泡沫による坑内火災の消火について (第1報)*

—模型風道による実験—

正 会 員 中 野 貫 一^{*1} 正 会 員 石 浜 渉^{*2}
 正 会 員 松 隈 喜 総^{*3} 岩 崎 環^{*4}
 正 会 員 鍋 谷 弘^{*4}

On the Control of Mine Fires with High-Expansion Foam Plugs (1st Report)

—Experiments with a small model roadway—

Kan-ichi NAKANO, Wataru ISHIHAMA, Kisō MATSUKUMA,
 Tamaki IWASAKI and Hiroshi NABEYA

Experiments have been made in the laboratory, in a ventilated small model roadway, to explore the factors controlling the proportion of sprayed liquid converted into foam, the filling of the model roadway with foam and the back-pressure exerted on the ventilation by the net and foam-plug.

The following conclusions are reached.

- 1) It is shown by experiments that there is an upper airspeed limit for adequate filling of the model roadway with foam, the limit being about 50m/min for one net design.
- 2) The degree of filling a model roadway with foam has been characterized by the "Leak ratio".
- 3) The back-pressure of the net is comprised of two components. The first component (h_1) is independent of airspeed. The second component (h_2) is due to the aerodynamic resistance of the net and increases linearly with airspeed.
- 4) If the air speed through the roadway is constant, the degree of filling a roadway with foam is affected by the characteristics of the foam agents solution.

1. 緒 言

最近、各国で坑内保安に泡沫を使用する研究が進められている。特に、坑木、ベルトの過熱による坑道火災に対し消火用ホースを用いる直接消火はその放水距離も限定されるとともに、坑内という悪条件によつて消火作業に非常に困難と危険が伴いがちである。そこで、火災地帯から離れた場所から火源部に水を送り込む消火が考えられる。

すなわち通気を利用して水を泡沫の状態に坑道に充満させながら火災地帯に送り込み、泡沫中の水分による冷却効果、また泡沫が水蒸気となり火をあげて燃焼しているのを抑制するのに充分なだけ空気中の酸素量を減少させることによる窒息効果、とで火災を抑制しようとする考え方が高膨張性泡沫による消火方式という形で H. S. Eisner と P. B. Smith (1956)¹⁾ により発表され、その後 J. Nagy⁵⁾, E. T. Linacre^{2), 3), 4)} らにより研究されている。われわれは本邦で生産されている界面活性剤

のうち十数種^{a)}を選択し、火災地帯に到達する泡沫の流動状態を支配する要因を解明する目的で実験を行なつたので、ここにその結果の概略を報告する。

2. 実験装置および方法

第1図に実験装置と測定機器の配置を示しているが、風道は透明なプラスチック製で、断面は、アーチ型である。網は、化繊の混紡であり(後出)、この網面にガラス製の溶液槽から既知濃度の泡沫剤を空気圧縮機で加圧し、蓮型ノズルから 6.5l/min の割合で噴射させ液膜を張らせる。送風は押込み方式とし風道内の通気速度を 0~115m/min に調節できる可変ダンパーをもつ送風機を使用した。測定機器は、風速測定のため入気側^{b)}にサーミスター風速計を設置し、泡沫帯の伸延に伴う圧力の増加量は、ピトー管による静圧によつて測定した。網面から 4, 9, 14m の各位置に泡沫の膨張率を測定する目的で 0.2×0.2m の面積をもつ落し蓋を取り付けた。第2

* 昭和36年11月30日受理 昭和36年度日本鉱業会秋季大会にて一部発表

*1 資源技術試験所北海道支所長

*2 " " 第1課長

*3 " " 第6部第2課長

*4 " " 北海道支所

a) 後出する各泡沫剤の略号 A, N, T は A: 試剤, N: Newlex T: Teepol の略称であり、後付する数字は有効成分を主体にした重量濃度を示す。例えば T. 1 は Teepol の 1% の溶液を示す。この実験に用いた泡沫剤の特性については昭和36年度日鉱会秋季大会にて著者の一人が、坑内火災対策としての泡沫制御法に関する研究⁷⁾と題して発表。

b) 第1図参照

図に示すように泡沫帯の伸延、および泡沫による通気の制御と消火の機構はかなり複雑である。このため本文では泡沫剤の種類と濃度が固定した場合、とくに、入気速度の変化に対して仮想火源点の到達する泡沫の状態について考察したが、泡沫が発泡を開始するに当つて直面する網と発泡圧の概要から述べる。

第1図 泡沫発生装置と測定用機器の配置図

3. 実験結果および考察

3.1 泡沫剤溶液と網に関係する発泡圧

網は、泡沫形成の初期条件を与えるものである。ここで最も重要なことは、その網の保水性と網目の大きさである。網目の大きさと泡沫剤の表面張力(σ)とから網面に膜を形成した場合に耐える最大圧力(h_1)、すなわち発泡圧は(1)式で与えられる。

$$h_1 = \frac{4\sigma}{r} \quad (1)$$

r : 液膜の最小曲率半径^{d)}

また、送風機により得られる圧力が、液膜に均一な通気圧(h_2)を与えていると仮定すれば、ここで網目が等しい大きさを持つなら、各網目を通過する風速(v_0)は、等しいことになる。

$$h_2 = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \quad (2)$$

ρ : 空気の比重 1.3×10⁻³[g/cm³]

(1),(2)式より $h_1 \leq h_2$ とおけば

$$v_0 \geq \left(\frac{8\sigma}{r\rho} \right)^{0.5} \quad (3)$$

(3)式の v_0 が右辺を越える場合は、通気は液膜で閉じられている網目を通過する。すなわち発泡を続けることを意味する。膜で張られている網目の部分が(3)式を等式にするまで順次、通気力が液膜を追い出す。しかし連続的に液の噴射をする場合は、液膜が泡沫に変換されると同時に網に保水されている液が膜を張り、一定の圧力を保持し、発泡を続ける。噴射を停止した後でも網の保水性の大きいものほど発泡を持続する時間が長く、漸次網目に張られる膜が減量し(2)式を満足する圧力以下になれば、発泡は停止する。第3図は本実験に用いた網^{e)}

c) 網面から排気側へ14mの場所を呼称する。

d) 単一細管から静かに気体を液中に押し出して得られる気泡については多数発表^{a)}されている。しかし気孔が密接し気体流速が大きく、多量の気泡が発生して泡沫を形成する場合は複雑で実験式も得られない状態である。Eisner と Smith (1956)^{b)} により気泡の初期生長の機構では液体膜の最小曲率半径は隣接する網目の中心間の距離の2に等しいとほのめかしている。

^{a)} Coppock, P. D., et al., T.I.C.E. (London), 29, 75 (1951),
Maier, U. S. Bur. Mines Bull., 260 (1927) Datta, R. L.,
et al., T.I.C.E. (London), 28, 14 (1950)

第2図 各要素とそれらの関連性

に対する通気速度と圧力との関係、第1表は、網の特性について Linacre^{a)} らが用いたものとの比較を示した。

ここで単位面積当りの網目の数がきまつている場合には、小さな網目は、網糸の径が大きくなるため、液を保持する面積、および保水性が大きくなり噴射の効率を上げ得ると考えられる。また、膜をより速かに張ることができる。そこで泡沫の生成に対して最適な網は、小さな網目を持ち、保水性の大きい性質のものであろうと考えられるが、現場では、泡沫自体が吸出扇風機により形成されるので通気的観点からすれば網の背面における負圧の増加をもたらし、時に火災現場に、爆発性ガスの流動あるいは増加の原因となることも考えられる。このために泡沫帯の伸延による圧力、発泡圧と網の抵抗圧などの総合した圧力降下を極力、小さくすることを考慮しなければならない。

第1表 網材料の特性についての比較表

実験者	網材名	網量の重 g/0.1m ²	網隙の率 (a) %	最率小半 曲径(r) cm	臨風* 界速(Vm) m/min	発泡圧		誤差
						実測値 mmAq	理論値 mmAq	
Linacre らによる	19	34.02	55	0.325	247	3.05	3.77	0.72
	9	48.20	35	0.250	184	3.81	4.89	1.08
	合成	53.86	30	0.065	310	18.29	18.83	0.54
本実験	1#	19.50	36	0.150	239	6.40	8.16	1.76
	2#	41.40	32	0.175	194	—	6.99	—

* $\sigma=30$ dyne/cm と仮定する。

c) 本実験では2種類(1#と2#)の網を用いたが、ここでは1#の網によるものである。

第3図 通気速度と各種圧力との関係

3.2 通気速度と発泡圧

(1)式は風速に無関係であり、網と泡沫剤の特性によつて決まる。しかし膜が張られた場合に、泡沫として追い出す圧力は(2)式によつて与えられる。初めに網の全面に膜が張られていると仮定すれば、膜を泡沫として叩き出す速度は通気速度によつて変化する。すなわち送風機の風量が多いほど発泡までに要する時間は短い。しかし実際には、一定の通気速度で通風しながら網面に液を噴射する。この場合には、網の一部分に液膜が張られた時でも v_b が(1)式を満足させる圧力を与える風速になれば発泡が始まる。そこで網目の通過風速 (v_b) は網の吹き抜け目数率^{f)} (N) と網面の空隙率 (a) により通気速度 (v_p) に影響する。

$$v_p = a \cdot N \cdot v_b \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)式の右辺のうち N 以外の項は使用される網により、一定であるから、 v_p が変化すると(4)式が等式になるように N が変化する。すなわち、液膜の増減で常に(4)式は等式になるように調節される。しかし N の増加には限度があり、その限界は網目の全部が空気を吹き抜けにした場合である。このときの風速を v_m とすれば(4)式は

$$v_m = a \left(\frac{8\sigma}{r\rho} \right)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで v_m を臨界風速と名付ける。本実験で用いた網材と泡沫剤とから v_m は 239m/min と計算された。しかし、火源点に到達する泡沫が最良の状態を示すための通気速度は、泡沫剤の種類と濃度により第4図にみられるようにすこぶ異なることがわかる。いずれにしても通気速度 (v_p) は臨界風速 (v_m) の $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}$ 程度の範囲にあることが観察された。ここで v_m 近傍の通気速度を与えた場合は、漏洩率 (LR)^{g)} はともかく泡沫が形成されることから、このような通気速度で通気した場合には、本実験で仮想した火源点よりもつと遠い地点で漏洩率が1に近い

第4図 仮想火源点に到達する泡沫の状態変化 (通気速度と漏洩率との関係)

づくことが推察できる(後出)。

3.3 入気量と泡沫量の関係

網の発泡圧は、実測では 6.4mm Aq であった。送風機口を全密閉した場合に示す水柱圧から、発泡圧を差引いた値が泡沫長さの最大値を与えることになる。ここで泡沫剤の種類と濃度が異なる場合、泡沫の長さ (l) とその時にかかる圧力 (h) の関係を第5図に挙げる。泡沫剤によつて網と火源点間の圧力が異なることがわかる。これは次式により表わされる。

$$h = 6.4 \exp(x \cdot l) \quad \dots\dots\dots (6)$$

① 泡沫剤の特性と風

道抵抗の状態変化を包含した係数

l : 網と火源点までの距離

x の値は、A1 剤と T0.5 剤では 0.1311, N0.5 剤では 0.095 である。泡沫の伸延につれて泡沫の進行速度が低下するが、この度合は網を中心にしてその入気側の圧力と、排気側^{h)}の泡沫の抵抗圧の差圧に比例するが、差圧は、漏洩率、泡沫の安定性に影響される。第6図は、適正な通気速度より早い場合(⑧:①~①'), 適正な場合(⑥:②~②'), また、おそ過ぎる場合(⑨:③~③')の状態を観察したものである。⑧の曲線関係は、通気風速が早や過ぎるためにすでに火源点に泡沫が到達している状態にありながら漏風量が泡沫量を超過したまま定常化している。⑥の曲線関係は、初めは漏風量が泡沫量を超過しているが泡沫の伸延につれ圧力が増加し、通気量が減少し、12mの付近で漏洩率が1になり、最良の状態を示している。⑨の曲線関係は、通気速度がおそ過ぎるために網面の近傍から漏洩率が1に近い状態で伸延しているが、泡沫中の含水量が流下して膨張率が増加し 9m

第5図 泡沫の長さとの関係

- f) 膜を張った目数と単に空気を通過している目数との比率を言う。網目の全部が膜を張っていない場合を $N=1$ とする。
g) 泡沫を形成するに用いられた空気量と総通気量との比率である。例えば単位時間に1容積の空気量がそとれ等しい泡沫量をもつとき、すなわち漏洩がない場合で漏洩率は1と示される。
h) 第1図を見よ。

第6図 泡沫の伸延に伴う漏洩量の変化

の付近で泡沫の剪断を生じ、火源点付近では逆に漏洩量と発泡量との比率が悪化している。④および⑤にみられるように、いずれも火源点で漏洩率が1から離れるが、同じ漏洩率を示す場合でも、このように異なつた状態変化によることがわかつた。④の曲線関係では、火源点を14mと想定したために漏洩率が悪く、もつと遠い位置で漏洩率が1になる場所があると考えられる。しかし⑤の曲線関係では時間とともに悪化する一方であるから、現場に適用させるに当つては、④、⑤、⑥のいずれの状態で作動されているかをあらかじめ知る必要がある。このためには実際規模の坑道で距離変化に対する漏洩率、また圧力変化に対する泡沫長さを測定しておく必要がある。同一の通気条件の下では、泡沫が安定なほど泡沫の剪断が始まる位置は、より排気側で起ることがわかつた。泡沫が剪断する限界距離の相違は泡沫剤の種類と濃度により異なると考えられるが、本実験では、各泡沫剤の発泡瞬間膨張率は約400倍程度であることがわかつているが、最も不安定な泡沫剤溶液では、2,800~3,000倍くらいで泡沫が破裂することが液流下時間の測定から観測された。

- i) 第6図に仮想曲線として示した交点(×)の風道の位置をいう。
j) 次報にて述べる。

4. 結 言

以上、模型風道を用いて通気速度の変化を軸として、一応定性的な事項を中心にして述べてきたが、これを現場で作動させるに当つて考慮されなければならないことは、ここで考察された範囲では、次の点である。使用される網の特性、火災帯との距離、坑道の通気速度が判明している場合、その風速で最良の状態の泡沫を作り得る泡沫剤を用いるようにすることである。換言すれば、泡沫剤の種類と濃度が固定され、坑道の通気速度が測定されたなら、網と火災帯間の距離を前後に移動して泡沫状態を最良にすることである。また、網と火災帯間の距離が固定されれば、泡沫が火災帯に到達した時に漏洩率が1を持つような通気速度を設定するよう調節しなければならない。これらの種々の操作を行なつて、初めてよりよい状態にすることが可能であると考えられる。われわれは、今後さらに規模の大きい風道を作製し、現場に近い状態で泡沫の伸延と消火効力について解明したいと考えている。

謝辞：本研究の実施に当り、九州支所の渡辺伊温技官から終始有益な助言をいただいたことに対し、また実験に際しては室工大学生、浜田恒平君の熱心な助力を受けたことについて厚く感謝の意を捧げるものである。ここに泡沫剤試料を御提供下された日本油脂株式会社油脂研究所に対し厚く御礼を申し上げる。

文 献

- 1) Eisner, H. S. Smith, P.B.: Firefighting in underground roadways, experiments with foam plugs, S.M.R.E. No. 130 June 1956.
- 2) Linacre, E. T.: Practical aspects of foam-plug method of fighting large mine-airway fires, S.M.R.E. No. 171 (2~1959).
- 3) Linacre, E. T.: Materials and equipment for the foam-plug method of mine firefighting, S.M.R.E. No. 179 (8~1959).
- 4) Linacre, E. T.: The formation and movement of foam-plugs for mine fire-fighting, S.M.R.E. No. 182 (8~1959).
- 5) Nagy, J., Basnes, R. W., and Murphy, E. M.: Control of mine fire with high-expansion foam-plugs, Bureau of Mine R. I. No. 5419 (1958).