

海難事故件数の統計モデルと巡視船の配備運用の最適化に関する研究

西本 和博

(埼玉大学大学院政策科学研究科 現所属：海上保安庁)

指導教官 大山達雄教授

1. 研究の目的

海上で発生する海難事故は年間2,500件から3,000件に及び、これらは人の生命又は財産に直接結びつくものであることから、海上保安庁に対し迅速かつ的確な対応が求められる。一方で、大幅な人員の増員や巡視船艇・航空機の増強が望めない中、現状勢力でのより一層の効率的な配備・運用計画システムの構築により対応していく必要がある。本研究においては、先ず海難現象の発生メカニズムを解明するための海難統計データ分析を行い、次に海難救助における巡視船の最適配備及び最適運用計画システムを提案するための巡視船の配備・運用モデル分析を行う。

2. 海難発生の確率モデル分析

(1) 船舶規模の回帰モデル

船舶規模を x (トン)、一般海難件数を y (件数) とすると、これらの関係は以下の回帰モデルによって表される。

$$y = cx^{\lambda} \quad (x: 0 < x < 100; c, \lambda: \text{パラメータ})$$

上記モデル式の決定係数は0.771となり、パラメータ値は $\lambda = -0.828$ となる。 λ は船舶規模に対する一般海難件数の弾性値であるから、船舶規模が1%大きくなると一般海難件数は0.83%少なくなることを意味する。

(2) 距岸距離の回帰モデル

距岸を x (海里)、一般海難件数を y (件数) とすると、これらの関係は以下の回帰モデルによって表される。

$$y = cx^{\lambda} \quad (x: 0 \leq x < 1000; c, \lambda: \text{パラメータ})$$

上記モデル式の決定係数は0.945となり、パラメータ値は $\lambda = -1.08$ となる。 λ は距岸に対する一般海難件数の弾性値であるから、距岸が1%大きくなると一般海難件数は1.08%少なくなることを意味する。船舶種類別に回帰モデルを推計した結果、レジャー船は距岸20海里未満を中心とした沿海型、貨物船は距岸100海里未満を中心とした近海型、漁船は距岸1,000海里

未満を中心とした遠海型であるといえる。

(3) 風力階級のポアソンモデル

風力階級 $x (x \in \{0, 1, \dots, 10\})$ と一般海難件数 $f(x)$ の関係は以下のような密度関数を有するポアソンモデルによって表されることがわかる。

$$f(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad (\lambda > 0: \text{パラメータ})$$

各年の一般海難件数を用いて上記モデル式を推計すると、パラメータ値は $\lambda = 2.99$ となる。 λ はポアソン分布の平均であるから、風力階級3で一般海難が起りやすいことを意味する。船舶種類別にポアソンモデルを推計すると、 λ の値は旅客船(2.46) < 貨物船(2.88) < 漁船(2.92) < レジャー船(3.05) となり、漁船あるいはレジャー船といった比較的小型の船舶ほど風力の影響を受けやすいといえる。

(4) 海難発生時刻のマルコフモデル

海難発生時刻の船舶種類別シェア推移データを調べると、マルコフモデルによって説明できることがわかる。すなわち、0時から24時までの1時間毎の変化に対し、0時から6時までは安定(深夜安定期)し、6時から12時まではレジャー船の吸収率が増加(レジャー船吸収期)、12時から18時までは再び安定(昼間安定期)し、18時から24時までは漁船及び貨物船の吸収率が増加(漁船・貨物船吸収期)することが明らかとなる。

3. 巡視船の最適配備モデル分析

任意の対象海域で海難が発生した場合、「配備されたいずれかの巡視船が即応時間内に海難現場に到達することができる」という条件の下で巡視船の最小配備隻数を求めるモデルであり、海難救助システム構築のための基本モデルとなる。対象海域を147個の小海域に分割し、小海域全体を表す添字集合 $I = \{1, 2, \dots, 147\}$ を、PM型、PL型及びPLH型巡視船の配備海域を表す添字集合 $I_1 = \{1, 2, \dots, 65\}$ 、 $I_2 = \{66, 67, \dots, 101\}$ 及び $I_3 = \{102, 103, \dots, 147\}$ にそれぞれ分割する。また、

巡視船の船型を表す添字集合を $T = \{1, 2, 3\}$ とする。配備巡視船の小海域への到達可能性を表す係数 $a_{ij} (i \in I, j \in I)$ を次のように定義する。

$$a_{ij} = 1 \quad \text{小海域 } i \text{ に配備された巡視船が} \quad (1)$$

$$\text{即応時間内に小海域 } j \text{ に到達できる}$$

$$= 0 \quad \text{小海域 } i \text{ に配備された巡視船が}$$

$$\text{即応時間内に小海域 } j \text{ に到達できない}$$

(1) モデルの定式化

(変数)

$$x_i : 0-1 \text{ 型整数変数 } i \in I$$

$$x_i = 1 \quad \text{小海域 } i \text{ に巡視船を配備する}$$

$$= 0 \quad \text{小海域 } i \text{ に巡視船を配備しない}$$

(制約条件)

(a) 海難救助可能条件

$$\sum_{i \in I_1 \cup I_2} a_{ij} x_i \geq 1 \quad j \in I_1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I_2 \cup I_3} a_{ij} x_i \geq 1 \quad j \in I_2 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I_3} a_{ij} x_i \geq 1 \quad j \in I_3 \quad (4)$$

(b) 船型別保有隻数条件

$$\sum_{i \in I_t} x_i \leq F_t \quad t \in T \quad (5)$$

F_t : 巡視船の船型別保有隻数 $t \in T$

(目的関数)

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} x_i \quad (6)$$

(2) 数値結果と評価

モデル分析の結果、巡視船の最小配備隻数は 35 隻となる。式(5)で与えた巡視船の船型別保有隻数とモデル分析の結果得られた船型別配備隻数とを比較すると、PLH 型巡視船保有隻数 11 隻に対し配備隻数 10 隻となり、巡視船を維持するために必要な整備あるいは乗組員の休養といった現実の制約を考慮すると PLH 型巡視船の運航が困難となる。そこで船型別保有隻数条件に、現実の制約を考慮した巡視船基本配備体制に示される船型別配備隻数を与えてモデル分析を行うと、総配備隻数では 3 隻増加するものの、現実の制約を満足する最小配備隻数を獲得することができる。

4. 巡視船の最適運用モデル分析

一定の配備隻数上限値に対して、「巡視船をどの小海域に配備し、いずれの小海域を管轄させれば、海難救助における巡視船の効率的運用を図ることができる

か」を目的とし、配備巡視船が管轄する小海域内の要救助海難件数と配備海域から海難発生海域までの距離との積和（総運用距離）を最小化するモデルである。

(1) モデルの定式化

(変数)

$$x_i : \text{巡視船の最適配備モデルと同じ}$$

$$z_{ij} : 0-1 \text{ 型整数変数 } i \in I, j \in I, i \neq j$$

$$z_{ij} = 1 \quad \text{小海域 } i \text{ に配備された巡視船は}$$

$$\text{小海域 } j \text{ を管轄する}$$

$$= 0 \quad \text{小海域 } i \text{ に配備された巡視船は}$$

$$\text{小海域 } j \text{ を管轄しない}$$

(パラメータ)

G_t : 巡視船の船型別配備隻数上限値パラメータ
 $t \in T$

(制約条件)

(a) 海難救助可能条件

$$x_j + \sum_{i \in I_1 \cup I_2} a_{ij} z_{ij} \geq 1 \quad j \in I_1, i \neq j \quad (7)$$

$$x_j + \sum_{i \in I_2 \cup I_3} a_{ij} z_{ij} \geq 1 \quad j \in I_2, i \neq j \quad (8)$$

$$x_j + \sum_{i \in I_3} a_{ij} z_{ij} \geq 1 \quad j \in I_3, i \neq j \quad (9)$$

(b) 海難救助容量条件

$$c_i x_i + \sum_{j \in I} c_j z_{ij} \leq R_i \quad i \in I, i \neq j \quad (10)$$

c_i : 小海域 i 内の要救助海難件数 $i \in I$

R_i : 小海域 i に配備された巡視船の
海難救助容量 $i \in I$

(c) 小海域管轄可能条件

$$x_i \geq z_{ij} \quad i \in I, j \in I, i \neq j \quad (11)$$

(d) 船型別配備隻数条件

$$\sum_{i \in I_t} x_i \leq G_t \quad t \in T \quad (12)$$

(目的関数)

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} c_j d_{ij} z_{ij} \quad (13)$$

d_{ij} : 小海域 i, j 間の距離 $i \in I, j \in I, i \neq j$

(2) 数値結果とパラメトリック分析

総配備隻数 38 隻の場合における船型別配備隻数条件 (式(12)) の下での巡視船の最適配備位置及び管轄領域を求める。

式(12)において、巡視船の船型別配備隻数を最小配備隻数 38 隻から巡視船基本配備体制での最大配備隻数 48 隻まで変化させ総運用距離の変化をみると、巡視船

の配備隻数の増加に伴い総運用距離は減少する。実際に巡視船が海難救助業務を行う際に求められることは、いかに早く海難発生地点に到達することができるかであり、総運用距離を小さくすることが課題となる。総運用距離の変化率をみると、配備隻数が一隻増加するときの総運用距離の減少率には幅があるが、配備隻数が39隻から40隻に増加する場合、PL型及びPLH型巡視船における構造上の変化が総運用距離の減少率に大きく影響するため、総運用距離の減少率が大きくなる。

変数、パラメータ及び制約条件は巡視船の最適運用モデルと同様とし、目的関数はパラメータを乗じた巡視船の総配備隻数と巡視船の総配備隻数に対する総運用距離の和を最小化する。

(目的関数)

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} Mx_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} c_{ij} d_{ij} z_{ij} \quad (14)$$

M : 件・距離に相当する量パラメータ

パラメータ M の値を変化させ、巡視船の配備隻数の変化をみると、 M の値が大きくなるに従って配備隻数は減少する。配備隻数が38隻から48隻までの平均的な総運用距離に対して $16,000 \leq M \leq 40,000$ となり、このときの配備隻数は41隻もしくは42隻となる。船型別巡視船1隻当たりの平均業務負荷量及び平均移動距離の積を求め、これに船型別巡視船配備隻数を乗ずることにより求まる平均運用距離を考える。総運用距離曲線が巡視船の配備隻数に対する海難救助業務の効率性を示すものであるとすれば、平均運用距離曲線は巡視船の配備隻数に対して海難救助業務を遂行する場合にかかる平均的な負荷量を示すものであると考えら

れる。両曲線の交差する点における配備隻数41隻もしくは42隻を巡視船の最適運用システムにおける最適配備隻数とみなすことができる。

5. 今後の課題

巡視船の遂行する業務を海難救助業務に限定して、巡視船の最適配備及び最適運用計画システムの提案を行ったが、現実には巡視船は海難救助業務以外にも領海警備、海上交通取締り等さまざまな業務を遂行しているため、これらの業務を総合的に取り扱ったシステムの提案、あるいはまた、本分析より詳細に海難発生件数を季節単位、月単位に考慮した場合のモデル分析等が今後の課題である。

参考文献

- [1] 大山達雄, 1993.『最適化モデル分析』日科技連.
- [2] Betta, R. and N.R. Mannur, 1990. "Covering - location models for emergency situations that require multiple response units", *Management Science*, Vol.36, No.1, pp.16-23.
- [3] Revelle, C. 1989. "Review, extension and prediction and emergency service siting models", *European Journal of Operational Research*, Vol. 40, pp. 58-69.

お詫びと訂正

11号掲載の森平爽一郎氏「モンテカルロ法によるオプション価格決定」に以下の誤りがありましたので、お詫びして訂正します。

618ページ 右段上から11行目から17行目にかけて $varepsilon_j$ が3回現れますが、これらはすべて ϵ_j の誤りです。また式(6.1)の最後にある e_j は ϵ_j の誤りです。

11号掲載の「私のORライフ」の著者國澤清典氏の紹介として、「くにさわ きよのり 東京工業大学名誉教授」が印刷されていませんでしたので、追加訂正いたします。

査読者へのお礼

今年度のOR誌の論文・研究レポート、論文・事例研究、論文・総合報告の査読を次の方々をお願い致しました。

ご協力いただきましてありがとうございました。この場を借りて厚くお礼を申し上げます。

(機関誌編集委員会)

上田 徹, 大野高裕, 大山達雄, 忍田和良, 片岡靖詞, 葛山康典, 腰塚武志, 猿渡康文, 篠原正明, 清水康司, 末吉俊幸, 住田友文, 高橋幸雄, 玉置 久, 刀根 薫, 枇々木規雄, 平瀬敬太, 降旗勝夫, 森戸晋, 森 雅夫, 矢田 健, 柳井 浩, 柳沢 滋, 八卷直一, 山田善靖, 吉田万貴子 (敬称略)