

(昭和 52 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

旅客の脱出流動数学モデルによる 船舶脱出システムの評価

正員 田 口 賢 士* 正員 室 津 義 定*
正員 外 山 嵩* 正員 岸 光 男**

Evaluation of Ship Escape System Using Mathematical Model on
Escape of Passengers on Board

by Katashi Taguchi, *Member* Yoshisada Murotsu, *Member*
Takashi Toyama, *Member* Mitsuo Kishi, *Member*

Summary

This paper is concerned with the evaluation of the escape system in the ship. The escape system is modeled by a combination of several basic elements and represented with a network graph. Mathematical models of the crowd flows in and between the basic elements are constructed using fluid flow analogy, and their parameters are determined from the experimental data. A method is presented to quantitatively analyze the escape of passengers and to design an optimum escape system of the ship. The proposed method is applied to the evaluation and optimization of the escape system of the actual car ferry and its applicability is demonstrated.

1 緒 言

船舶に浸水あるいは火災などの非常事態が発生した場合、乗船者は客室その他の居住区から、一群の出入口、廊下、階段等の脱出設備（以下単に脱出設備という）によって乗艇甲板まで脱出し、しかる後、救命艇等の救命設備を用いるという手順を経て、はじめて安全に船外に退避することができる。旅客船やフェリーにおいては、旅客は多数の組織されない老若男女によって構成され、しかも、非常事態が発生した場合、それはパニック状態に陥った群集となって避難を開始するわけであるから、旅客を船内居住区から乗艇甲板へ、如何に迅速に、しかも、円滑に移動させるかが、以後の脱出作業に決定的な影響を及ぼすものといえよう。したがって、この居住区から乗艇甲板に至る避難経路を構成する脱出設備の構造、配置はきわめて重要な意義を有し、非常事態での群集移動を考慮した最適な設計が要求される。

非常事態での群集の移動に関しては、すでに、建築物内とか市街地の一部分を対象として、いくつかの基本モデルが提案されており、それらは、群集の移動を流体的

に説明する方法^{1),2),3),4),5)}と、個々の人間を粒子として捉えこれを追う方法とに分けられる^{6),7)}。しかしながら、群集の脱出流動を、脱出システムの構成要素の特性と関連づけて、システム全体としてこれを評価するシステム工学的研究は少ない^{2),3),5),13)}。

船舶における脱出設備に関する研究は、これまでに、出入口あるいは階段等脱出設備の要素に関連して、群集流の挙動の観測とかモデルによる群集流動の研究が発表されている^{8),9),10),11)}。これらの研究は脱出における群集流の滞流および閉塞現象の説明を試みているが、船舶の居住設備と脱出設備を包含する総合的な脱出システムの評価を行うには到っていない。

本研究は、船舶における脱出システムを、その脱出機能特性によって分類される数個の基本要素によってモデル化し、脱出システムの構造把握と脱出経路の明確化のためにネットワーク・グラフ表示法を与え、さらに、基本要素および基本要素間の群集流動の流体数学モデルを構築し、脱出システムにおける群集流動を定量的に解析することにより、脱出システムの総合評価と最適化の方法を提案し、これを実船の脱出システムに適用することによりその有用性を検討するものである。

* 大阪府立大学工学部

** 大阪府立大学大学院

2 脱出システムの構造と

ネットワーク・グラフによる表現

2.1 脱出システムの基本要素

船舶の脱出システムは、群集発生場所、通路、階段、出入口および避難場所の各基本要素によって構成されるものとし、各基本要素の定義およびその脱出機能特性を次のように表わす。

(1) 群集発生場所

群集発生場所は、客室、食堂、喫煙室、娛樂室等の旅客居住区画とし、区画内の初期旅客数によってその特性を表わす。

(2) 通路

本論文では水平通路のみを考えることとし、群集発生場所内を貫通する通路、出入口室、階段に設けられる踊場も通路として扱い、同一幅の通路をもって1つの通路とする。また、通路が屈折している場合、屈折部の角度や曲率の程度によっては、群集流動に少なからぬ影響を与えるものと思われるが、システムの記述を簡単にするためにこれを見せし、屈折部においても通路幅に変化がない限り1つの通路として扱う。したがって、1つの通路の特性は通路長さと通路幅によって表わす。

(3) 階段

螺旋階段等の曲った階段は考慮せず、直線状の階段のみを考える。中間に踊場を有する階段は1 flightを1つの階段として扱う。階段の特性は階段の水平長さ、幅および傾斜角度によって表わす。

(4) 出入口

群集発生場所等の区画および脱出経路上に設けられる出入口を考え、その特性は出入口幅またはドアを設ける場合にはドア開放時のクリア幅とし、シルを設ける場合にはシル高さも出入口特性に加える。

(5) 避難場所

避難場所は救命艇の乗艇甲板あるいは救命いかだへの乗込装置を備える脱出甲板とする。避難場所への群集流入は最終出入口の特性にのみ依存し、流入後は速やかに拡散すると考え、避難場所自体の特性は考慮しない。

なお、通路および階段は後述するように、群集流動の数学モデルが類似となるので、両者を通路区画と総称することとする。また、後述するネットワーク・グラフに示される通路と通路および通路と階段の接続点については、接続点の形状（接続角度および屈折部の曲率など）の群集流動に与える影響は無視できない^{(8), (10), (11)}ものと思われるが、システムの記述を簡単にするためにその形状影響を考慮しないこととする。したがって、接続点は基本要素に加えず、群集流動モデルにおいて、接続点での群集の流入流出の関係を記述するに止める。

2.2 脱出システムのネットワーク・グラフ表現

脱出システムの構造の把握を容易にし、脱出経路の表現を明確にするために、脱出システムを前述の基本要素の組合せによるネットワーク・グラフによって表わす。ネットワーク・グラフ上での各基本要素および接続点はTable 1に示すようにシンボル化して表現する。

Table 1 Graphic symbols

Elements	Characteristics	Graphic symbols
Source	initial No. of passengers N_s	
Passage	length l_p width b_p	
Passage through source	length l_p width b_p	
Stairway	horiz. length l_{st} width b_{st} inclination θ	
Junction		
Doorway	width b_D	
Doorway with sill	width b_D sill height h	
Destination		

3 群集流動の数学モデルとそのパラメータ

この章では群集の移動を流体的に捉えることにより、基本要素および基本要素間の群集流動の流体数学モデルを構築し、そのパラメータを実験結果を基に推定する。

3.1 基本要素での群集流動数学モデル

(1) 通路区画における群集流動の数学モデル

通路および階段(通路区画)における群集密度と群集流動速度および群集流動数の関係を概念的に示せば Fig. 1 および Fig. 2 のようになる⁴⁾。図において群集流動速度

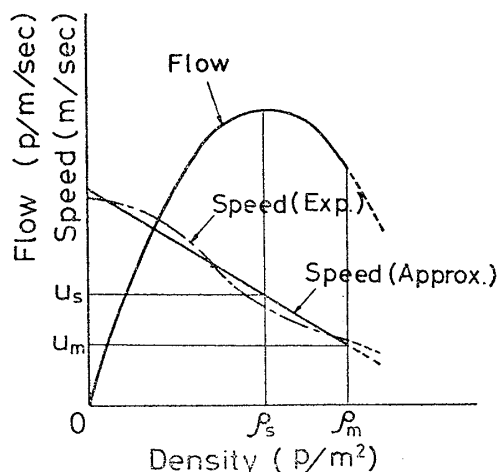


Fig. 1 Characteristics of crowd flow on the passage

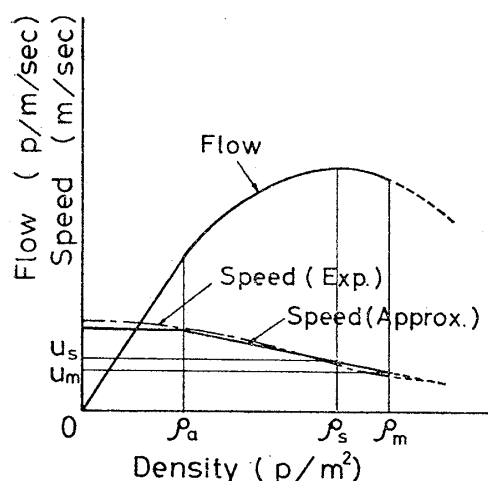


Fig. 2 Characteristics of crowd flow on the stairway

は群集密度の増大に伴って低下するが、群集密度がある値に達すると、群集流が非圧縮性を示すことにより、もはや群集密度は増大することなく、この値で許容最大群集密度 ρ_m となり、群集流は渋滞現象を生じ渋滞群集流動速度 u_m で流動するものとする。

通路区画における群集密度と群集流動速度の関係を従来の実測データ⁴⁾に基づいてモデル化すると、通路に対しては直線近似により

$$u(\rho) = a - b\rho \quad (1)$$

を得る。ここに、 u : 群集流動速度 (m/sec), a, b : 定数, ρ : 群集密度 (人/m²) である。いま、単位時間当りの群集流動数が最大となる群集密度を ρ_s とすれば、 $\rho_s = a/2b$ である。

次に階段における群集流動速度は、階段傾斜角 $40^\circ \sim 60^\circ$ においては階段傾斜角に無関係と見なされることから^{4),9)}、通路の場合と同様に群集密度のみの関数として表わすことができ、群集流動速度の垂直成分 u_v を実測結果から折線近似し、水平分速度 u_h を垂直分速度の余切で表わすと、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} u_v(\rho) &= \text{const.} : 0 < \rho \leq \rho_a \\ u_v(\rho) &= d - e\rho : \rho_a < \rho \leq \rho_m \\ u_h(\rho) &= u_v(\rho) / \tan \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 ρ_a : 折点群集密度 (人/m²), ρ_m : 許容最大群集密度 (人/m²), d, e : 定数, θ : 階段傾斜角 (度) である。単位時間当りの群集流動数が最大となる群集密度を ρ_s とすれば $\rho_s = d/2e$ となる。

(2) その他の要素の数学モデル

群集流が流出する群集発生場所および流入する避難場所については、計算の便宜上次のような仮定を設ける。

群集発生場所から通路区画へ流出する群集流動数は時間的に変化せず、常に許容最大群集密度 ρ_m をもって流出し、流出群集数は群集発生場所の出口幅に支配され

る。また避難場所への流入群集数は避難場所に直結する通路区画または避難場所の出入口の特性に支配されるが、避難場所への流入後の群集の渋滞はまったくないものとする。

出入口にシルが設けられている場合の群集流動数は、種々のシル高さを有する出入口について行なわれた脱出実験結果⁹⁾を用いて、シル高さに応じた係数を導入し、これをシルのない場合の群集流動数に乗ずることによって求める。

3.2 通路区画間の群集流動数学モデル

Fig. 3 のように、通路区画 P_j の上流側 (群集発生場所側を上流、避難場所側を下流と呼ぶ) に通路区画 P_i ($i=1, 2, \dots, l$) が接続されている場合の群集流動の取扱いについて述べる。通路区画 P_i ($i=1, 2, \dots, l$) から通路区画 P_j へ流入する群集数を単位時間当り $\mu_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, l$) とし、通路区画 P_j から流出する群集数を単位時間当り $\mu_j(t)$ とする。また、時刻 t における通路区画 P_j の群集密度を $\rho_j(t)$ とする。このとき、時刻 $t + \Delta t$ における通路区画 P_j の群集密度 $\rho_j(t + \Delta t)$ は、群集数が保存されることから、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \rho_j(t + \Delta t) &= \rho_j(t) + \frac{1}{A_j} \left[\sum_{i=1}^l \mu_i(t) - \mu_j(t) \right] \Delta t \\ &= \rho_j(t) + \frac{1}{A_j} [\zeta_j(t) - \mu_j(t)] \Delta t \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{ただし, } \zeta_j(t) = \sum_{i=1}^l \mu_i(t) \quad (\text{人/sec})$$

$$A_j = b_j l_j : \text{通路区画 } P_j \text{ の面積 (m}^2\text{)}$$

$$b_j : \text{通路区画 } P_j \text{ の幅 (m)}$$

$$l_j : \text{通路区画 } P_j \text{ の長さ (m)}$$

いま、通路区画 P_i ($i=1, 2, \dots, l$) の群集密度を $\rho_i(t)$ とすると、下流の通路区画 P_j との接続関係を考えない P_i における単位時間当りの群集流動数 $\omega_i(t)$ は、式(1)または(2)より、次のようになる。

$$\omega_i(t) = b_i \rho_i(t) u_i(\rho_i(t)) \quad (4)$$

$$\text{ただし, } b_i : \text{通路区画 } P_i \text{ の幅 (m).}$$

ここで、式(4)で与えられる群集流動数を P_j へ流

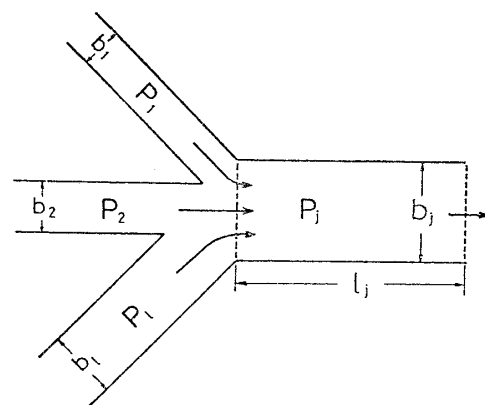


Fig. 3 Crowd flow at the junction of passages

入する通路区画 $P_i (i=1, 2, \dots, l)$ に対して総和をとると次のようになる。

$$\xi_j(t) = \sum_{i=1}^l \omega_i(t) \quad (5)$$

式(5)で与えられる $\xi_j(t)$ は、通路区画 P_j へ流入を希望する単位時間当りの群集数であると考えられるので、通路区画 P_j への流入希望群集数と呼ぶことにする。

一方、通路区画 P_j の幅 b_j を通して P_j へ流入可能な単位時間当りの最大群集数 η_j は第3.1節で述べた群集密度と群集流動速度との関係より、次のようになる。

$$\eta_j = b_j \rho_{js} u_j(\rho_{js}) \quad (6)$$

ただし、 ρ_{js} , $u_j(\rho_{js})$ は通路区画 P_j の群集流動数を最大にする群集密度とこれに対応する群集流動速度を表わす (Fig.1, Fig.2 参照)。通路区画 P_j への流入希望群集数は η_j よりも大きくなりえないので、 P_j への流入希望群集数 $\xi_j(t)$ が η_j より大きくなると、通路区画 P_j の入口付近で渋滞が発生して、流入群集数が急激に減少する。そして、通路区画 P_j の許容最大群集密度 ρ_{jm} とそれに対応する渋滞群集流動速度 u_{jm} で群集が通路区画 P_j へ流入するものとする。すなわち、通路区画 P_j への単位時間当りの流入希望群集数は次のように修正される。

$$\xi_j^*(t) = b_j \rho_{jm} u_{jm} \quad (7)$$

ここで、 $\xi_j^*(t)$ を修正流入希望群集数と呼ぶ。

次に、通路区画 P_j への流入可能群集数について考える。 P_j から流出する群集数は単位時間当り $\mu_j(t)$ であり、群集密度は $\rho_j(t)$ であるから、通路区画 P_j の許容最大群集密度を ρ_{jm} (Fig. 1, Fig. 2 参照) とすると、 P_j への単位時間当り流入可能群集数 $\varphi_j(t)$ は次のようになる。

$$\varphi_j(t) = \mu_j(t) + A_j [\rho_{jm} - \rho_j(t)] \quad (8)$$

通路区画 P_j へは単位時間当り $\varphi_j(t)$ 以上には流入しえないので、 $\varphi_j(t)$ と修正流入希望群集数 $\xi_j^*(t)$ とを比較することによって通路区画 P_j への流入群集数 $\zeta_j(t)$ を決定する。すなわち、

$$\zeta_j(t) = \varphi_j(t) \quad (\xi_j^*(t) \geq \varphi_j(t)) \\ = \xi_j^*(t) \quad (\xi_j^*(t) < \varphi_j(t)) \quad (9)$$

ここで、通路区画 P_j への流入希望群集数 $\xi_j(t)$ (式(5)) と実際の流入群集数 $\zeta_j(t)$ (式(9)) との比を渋滞係数 $K_j(t)$ と呼ぶことにし、次のように定義する。

$$K_j(t) = \zeta_j(t) / \xi_j(t) \quad (10)$$

通路区画 P_j の上流側に接続する各通路区画 $P_i (i=1, 2, \dots, l)$ から流入を希望する群集数を式(10)で与えられる渋滞係数 $K_j(t)$ にしたがって各通路区画 $P_i (i=1, 2, \dots, l)$ とも一様に減少させるとすると、通路区画 $P_i (i=1, 2, \dots, l)$ から通路区画 P_j への単位時間当り流入群集数 $\mu_i(t)$ は次のようになる。

$$\mu_i(t) = K_j(t) \omega_i(t) \quad (11)$$

脱出システムの群集流動の計算は、脱出システムを基本要素でモデル化し、その構成をもとに、初期条件として各通路区画の群集密度を与え、境界条件として群集発生場所の群集密度を与え、避難場所の渋滞係数を1として、避難場所から群集発生場所に向かって式(3)を逐次計算していくことによって実行される。

3.3 群集流動数学モデルのパラメータの推定

前節の群集流動の数学モデルを用いて実船の脱出システムの評価を行なうためには、数学モデルの群集流動速度に関するパラメータを決定する必要がある。

通路の群集流動速度モデル(式(1))における係数 a , b および許容最大群集密度 ρ_m は、従来行なわれた各種実験結果に大きな差がないので⁴⁾、これらの平均的な値をとって、

$$a=1.65, b=0.3, \rho_m=4.0 \text{ (人/m}^2\text{)} \quad (12)$$

とする。

階段の群集流動速度モデル(式(2))における係数 d , e および許容最大群集密度 ρ_m は、従来の実験結果にかなりの差が認められるため^{4),9)}、これらよりパラメータを推定することは困難である。そこで、日本海難防止協会の船舶設備委員会が実施した旅客船の脱出実験^{10),11)}における脱出経路および群集配置を第2章の方法でモデル化し、先に求めたパラメータ a , b および ρ_m を用い、また従来の実験値⁴⁾から階段の許容最大群集密度 ρ_m を6(人/m²)、折点群集密度 ρ_a を2(人/m²)と仮定して、群集流動の計算を行ない、脱出開始から完了までの脱出所要時間および脱出開始から最初の渋滞発生までの時間と渋滞解消までの時間を実験実験のそれと比較することによりパラメータ d , e を推定する。

実験実験の概要をTable 2に、実験実験と計算結果の比較をTable 3に示す。パラメータ d , e の3種の設定値に対する計算結果から、一般旅客群集の脱出流動に最も近いと思われる第2実験結果と良好な一致がみられるCase IIIの設定値 $d=0.75$, $e=0.075$ を推定値と定める。なお、この一組の値を用いた第3実験に対する計算では、脱出所要時間はよく一致するものの、実験において発生したと報告されている渋滞現象が計算では発生しないが、実験では和装婦人がシルの位置で渋滞したこと、通路が直角に屈折していること等を考慮すれば、計算による群集流がより円滑に流動することも許容されるであろう。

4 船舶の脱出システムの評価

この章では、前章までに与えたモデルを用いて、船舶の脱出システムを評価する方法について述べる。

対象船舶の脱出システムを、第2章の基本要素を用い

Table 2 Particulars of escape experiments on passenger ship^{10),11)}

実験次	回数	群衆の種類	脱出人員	階段巾	脱出経路上要所の巾	出口のシルハイト	脱出の種類	滞流発生した場所
第1実験	①	成年男子10才～50才(手荷物なし, オート着用あり)	48人	75cm (クリアー巾)	階段直上にコーミングを有する出口扉あり, 出口内外に1ステップが設けられている。 同上幅員108.5cm (クリアー巾)	コーミングは460H内外に約250Hのステップあり	後部2等室, 艀階段昇り口に頭初より約8人/m ² の密度の滞流をつくり, 階段脱出の有様を計測	階段昇り口広場(頭初より滞流をつくつた)
	②							
	③							
	④							
	⑤							
	⑥							
第2実験	①	老幼男女6才～65才(ホストバック, ハンドバックをもち救命胴衣なし)	115人	118cm	通路79cm 階段昇り口広場奥行130cmのところにスクリーンあり 階段直上第1実験に同じ	第1実験に同じ	2等室内所定の座席に履物をぬいて着座, 合図により自由に脱出, 手荷物あり, 家族連れあり, その有様を記録	階段昇り口広場及び階段附近通路
	②							
	③							
第3実験	①	女子10才～50才 洋装多し和装あり ハンドバックあり	37人	—	特2等室出口(クリアー)56cm 通路90cm 通路出口にコーミングを有する扉あり巾65cm	コーミングは230H内外に約120Hのステップあり	特2等3室より一斉に脱出開始, 通路にて合流の上, 曲り角を経て, 出口より脱出	各室内及び通路上出口附近

Table 3 Results of escape experiments and their calculations

Exp. No.	Results of escape experiments	Results of Calculations		
		Case I d=0.48, e=0.06	Case II d=0.64, e=0.07	Case III d=0.75, e=0.075
1	T ₁ = 30 T ₂ = 0 ~ 25	—	T ₁ = 53 T ₂ = 0 ~ 44	T ₁ = 44 T ₂ = 0 ~ 36
	T ₁ = 20 T ₂ = 0 ~ 14	—	T ₁ = 40 T ₂ = 0 ~ 28	T ₁ = 34 T ₂ = 0 ~ 24
2	T ₁ = 60 T ₂ = 10 ~ 40 (PS) = 10 ~ 50 (SS)	T ₁ = 160 T ₂ = 7 ~ 107 (PS) = 7 ~ 120 (SS)	T ₁ = 88 T ₂ = 10 ~ 68 (PS) = 12 ~ 60 (SS)	T ₁ = 67 T ₂ = 22 ~ 44 (PS) = 18 ~ 50 (SS)
3	T ₁ = 31 T ₂ = 15 ~ 31	—	—	T ₁ = 30 T ₂ = 0

T₁: Time required for escape of all passengers (sec)T₂: The first numeric signifies the time of initiation and the second that of termination, of saturation of crowd flow (sec).

てモデル化し, 第3章の群衆流動の数学モデルを用いると, 旅客の脱出開始から完了までの所要時間およびその間における脱出システム内の旅客分布の時間的变化など脱出システムにおける旅客の脱出流動を定量的に把握できる。また, 対象脱出システムとその代替設計との比較や感度解析, すなわち対象脱出システムの基本要素の諸元の変更が脱出流動に及ぼす影響の評価, などを行なうことができる。さらに, 設計変更が可能な基本要素については, 最適化手法¹²⁾を用いて指定されたルールや制約条件のもとに旅客の脱出所要時間を最小にするような最適な諸元を決定することとか, 指定された脱出所要時間を満足するように最適な脱出システムの構成を決めるこ

ともできる。

Fig.4 は, 指定されたルールや制約条件のもとに, 脱

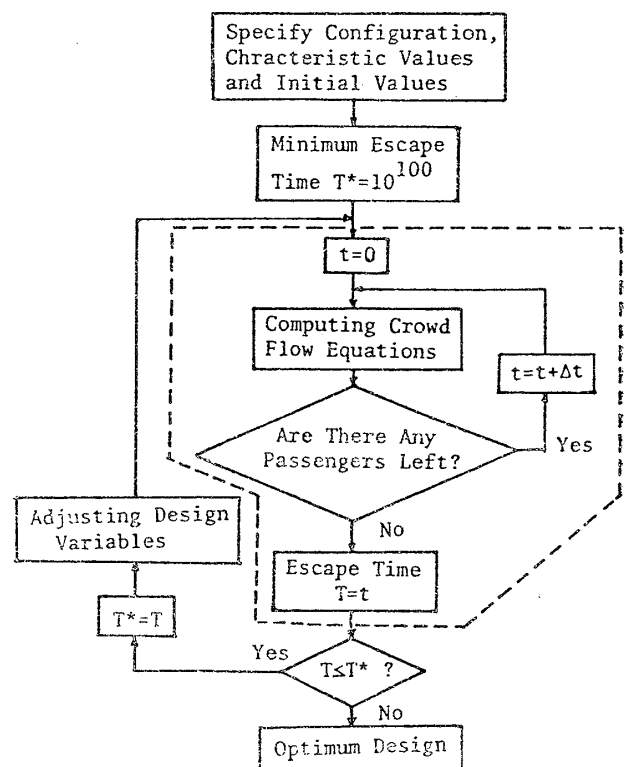


Fig. 4 Flow chart for evaluating and optimizing the ship escape system

出システムを最適化するための計算の1つの流れ図である。破線部分は指定された脱出システムの構成に対して旅客の脱出流動を計算するものであり、破線の外側の部分は最適化手法を用いて、脱出所要時間を最小にするよう基本要素の諸元を変更する計算を示している。なお、図中で、最小脱出所要時間の初期値を $T^*=10^{100}$ と記したのは十分大きい値を初期値として設定するということを意味する。

5 実船脱出システムへの適用

脱出システム評価に対するモデルの応用の一例として、実在船舶の脱出システムについての計算を示す。

対象船舶は Fig. 5 および Table 4 に示す一般配置および主要目を有するカーフェリーで、Fig. 6 に脱出システムのネットワーク・グラフを、Table 5 に基本要素の特性を示す。脱出システムは、Fig. 6 に見られるように、船体中央部 No. 6 客室で船体前半部および後半部の2つのシステムに分割し、船体後半部システムについては、端艇甲板への脱出に際して階段 ST_1 のみを使用する場合 (Case I) と階段 ST_1 , ST_4 , ST_5 を併用する場合 (Case II) の2通りの経路を考える。

5.1 脱出システムの評価

脱出システムの基本要素の1つである群集発生場所の特性を変化させた場合について、その影響を脱出開始から完了までの脱出所要時間の比較によって評価する。すなわち、群集発生場所の旅客数を Table 6 に示す3通りの分布について、また、出入口幅を Table 5 の基準値の75%, 50% および 25% に変化させた場合についてそれぞれ計算を行なう。

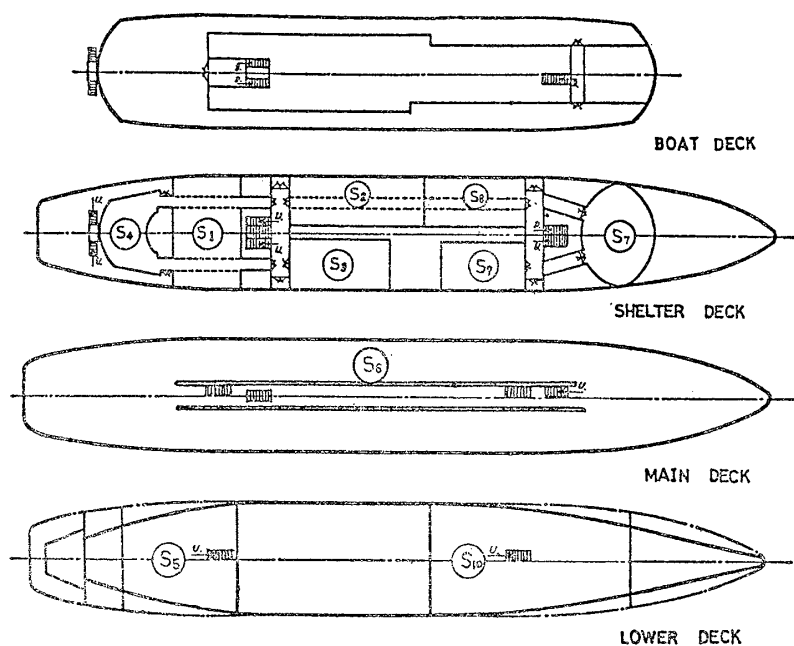


Fig. 5 Arrangement of an example ship

Table 4 Particulars of an example ship

L x B x D (m)	105.61 x 16.76 x 10.52
Draft, fully loaded (m)	3.66
Gross tonnage	3,960
Net tonnage	1,700
Passenger capacity	1,200
Vehicle capacity	200
Service speed (kt)	20
Route	Scotland - N. Ireland

Table 5 Characteristics of elements of escape system

Aft Part								
Passage			Stairway				Doorway	
No.	Length (m)	Width (m)	No.	Length (m)	Width (m)	Inclination (deg)	No.	Width (m) Sill h. (m)
P1	6.5	3.0	ST1	3.2	2.75	40	D1	2.55 0.2
P2	6.5	3.0	ST2	3.2	1.5	40	D2	1.5 0
P3	3.5	1.5	ST3	3.2	0.7	40	D3	1.5 0
P4	3.5	1.5	ST4	3.2	0.7	40	D4	1.5 0
P5	2.0	1.5	ST5	3.2	0.7	40	D5	1.5 0
P6	2.0	1.5					D6	1.5 0
P7	12.0	1.5					D7	1.5 0
P8	12.0	1.5					D8	1.5 0
P9	11.0	1.5						
P10	11.0	1.5						

Fore Part								
Passage			Stairway				Doorway	
No.	Length (m)	Width (m)	No.	Length (m)	Width (m)	Inclination (deg)	No.	Width (m) Sill h. (m)
P11	6.5	3.0	ST6	3.2	2.5	40	D9	2.3 0.2
P12	6.5	3.0	ST7	3.2	1.2	40	D10	1.5 0
P13	6.5	1.5	ST8	3.2	0.7	40	D11	1.5 0
P14	6.5	1.5					D12	1.5 0
							D13	1.5 0
							D14	1.5 0
							D15	0.7 0

計算の結果を Table 7, Fig. 7, Fig. 8 にそれぞれ示す。Table 7 は旅客分布の脱出所要時間（最初の旅客が脱出を開始してから最後の旅客が脱出するまでの時間）

に対する影響を示し、Fig. 7 は出入口幅の変化によって、各群集発生場所の旅客の脱出所要時間がどのように変化するかを図示している。ここで、システム全体の脱出所要時間は脱出開始から最後尾旅客の脱出完了までの時間を表わすから、Table 7 における旅客分布 No. 1 の脱出所要時間は、Fig. 7 の基準出入口幅における各群集発生場所の脱出所要時間のうちの最多所要時間に対応する。Fig. 8 は旅客分布 No. 1, 基準出入口幅について行なった群集流動の計算過程における脱出システム内旅客分布の時間的变化を示すものである。図中の群集発生場所ごとの数字は、その時刻における残留旅客数を示す。

以上の結果から、旅客分布の影響については、旅客が下層に多く分布するほど

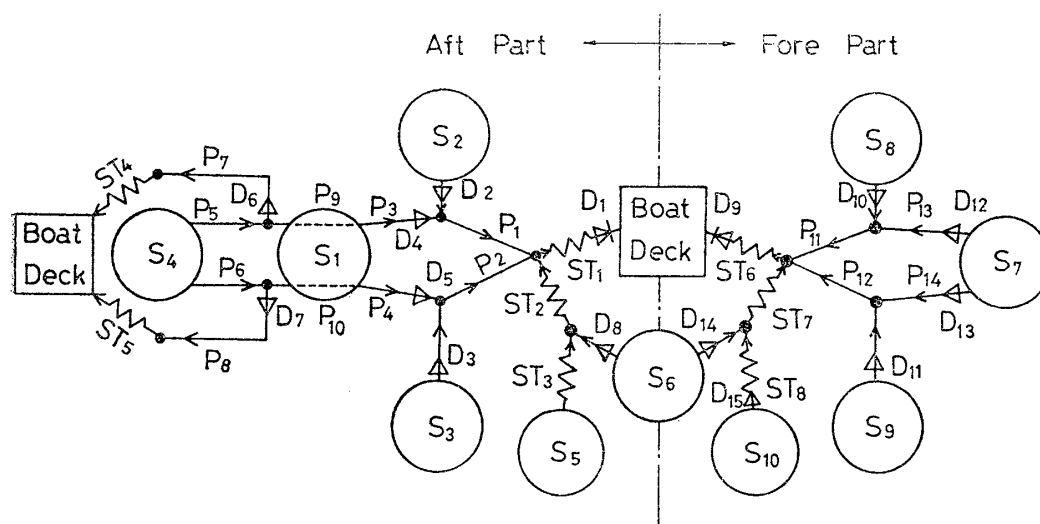


Fig. 6 Graphic description of escape system

Table 6 Distribution patterns of passengers

		Aft part			Fore part			
		Source	No. 1	No. 2	No. 3	Source	No. 1	No. 2
Shelter deck	S ₁	200	160	120	S ₇	120	90	60
	S ₂	150	100	70	S ₈	100	85	50
	S ₃	100	70	50	S ₉	60	45	20
	S ₄	100	70	60				
	Total	550	400	300	Total	280	220	130
Lower deck	S ₅	50	50	50	S ₁₀	50	50	50
Main deck	S ₆	50	200	300	S ₆	50	110	200
Total	Aft	650	650	650	Fore	380	380	380

Table 7 Time required for escape of all passengers of all passengers

Distribution patterns	Aft part		Fore part
	Case I	Case II	
No. 1	120	100	86
No. 2	148	132	100
No. 3	182	168	128

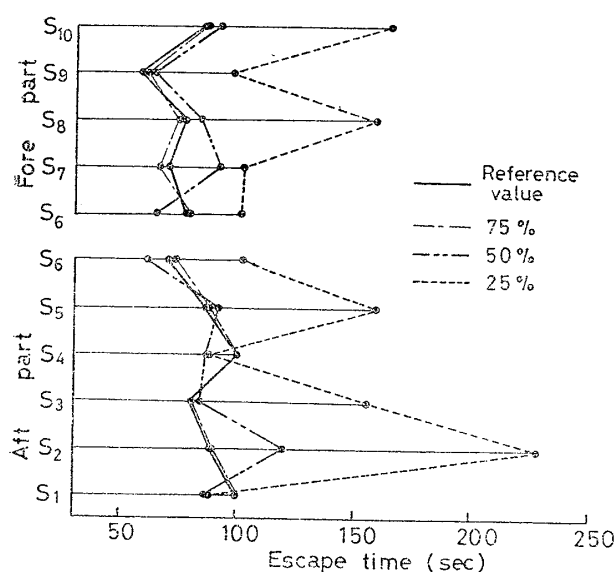


Fig. 7 Time required for escape from each quarter with different widths of doorways (Distribution pattern No. 1)

脱出所要時間が增大することがわかる。これは、主甲板の旅客分布が多い場合、遮浪甲板に通じる階段 ST₂, ST₇ で大きな渋滞が発生するためである。すなわち、旅客分布 No. 1 においては、脱出所要時間が階段 ST₁, ST₆ (Case II では、ST₄, ST₅ も含む) と出入口 D₁, D₉ の特性に支配されるのに対して、No. 3 の分布では階段 ST₂, ST₇ の特性に支配されることを示している。また、群集発生場所の出入口の幅の影響は、Fig. 7 に見られるように、出入口幅を基準値の 50% まで減少させても全旅客の脱出所要時間がたかだか 10~20 秒延びるだけで、顕著な影響を与えないことがわかる。しかしながら、出入口幅を基準値の 25% にまで減少させると脱出所要時間は急激に増大する。ここで、「出入口幅を 1/4 に減少させる」ことの意味は、出入口幅と群集流出数の関係から、出入口の群集流出数何らかの原因——例えば出口における混乱による閉塞現象——によって 1/4 に減少した場合を想定するものである。この場合、全体の脱出所要時間は、出入口幅当りの旅客数が最大である群集発生場所 S₂ の脱出所要時間に支配されることは自明であるが、Fig. 7 に見られるように、出入口幅 25% における S₁, S₄ の脱出所要時間が基準出入口幅の場合より短縮されていることは興味深い。これは、各群集発生場所からの群集流出数が減少した結果、各経路上の群集密度の低下をもたらし、出入口幅当りの旅客数の比較的小さい S₁, S₄ からの群集流出が円滑に行なわれたためである。この結果は、各経路上の群集密度を最大群集流動数を与える群集密度 ρ_c に近付くよう各群集発生場所における群集流出を操作することが可能であれば、システム全体の脱出所要時間を短縮しうることを示唆している。

5.2 脱出システムの最適化

脱出システムの最適化の例として、まず、群集発生場所の出入口幅を設計変数として変化させ、脱出所要時間

T:TIME

Z:NUMBER OF PASSENGERS ARRIVED AT BOAT DECK

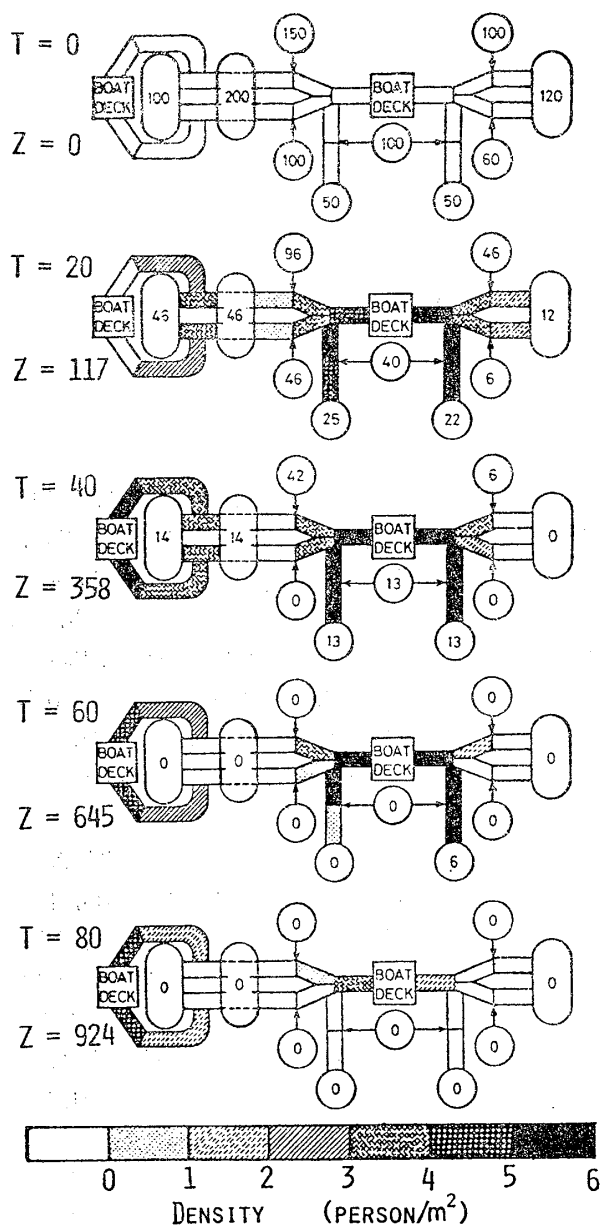


Fig. 8 Time histories of crowd densities in the escape system

を最小とするように出入口幅を決定する。最適化の手法としては、目的関数である脱出所要時間が設計変数の解析的表示として得られないことから、直接探索法の1つである Hooke-Jeeves¹²⁾法を用いる。なお、出入口幅以外の基本要素の諸元は Table 5, 旅客分布は Table 6 の No. 1 とし、船体前半部のみについて計算を実行する。Hooke-Jeeves 法における収束判定のステップ幅を 2cm, 出入口幅の初期値をすべて 30cm とし最適値の探索を行なう。この場合、実際の幅には人間が通りうるための最小幅が存在するわけであるが、計算モデルの構築上、人間の寸法等は考慮せず、流れとしてこれを扱ったの

Table 8 Optimum values of widths of doorways

Case	No. of trials	Width of doorways (m)						Escape time
		D ₁₀	D ₁₁	D ₁₂	D ₁₃	D ₁₄	D ₁₅	
A	1	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	187 sec
	6	0.70	0.30	0.70	0.30	0.70	0.60	120 "
	11	1.50	1.10	1.10	1.10	0.90	0.90	89 "
	30	0.70	0.70	0.70	1.00	0.90	0.60	88 "
	75	0.83	0.70	0.83	0.70	0.90	0.60	87 "
	107	0.83	0.70	0.48	0.70	0.90	0.60	85 "
	128	0.83	0.70	0.48	0.70	0.90	0.53	85 "
	150	0.79	0.70	0.48	0.70	0.90	0.60	85 "
B	Init. val.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.75	90 "
	Conv.val.	0.76	0.76	0.60	0.70	0.90	0.60	85 "
C	Init. val.	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	91 "
	Conv.val.	1.30	1.70	2.10	1.70	1.30	1.69	87 "
D	Init. val.	0.83	0.70	0.48	0.70	0.90	0.78	85 "
	Conv.val.	0.83	0.69	0.48	0.70	0.90	0.60	85 "

Init. val. : Initial value

Conv. val. : Convergent value

で、出口幅の初期値 30cm は計算上の最小幅と読みかえればよい。探索の途中経過および収束値を Table 8 の Case A に示す。探索試行回数 107 以後は脱出所要時間は 85 秒に留まり変化しない。このことは、脱出所要時間の最小点は出入口幅の作る設計空間で、なだらかな曲面上にあり、多峰性を持つことも考えられる。それ故、次に、探索の初期値を変えて改めて最適解の探索を行ない、その結果を Table 8 の Case B, C, D に示す。さらに、第 5.1 節で述べた基準値の脱出所要時間も 86 秒であること (Table 7) を併せ考えると、収束判定基準とか他の最適化法を試みるなど検討の余地はあるが出入口幅に関しては、なだらかな谷をいくつか持つものと結論される。したがって、同一の脱出所要時間を与える出入口幅の組合せの数は多数ありうるから、出入口幅の最終的決定は、最小脱出所要時間を与えるものの中から、設計者が持つ他の判断基準(例えば、最小出入口幅の設定)あるいは制約条件を基に選択されるべきである。

次に、出入口幅に加えて、通路 P₁₁, P₁₂ および階段 ST₇ の幅も設計変数として変化させ、脱出所要時間を最小にするものの中から、最小の通路幅、階段幅および出入口幅を与える設計値の組合せを求める。この問題の最適解の探索の初期値と収束値を Table 9 に示す。この結果、脱出所要時間を 85 秒に保ったまま、階段 ST₇ の幅および出入口幅はあまり変化しないままに、通路 P₁₁, P₁₂ の幅は 3m から 2.2m と 0.8m 狭くなる。

Table 9 Optimum values of widths of passages, stairway and doorways

	Width of passages, stairway & doorways (m)								Escape time
	P ₁₁	P ₁₂	ST ₇	D ₁₀	D ₁₁	D ₁₂	D ₁₃	D ₁₄	
Init. val.	3.00	3.00	1.20	0.83	0.80	0.80	0.80	0.90	85 sec
Conv.val.	2.20	2.20	1.18	0.78	0.65	0.65	0.65	0.90	85 "

Init. val. : Initial value

Conv. val. : Convergent value

6 結 言

この論文では、船舶脱出システムを群集発生場所、通路、階段、出入口および避難場所の基本要素の組合せでモデル化し、脱出システムの構造把握と脱出経路の明確化のために、基本要素によるネットワーク・グラフ表示法を与えた。さらに、基本要素および基本要素間における群集流動を流体的に捉えた数学モデルを与えることによって、船舶脱出システムにおける群集流動を定量的に解析し、脱出システムの評価と最適化を行なう方法を提案した。また、群集流動の数学モデルのパラメータを実船実験などを基に決定し、提案する手法を実船の脱出システムに適用し、脱出所要時間および脱出システム内における旅客分布の時間的変化を求めるとともに、基本要素の特性が脱出流動に及ぼす影響を考察し、さらに、基本要素の諸元の最適化の計算例を示した。

なお、この論文で与えた群集流動の流体数学モデルでは、浸水や火災など緊急時における旅客の異常心理や出入口に発生する閉塞現象などの確率的要因は考慮されていない。しかしながら、平常心理で避難行動を行なわせても、本質的には、船舶脱出システムの基本的性質が損なわれるとは考えられないので、船舶脱出システムの相対的評価法として、提案する手法は十分適用できるものとする。もちろん、旅客の脱出流動の数学モデルを緊急時における旅客の実際行動に近くなるよう、心理学や行動科学など他の学問分野の知識や実船実験などのデータの蓄積によって改良すべきことはいうまでもなく、これ等は今後の課題であろう。

参 考 文 献

1) 戸川喜久二：群集流の観測に基づく避難施設の研究，

- 建設省建築研究所研究報告，No. 14，(1955).
 2) 戸川喜久二：群集流解析に関する理論式の実用性の検討，日本火災学会論文集，第6巻，第1号，(1956).
 3) 岡田光正，辻 正矩，横井真朗：避難シミュレーションよりみた百貨店の危険性について（防災計画に関する基礎的研究その3），日本建築学会近畿支部研究報告集，(1973).
 4) 歩行性行動研究会：歩行行動に関する研究報告書，日本自動車工業会交通対策委員会，(1975).
 5) 藤田隆史：大震災火災時における住民避難の最適化（避難群集のシミュレーション），計測自動制御学会論文集，12-4，(1976).
 6) 中村和男，吉岡松太郎，稗田哲也：歩行者流動モデルとそのシミュレーション，人間工学，Vol. 10，No. 3，(1974).
 7) 平井一正，樽井賢治：パニック時の群集の行動とそのシミュレーション，システムと制御，Vol. 21，No. 6，(1977).
 8) 岩佐英介，田口賢士，池田 勝：非常時の避難を考慮せる出入口の幅について（第1報～第3報），関西造船協会，No. 81 (1956)，No. 85 (1957)，No. 87 (1957).
 9) 長谷川進，東 成光：船の階段について，関西造船協会，No. 86，(1957).
 10) 日本海難防止協会：航海設備等の基準および改善に関する研究（昭和41年度）(1968).
 11) 平本文男：非常の場合の群集流の性質，日本機械学会第295回講習会教材(1968)，pp. 73～pp. 82.
 12) J. コワリック，M. R. オスボーン，(山本善之，小山健夫訳)，非線形最適化問題，培風館(1970)，pp. 23～pp. 25.
 13) (社)日本中型造船工業会：カーフェリー建造マニュアル，昭和50年5月，pp. 75～pp. 87.