

46 シミュレーションによる旅客船の避難安全評価

システム技術部 *勝原光治郎、松倉洋史
装備部 太田 進

1. はじめに

事故時に退船脱出の準備などのため、ある定められた場所に集合することを避難という。速やかに避難できることは旅客船の安全要件の1つである。

国内現行規則では避難安全は、船舶設備規程⁷⁾、船舶検査心得⁸⁾に出入口幅の規定(計画脱出人数 N 人に対して Ncm 以上であること)や集合場所の広さの規定があること、船員法に非常配置表作成と誘導が義務付けられるなどの規定がある。出入口幅の規定は局所的な滞留回避の考えに基づいていると考えられる。したがって、船舶全体の避難経路が安全かどうかの確認基準が与えられていないという不十分さが指摘されている。国際的にもIMO決議 A.757(18)など国内法と同等である。

そこで、1994年9月のエストニア号の事故を契機として、IMOはRORO旅客船の安全基準を見直し、1995年11月SOLAS条約を改正した。その中には1999年7月1日以降に建造されるRORO旅客船は設計の早い段階で避難解析をすべきことが義務付けられている。これを受けてIMO暫定ガイドライン¹⁴⁾を決めた。これは手計算で人の流れを概算するものである。これはあくまで暫定であり不十分なので、現在IMOのFP小委員会で2002年を目標に検討中である。

勝原らはSOLAS条約の避難解析に対応することを念頭に、集団心理の下で個々人が動くマルチエージェントの避難シミュレーションプログラムを作成し、実船実験でこれを検証し、さらに実船に適用し船舶設計の際に役立つことを示した。本報はこれらの成果を概括紹介するものである。

従来の研究を見てみよう。避難解析の研究は、日本では戸川によって始められた。戸川¹⁵⁾は群集の挙動を計測し、歩行速度や出入り口での

流出速度を明らかにし、霞ヶ関ビルの避難安全の提言をするなど主に建築分野に業績を残した。その後建築分野ではこれらの成果は建築防災計画指針¹⁰⁾などの法規に集大成された。しかし、これは手作業で行う計算なので避難状況のイメージは作業者の頭の中にある。状況が複雑になると人間の頭脳がパンクしてしまう。それを克服するのが計算機によるシミュレーションの方法である。合流・分岐する人の流れをシミュレーションは容易に行うことができる。

計算機容量の小さかった初期には流体モデルや群体モデルなどが行われた。それに対して避難者を1人1人区別して取り扱うシミュレーションの方法は個体モデルあるいはMicroscopic Simulationと言われる。抽象度が少なく実際の人の行動にもっとも近い解析法である。

避難者個々人を区別して扱うようになると、ヒューマンファクターが検討されるようになった。位寄¹⁷⁾は火災時の危険の認識を、福地ら²⁷⁾は煙の下での歩行速度を問題にした。

筆者等は災害時の人間の避難行動を記述するとき経路の選択がどう行われるかが問題であると考えた。たとえ同一施設であっても人々の心理状態によって避難経路は異なる。例えば、船内の他の甲板に知人達がいたりとか、前日パーティーで乗客同士の交流があったとか、リーダーシップを発揮する性格の人がどこそこにいるとか、現場には種々の心理的要因の発生する可能性がある。

従来の避難シミュレーションのほとんどは同一施設であれば、同一の避難結果を与えている。それは心理を無視して待ち時間最小とか、最短経路選択とかで人間の行動を扱っているためである。そこで避難行動の多様性を表現するため心理的なヒューマンファクターを考慮に入れた単純なモデルを作った。

以下でシミュレーションによって旅客船の避

難安全評価が容易にできることを示す。

2. シミュレーションモデル

(1) 空間のネットワークモデル

まず、図1で示すようにノード・パス・スペースで構成するネットワークで船内避難行動空間を記述する。ノードはその点での位置・通行幅を、パスにはその長さ(m)を、スペースにはその空間の面積を属性として与える。人は個体として扱われ、ノードを越えるとき、経路選択の判断をしその方向に移動する。歩行速度は一定値を与えているので、現実の歩行を模擬するために人の移動には流出速度と密度の制限が加えられる。流出速度と人間の密度は制限値までは制約なしで歩行できるが、制限値に達すると制限値に制約され、滞留が起こる(流出速度律・密度律、図2)。

ネットワークのすべてのノードから避難場所に至るあらゆる経路を予め分岐プログラムで計算しておく。

経路の取り扱い方によって次の2通りのシミュレーションができる。避難経路が既に定められている場合と、経路を選択しながら避難する場合である。

(2) 固定経路の避難シミュレーション²⁾

この場合のシミュレーションは、各人の動く経路に沿ったネットワーク上のノード列を入力ファイルとして与え、各人は単位時間毎に流出速度律・密度律の下でこの上を歩行する。

(3) 経路選択の避難シミュレーション¹⁾

この場合、人は経路を選択する自律主体である。各人は五感で環境を感知し、心理的影響を受けながら、最適な経路を刻々判断し行動する。その際の避難行動は人間の典型的な集団行動と考えられる。

この集団心理に基づく経路選択判断モデルは、次の通りである。

1) 避難場所への早期到着願望がある。2) 自甲板からの情報は視覚、聴覚、嗅覚等を使ってすべて把握できる。3) 他甲板については、心理上で想像するだけである。4) 集団心理が支配的である。5) 人のタイプ(大人、子供、老人、障害者などに分類)で歩行速度、行動開始時間が異なる。ここで心理量として、階段から先集合場所までの想像上の距離を想像距離と名付けると、図3のように各人は集合場所に至るすべての経路について、(自甲板上の歩行時間) + (自甲板上の滞留待ち時間) + (他甲板の想像上の距離を歩く時間)を計算し最も小さい値をとる経路を選ぶことになる。そして、集団心理の仮定から想像上の距離は心理的に同一集団で同一の値をとる。このことは心理的変数を少なくし計算を著しく簡便にする。

図3から分かるように、経路選択のネットワークは各甲板毎つまり、心理的同一シチュエーション毎に組み立てる必要がある。また、集団の構成員がとる経路を集団としてみると左右に分岐する点が存在する。これは各人の軌跡が交錯しないということで、後述する実船実験によって示唆され確認された。その1例を図4に示す。実船実験で得た各人の奇跡の最初の約5秒間の分で、居室から出て左右に分かれている。これは避難行動が集団心理に基づいていることを示している。

3. 実船実験による検証

(1) 実船実験

避難行動の実船実験を平成6年12月、平成7年7月および平成8年7月に運輸省航海訓練所練習船「青雲丸」(表1)で東京港接岸中合計8回行った。

実験では3層の甲板を使用し、被験者全員の避難場所を最上階の甲板とした(図5)。垂直方向の避難経路は船尾階段、中央階段および船首

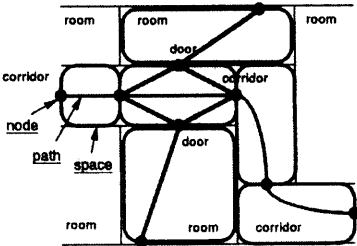


図1 node-path-space系

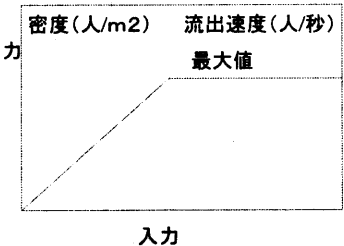


図2 密度・流出速度

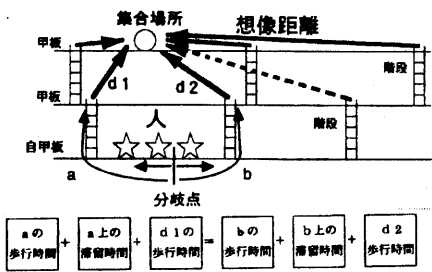


図3 経路選択モデル

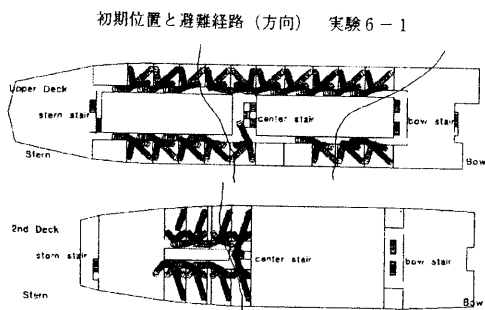


図4 避難経路の分岐

階段の3つである。下から上の甲板に上るこれらの階段によって避難経路を各々ルート1、ルート2、ルート3と呼ぶことにする。多人数の収容される場所は居室、食堂、第一教室である。

被験者は年齢19～20才の海員学校の学生で、平成6年は126名（男子122名、女子4名）、平成7年は76名（男子73名、女子3名）、平成8年は83名（男子80名、女子3名）であった。

被験者には実験開始前に通常の作業着や靴に加えヘルメットやゼッケンを着用させ、避難時

表1 青雲丸主要目

船名	練習船 青雲丸
総トン数	5,044トン
船長	114.6 m
船幅	16.0 m
乗船者数	256名
士官	34名
部員	42名
訓練生	180名

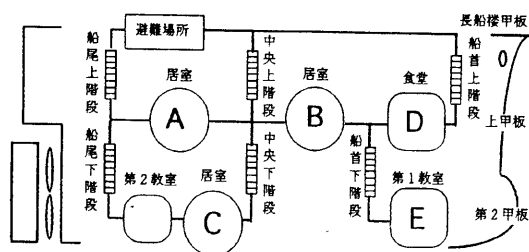


図5 船内避難空間

表2 初期の人配置

実験番号	居室A	居室B	居室C	食堂D	第1教室E	合計	配置
H6-1	47	39	40	0	0	126	居室
H6-2	26	26	26	24	24	126	分散
H6-3	18	18	18	17	17	88	分散
H7-1	24	26	26	0	0	76	居室
H7-2	15	15	16	15	15	76	分散
H7-3	0	0	0	0	76	76	集中
H8-1	27	28	28	0	0	83	居室
H8-2	0	0	0	0	83	83	集中



図6 実船実験風景

には走ったり押したりしないように予め指示した。初期位置に被験者を配置した後、一斉に避難させ避難場所に集合させた。被験者の初期配置は就寝時、休憩時及び講義時間などを想定し、表2に示すように居室配置、分散配置、集中配置などとした。また通路のドアは全て開け放して置いた。実験風景を図6に示す。

観測は、階段・出口・通路等での人の流れを約25台のビデオカメラを設置して行った。実験室でこのテープを分析した。避難時間は経路別に15秒時間間隔の避難人数推移として求めた。(図7左側)

(2) 実験と計算の結果の比較

1) 固定経路の場合

実船実験の結果得られた各人の経路通りに動かすとき、流出速度律・密度律の下で正しく避難時間を計算できるかを調べた。紙面の都合で割愛するが、計算と実験の良好な一致を得た。

2) 経路選択の場合

図7に実験と計算の結果の比較を示す。左側が実験結果、右側が計算結果である。パラメータは選択されたルート番号およびそれらの合計である。すべてのケースについて左右が一致している。とりわけ、居室配置の(A)、(D)、(G)、次いで分散配置の(B)、(C)、(E)がよい一致を示している。

分散配置の場合の問題点は、最下層の第2教室という奥まった場所から出て上の中層甲板に入った人たちの経路の選び方が、それ以前に中層甲板にいた人たちと異なっているということである。つまり想像距離が異なり、心理的集団として異質であることであった。これは想像距離を変えて繰り返し行ったコンピュータ計算で

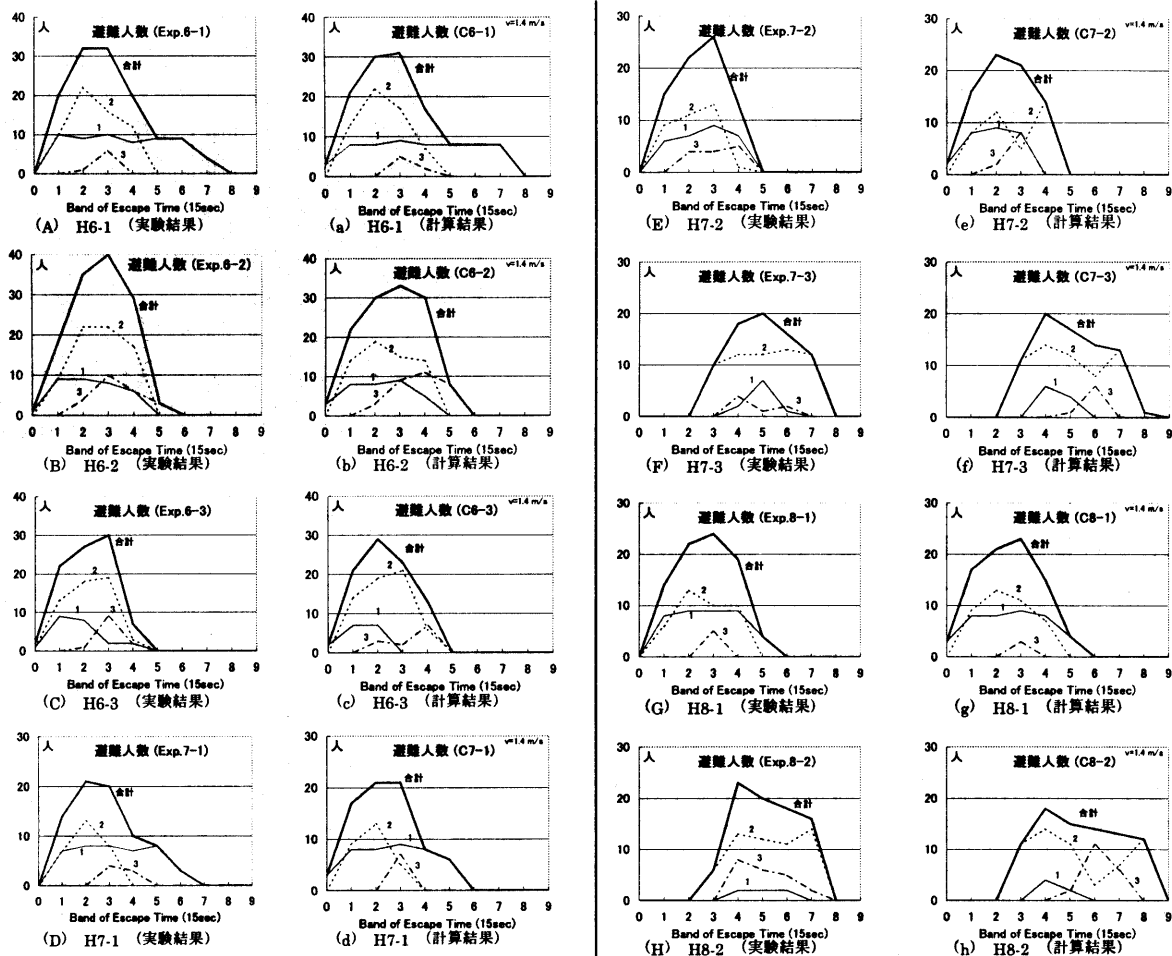


図7 実験結果と計算結果の比較

分かった。

集中配置の場合、(F)、(H)に見られるようにルート3のピークが計算の方が後ろにずれることである。これはシミュレーション画面を見ていて分かることであるが、ルート2に多数が向かっているとき実験では早めにルート3を選択する人があらわれるのに、計算ではルート2の階段が渋滞し始めてからルート3が選ばれ出している。これは現実には人々はこんなに多くの人がルート2を選べば滞留するに違いないと判断したと思われる。つまり、計算には人々の予見能力が組み込まれていないためである。

現状ではこれらの問題を解決するに至っていない。しかし、多少粗いがシミュレーション計算は実験結果の状況を再現でき、妥当性が確かめられたといえる。

4. 心理量の影響³⁾

人間モデルおよびシミュレーションが実船実験によって確かめられたので、次に想像距離という心理量の影響を調べよう。

青雲丸を例にする。乗客180人が居室にいる場合を計算する。図3から階段6個なので想像距離は6個だがこのうち独立なのは3個である。なぜなら経路選択に効くのは経路の差分だからである。最下層中央階段からの想像距離(50mとする)と船尾階段(50+VDa mとする)の選択を決める VDa、中層甲板の中央階段(50+VDb)・船尾階段(50)・船首階段(50+VDC)の選択を決める2つの変数 VDb、VDCの3つである。これらを変化させると、図8のようになる。最下層甲板階段から出る想像距離 VDa の影響は小さいので、中層甲板の階段から出る独立の想像距離 VDb と VDC を XY 軸とし、Z 軸に総避難時間を示す。3つのプラトー部分の間が崖になった谷3つという地形を

想起させる。谷が合流した部分に最低値がある。これが総避難時間最小のケースである。また、プラトー部分は各々の階段にすべての人が集まってきた場合で幅の狭い階段に対応したプラトーで最大の総避難時間となっている。

次に、この谷の合流点がボトムであることを利用して最適解を求めよう。なお、本シミュレーションではCRT画面上で滞留が少なくなるように避難空間を改善設計できるが、ここではそれを省略し、避難誘導経路の最適設計を示そう。

避難誘導経路の最適設計としては総避難時間が最小となるように避難経路を決めるとよい。このケースのときすべてのルートの避難時間が同時に終わっている(図9)。つまり、乗客を各ルートにうまく配分したのである。この場合の避難経路ブロック(同一方向の避難経路をとる乗客の初期配置区域)は図10のようになる。多次元VD空間での最適ケースの求め方は、このボトム点が存在すること、ルート毎の避難時間が同時に終わることを用いて行う。図11に総避難時間と最大滞留時間の関係を示す。

最大総避難時間は最悪ケースである。この最大と最小の間に心理的要因の影響は入る。避難安全を評価するにはこの両極端の数字を押さえる必要がある。

5. 避難経路解析評価方法^{2,9)}

5. 1 評価指標と評価基準

避難経路解析は、一般配置図ないし避難(脱出)経路図で表される避難経路配置が、避難性状の観点からみて適切であるか否かを判定するための方法である。避難安全には、船舶全体での総避難時間が一定範囲以下であることと、避難にあたってある程度の理性的行動が取られるべきこと、そのためにローカルな場所において群衆滞留時間が一定値以下であることの2条件と考えられる。

基準値としては、総避難時間が[13分]以内、および最大滞留時間[67秒]以内とする。その理由は、IMOガイドラインでは、1時間以内に生存艇により海上に避難することを要求しているが、救命設備の使用時間の規定値から、生存艇乗艇場所までの避難時間を算出し、安全係数を考慮すれば、許容総避難時間は13分となるからである。また、最大滞留時間は、現行の規則

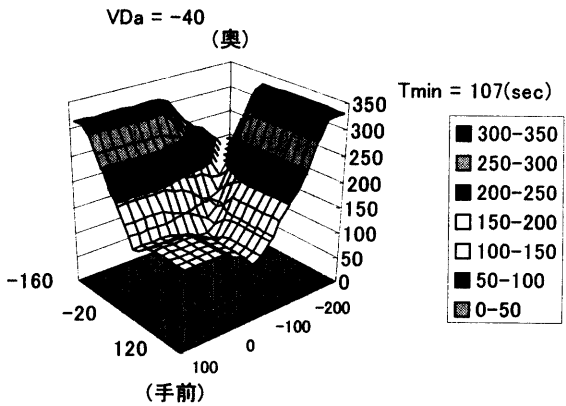


図8 心理量に対する総避難時間等高線

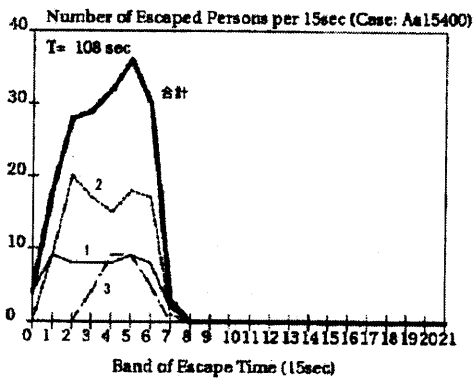


図9 最小総避難時間ケースの避難時間曲線

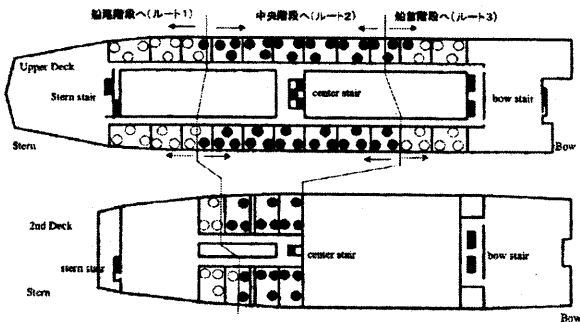


図10 最適避難誘導経路

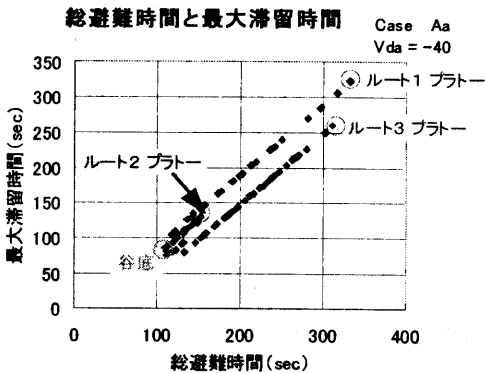


図11 総避難時間と最大滞留時間

である「1 人当たり 1 cm」を流出係数 1.5 人/秒/cm にあてはめると 67 秒となるからである。ただし、この基準値は本報での仮案である。

5. 2 計算に用いる避難定数

1) 基本歩行速度、基本限界流出速度、基本限界人密度

表 3 のとおり。

2) 縁材（コーミング）

暴露甲板に通じる出入口には、海水打ち込み防止のため、当該暴露甲板の海面からの高さに応じた縁材（コーミング）が設けられる。縁材がある出入り口の流出係数は、縁材の高さによらず、基本流出係数の 0.8 倍とする。

3) 船体傾斜時の歩行速度、限界流出係数¹⁾
表 4、表 5 のとおり。

5. 3 使用する避難経路

5. 4 で述べるシナリオで規定される場合を除いて、船舶設備規程を満足する全ての避難経路が使用できるものとして解析する。船舶設備規程では、回り階段や Transverse 方向の階段は、一般には避難経路として認められないが、本避難経路解析では、これらの避難経路も使用できるものとする。

5. 4 計算ケース（事故シナリオ）

乗客人数は定員とし、全員成人とする。乗客の初期配置が夜パターンと昼パターンについて各々次の事故シナリオの場合を計算する。

表 3 基本歩行速度、基本流出係数、最大人密度

項目	基本歩行速度	基本流出係数	最大人密度
通路(廊下、室内)	1.0 m/s	1.5 person/(m*sec)	3.33 person/m2
階段	0.5 m/s ¹⁾	80/60 person/(m*sec)	

(注1)階段を移動する水平方向の速度。階段の角度によらず、水平方向の速度

表 4 20 度の船体横傾斜を想定した歩行速度の補正係数

項目	設置方向	昇降の別	補正係数
通路	船首尾方向	-	1.0
	左右舷方向	登り／下り	0.7/1.1
階段	船首尾方向	-	0.8
	左右舷方向	後傾	登り／下り 0.7
		前傾	登り／下り 1.2/0.8

表 5 20 度の船体横傾斜を想定した流出係数の補正係数

項目	移動方向	昇降の別	補正係数
通路上	船首尾方向	-	0.7
	左右舷方向	登り／下り	0.8/1.0
階段入り口	船首尾方向	登り／下り	1.0/0.7
	左右舷方向	後傾	登り／下り 0.6/0.5
		前傾	登り／下り 1.1/0.9

- (1) 障害無しシナリオ（基本シナリオ）
- (2) 連続階段使用不能シナリオ
- (3) 火災室前通路使用不能シナリオ
- (4) 傾斜シナリオ

夜パターンは全乗客が居室に居る場合、昼パターンは 2/3 が公室、1/3 は居室に居る場合。

「(2)連続階段使用不能シナリオ」は連続して使用される一連の階段が使えない場合、「(3)火災室前通路使用不能シナリオ」は火災危険の多い業務区域および A 類機関区域を火災室とし、その扉の面する通路が遮断された場合、「(4)傾斜シナリオ」は浸水によって右舷ないし左舷に 20° 傾斜した場合である。これらは避難経路が十分な柔軟性・冗長性を有することの検証のために行う計算ケースである。

この避難経路解析評価方法を実船に適用した例を以下に示す。

6. 実船解析例 1（国内フェリー）

本シミュレーションの 2 つのうちの 1 つ、経路選択の避難シミュレーションによって未だ脱出経路が決まっていない新船設計段階で最適避難経路を決めることができるが、ここでは実船を採り上げたので、この実船の避難経路図の評価を固定経路のシミュレーションで行ってみる。次に、経路選択の避難シミュレーションによって最適経路を算出し、実船の避難経路図と比べ、

このシミュレーションの威力を示す。

6. 1 モデルシップとその避難経路図

モデルシップは総トン数約 2 万トン、船長約 181 メートル、旅客定員 926 名、乗組員 70 名、合計 926 名で、甲板は車両甲板 2 層、旅客甲板 3 層、その最上層は船橋甲板を兼ね、更にその上に羅針儀船橋甲板があり、合計 6 層である。国内長距離フェリーとして最大級のものである。特徴は、人口密度が高く甲板が少ないことである。

避難解析には旅客甲板の 3 層を考えれば十分である。3 層の最下層左右舷と船尾に集合場所があり、緊急時に必要があればここから 4 個のシューターで 46 個の救命筏等に脱出することになっている。

乗客と乗組員がいる各人の居室および船橋の業務区画から集合場所への避難経路が救命脱出経路図という部面に記載されている。図12にその3層の避難経路図の概要を示す。その特徴は、①船内がゾーンに分けられ、ゾーン毎に避難経路が付与されていて判り易い。②しかし、ゾーン1は上の甲板に一旦上がり、暴露甲板に出て下の甲板に下りるといった避難経路となっている点が乗客の心理には不自然ではないか。③ゾーン3の船首側の部屋からは船首側の出口から出るのが自然である。同様にゾーン4、ゾーン5、ゾーン6についても近くの出口や階段を選びたくなる心理が働くのではないか。④ゾーン6は近くの階段を避けて、遠くの船尾階段まで歩く経路となっていて不自然である。

6. 2 固定経路のシミュレーション

避難経路が与えられたときの避難シミュレーションの結果を図13、図14に示す。図13に示すように、総避難時間は186秒であった。ルート6が最終避難経路であった。言い換えればZ=2のゾーン6の乗客が船尾の避難場所に着くまで長距離歩行することが最大のネックであった。観測によればこのルートでは滞留は発生せずひたすら歩き続けている。ゾーン1の乗客を上甲板にあげてルート2の避難時間を短くしたと思われるが、その努力もむなしくルート6がネックになっている。また、1F船首部分をゾーン1とゾーン2に分けているが、ゾーン1を広く取りすぎている。せいぜいルート1とルート2が同時刻に避難し終わるくらいにゾーン1の人数を減らすべきであろう。さらに、ルート5をもっと早く避難終了するようにすれば、避難時間を短くできるであろう。表6にルート毎の避難終了時間を示す。

次に、図14に場所毎の滞留人数の推移を示す。最大滞留時間は120秒で、その場所はZ=1甲板の左舷中央出口であった。これはルート5の暴露甲板への出口である。つまり、滞留の観点からはゾーン5を小さくすべきだろう。ゾーン1(0Fnode147で滞留)とゾーン2(0Fnode165で滞留)はうまく按分されていると言える。大部屋からの避難は出口幅に影響され、出た通路の滞

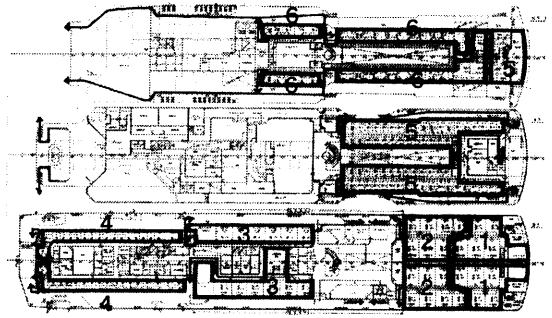


図12 一般配置図に書いた避難経路ブロック図

留を起こすので注意が必要である。0Fnode98の出口とその通路へ出た箇所0Fnode184で滞留しているが、許容範囲内である。

ここで、表7に設定定数の感度を調べて見た。限界流出係数・人の限界密度・コーミングの有無・歩行速度を設定値から変化させて、総避難時間、最大滞留時間を調べた。歩行速度が総避難時間に大きく影響していた。これは最終避難ルート6が歩行によって特徴付けられていたからで、一般的にはそうでないこともありうる。その他は、流出係数や人の密度が小さくなると最大滞留時間が大きくなるという影響があった。

次に、船の傾斜シナリオを固定経路のばあいについて計算して見よう。図15に総避難時間を図16に最大滞留時間を示す。基本ケースと比べて総避難時間は3秒、最大滞留時間は29秒増している。船の傾斜は滞留に影響があると言える。

6. 3 経路選択のシミュレーション

避難経路が予め与えられていないとき人々はどうのような行動をするか、ということを示すので、心理状態を変化させると人間としての摂理の下で種々の避難経路が求められるので、逆にその中から最適解や、最悪ケースを求めることができる。

3ケースの計算を示す。1つは夜パターンの基本ケースである。2つ目は垂直避難経路が大きい中央階段で火災になった場合である。3つ目は真中の甲板1Fのレストランが火災になったときで、開口部に面するパスは輻射熱で通行不能になっている場合である。いずれも心理量を変えて77回のシミュレーションを行い、総避難時間、最終水平および垂直避難経路、ローカルな最大滞留

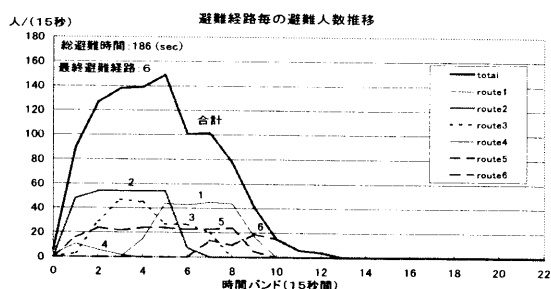


図 1 3 避難経路毎の避難人数推移 (固定経路)

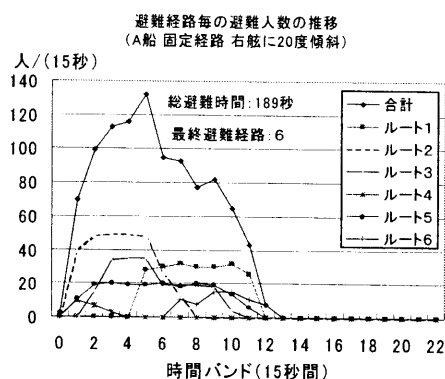


図 1 5 避難経路毎の避難人数推移 (固定経路 右舷傾斜)

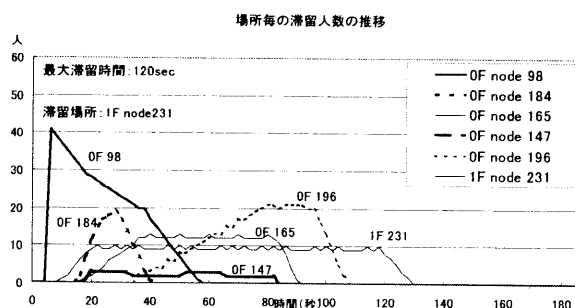


図 1 4 場所毎の滞留人数の推移 (固定経路)

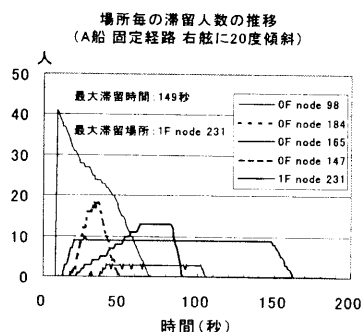


図 1 6 場所毎の滞留人数の推移 (固定経路 右舷傾斜)

表 6 避難経路別避難終了時間

避難ルート	1	2	3	4	5	6
避難時間(秒)	144	92	116	60	141	186

表 7 定数の感度

評価項目	流出係数限界			人の密度限界			コーミング		歩行速度		
	1.3	1.5	1.7	2	3.33	5	無	有	0.5	1	1.5
総避難時間	186.6	186.3	186.3	255.3	186.3	186.1	186.3	186.3	372.5	186.3	134
最終避難ルート	6	6	6	5	6	6	6	6	6	6	5&6
最大滞留時間	138	120	111	226	120	120	110	120	208	120	120
最大滞留場所	1F231	1F231	1F231	1F231	1F231	1F231	1F231	1F231	1F231	1F231	1F231

は標準ケース

時間およびその滞留場所、更には各シナリオでの最適なケースの場合の避難時間と滞留時間を計算した。また、最適ケースの脱出経路図相当の図を作成した。

(a) 基本シナリオケース

図 1 7 に基本ケースの場合で、想像距離という心理量が変わったとき総避難時間を示す。パラメータは階段中点から出る想像距離パスで、横軸はその想像距離と実距離との差分で、縦軸は総避難時間である。どの想像距離でも dd (想像距離と実距離の差) が 0 (m) 以上で総避難時間は変わらない。負では総避難時間が大きくなっている。

これはその階段に人が来易くなくなったら避難が遅くなることを意味する。想像距離が小さいとその階段に人々が集まり易くなるのでそれが最終避難経路となる。逆に、想像距離が大きくなると、人々がそこに集まらず、他の階段の状況で総避難時間が決まっている。図 1 8 に最大滞留時間を示した。主な滞留場所は 3 箇所 1F 中央の舷側に出る出口と OF 船首側の舷側への出口である。総避難時間と滞留時間の大小関係は基本的には独立事象である。詳細にみればここで滞留したため避難時間が長くなったとかいう関係はあるが別の場所がネックになることもあり、複雑である。心理状態の

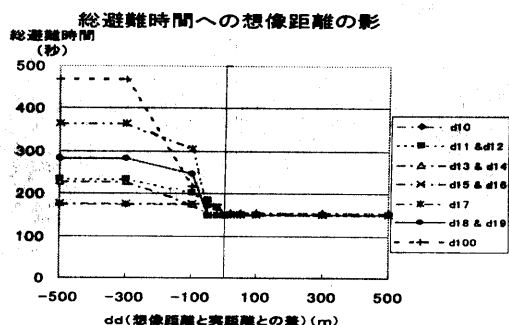


図 17 総避難時間 (基本ケース)

最大滞留時間への想像距離の影響

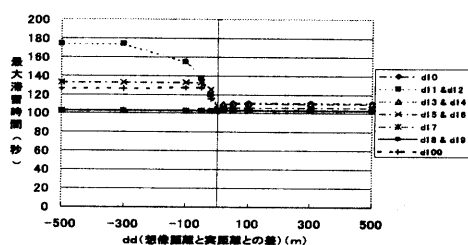


図 18 最大滞留時間 (基本ケース)

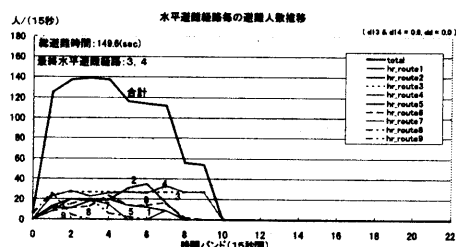


図 19 水平避難経路毎の避難人数推移
(基本ケース、最適ケース)

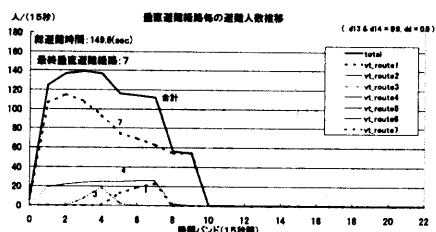


図 20 垂直避難経路毎の避難人数推移
(基本ケース、最適ケース)

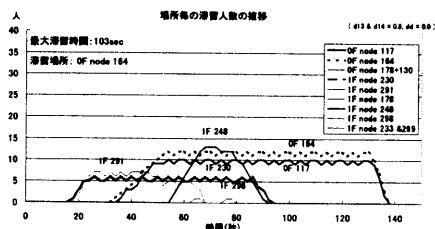


図 21 場所毎の滞留人数推移
(基本ケース、最適ケース)

変化・組み合わせはもっと広範囲であるが、ここでは想像距離が実距離である点を中心に想像距離を変化させている。図 17 における総避難時間がもっと小さくなるケースを求めることができるが、ここでは $Z=0$ の甲板で船首部分の人々の滞留箇所 0F164 または 0F117 で限界付けられているので 150 秒が最短、最適ケースである。垂直避難ルート 4 でネックになっている。その原因が場所 0F164 または 0F117 (0F 船首側の舷側への出口) での最大滞留となっている。この最適ケースの人々の経路をまとめる



図 22 最適避難経路ゾーン分け図
(基本ケース)

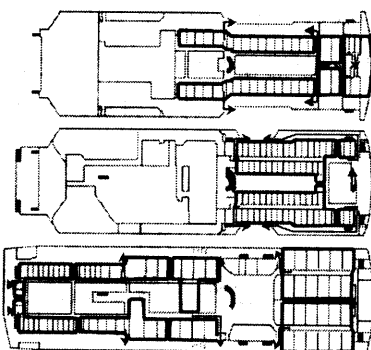


図 23 最適避難経路ゾーン分け図
(中央階段火災ケース)

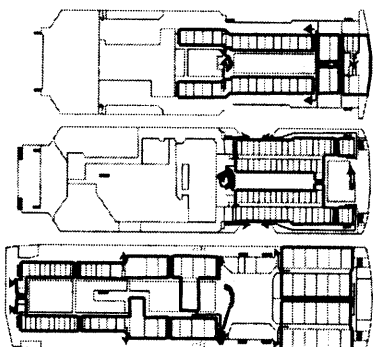


図 24 最適避難経路ゾーン分け図
(1F レストラン火災ケース)

と、図22のようになるので、脱出経路図をこれを参考に設定するとよい。

(a) 中央階段火災事故の場合（連続階段使用不能シナリオ）

最適ケースは基本ケースのそれに近い。最適避難経路ゾーン分け図（図23）は基本ケース（図22）で中央階段を使用していた1Fと2Fの部分の経路が変更になっただけである。航海中に中央階段火災事故発生という場合の避難誘導はこの変更部分を特に注意して経路を変更させるとよい。

(b) 1Fレストランの火災事故（火災室前後通路使用不能シナリオ）

最適避難経路ゾーン分け図（図24）は基本ケース（図22）で中央階段を使用していた1Fの人が舷に出て2Fの舷に出ていた人が中央階段を使用するように経路が変更になっただけである。

<まとめ>

3ケースの解析を行い、その最適ケースについてみると、表8のようによく似た結果となった。固定経路の場合の結果と比較すると、総避難時間および滞留時間のいずれにおいても3ケースのどのケースの避難経路でも固定経路より良い。

表8 3シナリオケースと固定経路の計算結果の比較

	総避難時間	水平最終避難経路	垂直最終避難経路	滞留時間	最大滞留場所
固定経路	186	route6	-	120	1Fnode231
基本ケース (最適ケース)	150	3.4	7	103	0Fnode164
中央階段火災ケース (最適ケース)	150	3.4	4.7	103	0Fnode164
1Fレストラン火災ケース (最適ケース)	150	3.4	7	103	0Fnode164

「評価法」に応答できるか。

固定経路の避難シミュレーションではその経路の特性しか分らない。だが、火災シナリオなどを解こうとするときそのようなシナリオの脱出経路図は与えられていない。自ら経路を作成する機能のないシミュレーション方式では、不可である。経路選択シミュレーションがなければ「5. 避難経路解析評価方法」に応答できない。

7. 実船解析例2

(国内フェリー、避難場所3 甲板)

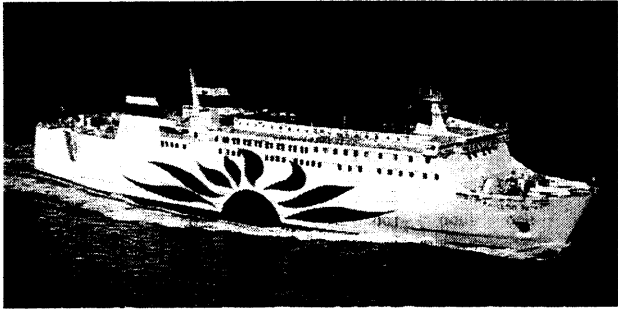


図25 国内フェリー

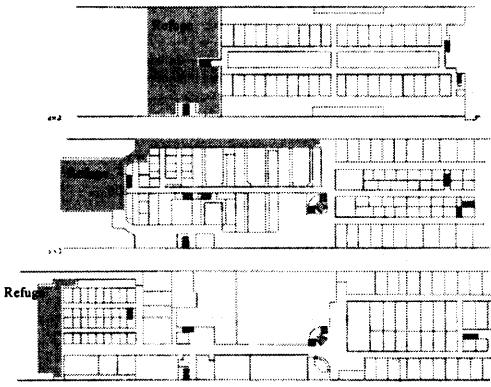


図26 乗客避難3甲板と避難場所

7. 1 モデルシップとその避難経路図

モデルシップは国内フェリーの実船で、その一般配置図を図26に示す。前例と異なる特徴は、避難場所が3層に渡っていることである。

乗客定員1105人の場合、最下層（Z=0）には人が居室、レストラン、ドライバー居室にいる。中層（Z=1）には人が居室にいる。Z=0、Z=1の間には中央に大きな階段がある。他には8個の階段がある。船尾の側に3層に渡って避難場所が設けられている。

このモデルシップの定員は、平水では1105人で、限定沿海では832人である。各々の夜間の居室を初期配置とするシミュレーションを行う。

7. 2 計算方法

(1) 計算ケース

次のケースを示す。

- ①固定経路の基本ケース。
 - ②経路選択の夜パターンの基本ケース。
- の最適解を示し、他は紙面の都合で割愛する。

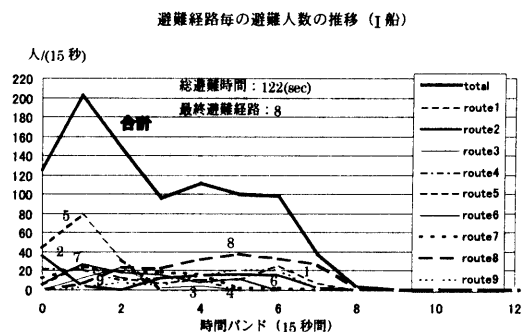


図 2 7 避難経路毎の避難人数の推移
(固定経路)

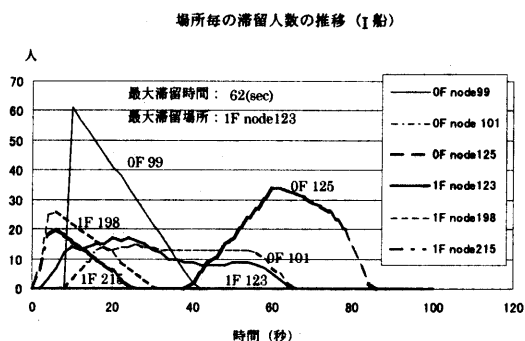


図 2 8 場所毎の滞留人数の推移 (固定経路)

(2) 甲板昇降による群集対峙の場合の仮定

本モデルシップは船尾側に3層に渡る避難場
所が設定されているので、乗客は階段を上がった
り下がりたりという自由度を持つ。その結果、
2集団が階段で対峙し動かなくなることもある。
そのときの人間の心理状態を場合分けしてすべ
て計算する方法もあるが、今はそれを解明する
のが目的ではないので、そのような心理状態の
発生は現実には少ないと仮定し省くことにする。
なお、この対峙の場合は最適解とはならない。

7. 3 計算結果

計算結果の1例を図27～図30に示す。固
定経路より最適化した基本ケースの方が避難時
間は短くなるが、局所効果である最大滞留時間
においては固定経路の方がよい。

8. 実船解析例3 (外洋クルーズ船)

8. 1 モデルシップ

豪華客船をモデルシップとしてとりあげた。
主要目は総トン数約2万2千トン、旅客定員6
07人、全長約160メートル、全幅約24メ
ートル、船級遠洋区域国際航海である。デッキ

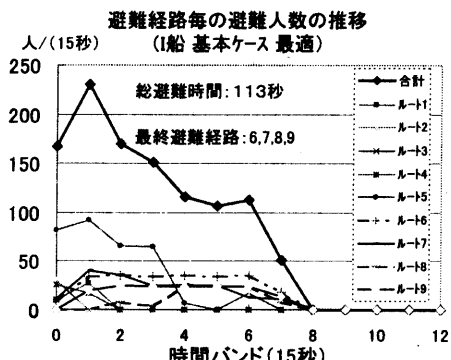


図 2 9 避難経路毎の避難人数の推移 (基本ケース 最適)

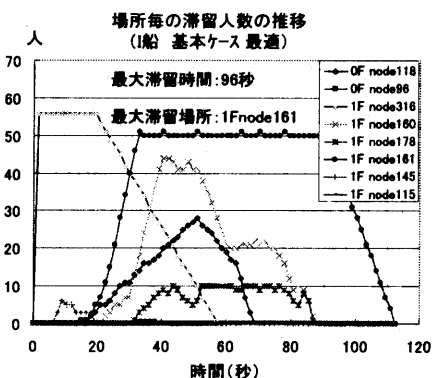


図 3 0 場所毎の滞留人数の推移 (基本ケース 最適)

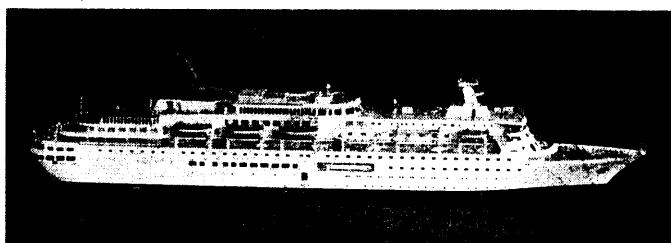


図 3 1 外洋クルーズ船

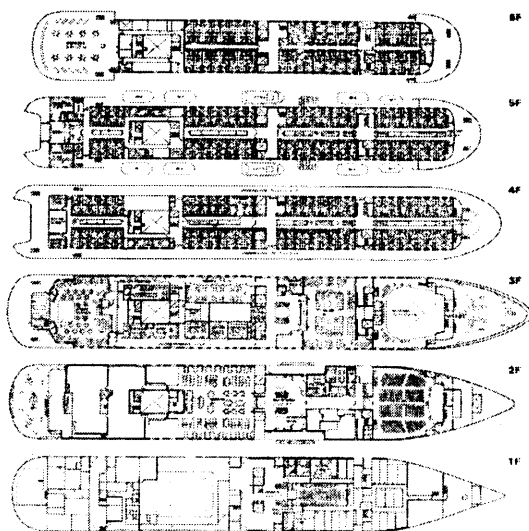


図 3 2 外洋クルーズ船の一般配置図

はシアター低部のあるB 1からサンデッキのある8 Fまでであるが、乗客の避難空間としては1 Fから6 Fまで考えれば十分である。乗客の避難空間の一般配置図概略を図3 2に示す。避難場所は4 Fの両サイドのプロムナードデッキである。本船の特徴は、甲板が多いこと、階段が多いことである。

階段が2 2個あるので想像距離は2 2個である。4 Fより上の甲板からは下へ降り、下の甲板からは上に昇る。図3 3に垂直断面の見取り図を示す。

計算すると滞留する場所はいずれも3 Fであった。そこで滞留場所を6箇所特定した。場所(1)～(5)は各階段の入口の場所で、(6)は船尾階段に行く出口である。

7. 2 計算方法

(1) 計算ケース

紙面の都合で次のケースのみを示す。
① 経路選択の夜パターンの基本ケース、その

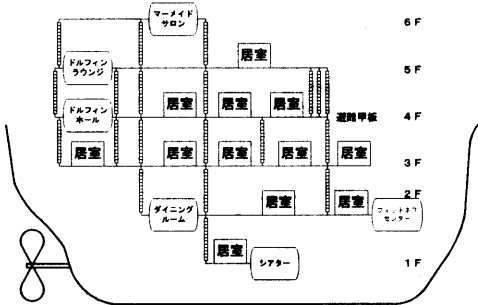


図3 3 垂直見取り図

最適ケース。

7. 3 計算結果

個の想像距離を変化させその最小避難時間のケースを準最適ケースとして図 に総避難時間と最大滞留時間を示す。これをベースにさらに、想像距離を変化させ、図 に最適ケースを求めた。また、これらの想像距離を変化させた全シミュレーションについて、総避難時間と最大滞留時間の関係を図にすると図3 8のような関係がある。基準値と比較すると、総避難時間よりも滞留時間の方がシビアである。

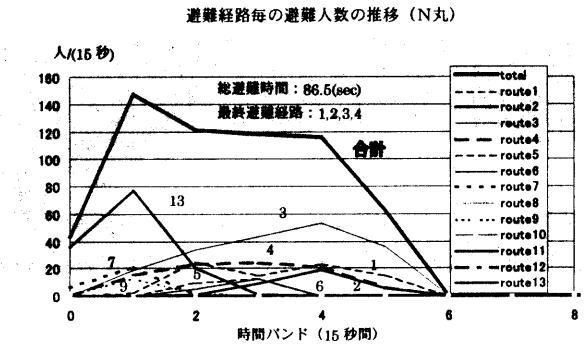


図3 4 避難経路毎の避難人数の推移
(固定経路)

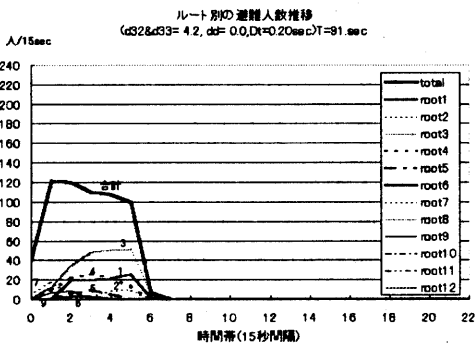


図3 6 避難経路毎の避難人数の推移
(基本ケース 最適ケース)

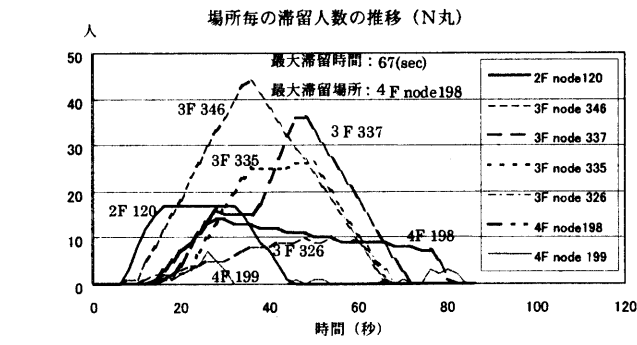


図3 5 場所毎の滞留時間 (固定経路)

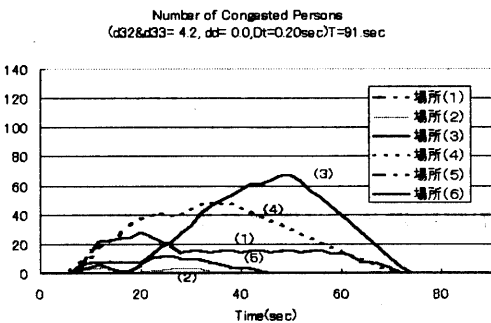


図3 7 場所毎の滞留時間
(基本ケース 最適ケース)

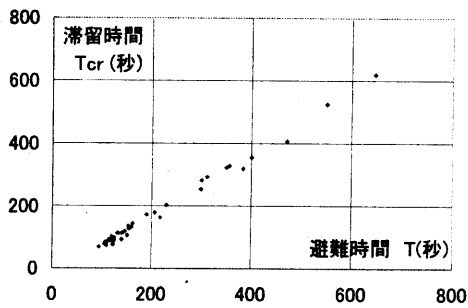


図 3.8 総避難時間と最大滞留時間

9 まとめと今後の課題

固定経路の避難シミュレーションと経路選択の避難シミュレーションツールを開発し、避難経路解析評価方法を設定し、それに応えられるようにバージョンアップし、同時に経路のボトルネックを示し、最適経路を導出し、設計に用いられるようにした。

経路選択の避難シミュレーションでは集団心理で避難するという人間モデルを提唱し、実船実験でその妥当性を検証した。

本シミュレーションは改訂 SOLAS 条約の避難解析の義務化に呼応した避難解析である。

今後の課題として、航海中のリスクマネジメントの判断ツールとして開発する予定であり、またその中に交通弱者の挙動を組み込みバリアフリー化にも対応する避難安全評価方法とする予定である。

なお、本研究の一部には日本財団の助成事業である(社)日本造船研究協会 RR48WG との共同研究の成果を含んでいる。

文献：

- (1) 勝原光治郎・亀山道弘・宮田修・高杉喜雄・阪根靖彦：船上の避難行動のシミュレーションⅠ，日本航海学会論文集，96号，pp.283-293，1996年3月
- (2) 勝原光治郎・亀山道弘・宮田修・高杉喜雄・阪根靖彦：船上の避難行動のシミュレーションⅡ，日本航海学会論文集，98号，pp.141-150，1998年3月
- (3) 勝原光治郎・亀山道弘・宮田修：船上の避難行動のシミュレーションⅢ，日本航海学会論文集，第100号，pp.199-207，1999年3月
- (4) 勝原光治郎・岡崎忠胤・亀山道弘・宮田修：ヒューマンファクターを考慮に入れた船舶での避難行動シミュレーション，安全工学 Vol.38 No.6(1999)
- (5) M.Katuhara, M.Kameyama, O.Miyata, Y.Takasugi and Y.Sakane : "Simulations and Demonstrations of Human Escape on Board", RINA Conference on Escape, Evacuation & Rescue Design for the Future, Nov. 1996
- (6) 勝原光治郎：船舶における群集の避難シミュレーション，第7回交通流のシミュレーションシンポジウム講演概要集，2000.11
- (7) 船舶設備規程(昭和9年2月1日通信省令第六号)第百条
- (8) 船舶検査心得 運輸省海上技術安全局，pp3-1-24~3-1-28 (3設備関係 3-1 船舶設備規程第2編居住、衛生及脱出設備 第6章脱出設備)
- (9) 社)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報告書 昭和41年
- (10) 日本建築学会編：建築設計資料集成3 単位空間Ⅰ pp54-55 1980
- (11) IMO 文書 Resolution A.757(18) "STANDARDS FOR THE CALCULATION OF THE WIDTH OF STAIRWAYS FORMING MEANS OF ESCAPE ON PASSENGER SHIPS" adopted on 4 November 1993 (Agenda item 11)
- (12) IMO 文書 SOLAS/CONF.3/46 ANNEX Page8-10
- (13) IMO 文書 FP 42/3 "RO-RO FERRY SAFETY" 12 September 1997
- (14) GUIDE FOR THE EVACUATION ANALYSIS OF RO - RO PASSENGER SHIPS, RINA, 1999.1
- (15) 戸川喜久二：群衆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，pp9 - 14，1956年11月
- (16) 山田常圭：建物の火災安全シミュレーション

技術の概観 シミュレーション第6巻第2号
pp2-10 昭和62年7

- (17) 位寄和久：避難行動モデルに関する研究—火災状況の認識と心理状態を考慮したモデルの提案—, 日本建築学会論文報告集, 第325号, pp125 - 133, 1983年3月
- (18) 村山雅己・吉田公一・板垣恒夫：避難シミュレーションによる避難経路の評価に関する研究—船体傾斜時における避難—, 日本造船学会論文集, 第188号, pp441 - 448, 2000年6月
- (19) 室崎益輝：建物火災のモデリングの現状と展望(その1 建物火災モデル開発の経過と現状), 火災学会誌, Vol.36, No.5 (164), pp1 - 11, 1986年10月
- (20) 室崎益輝：建物火災時の避難予測モデルについて, 火災学会誌, Vol.38, No.2 (173), pp12 - 20, 1988年4月
- (21) 松下聡：待ち行動を含む群集歩行シミュレーションモデルの研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第433号, pp79 - 88, 1992年2月
- (22) 「建築物の防火設計法の開発」報告書 第3巻 避難安全設計法, 建設省, 1988年12月
- (23) 吉田克之：避難行動予測における図式解法の問題点とEBモデルの提案—EBモデル(伸縮ブロックモデル)による群衆流の解析 その1—, 日本建築学会計画系論文報告集, 第409号, pp35 - 42, 1990年3月
- (24) 吉田克之：EBモデルによる集団歩行特性の検討および在来の図式解法の補正方法の提案—EBモデル(伸縮ブロックモデル)による群衆流の解析 その2—, 日本建築学会計画系論文報告集, 第413号, pp29 - 38, 1990年7月
- (25) 野口憲一：避難時の歩行支障に関する実験研究および動揺評価値の提案—人間の行動性に基づいた浮遊式海洋建築物の動揺評価に関する研究 その2—, 日本建築学会計画系論文報告集, 第479号, pp233 - 242, 1996年1月
- (26) 田口賢士・外山嵩・室津義定・岸光男：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, 日本造船学会論文集, 第142号, pp333 - 341, 1977年6月
- (27) 福地信義・今村照幸・篠田岳思：人的要因を

考慮した火災時の避難安全性に関する研究, 日本造船学会論文集, 第184号, pp579 - 590, 1998年6月

- (28) Daniel M. Alvord, *Status Report of Escape and Rescue Model*, NBS - GCR - 83 - 432, 1983.6
- (29) 造研 RR48WG 報告書 (1999, 2000 年度)