リスク評価の船舶設計への応用・火災リスク評価手法の開発 - リスクベース設計に向けて

金湖 富士夫*、岡 秀行*、今里 元信*、大縄 将史**、伊藤 博子*、吉田 公一***

An Application of Risk Analysis to Ship Design : Development of Fire Risk Analysis – toward Risk-Based Design

by

Fujio KANEKO, Hideyuki OKA, Motonobu IMASATO Masashi OHNAWA, Hiroko ITOH and Koichi YOSHIDA

Abstract

Since around 1996, the authors have developed a fatality risk evaluation methods utilizing ship design information directory aiming at designing an individual ship. Risk is defined as a frequency of an accident and the fatalities caused by the accident, and accuracy of those is important for risk analysis. Furthermore when designing an individual ship it is not desirable to spend much time in risk analysis. The simulation based risk analysis method which is used in design of an individual ship was developed considering such things. SAFEDOR which is one of EU6 research projects, aims at Risk-Based Design which deals with safety as one of parameters of objective function not as a restriction. In SAFEDOR fatality risk is estimated using simulation programs, which are time-based flooding simulation, fire escalation simulation, evacuation simulation and etc. The approach is same as the ours.

In this paper an outline of the fatality risk estimation methods of an individual ship, data-base of ship design information developed for managing data in order to enable to carry out several simulations easily, methods for enabling to shorten time consumed for simulations and an example of fire risk analysis as an application of these developed methods are shown. Furthermore to improve accuracy of fire risk evaluation, fire escalation prediction methods are discussed, verification of a two zone model program and a CFD model program for prediction of fire escalation by experiments, and shoat time estimation method for obtaining accurate fire risk by combining a 2 zone model program and a CFD model program are proposed.

** 流体部門

^{*} 運航・システム部門

 ^{***} 国際連携センター長 原稿受付 平成 21 年 2 月 6 日 審 査 済 平成 21 年 3 月 10 日

目 次

1. はじめに・・・・・60
2. 火災リスク評価手法・・・・・61
2.1 個船リスク評価手法の全体・・・・・・61
2.2 旅客船のリスクレベルについて・・・・・64
 2.3 火災リスク評価手順・・・・・・・・・・・・65
3. シミュレーション実施の簡易化・・・・・・65
3.1 船舶 GA データベース・・・・・・66
3.2 変換プログラム・・・・・・・・・・・・・・・・・67
3. 2. 1 3次元画像データ(DXFデータ)
から FDS 入力データへの変換・・67
3.2.2 船舶 GA データベースから
二層ゾーンプログラム(BRI2002)
入力データへの変換・・・・・・68
3. 2. 3 3次元画像データ(DXFデータ)
から FDS 入力データへの変換・・68
4. 火災リスク推定の短時間化(シミュレー
ション実施の短時間化)・・・・・・・68
4.1 災害進展シナリオの数の削減方策の概要・・69
4.2 シナリオの致命度の順序関係・・・・・・・69
4.3 イベントの成功の前後関係が結果に
影響を与える場合・・・・・71
5. 火災リスク評価事例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
5.1 一般化イベントツリーの定量化·······72
5.2 煙感知器の作動時間の確率
密度関数の決定・・・・・・・・・・・・・・・・72
 3 イベントンークノスにわける イベントの倍用時間の推定
1 ** > トの現外时间の推足・・・・・・12
5.4 逆问题、0 为处····································
5.6 <i>μ</i> 災進展な上び渡難シミュレー
5. 6 八次進展わよい理無シミュレ ションの宇施
5 7 川スク解析・・・・・・・・・・・・・・・・
6 水 ⁽¹⁾ 」 2 力 推定の 真特 庶 化 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
6.1 水災現象の粉値予測モデル・・・・・・76
6.1.1 ^一 届 ゾーンモデル・・・・・・・76
6.1.9 CED チデル・・・・・・・・78
$6 1 3 \text{CFD} \neq \mathcal{F} \mathcal{V} \mathcal{V} $
現象の数値予測・・・・・・79
6. 1. 4 ±>b
 6.2 火災実験によるプログラムの検証・・・・・85
6. 2. 1 標準火災試験・・・・・・・・・・・ 85
 6. 2. 2 二層構造物火災試験・・・・・・・85
6.3 火災リスク推定の高精度化と
短時間化との調和・・・・・90
6. 3. 1 二層ゾーンプログラムによる
予側結果から FDS による

	6.	3.	2	中	規	模	旅	客	船	を	想	定	L	た	例	題	•	•	· 90)
7.	おわ	ヮり	に・・	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	•	•	·91	-
参	考文i	献・	•••	••	•••	•••	••	••	•••	••	••	••	••	••	••	••	•	• •	91	

1. はじめに

最近 SAFEDOR(Design for Safety / Operation / Regulation)と呼ばれる欧州の研究プロジェクト に代表されるリスクベース設計が注目されている ^{1),2)}。当所は、SAFEDORと同様のリスクベー ス設計を目的として研究プロジェクトを 1995年から5年計画で、㈱日本船舶技術研 究協会(旧名:(社)日本造船研究協会)との共同 研究にて実施し、その成果は同協会の委員会 (第 42 基準研究部会(RR42):船舶の確率論的 安全評価方法に関する調査研究)で審議され ³⁾、逐次進捗状況を IMO(International Maritime Organization: 国際海事機関)に報告し てきた 4),5),6)。 同プロジェクトの実施段階 では FSA(Formal Safety Assessment:総合 安全評価)の一環と考えていたが、内容はまさ に SAFEDOR が研究開発を実施しているリ スクベース設計手法の開発であった。同プロ ジェクトでは災害として火災だけでなく浸 水も考慮しており、IMOに提出した文書には 浸水と火災のリスクの定式化と事例につい て扱われている。その後は災害を火災に絞り、 当所の指定研究、特別研究として、さらに重 点研究の一部として、リスクベース設計に向 けての基礎的な検討を継続してきた。 SAFEDOR は 2005 年 2 月開始のため、同プ ロジェクトはリスクベース設計において 10 年ほど先行していることになる。予算の点で SAFEDORの方が当所および日本船舶技術研 究協会がこれまでリスクベース設計手法の 検討に投入してきた金額よりはるかに大規 模であるが、リスクベース設計のネックの 1 つであるシミュレーションを実施しなけれ ばならないシナリオの削減等の問題点の解 決方法の開発等では日本側の方が進んでい ると思われる。

SAFEDORの注目すべき点はリスクベース 設計手法の開発だけでなく、その設計手法を 実現させるための法的枠組みをも同時に検 討していることである。(例:油による汚染の 許容範囲の設定手段としての CATS の IMO への提案⁷⁾、リスクベース設計の承認手続き の提案⁸))等) 欧州諸国は SLA(Safety Level Approach)-GBS が IMO で確立されればリス クベース設計も可能となることを見込んで そのための準備をしているように思われる。日本でも上記の RR42 のプロジェクトや GBS プロジェクト等の研究成果を基にさらに発展させたリスクベース設計を可能とする方法の開発が必要と思われる。

ここでは、これまでに当所がリスクベース設 計のために実施してきた研究の概要を紹介す る。2章ではリスクベースによる安全評価手続 きの概要を述べ、3章では船舶設計の課程で船 舶のリスク評価を簡便に実施するためのデー タベース化と種々の変換プログラムについて、 4章ではシミュレーションによる火災リスク評 価を短時間で実施するため開発された手法に ついて、5章ではシミュレーションを用いた個 船のリスク評価の例示として、旅客船の火災リ スク評価を詳細に示す。さらに6章では、火災 リスク評価の精度向上のため、火災進展予測手 法の吟味、実験による火災予測手法の検証、さ らに二層ゾーンモデルプログラム CFD モデル プログラムの組合せによる短時間での高精度 火災進展予測手法を提案する。

シミュレーションを用いたリスクベース設計のキーワードとして3つ上げることができる。 それらは、「簡易化」、「短時間化」、そして「高 精度化」である。3章以降はそれらのキーワー ドで特徴付けられる。

2. 火災リスク評価手法

2.1 個船リスク評価手法の全体

そのまま放置すると事故に至る危険な状況(ここ ではハザードという語をこの意味で使用する)の発 生から事故の発生に至る過程を事故発生シナリオ、 事故発生直後から被災船舶の最終状態までの過程を 災害進展シナリオと呼ぶことにする。リスク評価で は通常それらを分離せずに事故シナリオと呼んでい る。

船舶の主な RCO(Risk Control Option:安全対策 のこと)として、事故発生の予防、事故発生後の災害 進展抑制、避難、捜索・救助の 4 つの分野がある。 これまではそれらの分野毎に安全対策が審議され、 基準化されてきた。その結果として確かに安全面で の向上がもたらされてきたと言える。このような複 数の分野での安全基準の強化は多重防護の思想から は妥当と考えられるが、安全のための過大な投資を もたらす恐れがある。推奨されているレベルの安全 を確保し、かつ経済的でもある RCO が望ましいの は明白で、このような RCO を推奨あるいは強制化 する安全基準を作成するためには安全を示す何らか の合理的な指標が必要である。リスクは安全の数量 化のための合意された指標であり、安全確保のた めの異なる分野の RCO の効果はリスクというス カラー量の減少で表されるため、それらの RCO が同じ土俵で比較可能となる。したがって、リス クが求まればどの分野の RCO でもその効果が定 量的に比較できるため、安全レベルを維持し、か つ費用の増加を最小限に止めるものを選ぶことが できる。

リスクは事故の発生確率(あるいは頻度)と、 事故が発生した場合の結果の重大性(人命損失数、 環境汚染量、財産喪失額等)との積として定義さ れる。リスクを求めるためにはそれらの推定が必 要である。船舶の分野では事故の発生数が多いた め、現状の事故の発生確率は、海難データおよび それに対応する母集団データから求められる。す なわち、対象期間内の事故発生数を同期間内の母 集団の大きさ(航行船舶数)で割れば良い。この 点で事故発生数が船舶分野と比べて比較的に少 ない原子炉等のプラントの事故と船舶の事故と の大きな違いである。原子力産業等の分野では事 故発生数が非常に少ないため、事故発生確率を求 めるには、ハザードの発生から事故の発生までの 過程を FT(Fault tree:フォールトツリー) ある いは ET(Event tree: イベントツリー)でモデル 化し、事故につながる種々の要素の確率を求めて から演繹的に事故発生確率を求めるという手順 になるが、船舶分野では、既存の船種であれば、 上述のように膨大な事故データと船舶データか ら求めることができる。さらに、事故時の被害の 大きさを推定する場合も、前者は事故数が少ない ため、事故実績から得られる人命損失数等の被害 の大きさだけでなく、事故発生後の考えうる災害 進展シナリオを推定し、それらのシナリオ毎に被 害の程度を見積もることが求められる。この結果 として、原子炉等のリスクの推定値は大きな不確 実さを伴うが、船舶のリスク評価の場合は大数の 法則より不確実さを極力小さくすることができ る。しかし、事故発生や災害進展を防止するため の新たな RCO の効果を定量的に評価するために は実績がないため、原子力施設や種々のプラント の場合と同様に、考えられる多数の事故発生シナ リオおよび災害進展シナリオ毎に RCO が及ぼす 影響を定量化しなければならないため船舶の分 野においても ET あるいは FT 等を用いて事故発 生確率の推定を行うとともに災害時の被害の程 度の推定の必要が生じる。

このように RCO 導入によるリスク削減効果の 定量化のためには複雑な過程を踏むことが必要と なる。各過程において専門家判断を活用すること ができるが、それのみの場合は得られた数値の信 頼性が疑問視されることになる。しかし、それらの 過程において理論モデル、実験、あるいはシミュレ ーション等の科学的により正確と思われる手法を 使用する場合はかなりの量の作業が必要となり、



図-2.1 船舶設計のリスク評価過程

現実的な時間でリスク評価が実施できるかどうかが 問題となる。本研究では後者の立場に立つリスク評 価手法の開発を目標としており、科学的でかつ作業 量が適当な種々の手法を開発してきた。すなわち、 1章でキーワードとして上げた「短時間化」の方策 が重要であり、4章でそれが説明される。以下にリ スク評価の詳細手続きについて述べる。

まず最初に、種々の RCO の効果をリスクで評価 するための包括的かつ体系的な手続きを確立するこ とは重要である。図-2.1 はこのために作成したもの であり、捜索・救助を除いて、RCO が船舶の事故発 生、ないしは災害進展、避難に与える物理的な過程、 およびその効果の包括的な評価過程を示している。

図・2.1 内の船舶の構造、運航に関連する種々の要素のうち、ハードウエアに分類される要素は、運動、 破孔生成、浸水、火災、避難等の種々のシミュレー ションプログラム内にモデル化される。RCOがハー ドウエアであるなら、同様にモデル化され種々のシ ミュレーションプログラムに組み込まれてその影響 が解析され、事故の状況、人命損失数等が推定され る。同様に、ヒューマンファクターに分類される要 素は、ヒューマンファクターのモデル化を通して同 モデルを用いたシミュレーション(操船、火災、避 難等のシミュレーション)により解析され、事故の 発生、および、人命損失数が推定される。物理的過 程のシミュレーションは基礎となる方程式が既に明 らかであり、それに基づくシミュレーションプログ ラムを用いて解析することができる。

なお、事故による被害の主要なものとして、以下 では人命損失数を取り上げる。他(環境汚染、財産 等)も、同様の手続きでリスク評価を行うことにな るが、推定手法は分野毎に特有のもとなる。以下に、 リスクの導出方法を示す。

まず、以下に記号の定義を行う。

- S(s):事故 s の発生頻度
- η(F|,s):事故 s が発生し火災災害が生じる確率
- η(W|,s):事故 s が発生し浸水災害が生じる確率
- η(O|,s):事故 s が発生し他の災害が生じる確率
- η(i|F,s):事故 s が発生し火災災害が生じた場合の i 番目の火災災害進展シナリオが発生する確率
- η(i|W,s):事故 s が発生し浸水災害が生じた場合の i 番目の火災災害進展シナリオが発生する確率
- η(i|O,s):事故 s が発生し他の災害が生じた場合の i 番目のその他災害進展シナリオが発生する確率
- P(x | i,F,s): 事故 s が発生し火災災害が生じた場合のi番目の火災災害進展シナリオが発生した場合に、x 人が死ぬ確率
- P(x | i,W,s): 事故 s が発生し浸水災害が生じた場合の i 番目の浸水災害進展シナリオが発生した場合に、x 人が死ぬ確率

P(x | i,O,s): 事故 s が発生し、他の災害 O が生じ た場合の i 番目のその他災害進展シナリオが 発生した場合に、x 人が死ぬ確率

K:対象船舶の乗客、乗員の最大数

- n: 考慮する事故の種類
- n(j,s): 事故 s、災害 j における災害進展シナリオ の数

とすると、この船のリスクは、以下のように求め られる。

$$Risk = \sum_{s=1}^{n} S(s) \sum_{j=F,W,O} \eta(j \mid s) \sum_{i=1}^{n(j,s)} \eta(i \mid j,s) \sum_{x=0}^{K} P(x \mid i, j, s) \cdot x$$

...(2.1)

ここで、

$$P(x) = \sum_{s=1}^{n} S(s) \sum_{j=F,W,O} \eta(j \mid s) \sum_{i=1}^{n(j,s)} \eta(i \mid j, s) \cdot P(x \mid i, j, s)$$
...(2.2)

$$F(x) = \sum_{i=x}^{K} P(i) \qquad \dots \qquad (2.3)$$

とおき、横軸に x 、縦軸に F(x)をとり、(x,F(x)) を打点すると、いわゆる FN (Frequency vs Number of Fatality) 線図ができる。F(x)は、人 命損失数が x 人以上の頻度である。

また、

$$\sum_{x=0}^{K} F(x) = \sum_{x=0}^{K} P(x) \cdot x = Risk \qquad \dots \qquad (2.4)$$

である。すなわち、式(2.1)で定義した値は、F-N 曲線の積分値でもある。また、この値は、FSA で よく用いられているリスク指標値 PLL(Potential Loss of Life)と同じ意味を持つものである。

事故の発生確率を事故発生シナリオの発生確率 から求めると、以下のようになる。

$$S(s) = \sum_{h=1}^{H_s} \mu_{s \bullet hazard}(h) \cdot \mu_{s \bullet fail}(h) \quad \cdot \quad \cdot \quad (2.5)$$

$$\Xi \subseteq \mathfrak{C},$$

$$\mu_{s \bullet fail}(h)$$
:ハザード h が発生し、その回避に失敗

する確率

Hs:ハザードの総数

次に、事故発生後の災害の観点からリスクの発 生確率を求めるように、式(2.5)を書き変えると以 下のようになる。

$$Risk = \sum_{j=F,W,O} \zeta(j) \cdot \sum_{i=1}^{m(j)} \eta(i \mid j) \cdot \sum_{x=0}^{K} P(x \mid i, j) \cdot x$$

$$\cdots \quad (2.6)$$

$$\zeta(j) = \sum_{s=1}^{n} \xi(s) \cdot \eta(j \mid s) \qquad \cdot \cdot \cdot (2.7)$$

である。また、 $\sum_{x=0}^{K} P(x|i,j) \cdot x$ は、災害jおよび災害進展シナリオiが生じた場合の人命損失の期待値である。これを $\overline{x}(i,j)$ と表すと、式(2.6)は以下のようになる。

以上のように、リスクを求めるためには、事故発 生シナリオおよび災害進展シナリオの作成とその発 生確率の推定、および、各災害進展シナリオにおけ る人命損失数の推定が必要である。これらの実例を 4 および5章で示す。

それに先立って次節では、世界的な海難および船 舶要目データベースを用いた船舶の火災リスクの現 状および推移について述べる。

2.2 旅客船のリスクレベルについて

船舶の事故のデータは種々の団体が保持し、販売 している。それらの中で、LRFP(Lloyd's Register Fairplay)社による事故データはその包括性、一貫性 等の面で世界的に評価が高く、IMOのメンバー国が IMO への種々の提案文書で事故統計を引用する場 合には多くの場合LRFPによる事故データに基づい ている。また、同社は船舶の要目データベースも保 持し販売しており、これら事故データと船舶の要 目データを用いて、旅客船のリスクレベルを統計 的に評価することができる。LRFP による海難お よび船舶要目データベースに収録されている船舶 はすべて 100 総トン以上である。

SOLAS 条約(International Convention for the Safety of Life at Sea:海上人命安全条約)で は、旅客船は 12 人以上の旅客を運送する船舶と 定義されており、LRFP ではこの定義に合致した 旅客船として 4 種類の船舶をコード化しており、 それらは、(1)Passenger/General Cargo Ship、 (2)Passenger/Container Ship、(3)Passenger/ RO-RO Cargo Ship、(4)Passenger(Cruise) Ship である。これらのうち、(2)は数が僅かであるため、 本節では除いてそれ以外の 3 種類の旅客船でリス クレベルを解析する。

毎年の旅客船の運航隻数と、それに対応する事 故発生数から事故発生頻度が求められる。単位は [1/隻・年]である。旅客船の海難毎の事故発生頻 度を図-2.2 に示す。各種海難の事故発生頻度を判 別しやすくするために軸を対数表示している、事 故発生頻度は最近 30 年では 1993-1997 で底を打 ちその後、その他、戦闘行為による損傷、行方不 明を除いて増加している。

また、毎年の旅客船の運航隻数と、それに対応 する人命損失数(=死者数+行方不明者数)から人命 損失リスクが求められる。単位は[人/隻・年]であ る。これは人命損失数に事故発生頻度を乗じた値 であり、リスクである。また、それは PLL である。 定義から明らかなように、PLL は海難事故により 1 隻の船舶で1年に発生する人命損失数を意味し、 人命損失数の発生頻度ということになる。図-2.3 に海難毎の PLL の推移を示す。PLL は人命損失 数と同様の傾向を持つ。図-2.3 より、衝突による PLL が 1983-1987 年に急増しているが、これには

◆ 沈没

→衝突

--X--戦闘行為

--その他

2003-2007

1998-2002 --+---機関/船体損傷

→ 火災/爆発



図-2.2 旅客船各種事故の発生頻度(5年毎)

図-2.3 旅客船各種事故の人命損失リスク(PLL) (5 年毎)

西曆

1993-1997

-61

1988-1992

G-

1983-1987

フィリピン沖で 4,306 人が犠牲になった貨客船 DONA PAZ 事故が大きく寄与している。また、 1993-1997 年の期間以降の沈没による PLL がそれ 以前に比べて大幅に大きくなっているが、これは 1993-1997年の期間では869人の犠牲者を出したフ ェリーESTONIA 号の事故、1998-2002 年の期間で は、970人の犠牲者を出したフェリーLEJOOLA号 の事故、および 2003-2007 年の期間では 373 人の死 者を出した SENOPATI NUSANTARA 号の事故が それぞれ大きく影響している。また、2003-2007年 の期間では火災/爆発による PLL が以前の期間に比 べて急増している。それは988人の犠牲者を出した AL SALAM BOCCACCIO98 号の事故が大きく寄与 している。また、旅客船では事故発生頻度が大きい 機関/船体損傷では人はほとんど亡くなっていない。 それとは逆に、事故発生頻度はそれほど大きくない 沈没や火災/爆発の PLL が非常に大きくなることが わかる。

人命損失リスクの表現は1隻の船舶に注目した PLLによるもののほかに、1人の人に注目した表現 もあり、乗船者1人の年平均死亡頻度(単位[1/年]) を用いることもある。これは、船舶では対象船舶の PLL をその船舶の乗船者数で除することにより求 められる。前者は複数の人で構成される団体に注目 しているため、社会リスクと呼ばれており、後者は 一個人に注目しているため、個人リスクと呼ばれて いる。個人リスクは広い分野で求められており、産 業分野間で労働災害によるリスクの大きさを比較す る際に用いられている。貨物船ではある程度以上の 大きさの船舶では1隻あたりの乗船者数が同一船種 であれば大きさによらずほぼ一定であるため、船種 毎の乗船者数の平均値で PLL を除することにより 船種毎の個人リスクが求められる。しかし旅客船の 場合は1隻あたりの定員が十数人から数千人と大き な幅があるため、旅客船全体を対象にした場合、上 記の方法では個人リスクは求められず、PLL もその 意味で明らかになっていない。そのため、旅客船全 体で他の船種あるいは産業等とリスクの比較をしよ うとした場合に用いられるリスクの表現として、上 述の FN 線図がある。このリスク表現は、一度に多 数の人命を失う事故は、一度に少数の人命を失う事 故よりその発生が許容し難いという考え方でリスク の発生を抑制しようとする場合に適当な表現と言え る。また、対象のリスクプロファイルを示すのに適 当とも言える。もし、ある対象が一度に多数の人命 を失う事故が多い場合は右肩上がりになり、少数の 人命を失う事故が多ければ右肩下がりになる。さら に、事故数が多い場合は右上に位置し、事故数が少 ない場合は左下に位置することになる。FN 線図は このような性質を持つため、一度に多くの人命を失

う事故を減らすために安全対策の強制化等を検討 することには有効と言える。

図-2.4 に対象期間の前期(1978-1992:15 年間) と後期(1993-2007:15 年間)の FN 線図の比較を 示す。図-2.4 より、100GT 以上の旅客船では前期 と後期の人命損失リスクのリスクプロファイルに はほとんど違いがないことがわかる。



2.3 火災リスク評価手順

火災リスクを求める場合は図-2.1 の右側 の部分を実施することになる。また、式(2.1) から(2.7)では、式中の添時 Fの部分を扱えば 良い。

図-2.1 より火災リスクを求める場合は、火災災 害場所の位置、規模等の確率密度関数を推定し、 火災対処のイベントツリーを作成し、これらを用 い、さらに対象船舶の構造、消化設備等を考慮し て火災シミュレーションを実施し、その結果であ る船内各箇所の煙濃度等に対する時間変化を求め、 それらのデータと乗務員および避難者のヒューマ ンファクター、さらに対象船舶の人間が存在可能 な空間等の情報を用いて避難・脱出シミュレーシ ョンを実施し、必要な事故シナリオ(事故発生後は 特に災害拡大シナリオと呼ぶ。ここでは事故シナ リオは事故発生までのシナリオと災害進展シナリ オを合わせた概念として用いている)すべてにお ける人命損失数を求めることにより最終的に火災 発生時の人命損失リスクが求められることがわか る。

このように火災および避難シミュレーションで は船舶の構造や RCO の性能を考慮する必要があ るため、それらをシミュレーションプログラムへ の組込みが火災や避難の専門家でなく船舶の設計 者が簡易に実施できるものでなければならないこ とは明らかである。これがリスクベースリスクキ ーワードの一つの「簡易化」であり、3章で扱う。

3. シミュレーション実施の簡易化

2 章でも示唆したように、シミュレーション実施の簡易化がシミュレーションを主体としたリスク ベース設計には重要である。この章ではシミュレー ションの簡易化に必要な船舶の設計データのデータ ベースとそれから種々のシミュレーションプログラ ムの入力データを簡易に作成するための変換プログ ラムについて説明する。

3.1 船舶 GA データベース

火災リスクの推定には船体強度を求めるための船 殻データではなく、船内空間を表現するデータが必 要である。すなわち、船室の構造や配置、それらと 通路や階段との接続関係等である。そのような情報 は一般配置図から得られるため、それらの情報のデ ータベースを船舶 GA(General Arrangement:一般 配置図)データベースと呼ぶことにする。

ここでは、火災による人命損失数をシミュレーションで求めるために必要な船舶の構造を以下の5つ に区分しそれらをリレーショナルデータベース (Microsoft ACCESS)を用いてデータベース化した。

表-3.1 船舶空間要素

似帕龙胆亜丰	善 吐
hh 加 空 间 安 杀	
節点	他の 4 つの要素を記述する除の
(図・3・1,2)	基本となる甲板上の点であり、
	フレーム番号(一般配置図に船
	長方向にある一定幅の刻みのこ
	と)とそれらの番号が示す船長
	方向の位置からのずれで表現す
	る。船幅報告も船長方向と同様
	なフレーム番号を定義する。
部屋	船室や通路等、人間の存在可能
(図-3.3)	な区分された空間。床の節点列
	で形状を表現する。また、船室、
	通路等の種類のコードを持つ。
	開口により他の部屋ないしは階
	段と接続される。
開口(垂直開	扉など、部屋と部屋の間を往来
口、水平開口)	することを可能とする開口を意
(図・3.4)	味する。床に垂直な開口(扉等:
	垂直開口と呼ぶ)と水平な開口
	(エレベータが上下するため、ま
	た、アトリウム、ダクト等のた
	めの甲板の開口:水平開口と呼
	ぶ)がある。両端の節点と床から
	の高さ、さらに接続する部屋の
	番号等により記述される。
階段	引き続く甲板を接続する空間要
(図-3-5)	素。部屋の要素と同様に節点列
	で形状を表現する。

障害物	部屋の中にあり、人の移動を妨
(図-3-6,7)	害するもの。形状は別のテーブ
	ルで管理される。

図-3.1-7 でそれら船舶空間要素のデータベース 上での表現を示す。

	Microso	oft Access - [.	loint :	テーブル]			
	□ ファイル ウィンドウ処	(E) 編集(E) 表(D) (D) (D) (D) (D) (D) (D) (D) (D) (D)	示心 ヘルプピ	挿入① 書式② ④ Adobe PDF(B)) レコード)	*(<u>R</u>) ツール(D _ a ×
11	2 - 🖃	🔁 🎒 🗟 🖤	× 1	h 🖪 🗠 🚳	2 ↓ X ↓	🏹 🛅 🖓	7 🏘 🕨
1	h 💅 🗸						
	節点ID	X座標コード	DX	Y座標コード	DY	甲板No	DZ 🔺
	a001	X013	0	YL160	0	A	0
►	a002	X013	0	YR160	0	A	0
	a003	X015	0	YL320	0	A	0
	a004	X015	0	YL300	0	A	0
	a005	X015	0	YL280	0	A	0
	a006	X015	0	YL260	0	A	0
	a007	X015	0	YR260	0	A	0
	a008	X015	0	YR280	0	A	0
	a009	X015	0	YR320	0	A	0
	a010	X015	0	YR340	0	A	0
	a011	X020	0	YL180	0	A	0
	a012	X020	0	YR100	0	A	0
	a013	X020	0	YR180	0	A	0
	a014	X020	0	YR260	0	A	0
	a015	2027	0	YL180	0	A	0

図-3.1 データベース化された節点要素

□□ ファイル(E) 編 レコード(B) ツール ヘルプ(<u>H</u>) Adobe	集(E) 表示(V) (D) ウィンドウ(W) PDF(B)	挿入① 書式② The翻訳② _ 『	×
🔟 • 🔲 🙉 🧉) 🖎 🖤 🐰 🖻	È 💼 🛃	2
1 🔁 💅 🗸			
ID	フレームNO	Х	
• 1	XC	-3000	
2	XB	-2400	
3	XA	-1200	
4	>000	0	
5	X001	4200	
6	X002	5100	
7	X003	5400	
8	X004	5700	
9	>005	6600	
10	X006	9900	
11	X007	10800	
12	X008	13200	
13	X009	14100	
14	X010	15000	
15	2011	15900	

図-3.2 データベース化されたフレーム番号 (X座標)

2	licrosof	t Access	- Groom	テーブル]						
	ファイルモ) 編集(E)	表示())	挿入♀	書式(<u>0</u>)	レコード(日	り ツール(工)	ウ心陀園	The翻訳@	ヘルプ(日)	Adobe PDF(B)
1											- 5 >
	- 🔛 🤅	6 8 6	* ×	B 🖪	10 8		V 🖥 V	Ă ▶* ₩	🗗 ⁄a •	2.	
1 🕤	-										
:	「し」仮想	宝IDI仮相	「面」送付	家会日素	部調					ěň	5列
	1 A01			L// 36.	40 a0	06a007a014i	a013a018a019	3a020a031a030	a029a023a017	a012a011a01	5a026a025a024
	2 A02				40 a0	11a012a017	a016a015			00120011001	
	3 A04				40 a0	16a017a023i	a022				
	4 A05				40 a0	22a023a029	a028				
	5 A06				40 a0	13a014a021a	a019a018				
	6 A07				40 a0	19a021a032	a031a020				
	7 A08				30 a0	24a025a026	a027a028a02!	9a030a031a032	a038a037a036	a035a034a03	3
	8 A09				40 a0	39a041a085;	a062a061a040)			
	9 A10				10 a0	41a042a043;	a086a063a06.	2a085			
	10 A11				40 a0	61a062a063;	a065a066a06+	1			
	11 A12				40 a0	64a066a067a	a070a069				
	12 A13				30 a0	42a044a050i	a051a071a074	4a075a073a072	a070a067a066	a065a063a08	6a043
	13 A14				40 a0	44a045a052	a051a050				
	14 A15				40 a0	51a052a074	a071				
	15 A16				40 a0	68a069a070	a072a073a078	5a076a080a079	la078a077		

図-3.3 データベース化された部屋要素



🔎 Microsoft Acc	ess - [Stair:テーブル] 📃 🗖	×
Ⅲ ファイル(E) 編 ツール(I) ウィンド	集(E) 表示(V) 挿入(Q) 書式(Q) レコード(R) ウ(W) The翻訳(Q) ヘルブ(H) Adobe PDF(B) _	. ₽ ×
🛛 🔛 🖣 🔜 🖉	3 🖪 🖤 X 🖻 🖻 🗠 🧐 🛃 XI 💱	» •
i 🔁 🛃 🗸		
仮想室ID	節点列	
▶ A19	a015a016a022a028a027a026	
A811	a105a106a005a004	
A821	a109a110a009a008	
A831	a053a054a056a055	
A841	a057a058a060a059	
A864	a046a047a049a048	
B04	b026b027b032b037b119b036b031	
D011	LOOFLOORLOO7	

図-3.5 データベース化された階段要素

🖉 Microsoft Acc	ess - [Barrier	:テーブル]			
Ⅲ ファイル(E) 編	集(E) 表示(⊻)	挿入⊕ 書式@)	レコード(<u>R</u>)	ツール① ウィンドウ	(₩) The翻訳(Q)
ヘルプ(<u>H</u>) Adobe	PDF(<u>B</u>)				_ 8 ×
🔟 • 🔛 📆 🧉	B 🖪 🖤 🐰 🛙	h 🖻 🗠 🚳		🚡 🗸 🚧 🕨	K 🗇 л - 🏅
1 24 27 -					
ID	障害物ID	障害物パターンID	部屋番号	節点番号	角度
•	CP001	ECH01	C04	C301	0
2	CP002	ECH02	C04	C302	0
3	CP003	ECH01	C04	C303	0
4	CP004	ECH01	C04	C304	0
5	CP005	ECH03	C04	C305	0
6	CP006	ECH03	C04	C306	0
7	CP007	ECH01	C04	C307	0
8	CP008	ECH01	C84	C308	0
9	CP009	ECH01	C04	C309	0
10	CP010	ECH01	C04	C310	0
11	CP011	ECH04	C04	C311	0
12	CP012	ECH04	C04	C312	0

図-3.6 データベース化された障害物要素

🖉 Microsoft Acce	ss – [Bpattern : 7	ーブル]				
□□ ファイル(E) 編集 Adobe PDF(B)	(E) 表示(⊻) 挿入()) 書式(Q) Vコー	・ド(B) ツール(D)	ウインドウ型	The翻訳(Q)	∿ル⊅(<u>H)</u> _ ₽ ×
⊻• ∎•1,6 2,7.	0. ♥ % % ®	10 🕘 🛃 🖁	1 V B V	åå ▶ + ₩	🗇 ⁄a • 🛛	0.
ID	障害物ID	デッキ (着考	頂点座標		高さ
) je	CH01	テーブ	ルセット 0.0.02	000,1000,-2000,1	000,0	700
2 E	CH02	テーブル	ルセット 0.0.0,-2	000,1000,-2000,1	000,600	700
3 E	CH03	テーブ	ルセット 0.0.02	600,1000,-2600,1	000,0	700
4 E	CH04	テーブ	レヤット 000-2	600.10002600.1	000600	700

図-3.7 データベース化された障害物パターン要素

3.2 変換プログラム

下記に示す種々の変換オウログラムにより火災 および避難シミュレーションの実施が容易となる。 なお、造船各社の保持する船舶のデータベースから 船舶 GA データベースの変換プログラムを作成する ことにより、本報で論じている船舶のリスクベース 設計手法を造船各社が船舶設計手法の一部として活 用が可能となる。

3. 2. 1 3次元画像データ(DXFデータ)から FDS入力データへの変換

FDS(6.1 参照)を用いて船舶の火災進展シミ ュレーションを行うにおいては,計算対象領域 が大きいため,入力データ作成には膨大な時間 を要する。そこで,FDSにおいても3次元画像 の標準的記述形式のデータである DXF データ から,FDS 用入力データへ変換するソフト (DXF2FDS) が 用 意 され て お り,Web (http://fire.nist.gov/fds/)からダウンロード できる。

本ソフトの設定画面を図-3.8,9に示す。画面

上で x,y,z 方向それぞれの計算格子サイズを 設定することにより,計算領域の大きさ,計 算格子数,計算領域内に位置する物体の座標 位置などが,FDS用入力データに出力される。 なお,元の物体が格子上に位置しない場合, その物体は最寄りの格子上へ移動される。ま た元の物体の名前がそれぞれ個別に付いて いる場合,全て別々の物体であると認識する ため,変換に時間を要する。



図-3.8 DXF2FDSの設定画面(その1)

			Layer Name	FDS Material	Appearance	0
Specify Origin	x00	1	16200	5400	· 11150	-
	VOID	2	16200	-5400	· 11150	-
	70	3	16200	-5400	▼ 11150	-
	colo	4	16200	5400	· 11150	-
		5	16200	-6300	▼ 11150	•
veracile Grid dix [0,1	sult Grid dx 0.1 dx 0.1 dz 0.1		16200	6300	· 11150	-
		7	16200	-6300	· 11150	-
		8	16200	6300	· 11150	-
Copen in Notepad	atter conversion	9	22200	3000	- 3950	-
Coen in stokeview after conversion		10	22200	3000	▼ 3950	-
operation and the	sve unter conversion	11	22800	3000	▼ 3950	-
FDS	FDS4	12	22800	3000	- 3950	-
Smokeview	smokeview	13	22800	-6000	▼ 3950	-
		14	22800	-6000	- 3950	-
		15	23400	-6000	▼ 3950	•
		16	23400	-6000	- 3950	-
70 Database		17	28200	1900	12300	-
DS Delabase	vistalvanad data	18	28200	1800	12300	-
	CARGE AND THE AREA	19	28200	1800	· 7500	-
		20	28200	1900	7500	-
				1		_
				Save Defaults		

図-3.9 DXF2FDS の設定画面(その2) 変換した FDS 用入力データにおいて,火 源の設定位置,発熱速度,物体の特性,計算 対象時間,温度等の出力パラメータなどを設 定することにより,FDSが実行できる。ここ で,壁やドア開口部などの設置が,設定通り であるかの確認を行うことが望ましい。

図-3.10(カラーページ)に 5 章で用いる対象船舶 の DXF データを変換した結果の景観図を示 す。元は船舶の DXF データで,一辺が 0.2m の計算格子サイズで変換すると,計算領域サ イズは,船長方向に89m,船幅方向に14m,鉛 直方向に12.6mで,格子数はそれぞれ445個, 70個,63個となった。

2.2 船舶 GA データベースから二層ゾーンプロ グラム (BR12002)入力データへの変換

上記に示した船舶 GA データベースから、二層ゾー ンモデルによる火災ミュレーションプログラム (BRI2002)の入力データを作成する手間を省くため の対話型のプログラムを作成した。BRI2002の入力 項目として火災室を指定し、火源の発熱率の時系列、 部屋の諸元(天井高さ、壁の材質等)、開口の諸元(隣 接する部屋の番号等)等をテキストデータとしてフ アイルにする必要があるが、このプログラムにより 船舶 GA データベースからそれらのデータの作成が 簡易にできるため、手間が大幅に省かれ、火災シミ ュレーションの実施が容易になった。

図-3.11 に火源の発熱率の時系列入力画面を、図-3.12 に船舶の各部屋の諸元入力画面を示す。



図・3.11 火源の発熱率の時系列入力画面



図-3.12 船舶の各部屋の諸元入力画面

3.3.3 船舶 GA データベースから3次元画像データ(DXF データ)への変換プログラム

上述した DXF データから FDS の入力データへの 変換プログラム等、DXF 型式のデータを基に種々の プログラムの入力データを作成するプログラムが多 数流布されている。種々の既に入手可能なプログラ ムの活用のために船舶GAデータベースからDXF データを作成することは重要であり、本研究でも それを可能とするプログラムを作成した。同プロ グラムにはそれ自身に船舶の3次元構造の簡単な 画面(図-3.14)とその制御用画面(図-3.13)を持つ。 図-3.14 では階段要素のみ面を表示し(階段の「モ (モデルの意)」のチェックボックスのみチェック が入れられている)、他の要素は境界線のみの表示 となっている。

船舶 GA データベースで記述した船舶の形状デ ータが一旦 DXF データ⁹⁾に変換されると、一般に 市販されている 3 次元モデラーを用いて各面にテ クスチャを張り付け避難シミュレータ等種々のシ ミュレータで用いることができる。 5 章の例題で 用いた対象船舶の C 甲板のテクスチャを付けた 3 次元景観画像を図-3.15(カラーページ)に示す。

ファイル(E) 設定(P)												
データ種別	名称	名	Ŧ	線	節	ŧ	線	床	天	壁	他	
∃ Ship												
Ⅲ デッキ	A											
Ⅲ デッキ	в											
⊞ デッキ	C			2								
□ デッキ	D											
■ 仮想室												
Ⅲ 階段												
障害物												
▣ 開口												
■ 水平開口												
■ 接点												
■ デッキ	E										-	

図-3.13 構造確認用画面の制御用画面



図-3.14 構造確認用画面

 火災リスク推定の短時間化(シミュレーション 実施の短時間化)¹⁰⁾

この章ではシミュレーションによりリスク評価 を現実的な時間内に実施するために障害となる、 シミュレーションを行うべき災害進展シナリオの 数を削減するために開発した方法を示す。

4.1 災害進展シナリオの数の削減方策の概要

ET により災害進展シナリオを記述し、その発生 確率を推定する場合の主要な問題点の1つはツリー の最終枝、すなわち、シナリオの多さである。煙流 動に影響を与える種々の要素が多いと2の要素数乗 のオーダーでシナリオは増加していき、それらすべ ての災害進展シナリオでのシミュレーションの実施 は事実上不可能となる。したがって、得られる結果 の信頼性を損なわないで ET を簡略化することが重 要となる。

また、火災は実験結果等(図 6.11 等)より、短時間 で急激に火勢が強まることが知られており、少しの タイミングの違いで死者数が大幅に変化することが 予想される。したがって、消火、防火手段の成功/ 失敗の確率だけでなく、成功までの時間が重要にな る。通常のイベントツリー解析においては、分岐部 の確率およびその確率分布関数の推定がなされるが、 イベントが成功するまでの時間の推定はなされない。 しかし、シミュレーションによる人命損失の推定に は、消火、防火の成功/失敗だけでなく、成功する場 合の成功までの時間が問題になる。

そこで、できる限りシミュレーションを実施すべ きイベントシーケンスの数を減らし、火災進展およ び避難シミュレーションを実施可能なものとするた め、火災災害における ET を、火災検知、初期消火、 スプリンクラー消火、防火扉閉鎖、消火栓消火の、 火災災害対処の主要なイベントで構成し、他の細か なイベントの影響はそれらの主要なイベントの成功 時間の確率密度関数の形に反映させるとして、図 -4.1 のような ET を開発することにした。このよ うな ET を、火災災害対処の ET として一般的に 使用可能という意味で、一般化イベントツリー (Generic Event Tree)と呼ぶことにする。また、 排煙ファン等は、火災災害のイベントとは独立に 動作するため、各イベントシーケンスにおける火 災進展シミュレーションの際にその影響をモデル 化して組み込むことにする。また、ET を大きな ものとする要因の1つは、単なる場合分けもツリ ーの中に入れ込むことである。それで、ツリーの 大きさを適当なものにするため、どのイベントシ ーケンスにも同様に影響を与える場合分けは、ツ リーの外に出し、結果解析の際に考慮することに する(図-4.1)。

以下に、このようにして作成された ET の各イ ベントシーケンス毎に実施すべき火災進展シミュ レーション、および、それらのシミュレーション 結果に対応する火災災害イベントシーケンスの発 生確率を推定する手法について述べる。

4.2 シナリオの致命度の順序関係

どのイベントも成功時間が遅ければ遅いほど被 害が増大すると仮定する。ここで、各イベント内 の成功時間を幾つかに分割(図-4.2)して得られる 小区間をイベント内グループと呼び(図-4.2,3)、 各イベントから、イベント内グループを1つずつ 取り出し、それらから構成される組合せ(シナリ オグループと呼ぶ)を作ると(図-4.3)、シナリオグ ループ間で、成功の程度の順序、すなわち人命損



図-4.1 火災対処の一般化イベントツリー

失数の上限、下限の順序が得られる。

この方式によると、図-4.3で、各イベントにおいて すべての分割の j=5 であるシナリオグループ (太い 黒枠で囲まれている)の最遅の成功時間における人 命損失数は、一部が5で、残りはそれ未満のシナリ オグループの最遅の成功時間における人命損失数<u>よ</u> <u>り大きい</u>とすることができる。したがって、イベン ト内グループが全て m であるシナリオグループの 最遅の成功時間における人命損失数を、一部が m で それ以外が m 未満であるシナリオグループの上限 の人命損失数とすることができる。同様に、イベン ト内グループが全て m であるシナリオグループの 最早の成功時間での人命損失数は、一部が m で、そ れ以外が m より大きいシナリオグループの下限の 人命損失数とすることができる。 すべて m であるシ ナリオグループを代表シナリオグループと呼び、代 表シナリオグループの最遅の成功時間における人命 損失数が上限の人命損失数となるシナリオグループ の集合をシナリオグループ上限集合、下限の人命損 失数となるシナリオグループの集合をシナリオグル ープ下限集合と呼ぶ。代表シナリオグループの数は M 個、すなわちイベントの分割数分存在する。 以 上より、代表シナリオグループの最早時間、最遅時 間でシミュレーションし得られた人命損失数に、以 下に示す方法で得られる上限集合、下限集合の発生 確率を乗じることにより、イベントシーケンスのリ スクを求めることができる。以下に、上限、下限集 合の発生確率を求める。

 $_{N}I_{k}$: (1,2,...,N)から k 個取った数字の組合せか ら構成される集合。(N:成功イベントの総数) $_{N}i_{k}$: に含まれる、k 個の数字の組合せの任意の

要素。($_N i_k \in_N I_k$)

NUM($_N I_k$): の要素数(= $_N C_k$)

 N_{i_k} : N_{i_k} 以外の(1,2,...,N)内の数の組合せ

$$_{N}i_{k}\cap_{N}\bar{i}_{k} = (1,2,...,N)$$

とすると、シナリオグループ上限集合 j の発生確率 (P_j(U))は式(4,1)で求められる。

$$P_{j}(U) = \sum_{k=1}^{N} \sum_{N} \prod_{i \in N} \prod_{i \in N} p_{i}(j) \prod_{m \in N} \sum_{l=1}^{j-1} p_{m}(l) \qquad \cdots (4.1)$$

同様に、シナリオグループ下限集合 j の発生確率 (P_i(U))は式(4,2)で求められる。

$$P_{j}(L) = \sum_{k=1}^{N} \sum_{N, I_{k}} \prod_{i \in N} p_{i}(j) \prod_{m \in N} \sum_{l=j+1}^{M} p_{m}(l) \quad \cdots (4.2)$$

ここで、わかりやすさのため、pi(j)=p(j)(for all i) として、シナリオグループ上限および下限集合 j の発生確率を求める。

$$P_{j}(U) = \sum_{k=1}^{N} {}_{N}C_{k}p(j)^{k} \left(\sum_{l=1}^{j-1} p(l)\right)^{N-k} \cdots (4.3)$$
$$= \left(\sum_{l=1}^{j} p(l)\right)^{N} - \left(\sum_{l=1}^{j-1} p(l)\right)^{N}$$

$$P_{j}(L) = \sum_{k=1}^{N} {}_{N}C_{k}p(j)^{k} \left(\sum_{l=j+1}^{M} p(l)\right)^{N-k} \cdots (4.4)$$
$$= \left(\sum_{l=j}^{M} p(l)\right)^{N} - \left(\sum_{l=j+1}^{M} p(l)\right)^{N}$$

となる。

また、







図-4.3 シナリオグループの順位付けおよび代表シ ナリオグループ

$$\sum_{j=1}^{M} P_{j}(U) = (p(1))^{N} + ((p(1) + p(2))^{N} - (p(1))^{N}) \cdots (4.5) + \bullet \bullet \bullet + \left(\left(\sum_{j=1}^{M} p(j) \right)^{N} - \left(\sum_{j=1}^{M-1} p(j) \right)^{N} \right) = (1)^{N} = 1$$

であり。同様に、

$$\sum_{j=1}^{M} P_j(L) = 1 \qquad \cdots (4.6)$$

であるため、上限集合の全体と、下限集合はそれぞ れすべてのシナリオグループの集合となていること が確認できる。

以上より、火災および避難のシミュレーションは、 M 個のシナリオグループ上限集合の上限値(最遅時 間)のみ、およびシナリオグループ下限集合の下限



図-4.4 逆問題における時間差の確率密度関数 値(最早時間)のみで実行すれば、成功時間の範囲 の分割数に応じた精度で下限と上限の人命損失リス クを算出できることが期待される。成功イベントの 数によらず、成功時間をM個に当分した場合はM+1 回で良いことになり、それらの組合せすべて (N(M+1),N:成功イベント数とする)大幅にシミュレ ーションの実施回数が減ることになる。

4.3 イベントの成功の前後関係が結果に影響を与 える場合

防火扉閉鎖より後に閉鎖された防火区画内の乗客 が避難を開始する場合は、それらの避難者が各居室 から通路に移動すると煙に巻かれて動けなくなって しまう。このように、手順前後により結果が大幅に 異なる場合はイベントの成功時間が遅ければ遅いほ ど人命損失数が多くなるという仮定は成り立たない。 このような場合は、こうしたことが生じるイベント の組合せを取り上げ、成功時間の前後により、場 合を2つに分けてリスクを求めることになる。簡 単のため、手順前後により人命損失数が異なるイ ベントが2つだけ存在する(避難と防火扉閉鎖)と 仮定して、この場合のリスクの導出方法を検討す る。このような手順前後が存在する問題のことを 順問題と呼び、手順前後が生じない問題のことを 順問題と呼ぶことにする。

火災の Generic Event Tree では、消火、防火扉 の閉鎖等のイベントの順序は予め考慮されている ため、このような問題は存在しない。こうした問 題は、独立に生じると考えることのできるイベン ト間に存在する。5章では、避難と防火扉閉鎖が これに当たるとしているが、実際は当然のことと して防火区画内の乗客および乗員がその区画から すべて退去していることを確認した後に防火扉を 閉鎖すると考えられる。しかし、防火区画内が煙 で充満し、かつ、居室内の乗客が熟睡している、 あるいは既に煙で動けなくなっている場合は、確 認に時間を費やすことが延焼防止の妨げとなって しまうことが考えられるため、乗客等の退去の確 認を待たずに防火扉の閉鎖を行ってしまうような 状況も発生し得ると考え、そうしたことが生じな いような対策を検討すべきであろう。

避難開始時間の確率密度関数を f(x)、防火扉閉 鎖成功の確率密度関数を g(y)とし、x=y+t,(t>0) である t の確率密度関数を h(t)とすると、h(t)は 式(4.7)のように求められる。

$$h(t) = \int_{y=0}^{\infty} f(y+t)g(y)dy \qquad \dots \qquad (4.7)$$

h(t)でt≧0である領域を、発生確率がほぼ同等に なるように境界時間 ts、tsm、tml、tl を決め、t がそれらの値になるような y の確率密度関数を求 めてそれらの最大値を ys、ysm、yml、yl とする(図 -4.5)。また、xs=ys-ts、xsm=ysm-tsm、xml=yml -tml、xl=yl-tlとして、それらのyおよびxの 値で、防火扉閉鎖成功時間が避難開始時間より早 い場合のシミュレーションを実行する。(図-4.5) また、避難開始時間が防火扉閉鎖成功時間より早 い場合は、すなわち、順問題の場合は、遅ければ 遅いほど人命損失数が多くなるとの仮定が成り立 つものとし、4.2 の方法を援用して、xE、xEM、 xML、xL および yE、yEM、yML、yL を求める。 (図-4.6) なお、この場合の2つのイベントグルー プの発生確率の合計は x<y の場合の確率であり、 その比は xE、yE 等を求めた際の E、M、L の確 率の比と同じとする。

発生確率を求める際の簡便さのため、前後関係 により結果の違いが予想される2つのイベントグ



yE yEM yML yL 図-4.6 順問題におけるシミュレーション実施 時間

ループの、それらの成功時間の差の正負で2つのイ ベントグループの合成された確率密度関数を2つの 部分に分け、それらの部分の確率を p1 および p2(p1+p2=1)とし、それぞれの部分の分割を他の部 分の分割と同様の比で行う。

5. 火災リスク評価事例

この章では、4 章で概説した手法を仮想船舶の居室

火災に適用して居室火災リスクの推定を試行する。 なお、仮想船舶は実際に航行している船舶ではな く、国際航海を行う船舶としての基準を満たすこ とを念頭において設計した船舶である³⁾。ある。 表-5.1 および図-5.1 にここで使用した対象船舶を 示す。

以下に示す手順で一般化モデルの居室火災リス クを求める。

5.1 一般化イベントツリーの定量化

一般化モデルを提示して、B 船社にインタビュ ーし、図-5.4の 各イベントの最早成功時間、最遅 成功時間の欄にある回答を得た。その結果、図-5.4 のような各分岐における分岐確率および成功時間 の確率密度関数(各イベントにおける最早成功時 間、最遅成功時間を、分布を正規分布と仮定して、 ±3σの値とする)を得た。

なお、イベントツリーの分岐確率である、スプ リンクラー消火成功確率、防火扉閉鎖成功確率、 消火栓消火成功確率が回答では1となっているが、 現実とは異なることは明らかであるので、ここで は、それらの成功確率を0.99とした。

5.2 煙感知器の作動時間の確率密度関数の設定

文献¹²⁾にある煙感知機の試験結果より、煙感知 機の中心からの水平方向の火元までの距離と作動 時間との関係を式(5.1)に示す2次式でモデル化 し、火災室の中心に煙感知機が設置してあると仮 定して火災室の煙感知機が作動する時間の確率密 度関数を文献³⁾の方法にて求める。

(煙感知器のモデル)

t:出火から煙感知器作動までの時間

r : 火源から煙感知器までの水平方向の距離 ε: 偏差(正規分布と仮定する)

とし、実験値をrの2次式を用いて回帰分析する と、以下のようになる。なお、避難シミュレーシ ョンにおける煙感知作動時間の分布を求める際に は、文献¹²⁾にあるアネモ型換気装置で毎時10回 の換気を実施した場合の実験結果を使用した。そ の実験結果を図-5.2に示す。

> $t = 5.72 r^2 + 31.2 + \epsilon$ · · · (5.1) $\mu(\epsilon) = 0.0$

σ(ε)=24.7

5.3 ベントシーケンスにおけるイベントの境界時間 の推定

各イベントシーケンスにおける各イベントの成功 時間は、煙感知器作動からの時間(Tse)であるので、 出火時点から各イベントシーケンスにおける各イベ ントの成功までの時間(Tig)は、出火から煙感知器作 動までの時間(Tigs)を加えなければならない。よって、 $T_{ig}=T_{igs}+T_{se}$ · · · (5.2) である。このようにして、各イベントの T_{iE} , T_{iEM} , T_{iML} , T_{iL} ,を求めることができる。また、 P_{iE} , P_{iM} , P_{iL} は、適当に決定する。ここでは、 $P_{iE}=0.3$ 、 $P_{iM}=0.4$ 、 $P_{iL}=0.3$ 、 T_{iE} 、 T_{iL} はそれぞれ片側 0.5%の時間とす ると、イベントシーケンス毎の各イベントの T_{iE} , T_{iEM} , T_{iML} , T_{iL} は表-5.3 のようになる。

5.4 逆問題への対処

避難開始の確率密度関数、防火扉閉鎖の順序が逆 転する場合を考慮するため、それぞれのイベントの 確率密度関数を用いて、それらの差の正負によって、 4.3 節の方法で、シミュレーションすべき避難およ び防火扉閉鎖時間を求める。

5.5 避難者の初期位置の分布および発生確率の推定

乗員、乗客の初期分布として、一般化モデルの C デッキのダイニングルームが満席になる食事時(計 3時間と仮定)、および、大半が居室にいる場合(残 り 21時間)の2通りに分けた。初期位置は九居室 の定員等を考慮して適宜決定した。初期分布の発生 確率は1日のその継続時間の割合とした。

5.6 火災進展、避難シミュレーションの実施

A Deck Pahtry €7B up = DKChenge Rm Eng B Deck C/F Chenge R Dagzy.DK 073® up<u>−eò</u> PASS.CABIN(A) PASS.CABIN(B) ħ Dining 火災発生場所 Bunk PASS CABIN(D Deck Str. ond Rm E Deck Main Engine r Cond. Rm Auxili Machinery H F Deck Auxiliary TAR TAR Stering Main Engine Room Tk T Roon TING) TIN <u>undenten heiter heiter</u> 図-5.3 対象船舶の一般配置図



図-5.2 煙検知器作動時間の実験結果および推定 モデル



図-5.3 シミュレーションに使用した煙検知器作 動時間の確率密度関数



図-5.4 シミュレーションに使用した火元の発熱 率曲線(イベントの成否で形を変えて用いる)

公 0.1 A 涿加加少工女日					
全長	90.00m				
垂線間長	83.00m				
船幅	13.40m				
型深	6.30m				
計画満載喫水	4.00m				
排水量	2,293 トン				
GM/KG	0.912m / 6.15m				
風圧側面積	約 960m2				
風圧側面積中心	水面上約 5m				
旅客定員	80 名				
乗組員	40 名				
資格	第1種船 国際航海				

表-5.1 対象船舶の主要目

避難者の初期分布毎に、また、イベントシーケ ンス毎に E-E、EM-EM、ML-ML,L-Lの組合せで、 避難、火災進展シミュレーションを実施し、一酸 化炭素中毒で死亡する人数を求める(表-5.3)。得ら れた結果より、各イベントシーケンスのリスクの 上限と下限を求め、それらから、全体の火災リス クの上限と下限を求めた。その結果を(表-5.4)に示

火災/爆発発生室	事故船隻数	人命損失数
居室	59	112
機関室等機械室	148	540
上記以外の場所	78	1277
発生場所不明	95	351
計	380	2280

表-5.2 旅客船における火災/爆発事故の発生場所 (1978-2005 年,LRFP)

す。火災進展シミュレーションプログラムでは、文献 12)にある火災実験結果に基づいて火元の発熱率

曲線を作成した。用いた火災進展シミュレーショ ンプログラムは BRI2002¹³⁾で避難シミュレーショ ンプログラムは当所が独自に開発したものであ¹⁴⁾。

5.7 リスク解析

表-5.4 にある火災発生頻度、居室火災発生確率を 求めるために LRFP 海難データベースを調査したと ころ、表-5.2 のようになった。同表で発生場所不明 の事故が 95 隻もあるが、それらを発生場所が確定さ れている事例数の比で案分して居室火災の数を調整



図-5.5 回答	答例およびイベント毎の成功時間と標準偏差
表 5.4	試計算対象船舶の居室火災リスク計算表

	シーク	rンス1	シーク	rンス2	シーケンス3 シーケンス4			シーケンス5		シーケンス6						
火災発生頻度	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03	2.51E-03
居室火災調整係数	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207
避難者初期配置	0.125	0.875	0.125	0.875	0.125	0.125	0.875	0.875	0.125	0.125	0.875	0.875	0.125	0.875	0.125	0.875
火災室避難成功確率	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
火災室以外の室の避難成功確率	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
煙検知の成功確率	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
初期消火成功·失敗確率	0.9	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
スプリンクラ消火成功/失敗確率	1	1	0.96	0.96	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
防火扉閉鎖成功/失敗確率	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
消火栓消火成功/失败確率	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5
人命損失数(E-E)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
人命損失数(EM-EM)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
人命損失数(ML-ML)	0	0	0	0	39	39	22	33	40	39	26	33	38	34	40	34
人命損失数(tL-L)	0	0	1	1	48	48	38	38	48	48	38	37	48	39	48	46
手順前後係数	1	1	1	1	0.798	0.202	0.798	0.202	0.798	0.202	0.798	0.202	1	1	1	1
シナリオグループ発生確率(E)	0.008	0.008	0.027	0.027	0.002	0.002	0.002	0.002	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.027	0.027
シナリオグループ発生確率(M)	0.232	0.232	0.316	0.316	0.166	0.166	0.166	0.166	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335	0.316	0.316
シナリオグループ発生確率(L)	0.760	0.760	0.657	0.657	0.832	0.832	0.832	0.832	0.760	0.760	0.760	0.760	0.760	0.760	0.657	0.657
避難者初期配置毎の人命損失リ スクの下限	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-08	1.25E-07	1.82E-06	1.02E-05
避難者初期配置毎の人命損失り スクの上限	0.00E+00	0.00E+00	4.10E-06	2.87E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.20E-06	1.86E-05	2.88E-06	1.86E-05
シーケンス毎の人命損失リスクの 下限	0.00]	E+00	0.00	0.00E+00 0.00E+00 1.45E-07					1.20	E-05						
シーケンス毎の人命損失りスクの 上限	0.00	E+00	3.28	E-05	0.00E+00 0.00E+00 2.18E-05 2.1					2.15	E-05					
居室火災リスク下限		1.21E-05														
居室火災リスク上限	7.61E-05															

した値の全体の比率を求めると0.207となった。また、 図-2.2より2003-2007年の旅客船の火災/爆発の発生頻 度を求めると000251となった。これらの値と上記の各 値を表-5.4に入れことにより、一般化モデルのリスク の下限、上限を求めることができる。

その結果、表・5.1 および図・5.1 に示す旅客船の一般 化モデルでは、居室火災/爆発リスクの上限値として

1.13×10⁻⁴、下限値として 1.73×10⁻⁷となった。

なお、図-5.6(カラーページ)に上記の火源の発熱率曲線 で対策がすべて失敗した場合の対象船舶の FDS 解析 結果の一例を示す。また、図-5.7(カラーページ)に BRI2002 により解析された一酸化炭素濃度の時系列 のもとで避難シミュレーションを実施した場合の途 中経過の一例を示す。

6. 火災リスク推定の高精度化

表-5.3 イベントシーケンス毎の各種イベントの成功時間および避難シミュレーションにおける人命損失数

			火災室遇	達難開始	火災室以外の室から の避難開始		防火厚	尾閉鎖	消火相	全消化	
初期配置	境界時間 記号	煙検知 時間 (T _{SMK}) (sec)	T _{SMK} から の時間(T) (sec)	出火から の時間 (T _{SMK} +T) (sec)	人命損失数						
2.6	5 (7 2 ()	7-11).		()		()					
~-	クノス Z (. エ	ヘノリング	/ フ成切)	11	167	167					0
	T _E	38	18	56	177	215					0
Α	T _{MI}	70	22	92	183	253					0
	TI	133	28	161	193	326					1
	T _E	0	11	11	167	167					0
в	T _{EM}	38	18	56	177	215					0
	1 _{ML}	/0	22	92	183	253				\sim	0
		155	20 # - > - > - > / /		195	520					
~~	ケシス3()	· 力火扉闭動	貝成切 - 相火	. 住 相 火 成 き	刃)	100	100	100	100	100	0
	$T_{\rm F}(1s)$	28	11	56	190	190	190	190	190	190	0
Α	$T_{EM}(TSI)$	70	22	92	190	262	187	220	194	252	33
	$T_{\rm MI}(Th)$	133	28	161	200	333	188	321	200	333	38
	T _E	0	11	11	166	166	177	177	190	190	0
Δ	T _{EM}	38	18	56	176	214	184	222	194	232	0
А	T _{ML}	70	22	92	181	251	187	257	196	266	22
	TL	133	28	161	188	321	194	327	200	333	38
	$T_{\rm E}({\rm Ts})$	0	10	11	190	190	190	190	190	190	0
в	$T_{EM}(1sn)$	38 70	18	<u> </u>	190	228	188	226	194	232	20
	$T_{MI}(TIII)$	133	22	161	200	333	187	321	200	333	48
	T _E	0	11	11	166	166	177	177	190	190	0
р	T _{EM}	38	18	56	176	214	184	222	194	232	0
Б	T _{ML}	70	22	92	181	251	187	257	196	266	39
	Тт	133	28	161	188	321	194	327	200	333	48
シー	ケンス4(防火扉閉鎖	肖成功 - 消火	:栓消火失則	攵)						
	$T_{E}(Ts)$	0	11	11	190	190	190	190			0
А	$T_{EM}(Tsn)$	38	18	56	190	228	188	226			0
	T _{ML} (Tml)	70	22	92	192	262	187	257			33
	T_{I} (Tl)	133	28	161	200	333	188	321			38
	T _E	28	11	56	166	214	1//	222			0
Α	Т _{ЕМ} Т	70	22	92	181	214	184	257			26
	T _I	133	28	161	188	321	194	327			37
	$T_{\rm E}({\rm Ts})$	0	11	11	190	190	190	190			0
в	T _{EM} (Tsn)	38	18	56	190	228	188	226			0
Б	T _{ML} (Tml)	70	22	92	192	262	187	257			39
	$T_{I}(Tl)$	133	28	161	200	333	188	321			48
	T _E	0	10	11 56	166	166	177	177			0
в	T I EM	38 70	18	30	1/0	214	184	222			40
	T.	133	22	161	181	321	194	327			40
シー	ケンス5(防火扉閉鎖	真失敗 -消火	:栓消火成马	为)	221	171	521			
	T _E	0	11	11	167	167	\sim	\sim	190	190	0
А	T _{EM}	38	18	56	177	215	\sim	\sim	194	232	0
11	T _{ML}	70	22	92	183	253			196	266	34
	T	133	28	161	193	326			200	333	39
	T _E	0	10	54	167	215			190	190	
в	T.		22	92	1//	213	\sim		194	252	38
	Тт	133	28	161	193	326			200	333	48
シー	ケンス6(防火、消火	との手段す~	べて失敗)							
	T _F	0	11	11	167	167					0
А	T _{EM}	38	18	56	177	215		\sim	\sim		0
Â	T _{ML}	70	22	92	183	253					34
	Т	133	28	161	193	326					46
	T _E	0	10	11	167	167	\sim				5
в	T I EM	<u>38</u> 70	18	<u>56</u> 02	1//	215			\sim		3
	1 ML.	122	22	92	103	233					40

これまで、シミュレーションを用いた火災リスク 解析を現実的なものとするため、簡易化と短時間化 について論じてきた。使用したシミュレーションプ ログラムは二層ゾーンプログラム(BRI2002)と当所 で作成した避難シミュレーションプログラムである が、それらが現実の現象を十分表現しているかどう かは実験を通して検証する必要がある。また、リス ク評価の精度をさらに上げるためにはそれらのシミ ュレーションプログラムをより高精度なものにする 必要がある。高精度なプログラムは実施に時間がか かるため、現実的な時間で火災リスクを求めるため には何らかの短時間化の方策が必要である。

ここでは、二層ゾーンプログラムより精度の高い CFD モデルによるシミュレーションプログラムで ある FDS を用いて高精度の火災進展予測を行う方 法を示す。

まず、次節で CFD モデルと二層ゾーンモデルに ついて解説し、CFD モデルによる船舶動揺時の火災 進展予測について吟味する。

6.1 火災現象の数値予測モデル

船舶火災では延焼が拡大すると消火に困難を極 めるため、火災の早期発見と状況に応じた的確な処 置が重要である。その最適な方法を検討するには、 火災の探知、発達、発生する煙及びガスの広がりな ど煙流動現象の把握が火災安全工学上必要不可欠で ある。しかし、火災実験では現象の再現性が乏しい のみならず、必要な物理量の計測が非常に難しい。 その欠点を補うことができる有効な手段の一つとし て数値シミュレーションが挙げられる。

火災現象は化学反応を伴う高温乱流場であるた め,理論解析はもとより数値解析的にも瞬時局所的 な物理量を詳細に得ることは難しい。これまで火災 現象の数値シミュレーションには主に二層ゾーンモ デル (Two-layer Zone Fire Model)¹⁶⁾が用いられて きた。これは区画火災を対象としたモデルで、個々 の区画を空間的に均質な熱い上層部と冷たい下層部 の2つに分割することで簡単化する。それぞれの層 において質量及びエネルギーバランスを考慮し、そ の他の物理的過程を記述するモデルは常微分方程式 や代数方程式の形で適宜組み込まれる。ゾーンモデ ルは物理モデルとして簡単である上、数値計算も比 較的簡単で計算コストが極めて低いことから実用的 に広く用いられている。しかし、解析対象を二層に 分割した記述で現実を模擬できる場合には得られた 計算結果を信頼できるものの、モデル化の仮定から 外れた場合、モデルを系統的に改良することは難し い。

近年の計算機能力の急速な向上と計算流体力学

(CFD; Computational Fluid Dynamics) 的手 法の成熟に伴い、火災現象の研究に CFD モデル が適用されるようになってきた。その中で主に用 いられているものは Reynolds 平均により定式化 されたモデル (RANS; Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) である¹⁶⁾。一方,こ のような平均操作を行わず、計算格子よりも大き なスケールの渦を直接解き、格子サイズよりも小 さなスケールの渦についてモデル化を行う Large-Eddy Simulation (LES) は, Reynolds 平 均モデルに比べて多くの計算格子を必要とするた め計算コストが高く, LES を採用した火災 CFD モデルによる研究は極めて少ない。しかし、火災 に伴う流れ場は浮力の影響が強く, Reynolds 平均 モデルによるこのような流れ場の再現性は低いこ とが知られており、LES に基づく CFD モデルの 適用が望ましい。

最近,LES を採用した CFD 解析コード(Fire Dynamics Simulator; FDS)^{17,18)}が,米国商務省 標準技術研究所(NIST; National Institute of Standards and Technology)において開発された。 FDS を応用した数値解析^{19,20)}や FDS の性能評価 を行った研究結果²¹⁾⁻²³⁾が報告されており,火災現 象の数値解析に特化した有望な CFD モデルとし て評価されている。しかし,現状の CFD モデル による火災現象の再現性については,基礎研究の 観点からは不十分で,実用工学的な観点からもそ の要求を完全に満足させる水準には至っていない。

そこで第4章では、FDSのCFDモデルを構成 する各サブモデル(乱流モデル,燃焼モデル,輻 射モデル,消炎モデル,スプリンクラーモデル 等々)の中で,熱及び煙流動解析の基礎である乱 流モデルに着目し,火災流動場におけるサブグリ ッドスケール(SGS;Subgrid Scale)モデルの比 較を行った。さらに,船体動揺を考慮した数値シ ミュレーションを実施し,船体動揺が火災時の区 画内で生じる流動場に及ぼす影響について検討し た。

まず, 6.1.1 節で二層ゾーンモデル, 6.1.2 節 で CFD モデルについて概説し, 6.1.3 節で SGS モデルの比較結果ならびに船体動揺の影響につい て詳述する。

6.1.1 二層ゾーンモデル

二層ゾーンモデルの数値計算コードは多数開 発されている¹⁶⁾。本研究では、日本で開発された BRI2002¹³⁾を使用している。以下では文献^{[14,24)} に基づき二層ゾーンモデルの概要を示す。二層ゾ ーンモデルは、その名のとおり二層ゾーンの概念 に基づいて開発されたモデルである。二層ゾーン とは、図-6.1 に概念的に示すように、火災時の居住 空間の上部は温度の高い上部層(高温層)、下部は相 対的に温度の低い下部層(低温層)が存在すると仮 定し、それぞれの層を検査体積として火災に伴う物 理的性状を簡単化するものである。それゆえ、これ に関係して二層ゾーンモデルでは、次のような仮定 を設定する。

- (a) 船舶など構造物内の任意空間は上部層と 下部層の2つの層によって満たされて いる.
- (b) 上部層と下部層は水平な境界面(不連続 面)で明確に区分される。
- (c) 各々の層の内部は、活発な混合のため、温度や化学種濃度など物理的な量が一様になっている。
- (d) 各層の境界面を通しての質量の移動は、火 災プルーム、開口流およびそれを源とする 開口噴流プルームのみによって生じる。
- (e) 各層の境界面を通しての熱エネルギーの 移動は、(d)の質量の移動に伴うほか、周 壁との間の輻射および対流熱伝達、ならび に同一空間内の他方の層との間の輻射熱 伝達によってのみ生ずる。
- (f) 火源上の火炎からの直接の輻射は無視する。
- (g) 窓, 扉開口等を通しての輻射等, 空間を異 にするゾーン間の輻射熱伝達は無視す る。
- (h) 構造物内の各空間の体積は空間内の圧力 の変化,その他の理由により伸縮しないも のとする。



図-6.1 二層ゾーンモデルの概念

ゾーン中の気体についての質量の保存,化学種の 保存,エネルギーの保存および気体の状態から以下 のような保存関係式が得られる。なお,以下の式で は考えているゾーンは添字*i*で識別するが,表記上 の簡潔さのため,流入と流出を区別する必要のある 開口流量以外は原則として添字*i*は省略している。 (1) 質量の保存

ー般にゾーン中では、燃焼反応による熱の発生 ならびに化学種の生成及び消滅が起こっているが、 化学反応による質量変化は生じないため、ゾーン 中の気体質量は境界を通しての質量の出入りによ ってのみ変化する。したがって、質量保存則は次 のように表される。

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = \sum_{j} \left(-m_{ij} + m_{ji}\right) \qquad \cdot \cdot \cdot (6.1)$$

ここで、 ρ はゾーンの気体の密度、Vはその体積 である。 m_{ij} 及び m_{ji} は、それぞれゾーンの境界を 通して流出及び流入する気体の質量流速である。 具体的には、開口を通る気体の移動、火災プルー ム、機械換気などに伴って発生する。添え字jは 隣接するゾーンを表しており、式(6.1)の右辺は 隣接するゾーンに対する流入と流出量の和である。

(2) 化学種の保存

ゾーン中の特定の化学種*l*を考えると、その量 の変化は、境界を通して流入あるいは流出する気 体の移動及びゾーン内の燃焼反応により起こるた め、

$$\frac{d}{dt}(Y_l\rho V) = \sum_j \left(-Y_l m_{ij} + Y_{l,j} m_{ji}\right) + \Gamma_l \cdots (6.2)$$

ここで、 Y_l は化学種lの質量分率である。火災に 関係する気体中の化学種lとして、可燃ガス、 O_2 、 CO_2 、CO、 H_2O 、 N_2 および煙粒子が主要なもの として挙げられる。その他にも様々考えられるが、 これら全ての化学種の質量分率の和をとれば、

$$\sum_{l} Y_{l} = 1 \qquad \cdot \cdot \cdot (6,3)$$

また、 Γ_l は化学種lの生成速度であり、 M_f および M_l を燃料および化学種lの分子量、 v'_l および v''_l を原系および生成系の化学種lの化学量論係

数, *m_bを燃焼速度とすると次のように表される。*

$$\Gamma_l = \frac{\left(\nu_l'' - \nu_l'\right) M_l}{\nu_f' M_f} m_b \qquad \cdots \qquad (6.4)$$

(3) 熱エネルギーの保存

火災空間では燃焼に伴う発熱があり,それにより 温度上昇した気体と周壁の間は熱伝達による熱の移 動が生ずる。また,温度差による換気によって隣接 空間との間に熱の移動が起こる。これらを考慮する と,ゾーンの熱エネルギーの保存は次のように表さ れる。

$$\frac{d}{dt}(c_p\rho VT) = Q + Q_h + \sum_j c_p\left(-Tm_{ij} + T_jm_{ji}\right)$$

 $\cdot \cdot \cdot (6.5)$

ここに、Tはゾーンの気体の温度、 c_p は気体の定

圧比熱,Qは燃焼による発熱速度, Q_h は熱伝達によりゾーンが得る熱量である。

(4)気体の状態ゾーン内の気体を理想気体と見なすと、

$$p = \frac{\rho}{M} RT \qquad \cdots (6.6)$$

ここで、*p*は圧力、*R*は普遍気体定数、また*M*は気体の平均分子量である。

これらの保存式及び状態方程式から温度,濃度,ゾ ーン体積及び圧力を陽に与える式,いわゆるゾーン方 程式に変形すると次のようになる。

●化学種の質量分率

$$\rho V \frac{dY_l}{dt} = \sum_j (Y_{l,j} - Y_l) m_{ji} + \Gamma_l \qquad \cdot \cdot \cdot (6.7)$$

●温度

$$c_p \rho V \frac{dT}{dt} = Q + Q_h + c_p \sum_j m_{ji} \left(T_j - T \right) \cdot \cdot \cdot (6.8)$$

●体積

$$c_p \rho_{\infty} T_{\infty} \frac{dV}{dt} = Q + Q_h + \sum_j c_p \left(-T m_{ij} + T_j m_{ji} \right)$$

$$\cdot \cdot \cdot (6.9)$$

●空間の圧力

$$\sum_{1,2} \left\{ Q + Q_h + \sum_j c_p \left(-Tm_{ij} + T_j m_{ji} \right) \right\} = 0$$
. . . (6.10)

●状態方程式

$$\rho T = \rho_{\infty} T_{\infty} = \frac{PM}{R} \approx 353 \qquad \cdots (6.11)$$

ここで、ゾーン方程式の導出において、比熱 c_p 及び分子量Mを一定と近似している。添字 ∞ は、 火災による燃焼生成物を含まない純粋な空気を表 している。

連立常微分方程式(6.7)~(6.9)および非線形代 数方程式(6.10)は、二層ゾーンモデルで最も基 本となる式であるが、これらの右辺には燃焼発熱、 火災プルームや開口流などの流量、熱伝達速度な ど火災現象を構成する要素過程に関する量が多く 含まれている。それゆえ、これらの構成方程式に より方程式系を閉じなければ実際には解くことは 出来ない。各要素過程モデルの詳細については文 献^{13),24)}を参照されたい。

6.1.2 CFD モデル

本研究で使用した計算コードは,NIST で開発 された Fire Dynamics Simulator (FDS)^{17,18)}で ある。FDS は火災解析に特化した CFD プログラ ムで,主に次のような特徴を持つ。

- 低マッハ数近似が成り立つ流れ場を対象。
- 乱流場の解析は LES によって行い, SGS モデルとして最も代表的な Smagorinsky モデル²⁵⁾を採用。
- 混合分率を用いる火炎面モデルと酸素消費法 ²⁶⁾を組み合わせた乱流拡散燃焼モデルを火源のモデルとして採用。
- 輻射伝熱の影響は、非散乱性気体の輻射輸送方程式を有限体積法的に解くモデル²⁷⁾により評価。
- 空間微分項の離散化には2次精度中心差分 スキーム,対流項には局所クーラン数をパ ラメータとした風上差分スキームが用い られている。時間積分は2次精度の予測 子・修正子法による陽解法を使用。計算格 子は矩形の直交格子であり、マルチブロッ ク格子にも対応。
- MPI (Message Passing Interface) ライブ ラリを利用した並列計算が可能。

流れ場の支配方程式は,次のように質量保存式, 運動量保存式,発散拘束条件,混合分率の保存式 及び状態方程式からなる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} \qquad \cdot \cdot \cdot (6.12)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{u} \times (\nabla \times \mathbf{u}) + \nabla \left(\frac{|\mathbf{u}|^2}{2} + \frac{p}{\rho_{\infty}} \right) \qquad (6.13)$$
$$= \frac{1}{2} \left((\rho - \rho_{\infty}) \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \tau \right)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{\rho c_p T} \left(\nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot \sum_l \int c_{p,l} dT \rho D_l \nabla Y_l - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \dot{q}''' \right) + \left(\frac{1}{\rho c_p T} - \frac{1}{p_0} \right) \frac{dp_0}{dt}$$

• • • (6.14)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Z) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Z) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Z) \cdot \cdot \cdot (6.15)$$

$$p_0 = \rho TR \sum \left(\frac{Y_l}{M_l}\right) \cdot \cdot (6.16)$$

ここで、tは時間、 ρ は密度、 \mathbf{u} は速度ベクトル、 pは圧力、Tは温度、Yは質量分率、Zは混合分率、 τ は応力テンソル、kは熱伝導率、 c_p は定圧比熱、 \mathbf{q} , は輻射熱流束である。下付き添字lは化学種、 \dot{q} "は 単位体積あたりの発熱率、Dは物質拡散係数、Mは 分子量を表す。支配方程式に質量分率Yの保存式が 含まれていないが、これは混合分率Zが求められる と、ZとYの状態図(図-6.2 参照)から瞬時局所の 各化学種の質量分率Yが決定される。

FDS に採用されている乱流モデルは Smagorinsky モデル $^{25)}$ である。このモデルは簡潔 であることと数値計算の安定性が良いことから工学 的に広く用いられており、渦粘性係数 μ_{LES} は次のよ うに表される。

$$\mu_{\text{LES}} = \rho \left(C_{\text{S}} \Delta \right)^2 \sqrt{2 \text{def } \mathbf{u} \cdot \text{def } \mathbf{u} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \mathbf{u} \right)^2},$$

 $\cdot \cdot \cdot (6.17)$



図-6.2 混合分率と各化学種の質量分率の状態図

def
$$\mathbf{u} = \frac{1}{2} \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^t \right]$$
 (6.18)

 C_s は Smagorinsky 定数で、多くの計算例や理論 解析により 0.1 から 0.2 程度であることが分かっ ている。 Δ は空間フィルター幅で、各方向の計算 格子幅を用いて $\Delta = \sqrt[3]{\Delta_x \Delta_y \Delta_z}$ により定義している。 熱及び物質の乱流拡散の影響を考慮するため、熱 伝導率 k 及び物質拡散係数 Dについては渦粘性 係数 μ_{LES} を用いて次のようにモデル化している。

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES}c_p}{\Pr_t} \quad ; \quad (\rho D)_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t} \qquad \cdots (6.19)$$

ここで, Pr,は SGS Prandtl 数, Sc,は SGS Schmidt 数である。

6.1.3 CFD モデルによる火災現象の数値予測(1) 乱流モデル

FDS に採用されている Smagorinsky モデルの 欠点として,異なる種類の流れに適用する場合に C_s の値を変えなければならないこと,非乱流域や 壁近傍で修正を要することが挙げられる。そこで 本研究では,これらの欠点を克服することを目的 として開発された次の 2 つの SGS モデルを取り 上げ,FDS における SGS モデルの性能評価を行 う。

(a) 構造関数モデル²⁸⁾

$$\mu_{\text{LES}} = 0.105 C_{K}^{-\frac{3}{2}} \rho \Delta \sqrt{\left\langle \left\| \mathbf{u} \left(\mathbf{x} + \mathbf{r}, t \right) - \mathbf{u} \left(\mathbf{x}, t \right) \right\|^{2}} \right.}$$
(b)

...(6.20)

 C_{κ} : Kolmogorov 定数 (=1.4)

(c) WALE モデル²⁹⁾

$$\mu_{\text{LES}} = \rho \left(C_w \Delta \right)^2 \frac{\left(S_{ij}^d S_{ij}^d \right)^{\frac{3}{2}}}{\left(S_{ij} S_{ij} \right)^{\frac{5}{2}} + \left(S_{ij}^d S_{ij}^d \right)^{\frac{5}{4}}} \\ \cdot \cdot \cdot (6\text{-}21)$$
$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left(g_{ij}^2 + g_{ji}^2 \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} g_{kk}^2, \quad g_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ \cdot \cdot \cdot (6\text{-}22)$$
$$C_w : モデ ル 定数$$

FDS はオープンソースのプログラムであるため, プログラムの一部を書き換え,標準で採用されてい る Smagorinsky モデルを用いた場合に加え,前述 の 2 つの SGS モデル((a)及び(b))を組み込んだ場 合についても計算した。使用プログラミング言語は Fortran90 である。

(2) 解析対象

SGS モデルの性能評価には図-6.3 に示す区画内 の火災現象を解析対象とした。この区画を対象とし た実験は Steckler ら 30),31)によって行われ, 詳細な 計測データが報告されており、これまで数多くの火 災 CFD モデルの検証に利用されている³²⁾。区画寸 法は,床面積が2.8 m×2.8 m,高さ2.18 mで,幅 0.74 m×高さ1.83 mの開口を持つ。壁厚は0.1 mで, 区画内の流れ場が短時間で定常状態に達するように 壁面はセラミック断熱板で覆われている。開口部に 流速プローブならびに熱電対が設置されている。ま た,区画内温度を計測するため,区画隅に熱電対が 設置されている。メタンを燃料とする多孔板拡散バ ーナーを火源として用いており、バーナー径は 0.3 m である。Steckler らは発熱率,開口面積及び火源 位置を変え、45 通りの実験を行っている。 (3) 計算条件

FDS は少ない格子点数で計算機負荷を抑え,短時間で計算結果を得るための実用解析モデルであり, 壁面近傍の流れ場などを詳細に解析することを目的 とした CFD モデルではない。それゆえ,本研究で は火源が壁近傍にある場合を対象とせず,図-6.3(b) のように火源を区画中央に設置し,発熱率が 62.9 kWの場合を取り上げて数値解析を行った。





図-6.3 火災実験 30,31)で使用された区画の概略図

図-6.4(h_7 - n° - ν)に計算領域と計算格子を示す。 計算領域については、区画内だけでなく開口部に 続けて区画外にも計算領域を取り、区画内の流れ 場に対する境界条件の影響を低減している。計算 格子は各方向とも等間隔に設定した。使用した格 子点数は146,853 点で、格子間隔は約6 cm であ る。Smagorinsky 定数 C_s については、感度解析 の結果 ²¹⁾に従い 0.2 に設定した。また SGS Prandtl 数 Pr_t, SGS Schmidt 数 Sc_t については、 それぞれ 0.5 及び 0.3 とした ¹⁸⁾。上述のものを含 め、計算に必要な諸条件を表-6.1 に示す。

(4) 区画内流れ場の様子

まず, Smagorinsky モデルによる解析結果の一 例を図-6.5(カラーページ)に示す。点火から 20 分後の 十分発達した流れ場の速度ベクトル及び 80°C の 等温面を表している。開口部からの外気の流入に より,火災プルームは床面中央の火源から斜め上 方に形成されている。また,等温面は床面に平行に 形成されており,上部高温層と下部低温層の2つの 層が形成されていることが分かる。火災プル 表-6.1 計算条件

Physical conditions	
Fuel	Methane
Heat relearse rate	62.9 [kW]
Wall condition	Adiabatic
Initial conditions	
Ambient velocity	0 [m/s]
Ambient temperature	29 [°C]
Computational conditions	
Computational domain	4.3×2.8×2.18 [m]
Number of grid points	81×49×37
Smagorinsky constant	0.2
WALE model constant	0.325 - 0.5
SGS Prandtl number	0.5
SGS Schmidt number	0.3

ームの吹き倒し並びに二層に成層化した状態は,区 画火災でよく観察される現象である。本計算は,高 精度の乱流解析を行うには計算格子数及び計算スキ ームの精度ともに不十分であるが,火災プルームが 引き起こす大規模渦構造は再現されており,有望な 実用解析ツールであることが分かる。

以下, Steckler らの実験値^[16,17]との比較には定常 解が必要なため、点火から 20 分間の計算を行い、 最後の5分間の結果を用いて時間平均値を算出した。

(5) Cw 値の決定

比較対象の SGS モデルの一つである WALE モデ ル ²⁹⁾には未知のモデル係数 C_w が含まれているため, FDS に組み込んだ場合の最適値を決定する必要が ある。文献 ²⁹⁾では、一様等方性乱流の DNS (Direct Numerical Simulation)結果から C_w =0.5 を与え、 層流から乱流に遷移する円管内流れに適用している。 また、商用の汎用流体解析ソフトウェアである Fluent 6.2³³⁾では SGS モデルの一つとして WALE モデルが採用されており、 C_w =0.325 をデフォルト 値として与えている。そこで本研究では、 C_w を 0.325 から 0.5 の範囲で変化させ、図-6.6 に示すよ うに実験値との比較を行った。

図-6.6(a)及び(b)は開口部中央の温度及び流速で、 床面からの鉛直方向の分布を表しており、(c)は区画 内温度の鉛直方向分布を表している。区画から流出 する速度を正値(OUT)、流入する速度を負値(IN)で 表わしている。 C_w =0.325の場合を除き、 C_w 値に関 わらず計算結果に大差は見られず,温度分布及び 流速分布共に全体として実験値に近い分布を示し ている。特に速度分布については,実験結果と良 く一致していることが分かる。

+分な計算格子を確保できない実用解析では, 火炎の形状の正確な数値予測は難しい。エネルギ ー保存則の観点から意図した火災現象が数値的に 再現されるためには,少なくとも発熱率の正確な 算出が非常に重要となる。そこで,乱流モデルが 燃焼モデルに及ぼす影響,つまり *C*w値が火源の発 熱率に及ぼす影響について検討する。異なる *C*w値 に対する発熱率を表-6.2 に示す。*C*wの増加と共に 発熱率は実験値(62.9 k W)に近づき,*C*wを 0.45 以上に設定すれば誤差は 1%程度に抑えられてい る。

表-6.2 Cwが発熱率に及ぼす影響

C_w	Heat Release Rate [kW]	Error [%]
0.325	58.69	6.7
0.4	60.89	3.2
0.425	61.49	2.2
0.45	61.96	1.5
0.475	62.39	0.8
0.5	62.55	0.6
Experiment	62.9	0.0

以上のように、速度分布、温度分布ならびに発熱 率について実験結果と比較検討したところ、 C_w の 最適値の範囲は $0.45 \le C_w \le 0.5$ であり、この範囲 内であれば C_w が計算結果に及ぼす影響は軽微で あることが分かる。

(6) SGS モデルの比較

異なる 3 つの SGS モデルによる計算結果と実 験結果の比較を図・6.7 に示す。比較対象の SGS モデルは, FDS に標準で採用されている Smagorinsky モデル²⁵⁾,未知のモデル定数を含 まない構造関数モデル²⁸⁾,ならびに前節でモデル 係数を決定した WALE モデル³⁰⁾の 3 つである。 図・6.6 と同様,図・6.7(a)及び(b)は開口部中央の温 度及び流速で,床面からの鉛直方向分布を表し ており,(c)は区画内温度の鉛直方向分布を表して いる。(b)の流速分布についても同様に,区画から 流出する速度を正値(OUT),流入する速度を負値 (IN)で表わしている。図中の凡例の Smag, SF, WALE はそれぞれ Smagorinsky モデル,構造関 数モデル,WALE モデルを表わしている。



図-6.6 異なる Cw値による計算結果と実験値の比較



図-6.7 異なる SGS モデルによる計算結果と実験値の比

WALE モデルのモデル係数 C_w は, Smagorinsky 定数 C_s =0.2 に対応する 0.5 に設定した。流速分布については,各モデルとも実験値と良い一致が観察される。温度に関しても開口部及び区画内共に,各モデルによる予測値は全体として実験値に近い分布を示している。Smagorinsky モデルと構造関数モデルでは,モデル間で有意な差異は観察されないが,WALE モデルは上部の高温層で他のモデルに比べて 5°C 程度高く予測している。

次に、SGS モデルが燃焼に及ぼす影響を調べるため、発熱率の比較結果を表・6.3 に示す。SGS モデル に依らず実験値との誤差は1%未満であり、*C_w*など のモデル定数を適切に選択すれば、SGS モデルは発 熱率にほとんど影響しないことが分かる。

SGS model	Heat Release Rate [kW]	Error [%]					
Smagorinsky	6308	0.3					
Structure Func.	62.89	0.0					
WALE	62.55	0.6					
Experiment	62.9	0.0					

表-6.3 SGS モデルが発熱率に及ぼす影響

構造関数モデルならびに WALE モデルは壁面近 傍での渦粘性の減衰を考慮し, Smagorinsky モデル を改良したモデルであるが,本計算のような少ない 格子点数での使用を想定していないため,最も低次 の SGS モデル (Smagorinsky モデル)による結果 と有意な差が見られないと考えられる。本節での比 較は,十分発達した流れ場の時間平均値の比較であ るため,火災初期段階の非定常過程における SGS モデルの性能評価を次節で行う。

(7) 熱感知器の応答性

火災プルームの形成に伴う上昇気流が天井に衝突 した後,天井に沿って同心円状に広がる天井ジェッ トの温度や流速は,天井に設置された火災感知器や スプリンクラーヘッドの作動に関係するため,火災 安全工学の観点から非常に興味深い。また,火災感 知器の作動に関わる火災初期段階の流れ場は火源近 傍の高温乱流場であり,実験による計測は非常に困 難である。それゆえ本計算結果と実験値を直接比較 することはせず,熱感知器モデル^[20]を使用し,熱感 知器の作動時間を指標として非定常過程における SGS モデルの影響を評価することとした。

対象とする熱感知器は定温式スポット型熱感知 器で,感知器の感熱部は周囲の高温空気から熱を受 けて徐々に温度が上昇し、それが一定温度を超え たときに作動するものである。熱感知器の作動時 間を予測するため、感知器感熱部の熱伝達過程は 次式でモデル化されている³⁴⁾。

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{\sqrt{|\mathbf{u}| \left(T_g - T_d\right)}}{RTI} \qquad \cdots (6.23)$$

ここで、 T_d は感熱部の温度、 T_g 及び \mathbf{u} はそれぞれ 感熱部付近の気流の温度及び速度ベクトルである。 RTIは応答時間指数(Response Time Index)で、 感熱部の熱的な応答時定数を流速で規格化したも のである。

船舶火災を想定した場合,船体動揺が火災プル ームや天井ジェットに及ぼす影響を調べることは, 船舶での避難安全対策を講ずる上で重要である。 そこで,動揺影響を考慮した火災初期の流れ場に おける SGS モデルの影響についても感熱部温度 の時間変化を求めることで検討した。船体動揺の ー例として,船舶のローリングを振幅 $A=9.8\sin5^{\circ}(m/s^2)$,周期T=8(s)の単振動 $A\sin(2\pi t/T+\alpha)$ で模擬し,開口面に対して垂直 に区画を振動させた。着火時の船体姿勢の影響を 考慮し,初期位相 α が0及び $\pi/2$ の2つの場合に ついて検討した。ここでは作動温度が74°C, RTI が100の熱感知器が天井中央,つまりバーナーの 真上に設置されている場合について計算を行った。

図-6.8に熱感知器感熱部の温度の時間変化を示 す。 (a)は動揺を考慮しない場合, (b)及び(c)は動 揺を考慮した場合で,それぞれ $\alpha = 0$ 及び $\alpha = \pi/2$ の結果を示している。図中の凡例の Smag, SF, WALE はそれぞれ Smagorinsky モデル,構造関 数モデル, WALE モデルを表している。(a)から(c) の全てにおいて SGS モデルにより作動時刻に差 異が見られる。また、動揺の有無によっても感熱 部の温度変化に差異が現われており、流れ場が SGS モデルに依存していることが分かる。しかし ながら、船舶における消火活動や避難は、感知器 の作動と同時に開始されるものではなく、感知器 の作動後に火災確認が行われ,その後開始される。 そのため感知器の作動時間における有意な差異は, 30秒から1分程度と考えられる。こうした消火活 動等の時間スケールに対して,SGS モデルの違い による作動時間の差異は 3~5 秒程度である。よ って,時間平均値が重要な十分発達した流れ場だ けでなく,熱感知器の作動時間の予測など瞬時局 所の物理量が重要な場合においても、計算結果の SGS モデル依存性は安全評価の観点からは問題

にならないと考えられる。

6.1.4 まとめ

第4章では、NISTで開発された火災解析 CFDコ
 ド Fire Dynamics Simulatorの乱流モデルに着目し、火災流動場における SGS モデルの性能評価を行った。本研究で得られた結論は次の通りである。

- 1. SGS モデルとして WALE モデルを採用した 場合,モデル定数 C_w の最適値の範囲は $0.45 \le C_w \le 0.5$ であり,この範囲内であれば 計算結果に及ぼす C_w の影響は極めて小さい。
- 2. 実験結果と計算結果の時間平均値を比較した ところ,十分発達した火災流動場では SGS モ デル間で大きな差異は見られない。
- 3. 船体動揺の影響を考慮し、火災の初期段階で重要となる熱感知器の応答性について調査したところ、瞬時局所的な流速及び温度が影響するため、熱感知器の作動時間はSGSモデルに依存する。しかし、避難や消火活動の評価の観点から検討を要するほどの作動時間の差異は見られない。

以上により, FDS に標準で採用されている Smagorinsky モデルは最も低次の SGS モデルで あるが,安全評価の観点からは高次の SGS モデル に比して有意な差異のない結果を与えるため,実 用解析では Smagorinsky モデルで十分であると 結論付けられる。





6.2 火災実験によるプログラムの検証

6. 2. 1 標準火災試験

標準火災試験のモデルを用いて, FDS による火 災進展シミュレーションを試みた。ここでは, FDS による計算結果と実験結果との比較につい て述べる。

FDS で作成した標準火災試験モデルの概観図 を図- $6.9(h_{7}-x^{\circ}-y^{\circ})$ に示す。また、三面図による試 験モデルの見取り図を図-6.10 に示す。計算対象 領域のサイズは、 $4.40\times4.35\times2.40m$ で、計算格子 数は、 $88\times87\times48$ 個とした。またモデル内の壁面 は石膏ボードとし、初期温度は 9.0℃とした。計 算 対 象 時 間 は 600 秒 と し 、計 算 機 (Xeon,3.2GHz×2cpu)の並列処理による所要時 間は約 67 時間であった。

図-6.11 に発熱速度の時間変化を示す。ここで、 図-6.11(a)は、実験で得られた発熱速度を表し、図 -6.11(b)は、今回の計算で用いた発熱速度を表して いる。また火源については、実験では軽油を用い ているが、計算では灯油およびプロパンを用いた。

図-6.12 に、高さ方向の熱電対別に見た温度の 実験結果と計算結果の時間変化を示す。図-6.11(a) は、火災室と通路を通じる出入口中央、(b)は通路 と外部を通じる出入口中央、(c)は火災室隣の非火 災室と通路を通じる出入口中央、(d)は火災室中心 付近、(e)は通路中心付近、(f)は非火災室中心付近 の温度変化を示す。また図中の太い実線は実験結 果を,細い実線は火源が灯油の場合の計算結果を、 細い波線はプロパンの場合の計算結果を示してい る。これらの図より、火源の違いによる差異は、 見受けられないと考えられる。

図-6.12(a)~(f)をみると、火源近傍の温度変化 については、実験結果と計算結果の温度差が目立 っている。これは、火源のモデルが実験時のよう に再現できないことが一因であると考えられる。 一方、通路などについては、実験結果と計算結果 がほぼ同じような温度変化を得ることができた。

次に、開口部などの鉛直方向の平均温度分布を みることとした。図・6.13 に実験結果と計算結果 の高さ方向の平均温度分布を示す。図・6.13 (a)~ (f)は、前の図と同様の場所における温度分布を示 す。また図中の黒丸は実験結果、白丸は灯油によ る計算結果、三角はプロパンによる計算結果を示 す。なお、実験結果、計算結果の温度は、それぞ れ温度の変動が小さい 120 秒間の平均を用いた。 こちらも前の結果同様、火源近傍については、一 致しているとは言い難いが、火災室から離れた 場所については、実験結果と計算結果がほぼ同 じような結果が得られた。

FDS を用いて,標準火災モデルを対象に火災 進展シミュレーションを行ったところ,火災室 については,実験結果と計算結果に差異が現れ たものの,それ以外の場所については,概ね同 じような結果が得られた。このことから,今回 の計算に限っているが,FDS を用いて,火災室 以外の場所に関する温度変化などが再現できる ものと考えられる。

6.2.2 二層構造物火災試験

二層構造物火災試験のモデルを用いて, FDS による火災進展シミュレーションを試みた。こ こでは, FDS による計算結果と実験結果との比 較について述べる。

FDS で作成した二層構造物火災試験モデル の概観図を図-6.14($h\bar{j}$ - $^{\circ}$ - $\dot{\gamma}$)に示す。計算対象 領域のサイズは、5.5×2.8×2.8mで、計算格子数 は、110×56×56 個とした。またモデル内の壁面 はケイ酸カルシウムとガラス窓とし、初期温度 は 9.0℃とした。計算対象時間は 300 秒とし、 2 台の計算機 (Pentium4, 3.8GHz) の並列処 理による所要時間は約 6.5 時間であった。また 火源は、実験同様プロパンを 67kW 一定の発熱 速度を与えるように設定した。なお火災室は、 図-6.15 において、1 階右端の船室とした。

図-6.16-18に,計測点のうち、1階火災室内、 1階通路の火災室と隣室境界付近、そして、2 階の火災室真上室内での計測結果を示す。それ らの図は、各計測点における鉛直方向の温度の 時間変化を示し、(a)、(b)はそれぞれ実験結果と 計算結果を表している。これらの図中において, 熱電対の温度変化は、線種ごとに高さ別で表し ている。なお熱電対の設置高さは、船室内と通 路内においては、床から 15cm 刻みで 75cm ま で,出入口においては床から 12cm 刻みで 60cm までとした。これらの図より、場所によって実 験結果と計算結果の温度差が多少あるものの, 通路や2階などについては、実験結果と計算結 果がほぼ同じような温度変化を得ることができ た。以上より、FDS を用いて火災室および非火 災室や通路などの温度変化などをある程度正確 に推定できると思われる。



図-6.10.標準火災試験モデルの三面図(単位:mm)



(a) 火災室出入口(高さ方向) (b) 通路出入口(高さ方向) 図-6.12 標準火災試験モデルにおけるシミュレーション結果と実験結果の比較(その1)



(e) 通路中央(高さ方向)

(f)非火災中央(高さ方向)

図-6.12 標準火災試験モデルにおけるシミュレーション結果と実験結果の比較(その2)



図-6.13 実験結果と計算結果の高さ方向の平均温度分布



図-6.15 二層構造物実験モデルの三面図(〇記号は熱電対設置位置)(単位:m)



図-6.17 温度の時間変化(1階通路,火災室と隣室境界付近,1C2)



図-6.18 温度の時間変化(2階火災室真上室内,2R1)

- 8.3 火災リスク推定の高精度化と短時間化との調 和
- 3.1 二層ゾーンプログラムによる予側結果から FDS による解析結果を予測する方法

非常に高速なフィールドモデルの計算ソルバーで ある FDS でさえ、二層ゾーンプログラムの 1 つで ある BRI2002 の1万倍も時間がかかる³⁵⁾。そこで、 適当な数の典型的な Deck Plan で、FDS と BRI2002 を用いて各 Deck Plan 毎に修正項の時系列を求める。 それらの Plan は既存の旅客船でも良いし、新たに そのような Plan を作成しても良い。このような Deck Plan を標準 Deck Plan と呼ぶことにする。新 たな旅客船が計画された場合、その Plan に最も近 い標準 Deck Plan を選び、修正項を得、新たな Plan に対して BRI2002 で計算し、各時点、各地点で修 正項を加え FDS で計算し上限値、下限値を求める。 その際、各層の平均値の差から FDS の平均値を求 め、FDS の平均値から各空間における FDS による 温度、一酸化炭素等の毒性ガス、およびすすの濃度 の分布を求める。

修正項を求めるに当っては、図-6.18 のように火 災室を中心に空間の種類、MVZ(Main Vertical Zone)、甲板、船側方向の並び、船長方向の並びの 違いにより対象旅客船の各空間の指定を行い、指定 毎に修正項を得る。

空間指定 X(n1,n2,n3,n4)は、

X:居住空間種類(R:room,C:coridor,

S:stair, H:hall,A:atrium)

n1:指定居住区間が存在している MVZ n2:指定居住区間が存在している甲板 n3:指定居住区間が存在している船幅方向位置 n4:指定居住区間が存在している船首方向位置 を意味し、n1~n4 は離散値となる。 以上のようにして、BRI2002 と FDS とを 併用して、BRI2002 でまずシミュレーション を実施し、BRI2002 の結果に修正項を加える ことにより、FDS による解析結果を推定する ³⁶⁾。これにより、BRI2002 よりは FDS の結 果に近く、かつ短時間でシミュレーションが 可能となると考えられる。



図-6.18 火災室中心の船内居住空間の指定法 (例)

3.2 中規模旅客船を想定した例題

船長方向の長さがおよそ 80m、幅がおよそ 25m、 各甲板高さがおよそ 2.8m で7層の甲板で部屋数 が全部で 400 室以上の MVZ 内の火災進展シミュ レーションを FDS と BRI2002 で実施し、上述し た方法で差を取った。なお、この MVZ は1階から 3階までは船室が3列で通路が2本、4階から7階 までは幅がおよそ17mとなり船室は2列、通路は中 央の1列のみとなる。通路幅は2m弱である。

火災室のシミュレーション結果を図-6.19、最上層 甲板の通路中央部のシミュレーション結果を図 -6.20に示す。

シミュレーションは FDS および BRI2002 で実施 した。火災室は1 階中央下の列の船室で、火源の大 きさを 0.5MW から 0.5MW 刻みで 2.0MW まで 4 通 り変えて実施した。それらの図には、対象となる船 室あるいは通路の一部において、上層と下層の FDS および BRI2002 による温度および一酸化炭素濃度 の毎秒の推定値の最大値と最小値、そしてそれぞれ の差が示されている。

そのようにして対象旅客船の船室、通路等の各空間の修正項を求め、上述した方法により FDS による予測結果を短時間で推定することが可能と思われる。

また、旅客船の種類、大きさを旅客船全体を網羅 するように選ぶことにより、すなわち FSA で言うと ころの一般化モデルを定義することにより、どのよ うな旅客船でも FDS による、すなわちフィールド モデルによる予測結果を推定することが可能となり、 旅客船の火災リスクの評価が可能となると思われる。

しかし、そのような一般化モデルの定義には IMO における合意が必要であり、また、この方法により 修正項を得るための手続きが非常に手間と時間を消 費するものであることは予想に難くない。相当長時 間に亘るものであれば、スーパーコンピュータを用 いなければならず、この方法は現実的でなくなる可 能性が存在する。問題はリスクの評価精度と時間の トレードオフである。また、このような方法の意義 に関する検討が必要である。

7. おわりに

本研究により、リスクベース設計の核となる任意 の個船の火災リスクをシミュレーションを用いて解 析するための手法が得られた。このようなリスク解 析を可能とする以下の諸点が達成された。

- シミュレーションを簡易に実施するための方策の基礎として、船舶の一般配置図より得られる情報を格納するリレショナルデータベース(船舶GAデータベース)が作成された。
- 2) 船舶 GA データベースから火災進展および避難シ ミュレーションプログラムへの入力データを簡 易に作成するための種々の変換プログラムが作 成された。
- シミュレーションを実施すべき災害進展シナリオの数を大幅に削減し火災リスク解析の時間を

短縮するための方策が開発された。

- 4) 代表的な火災進展予測プログラムを吟味し、 CFD モデルプログラム(FDS)により船舶火災の 特徴である船舶同様時の火災状況について検 討した。
- 5) 高精度化のために CFD モデルプログラム (FDS) と二層ゾーンモデルプログラム (BRI2002)を併 用して BRI2002 を用いるよりも精度が高く、か つ FDS のみの場合より短時間に火災リスクを 求めるための方法が発案され、そのための基礎 的なデータが得られた。

SAFEDOR が目指しているリスクベース設計は主 に旅客船等の高付加価値船舶を対象としているが、 それらの船舶で実績を積めばタンカー、バルクキ ャリアー等の一般商船にも応用されるようになる ことが予想されるため、日本でも本報で検討した ような、シミュレーション等を使用した個船のリ スクベース評価を核としたリスクベース設計手法 の検討が今後重要になると思われる。本研究がそ のための基礎として活用されることを念願する次 第である。

謝辞

3~5章の研究は国土交通省の指導の下、日本財 団助成による(財)日本船舶技術研究協会の1995 ~1999年度「船舶の確率論的安全評価方法に関す る調査研究」において、さらに同協会と当所との 共同研究として実施した。上記の研究の実施に当 たり関係者各位の御指導、御協力に心より感謝す る次第である。また、船舶GAシステムの開発にお いては福元正明氏(当時、科学技術特別研究員)の、 また、当時避難シミュレーションプログラムの開 発においては戴暁旬氏(当時、科学技術特別研究 員)の協力に謝意を表する。

参考文献

- 1) Vassalos D. : RISK-BASED DESIGN : FROM PHILOSOPHY TO IMPLEMENTATION, P. 2nd Int'l Conf. of Design For Safety(DFS)(2004), 1-10
- Vassalos, D: Project Genesis RBD Realisation, Proc. of 2nd Int'l Conf. on Risk-Based Approarches in the Maritime Industry
- (社)日本造船研究協会:「RR42 平成 7-11 年度 調査報告書(船舶の確率論的安全評価方法に関 する調査研究)」(1995-1999),

- 4) JAPAN :Formal Safety Assessment Research project on quantification of risk on lives, IMO/MSC67/INF.9(1996)
- JAPAN: FORMAL SAFETY ASSESSMENT, MSC70/INF.7 (1998)
- 6) JAPAN: Formal Safety Assessment Method for reduction of number of accident scenarios, IMO/MSC72/INF.17(2000)
- 7) SAFEDOR: ENVIRONMENTAL RISK ACCEPTANCE CRITERIA - ANNEX 3 of MEPC55/18(2006)
- 8) Denmark:GOAL-BASED NEW SHIP CONSTRUCTION STANDARDS Guidelines on approval of risk-based design, MSC86/5/3(2009)
- 9) 金湖富士夫、池本義範:「避難シミュレーション による避難者モデルの開発」,日本 VR 学会論文 誌,Vol.5,No.3(2000),1041-1048
- Kaneko, F.: Methods for probabilistic safety assessments of ships, J. Marine Science and Technology(JMST)(2002), Vol.7, 1-16
- (社)日本造船研究協会:「RR73 平成 79 年度調査 報告書(船舶の防火に関する調査研究)」(1998)
- 12) (社)日本造船研究協会:「RR744 平成4年度調査報告書(高速船の国際基準に関する研究)」
 (1992)
- 13)「BRI2002:二層ゾーン建物内煙流動モデルと
 予測計算プログラム」,社団法人 建築研究振興協会(2003)
- 14) 戴暁旬,金湖富士夫:「船舶災害時における避難 解析手法について-第1報,避難者モデルの構 築方法およびシミュレーションについて-」,日 本造船学会論文集, Vol.184(1998)
- 15) 岡秀行:「火災現象のラージェディシミュレーションにおけるサブグリッドスケールモデルの比較」,日本マリンエンジニアリング学会誌第41 巻3号(2006),127-133
- 16) The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition, (2002), 3-189.
- 17) K. McGrattan ed., Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1018, (2004).
- 18) Y. Xin et al., Combust. Flame, Vol.141 (2005), 329-335.
- H.Y. Wang et al., Fire Safety J., Vol. 37 (2002), 259-285.
- R. Yang et al., Fire Safety J., Vol.40 (2005), 81-98.
- W. Zhang et al., Fire Safety J., 3Vol.37 (2002), 721-752.
- 22) T.G. Ma and J.G. Quintiere, Fire Safety J., Vol. 38 (2003), 467-492.

- 23) G.W. Zou and W.K. Chow, J. Fire Protection Eng., Vol.15 (2005), 77-92.
- 24)田中,改訂版 建築火災安全工学入門,日本 建築センター,(2002),129-145.
- 25) J. Smagorinsky, Monthly Weather Review, 91-3, (1963), 99-164.
- 26) C. Huggett, Fire and Materials, 4-2 (1980), 61-65.
- 27) S. H. Kim and K. Y. Huh, Numer. Heat Transfer B, Vol. 35 (1999), 85-112.
- 28) O. Metais and M. Lesieur, J. Fluid Mech., Vol.239 (1992), 157-194.
- 29) F. Nicoud and F. Ducros, Flow, Turbulence Combust., Vol.62 (1999), 183-200.
- 30) K.D. Steckler et al., 19th Symp. (Int.) on Combustion, (1982), 913-920, The Combustion Institute.
- 31) K.D. Steckler et al., 20th Symp. (Int.) on Combustion, (1984), 1591-1600, The Combustion Institute.
- 32) V. Novozhilov, Progress Energy Combust. Sci., Vol.27 (2001), 611-666.
- 33) FLUENT 6.2 User's Guide, (2005), Fluent Inc.
- 34) G. Heskestad and R. G. Bill, Fire Safety J., Vol.14 (1988), 113-125.
- 35)今里元信他:CFD プログラムと二層ゾーン プログラムによる旅客船火災の推定,第5 回海上技術安全研究所研究発表会講演集 (2005),85-88
- 36) Kaneko, F.: Possibility of Fire Risk Analysis of Large Passenger Ships by Application of a Zone Model Program - A Proposal of Simulation-based Risk Estimation, P.. 2nd Int'l Conf. of Design For Safety(DFS)(2004),215-226



図-6.19 FDSとBRIによる計算結果(第10甲板中央通路付近その1)



図-6.19 FDSとBRIによる計算結果(第10甲板中央通路付近その2)



図-6.20 FDSとBRIによる計算結果(第10甲板中央通路付近その1)



図-6.20 FDS と BRI による計算結果(第10甲板中央通路付近その2)

(400)



図-3.15 対象船舶の景観画像(DXFデータ+テ クスチャ)



図-3.10 DXF データ変換結果(対象:船舶)



図-6.5 着火 20 分後の流れ場の様子。中央断面上の速度ベクトル及び温度の等値面(80°C)



図・6.4 計算領域と計算格子



図-6.9標準火災試験モデル概観図



図-6.14 二層構造物火災試験モデル概観図



(a) 等温面(赤:100度C、白:50度C、緑:30度C)



(b) すすの分布 図-5.6 FDS による対象船舶の火災進展シミュレーションの途中経過(着火後 270 秒後)



図-5.7 火災進展シミュレシーションにより解析された一酸化炭素濃度の時系列を導入した 避難シミュレーションの一例