

## 低温域における泡性状について

### The Behavior of Fire-Fighting Foam at Low Temperature

平 沢 正 己\*  
鶴 岡 功 二\*

The foam-forming abilities of fire-fighting foam agents were evaluated by the expansion ratio and the 25% drainage time in the low temperature region ranging from 20 to  $-20^{\circ}\text{C}$ . The freezing time of the foam was measured in order to check the frozen property. The sealing property was estimated by measuring the amount of n-hexane passed through the frozen foam. Foam liquid was diluted to the 3 vol% solution with the fresh water or the sea water, and then the solution was foamed at the refrigerator.

It was found that the expansion ratio of the fresh water solution decreased with a decrease in temperature, but the remarkable decrease did not occur in the sea water solutions. As the decreasing in the temperature and increasing in the expansion ratio, the 25% drainage time became longer and freezing time changed shorter. Freezing time of the sea water solutions were longer than that of the fresh water solutions under the same conditions. As a result of sealing property, n-hexane gas of 35 to 55% leaked through the frozen foam of 30cm thickness at  $-10^{\circ}\text{C}$ .

#### 1. はじめに

冷凍倉庫火災に対して、泡消火薬剤を使用する際には、低温域における泡性状について、検討する必要がある。

合成界面活性剤泡消火薬剤による消火方法については、貯蔵品の水損を軽減し、人的危険の少ないことや、界面活性剤の湿潤効果により、水が木材やウレタンフォームなどの固体内部に浸透し易いなどの利点が上げられているにもかかわらず、発泡した泡の凍結により、消火効果が低減することが危くされているため、使用に慎重とならざるを得ないのが現状である。

冷凍倉庫火災の特徴は、その件数こそ少ないものの、一たび出火すれば、鎮火までに相当の時間を要し、多大の損害を生じる。これは、冷凍倉庫という性質上、気密性を高めるために開口部が少なく、消防隊の活動が著しく制限されること。冷蔵効率の点から複数階を一体として施工し、内部

に多量の発泡プラスチック等の断熱材が使用されている状態にあることから、着火や延焼危険が高いことによっている。

昭和52年の新興海陸運輸倉庫(定温倉庫)火災では、断熱材から可燃性ガスが発生し、間欠的な爆燃現象により、消防職員が多数負傷するという惨事も発生している。

また、昭和54年の港区港南で発生した冷凍倉庫火災では、天井、壁体など230 $\text{m}^2$ が焼損したにもかかわらず、鎮火までに9時間を要している。

このため、有効な消火手段が種々検討されてきており、現在では、二酸化炭素やドライアイスによる密閉消火が一番有効な手段と考えられているが、この種の設備の設置されていない建物にあっては、二酸化炭素などの調達に相当の時間を要し、また消火薬剤が高価であり、その費用が関係者の負担を増大させるとの指適もある。

この様なことから、泡消火薬剤を使用したとき、泡が凍結した場合にあっても、消火効果が確認されれば、消防隊の迅速な対応により、早期の鎮火も可能になる。また冷凍倉庫火災のみならず、寒

冷地における消火活動においても大きな指針となり得るが、これまで、この種の実験についての報告例<sup>(1)</sup>はほとんどなく、体系的な研究も実施されていない。

以上の点から、本研究は、有効な消防活動基準の確立を図るための基礎資料を得ることを目的として、合成界面活性剤泡消火薬剤の、低温域における性状について明らかにしようとするものである。

## 2. 実 験

### (1) 実験装置

この装置は、100倍から300倍程度の膨脹率の泡を発生させる発泡機として製作したものである。図1は装置の概略である。

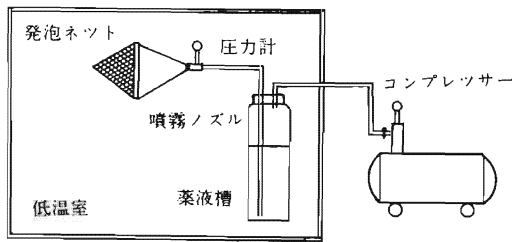


図1 実験装置

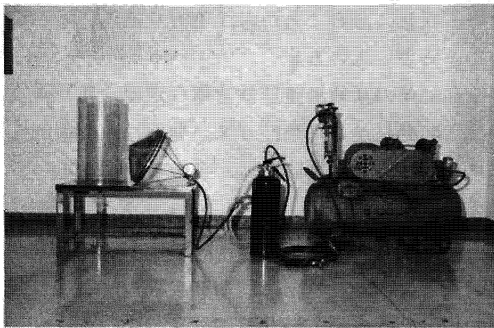


写真1 実験装置の全景

方式としては、合成界面活性剤泡水溶液(以下「泡水溶液」という)を薬液槽に入れ、コンプレッサーにより加圧し、発泡に必要な風量を得ている。泡水溶液は、噴霧ノズルにより放出され、発泡ネットにより起泡される。いわゆる中発泡程度の泡を発生させることとしたのは、現在、消防隊が活動時に簡便に使用している、東消式簡易発泡器の発泡性能を基準にして、これを実験室規模で使用するためである。

### (2) 合成界面活性剤泡消火薬剤及び泡水溶液の調整

合成界面活性剤泡消火薬剤(以下「泡消火薬剤」という)として、ヤマト消火器(株)製泡消火薬剤(プロフォーム)を使用した。試験用水は、水道水(以下「淡水」という)又は検定細則に定める合成海水(以下「海水」という)を用い、泡水溶液濃度を3vol%に希釈して使用した。なお、試験は、プレミックスによる性能劣化を考慮に入れ、調整混合後5分以内に実施した。

### (3) 発泡器

発泡性能を比較検討するため、100倍、200倍、300倍に近似する膨脹率の泡を発生させることを目的として製作した。

発泡ネットは、底面の直径35cm、高さ10cmの円錐形とし、二種のメッシュの異なる金網を密着させ二重ネットとした。噴霧ノズルは、(株)いけうち製充円錐ノズルから、適当な噴量のものを選択し、発泡ネット底面から25cmの位置として、噴霧状となった泡水溶液が、均一に発泡ネット面に放射されるようにした。表1に各発泡器の諸元を示した。

表1 各発泡器の諸元

発泡器	発泡ネット		噴霧ノズル	噴量 (ℓ/min)	ノズル根元圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	コンプレッサー圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )
	内側	外側				
100倍型	SUS304, 平織 20メッシュ・φ0.43	SUS304, 平織 14メッシュ・φ0.62	規格 4ℓ/min at 2kg/cm <sup>2</sup>	9.9	4.4	7.0
200倍型	SUS304, 平織 14メッシュ・φ0.62	SUS304, 平織 10メッシュ・φ0.74	規格 8ℓ/min at 2kg/cm <sup>2</sup>	9.6	4.0	6.5
300倍型	SUS304, 平織 14メッシュ・φ0.62	SUS304, 平織 8メッシュ・φ0.8		5.2	5.0	6.0

#### (4) 低温室

室内は、巾員340cm、奥行344cm、高さ280cmで、三菱重工業(株)製三菱テカムシ冷凍機により、室温を20℃～-20℃まで変化させた。

#### (5) 実験方法

ア、室温が発泡性能におよぼす影響

泡水溶液の液温を15℃一定とし、低温室の室温を20℃～-20℃まで変化させ、低温室内で各発泡器により泡を発泡させて、膨脹率並びに25%還元時間を測定した。また、ガラス製泡収集容器(内径23cm、深さ40cm)にcc熱電対(φ=0.32mm)を底面から10cmの容器中央部に設置し、これに泡を補集して、泡内温度の時間による変化を測定し、合せて、泡の凍結状況を観察した。

イ、液温が発泡性能におよぼす影響

200倍型の発泡器を用い、室温を20℃及び-10℃として、泡水溶液の液温を20℃～5℃まで、5℃間隔で変化させた場合の、膨脹率並びに25%還元時間を測定した。

ウ、泡の密閉性

低温域における泡の可燃性蒸気に対する密閉能力を見るため、図2に示す装置を用いて試験を行った。

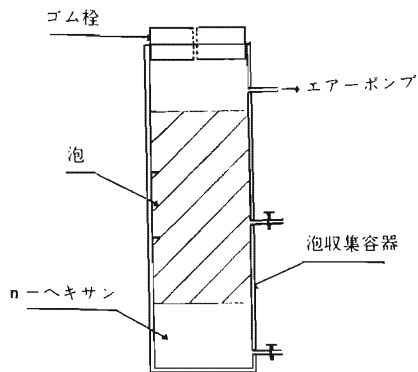


図2 泡の密閉性試験

ガラス製容器(直径12cm、深さ50cm)に、n-ヘキサンを約10cmの高さまで満たし、室温を0℃並びに-10℃とした低温室内で泡を発泡させ、容器に高さ約10cm及び30cmとなるよう補集して被覆した。密閉能力が低下し、泡上に漏えいしたn-ヘキサン蒸気は、エア-ポンプで採集して、日立163型ガスクロマトグラフにより検出した。

### 3. 実験結果及び考察

#### (1) 室温の発泡性能におよぼす影響

液温を15℃とした場合の、発泡性能の室温による変化を表2及び表3に示した。

表2 室温の発泡性状におよぼす影響(淡水)

室温(℃)	+20	0	-10	-20
膨脹率				
100倍	99 8'38"	66 6'17"	36 7'56"	37 凍結
200倍	221 8'33"	215 13'30"	193 凍結	155 凍結
300倍	310 8'15"	306 24'30"	306 凍結	288 凍結

上段 膨脹率  
下段 25%還元時間  
液温 15℃一定

表3 室温の発泡性状におよぼす影響(海水)

室温(℃)	+20	0	-10	-20
膨脹率				
100倍	87 5'12"	72 6'12"	71 12'00"	74 凍結
200倍	233 5'39"	206 9'35"	233 凍結	208 凍結
300倍	288 7'49"	253 14'15"	331 凍結	223 凍結

上段 膨脹率  
下段 25%還元時間  
液温 15℃一定

ア、膨脹率

室温20℃における膨脹率を基準として、室温低下に伴う膨脹率の変化割合(比膨脹率)を図3及び図4に示した。

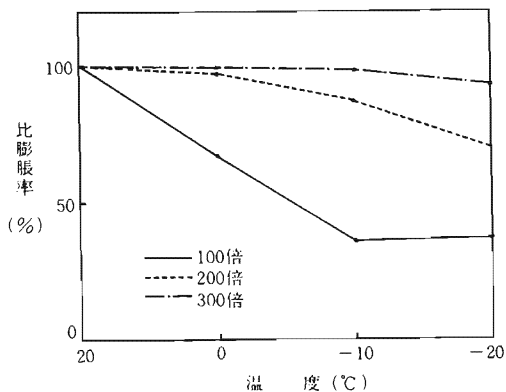


図3 室温の膨脹率におよぼす影響(淡水)

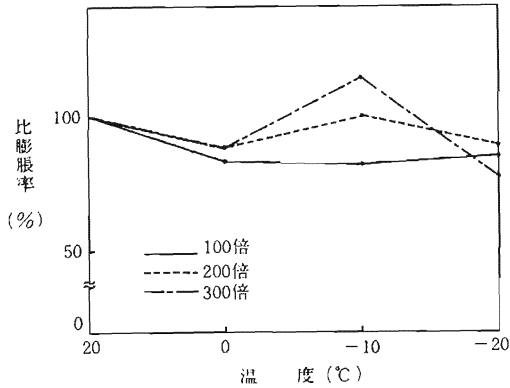


図4 室温の膨脹率におよぼす影響(海水)

淡水については、室温が下がるほど、膨脹率が低下する傾向にあるが、膨脹率の高い泡ほど室温の影響を受けにくい。200倍、300倍の泡は、室温が下がるにしたがって膨脹率が比較的緩やかに低下するが、100倍の泡にあっては、 $-10^{\circ}\text{C}$ 位まで急激に膨脹率が低下し、室温 $20^{\circ}\text{C}$ と比較して、36%の膨脹率しかなかった。

膨脹率は、これまでも周囲温度によって大きく影響を受けることは測定されており、室温が $20^{\circ}\text{C}$ ~ $30^{\circ}\text{C}$ においては、温度上昇によって膨脹率が低下すると言われている<sup>(2)</sup>。今回、室温が $20^{\circ}\text{C}$ 以下の低温域においては、温度低下により膨脹率の低下する傾向を示した。この様に、膨脹率が室温によって一つの極大値を持つような挙動を示すことは、界面活性剤の性質に大きく起因していると考えられる。泡消火薬剤には、製造各社により高い起泡力を得るため、また泡の安定性を得るために、各種の成分が混合されているが、それぞれの界面活性剤や添加剤により、起泡力に差が出来る。低温や温度上昇によっても安定な泡を発生するものもあれば、影響を大きく受けるものもある。今回の実験では、一社の泡消火薬剤しか使用しなかったが、他の薬剤についても検討をする必要があると思われる。各発泡器によって発泡性能に大きな差が見られたのは、発泡器の機械的影響によると考えられる。

海水は、室温が下がっても、淡水ほど膨脹率の低下は認められなかった。中には、室温 $20^{\circ}\text{C}$ の膨脹率を上回るものがあった。これは、室温が下がるにしたがって、海水中の無機塩により泡の安定性が減少して、ネット面で成長する泡の径にばらつきができ、測定上では膨脹率が低下しないように見えると推測される。また一般に海水は、含有される無機塩の影響により、粘度が上昇し、表面張力が增大して、淡水よりも膨脹率が低下する傾向にあると言われている<sup>(3)</sup>。実験では、淡水よりも良い膨脹率を得たものが多かった。これは、製造会社や泡消火薬剤により、海水を使用した方が、淡水よりも膨脹率の良い泡を発生するものがあることが経験的に知られており、今回使用した泡消火薬剤の界面活性剤の性状により、このような結果が得られたと考えられる。

イ、25%還元時間

室温 $-10^{\circ}\text{C}$ 以下では、淡水、海水とも、100倍の膨脹率の泡を除いて凍結し、測定は出来なかった。室温 $20^{\circ}\text{C}$ と $0^{\circ}\text{C}$ における25%還元時間を図5と図6に示した。

淡水では、室温が下がるほど、また、膨脹率の高い泡ほど、25%還元時間が長くなる傾向にある。特に、300倍の膨脹率の泡にあっては、室温 $0^{\circ}\text{C}$ では、 $20^{\circ}\text{C}$ と比較して、

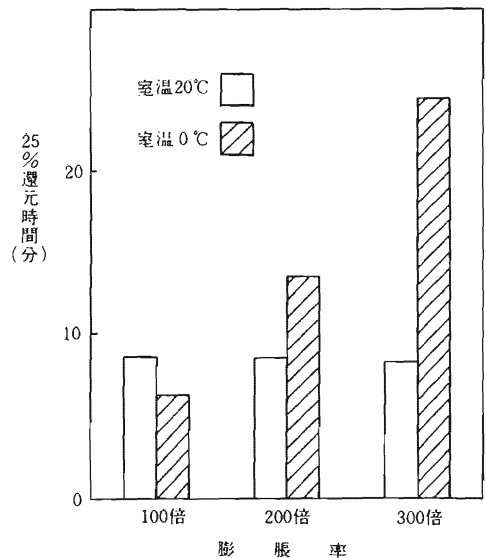


図5 室温の25%還元時間におよぼす影響(淡水)

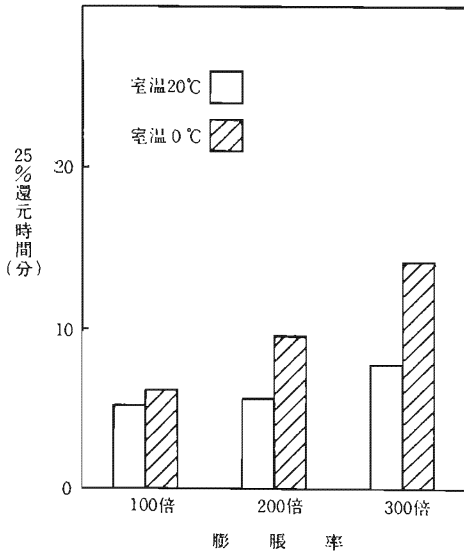


図6 室温の25%還元時間におよぼす影響(海水)

3倍近く長くなっている。これは、泡の含水量の差により、冷却速度が異なることにより説明される。また、泡の温度降下によって、還元する泡水溶液の粘性が増し、流動性が低下することにより、保水性が良くなることに起因すると考えられる。

海水は、室温20°Cでは淡水と比較して、25%還元時間が短くなり、室温0°Cにおいても、淡水ほど長くはならない。海水中の無機塩の影響は、膨脹率よりも、泡の安定性や保水性の指標となる25%還元時間に表われ、安定度を失い強度を減少した泡の崩壊による泡膜流下速度の増大となって見られる。

ウ、泡の温度変化及び凍結状況

図7及び図8に、淡水と海水の室温0°Cと-10°Cにおける泡内温度の変化を示した。

淡水では、膨脹率の高い泡ほど、発泡時の泡内温度が低下している。冷却速度は、室温0°Cにおいては、膨脹率の低い泡の勾配が大きく、室温-10°Cでは、逆に膨脹率の高い方が大きくなっている。ただし、室温-10°Cの100倍の膨脹率の泡にあっては、膨脹率が大きく低下していることが原因で、温度変化が緩慢になっている。

海水でも、室温0°Cでは、膨脹率の高い泡ほど発泡時の泡内温度が低下しているが、

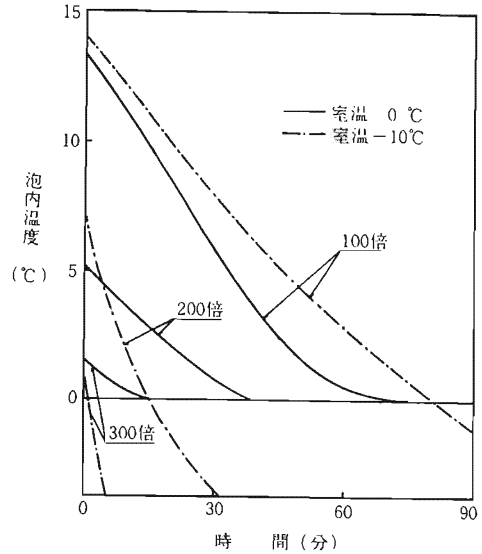


図7 泡内温度の時間変化(淡水)

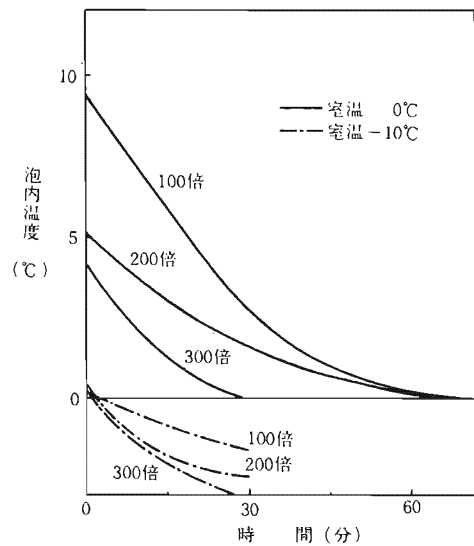


図8 泡内温度の時間変化(海水)

室温-10°Cでは、各膨脹率の泡とも差がみられず、冷却速度も小さい。

熱移動の速さは、フーリエの法則により、泡水溶液の熱伝導率に比例する。

$$q = -\lambda A d\theta/dl$$

ここでq:熱移動の速さ(cal·sec<sup>-1</sup>)

λ:熱伝導率(cal·cm<sup>-1</sup>·sec<sup>-1</sup>·deg<sup>-1</sup>)

A:熱の向きに垂直な断面(cm<sup>2</sup>)

dθ/dl:温度勾配(deg·cm<sup>-1</sup>)

また、温度伝導率Kは次のようにおけるから、

$$K \equiv \lambda / c\rho$$

ここで C:比熱[cal·g<sup>-1</sup>·deg<sup>-1</sup>]

ρ:密度[g·cm<sup>-3</sup>]

温度降下、すなわち冷却速度は、泡水溶液の熱容量に反比例する。

したがって、発泡時の泡内温度は、膨脹率に密接に関係する。膨脹率の高い泡は、含水量が少なく熱容量が小さいことから、発泡時から温度が低下しており、膨脹率が低くなるほど、泡水溶液の液温に近い値を示している。海水の場合は、淡水と比べて熱伝導率が大きく、比熱が小さいことから、温度伝導率が大きくなり、発泡時の温度低下は激しい。

各膨脹率の泡の冷却速度は、フーリエの法則から、室温との温度差の少ない泡が勾配は小さくなっている。室温-10℃では、凍結した泡の熱伝導について考慮する必要がある。淡水では、泡が凍結した場合、凍結前よりも熱伝導率が大きくなり、膨脹率の高い泡ほど熱容量が小さく、冷却速度が大きくなる。海水では、泡の凍結によっても、淡水ほど熱伝導率が大きくなり、比熱も温度が低下するほど大きくなることから、冷却速度が淡水より緩やかな下降を示すと考えられる。

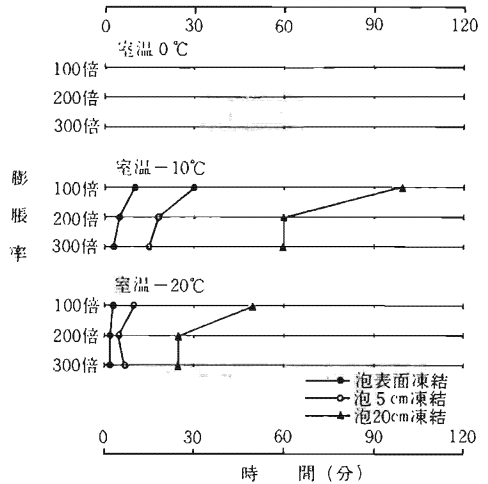


図10 泡の凍結状況(海水)

これらを、図9及び図10に示す泡の凍結状況でみれば、よく理解できる。

淡水は、室温0℃で泡表面の凍結が起ったのみで、凍結は内部まで進行しなかった。-10℃~-20℃では、室温が下がるほど、また膨脹率の高い泡ほど、凍結までの時間が短くなる傾向にある。

海水では、氷点が-1.95℃(Cl=19.00%)のため、室温0℃では凍結は起こらない。室温-10℃~-20℃でも、淡水より凍結までの時間は、長くなっていることを示している。

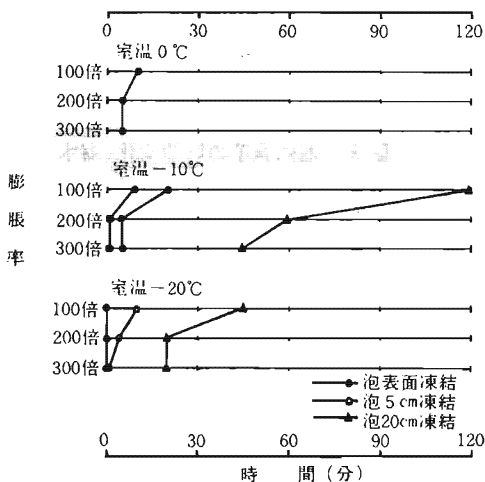


図9 泡の凍結状況(淡水)

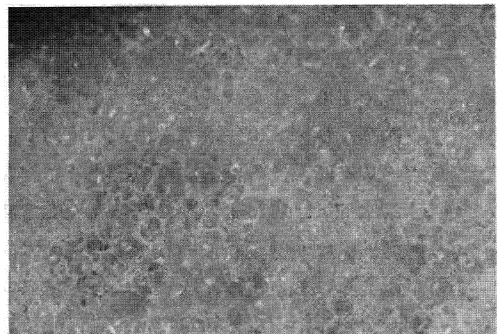


写真2 泡の凍結状況

## (2) 液温の発泡性能におよぼす影響

200倍の発泡器により、泡水溶液の液温を20℃~5℃まで5℃間隔で変化させた場合の発泡性能を表4に示した。

表4 液温の発泡性能におよぼす影響

液温 (°C)	淡水		海水	
	室温	-10°C	室温	-10°C
20	245 11'00"	174 凍結	223 7'38"	208 凍結
15	221 8'33"	193 凍結	233 8'12"	233 凍結
10	223 8'30"	199 凍結	245 8'12"	204 凍結
5	188 8'21"	186 凍結	175 6'43"	163 凍結

〔上段 膨脹率  
下段 25%還元時間〕

ア、膨脹率

液温20°Cにおける膨脹率を基準として、液温による膨脹率の変化割合(比膨脹率)を図11に示した。

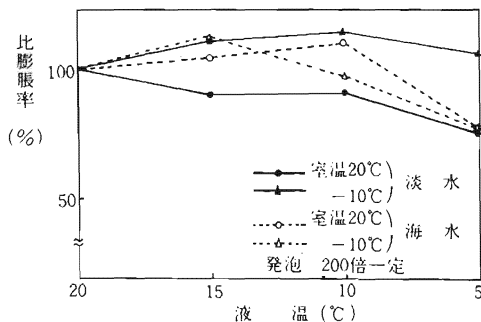


図11 液温の膨脹率におよぼす影響

淡水は、室温20°Cでは、液温が下がるにしたがって膨脹率が低下している。室温-10°Cでは、液温10°Cに極大値を持ち、液温5°Cにおいても、20°Cと比較して膨脹率は高くなっている。淡水では、室温と液温との温度差が起泡性に大きく関与していると考えられる。室温と液温との差が大きいほど、泡消火薬剤中の界面活性剤の起泡性に影響を与え、膨脹率の低下を引き起こすものと見られる。

海水では、液温10°C~15°Cで極大値を持つが、室温による差は認められない。これは、無機塩により発泡時の泡の成長が不安定となり、膨脹率に測定上、差が認められなくなるためであると思われる。

淡水、海水とも、液温5°Cのとき、一様に膨脹率が大きく低下しているが、一因として、界面活性剤の溶解性が液温が低い

めに悪くなり、膨脹率に影響を与えているとも考えられる。

以上の実験結果から、界面活性剤の活性効果を最大にする液温が存在するということがあるが、液温が5°C以上ならば、膨脹率には大きな影響を及ぼさないと言える。

イ、25%還元時間

図12には、室温20°C一定の場合の、25%

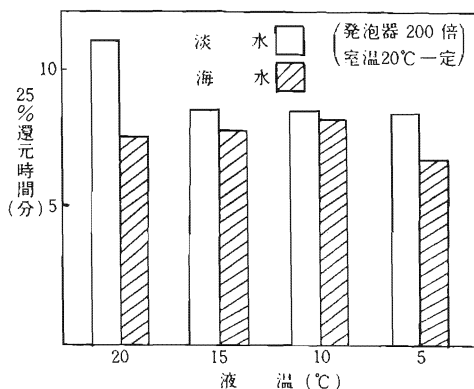


図12 液温の25%還元時間におよぼす影響

還元時間を示した。室温-10°Cの場合は、全て凍結して測定出来なかった。

淡水の場合は、液温20°Cにおいて最大の値を示したが、液温が低くなっても25%還元時間はほとんど悪化しない。海水においても、液温5°Cで悪くなる以外は、差は認められなかった。室温が20°C以下では、液温の変化は淡水、海水とも、25%還元時間にあまり影響を及ぼさないと思われる。

### (3) 可燃性蒸気を密閉する能力

凍結した泡が、断熱材等から発生する可燃性蒸気を密閉し、酸素をしゃ断出来るかは、

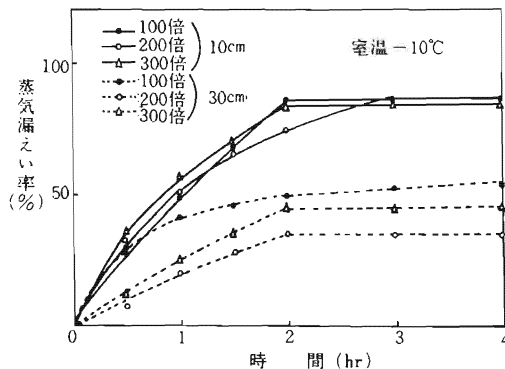


図13 各膨脹率の泡の蒸気漏えい率

泡消火薬剤を冷凍倉庫などで使用する場合に、検討を要する項目である。もし、凍結した泡に密閉する能力がなければ、発生した可燃性蒸気に着火する恐れがある。

室温0℃においては、各膨脹率の泡とも、被覆する泡の厚さを30cmとしたところ、n-ヘキサンをほぼ完全に密閉したが、泡の厚さ10cmについては、密閉の効果はなく、漏えいがあった。図13に、淡水を用いて、室温を-10℃とした場合の、各膨脹率の泡の蒸気漏えい量を、n-ヘキサンを全く泡で被覆しない場合の蒸気発生量との比で表わした。泡の厚さが10cmでは、密閉効果はなく、泡の厚さが30cmとしても、35~55%のn-ヘキサンが漏えいしている。泡は凍結が進行するとき、体膨脹により泡内に歪みを生じ、その間隙からn-ヘキサンの漏えいが起こると考えられ、泡による被覆が厚いと、漏えいした蒸気が上層の泡により妨げられやすくなり、蒸気発生抑制がなされると考えられる。

#### 4. おわりに

これまで、泡消火薬剤を冷凍倉庫内部で発泡させることを前提として、泡性状について検討してきたが、気温が氷点下となる寒冷地において、泡消火薬剤を使用して消火活動を行う場合にも適用出来る。泡消火薬剤を低温域において発泡させ、使用する時には、次の点に留意する必要がある。

##### (1) 泡の凍結は、急速には進行しない。

凍結について、室温0℃においては考慮する必要はなく、-10℃~-20℃においても、膨脹率の低い泡は凍結が進行しにくい。低温域において発泡を行う場合は、低い膨脹率の泡で連続的に送泡して泡の厚みを増すことにより、一層、凍結までの時間を長く出来る。

##### (2) 海水は淡水より凍結しにくい。

海水は、発泡時の温度降下は大きいですが、凍結し始めると冷却速度が緩やかになり、凍結に至る時間が長くなる。海水の影響は25%還元時間の低下によく現われる。

##### (3) 使用目的にかなった膨脹率を選択する。

低温域では、室温が下がるほど、また、膨脹率の高い泡ほど25%還元時間は良くなり、離れた場所へ送泡するのに大きな利点となる

が、凍結が起こるに伴って流動性が低下する。このため、離れた場所へ送泡する場合には、多少保水性が落ちても流動性を確保するため、膨脹率の低い泡を発生させ、流動性を考慮しなくても良い場所にあつては、膨脹率の高めの泡を発生させればよい。使用に当っては、泡消火薬剤及び泡の性状を念頭に入れ、目的にかなった膨脹率を選択して、有効に消火活動に対応出来るよう努めるべきである。

##### (4) 凍結泡により可燃性蒸気を密閉するには、泡層を厚くする必要がある。

今回実験を行った程度の膨脹率では、泡の厚さを30cm以上として使用しない限り、可燃性蒸気を密閉することは困難である。

また、凍結した泡を低温室から取り出し、空气中に放置すると、泡の崩壊が著しく溶けるように崩れてしまう。このため、実火災時では、熱のため、泡による可燃性蒸気の密閉については期待できない場合が多い。しかしながら、泡消火薬剤の役割は、密閉効果のみならず、含有水分による冷却効果や湿潤効果によって、水分が物質の内部まで浸透しやすくなることも考え合わせると、低温域において、泡消火薬剤が使用に耐えないものとは、断言出来ない。

低温域における泡性状については、以上、検討してきたように、凍結が起っても性状を熟知した上で活用すれば、十分消防活動に対処出来るものであることが分った。しかし、実際の消火活動を考えるとき、実大規模における凍結泡の性状や、凍結した泡が消火に対し、どの程度有効性を示すかということが、大きな課題であると考えられるので、今後とも研究を継続して行く予定である。

#### 5. 参考文献

- (1) 旭川市消防本部、寒冷時における高発泡実験結果
- (2) 渡辺勝志、消防科学研究所報5号、P22、1968
- (3) 新居六郎、消防研究所報告、Vol.28、P9-14、1967
- (4) 沖山博通、火災、Vol.28、No.5、P28-35、1978
- (5) 堀口博、新界面活性剤、三共出版
- (6) 甲藤好郎、伝熱概論、養賢堂