配置設計

港域内アンカレッジの配置設計に際しては、所要のアンカレッジを適切な位置に配置できるように検討がなされなければならない。所要のアンカレッジを港湾形状との関連から適切な位置に合理的に配置するためには、錨地から港内に入港する際にできるだけ短距離の移動で済み、そして、他の航路を横断しなくてよいように、バースと航路と錨地の地理的相互関連性を考慮に入れた設計が必要である。

そこで、ここでは神戸港を対象に、港内に図11に示すように港湾の地理的特徴を考慮して3つの地区にグルーピングしてモデル化し、これに表2に示した設定条件を与えてシミュレーションを行った。シミュレーションの実行に際しては、錨地割り当てサブモデルの項において述べたように、錨地は目的バースへの出入りに使用する航路に近い錨地から順に割り当てられる。したがって、シミュレーション結果において3つの地区それぞれの港外に配置されたアンカレッジ需要に着目すれば、所要のアンカレッジを安全、効率の面から適切な位置に配置するための設計資料が得られる。

図10 バース数減少とアンカレッジ需要の関係

図11 港湾形状を考慮にいたしたシミュレーション結果

図 11 は、港のグルーピングとシミュレーション結果を整理したものである。図の上部には各地区ごとバースの数、図の下部には時刻別平均錨泊隻数と 1 日に発生する最大錨泊隻数の出現分布を示している。図 11 に見られるように各地区ごとにアンカレッジ需要の様子が異なることがよくわかる。このような結果を利用することにより、錨地から港内に入港する際に短距離の移動で済み、そして、他の航路を横断しなくてよいような合理的なアンカレッジ配置が設計できる。

7. むすび

目的バースに空きがあれば入港着岸し、空きがなければ錨泊待機させるといった基本の流れに 5 つのサブモデルを組み込んだ港域内船舶流動シミュレーションモデルを開発した。このシミュレーションモデルによれば、入港船舶数、港湾の規模、バースの稼働状況、入出港時間制約等、港湾の機能充実の程度と港湾活動の状況に応じたアンカレッジの潜在需要を見いだすことができるとともに、港湾の地理的形状に見合った安全で効率的なアンカレッジの配置設計が検討できる。

以下に本研究において提示した港域内船舶流動シミュレーションモデルの特徴とその利用可能性についてとりまとめる。

- (1) 入港船舶の月間、旬間、週間、時間変動を考慮したことにより、アンカレッジ利用のピーク時期と閑散時期の変動を把握できる。
- (2) 船種をコンテナ船と在来船に分けて構成したことにより、船舶の出入港態様、荷役形態の相違によるアンカレッジ需要への波及の様相が検討できる。
- (3) 船型を L, M, S に分けてモデルを構成したことにより、アンカレッジの適正規模配置数を船の大きさに応じて検討できる。
- (4) 夜間入港時間制約をパラメータとしてモデルの中に組み込んだことにより、夜間入港時間制約の解除など将来における入出港運用形態の変化に伴うアンカレッジ需要への波及効果が検討できる。
- (5) 港湾をバース群、使用航路、錨地で構成される基本エレメントでモデル化したことにより、港勢に応じた港湾の一般化が可能であり、さらに、港内バースとアンカレッジの相互関連性を考慮に入れた安全、効率の面からも合理的なアンカレッジ配置が検討できる。
- (6) 錨地割当に際しては具体的な運用手順を組み込む形でモデル化したことにより、将来における運用官の運用方法の改善や最適化の検討にも利用できる。
- (7) 検疫船サブモデルを導入したことにより、将来の検疫実施形態への変化にも対応できる。

参 考 文 献

- (1) 神戸市;平成 3 年度水域施設利用計画(神戸港錨地利用調査)に関する調査研究報告書,平成 4 年 3 月
- (2) 神戸市港湾局,(株)日本海事検定協会;神戸港港湾施設の利用状況等調査報告書(錨地利用計画),平成 5 年 3 月