

広域湾内海上交通システムの アベイラビリティについて

Availability of Sea Traffic System of A Bay

黒田 勝彦・・王 能勇・・

By Katuhiko KURODA and Neng Yong WANG

At the Bays of Osaka, Tokyo and Ise in Japan the sea traffic conditions are said to be very much dangerous because of increase of the number of ships, and lack of the space due to the utilization of the bay area for many kinds of activities. Thus some countermeasures should be considered for the improvement of the navigational safety. However no research has been proposed for measuring the safety of total sea traffic system in such bays. This paper discusses the model of the safety of the sea traffic system based on the concept of the system availability.

1. はじめに

東京湾、伊勢湾、大阪湾といった大都市港湾をその周辺に数多く抱える湾では湾内の埋立人工島を始めとする湾内水域の高度利用や湾内航行船舶数の増加によって、船舶の航行安全性に著しい支障をきたしている。このような背景から海上保安庁を中心に広域湾内の海上交通の安全性確保のための航路の統合や一方交通航路の設定、船型の分離、航行援助のための情報支援システム等について検討がなされている。しかし、未だ広域の航路ネットワークよりなるシステムの安全性を定量的に扱うモデルが開発されておらず、各種の対策の効果を定量的に検討する

方法がない。そこで、本研究ではシステム信頼性の一つのメジャーであるアベイラビリティの概念を応用した航路ネットワークを含むシステムの航行安全性の表現モデルを提案し、大阪湾に適用してその有用性について検討した。

2. 航路ネットワークシステムの構成

(1) 定義—ユニット、故障率、保全率

図1(a)は海峡部の狭水道、港湾部及びこれらを結ぶ航路から成る海上交通ネットワークを示している。海峡部、港湾部、航路の交差部をノードと呼び各ノードを結ぶ航路はリンクと呼ぶ。このようなリンク・ノードからなるネットワークは部品(ユニット)の集合体と見ることができる。各ノード及びリンクのうちの同一条件の範囲を区切ってそれぞ

・ 正会員 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学科(京都市左京区吉田本町)

・ 正会員 工修 東光コンサルタント(東京都新宿区信濃町21、石原ビル)

れをユニットと名付ける。特に、長いリンクではリンク上の地点によって保全率および事故率が異なるのでこれがほぼ一定になるように適当な区間に区切ってユニットを決める必要がある。図1(a)をこの様なユニットの集合体としてのシステムに置換すると図1(b)のようになる。

ユニットの故障とはそのユニットにおいて航路本来の機能である「交通疎通機能」が船舶事故のために停止する状態を云い、一定時間内にユニットが故障を発生する回数または一回の故障が発生する確率をユニットの故障率と呼ぶ。

ユニットの保全とは、ユニットが故障、すなわち、船舶事故が発生した場合、何等かの方法で事故を処理し航路の機能を回復せしめる事を云う。航路の保全率とは、所与の時間内に修理出来る故障件数を云う。従って、ユニットの保全率は処理基地からそのユニットまでの時間距離と処理能力に依存する。

(2) リンクのユニット分割法

先に、長いリンクは故障率・保全率が一定になるように適当な区間に分割してユニットを構成する、と述べた。ここでは、その方法について説明する。

今、図2(a)のような幾何学的条件の様な一本の航路を考える。航路の長さが L (km)であるとき、このリンクを一隻の船が通り抜ける時に期待される

事故率を $P_c(L)$ とする。更に、このリンクを n 等分し、 n 個のユニットの直列システムと考える。このとき、各ユニットは同じ事故率 $P_c(L/n)$ を持つ。さて、 n 個の直列ユニットに分割してもリンクとしての事故率は不変であるから次式の関係が常に成り立たなければならない。

$$\{1 - P_c(L/n)\}^n = 1 - P_c(L) \quad \dots(1)$$

上式で、 $P_c(L) \ll 1$ が通常成り立つので、近似的に

$$\{1 - P_c(L/n)\}^n = 1 - n P_c(L/n) = 1 - P_c(L)$$

すなわち、

$$n P_c(L/n) = P_c(L) \quad \dots(2)$$

が成り立たなければならない。図3はOSHICOP-モデル¹⁾による衝突確率モデルを用いて(2)式が成り立つ分割数を求めたものである。この図からうに事故率が等しくなるようなユニット分割が存在することが理解される。一方、保全率は後述するように分割長にほとんど影響しない。よって、実際はユニット長は事故率によって決まる。

3. ユニットのアベイラビリティ

(1) ユニットの故障率

いま、固定座標上の地点 (x, y) に位置するユニットの故障率を $\lambda(x, y, t)$ とする。しかし、故障発生時間間隔が指数分布 $f_D(x, y, t)$ に従うものと仮定

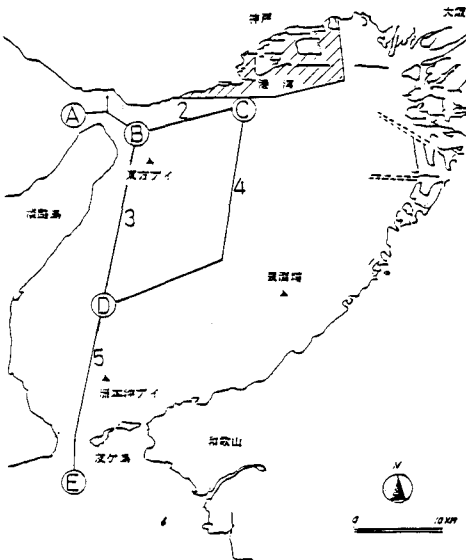


図1(a) 航路のリンク・ノードネットワーク

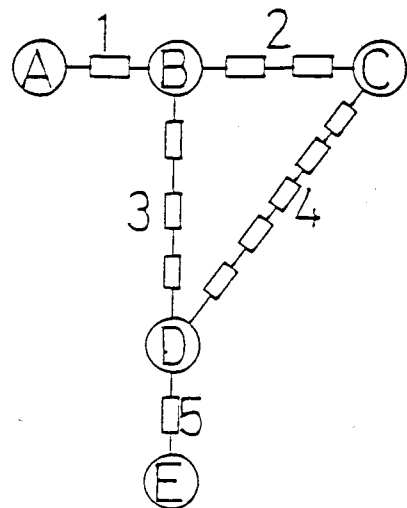


図1(b) 航路ネットワークのシステム構成

すると、 $\lambda(x, y, t)$ は時間 t と独立な定数となり、地点 (x, y) での船舶事故確率を $Pc(x, y)$ 、平均時間交通量を $Q(x, y)$ とすると次式であたえられる²⁾。

$$\lambda(x, y) = Pc(x, y) \cdot Q(x, y) \quad \dots(3)$$

(2) ユニットの保全率

地点 (x, y) のユニットで船型 k と k' の2船が衝突事故を起こしたとする。このとき、もし、引き続いて来る船舶がこのユニットに到着するまでに事故が処理されれば実質的にこのユニットの交通疎通機能は損なわれていないと考えられる。このような事故の全処理時間は最寄りの処理基地 (x^*, y^*) からユニットに処理船が到着するまでの時間と到着後の処理時間の和で与えられる。処理船の平均航行速度を V とすると基地からユニットまでの平均所用時間 τ_1 は

$$\tau_1 = \{(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2\}^{1/2} / V \quad \dots(4)$$

さらに、現場に到着して事故処理を開始してから終了するまでの平均時間 τ は一般に事故船の船型の組 (k, k') に依存する。しかし、特定の船型対別にユニットのアベイラビリティを求めることが目的ではないので全船型対の平均的な処理時間を τ_2 とし、以下のように求めた。考えている航路の交通についての船型構成確率密度関数を $\phi(k, k')$ 、ユニット (x, y) での船型対別衝突確率を $Pc(x, y, k, k')$ とすると、

$$\tau_2 = \frac{\sum_{k, k'} \tau(k, k') Pc(x, y, k, k') \phi(k, k')}{\sum_{k, k'} Pc(x, y, k, k') \phi(k, k')} \quad \dots(5)$$

ところで、通常、事故の連絡をうけてから基地を出発して事故現場に到着し処理を終えるまでのトータル時間（保全時間） ξ は種々の要因で変動し確定的に決まらない。本研究ではオイル処理時間の分布³⁾を参考にして、 ξ の分布形を指数分布と仮定した。このとき、ユニットの保全率 $\mu(x, y, x^*, y^*)$ は次式で与えられる。

$$\mu(x, y, x^*, y^*) = 1 / \{\tau_1 + \tau_2\} \quad \dots(6)$$

(3) ユニットのアベイラビリティ

一般に、ユニットの故障が修理され再び故障が発生して修理サービスを受ける、といった形態は丁度一定個数の窓口で修理顧客が到着し、修理（サービス）を受けて窓口を離れていく現象と全く同じであるので、ユニットのアベイラビリティ $A(x, y)$ は、以下のように求められる。但し、次の3点を前提条件とする。

- ①到着時間間隔に相当する故障時間間隔 t は指数分布 $f_D(t)$ に従う。
- ②サービス時間間隔に相当する保全時間 t は指数分布 $f_m(t)$ に従う。
- ③サービス窓口は最寄りの修理基地一つを考慮するので窓口数は一つである。

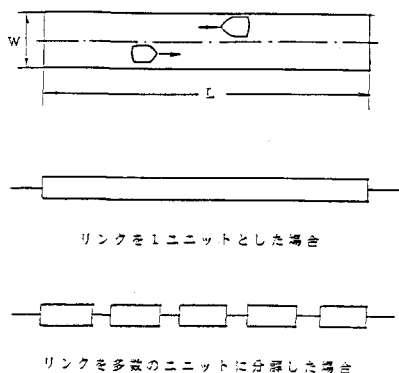


図2 (a) リンクのユニット構成

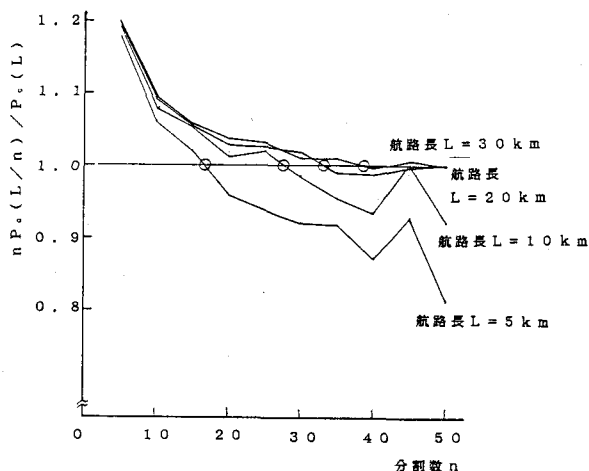


図2 (b) リンクの適正ユニット分割

以上より、このシステムは $(M/M/1)$ システムと同等である。いま、故障状態を $[1]$ 、ユニットの動作状態を $[0]$ とし、それぞれの状態確率を $P_0(t)$ 、 $P_1(t)$ とすると、それらは次式で与えられる。

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp\{-(\lambda + \mu)t\} \quad \dots(7)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \exp\{-(\lambda + \mu)t\} \quad \dots(8)$$

式(7)は任意の時刻に動作状態にあったユニットが時間 t 経過した瞬間に動作状態にある確率を意味しており、次式で与えられるユニットの信頼度 $R(t)$ とは意味が異なる。

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad \dots(9)$$

式(9)は $t=0$ で故障していないユニットをも時間動作させても故障を発生しない確率を意味している。それに対し、 $P_0(t)$ は故障したとしても保全が完了し、時刻 t の瞬間に動作できる確率を意味しており、瞬間アベイラビリティと呼ぶ。

ところで、航路を管理する側にとっても、航路を利用するユーザーの側にとっても、ある瞬間、瞬間の疎通機能保持確率よりも、長い期間の航路の信頼度の方に関心がある。今、期間 T の間の平均的なアベイラビリティを $A(x, y, T)$ とすると、

$$\begin{aligned} A(x, y, T) &= \frac{1}{T} \int_0^T P_0(t) dt \\ &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{T(\lambda + \mu)^2} [1 - \exp\{-(\lambda + \mu)T\}] \end{aligned} \quad \dots(10)$$

となり、例えば年平均アベイラビリティが欲しい時は $T=1$ の場合を考えればよい。更に、長時間の定常状態におけるアベイラビリティに関心がある場合、これを $A(x, y)$ とすると、式(10)より

$$A(x, y) = \lim_{T \rightarrow \infty} A(x, y, T) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad \dots(11)$$

式(11)を定常アベイラビリティと呼ぶ。

4. 航路及び航路ネットワークのアベイラビリティ

(1) 直線航路のアベイラビリティ

ここで云う直線航路とは、図3(a)に示すよう

に、ネットワークを構成するリンクまたはリンク・ノードの直列につないだ航路をいう。いま、ノード i とノード j が図3(a)のような直列航路で連結されている時、リンク $i-j$ は図2で述べた方法によって n 個のユニットに分割でき、図3(b)のようなシステム構成図を得ることが出来る。もちろん、ノード i 及び j も一つのユニットである。さて、各ユニットに定常な交通量 Q_{ij} および Q_{ji} が両方向に流れているとき、任意のユニット k の定常アベイラビリティ A_k は式(11)より、

$$A_k = \frac{\mu_k}{\lambda_k + \mu_k} = \frac{1}{1 + \rho_k} \quad \dots(12)$$

但し、 $\rho_k = \lambda_k / \mu_k$ は故障・保全率比で与えられる。全ての n 個のユニットについて故障をしていない状態を $[0]$ 、第 k 番目のユニットが故障している状態を $[k]$ とする。あるユニットが故障を発生すると、最寄りの処理基地から処理船が出動し、他の処理基地からの応援がないものとする、故障の修理窓口は常に一つでよく、当該故障ユニットの保全度を μ_k とすると、状態の推移は図3(c)のようになる。これを参考にして、定常状態における P_0 を求めると、次式のようなになる。

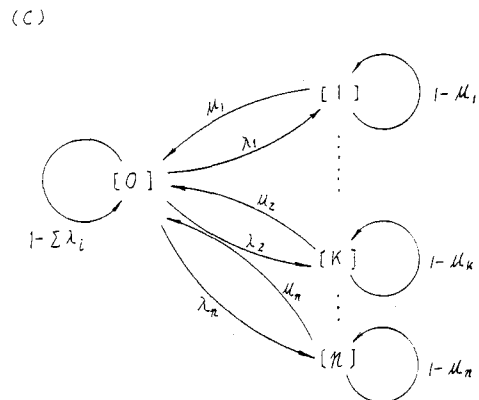
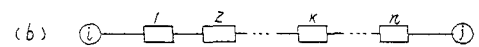
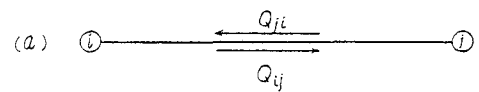


図3 直列航路、直列システムの状態推移

$$P_{00} = \frac{1}{1 + \rho_s(n)} = A_s(n) \quad \dots(13)$$

但し、

$$\rho_s(n) = \sum_{k=1}^n \rho_k = \sum_{k=1}^n \frac{\mu_k}{\lambda_k + \mu_k} \quad \dots(14)$$

式(13)は、あたかも $\rho_s(n)$ を持つユニットのアベイラビリティと解釈したものと同じである。式(12)、(13)、(14)から、

$$A_s(n) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^n \{(1-A_k)/A_k\}} \quad \dots(15)$$

となり、ユニットアベイラビリティ A_k と直線航路のアベイラビリティ $A_s(n)$ の関係が得られる。

(2) 並列航路のアベイラビリティ

図4(a)のような並列航路について考える。この場合ノード①、②は合流、分岐ノードとなり、システム構成は図(b)のようになる。ノード①と②を結ぶリンクはそれぞれ直列システムであるので、(1)で述べたように $\rho_s(n_1)$ 、 $\rho_s(n_2)$ なる故障・保全率比を持つユニットと考えれば図(c)のようなシステムに置き換えることが出来る。従って、結局、故障・保全率比が $\rho_s(n_1)$ 、 $\rho_s(n_2)$ なるユニットの並列システムとして取り扱えば十分である。また、このシステムで一方のユニットの修理中に他方の故障を放置しておくことは現実的には有り得ないので、故障が同時に起こった場合はそれぞれ別々に同時に修理出来るものとする。このとき状態の推移図は(d)のようになるので、(M/M/m)(mは並列個数)の待ち行列問題と等価になる。二つのユニットについて動作状態を[0]、故障状態を[1]とすると、定常状態での状態確率は次式のようになる。

$$\begin{aligned} P_{00} &= \frac{1}{1 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_1 \rho_2} \\ P_{10} &= \frac{\rho_1}{1 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_1 \rho_2} \\ P_{01} &= \frac{\rho_2}{1 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_1 \rho_2} \\ P_{11} &= \frac{\rho_1 \rho_2}{1 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_1 \rho_2} \end{aligned} \quad \dots(16)$$

但し、 $\rho_1 = \rho_s(n_1)$ 、 $\rho_2 = \rho_s(n_2)$

これより、明らかに、並列航路のアベイラビリティ $A_P(n_1, n_2)$ は

$$\begin{aligned} A_P(n_1, n_2) &= P_{00} + P_{10} + P_{01} \\ &= \frac{1 + \rho_1 + \rho_2}{1 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_1 \rho_2} \quad \dots(17) \end{aligned}$$

式(17)において、並列システムの見かけの故障・保全率比 $\rho_P(n_1, n_2)$ を

$$\rho_P(n_1, n_2) = \frac{\rho_s(n_1) \rho_s(n_2)}{1 + \rho_s(n_1) + \rho_s(n_2)} \quad \dots(18)$$

と定義すると、 $A_P(n_1, n_2)$ は

$$A_P(n_1, n_2) = \frac{1}{1 + \rho_P(n_1, n_2)} \quad \dots(19)$$

となり、見かけ上の故障・保全率比が $\rho_P(n_1, n_2)$ であるようなユニットのアベイラビリティと等価になる。

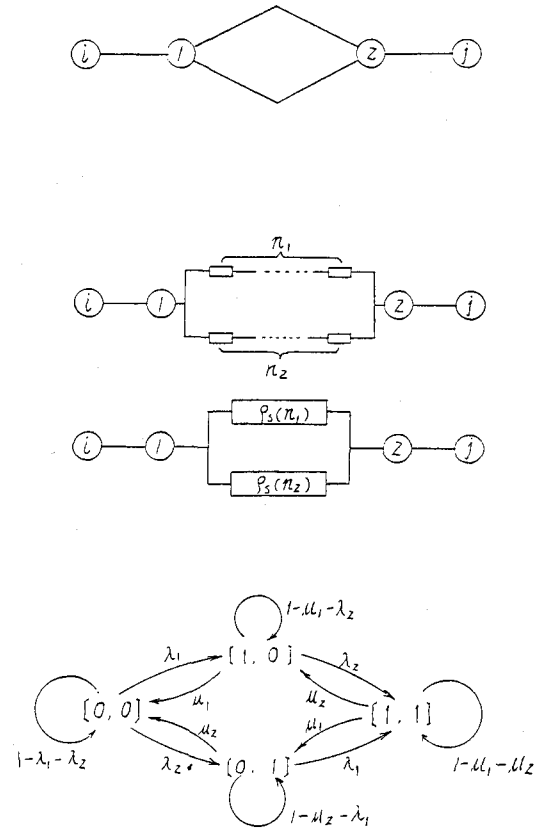


図4 並列航路、並列システムの状態推移

一般並列航路についてのアベイラビリティは上述の方法を適用して次のような結果を得ることができる。

$$A_P(n_1, n_2, \dots, n_m) = \frac{\prod_{i=1}^m [1 + \rho(n_i)] - \prod_{i=1}^m \rho(n_i)}{\prod_{i=1}^m [1 + \rho(n_i)]} \quad \dots(20)$$

但し、 $\rho(n_i)$ は n_i 個のユニットからなる直列システムの故障・保全率比である。

(3) OD航路別のアベイラビリティ

OD航路のアベイラビリティは基本的には直列航路のアベイラビリティ $A_s(n)$ と並列航路のアベイラビリティ $A_P(n_1, n_2, \dots, n_m)$ との直列連結システムのアベイラビリティとして求めることが出来る。この場合ノード i とノード j のODアベイラビリティ A_{ij} は

$$A_{ij} = \prod_{k=1}^s A_s^k(n_k) \prod_{m=1}^p A_P^m(n_1, n_2, \dots, n_m) \quad \dots(21)$$

但し、直列航路部は s 個あり、第 k 番目の直列航路は n_k 個のユニットからなるとする。また、並列航路は p 個含まれており、第 m 番目の並列航路では m 重並列となっているものとする。

当然のことであるが、 A_{ij} と A_{ji} は一般に Q_{ij} と Q_{ji} が異なるので一致はしない。また、OD航路の一部に一方通行航路が含まれている場合も同様である。

(4) 航路ネットワークのアベイラビリティ

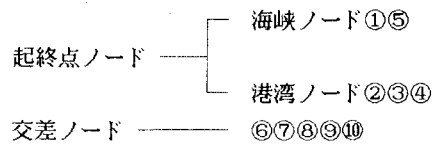
航路網全体のアベイラビリティはここではシステムアベイラビリティ A と呼ぶことにする。さて、通常の装置と異なり、航路はOD別に整備されて、全体としてのネットワークを構成しているので、「航路ネットワークのアベイラビリティ」は別の観点から定義しておく必要がある。即ち、OD航路が一つでも機能しておればネットワーク全体としての全ての機能が停止したことにはならない。そこで、ネットワーク全体を眺めるときに、ODトリップを完結したいと欲求する全ての交通需要 $Q = \sum \sum Q_{ij}$ が定常的にその目的を何割が達成できるかという観点がある。この観点から、システムのアベイラビリティ A は全交通量に対するOD別に目的を達成出来る需要量の比として次式のように定義する事が出来る。

$$A = \frac{\sum \sum A_{ij} Q_{ij}}{\sum \sum Q_{ij}} \quad \dots(22)$$

5. 大阪湾内航路網での数値計算による検討

(1) 航路ネットワークの形状

大阪湾内の海上交通は漁船等を除くとほぼ決められた航路を航行しており将来的には航路網形状を検討して定められた航路上を航行するよう義務付けることも現在検討されている。現状の航路はほぼ図5のようである。この航路網図において、各ノードは以下のような機能を持っている。



また、図中●印は、事故処理船が待機している処理船基地である。図5の座標系における各ノード及び修理基地の座標は表1および表2に示す。

表1 ノードの位置座標

番号 No	分類	座 標	
		X	Y
①	起 終 点	0. 0	0. 0
②	起 終 点	32. 00	15. 73
③	起 終 点	32. 40	31. 00
④	起 終 点	22. 2	34. 67
⑤	起 終 点	9. 17	28. 90
⑥	交 差 点	23. 30	22. 00
⑦	交 差 点	26. 80	26. 50
⑧	交 差 点	24. 50	30. 60
⑨	交 差 点	19. 10	30. 30
⑩	交 差 点	15. 70	25. 03

表2 修理基地の位置座標

修 理 基 地	座 標	
	X	Y
修 理 基 地 1	37. 50	33. 30
修 理 基 地 2	19. 50	40. 00

(2) OD交通量、配分交通量及び航路条件

図5の航路について各OD交通量(全船型)及び船型別交通量は一括して表3に示す。これは、OTS21委員会報告書³⁾にもとずいて作成した。現在の配分交通量については紙数の関係上省略するが、あるリンクまたはノードで事故が発生し処理待ちが生じる場合は他の利用出来るリンクがある場合はその内最短経路を通行するとして配分した。

航路の幾何学的条件の詳細も紙数の関係上省略するが、航路幅はすべて2(km)である。

(3) 事故モデルについて

考えた事故形態は統計上6割以上を占めている衝突事故のみをとりあげた。事故率算定モデルは過去の研究によるもの^{1), 4)}の外は新しくモデルを開発した⁵⁾が紙数の都合上ここで述べることは出来ないので割愛する。船型対別の事故処理時間は表4のように想定した。

(4) 計算結果について

計算は各ノード、リンクを分割したユニット毎に λ 、 μ を求め、これを用いてリンク別、OD別にア

ベイラビリティを算定し最後に大阪湾の航路ネットワークについてのアベイラビリティを求めた。

紙数の関係から全ての結果を示すことが出来ないのが残念であるがOD別のアベイラビリティの算定結果のみを表5に示す。

この表から解るように、①-③、③-①、①-④及び④-①のODが他のODに比較してアベイラビリティが低い。即ち、現在の大阪湾内では、大阪-友ヶ島ルートが湾内航路の内最も信頼度が低い。その原因は神戸-友ヶ島、芦屋・尼崎-友ヶ島、大阪-友ヶ島と大阪、神戸の2大港及び湾奥各港と友ヶ

表3 OD別交通量

(a) 起終点別の総交通量 (隻/時)

OD	①	②	③	④	⑤
①	—	4.0	8.0	7.0	6.0
②	4.0	—	1.0	1.0	7.0
③	7.0	1.0	—	3.0	10.0
④	7.0	1.0	3.0	—	10.0
⑤	6.0	7.0	8.0	10.0	—

(b) 起終点別的大型船交通量 (隻/時)

OD	①	②	③	④	⑤
①	—	0.8	1.6	1.4	1.2
②	0.8	—	0.2	0.2	1.4
③	1.4	0.2	—	0.6	2.0
④	1.4	0.2	0.6	—	2.0
⑤	1.2	1.4	1.6	2.0	—

(c) 起終点別の中型船交通量 (隻/時)

OD	①	②	③	④	⑤
①	—	1.2	2.4	2.1	1.8
②	1.2	—	0.3	0.3	2.1
③	2.1	0.3	—	0.9	3.0
④	2.1	0.3	0.9	—	3.0
⑤	1.8	2.1	2.4	3.0	—

(d) 起終点別の小型船交通量 (隻/時)

OD	①	②	③	④	⑤
①	—	2.0	4.0	3.5	3.0
②	2.0	—	0.5	0.5	3.5
③	3.5	0.5	—	1.5	5.0
④	3.5	0.5	1.5	—	5.0
⑤	3.0	3.5	4.0	5.0	—

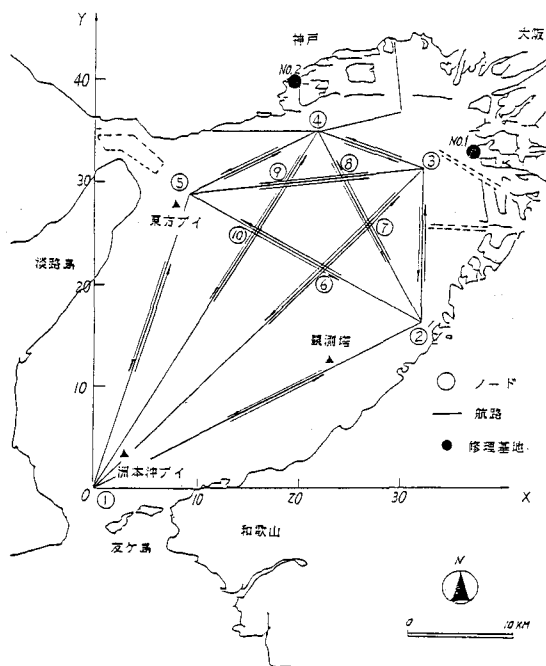


図5 大阪湾内航路ネットワーク

島を結ぶ交通量が最も多く事故の危険性が高いと同時に事故処理基地までの距離が遠いからである。従って、友ヶ島付近に事故処理基地を設定することはアベイラビリティ改善に効果があることが推定できる。

さて、表5を基に大阪湾全体の航路ネットワークのアベイラビリティを式(22)に基づいて求めると、 $A=0.979$ を得た。この値は他の湾域、例えば、東京湾、伊勢湾等の値と比較して見ないと一概には言えないが、通常の機械装置や、橋梁構造物等のシステムの破壊確率のオーダー(10^{-5} ~ 10^{-7})に比較すると $1-A=0.021$ と極めて高く、航路機能が損なわれる状態が高い確率であることが解る。

6. おわりに

本研究は最近特に大阪湾、東京湾、伊勢湾等の広域湾内の海上交通の危険性が叫ばれるようになった実態を何とか数量的に表現する方法がないかと云う狙いから始められたものである。東京湾と大阪湾のどちらがより危険かといった比較には本研究の成果がそのまま適用出来るとともに、単なる事故率ではなくアベイラビリティの概念を導入したことにより、湾全体の航路網のどの部分を重点的に改良すべきか、事故処理の基地や能力を何処にどれだけ保持すれば良いかといった疑問に答えるために本研究の成果は応用できる。

紙数の都合で多くの示唆に富んだ結果が得られているにも拘らずそれらについて触れる事が出来なかった。別の機会にその全容を発表する予定であるがそれらは、①広域海上交通ネットワークを分析する上で基礎となる航路ユニットの同定、②分岐、合流航路部での衝突確率の推定モデル、③リンク長とアベイラビリティの関係、④リンク容量(航路幅/交通量)とアベイラビリティの関係、⑤保全率と事故処理能力、処理基地までの距離との関係、⑥冗長リンクのアベイラビリティへの影響度、等である。

参考文献

- 1) 黒田勝彦・喜多秀行：土木学会論文報告集 No. 339、1984
- 2) 黒田勝彦他：第8回土木計画学研究・講演集、

1986

- 3) 神戸海難防止協会：OTS21調査報告書(その1)、1985
- 4) 黒田勝彦・喜多秀行：第5回土木計画学研究・講演集、1983
- 5) 王 能勇：京都大学修士学位論文、1987

表4 想定事故処理時間

船型別	大型船	中型船	小型船	事故処理船速度
大型船	12.0	10.0	8.0	18km/hr ≒11ノット
中型船	10.0	8.0	6.0	
小型船	8.0	6.0	4.0	

表5 OD航路別アベイラビリティ

OD	①	②	③	④	⑤
①		0.994905 (4)	0.962433 (8)	0.964371 (7)	0.989612 (6)
②	0.994905 (4)		0.999953 (1)	0.993253 (1)	0.971773 (7)
③	0.968709 (7)	0.999953 (1)		0.999223 (3)	0.966840 (10)
④	0.964371 (7)	0.993253 (1)	0.999223 (3)		0.987863 (10)
⑤	0.989612 (6)	0.971773 (7)	0.974062 (8)	0.987863 (10)	

() 内はOD交通量である。