

3. 加圧下における可燃物の燃焼危険性

駒 宮 功 額*
森 崎 繁*

Combustion Hazard of Combustible Materials under Compressed Gas Atmospheres

by K. Komamiya*
S. Morisaki*

Danger of combustion will be increased in atmospheres at work places such as caisson work, as oxygen partial pressure is higher than air at atmospheric pressure.

Experiments on ignition temperature, flame velocity and quenching distance were carried out at these conditions to estimate the combustion danger in these gas atmospheres.

From the experiments, it was revealed that the increase of a few pressure had not so much influences on the combustion danger. However, as a caisson work is proceeded at a confined room, it is necessary to pay more attention for prevention of fire.

3.1 研究目的

大気圧空気中における可燃物の燃焼危険性については、人類が火を利用して以来日常経験を重ね、次第に技術的知識も蓄積されて、その予測はかなり可能となってきた。

しかし自然には存在しない加圧された環境下の燃焼危険性については、十分な経験をもっていない。人類がこのような加圧下での燃焼を経験したのは1870年ブルックリン橋の潜函工事の際のコーキング用粗麻の火災¹⁾と考えられている。この火災事故そのものは建設工事に大きな障害ではなかったようで、NFPA (全米防火協会) が正式にこの種の問題を取上げたのは科学技術の発達により、空気より支燃性の強い雰囲気*下での火災事故の起こるようになった1960年代であった²⁾。近年国内でもこの種の事故³⁾の発生を見るようになり、当所では事故原因を明確にするため、火災事故に関連して若干の実験を行なったが、十分ではなかったので今回総合的な危険性の評価を目的として主として加圧空気下で実験を行なうこととした。

実験用試料は無数の物質が考えられるが、ここでは潜函工事に用いられるものを対象とした。このためアンケート調査を行ないTable 3-1のような結果を得たので、主として潤滑油のような液体とプラスチック、繊維のような固体を取上げることにした。

Table 3-1 Combustible materials in caisson work

潜函工事に持込まれる可燃物		
種類	名称	
油	脂	潤滑油, タービン油 作動油, 絶縁油, グリース
プラスチック		発泡プラスチック, ビニル排気管, 電線絶縁物, コーキング材, 塗料, ゴム製品 (コンベア, ホース等)
木材		杭木, 足場板, 矢板
繊維		作業服, ウェス, セメント袋

*加圧空気や大気圧の酸素雰囲気は大気圧の空気の酸素分圧(約160mm Hg)より高いため燃焼危険性が増加する。このような雰囲気を過剰酸素雰囲気と呼んでいる。特に酸素の支燃性を弱める窒素などの混入割合が少なかったり、空気でもその圧力が高いと強い支燃性を示す。

燃焼危険性の評価には多くの方法が考えられるが、発火を起こすためには十分な酸素濃度の雰囲気中でなければならぬ。また発火しても十分な燃焼熱を発生しなければ、火炎は伝ばせずに消えてしまう。このような考えからTable 3-2の評価項目をあげ、今回は発火温度、火炎伝ば速度、消炎距離について前記試料を用いた実験を試みた。

Table 3-2 Evaluation of combustion hazard

燃焼危険性の評価	
発火前	引火温度
	発火温度
	最小発火エネルギー
燃焼性	酸素指数 (最低酸素濃度)
	発火後
	燃焼熱
	火炎伝ば速度
	消炎距離
	消炎容積

3.2 実験と結果

3.2.1 発火温度

3.2.1.1 実験

発火温度の測定には各種の方法が知られているが、固体や液体の試料ではFig. 3-1のような一定温度に保った容器に試料を落下又は滴下して発下させる定温法⁴⁾

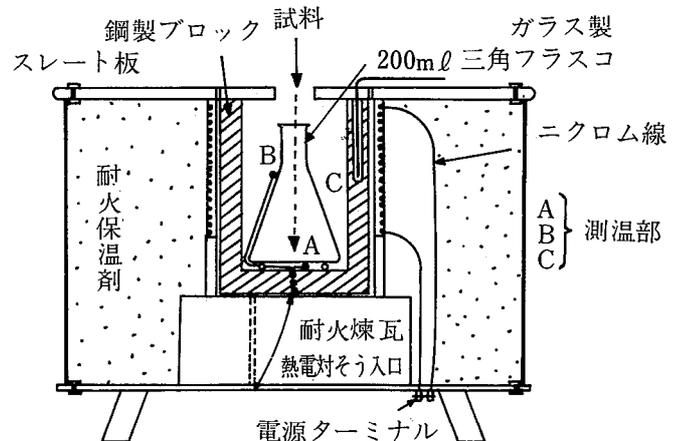


Fig. 3-1 Standard of atmospheric pressure ignition apparatus (isothermal method)
標準的な大気圧発火温度測定装置

(滴下法ともいう)と、Fig.3-2のような試料を入れた容器を一定昇温速度で発火するまで加熱する昇温法とが一般的である。

定温法では発火まで多少の待ち時間を要し、これを発火遅れ時間と呼んでおり、最低発火温度のときがもっとも長く、それより高い温度(たとえば瞬間発火温度)ではもっとも短い。一方昇温法では昇温に若干の時間を要するので瞬間的な発火温度の測定は不可能である。どちらの方法でも測定装置、試料量、支燃性ガスの種類と圧力、昇温速度などの影響をうける。

Fig.3-1は大気圧下での定温法による装置であるが、これを加圧下で液体試料について測定したのがFig.3-3で、かなり複雑となる。またFig.3-2の昇温法は加圧下でも液体、固体とも測定できるが、定温法との関係は

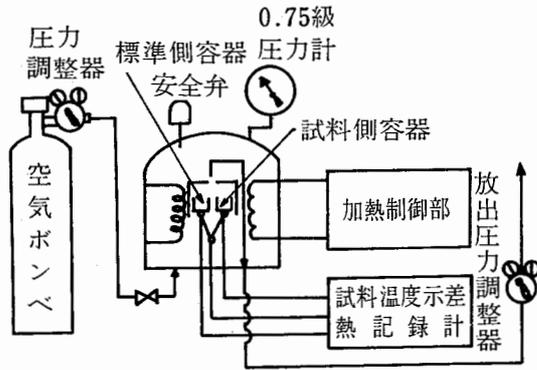


Fig. 3-2 Flow sheet for high pressure ignition apparatus (dynamic method)
昇温式 高压発火温度測定装置

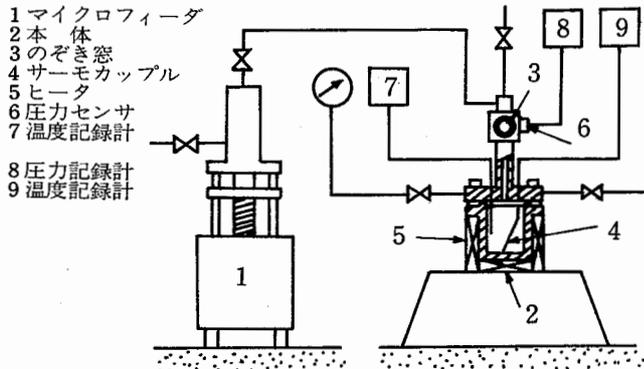


Fig. 3-3 Flow sheet for high pressure ignition apparatus (isothermal method)
定温滴下式 高压発火温度測定装置

固体⁵⁾ だけしか報告されていない。このためFig.3-3の定温式装置で発火温度を測定した潤滑油について、Fig.3-2の昇温式装置で実験し、両方式の比較を行うとともに、プラスチックや繊維などの固体試料についても発火温度を測定した。

3.2.1.2 実験方法と試料

液体の潤滑油はアルミ製試料容器(内径5mm, 深さ5mm)に約10mgを、固体試料は約5~10mgになるように切断した試片をそれぞれ入れ、所定圧力に加圧して通電昇温させた。発火温度はFig.3-4のように試料温度曲線の急激に立ち上った温度を、発熱温度はFig.3-4のDTA曲線のベースラインとピークの最大傾斜の交点の温度とそれぞれ定義した。

実験試料として油脂は空気圧縮機専用油、タービン油2種、作動油3種とグリース2種の計8種をプラスチックはポリエチレン、塩化ビニール、市販ゴム長靴を、繊維はTable.3-3のようなものを用いた。

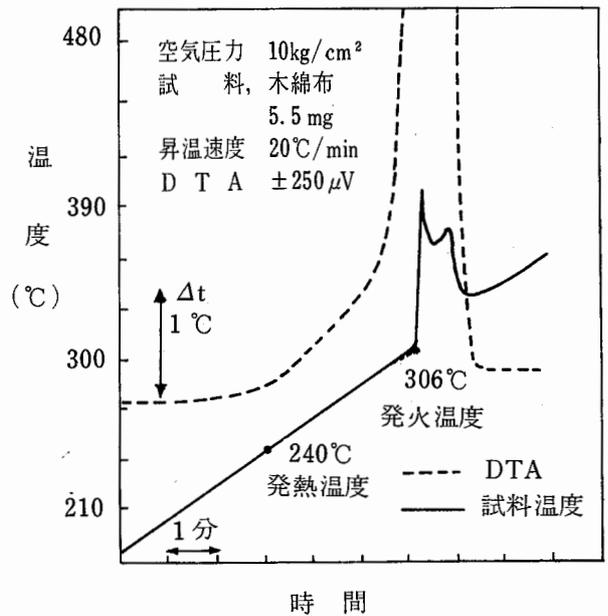


Fig. 3-4 Ignition temperature of cotton sheeting
木綿布の発火温度

3.2.1.3 実験結果

昇温法による潤滑油の発火温度をFig.3-5に示したが、定温法の最低発火温度とよく一致した。次にプラスチックや繊維などについてはTable 3-4に測定結果を示した。なお従来発火温度は圧力の増加によりかなり低下すると思われていたが、昇温法による実験ではプラスチック⁵⁾をはじめ潤滑油などもその変化は僅かなことが

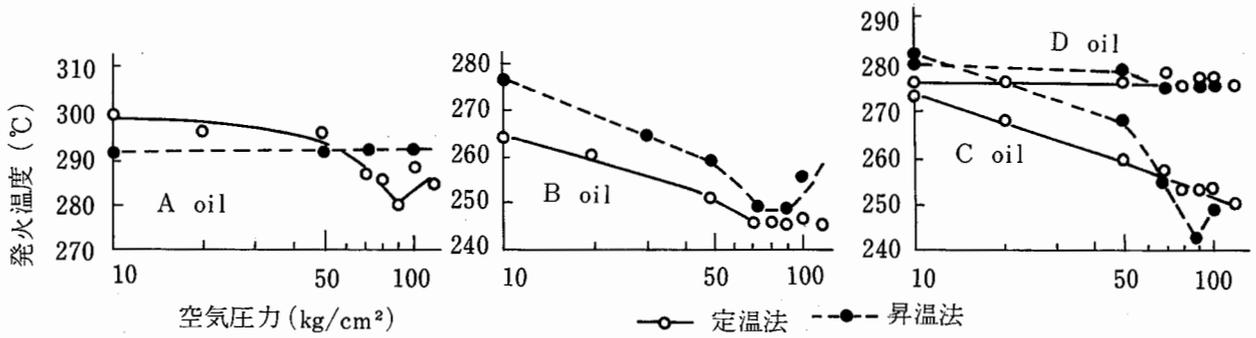


Fig. 3-5 A relationship between ignition temperature on isothermal method and dynamic method
適下法と昇温法による発火温度の比較

Table 3-3 Properties of fabric materials
繊維状試料の性質

名称	化学組成 (%)	密度 (mg/cm ²)
作業服地	綿100	27.7
	綿35 ポリエステル65	25.1
	綿45 ビニロン55	22.8
	防災服地	防災綿100
耐熱布	ポリメタフェニレン・ イソフタルアミド (芳香族ポリアミド系)	23.9

明らかとなってきた。このためTable 3-4の発火温度は空気圧力が10kg/cm²の過酷な条件下で測定したものであるが、最低でも約240°Cであった。発火危険性の高い物質として知られている硝化綿や二硫化炭素の発火温度は大気圧下で100°C台であり、一般に発火温度が200°C以上であれば特に危険ではないと考えられている。したがってこれらの試料は加圧下でも特別な発火危険性はないと判断される。またポリエチレンやグリースの発熱温度が180~190°Cとやや低かったが、過熱などの異常が生じない限り発火危険性物質とは考えられない数値である。

3.2.2 火炎伝ば速度

可燃物の火炎伝ば速度に対する圧力の影響は、一部のガス⁶⁾や固体⁷⁾について報告されている。ガスの場合にはメタン、一酸化炭素とも圧力が増加しても火炎伝ば速度は増大せず、反対に低下の傾向にある。また固体では3~4kg/cm²までの圧力では最高でも大気圧の2

Table 3-4 Ignrtion temperature of combustible materials
可燃物の発火温度

名称	発火温度 (°C)	発熱温度 (°C)
ポリエチレン	270	180
塩化ビニル	294	224
ゴム (長靴用)	(412)	253
作動油 A	298	246
" B	285	221
グリース A	296	191
" B	293	189
綿作業服地	306	240
綿35, ポリエステル65 作業服地	(411)	[246]
綿45, ビニロン55 作業服地	238	202
防災綿服地	274	217
耐熱布 (芳香族ポリアミド系)	(426)	360

但し (空気 10kg/cm² ()無炎燃焼)
(昇温速度 20°C/min ()融点)

倍であった。液体については石油タンク等の防火の立場から燃焼による液面降下速度が大気圧下で測定されているが、潜函工事では大量の可燃性液体が持込まれることはないようである。

このためここでは消炎距離の測定を含め、潜函工事に持込まれる固体を実験対象とした。

3.2.2.1 実験

プラスチックフィルムや布などをFig.3-6, Fig.3-7のようなホルダーにはさみ, Fig.3-8, Fig.3-9の耐圧容器に水平に置き点火し、一定距離の燃焼時間を測定する

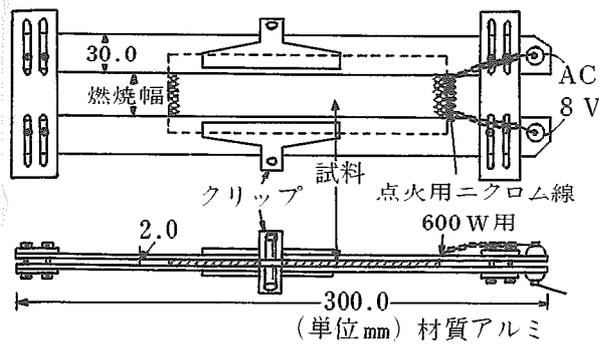


Fig. 3-6 Large apparatus for the determination of flame velocity
大形火炎伝ば速度測定用ホルダー

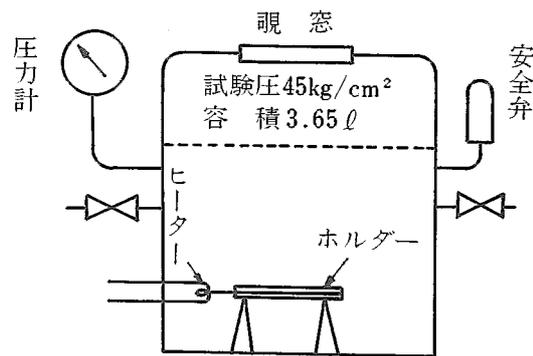


Fig. 3-9 Small combustion vessels
小形燃焼容器

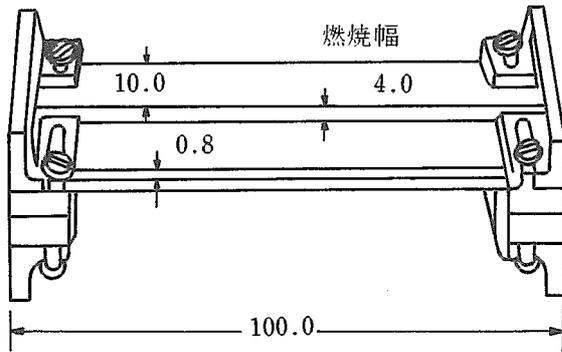


Fig. 3-7 Small apparatus for the determination of flame velocity
小形火炎伝ば速度測定用ホルダー



Fig.3-8 Large combustion vessel
大形燃焼容器

ことにより火炎伝ば速度を求めた。大形のホルダーは燃焼実験に多量の圧縮空気を必要とするばかりでなく、燃焼時に発生する煤や有害ガスなどの処理も困難するので、実験は主として小形のホルダーを小形の燃焼容器に入れ、相対的な危険の評価を行なった。

試料はプラスチックとしてポリエチレン（厚さ0.05 mm）アクリル板（厚さ1mm）を、布として綿100%のものをそれぞれ用いた。

3.2.2.2 結果

火炎伝ば速度に影響を与えるものとしてはホルダーの燃焼幅、火炎伝ば方向（垂直上向、垂直下向、水平）、試料の厚さ、表面状態などがあり、Fig.3-10には水平の火炎伝ば方向における関係を、Fig.3-11には空気圧力と火炎伝ば速度の関係をそれぞれ示した。これらの図から空気圧力が3~4kg/cm²に達すると、火炎伝ば速度は大気圧の2倍となる程度の危険性の増加であることが理解できる。

これらの大形ホルダーと大形燃焼容器を用いた実験は操作や騒音などに問題が多いが、小形ホルダーを用いた実験では試料や加圧空気の量が僅かなのでその恐れは少ない。Fig.3-12はFig.3-7とFig.3-9を用いたポリエチレンフィルムの結果で、絶対的な危険を知ることはできないが、相対的な圧力の増加による燃焼危険性の増加は、Fig.3-11にほぼ似た傾向を示している。

なお綿のように吸湿性の試料では、乾燥した試料と飽和するまで吸湿させた試料の火炎伝ば速度差は2倍⁸⁾であることから、このような危険性の評価は相対的な比較で十分可能と思われる。

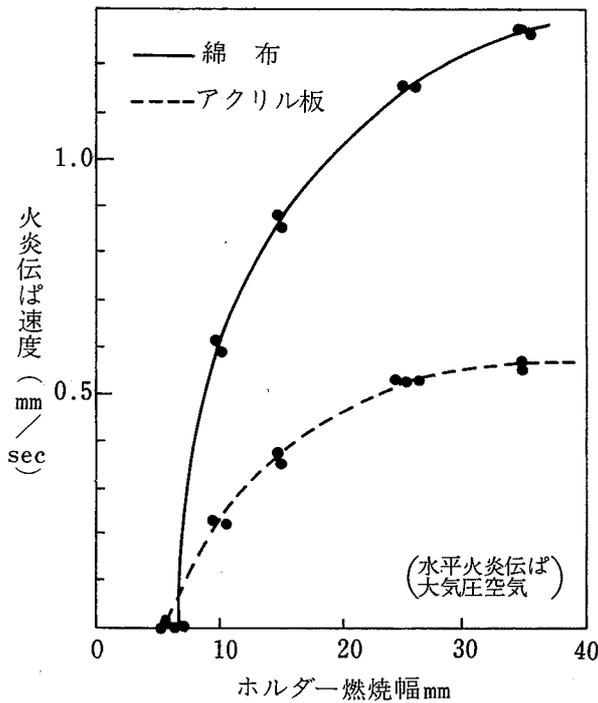


Fig. 3-10 Relationship between flame velocity and combustion wide
火炎伝ば速度とホルダー燃焼幅の関係

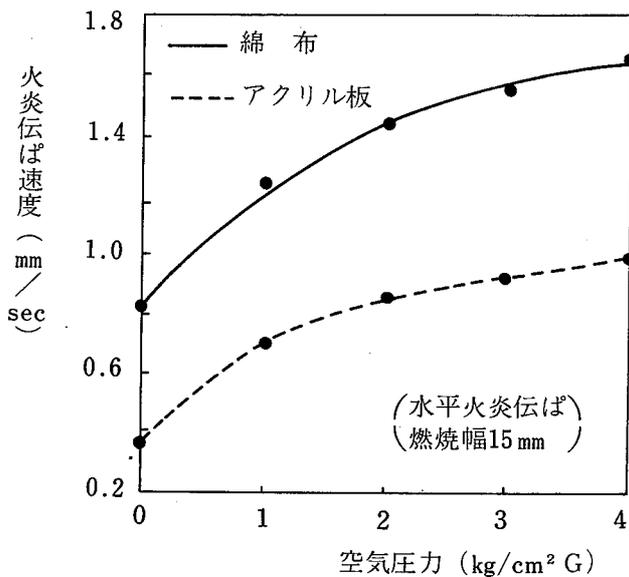


Fig. 3-11 Relationship between flame velocity and air pressure
火炎伝ば速度と空気圧力

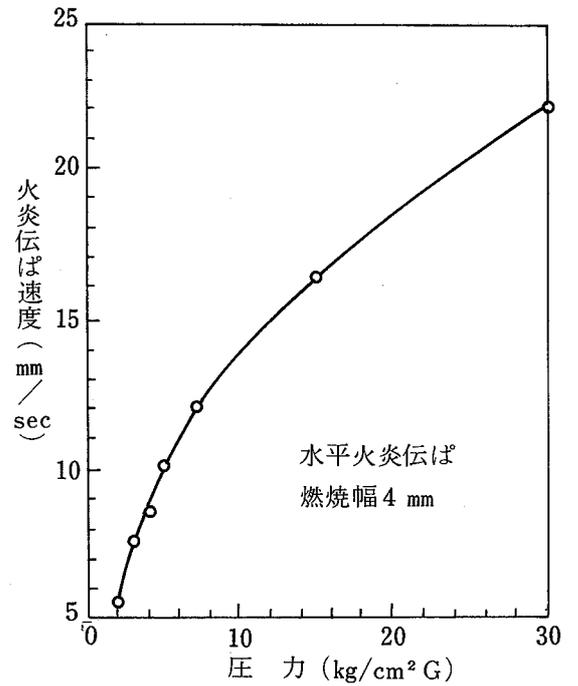


Fig. 3-12 Relationship between flame velocity and pressure of polyethylene
ポリエチレンの火炎伝ば速度と圧力

3.2.3 消炎距離

3.2.3.1 実験

火炎伝ば速度と同じようにFig.3-9の小形燃焼容器にはFig.3-13のホルダーを、Fig.3-8の大形燃焼容器にはFig.3-6のホルダー燃焼部を鋭角三角形に改造してそれぞれ用いた。

実験は試料をホルダーにはさみ、所定空気圧に加圧したのち鋭角三角形の底辺側に点火し、燃焼した距離から消炎距離を求めた。

試料は火炎伝ば速度と同じプラスチックと各種の布や和紙などを用いた。

3.2.3.2 結果

消炎距離に影響を与えるものとしては火炎伝ば速度と同じような項目が考えられるが、これらの基礎実験は文献⁹⁾にゆずり、ここでは加圧空気での結果のみを取上げる。

ポリエチレンと和紙を大、小のホルダーで実験した結果をFig.3-14に示したが、火炎伝ば速度と同じように消炎距離を半減させるに必要な空気圧力は約4kg/

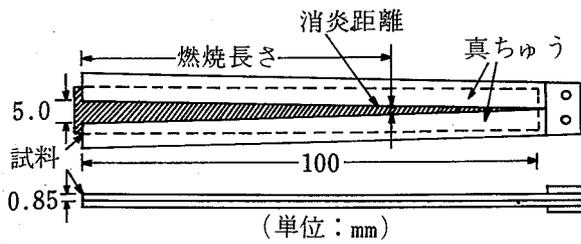


Fig. 3-13 Holder for measuring quenching distance
固体の消炎距離測定用ホルダー

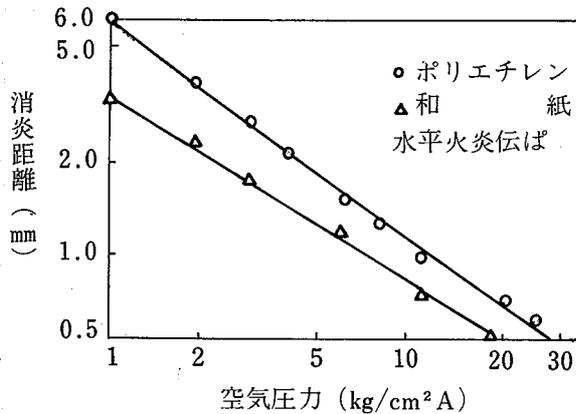


Fig. 3-14 Relationship between quenching distance and air pressure
消炎距離と空気圧力

cm²であった。またポリエチレンについてはFig.3-12の火炎伝ば速度Vと消炎距離Qの関係をまとめてみたが、Fig.3-15のように $V=1/Q$ が成立つことが示された。この関係は可燃性ガスではよく知られた事実であるが、固体物質についても今回の実験結果から、この関係が成立つものと考えられる。

この他表3-3の繊維状試料について大形ホルダーで実験を行なった結果をTable 3-5に示したが、大気圧空気中では燃えない防火布も2kg/cm²では無炎燃焼することや、耐熱布では10kg/cm²でも発炎しないことが確認された。このような難燃性布の性能試験に、この方法は有効なものと考えられる。

3. 考察

以上の実験から数kg/cm²までの高圧下での可燃物の燃焼危険性が次のようにならかなり明確化された。

- 圧力の増加による大幅な発火温度の低下は認め

Table 3-5 Quenching distance of fabric materials

繊維状試料の消炎距離

名 称	空気圧力 (kg/cm ²)	消炎距離 (mm)
綿100%	0	8.6
綿35, ポリエステル65%	0	8.4
綿45, ビニロン55%	0	7.5
防火綿	2	11.4*
耐熱布(芳香族ポリアミド系)	10	不燃

*無炎燃焼

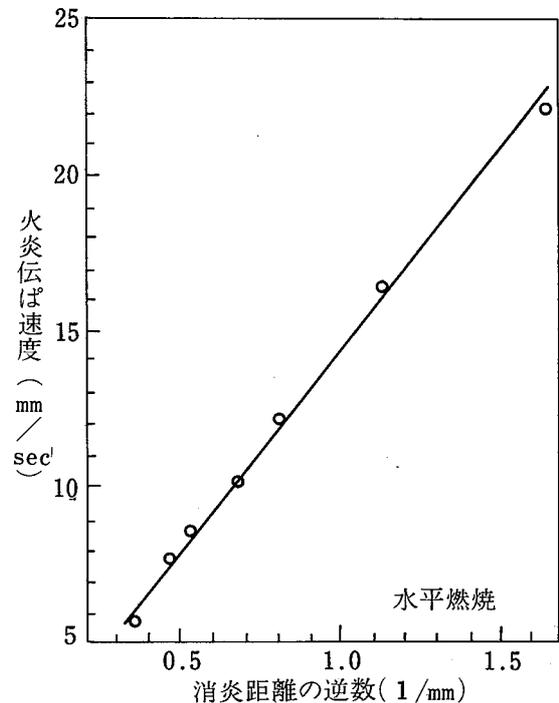


Fig. 3-15 Relationship between quenching distance and flame velocity of polyethylene

ポリエチレンの火炎伝ば速度と消炎距離の関係

られない。

- 火炎伝ば速度、消炎距離とも2倍の危険性を示すに必要な圧力は3~4kg/cm²である。この程度では布の吸湿率、プラスチックの厚さなどの変化を考慮すると、危険性がいちじるしく増大したとは表現できない。
- 燃焼危険性の評価は発火温度、火炎伝ば速度、消炎距離などを総合して行うべきであろうが、潜函工事の最高圧を考慮すると、大気圧と比較

した数値を与えることは困難と思われる。

したがって潜函工事現場内の火災予防については通常のタンク内作業より、やや強化した可燃物の持込み制限、消火設備などの設置を確実に実施すればよいものと考えられる。

文 献

- 1) 本田 訳 "19世紀の発明家たち" シグマ (1978)
- 2) NFPA No.53M "Fire Hazards in Oxygen Enriched Atmospheres" (1969)
- 3) 駒宮 "過剰酸素中の燃焼危険性と安全対策" 産業安全研究所安全資料 RIIS-SD-72-1 (1973)
- 4) 橋口, 小河原, 浦野, 岩阪 "高压空気系の潤滑油による爆発危険性について" 高压ガス, 9, No. 4(1972)
- 5) 駒宮, 森崎, 琴寄 "高压可燃性ガス中における発火温度の測定—ポリ四ふっ化エチレン—" 安全工学, 13, No.3(1974)
- 6) W. A. Strauss, R. Edse "Burning velocity measurements by the constant-pressure bomb method" Seventh International Symposium on Combustion, p383 (1958)
- 7) J. M. Kuchta, E. L. Litchfield and A. L. Furno "Flammability of materials in hyperbaric atmospheres" FR, No.4016, Bureau of Mines (1967)
- 8) 駒宮 "布の燃焼性" 火災, 12 (1962)
- 9) 駒宮 "固体の消炎距離" 産業安全研究所報告 RIIS-RR-20-1 (1971)

付 録

加圧空気中の火災事例

年月日	死	傷	場 所	概 要
34. 3. 24	1		閘門潜函	地下31mに潜函を沈下させたので、地上に出ようとタラップを登っていたが衣服が発火し、地下20mの地点から墜落した。(圧力2.95kg/cm ²)
45. 2. 8	1		再圧タンク	タンク内で投光器のため毛布と布団が発火し、内部の技術者は死亡した。
46. 2. 16		5	シールド工事トンネル	1.1kg/cm ² で加圧されていたトンネル内でシールドのオイルモータ付近の電気溶接を行なったところ油が発火した。
46. 12. 21	3	3	シールド工事トンネル	0.4kg/cm ² に加圧した地下30mのシールド台車上でガス切断を行なったところ、火災となりタービン油に延焼した。
48. 12. 8			シールド工事下水管	地下6~10mのシールド台車上のキャブタイヤコード付近から発火し、コード、分電盤、ベルトコンベアを焼いた。
49. 1. 8			シールド工事水道管	地下25mのシールド付近でガス溶接中アセチレンボンベが発火した。
49. 12. 19		3	シールド工事下水管	地下9mのシールド付近でガス切断中アセチレンホースが燃えた。
52. 1. 17			シールド工事水道管	地下18mのシールド付近でガス溶接中アセチレンボンベが発火した。