人的要因を考慮した火災時の避難安全性に関する研究

正員 福地信義* 正員 篠田岳思*
正員 今村照幸**

Establishing the Methodology for Safe Evacuation in the Event of a Marine Fire

by Nobuyoshi Fukuchi, *Member* Takeshi Shinoda, *Member*
Teruyuki Imamura, *Member*

Summary

It may be difficult to establish the methodology for safe evacuation in the case of outbreak of a marine fire, by originating in the intricacies of the fire spread phenomena and the uncertain behaviors of evacuation based on human factors without uniformity. The suitable countermeasures have to be taken to cope with rapid spreading smoke that is apt to endanger even for personnel away from the division of fire outbreak. Besides, the existence of un-measurable factors such as the ambiguity of human behavioral patterns should be necessary to be considered the redundancy system for safe evacuation. Accordingly, the designing criteria for the safety of evacuation system consisted in evacuating routes and human flow control, is desirably instituted by grasping the personnel behavior based on the associated in simulations of smoke diffusion and evacuation.

The evacuation movement can be predicted considering the decrease of walking speed and the occurrence of self-isolation in psychological action with lowering smoke layer by the proposed method in this paper. The measured index of risk for the evacuation system is defined by using the results of a simultaneous simulation of smoke diffusion and evacuation. This risk index may be used the comparison between various safety systems and its validity is confirmed using the model of a common space in a typical cruising ship.

1. はじめに

船舶や海洋構造物において火災が発生した場合、燃焼に伴う高温の火熱だけでなく、火源から急速に広がる煙が人命安全上の脅威となり、これを回避する安全対策が必要である。火災時の避難安全性を確保する方策を考える上での難しさは、火災現象や煙流動の複雑さに加え、緊急時の人的要因が事態の進展に極めて大きく影響することであり、これらを踏まえた避難行動の的確な予測を行うことが不可欠である。この問題に対し、避難者が計画通りに整然と避難することを仮定した様々な避難モデルが提案されている

が、避難者が煙や火災等に遭遇したときの反応行動や緊急時の情報処理過程を考慮した避難行動モデルは少ない。

本研究では、年齢別の歩行特性を考慮した群集流の行動モデルを基本として、非常時の反応行動である煙層降下による歩行速度の低下や思考遮断の状態生起を組み込んだ避難モデルを構築している。また、避難安全設計のための評価指標として、避難行動と煙流動の数値シミュレーション結果とを重ね合わせた、避難経路の危険度および人命に危険が及ぶ重大危険度を定義した。この避難モデルにより、客船の公共区画における避難行動の数値シミュレーションを行い、避難開始の遅れ、煙による歩速の低下、遮断状態の発生等の人的要因が避難状態に与える影響を調べた。さらに危険度を用いて人的要因に対する避難安全性の評価を行い、安全性指標としての有効性を示し、避難安全システム設計では人的要因を考慮することの重要性を明らかにする。

* 九州大学大学院工学研究科

** 川崎重工業(株)

2. 避難計画に係わる人的要因

避難計画には、火災時に混乱や迷いが起こらないような避難動線計画を立て、全空間要素の許容量と流量を検討した上で各開口部の幅員を決定し、さらに防火、防煙対策をはじめ非常照明等の適正配置、内装材の不燃化を行って安全に避難できる限界時間の延長を図ることが必要である¹⁾²⁾³⁾。

2.1 避難時の心理状態と行動

(1) 避難行動の傾向

火災時の人間の行動は様々であるが、一般的な習性として帰巢本能、退避本能、指光本能、追従本能、左回り本能がある。この他に、開かれた空間の方を目指す、混迷の度がひどくなると狭い隅の方に逃げ込む傾向などが行動に出る⁴⁾。

この中で特に問題となるのは追従本能であり、客船などでは正確な避難経路を認知していない乗客が多いことを考えると、パニック状態が発生し、誤った避難路を選択した集団に追従した場合には多くの犠牲者が出る可能性がある。つまり、明確な避難経路の表示や的確な避難誘導が特に重要であるといえる。

(2) 避難開始までの行動

人間が火災を知覚し、避難開始するまでの時間は、区画の管理状況、火災報知器の設置状態、通報・伝達システムの信頼性などに依存している。特に、非常ベルによる通報では、日頃誤作動やいたずら等の非火災報に曝されることが多く、誤報の判断や確認のために避難行動への移行が遅れるケースが多く見られる。

(3) 緊急時の情報処理プロセス

火災などの緊急時の情報処理は次のような過程によるものと考えられている⁵⁾。

- i) 異常が知覚されると、危機状態に対する定型的な判断パターン（理解スクリプト）が活性化される。
- ii) 状況に対する結果が予想（状況予期）され、日常状態とは異なる状況の再定義がなされる。
- iii) 定型的な行為パターン（行為スクリプト）が活性化され、対応行為に対する結果と可能性が予測される。
- iv) これにより、恐怖感を低減させるために情動のコントロール（内的対応）と危機の回避のため外部環境へのコントロール（外的対応）がなされる。
- v) iv)の対応により生じた「ハラハラ」「ドキドキ」という生理的な喚起とストレスが与える情動や認知活動への制約と外界からの応答により、現状認知のモニターおよび時間や緊急時の知識・判断能力などの資源の効率的な配分のための制御が行われ、ii)へフィードバックされる。
- vi) ただし、ii)での状況予期が厳しい結果の場合には、恐怖の情動のみ卓越して“遮断”状態となりパニックが起こる。

なお、情報処理の各プロセスの生起状態を推定するために、過去の大規模火災（陸上）事例に関する避難行動の分析データを appendix に記載する。

(4) 遮断状態での行動

火災時のような緊急時の避難行動において、煙あるいは火勢を見たりすると、自分の行動判断がつかない遮断状態に陥ることがある。この場合には動けなくなったり、パニックを起こして、逃げ遅れてしまう危険性がある。そのため、遮断状態の発生の可能性を考慮して避難安全性の評価をする必要がある。

なお、遮断状態の発生を回避するためには、火災・避難訓練等により理解スクリプトや行為スクリプトを増やし、対応行為への移行を容易にする必要がある。

2.2 歩行速度

(1) 平均歩行速度

避難行動シミュレーションでは年齢層に応じた平均歩行速度を必要とするので、Fig. 1 に示す 5 歳刻みの日本人の平均歩行速度⁶⁾ から、歩行が遅く判断力の弱い 9 歳以下の低年齢層、10 歳～59 歳の青年・成人層、歩行は遅いが判断力のある 60 歳以上の高年齢層の 3 グループに分類すると平均歩行速度はそれぞれ 1.0 m/s、1.3 m/s、1.0 m/s となる。

(2) 煙層降下に伴う歩行速度の変化

人間の歩行速度は歩行姿勢に影響を受けて変動する。火災時の煙層降下に伴って歩行姿勢に制約を受けることにより、歩行速度がどのように変化するかを調べるために、模擬歩行実験を行った。実験は天板を煙と見立て、天板部分の高さを 1.5 m、1.2 m、0.9 m、0.6 m と変化させ、6 m 間の通過時間を計測した。なお、各天板の高さにおける歩行姿勢および 20 人の成人被験者から求めた歩行速度を Fig. 2 に示す。

3. 避難シミュレーションと安全性評価

3.1 避難モデルの概念

火災時に避難者が基本的には避難口に向かって避難することを仮定して、避難者の滞留の発生や各空間通過に要する時間等を考慮した避難状態を予測するための避難行動モ

Fig. 1 Ordinary walking speed regarding age

(a) Walking postures against various ceiling heights

(b) The relation between walking speed and ceiling height

Fig.2 Walking postures and speeds against various ceiling (smoke layer) heights

デルを考える²⁾。

(1) 避難者モデル

避難開始時点では避難者は全て移動出来るものとし、避難者全体を歩行（移動）速度に応じて3つのグループに分け、それぞれ異なる初期歩行速度を設定する。これによって避難者の行動能力のばらつきを群として盛り込むとともに、模擬実験より得た煙層降下による歩行速度の低下も考慮した避難モデルとする。なお、介護が必要な身障者や病人が居る場合には、これらで最低速グループを構成する。

(2) 避難空間モデル

避難空間としては、火災時に避難者が存在する空間、避難者が移動する空間、および最終避難場所となる空間を扱い、避難に関係がない場所は除くことにする。このモデルでは、(i)初期時に避難者が存在し、出口が1つ以上ある空間（居室、オフィス、劇場など）を用途空間、(ii)入口と出口ともに1つの空間（廊下など）を通路、(iii)入口と出口の合計が3つ以上の空間（ホール、ロビーなど）を合流空間、および(iv)入口のみで最終避難場所となる空間を避難空間として設定する。

また、避難者が移動する空間に複数の出口がある場合には、その空間で避難者の退出が最も早く終了するように自動的に避難者の通過量を配分する。

3.2 避難シミュレーションの計算法

(1) 避難行動の設定

避難行動に要する時間は、避難開始時間、避難者の歩行速度および用途空間における避難者の滞留の発生などに大きく左右される。例えば、避難時の歩行速度は、避難者の

行動能力、避難者の密度、経路の視認の程度、心理的状態などに左右される。

計算例では、避難者の3つのグループに対して、居室や廊下等の水平部の初期歩行速度は年齢層に基づいた平均歩行速度とし、火災進展に伴う煙層降下による歩行速度の低下を考慮するため、避難過程で各グループの歩行速度を煙層高さに応じて再設定することにする。

ただし、階段部では各グループとも水平部の50%の歩行速度とし、狭い出口や階段などで多人数が退出しようとして起こる滞留は開口部流動係数を設定して滞留の発生の有無を判断する。なお、開口部流動係数は水平部において1.5(persons/m・sec)、階段部では1.3(p./m・sec)とした。

(2) 避難者の移動計算²⁾

i) 用途空間において出口へL字型経路で到達する場合
オフィスなど室内に机等がある場合には、避難者は出口に直進できず、Fig.3(a)に示すようなL字型の経路で出口に到達すると仮定する。この場合の避難開始から時間 t (sec)までに出口に到達する避難者数 $N(p.)$ は次式で表せる。

$$N = n_0 \frac{(ut)^2}{2} - n_0 \frac{(ut-a)^2}{2} H_v \left[t - \frac{a}{u} \right] - n_0 \frac{(ut-b)^2}{2} H_v \left[t - \frac{b}{u} \right] \quad (1)$$

ここに、 a, b はそれぞれ用途空間の辺の長さ(m)、 u は避難者の歩行速度(m/s)、 n_0 は用途空間内の初期避難者密度(p./m²)であり、 $H_v[x]$ はHeaviside階段関数を表す。

ii) 用途空間において出口へ求心的経路で到達する場合
ディスコのように用途空間内に歩行の障害となるような物がない空間では、避難者はFig.3(b)に示すように出口に直進し、求心型の経路となるもの仮定する。避難開始から時間 t までに出口に到達する避難者数 $N(p.)$ は次式で表せる。

$$N = n_0 \frac{\pi(ut)^2}{4} - \frac{n_0}{2} \{ (ut)^2 \theta_1 - aut \sin \theta_1 \} H_v \left[t - \frac{a}{u} \right]$$

Fig.3 Evacuation paths to exit in various purpose spaces

$$-\frac{n_0}{2} \{ (ut)^2 \theta_2 - but \sin \theta_2 \} H_v \left[t - \frac{b}{u} \right] \quad (2)$$

ただし、 $\theta_1 = \cos^{-1}(a/ut)$ 、 $\theta_2 = \cos^{-1}(b/ut)$

iii) 用途空間における滞留時の避難者の移動

用途空間に複数の出口がある場合には、避難者は滞留の少ない出口を選択して移動すると考えられるため、滞留を最短時間で解消する時間 $t_{0,\min}$ は次式で与えられる。

$$t_{0,\min} = \sum_i N_{\text{exit},i} / \sum_i m_{\text{exit},i} \quad (3)$$

ここに、 $m_{\text{exit},i}$ は出口 i の避難者流出速度 (p./sec)、また $N_{\text{exit},i}$ は移動前の出口 i の滞留量 (p.) である。

従って、用途空間の滞留が最も早く解消するような各々の出口への滞留の分配量は次式で表される。

$$N_{\text{exit},i}^* = m_{\text{exit},i} \cdot t_{0,\min} \quad (4)$$

ここに、 $N_{\text{exit},i}^*$ は移動後の出口 i の滞留量 (p.) である。

iv) 通路内の避難者の移動

通路内の移動の計算は、避難者の移動方向に対してその空間を $u\Delta t$ の長さ毎に分割する。ここで、 Δt は計算の時間間隔であり、計算では各時間ステップ毎に分割した通路の避難者を出口側に移動させる。

v) 合流空間内の避難者の移動

合流空間内の入口と出口は各々仮想の通路によって連結されているものとみなし、空間内では避難者が仮想の通路内を、iv) の移動と同様に、出口に向かって移動すると考える。

なお、合流空間に複数の入口と出口がある場合には、各々の入口から空間に流入した避難者は、各出口までの距離、避難者の流入速度、避難者滞留量を考慮して、最短時間で退出できると予想される出口を選択して移動するものと仮定する。

vi) 避難空間内の避難者

避難者は避難空間に避難した時点で避難終了とみなすので、それ以降の移動は考慮しない。

vii) 避難完了の判定

避難空間内に流入した避難者数が初期避難者数に達した時点をもって避難完了とする。

3.3 煙流動シミュレーション

火災進展に伴う煙層降下による歩行速度の低下や思考遮断を考慮するために、煙流動シミュレーションを並行して行う必要がある。ここでは、煙層の界面形成を考慮した上部の高温煙層部と下部空気層を仮定する2層ゾーンモデルを用いて行う。なお、計算は文献⁷⁾⁸⁾に従った計算プログラムを用いて行った。以降、2層ゾーンモデルによる解析の概略を述べる。

2層ゾーンモデルでは、各区画内の煙層と下部空気層の各ゾーンに対して質量、化学種、エネルギーの収支関係、気体の状態式等から導かれる化学種の濃度、区画内ガス濃

度、およびゾーンの体積を与える状態方程式を考慮する。

(1) 化学種の濃度収支方程式

ゾーン内部の既存量、境界を通して流入およびゾーン内部での化学反応(燃焼)による生成・消費による化学種 k の質量分率(濃度)に関する収支方程式は、ゾーン内の気体の質量収支と化学種(酸素、二酸化炭素、一酸化炭素、水分、窒素)の収支より、次式のように表せる。

$$\rho V \frac{dw_k}{dt} = \sum_j (w_{i,j} - w_k) \dot{m}_j + \dot{n}_k \quad (5)$$

ここに、 t は時間 (sec)、 ρ はゾーンの気体密度 (kg/m³)、 V はゾーンの体積 (m³)、 $\dot{m}_j$ はゾーンの境界から流入する気体の質量流速 (kg/sec) であり、添字 j は対象空間に隣接する空間を意味し、 $\sum_j$ は流入が生じる隣接空間の境界について和をとるものとする。また、 w_k は化学種 k の質量分率 (kg/m³)、 $\dot{n}_k$ はその化学種の生成速度 (kg/sec) であり、酸素では消費のため負値となり、窒素では0である。

(2) 区画内ガス温度の状態方程式

ゾーン内に流入するエンタルピー、熱エネルギーおよび仕事について考え、これに相変化のない場合のエンタルピー関係、火災により生成される燃焼ガスの比熱値がその組成の違い拘わらず大きく差異がない仮定、および一般に居住区画のようなある程度隙間のある空間では圧力変化が小さいことを仮定すると、区画内ガス温度の状態方程式は次のようになる。

$$c_p \rho V \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_H + \Delta H \dot{m}_b + c_p \sum_j (T_j - T) \dot{m}_j \quad (6)$$

ここに、 $\dot{Q}_H$ は熱伝達によりゾーンに加わる正味の熱量 (kW) である。また、 c_p は空気平均比熱 (kJ/kg・K)、 T は温度 (K)、 $\dot{m}_b$ は燃焼速度 (kg/sec)、 ΔH (正値) は単位燃焼量当たりの原系と生成系のエンタルピー差(燃焼熱) (kJ/kg) を表す。

(3) ゾーンの体積の式

燃焼ガスと空気の状態式は実際的にはあまり差がないと考え、さらにある程度の隙間のある空間を対象として圧力変化項を無視すれば、(6)式より次式を得る。

$$c_p \rho_s T_s \frac{dV_s}{dt} = \dot{Q}_{H,s} + \Delta H \dot{m}_{b,s} + c_p \sum_{j \in s} T_j \dot{m}_j \quad (7)$$

ここに、 s は上部層を示す添字である。また、下部層の体積は区画の体積から上部層の体積を減ずることにより得られる。

3.4 避難安全性の判定

一般に避難者が避難過程で煙に曝されなければ、安全に避難完了することが出来るが、避難時に避難者が煙に曝されるかどうかは、煙の流動状態と避難経路に関する様々な要因が絡んでいる。そこで、煙流動シミュレーションと避

難シミュレーションを行い、その結果を重ね合わせて安全性を判定することとし、そのための危険度の定義を行う⁹⁾。

(1) 避難経路の危険度

火災時の避難行動では、その避難経路の選択により危険度が増すと考えられる。ここでは、各区画からの避難者数、煙層降下と遮断状態に伴う歩行速度の低下および避難距離を考慮して、時刻 t における避難経路の危険度を次式で定義する。

$$R_{ev} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^G [1 - r_{i,j}(t)] \left[\frac{m_{i,j}(t)}{M} \right] \left(\frac{x_i}{L} \right) \quad (8)$$

ここに、 $r_{i,j}$ は歩行速度の変化率 ($= u_{i,j}(t)/u_j^0$) であり、 $(1 - r_{i,j})$ は煙による危険の割合を意味するものとする。なお、 u_j^0 は避難者 j グループの初期歩行速度 (m/sec) であり、 $u_{i,j}(t)$ は i 区画内の j グループに属する避難者の時間 t における歩行速度である。また、 N は区画数、 G は避難グループ数、 $m_{i,j}$ は i 区画内の j グループに属する避難者の人数、 M は総人数である。さらに、 x_i は各区画中心から最終避難口までの距離、 L は各区画から避難口までの総距離である。

この指標 R_{ev} が大きいほど危険性が高いこと、つまり避難経路や船室配置または防煙対策に問題があることを示す。なお、 $R_{ev}=1.0$ は全員が避難場所から最も遠い区画に居て、煙により致死状態にあることを意味する。

(2) 重大危険度

煙層がある高さまで降りてくると、歩行速度が急激に低下する。模擬歩行実験より、その限界は歩行速度変化率では $r_{i,j} \leq 0.5$ に当たり、この場合では人命が非常に危険な状態に陥ると考えられる。そこで(8)式から $r_{i,j} \leq 0.5$ の場合の危険度を取り出して重大危険度 $D_{ev}(t)$ とする。これは、 $D_{ev}(t)$ が大きいほど、逃げ遅れによって命を落とす人数が増えることを意味する。

4. クルーズ客船“A”における避難シミュレーション

ここでは、クルーズ客船“A”における火災時の公共区画を対象に煙流動および避難行動のシミュレーションを行う。その結果から3.4で定義した危険度を算定し、避難安全性に対する人的要因の影響を検討する。

4.1 解析モデル

(1) 避難対象区画

避難シミュレーションは、Upper Promenade Deck (A甲板)、Promenade Deck (B甲板)、Lower Promenade Deck (C甲板) の3層甲板の区画における避難行動を解析の対象とした。各甲板の区画配置と乗客・乗員422名の初期配置をFig. 4に示すが、公共区画が大半であり、利用客が多い時間帯Day Boat時の火災発生を想定した。火災はFig. 4の斜線部分の居室から発生したものとし、乗

Upper Promenade Deck (A-deck)

Promenade Deck (B-deck)

Lower Promenade Deck (C-deck)

Fig. 4 The general arrangement of a common space of cruising ship “A”

客・乗員は想定した避難行動のシナリオに従い、C甲板にある2カ所の避難口を目指し、避難行動を行うものとする。

(2) 避難行動のシナリオ

各用途空間内における避難者の避難開始の遅れが避難完了時間や安全性にどれだけ影響するかを調べるために、Fig. 5に示すような4種の避難行動のシナリオを想定した。各シナリオは、陸上火災の避難行動データと2.1(2)(3)で述べた避難開始までの行動および緊急時の情報処理プロセスを参考に、各避難行動は以下のような時系列とした。

[行動A]: 火災室の乗客が火災を発見し、避難開始するとともに火災発生を乗組員へ連絡する。

[行動B]: 乗組員が火災発生場所を確認し、火災階の乗客へ避難するように指示する。

[行動C]: 非火災階に火災発生との連絡を行う。連絡を受けた乗組員は非火災階の乗客へ避難するように指示する。

i) シナリオ1

[行動A] 0秒 (火災発生と同時に火災発見), [行動B] 30秒, [行動C] 60秒

Fig. 5 Scenarios of evacuating initiation process

ii) シナリオ 2

[行動 A] 0 秒, [行動 B] 30 秒, [行動 C] 180 秒 (非火災階への連絡の遅れや連絡後に非火災階の乗客が直ちに避難行動に移らず, 避難開始が遅れる)

iii) シナリオ 3

[行動 A] 120 秒 (火災室の乗客が火災を発見に時間がかかったり, 命を落としていたりして火災発生との連絡が遅れる), [行動 B] 150 秒, [行動 C] 300 秒

iv) シナリオ 4

[行動 A] 180 秒 (シナリオ 3 よりさらに 60 秒遅れて火災発生との連絡), [行動 B] [行動 C] 360 秒 (避難発生との連絡が遅れ, 船内放送などで全船に避難指示が出て, 非火災階, 火災階とも同時に避難開始)

クルーズ客船の船客・乗組員の人数と年齢を仮定し, Fig. 1 に基づく歩行速度と遮断状態の生起の組み合わせにより 3 グループに分け, その各グループの人数構成比と歩行速度を Table 1 のように設定した。また, 煙層降下による歩行速度の低下の割合は, 2.2(2)の実験に基づき, Table 2 に示すように決めた。なお, 遮断状態の生起は Appendix に示す避難行動の分析データ (内的対応の項) から推定して約半数と考え, B グループに対応させてい

Table 1 The composing ratio and ordinary walking speed of each group

Item	Evacuating persons		
	A-group	B-group	C-group
Composing ratio	30.8 %	52.3 %	16.9 %
Walking speed	1.3 m/s	1.3 m/s	1.0 m/s
Self-isolation	none	break out	none

Table 2 The ratio of evacuating speed per ordinary walking speed

Height of smoke	Evacuating persons		
	A-group	B-group	C-group
1.5 m	88 %	88 %	88 %
0.9 m	72 %	10 %	72 %
0.6 m	10 %	10 %	10 %

る。これにより, i) 煙層高さが 0.9 m になった時点で遮断状態の発生により B グループのみ歩行速度が 10% へ低下し, さらに ii) 0.6 m になった時点で全グループの歩行速度が 10% へ低下するものと仮定した。

4.2 シミュレーションの結果

(1) 煙流動の状態

4.1(1) に述べた解析モデルに対して, 煙流動の数値シミュレーションを行った。その結果から各甲板のホールと通路の煙層高さの時間的推移を Fig. 6 に示す。なお, C 甲板の 2 本の通路端, B 甲板のオフィス, シアター, A 甲板のバー, テラス, ショッピングアーケード, カジノ, 各甲板のホールおよびアトリウム (上部より) は常に自然換気が行われているものとした。

計算結果では, 火災発生後 150 秒で A 甲板ホールの煙層高さが 1.5 m に低下し, 220 秒で A 甲板ホールの煙層高さが 0.9 m, A 甲板の通路の煙層高さが 1.5 m に低下しているが, 他の空間内の煙層高さは避難行動に対し特に問題ないものと思われる。ただし, 火災発生後 400 秒前後から B 甲板ホールの煙層高さが急激に低下しており, この時点で B 甲板ホールに避難者が存在した場合かなり危険な状態であることが予測できる。

Fig. 6 The variation of height of smoke layer as time proceeds

(2) 避難の状況

避難行動の数値シミュレーションを次の4ケースについて行い、人的要因の影響を調べた。

(a) 歩行速度を一定にした場合

(b) 煙層降下による歩行速度の低下を考慮した場合

(c) 煙層降下による歩行速度の低下とBグループのみの遮断状態の発生を想定した場合

(d) 煙層降下による歩行速度の低下と全グループの遮断状態の発生を想定した場合

なお、(b)、(c)、(d)の場合、Fig. 6に示す煙層高さの計算結果より、火災発生後150秒でA甲板ホール、220秒でA甲板のホールと通路での歩行速度が低下するものとした。

(a) In the case of constant walking speed

(b) Considering the decrease of walking speed with lowering smoke layer

(c) Considering the decrease of walking speed and the outbreak of self-isolation (at 220 sec.) with lowering smoke layer

Fig. 7 The variation of evacuation number at the specified spots with time (Scenario-1)

シミュレーション結果から各デッキのホールの在室者およびA甲板からB甲板への階段における通過人数の変化をFig. 7～Fig. 10に示す。また、シナリオ4について、(b)ケースでの避難状況をFig. 11に示す。

これらの計算結果から避難状況を分析すると次のようになる。

i) シナリオ1に関しては、何れのケースともに避難完了時間に差が見られない。これは、A甲板ホールの煙層高さが0.9mに低下し、歩行速度が72%に低下する時点で全ての避難者の脱出が完了しているためである。

ii) シナリオ2に関しては、220秒で遮断状態が発生する(c)ケースはA甲板ホールの避難者の脱出に時間がかかり、それに伴って(a)ケースより避難完了が97秒の遅

(a) In the case of constant walking speed

(b) Considering the decrease of walking speed with lowering smoke layer

(c) Considering the decrease of walking speed and the outbreak of self-isolation (at 220 sec.) with lowering smoke layer

Fig. 8 The variation of evacuation number at the specified spots with time (Scenario-2)

Fig. 9 The variation of evacuation number at the specified spots with time (Scenario-3)

Fig. 10 The variation of evacuation number at the specified spots with time (Scenario-4)

Fig. 11 Simulation results of evacuation behavior at periods 0, 420, 450 sec. (Scenario-4)

れが生じている。

iii) シナリオ 3, 4 については、ともに非火災階の避難開始時点で既に A 甲板ホールの煙層高さが 0.9 m に達しているため、220 秒で遮断状態が発生する場合は (a) ケースより避難完了が約 100 秒の遅れ、330 秒で遮断状態が発生するときは (a) ケースより避難完了の約 130 秒の遅れが生じている。

iv) ただし、シナリオ 2, 3, 4 の何れの場合も、(b) ケースでは (a) ケースと比較して殆ど避難完了時間に差が見られない。これは、(a) ケースでは B 甲板ホールで滞留が見られるために A 甲板から B 甲板への階段がネックとなり、A 甲板ホールからの脱出がスムーズに行われず歩行速度をが低下した場合と同じような現象が起こるものと考えられる。

4.3 避難安全性の評価

シミュレーションの結果をもとに、3.4 で定義した避難経路の危険度の結果を Fig. 12, Fig. 13, および重大危険度の結果を Fig. 14 に示す。これらの結果から避難安全性を分析すると、次のようになる。

(1) 避難経路の危険度

a) 避難開始時間の影響

Fig. 12 から、避難開始時間が遅れると危険度のピークおよび累積危険度が高くなることが顕著に確認できる。特

Fig. 12 Risk index of evacuation route in the case of constant walking speed

にシナリオ2は、シナリオ1と比較してピーク値で5倍、累積値で7.5倍と急激に危険度が増加している。これは、A甲板の避難者は煙層降下の著しいA甲板ホールを通過しなければならないが、僅か2分の避難開始遅れが影響したものと考えられ、早期の避難開始が極めて重要であることが分かる。また、シナリオ4における500秒からの危険度の上昇は、この時点でB甲板ホールへの煙の流入が始まって急激な煙層降下が起こることにより、逃げ遅れている避難者が危険な状態に置かれていることを示している。

b) 歩行速度低下と遮断の影響

Fig. 13より、何れのシナリオの場合も歩行速度低下を考慮することによって、危険度のピーク値の上昇が見られる。特にシナリオ2, 3, 4のように避難開始が遅れた場合には、A甲板ホールで逃げ遅れた避難者に対して暴露危険時間が長くなっている。

(2) 重大危険度

a) 避難開始時間の影響

シナリオ1, 2ともに重大危険度は生じないが、シナリオ3, 4ではFig. 14に示すように重大危険度が生じている。これは、A甲板における避難開始の遅れで避難者が生命の危険に曝され、A甲板ホールを通過しなければならないA甲板の避難者の殆どが逃げ遅れる可能性が高いことを意味している。

b) 歩行速度低下と遮断の影響

シナリオ3, 4ともに煙層降下による歩行速度の低下を

考慮した場合には、重大危険度のピーク値および累積重大危険度が増加している。また、Fig. 14から、歩行速度一定の場合と歩行速度の低下を考慮した場合の避難完了時間はほぼ同じであるが、歩行速度の低下を考慮した場合の累積重大危険度は増加しているのが分かる。これは、たとえ避難完了時間が同じでも避難者が危険に曝され、逃げ遅れの可能性には差があることを表している。

即ち、避難計画を立てる際に単に避難完了時間だけで判断するのではなく、煙層降下に伴う歩行速度の低下や遮断状態を考慮した避難モデルを用いたシミュレーションにより避難安全性の検討を行う必要があることを意味する。

5. 結 言

避難者の人的要因を考慮して、年齢などによる歩行速度のばらつきおよび煙層降下による歩行速度の低下と遮断状態の発生を組み込んだ避難モデルを構築し、客船における避難シミュレーションを行った。その結果に対して避難経路の危険度および重大危険度を適用し、以下の事が明らかになった。

1) 避難シミュレーションにより、避難完了までの過程が把握でき、考慮した人的要因に応じた避難経路の問題点が分かる。

2) 避難開始が遅れるほど、避難過程での危険度が高まり、即時避難のケースでは生じなかった致命的な重大危険度も増加する。また、煙層降下による歩行速度の低下や遮

Fig. 13 The variation of aggregated risk index as time proceeds

Fig. 14 The variation of fatal risk index as time proceeds

断状態の生起により、歩行速度一定の場合と避難完了時間がほぼ同じ場合でも、危険度が増加する。

3) 避難安全性の評価のために定義した危険度を適用した結果、危険度の有効性および避難安全性に対する人的要因の考慮の重要性を確認できた。

したがって、避難システム計画時の設計案に対し、危険度を安全性指標として適用することにより、予め避難安全性の評価が可能になる。ただし、避難行動に心理状態を精度良く組み込むには、さらに多くの事例分析が必要である。

参考文献

- 1) 防災システム研究会：建築防火の基本計画，オーム社，(1977)
- 2) 建築物総合防火委員会：建築物の総合防火設計法（第3巻）避難安全設計法，日本建築センター，(1989)
- 3) 田中孝義：建築火災安全工学入門，日本建築センター，(1993)
- 4) 安部北夫：パニックの人間科学，ブレーン出版（1986）
- 5) 池田謙一：認知科学選書9 緊急時の情報処理，東京大学出版会（1986）
- 6) 佐藤方彦他：人間工学基準数値数式便覧，技報堂出版（1992）
- 7) 日本建築センター：煙流動及び避難性予測のための実用計算プログラム解説書（第2版），新洋社（1992）
- 8) 田中，中村：建築内煙流動予測計算モデル，建築研

究所報告，No. 123，(1989)

- 9) 福地，篠田，吉田：火災時の避難安全性と評価指標について，西部造船会会報，第90号（1995）
- 10) 堀内三郎他4名：大洋デパート火災における避難行動について（その2）日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）(1974)
- 11) 斎藤平蔵他6名：火災と人間行動のシミュレーション（その3）在館者の行動・心理の法則性，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）(1977)

Appendix 大規模火災事故（陸上）事例に関する避難行動の分析データ

緊急時の情報プロセスにおける各過程の発生確率を推定するために、過去の大規模火災事故2件における避難行動の分析データを（事例，対象数/事例に係わった人数）として以下に示す。

（事例A）大洋デパート火災（熊本市，1973.5.15 死者103名）¹⁰⁾

（事例B）B事務所ビル火災（東京都，1975.11.20 死者なし）¹¹⁾

(a) 異常の知覚

- ・物理的兆候：炎，煙（A，44/137）(B，104/273)
- ・人為的兆候：人の騒ぎ（A，40/137）(B，32/273)，通報（A，50/137），非常放送（B，47/273），上司の命令（B，90/273），
- ・日常へのバイアス（偏向）：避難訓練と思った（誤認）（A，6/29）

(b) 状況予期 (有害性の評定)

- 生命が危ないと思った (A, 44/122) (B, 24/300), 心配だった (命, 家族) (A, 19/122) (B, 108/300)
- 心配なかった (状況判断) (A, 25/122) (B, 168/300), 避難訓練と思った (誤認) (A, 6/29)
- 何も分からなかった (知覚していない) (A, 20/122)

(c) 対応行為

- 内的対応: 生命の危機感 (A, 44/122), かなり恐ろしかった (A, 13/122), 心配だった (A, 19/122), 非常に不安 (B, 24/300), 不安感 (B, 108/300), ダメだと思った (A, 75/120), 何をしたいかわからない (A, 32/114), ダメだと思わなかった (A, 39/120)
 - 外的対応: ダメだと思わなかった (A, 39/120), 何らかの活動をした (B, 65/287), 避難行動をとった (A, 80/140) (B, 87/287), 荷物を出そうとした (A, 3/140), 消火器を取りに行った (A, 8/140), 大声で人に知らせようとした (A, 19/140), 友人や家族を探した (A, 6/140), 燃えている場所を確認しに行った (A, 13/140),
 - 待機行動: 誰かの指示を待った (A, 9/140), 様子をみる (B, 135/287)
-