艤装設計における不確定性のある問題の 解析手法について

(その2 船舶火災の拡大条件)

正員 福 地 信 義* 正員 篠 田 岳 思**

A Practical Method for Analyzing the Indeterminable Problems in the Design of Ship Equipments
(Part 2) Conditions for the spread of ship fires

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

Summary

The various factors and conditions for the design of ship equipments contain several indeterminable elements, which could often introduce a certain amount of fuzziness in the designed values. In the previous part of this paper, a method of solution to such problems was attempted by evolving a Cartesian Product Model using the Fuzzy theory. This part investigates the prediction methods for the amount of fuzziness that could be introduced by the indeterminacy of the governing factors in a strongly parameter dependent phenomenon, based upon a combination of mathematical modelling and fuzzy relationships, using a fuzzy determination model.

As a practical example, the phenomenon of the incidence of ship fires and the conditions for its outburst and spread are investigated by dividing it into the flashover of the burning cell and its spread into the adjacent cells. The flashover threshold curve for the outburst of fire in a cell is determined first, and the fuzziness involved in the chances of a flashover is predicted in the threshold curve, using the fuzzy relationships. The conditions under which the fire would spread into the adjacent cells, and the range of thicknesses for the noninflammable intercell wall materials necessary to prevent that danger, are determined then by introducing the indeterminable values into the fuzzy determination model.

1. は じ め に

艤装設計では、設計要因や条件に不確定要素を含むために、これらに基づき解析した設計値にあいまいさをもつ問題が多くある。このような問題の解決法として、前報¹⁾ではファジィ理論による直積モデルを提案した。本報では、パラメータ依存性の強い現象について、支配要因のもつ不確定性から現象に顕れるあいまい量を、現象の数学モデルとファジィ関係の組合せにより、推定する方法および不確定現象の判定のためのファジィモデルについて述べる。

適用例として、船舶火災における火災拡大現象を火災区画のフラッシュオーバーと他区画への火災伝播とに分けて、火災拡大の条件を取扱う。まず、区画火災の拡大条件であるフラッシュオーバーの限界曲線を求め、あいまいさ

をもつ火災拡大要因により限界曲線に顕れるあいまい量をファジィ関係を用いて推定する。さらに、隣接区画への火災伝播の拡大条件として、火災拡大要因に不確定量を含んだファジィ判別モデルを提案し、これにより延焼を抑止するために必要な断熱材厚さを決定する手法を示す。

2. 区画火災の拡大条件

船舶火災のような区画火災の場合、火災の進行は火災成長期、火災最盛期、火災減退期の3つに分けられる。この内、火災成長期に温度が急激に上昇し、区画全体が火災につつまれる現象をフラッシュオーバーという。従って、フラッシュオーバーが起ると火災が急速に拡大するため、この現象が起る条件を把握することが必要である。なお、ここでは例として船室を対象とする。

2.1 区画火災モデル

(1) 発熱量

Fig.1(a)のように、一般船室の間仕切り壁はケイ酸カ

* 九州大学工学部

** 九州大学大学院工学研究科

Fig. 1 Modelling of a living space

ルシウム、ロックウールなどの断熱材と仕上材としての表面化粧板、クロスより成り、その上に据え付け家具などの可燃物が配置されている。さらに、床には内装材としてカーペット、寝具などの可燃物がある。

可燃性有機物が燃焼するときの発熱量 h (kcal/kg) は次の Dulong の式より見積もられる。

$$h = 8100\kappa C + 2900\left(H + \frac{O}{8}\right) - 600W \quad (1)$$

ただし、完全燃焼の場合 $\kappa=1.0$ 、不完全燃焼の場合 $\kappa=0.3$ とする。また、 C, H, O, W は有機物中の炭素、水素、酸素、水分の組成重量比である。

木材の場合の組成重量比を (1) 式に代入すると、完全燃焼で 3.6×10^3 kcal/kg、不完全燃焼では 1.1×10^3 kcal/kg となる。従って、完全燃焼率を x とすると、木材が燃焼したときの発熱量 h_w (kcal/kg) は次式で表わされる。

$$h_w = 3.6 \times 10^3 x + 1.1 \times 10^3 (1-x) \quad (2)$$

(2) 燃焼速度

可燃物が燃焼する際の見かけの反応速度は次の Arrhenius の式により表現できる²⁾。

$$r = A_a e^{-E_a/RT} \quad (3)$$

ここに、 E_a は活性化エネルギーであり、 R はガス定数 (1.986 cal/°K·mol)、 T は絶対温度 (°K) である。さらに、 A_a は頻度係数であり、次式で表わされる。

$$A_a = \nu c^n \quad (4)$$

ただし、 c は酸素濃度である。例えば、木材の場合には $n=1$ 、 $\nu=7.38$ (1/min)、 $E_a=4.85$ (kcal/mol) である。

反応熱量は h に相当するので、可燃物から発生する熱量は $h\beta r$ となる。ここで、 β はフラッシュオーバーが問題と

なる時点での燃焼量であり、初期火災荷重 m_0 とし、燃焼後残存した割合を ε とすると次式となる。

$$\beta = m_0(1-\varepsilon) \quad (5)$$

(3) 状態方程式

火災時に問題となる可燃物は形、質など種々あるが、船室内の可燃物を発熱量が等価な木材重量に換算³⁾し、それらを Fig. 1(b) に示すように壁、天井、床などの壁体に等価木材として配置する。なお、以降、天井、床を含めて壁体と呼び、区画の壁体数を N とする。

壁体表面の温度 T_{wi} ($1 \leq i \leq N$) および酸素濃度 c の時間変化は、燃焼中の壁体を I とすると次の熱収支方程式により表せる。

$$H_i \frac{dT_i}{dt} = h\beta \nu c e^{-E_a/RT_i} - \sum_{j=1, j \neq i}^N A_j \phi_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (6)$$

$$H_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \{A_j \phi_{ij} \sigma (T_j^4 - T_i^4) - \overline{KA}_i (T_i - T_0)\} \quad (7)$$

$$V_R \frac{dc}{dt} = -bce^{-E_a/RT_i} + \nu(c_0 - c) \quad (8)$$

ここに、 t は時間、 H_i は壁体の熱容量、 A_i は表面積であり、さらに V_R は区画の気積、 b は酸素消費に関する比例定数、 ν は単位時間当りの換気量である。また、 T_0, c_0 は区画内温度と酸素濃度の初期値であり、 $\overline{KA}_i$ は壁体 i における熱流強度、 σ はステファン・ボルツマン定数 (4.88 kcal/m²h°K⁴) である。さらに、 ϕ_{ij} は空間に相対する 2 平面 i, j 間の総括熱放射線吸収率であり、次式で求められる。

$$\phi_{ij} = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_j F_{ij}}{1 - (1 - \varepsilon_i)(1 - \varepsilon_j) F_{ij} F_{ji}} \quad (9)$$

ただし、 F_{ij} は形態係数、 ε_i は熱放射率である。

ここで、燃焼中の壁体と残りの壁体との位置関係を、Fig. 1(c) のように燃焼壁体が包囲される簡易モデルにより考える。燃焼壁体の表面温度 T_F および残りの壁体の平均表面温度 T_w の時間変化は次の熱収支方程式により表せる。

$$H_F \frac{dT_F}{dt} = h\beta \nu c e^{-E_a/RT_F} - A_1 \phi_{12} \sigma (T_F^4 - T_w^4) \quad (10)$$

$$H_w \frac{dT_w}{dt} = A_2 \phi_{21} \sigma (T_F^4 - T_w^4) - \overline{KA}_2 (T_w - T_0) \quad (11)$$

ここに、 H_F, H_w はそれぞれ燃焼壁体および残りの壁体の熱容量であり、 A_1, A_2 は燃焼壁体および残りの壁体の表面積である。なお、形態係数 $F_{12}=1$ であるから、 $F_{21}=F_{12}(A_1/A_2)=A_1/A_2$ となり、 ϕ_{12} は (9) 式より

$$\phi_{12} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(A_1/A_2)} \quad (12)$$

となる。ここに ε_1 は炎の熱放射率 (0.98) とし、 ε_2 は壁の熱放射率であり、0.5 を用いる。

(4) 状態量の安定性

酸素濃度 c 、燃焼壁体の温度 T_F 、未燃焼壁体の温度 T_w について次の状態量ベクトルを定める。

$$x = \{c(t) \quad T_F(t) \quad T_w(t)\}^T \quad (13)$$

火災区画の状態方程式(8), (10), (11)は、ベクトル値関数 $f(\mathbf{x})$ を用いてベクトル表示できる。

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (14)$$

(14)式は右辺に時間 t を陽に含まないため自励系である。従って、(14)式よりある状態量ベクトル $\mathbf{x}$ において $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ が1つずつ定まるため、勾配場を決めることができ、系の相空間が表現できる⁴⁾。

2.2 区画火災の数値計算例

区画火災の場合、燃焼の状態を支配する主な要因として、(i)換気回数、(ii)可燃物の量(火災荷重)、(iii)熱貫流状態(壁体の断熱材厚さに依る)、があげられる。

例として、床面より出火した場合について、 T_F , T_W , c を計算する。計算条件を Fig. 1 に示しており、この条件を標準とする。燃焼を支配する要因の影響を考察するため、標準条件に比べこれらを変化させた3ケースについて調べる。

case-A: 換気回数を変化

case-B: 火災荷重を変化

case-C: 熱貫流量を支配する断熱材厚さを変化

Fig. 2(a)は酸素濃度一定とした場合の燃焼壁体の温度 T_F とこれを囲む壁体の温度 T_W の相図である。これより、酸素が十分に補給される場合には T_F と T_W は急上昇することが分かり、火災が急拡大することを意味する。逆に、酸素の補給が制限を受けると、制限の程度に従い T_F , T_W はある温度に収束し、火災の拡大が抑止されることを示している。

燃焼壁体を囲む壁体の温度 T_W を一定とした場合の酸素

濃度 c と燃焼壁体温度 T_F の相図を Fig. 2(b)(1)に示す。これより、 c の減少とともに T_F はある温度に収束することが分かり、収束点は安定な平衡点である。

Fig. 2(b)(2)は T_F を一定にした場合の c と T_W の相図である。(b)(1)と同様に、 c の減少とともに、 T_W は安定平衡なある温度に収束し、酸素供給を遮断した場合の効果を示している。

Fig. 2(c)は(a), (b)に基づき、 c , T_W , T_F 間の相図を概念的に表わしたものである。酸素濃度が低いところに鞍点(S.P.)があるが、この鞍点は微分方程式のパラメータまたは初期値により大きく変化する。このため、火災区画の状態方程式のようにパラメータ依存性が強い場合には相図を十分検討する必要がある。

case-A について、燃焼壁体温度 T_F と残りの壁体温度 T_W の時間変化を Fig. 3(a), (b)に示す。 T_F は換気回数に関係なく600秒近くで急上昇、すなわちフラッシュオーバー現象がみられる。換気回数を少くすると、最高到達温度は下り、火災拡大の抑止効果がある。Fig. 3(c)は酸素濃度 c の時間変化である。フラッシュオーバーを境にして酸素濃度は急速に減少する。

case-B について、状態量 T_F , T_W , c の時間変化を Fig. 4(a), (b)に示す。火災荷重が小さくなるに従い、フラッシュオーバーに到る時間は遅くなるため、不燃化などによる火災荷重の軽減は消化活動や避難時間の確保のために必要である。

case-C についての状態量 T_F , T_W , c の時間変化を Fig. 5に示す。断熱材厚さを変えてもフラッシュオーバーに到

Fig. 2(a) Phase portraits of temperatures at and around the burning wall for constant values of oxygen content in the burning cell

Fig. 2(b) Phase portraits of temperature and oxygen content in the burning cell for constant values temperatures at and around the burning wall

Fig. 2(c) Phase portrait of the state equations

Fig. 3 Variations with time of temperature and oxygen content in the burning cell for different ventilation cycles

Fig. 4 Variations with time of temperature and oxygen content in the burning cell for different quantities of inflammable materials

Fig. 5 Variations with time of temperature and oxygen content in the burning cell for different thicknesses of the noninflammable wall materials

る時間は変わらないが、断熱材厚さを減らすと壁体の熱貫流量が多く放熱が増えるため、最高到達温度が低下するとともに、隣接区画への火災伝播の危険が生じてくる。

2.3 あいまいさの推定

火災拡大要因のもつあいまいさのために生じる不確定の現象のあいまい量をファジィ関係⁵⁾を応用して推定する。

(1) ファジィ関係

任意の集合 X と Y とのファジィ関係 $\underline{R}$ は次式により表わせる。

$$\underline{R} \subset X \times Y \quad (15)$$

ただし、記号 $\sim$ はあいまいさを意味し、 $\times$ は直積記号である。この $\underline{R}$ の重みはメンバーシップ関係 $\mu_{\underline{R}}$ により表わし(ただし、 $0 \leq \mu_{\underline{R}} \leq 1$)、重み 1 のときはクリスプな関係と考える。

さらに、任意の集合 Y, Z のファジィ関係 $\underline{S}$ を次式で定める。

$$\underline{S} \subset Y \times Z \quad (16)$$

すると $\underline{R}$ と $\underline{S}$ の合成 $\underline{S} \circ \underline{R}$ は次のメンバーシップ関数に

より定まる直積 $X \times Z$ に関するファジィ関係である。

$$\mu_{\underline{S} \circ \underline{R}}(x, z) = \max_{y \in Y} [\mu_{\underline{R}}(x, y) \wedge \mu_{\underline{S}}(y, z)] \quad (17)$$

ただし, $x \in X, z \in Z$, 記号 $\wedge$ は最小をとる。

関数は関係の特殊な場合なので, 集合 X と Y とのファジィ関係を (15) 式において, $y = f(x), (y \in Y)$ として関数に拡張する。Fig. 6 のようにある要因 $x (x \in X)$ のあいまいさを次式とする。

$$\underline{A} \subset X \quad (18)$$

$\underline{R}$ と $\underline{A}$ の合成は次式となる。

$$\underline{B} = \underline{R} \circ \underline{A} \quad (19)$$

ここで, $\underline{B}$ のメンバーシップ関数は次式で表わせる。

$$\mu_{\underline{B}}(y) = \max_{x \in X} [\mu_{\underline{R}}(x, y) \wedge \mu_{\underline{A}}(x)] \quad (20)$$

(19), (20) 式により要因 x のあいまいさ $\underline{x}$ が関数(現象) y に影響を与える大きさ, すなわち $y = f(\underline{x})$ を推定することができる。

計算に際しては次の手順をとる。まず, (18), (15) 式を次のように離散化する。

$$\underline{A} = \sum_j a_j / x_j, \quad (0 \leq a_j \leq 1) \quad (21)$$

$$\underline{R} = \sum_i \sum_j r_{ij} / (x_i, y_j), \quad (0 \leq r_{ij} \leq 1) \quad (22)$$

Fig. 6 The fuzzy relationship model

すると, (20) 式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \mu_{\underline{B}} &= \mu_{\underline{R} \circ \underline{A}} \\ &= \max_{x_j \in X} [\mu_{\underline{R}}(x_j, y_i) \wedge \mu_{\underline{A}}(x_j)] \\ &= \bigvee_{j=1}^n [\mu_{\underline{R}}(x_j, y_i) \wedge \mu_{\underline{A}}(x_j)] \end{aligned} \quad (23)$$

ここに, 記号 $\bigvee_{j=1}^n$ は $1 \leq j \leq n$ の中で最大をとる。

(2) フラッシュオーバーの条件

建物の実大火災実験³⁾⁶⁾⁷⁾などを参考にし, フラッシュオーバーをここでは次のように定義する。

- i) 出火した壁体が 20 分以内に 1200°K を超えること。
- ii) 出火壁体を包囲する壁体の温度が発火点 680°K を超えること。

この定義によるフラッシュオーバーに到る条件が火災拡大の条件と見なし, この支配要因として換気回数と火災荷重を選び, 数値計算により調べる。

ここで, 火災拡大の条件は支配要因を変数とした関数曲線として表わされるが, 定義 i), ii) を満す曲線をフラッシュオーバー限界曲線と名づけ, 定義 ii) のみ満す曲線を出火限界曲線と呼ぶ。なお, 計算条件は 2.2 と同じものとする。さらに, あいまいさを考慮するために, これらの限界曲線を次に示す分数関数を用いて, 最小二乗法により近似する。

$$y = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{(x-b)^i} \quad (24)$$

ただし, a_i, b は補間係数である。この近似曲線を用いて, 2.3(1) で述べた方法により, あいまい量を推定する。

単位面積当りの火災荷重 m と換気回数 v に関する出火限界曲線およびフラッシュオーバー限界曲線を Fig. 7 に示す。なお, m にはあいまいさを考慮している。また, 近似曲線は (24) 式の第 2 項までを用いて表わし, 出火限界曲線では $a_1 = 2.45, a_2 = 0.0053, b = 0.162$ およびフラッシュ

Fig. 7 Flame and flashover regions of ventilation cycles for different wood equivalence ratios

ーバー限界曲線では $a_1=3.43$, $a_2=0.0026$, $b=0.274$ となる。 m と v とが出火限界曲線より上方の領域の値をとる場合には区画火災が発生し、さらにフラッシュオーバー限界曲線より上方の値をとる場合にはフラッシュオーバー現象が現れる。

この限界曲線によると、火災荷重が小さい場合には、酸素供給（換気量）が極めて多くない限り区画火災発生に到らないため、火災荷重の減少を計ることは区画火災の拡大を抑止する効果大きい。

3. 火災伝播による拡大条件

3.1 火災伝播モデル

火災区画がフラッシュオーバーし、火盛り期にはいと、火災が隣接区画へ伝播し火災の拡大が起る。この火災伝播の状態は区画間仕切り壁の伝熱特性や火災の継続時間などにより決まる。

(1) 隣接壁体の状態方程式

船舶居住区が Fig. 8(a) に示すように断熱材および仕上材よりなる壁体により区画分けされており、火災区画よりこの壁体を通して火災伝播が起る場合について解析する。

火災区画の熱は熱伝導により隣接区画の壁 (W_1) を構成する可燃物の温度を上昇させ、これが発火温度に達すると、この区画へ火災が伝播する危険性が現われる。

隣接区画を構成する壁体の表面温度を $T_{w1}(i=1, 2, \dots, N)$ とし、火災区画と隣り合う壁体（以降、隣接壁体と呼ぶ）の suffix を 1 とすると、壁体 W_1 に関する熱収支方程式は次式となる。

$$H_{w1} \frac{dT_{w1}}{dt} = \sum_{i=2}^N \{ -A_1 \sigma \phi_{1i} (T_{w1}^4 - T_{wi}^4) - \alpha A_1 (T_{w1} - T_a) \} + I(t) \quad (25)$$

ここに、 H_{w1} は壁体 W_1 の熱容量、 T_a は区画内空気温度、 α は対流熱伝達率である。また、 $I(t)$ は火災区画からの熱貫

流量であり、次式で表わされる。

$$I(t) = \int_0^{t^*} \frac{dT_F}{dt} q(t^* - \tau) d\tau \quad (26)$$

ただし、 $t^* = \min(t, t_{F0})$, t_{F0} はフラッシュオーバーまでの時間、 T_F は火災区画の温度である。 $q(\tau)$ は単位熱貫流応答であり、付録において述べる。

さらに、火災区画に隣接しない壁体（以降、非隣接壁体と呼ぶ）の温度 $T_{wi}(i \neq 1)$ および区画内空気温度 T_a の時間変化を無視し、Fig. 8(b) のように隣接壁体を非隣接壁体が包囲する簡易モデルを考えると、(25) 式は次のように改められる。

$$H_{w1} \frac{dT_{w1}}{dt} = -A_1 \sigma \phi_{12} (T_{w1}^4 - T_0^4) - \alpha A_1 (T_{w1} - T_0) + I(t) \quad (27)$$

ここに、 ϕ_{12} は (12) 式と同じであり、 T_0 は区画内初期温度である。

(2) あいまいさを含んだモデル

(27) 式を解くことにより、隣接壁体の可燃物温度、発火までの時間および防火上必要とする断熱材の厚さは確定値として得られる。しかし、火災伝播要因の中には不確定的な量があり、これを考慮する必要がある。

a) 火災区画温度

火災区画における温度は換気の有無、可燃物量などに大きく左右されるため、火災区画からの熱貫流量にあいまいさが生じる。そこで火災区画の温度 T_F の時間変化を実大火災実験の結果³⁾⁶⁾⁷⁾ から、次式より最小二乗法を用いて近似する。

$$T_F(t) = \gamma e^{\delta t} + (T_0 - \gamma) \quad (28)$$

なお、(28) 式中の γ , δ は Fig. 9 に示している。

さらに、フラッシュオーバーまでの時間が退避や消火活動の時間確保に影響を及ぼすことを考慮し、 T_F の重みとして危険度を導入し、Fig. 9 に示すメンバーシップ関数 μ_{T_F} を定める。（ただし、 $0 \leq \mu_{T_F} \leq 1$ ）

b) 発火温度

可燃物が加熱されると熱分解して可燃性ガスを放出するが、このガスにわずかな口火でも着火する時の温度を引火温度という。さらに可燃物が加熱されると、口火がなくても着火する温度を発火温度という。

船舶居住区の造作材料の引火温度と発火温度は一般に異なるため、Fig. 10 に示すように、引火温度から発火温度に到る温度領域を火災伝播の可能性のある発火温度のあいまいさとする。居住区造作材料の発火温度のあいまいさを T_{Si} とし、そのメンバーシップ関数を $\mu_{T_{Si}} (0 \leq \mu_{T_{Si}} \leq 1)$ とすると、火災伝播が問題となる発火温度 T_S およびそのメンバーシップ関数 $\mu_{T_S} (0 \leq \mu_{T_S} \leq 1)$ は次式により表わせる。

$$\mu_{T_S} = \bigvee_{i=1}^n \mu_{T_{Si}} \quad (29)$$

ここでは μ_{T_S} として Fig. 10 に示す実線をとる。

(3) 必要断熱材厚さの決定

Fig. 8 Fire spread modelling of a living space

Fig. 9 Curves for rise of temperature with time in the burning cell

Fig. 10 Membership functions of inflammability

あいまいさを考慮した火災区画の温度 T_F とそのメンバーシップ関数 μ_{T_F} および可燃物の発火温度 T_S とそのメンバーシップ関数 μ_{T_S} を用いて、断熱材の必要厚さ d の決定に関する危険度のメンバーシップ関数 μ_d および延焼に到るまでの時間に関する危険度のメンバーシップ関数 μ_t は次式により求められる。(ただし、 $0 \leq \mu_d \leq 1, 0 \leq \mu_t \leq 1$)

$$\mu_d = \mu_{T_F} \times \mu_{T_S} = \mu_{T_F} \wedge \mu_{T_S} \quad (30)$$

$$\mu_t = \mu_{T_F} \times T_S \times d = \mu_{T_F} \wedge \mu_{T_S} \wedge \mu_d \quad (31)$$

なお、 μ_{T_F} が危険側を評価しているため、 μ_d, μ_t は危険側を示す。また危険性と安全性が補関係であるので、安全性を評価するためには次式を用いる。

$$\mu_{\bar{d}} = 1 - \mu_d, \quad \mu_{\bar{t}} = 1 - \mu_t \quad (32)$$

なお、計算に際してはメンバーシップ関数は α -cut により離散化する。記号 $\bar{}$ は補関係を示す。

3.2 数値計算例

(1) 発火の可能性

例題として、Fig. 8 に示す居住区モデルと Fig. 1 と Fig. 8 の計算条件により数値計算を行う。なお、可燃物は等価木材に換算し、時間微分には差分を用い、時間きざみは 1 秒とした。

断熱材 (ケイ酸カルシウム板) の厚さ 2 種に対する、隣接壁体の表面温度 T_{w1} の時間変化を Fig. 11 に示す。 T_{w1} は時間の経過とともに上昇し、定常となるが、火災区画温度のあいまいさのために T_{w1} に幅があり、断熱材厚さが厚いほど熱貫流応答のあいまいさが増幅される。

Fig. 11 Variations of wall surface temperatures with time

Fig. 12 Wall surface temperatures for different thicknesses of the noninflammable wall materials

壁体の断熱材厚さを変化させた場合の隣接壁体の最高到達表面温度 $T_{w1(max)}$ を Fig. 12 に示す。表面温度のばらつきは発火温度付近において大きく、断熱材厚さを増すことにより $T_{w1(max)}$ を低下させ、発火の抑止効果は大きい。

Fig. 13 は出火の可能性を重視した場合の 2 種類の断熱材に対する厚さを決定するためのメンバーシップ関数 $\mu_d, \mu_{\bar{d}}$ である。 μ_d は危険側、 $\mu_{\bar{d}}$ は安全側を評価しており、図

Fig. 13 An example of the use of membership functions for the design of nonflammable wall thicknesses

中左側寄りの厚さを選ぶほど、火災伝播の危険性は増す。また両者が重なる部分は比較的危险性が低い範囲である。

Fig. 14 は火災伝播に到るまでの時間に関するメンバーシップ関数 μ_t である。 μ_t が 1 に近いほど隣接壁体が発火する危険性が高いことを示している。これにより、断熱材としてケイ酸カルシウム板を用いた場合には、厚さ 21 mm 以上では発火の可能性がないことが分かる。

(2) 必要厚さの試算

SOLAS における防火構造に関する規定では、指示の時間内における構造材の裏面温度が初期温度からの上昇制限値として与えられている。

A 級仕切り：平均温度 139°C，最高部温度 180°C

B 級仕切り：平均温度 139°C，最高部温度 225°C

ここで、A 級、B 級仕切の安全性を評価するために、制限値 T_L に Fig. 15(a) に示す重みを付加し、制限値のメンバーシップ関数 μ_{T_L} を考える。なお、煙および炎の通過の阻止能力および断熱材の温度特性は考慮していない。

断熱材にケイ酸カルシウム板を用いる場合、各級に必要な

Fig. 14 An example of membership functions of time for flame eruption

な仕切厚さのメンバーシップ関数 μ_d は次式で与えられる。

$$\mu_d = \mu_{T_L} \wedge (1 - \mu_{T_L}) \quad (33)$$

A-30, A-15, B-30, B-15 の各級仕切に対する μ_d の試算結果を Fig. 15(b) に示す。条件が厳しい級ほどメンバーシップ関数は図の右側にある。

4. 結 言

多くの不確定量を含む問題の解析手法として、ファジィ関係と現象の数学モデルによる、あいまいさのある判定条件を導く方法について述べた。

例として、この方法を船舶火災における拡大条件の決定に適用した。この例題を通じて、現象の支配要因に不確定量を含んでいる場合に顕れる現象のあいまい量はファジィ関係を用いることにより推定できること、および現象の分岐条件のあいまいさを提示できることを示した。

なお、本研究は文部省科学研究補助金(試験研究(B)，研究代表者 福地信義)を得て行ったことを付記する。

Fig. 15 Examples of membership functions for wall surface temperatures and the design of nonflammable wall thicknesses according to SOLAS.

参考文献

- 1) 福地, 篠田: 機装設計における不確定性のある問題の解析手法について (その1) 浸油・浸水時の集水問題, 日本造船学会論文集, 第166号, (1989)
- 2) 日本火災学会: 火災便覧, 共立出版, (1986)
- 3) 小國勝男: 鉄筋コンクリート造集合住宅の実大火災実験 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1983)
- 4) 笠原皓司: 微分方程式の基礎, 朝倉書店, (1982)
- 5) 菅野道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社, (1989)
- 6) 佐藤寛: 単室モデルによる室内可燃物と初期火災の関連について (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1985)
- 7) K. Kawagoe: Fire Behavior in Rooms, Report of the Building Research Institute, No. 27, (1958)

付録 単位熱貫流応答

壁体において壁厚方向を x , 温度伝播率を k とすると, 熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (\text{A} \cdot 1)$$

ただし, θ は壁体内温度とし, $t=0$ の時 $\theta=0$, および任意の時刻における両表面温度を θ_1, θ_2 とすると, (A・1) の解は次式で表せる。ただし, d は壁体厚さである。

$$\theta = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \frac{x}{d}$$

$$+ \frac{2}{\pi} \sum_n \frac{(-1)^n \theta_2 - \theta_1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{d}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 k}{d^2} t\right) \quad (\text{A} \cdot 2)$$

このときの壁体内部での熱流束 q は次式で与えられる。

$$q = -\lambda \frac{\theta_2 - \theta_1}{d} + \frac{2}{d} \sum_n \{(-1)^n \theta_2 - \theta_1\} \cos\left(\frac{n\pi x}{d}\right) e^{-a_n t} \quad (\text{A} \cdot 3)$$

ここに, λ は壁体の熱伝導率であり, $a_n = n^2 \pi^2 k / d^2$

ここで, $x=0$ と $x=d$ における熱流を q_1, q_2 とすると, 次の関係式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} \theta_1 \\ q_1 \end{Bmatrix} = \frac{1}{B} \begin{bmatrix} A & 1 \\ A^2 - B^2 & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_2 \\ q_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A} \cdot 4)$$

ただし

$$A = \frac{\lambda}{d} \left\{ 1 + 2 \sum_n e^{-a_n t} \right\}, \quad B = \frac{\lambda}{d} \left\{ 1 + 2 \sum_n (-1)^n e^{-a_n t} \right\} \quad (\text{A} \cdot 5)$$

m 層の多層壁の場合は拡張されて, (A・4) の伝達マトリックスを M_i (i 番目の層) とすると, 次式となる。

$$\begin{Bmatrix} \theta_1 \\ q_1 \end{Bmatrix} = M_1 M_2 \cdots M_m \begin{Bmatrix} \theta_{m+1} \\ q_{m+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & Y \\ Z & W \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{m+1} \\ q_{m+1} \end{Bmatrix} \quad (\text{A} \cdot 6)$$

これより単位熱貫流応答 $q(t)$ は, $\theta_1=1, \theta_{m+1}=0$ を代入することにより次のように得られる。

$$q(t) = q_{m+1} = 1/Y \quad (\text{A} \cdot 7)$$