

フッ素フリー泡消火薬剤の泡消火効率改善に関する検討

消防庁消防研究センター

内 藤 浩 由

1. はじめに

石油タンク火災や流出油火災時の消火対応としては、泡消火が最も有効であるが、その泡消火過程は、燃料の種類、泡の投入方法、泡消火剤の種類、泡性状（起泡性、保水性、流動性）が関与する極めて複合的な現象であるため、泡の性能を定める「泡消火薬剤の技術上の規格を定める省令」¹⁾においても、消火性能評価試験の実験条件等は、海外の規格の条件を参考にしたり、また経験的に取り決められていたりするのが現状である。また現在、危険物用に販売されている泡消火薬剤は、規格省令試験には合格し、一定の実験条件等（ガソリン・ヘプタン、所定の寸法・形状の火皿や発泡器）における泡消火性能評価であり、それ以外の消火性能データ等の蓄積は、ほぼなされていないのが現状である。そのため、泡消火性能の定量的な評価は、極めて難しく、大規模石油タンク火災等に対する詳細な消火戦術や、より効率的な泡消火技術の提案までには至っていないのが現状である。

また、今日の消火システムに求められる性能は、「火災が消えさえすれば良い」わけではなく、費用対効果や環境への影響等、また迅速且つ、効率的、効果的に消火できる技術の開発等、強く求められており、石油タンク火災の泡消火効率改善に関する検討が益々重要となってきた。特に、泡消火時の環境影響と言う観点からは、2009年に開催された、ストックホルム条約（POPs条約）の第4回締約国会議（COP4）²⁾で、残留性有機汚染物質である、ペルフルオロオク

タンスルホン酸（PFOS）とその塩を含む9種類の物質が同条約の付属書Bに追加されたことを受け、2010年の化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（化審法）改正時に、第一種特定化学物質に指定³⁾され、国内においても、PFOS含有の泡消火薬剤の使用は、事実上使用禁止となった。この様な世界的動向により、現在、国家検定品として販売されている泡消火薬剤に添加されているフッ素化合物が、将来、使用禁止された場合を想定し、その使用禁止が消火性能に与える影響評価とその対応策の検討に関する研究内容の一部について、フッ素含有泡消火薬剤、及びフッ素フリー泡消火薬剤の消火実験結果を踏まえ紹介する。

2. 泡の消火性能とは

石油類を貯蔵するタンクに火災が生じた場合、有効な消火方法の一つとして、泡による消火が存在する。ガソリンなどの低引火点燃料油の火災に対する泡の消火原理は、燃料油の表面を泡層により被覆し、封鎖することによって、燃料油から発生する可燃性蒸気を防ぐ除去消火が主たる要因となる。しかしながら、泡消火性能を詳細に考えた場合、様々なパラメータが消火性能を支配していることがわかる。泡による消火過程を考えると、タンク内へ投入された泡は、火炎からの放射熱に暴露され、その結果、泡塊の水分は烈しく蒸発し、また泡の自然排水（還元）により消泡しやすくなる。しかし、泡層が一度形成すると連続的に供給される泡が、泡層上部へ流下しながら積層することにより、火

災からの放射熱から、泡層を保護する役目をする。その結果、消泡が抑制され、泡層が燃烧油面の一部を被覆しはじめると、燃料油からの可燃性蒸気が抑制され、その結果、泡層への熱暴露が減少することで、消泡量が減少し、それに伴い、更に泡の油面被覆が進むと考えられる。すなわち、泡による消火を実現するには、火災からの放射熱に対する消泡量に対し、泡層を形成できる量で泡を油面へ供給しなければならず、このことから泡の限界泡供給率[L/min/m²]（単位面積当たり単位時間当たりの泡の供給量）の存在があることは理解できる。そのため、泡消火において、泡供給率が大きな支配パラメータであることは自明であるが、その他に、泡の消火過程で寄与する要素として、図1に示す様に、泡消火薬剤の種類、泡の物理的性質となる泡性状（起泡性、保水性、流動性）、更には、燃烧油面への泡投入方法（泡モニター、固定泡放出口、底部泡注入方式）により、泡消火性能は大きく異なる。更に、泡消火に寄与するパラメータは、油面上に泡が展開する能力となる被覆性、可燃性蒸気を封鎖するための能力となるシール性、そして燃烧している火炎から熱に耐える能力である耐熱性、更には、燃料油により泡が破壊されない能力となる耐油性があり、これら各性質は、互いに相関し、泡の消火性能は、極めて複合的な現象と言える。そのため「泡消火薬剤の技術上の規格を定める省令」¹⁾で定められている泡消火薬剤の消火試験においても、

泡の消火性能に対する定量的検討は難しく、既存の泡消火設備でも経験的に安全率を考慮した泡の供給率や発泡倍率、還元時間等が定められているのが現状である。従って、現象の複雑さ故に、今回の研究内容においても、泡の消火性能の全てを表しているとは言えないが、泡消火薬剤の種類（フッ素含有泡、フッ素フリー泡）や泡性状が、どの様に消火性能に影響を及ぼすのか検討を行ったので紹介する。

3. 泡消火性能実験

3.1 実験装置及び方法

消火に必要な泡の損失を減らし、より効率的、効果的に消火するためには、どうすべきか、様々な消火に寄与するパラメータがあるなか、本研究では、泡消火薬剤の種類と制御可能な泡性状となる起泡性、保水性に着目し、泡消火にとって最適な条件とは何か検討を行った。

今回使用する、泡消火実験用の装置を図2に示す。泡の消火実験を行うため、実際の石油タンクを模擬した小規模タンク（タンク表面積1[m²]）を製作した。タンク底部及び横方向をガラス製とし、泡消火過程を可視化することができる。小規模タンク底面下に6台のカメラを設置し、各映像を合成して、燃烧油面中の泡の被覆面積や、また横方向から撮影することで、泡被覆時の泡厚さ等の測定も可能となる。そして、泡を生成する発泡器は、一定圧力0.4[MPa]のもと、泡水溶液と圧縮空気をフローメーター

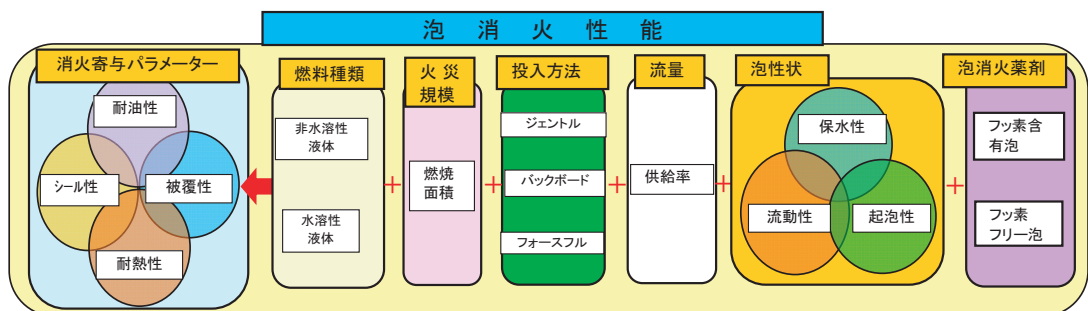
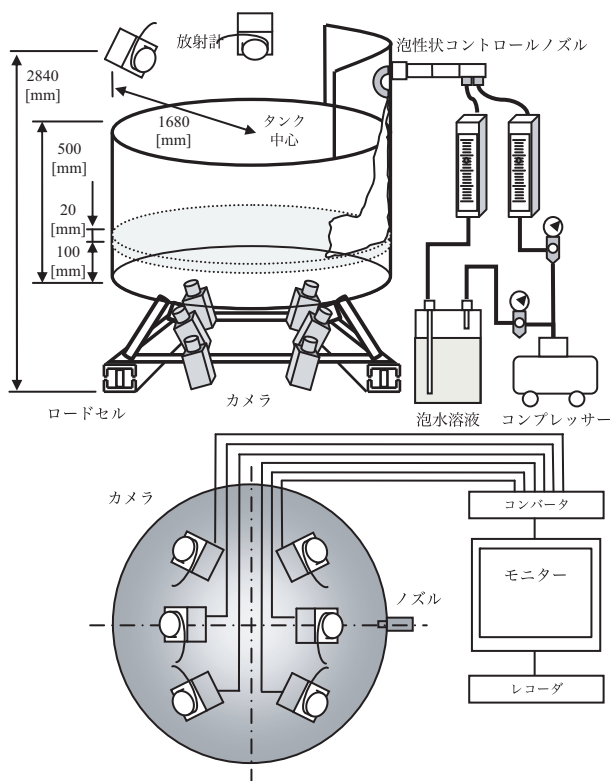


図1 泡消火性能に寄与するパラメーター

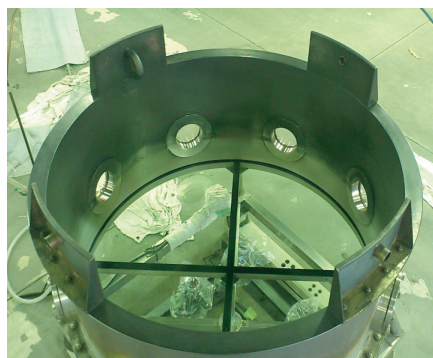
により流量調整し、起泡性の指標となる発泡倍率 E ($= \rho_{\text{solution}} : \text{泡水溶液の密度} / \rho_{\text{foam}} : \text{泡の密度}$) を制御し、更に、保水性の指標となる還元係数 C (3.2節で定義) を、発泡器の管路抵抗を可変することにより制御を行った。泡の投入方法は、実際の石油タンクの泡消火設備に採用されている、固定泡放出口⁴⁾を用い、泡消火実験を実施した。投入された泡は、小規模タンク内壁に沿って流下し、燃料油面へ供給される。固定泡放出口の設置位置は、実タンクのスケール比を模擬し、小規模タンクの底面から高さ600 [mm]に設置した。また泡消火時の火炎抑制に関する定量的判定のため、放射計を使用し、放射熱 [kW/m^2] の計測を行った。計測位置は、タンク模型中心から1680 [mm]、床面から高さ2840 [mm]に設置した。更に、タンク模型をロードセルに載せており、泡消火実験時の重量

変化量の計測から発熱速度の算出が可能である。実験条件は、小規模タンク内に敷水100 [L] を投入し、その後、燃料油となるノルマルヘプタン20 [L] (比重: 0.684at20 [°C]) を投入し、温度20 [°C]一定のもと消火実験を行った。また予燃焼時間は、液面降下速度が一定となり定常燃焼へと移行する60秒とし、その後、泡放射を開始した。今回使用する泡消火薬剤は、石油タンク火災に有効⁵⁾とされる、粘性付与水成膜泡 (以下 AR-AFFF) とフッ素たん白泡 (以下 FP) を使用し、またこれら泡消火薬剤から、フッ素系界面活性剤を抜いた、フッ素フリー粘性付与水成膜泡 (以下 N-AR-AFFF)、フッ素フリーたん白泡 (以下 N-FP) の計4種類を用い、3%の泡水溶液にして泡消火実験を実施した。

次に、実験の様子を、写真1～3に示す。写真1は、小規模タンク実験装置を用いた泡消火



【小規模タンク側方からの写真】



【小規模タンク上方からの写真】

図2 泡消火実験用の小規模タンク装置



写真1 小規模タンク実験装置を用いた泡消火実験時の様子



写真2 小規模タンク横方向から撮影した燃焼油面を泡が被覆している様子

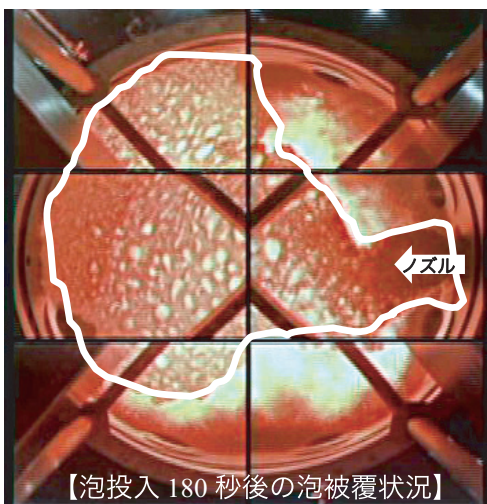
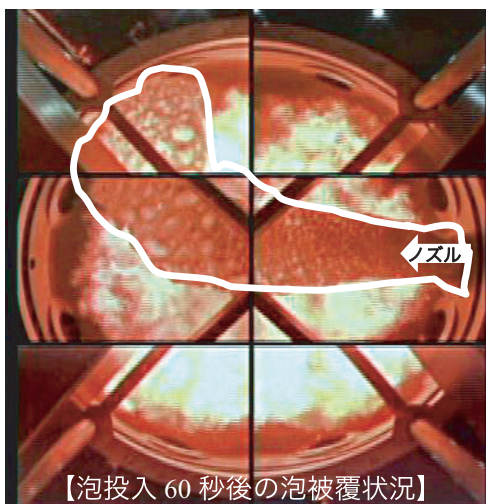


写真3 小規模タンク実験装置下部から撮影した泡の被覆状況
(左：泡投入開始から60秒後、右：180秒後の写真)

実験時の様子を示しており、実験条件は、泡消火薬剤：FP、泡供給率 $0.75[\text{L}/\text{min}/\text{m}^2]$ 、発泡倍率8倍、還元係数 $0.0026[\text{s}^{-1}]$ (3.2節で定義) で実施しており、泡投入開始直前の写真である。また、写真2は、小規模タンク横方向から撮影した燃焼油面を泡が被覆している様子であり、泡層が油面からの可燃性蒸気を抑え込み、蒸気を内包した凹凸の泡が観測されているのがわかる。更に、写真3では、小規模タンク実験装置

下部から撮影した泡の被覆状況を示しており、泡投入開始から60秒後、180秒後の写真を示している。この実験条件では、小規模タンク面積に対し、それぞれ15%、65%程度、泡が油面被覆している状況が観察できる。また、被覆している面積は白線で囲まれた領域であり、泡被覆している領域の気泡は、写真2で確認された可燃性ガスを内包した泡塊と考えられる。この様に、各泡消火薬剤、泡性状において消火実験を

実施し、各泡の消火性能の評価を行う。

3.2 泡の保水性の定義及び泡消火実験条件

同じ発泡器を使用して、泡の供給量や発泡倍率 $E[-]$ (以下 E) を可変して発泡させた場合、泡の還元特性は大きく異なり、また泡消火薬剤の種類によっても異なることは、一連の実験より明らかとなった⁶⁾。従って、泡の保水性を制御すると言うことは、各パラメータ (泡消火薬剤、泡供給率、発泡倍率) を考慮し、還元計測を行うことで、泡の保水性を評価することになる。本研究で使用する泡性状コントロールノズルは、発泡倍率は自在に変化させることはできるが、泡の還元を自在に変化させ、厳密に制御することは困難であることがわかった。そこで、還元泡水溶液量の時系列データを計測し、泡の保水性の指標を新たに定義することで、保水性の違いによる泡消火性能の定量化を試みた。泡採取容器内 (底部に穴を設けた内径 $\Phi 200[\text{mm}]$ 、高さ $60[\text{mm}]$ の容器) に泡を投入し、泡が、ある還元速度によって、一定の割合で質量減少すると仮定すれば、還元の指標を定数として扱うことが可能となる。すなわち、還元による泡質量減少割合を還元係数 $C[\text{s}^{-1}]$ (以下 C) と定義し、式(1)に示す。

$$\text{還元係数 } C[\text{s}^{-1}] = \frac{\text{泡の還元速度 } v[\text{g/s}]}{\text{泡採取容器内の残存泡質量 } m[\text{g}]} \quad \dots(1)$$

C は、泡の還元速度 $v[\text{g/s}]$ を泡採取容器内の

残存泡質量 $m[\text{g}]$ で除した値とし、また m は、泡の水溶液の還元がほぼ終了する3000秒での還元質量から、ある時刻 t における還元質量を差し引いて求められる。本研究では、 C を保水性の指標として扱うことにした。 C が小さいとは、還元による泡質量減少割合が小さいことを意味し、保水性の高い泡性状を示す。逆に、 C が大きい場合は、保水性の低い泡性状を示すことになる。泡の保水性の指標となる、還元係数を新たに定義することで、泡消火の保水性の違いと、起泡性の違いによる泡消火性能を定量化することが可能となる。また、還元計測時間3000秒後の還元量で無次元化した還元量を $D[-]$ とすると、容器内の泡残存泡重量 $m (=1-D)$ が、一定割合 C で重量減少すれば、 D の時間変化は、式(2)で表すことができる。

$$\frac{dD}{dt} = C(1-D) \quad \dots(2)$$

D に対し解けば、

$$D = 1 - \exp(-C \cdot t) \quad \dots(3)$$

となるので、 $D=0.25$ (25% 還元量) に対する、 C と還元時間 t の関係は、図3で示すことができる。泡消火薬剤の技術上の規格を定める省令¹⁾は、25% 還元時間を採用しており、通常の泡消火薬剤では1分以上、大容量泡放水砲用泡消火薬剤では2分以上と定められている。図3より C を求めると $0.0048[\text{s}^{-1}]$ と $0.0024[\text{s}^{-1}]$ となり、今回、泡性状による泡消火性能を調べるに当たり、これら C の範囲を考慮して消火実験

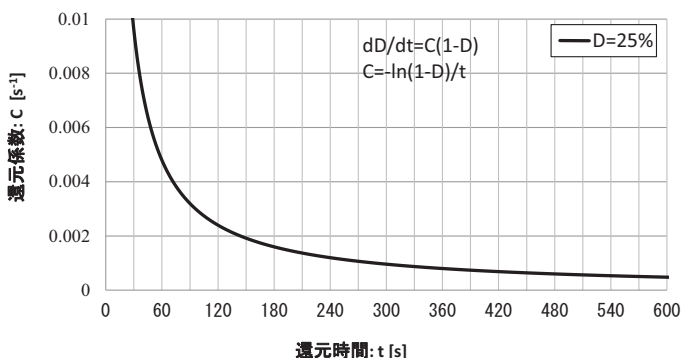


図3 25% 還元時間と還元係数の関係

条件を設定した。

今回の泡消火実験条件は、E と C を変化させ、AR-AFFF、N-AR-AFFF、FP、N-FP の 4 種類の泡消火薬剤に対して実験を行った。各泡消火薬剤に対し、E を 4 倍、8 倍、12 倍に設定し、また C を約 $0.001 \sim 0.006 [\text{s}^{-1}]$ の範囲（保水性の高い泡～低い泡）で変化させ、更に泡供給率 Q （以下 Q ）を $0.5 \sim 2.25 [\text{L}/\text{min}/\text{m}^2]$ の範囲で変化させ泡消火実験を行った。

3.3 泡性状の違いによるフッ素含有泡とフッ素フリー泡の消火性能の検討

泡の消火性能を評価するための指標として、完全消火する時間で評価できれば良いが、泡の消火過程は、複合的であり、また同じ泡消火薬剤、泡供給率、泡性状、そして同じ泡の投入方法でも、消火時間の再現性は極めて低くなる。その理由としては、泡面上に生じるフリッカー炎（泡面上に漏れ出した可燃性蒸気または、泡投入時に油汚染された泡が原因となり、泡面上を炎が伝播する青炎のこと）または、キャンドル炎（泡の油面被覆の隔たりや、火炎により加熱された小規模タンク側壁に付着した泡が、熱により消泡し、泡面上、もしくは、側壁から漏れ出した可燃性蒸気に着火して生じる、ろうそくの様な炎のこと）が原因であり、その発生や消火過程は、極めて偶発的となる。従って、本研究における泡の消火性能を評価するための指標として、消火時間を採用するのは不適切であると考えられる。また、非水溶性液体用低発泡泡消火薬剤の ISO 規格⁷⁾では、泡消火試験時の最大放射熱に対し、90% 放射熱が抑制された時間を「90% コントロール時間」と定義し、消火性能の参考データとして採用している。本研究では、各泡性状に対し、ほぼ火炎抑制できない条件でも、消火性能を何かしらの指標により定量しなくてはならず、90% コントロール時間による指標でも、不適切であると考えられる。

そこで本研究は、各泡消火実験時に得られる、

放射熱データーを用いて、自由燃焼時の放射熱の積算量に対する、泡消火開始からの放射熱の積算量の割合から、火炎抑制効果を定量し、このパラメータを泡消火性能の指標として採用した。

積算放射熱量抑制効果 γ [%] を式(4)により定義する。

$$\gamma = [1 - (\int_0^{t_1} q_{\text{foam}} dt / \int_0^{t_1} q_{\text{free}} dt)] \times 100 [\%] \quad \cdots(4)$$

ここで q_{free} は、自由燃焼時のある時刻 t の放射熱量を示し、また q_{foam} は、各泡性状に対する、ある時刻 t の放射熱量とし、時間 dt の積を 0 から t_1 まで積分した値を積算放射熱量とした。今回は、 $dt=1 [\text{s}]$ 、 $t_1=600 [\text{s}]$ のもと算出を行った。尚、 t_1 の設定は、消火実験の全条件にて、 $q_{\text{foam}}=0 [\text{kW}/\text{m}^2]$ となる時刻である。

図 4 に、 $Q0.75 [\text{L}/\text{min}/\text{m}^2]$ 一定のもと、AR-AFFF と N-AR-AFFF に対する、 $E[-]$ と $C[\text{s}^{-1}]$ の積算放射熱量抑制効果 γ [%]（以下 γ ）を示す。図 4 左図に示す AR-AFFF の場合、 C が $0.001 [\text{s}^{-1}]$ から $0.002 [\text{s}^{-1}]$ の保水性の高い泡性状では、 γ が 65 [%] から 80 [%] となり、高い値を取る。E8 と E12 では、 γ が 80 [%] 程度の抑制効果が得られ、また E4 では 65 [%] と僅かに低下している。一方、保水性の低い泡性状となる、 $C0.004 [\text{s}^{-1}]$ から $0.006 [\text{s}^{-1}]$ では、 γ が 50 [%] から 10 [%] まで急激に減少している。すなわち γ は、 $C0.003 [\text{s}^{-1}]$ より高い領域で、還元係数依存性が高くなり発泡倍率依存性は低い泡消火薬剤であると言える。また図 4 右図に示す N-AR-AFFF の場合、同様に E をパラメータとした時の C に対する γ を見ると、 $0.001 [\text{s}^{-1}]$ から $0.006 [\text{s}^{-1}]$ にかけて、 γ は最大でも 5 [%] 程度であり、 E を変化させても、 γ はほぼ変化せず、泡性状を変化させても、火炎抑制できないことを示している。すなわち限界泡供給率は $0.75 [\text{L}/\text{min}/\text{m}^2]$ 以上となり、更に、フッ素系界面活性剤の添加が、泡の消火性能を担保する上で

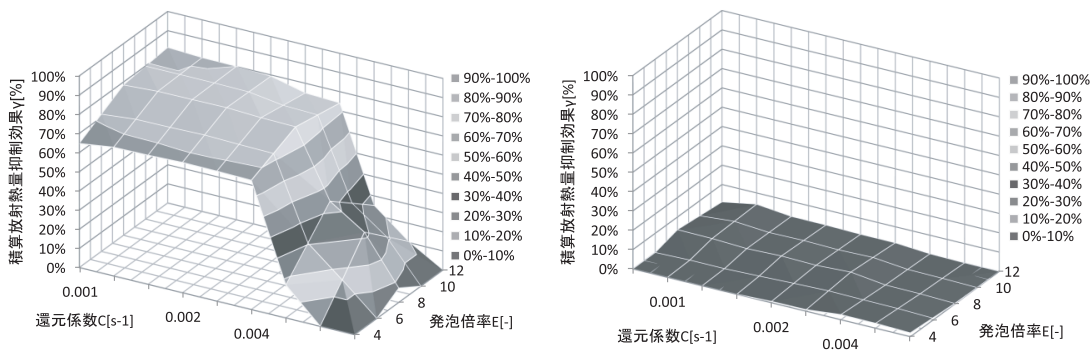


図4 各EとCに対する積算放射熱量抑制効果 γ の関係(左図:AR-AFFF、右図:N-AR-AFFF)

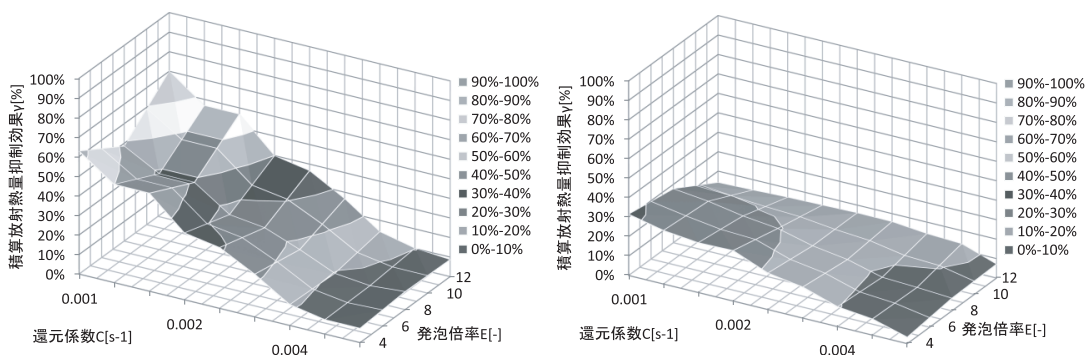


図5 各EとCに対する積算放射熱量抑制効果 γ の関係(左図:FP、右図:N-FP)

極めて重要であることを図4は示している。

図5に、 $Q0.75 [L/min/m^2]$ 一定のもと、FPとN-FPに対する、E[-]とC[s⁻¹]の γ [%]の関係を示す。図5左図のFPの場合、各Eに対し、Cが $0.001 [s^{-1}]$ から $0.004 [s^{-1}]$ に増加すると、比較的緩やかに γ が減少している。特に保水性の低い泡性状となる $0.004 [s^{-1}]$ から $0.005 [s^{-1}]$ では、 γ が10[%]以下となる。またCの全領域で、 γ はE8、E4、E12の順に高くなり、Cが $0.001 [s^{-1}]$ では、50[%]から70[%]になり火炎抑制効果が最も高い領域となる。またCの増加と共に、各Eに対する γ の範囲は狭くなり、Cが $0.004 [s^{-1}]$ では γ が8 [%]から12[%]となる。また γ に対するEの依存性は低くなっている。FPにおいても、 γ の還元係数依存性が高く、また発泡倍率依存性は、比較的低い傾向を示している。そして、図5右図のN-FPの場合、

EをパラメータにとりCに対する γ を見ると、 $0.001 [s^{-1}]$ 近傍では、E4、E8共に、 γ は30 [%]程度となり、またE12では、 γ は12[%]まで低下している。Cが $0.003 [s^{-1}]$ から $0.005 [s^{-1}]$ にかけて、Eに対する依存性は低くなり、Cの増加と共に、 γ は15[%]から5 [%]まで緩やかに低下している。N-FPにおいて、FPほどCとEに対する γ の依存性は高くないが、E4、E8においては、 γ の還元係数依存性があることがわかる。 $Q0.75 [L/min/m^2]$ において、N-FPの γ は最大でも30[%]となり、FPに比べれば消火性能は低下するが、泡性状を最適化することによってN-FPでも約3割程度、火炎抑制が可能であることを示している。

図4、図5において、フッ素含有泡消火薬剤とフッ素フリー泡消火薬剤の消火性能比較を行い、フッ素系界面活性剤の添加が、泡の消火性

能を担保する上で重要であることは、明らかとなったが、泡性状に対する限界泡供給率の検討を行うことで、フッ素フリー泡消火薬剤においても、火災抑制または、効果的な泡消火性能を得られる可能性を次節で紹介する。

3.4 フッ素含有泡とフッ素フリー泡における泡供給率の影響

図6に、AR-AFFF及びN-AR-AFFFの各泡性状(E,C)に対する消火限界泡供給率 Q_c [L/min/m²] (以下 Q_c)を示す。 γ が70[%]になるために必要となる Q_c を、泡性状(E,C)毎に示している。尚、 γ が70[%]の条件は、自由燃焼時の最大放射熱に対し、9割以上放射熱を抑制できる条件となり火災抑制及び消火可能な閾値である。また Q_c が存在しない条件においては、より高い Q [L/min/m²]での検討を行わなければならないが、今回は、実験装置の制約上、Q0.5~Q2.25の間でしか検討できないため、 γ が70[%]以下の泡性状の条件は、ブランクにしている。

図6(左図)に、AR-AFFFの泡性状毎の Q_c を示す。各泡性状に対して、 Q_c は存在し、C0.006の条件を除き、ほぼ均一な分布を取る。また、最小消火限界泡供給率: Q_{cmin} [L/min/m²] (以下 Q_{cmin})は、最も消火効率の高い条件を示し、E8-C0.001、E8-C0.002、E12-C0.001の条件で、各々0.69 [L/min/m²]となる。更に、最

大消火限界泡供給率: Q_{cmax} [L/min/m²] (以下 Q_{cmax})は、消火効率の最も低い条件を示し、ブランクになっている泡性状の条件のどれかに該当するが、今回は、実験装置の制約上Q0.5~Q2.25の検討のため、 γ が70[%]以上の条件における Q_{cmax} とした。その結果、E4-C0.006の条件で、 Q_{cmax} は1.23 [L/min/m²]となる。すなわち、泡性状の違いにより Q_c は、最大で1.78倍も異なることがわかる。

図6(右図)に、N-AR-AFFFに対する、泡性状毎の Q_c を示す。 Q_{cmin} は、E8-C0.001、E12-C0.001、E12-C0.002の条件で1.71 [L/min/m²]となる。また、 Q_{cmax} は、実験の制約上Q0.5~Q2.25の範囲で検討を行い、E8-C0.004の条件で、2.19 [L/min/m²]となる。N-AR-AFFFの場合、火災抑制可能な泡性状の条件($\gamma=70$ [%])が限定的であり、二極的性質を有する泡消火薬剤と言えるが、火災抑制可能な泡性状の条件であれば、 Q_c の値は、ほぼ一定となり、泡性状に依存しない泡消火薬剤と言える。

図7に、FP及びN-FPの各泡性状に対する Q_c を示す。図6と同様、 γ が70[%]になるために必要となる Q_c を、泡性状(E,C)毎に示している。また図中の Q_c が存在しない条件においては、より高い Q での検討が必要であるが、実験装置の制約上、検討できない条件であ

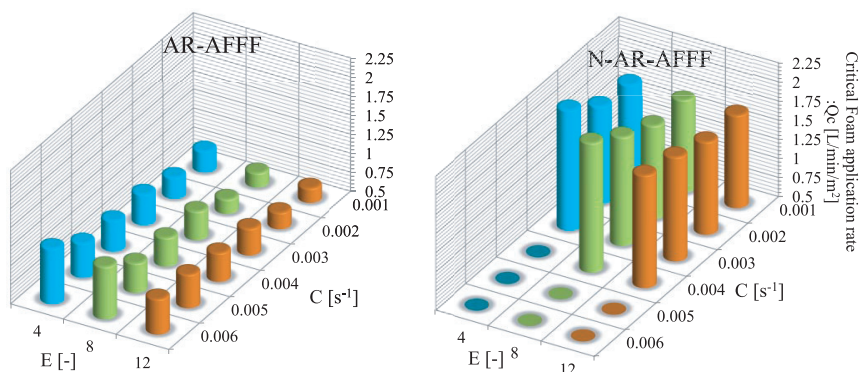


図6 AR-AFFFとN-AR-AFFFの泡性状に対する Q_c の関係

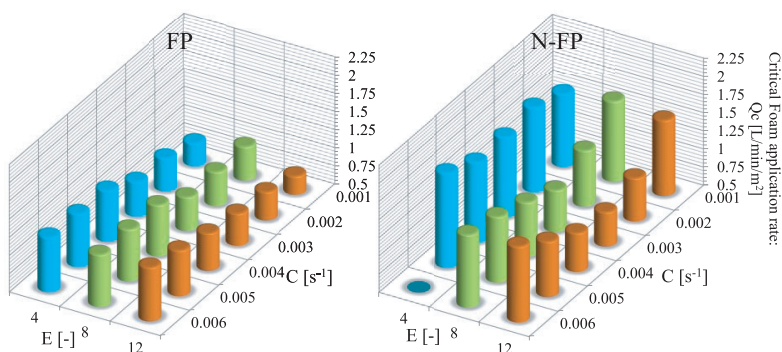


図7 FPとN-FPの泡性状に対する Q_c の関係

る。

図7(左図)に、FPの泡性状毎の Q_c を示す。各泡性状の条件に対して、 Q_c が高い条件は存在せず、ほぼ均一な分布を取る。 Q_{cmin} は、E12-C0.001の条件で $0.75 [L/min/m^2]$ となり、また Q_{cmax} は、E12-C0.006の条件で、 $1.24 [L/min/m^2]$ となる。泡性状の違いにより Q_c は異なるが、最大で1.65倍の Q_c の変化が見られる。図7(右図)に、N-FPの各泡性状に対する Q_c を示す。 $\gamma=70[\%]$ の時の泡性状毎の Q_c を見ると、概ね $1.0\sim1.8 [L/min/m^2]$ となる。またN-AR-AFFFに比べ、 Q_c は、各泡性状に対し広範囲に存在し、E4-C0.006以外は、全て Q_c が存在している。また、 Q_{cmin} は、E12-C0.003の条件で $0.97 [L/min/m^2]$ となり、更に、 Q_{cmax} は、E4-C0.005の条件で $1.8 [L/min/m^2]$ となる。 Q_c が存在する領域での、各泡性状に対する Q_c の依存性は、AR-AFFF及びN-AR-AFFFに比べ、比較的高いと言える。またN-FPの場合、E12-C0.003～C0.004の泡性状の条件であれば、より低い Q_c を得ることができ、逆に、保水性の高いC0.001の条件では、 Q_c が高い結果となる。これは、N-FPの泡の流動性に起因するものと考えられる。たん白系泡消火薬剤の場合、Eが高く、Cが低い条件において、泡の流動性が低くなる傾向があり⁸⁾、泡の油面被覆時の阻害要因として考えられる。N-FPの場合、泡の流動性を加味した、

EとCの最適化を図ることで、より効果的な消火が達成できると考えられる。

3.5 泡性状に対する泡供給率増加係数の検討

本研究の目的は、固定泡消火設備等で現在使用されているフッ素含有泡消火薬剤が規制され、フッ素フリー泡消火薬剤で消火対応する場合の泡供給率を示すことにある。現行の消防法で規定されている、「製造所等の泡消火設備の技術上の基準の細目を定める告示(総務省告示第559号)」⁹⁾内で定められている、上部泡放出口(I型、II型)に対する泡供給率は、 $4 [L/min/m^2]$ と規定されているが、フッ素フリー泡消火薬剤で消火対応する場合、前節の結果を踏まえ、同等な消火性能を得ようとした場合、各泡性状に対する増加係数を乗じた泡供給率で対応する必要があると考えられる。増加係数算出においては、最も消火効率の高い泡性状で得られる、AR-AFFF、FPの Q_{cmin} を用い、各泡性状の Q_c との比を、泡供給率増加係数と定義した。その結果を表1に示す。AR-AFFFの Q_{cmin} に対するAR-AFFF及びN-AR-AFFFの増加係数を見ると、AR-AFFFも、泡性状の変化により、 $1.0\sim1.8$ 倍の増加係数となり、またN-AR-AFFFにおいては、 $2.5\sim3.2$ 倍となる。フッ素含有泡のAR-AFFFにおいても泡性状の変化により、最大で1.8倍の泡供給率で消火対応しなければならないことを示し、またフッ素フリー泡のN-AR-AFFFにおいては、

表1 各泡消火薬剤の泡供給率増加係数

AR-AFFF		C[s ⁻¹]					
		0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
E[-]	4	1.1	1.1	1.3	1.3	1.4	1.8
	8	1*	1*	1.3	1.3	1.3	1.7
	12	1*	1.0	1.2	1.3	1.4	1.4
N-AR-AFFF		C[s ⁻¹]					
		0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
E[-]	4	2.5	2.6	3.0	-	-	-
	8	2.5	2.5	2.8	3.2	-	-
	12	2.5	2.5	2.7	2.9	-	-
FP		C[s ⁻¹]					
		0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
E[-]	4	1.1	1.3	1.3	1.6	1.6	1.7
	8	1.3	1.3	1.3	1.6	1.6	1.6
	12	1*	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7
N-FP		C[s ⁻¹]					
		0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
E[-]	4	2.0	2.2	2.1	2.1	2.4	-
	8	2.1	1.7	1.4	1.7	1.9	2.0
	12	2.1	1.5	1.3	1.4	1.7	2.1

*: O_{Cmin} における増加係数

泡性状を最適化しても2.5倍以上の泡供給率で対応する必要があることを示している。同様に、FPの $Q_{c_{min}}$ に対するFP及びN-FPの増加係数を見ると、FPは、泡性状に対し1.0～1.7倍の範囲となり、N-FPにおいては、1.3～2.4倍の範囲となる。FPにおいても泡性状の変化により、最大で1.7倍の泡供給率で消火対応しなければならないことを示し、また、N-FPにおいては、1.3倍以上で対応する必要があることを示している。

4. おわりに

フッ素含有及びフッ素フリー泡消火薬剤に対し、泡性状（起泡性・保水性）、泡供給率（単位面積、単位時間あたりの泡投入量）の違いによる泡の消火性能について検討し、限定的な条件ではあるが、泡消火に対する最適な泡性状及び泡供給率を示してきた。更に、フッ素化合物の使用禁止が泡消火薬剤の消火性能に与える影響評価と対応策に関する検討も行い、固定泡消火設備等で現在使用されているフッ素含有の泡消火薬剤が規制され、フッ素フリー泡消火薬剤で消火対応する場合の、泡性状に対する泡供給率も示してきた。しかしながら、**図8**に示す様に、

【フッ素フリー泡消火薬剤に対する泡供給率： Y^{*1} 】 = : 研究目的

【告示の泡供給率：4 Lpm/m²】 × 【泡性状係数：A^{#2}】 : 検討済

$$\times \left[\text{スケール係数: } B \right]^{*2} \times \left[\text{泡投入係数: } C \right]^{*2} \times \left[\text{燃料種係数: } D \right]^{*2} : \text{検討課題}$$

*¹ : 実設備可能な上限値及び安全率や経済性を要検討

*² : 係数A~Dは、 $1 < A \sim D < \text{実設備可能な上限値}$

図8 フッ素フリー泡消火薬剤代替時の泡供給率の各係数について

フッ素フリー泡消火薬剤代替時の泡供給率を厳密に考える場合は、泡性状に対する増加係数だけではなく、油種の違いや泡の投入方法、また火災規模によっても泡消火性能は大きく影響する。そのため、各パラメーターに対する、増加係数の検討を引き続き行い、フッ素フリー泡消火薬剤へ代替した場合の技術指針を示せればと考えている。

参考文献

1. 泡消火薬剤の技術上の規格を定める省令：
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S50/S50F04301000026.html>
2. POPs 条約ホームページ：<http://www.pops.int/>
3. 環境省ホームページ：<http://www.env.go.jp/chemi/kagaku/kisei/class1.html>
4. 深田工業株式会社, *Safety & Tomorrow*, No. 136, 18 (2011).
5. 竹元・内藤他, 消防研究所研究資料, 第73号, 1 (2006).
6. 内藤・佐澤・山谷・佐宗, 平成22年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 184-185 (2010).
7. ISO7203-1, Annex H, 24 (2011).
8. 内藤・佐澤・佐宗・山谷, 平成23年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 384-385 (2011).
9. 製造所等の泡消火設備の技術上の基準の細目を定める告示（総務省告示第559号）：http://www.fdma.go.jp/concern/law/kokuji/pdf/h26/01_559.pdf