

Research Report of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-77, 1987.
UDC 622.61 ; 534.222 ; 614.83 ; 546.21

酸素ホースの爆発事故原因について*

松井英憲**, 駒宮功額***

On the Cause of Accidental Explosion of Oxygen Hoses

by Hidenori MATSUI and Kougaku KOMAMIYA

Abstract ; Many accidental explosions of oxygen conveying rubber hoses for gas welding or steel manufacturing industries have occurred in Japan and other countries. A typical case shows rupture of a hose in many places due to a detonation. The cause of the explosion may be that a fuel, such as acetylene reversely flows into oxygen hose and forms a fuel~oxygen mixture, then it will be detonated. However, as oxygen pressure used in a workshop is usually much higher than that of the fuel gas, the reverse flow of fuel is hardly realized. In order to make clear the real cause of these accidental explosions and to establish the preventive measures of the accidents, three kinds of experiment, reproducing the explosion phenomena, have been carried out.

In the first experiment, based on the assumption of the possibility of reverse flow of a fuel into oxygen, the propagation of gaseous detonations of acetylene~oxygen mixture in rubber hoses and the effects on rubber hoses were investigated. As a result, it was proved that the oxygen rubber hose was hardly ruptured by oxy~acetylene detonation at usual oxygen pressure unless the hose had been degraded. In an excess concentration of oxygen, the inner surface of the rubber hose was ignited by propagation of gaseous detonation and large amounts of soot, hydrogen and carbonmonoxide were produced by the succeeding diffusion combustion of the rubber. These combustibles were re-detonated by another ignition.

In the second experiment, soot film detonation in oxygen was investigated to confirm the secondary explosion of the soot produced by diffusion combustion of the hose rubber. The inner surface of the test tube was coated with thin layer of soot which was formed by the decomposition of acetylene induced by shock wave. The soot film detonation was directly initiated by an oxy-acetylene gaseous detonation. The wave velocity in a transparent vinyl resin hose was determined from self luminous streak photographs with a rotatory drum camera, and the wave velocity determined from ion current detection with ion gaps in steel pipe. The wave pressure was also determined with piezo electric pressure transducer. Almost steady soot film detonations were observed with the wave velocities of 1,500~2,000 m/sec. The peak pressures of the wave were about 56 times the initial pressure of oxygen. Therefore, the soot could be one of the fuel materials for the accidental explosion of oxygen conveying rubber hoses.

In the third experiment, DTA (Differential Thermal Analysis) was performed with the fats

* 昭和59年12月, 第17回安全工学研究発表会において一部発表

** 化学研究部 Chemical Safety Research Division

*** 安全技術課 Safety Technology Section (Tokyo Ind. Safety Exhibition Center)

which was initially adhered to the inner surface of a rubber hose in the manufacturing process. This experiment was pre-examining to see the possibility of solid fat film detonation in a hose. Exothermic starting temperature, ignition temperature and wt. % of burned residue of the fats were determined from DTA. Next, fat film detonation in oxygen conveying rubber hose was investigated. Attempts to detonate in smaller hose of 6.5 mm i. d. were not successful, but in larger hoses of 25 mm i. d., the fat film detonation with steady wave velocity was achieved in the range above the oxygen pressure of 1.5 atm. However as a quantity of the fat in the hoses is too small, it may be suggested that the rubber itself could be a fuel material. The wave velocities in these experiments were 1,350~1,450 m/sec, and the peak pressures were 31~32 times the oxygen pressure.

From the above experimental results, we may conclude the following on the cause of accidental explosion of oxygen conveying rubber hoses: Rubber is essentially combustible material and is easily ignited in oxygen by various ignition sources, such as static electricity spark, friction spark of particles, heat of adiabatic compression of oxygen and flash back at the torch, etc. Once ignition of inner surface of the rubber hose has occurred, proceeding diffusion combustion of rubber produces other combustibles, such as soot (carbon), hydrogen and carbonmonoxide, etc. These combustibles are dispersed into oxygen flow through the hose and form detonable mixture. This mixture will be re-ignited by the first diffusion combustion or flash back at the torch. The flame in soot, combustible gases~oxygen mixture will easily develop into two phase detonation, sometime including fat film detonation, with higher wave pressure and longer reaction zone compared with homogeneous gaseous detonations. For preventive measures, removal of the ignition sources, regular examination and cleaning of hoses are important.

Keywords ; Oxygen, Gas welding, Rubber, Combustion products, Detonation.

1. 諸言

ガス溶接や切断の作業中に、酸素ホースが突然爆発する事故が作業現場で生じている¹⁻²⁾。外国においても、アセチレンホースより酸素ホースの爆発事故の方がひんぱんに発生しているとの報告が見られる³⁾。ガス溶接・切断作業に限らず、ゴムホースを用いて酸素を取り扱う作業中にホースの爆発が生じた事故例も幾つか報告されている⁴⁻⁵⁾。これらの事故原因について、駒宮は、可燃物の発火に引き続いて生成するすす粉じんによる爆発説を提唱している⁶⁾。

本研究は、すす粉じん爆発説の検証をも含めて、これらの事故がどのような原因で、どのような過程を経て起きるのかを更に詳しく究明することにより、この種の事故防止対策を確立することを目的としている。

ここでは、このような事故の典型的な例の幾つかを示し、事故発生時の爆発現象に結び付くと考えられる三つの異なるタイプの事故再現実験を行った結果について報告する。

2. 酸素ホースの爆発事故例

2.1 ガス溶接用酸素ホースの爆発

(1) 造船所において、改造中の船内でガス溶接作業を行うため、甲板上から酸素及びアセチレン用ホースを約 10 m 下の岸壁に降ろし、それぞれのガス本管(酸素圧: 4 kg/cm²(以下圧力はいずれもゲージ圧)、アセチレン圧: 0.4 kg/cm²) に接続した。岸壁側の作業者が本管の酸素コックを開けたところ、約 30 秒後に内径 25 mm, 肉厚 6 mm の酸素ホースが、長さ 45 m にわたって、多数箇所ではほとんど同時に爆発し、火炎が吹き出した。この火炎で近くに居た一名が火傷を負った。このホースの破損状況を Photo. 1 に示す。

(2) 配管等の加工工場において、溶解アセチレンと酸素ポンペを用いて、加工中の鋼管の溶接部をガウジングしようとしていた。吹管の酸素とアセチレンのコックを開け、吹管に火を付けたが酸素が出ていないようなので、ポンペの所へ戻って圧力調節器を調べたと

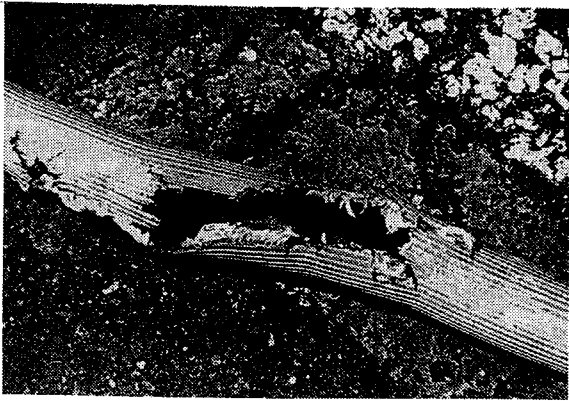


Photo. 1 Accidentally exploded oxygen conveying rubber hose.

爆発した酸素ホースの破損状況

ころ、酸素ホースのカプラが外れていた。外れていたカプラを差し込んだところ、内径 6 mm の酸素ホースの全長 38 m にわたって、数 10 cm 間隔で合計 84 箇所が大音響を発生して破裂した。このため作業者は両耳の鼓膜を損傷した。なお、このときの酸素の使用圧力は 6 kg/cm^2 、アセチレンの使用圧力は 0.6 kg/cm^2 であった。

以下、(3)~(5)の事例は、自動車製造工場における通常のアセチレン溶接作業での事故である。

(3) 溶接作業を始めるため、吹管に点火したが消えそうになったため、吹管のコックを閉めようとしたところ、酸素ホースが吹管より約 9 m の所を中心に 5 箇所爆発破損した。

(4) 溶接作業中、酸素ホースが突然大音響とともに爆発した。アセチレンホースは異常なく、酸素ホースの中央部が数箇所破裂し、燃えた跡が認められた。吹管取付部近くのホース内面にはすすが付着していた。

(5) 溶接作業が終わったので、アセチレンと酸素の供給を止めたところ、酸素ホースが爆発した。酸素ホースは吹管より 1 m の箇所爆発し、そこから吹管まですすが付着していた。

2.2 電気炉の酸素吹精用ランスホースの爆発

鑄造工場において、電気炉で溶解したスクラップの不純物を酸素と化合させ、溶湯の表面に浮かせて分離、除去するため、溶湯の中へ酸素を吹き込む酸素吹精作業を行おうとしていた。電気炉に通電し、炉内のスクラップが溶けたところで、酸素吹精を行うため、作業員がホースを持ってカラ吹きをした。しかし酸素の出方が悪かったので、何か詰まっているものと思い、

ホースの元バルブを閉め、ホースの口金部分を鉄台の上で 4~5 回たたいた後、元バルブを開けたところ、口金から黒い煙が出た直後にホース内で爆発が起きた。ホースは口金から 1 m と 5 m の 2 箇所破裂し、跳ねたホースに当たって 3 名が負傷した。なお、ランス用ホースは、長さ 18 m、内径 19 mm、肉厚 6.5 mm、0.5 mm 径のワイヤ入りで、耐圧強度は 52.5 kg/cm^2 とされている。使用酸素圧は 13 kg/cm^2 であった。

3. 酸素ホースで生ずる気体爆ごう波の実験

ガス溶接用酸素ホースの典型的な爆発事故では、溶接・切断作業中に、酸素ホースが全長にわたって、数 10 cm 間隔の多点で同時に火を噴いて大音響を発生して破裂する現象が見られる。このような現象は、ホース内で超音速の火炎伝ば、即ち爆ごう（デトネーション）が生じたことを示唆している。このような現象がどのような原因で生ずるのかを明らかにするため、まず現象の再現実験を試みることにした。

一般的に考えられることは、燃料ガスのアセチレン等が、何らかの原因で酸素ホース内へ逆流し、酸素ホース内にアセチレン~酸素混合ガスが形成され、これに着火して爆発が生じたとするものである。通常溶接断作業では、酸素の使用圧力は $4\sim6 \text{ kg/cm}^2$ で、アセチレンの使用圧力 0.5 kg/cm^2 以下に較べると格段に高いので、このような状況は実現困難と思われるが、事故は通常作業条件とは異なる状態のときに生ずることが多いので、ここではあえて、アセチレンが酸素ホースへ逆流した場合を想定して実験を行ってみた。

3.1 実験方法

実験は、長さ 4~5 m の市販の各種ゴムホースの一端に、点火装置及びガス導入バルブを取り付け、ホース内の空気を真空ポンプで一旦排気した後に、ホース内へアセチレン~酸素混合ガスを圧入し、ニクロム線ヒーターで着火した。一部の実験では、ホース内を伝ばする気体爆ごう波の伝ば速度を、ホースに縫針を突き刺してイオンギャップとし、火炎面の通過を検知する

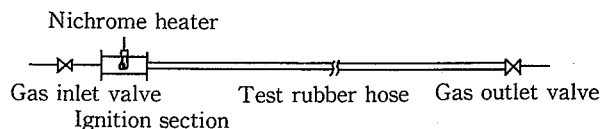


Fig. 1 Schematic figure of the apparatus for gaseous detonation.

気体爆ごう波の実験装置の概略

Table 1 Effects of gaseous detonation on rubber hoses
気体爆ごう波のゴムホースへの影響

Expt. No.	Rubber hose	Specification of hoses			Gaseous detonation			Damage of hoses
		Inner dia. (mm)	Outer dia. (mm)	Rupture pressure* (kg/cm ² G)	Mixture C ₂ H ₂ vol.% in O ₂	Initial pressure (kg/cm ² G)	Velocity measured (m/sec)	
1	Hose for oxygen	6.5	15	75	35	3.0	2,702	No damage
2	Hose for oxygen	6.5	15	75	35	4.5	2,702	No damage
3	Hose for oxygen	6.5	15	75	10	5.0	1,933	No damage
4	Hose for acetylene	9.5	16.5	24	35	2.0	2,681	Ruptured at the hose end
5	Hose for acetylene	9.5	16.5	24	35	2.5	2,693	Ruptured at the ignition & hose ends
6	Hose for acetylene	9.5	16.5	24	35	3.0	2,705	Multiply ruptured at 18 spots
7	Hose for acetylene	9.5	16.5	24	35	4.5	2,705	Wholly destroyed
8	Vinyl resin hose	10	15	8	10	1.0	1,860	No damage
9	Vinyl resin hose	10	15	8	10	2.0	1,860	Ruptured at the hose end

* Rupture pressure was determined by hydraulic pressure test.

ことにより測定した。実験装置の概略を Fig. 1 に、実験結果を Table 1 に示す。

3.2 実験結果

これらの実験では、酸素過剰（例えば酸素中アセチレン濃度10%）の場合、気体爆ごう波伝ば終了後、ホース端部でホース内面ゴムの発火が生じ、ホース内面の燃焼がしばらく継続し、ホース表面が熱くなるのが観測された。消炎後ホース内面には多量のすすが付着していた。また、このときの (Table 1 の Expt. No. 3) 燃焼生成ガス（跡ガス）をガスクロマトグラフで分析した結果を Table 2 に示す。この表から、すす（カーボン）のほかに水素や一酸化炭素などの可燃成分がかなり生成していることがわかる。これらの後ガスに再度点火すると、再び爆ごう波の伝ばが観測された。

これらの結果から次の事が推定される。

(1) 酸素ホースは、ガス溶接断時の通常の酸素の使

用圧力のアセチレン～酸素混合ガスの爆ごう波の伝ばによって、容易には破損しない。Table 1, Expt. No. 2 では、爆ごう波面圧力は、計算では 215 kg/cm² にもなるが、実際には管径が細いためエネルギー損失が大きく、衝撃圧の持続時間も数ミリ秒と極めて短いため、ゴムホースの弾性によってエネルギーが吸収され、破損に致らないものと考えられる。従って、ホースが劣化して弾性が弱まっている（硬くなっている）場合には、ホースが破損することがありうる。

(2) 酸素ホースより強度の小さいアセチレンホースでは、内部の気体爆ごう波の伝ばによってホースは容易に破損する。例えば、Table 1, Expt. No. 6 では同時多点でのホースの破裂が観測され (photo. 2), このような現象は、典型的な酸素ホースの爆発事故の現象に類似している。従って、酸素ホースの爆発事故は、

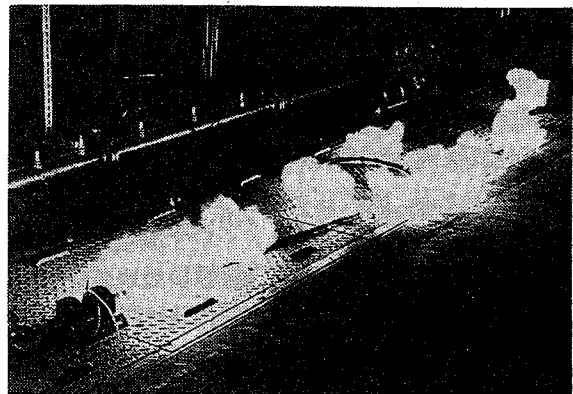


Photo. 2 Experimentally reproduced multiple explosion of rubber hose.

ゴムホースの爆発再現実験

Table 2 Gaseous products after the hose rubber ignited by gaseous detonation.
気体爆ごうによるゴムの発火、燃焼生成ガス成分の例

Gaseous products	Vol. %
Hydrogen	12.8
Oxygen	30.4
Nitrogen	0.5
Methane	1.3
Carbon monoxide	31.6
Carbon dioxide	23.5

(Case of Expt. No. 3 on Table 1)

気体爆ごうの場合より更に高い衝撃圧の発生、もしくは圧力持続時間の長い爆ごう現象が酸素ホース内で生じた可能性がある。即ち、気体以外の可燃物、例えばすすや油膜などが関与していることが推定される。

(3) 酸素過剰雰囲気下ではホース内の気体爆ごう波の伝ば後に、主としてホース端部で、ホース内面ゴムの発火が生じ、その際多量のすすや水素、一酸化炭素などの可燃物を生成することから、実際の作業現場では、一旦ホース内面で発火が生ずると、継続的な酸素の供給により、これらの可燃物が酸素ホース内に多量に生成することが推定され、これらが二次的に爆ごうすることによってホースの破損が生じた可能性が強い。

4. ホース内面に付着したすす膜爆ごう波の実験

筆者らはこれまでに、可燃性の液体又は固体が酸素中で発火すると、多量のすすや水素、一酸化炭素を発生しつつ燃焼したり、条件によってはそれらの不完全燃焼生成物が二次的に爆発しうることを確認している⁷⁾。

ここでは、アセチレンが分解するとすすが生成することを利用し、人為的にすすを管壁に膜状に付着させ、これが支燃性ガス中で爆ごうするか否かを実験的に確かめてみた。

4.1 実験方法

実験装置は、火炎速度を連続的に測定するため、全長 5 m、内径 10 mm、肉厚 2.5 mm の透明塩化ビニルホースを用いて、回転ドラムカメラによる自発光流し写真撮影を行った。Fig. 2 に示すように、ビニルホースを垂直パネル上に S 字型に固定し、長さ 1.2 m の直線部分が 30 cm 間隔で 3 段同時にカメラの視野に入るように設定した。この場合、起爆のための駆動部には、長さ 1 m、内径 9.2 mm の 1/4 B 管 (ガス管) を用いた。

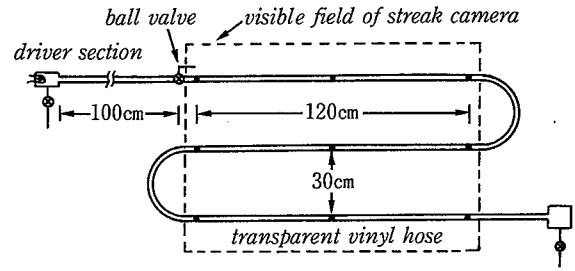


Fig. 2 Experimental arrangement of transparent vinyl hose (10 mm in dia.) for rotary drum camera.
流し写真撮影に用いた透明ビニルホースの配置

駆動部とビニルホースの間には、ボールバルブを取り付け、駆動ガスにはアセチレン～酸素等モル混合ガスを用いた。

実験方法は、管路をあらかじめ真空ポンプで排気した後、ボールバルブを閉じ、駆動部には駆動ガスを、ビニルホースにはアセチレンのみを、夫々同じ所定の圧力まで導入する。点火直前にボールバルブを開にして、点火端においてニクロム線ヒータで駆動部の混合ガスに点火する。駆動部では、直ちにアセチレン～酸素等モル混合ガスの爆ごう波が生じ、これが透明ビニルホース内のアセチレン中へ入射する。この入射衝撃波によってビニルホース内のアセチレンは、 $C_2H_2 \rightarrow 2C + H_2$ の分解反応を起こし、カーボン(すす)と水素ガスが生成する。ここで、ホース内の水素を真空ポンプで排気すると、ホース内壁にすすが付着した状態となる。

そこで、ビニルホース内へ酸素を、駆動部には再びアセチレン～酸素等モル混合ガスを所定の圧力まで導入し、ボールバルブを開にして駆動ガスに点火すると、爆ごう衝撃波がすすの付着したビニルホース内の酸素中へ入射する。回転ドラムカメラによる流し写真の撮

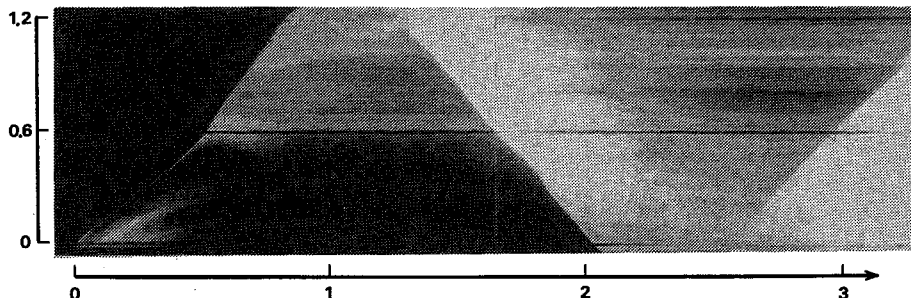


Photo. 3 A self luminous streak photograph of soot film detonation.
(x-coordinate : time in msec, y-coordinate : distance in m, oxygen pressure $P_0 = 1$ atm,
 $\phi \approx 1.4$)
すす膜爆ごう波の自発光流し写真の例

影は暗室下で行う。

4.2 実験結果

この方法によって得られた流し写真の観測例を Photo. 3 に示す。写真の横方向は時間の経過を、縦方向は距離を表しており、輝部先端（火炎面）の軌跡の傾きから、火炎速度を知ることができる。この写真から、ビニルホース内では、酸素圧大気圧で、波面速度 1,500~2,000 m/sec のほぼ定常な爆ごう波が伝ばしうることがわかる。この場合、ホース終端部の破裂が見られた。このような不均質系の爆ごう波では、均質系の気体爆ごう波に較べて反応帯域が長いため、発光時間が長くなっており、炭素の発光のため輝度が高く強い発光が見られる。

同様の起爆方法により、長さ 4 m, 1/4 B (内径 9.2 mm) の直管内を伝ばするすす膜爆ごう波の、酸素圧(減圧下)に対する伝ば速度の測定結果を Fig. 3 に、波面最高圧力の測定結果を Fig. 4 に示す。波面速度はイオ

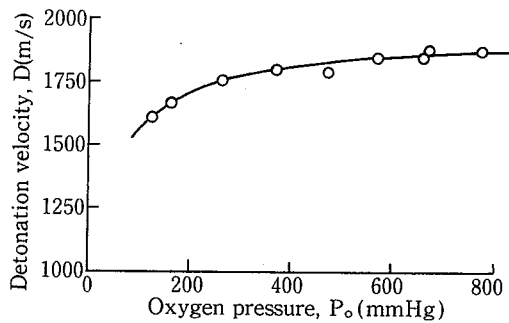


Fig. 3 Wave velocity of soot film detonation with oxygen pressure in 1/4 B tube. ($\phi \geq 1.4$)
すす膜爆ごう波の波面伝ば速度

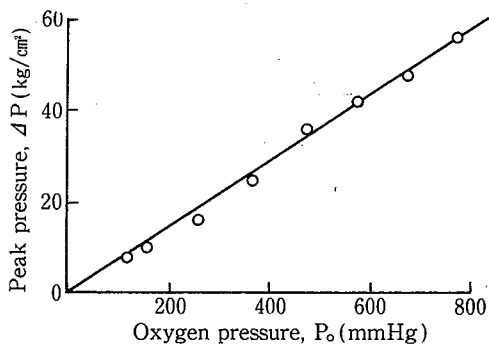


Fig. 4 Peak pressure of soot film detonation wave with oxygen pressure in 1/4 B tube. ($\phi \geq 1.4$)
すす膜爆ごう波の波面最高圧力

ンギャップを用いて、波面圧力はピエゾ圧力変換器を用いて、いずれも管終端部近くで測定したものである。実験時のすす濃度は、いずれも燃料過剰域（化学当量比 $\phi \geq 1.4$ ）で、この領域では同じ酸素圧に対して速度はすす濃度に依らずほぼ一定となる。

これらの実験結果から、すすは同じ炭素を主成分とする工業製品のコークス粉やグラファイト粉などと較べて極めて粒径が小さい（10~20 nm）ため、反応性が高く、膜状に管壁に付着した状態でも、支燃性ガス中で容易に爆ごう波を生ずることがわかる。また、その伝ば速度は大気圧の酸素中で約 1,850/sec, 波面圧力のピーク値は酸素圧の約 56 倍となり、衝撃圧持続時間も長く、気体爆ごう波に較べて破壊効果が大きいことが推定される。

これらの結果から、酸素ホースの爆発事故の原因の一つとして、酸素ホースの内面ゴムの燃焼で生じたすすが酸素気流中ですす粉じん爆ごうを起すことが考えられる。

5. 酸素ホースで生ずる油膜爆ごう波の実験

酸素ホースの爆発事故原因として、更にゴムホースの材料への添加物、又はホースの製造工程において内面に付着したと考えられるステアリン酸、パラフィン類、鉱油などの油脂類による固体可燃物の油膜爆ごう

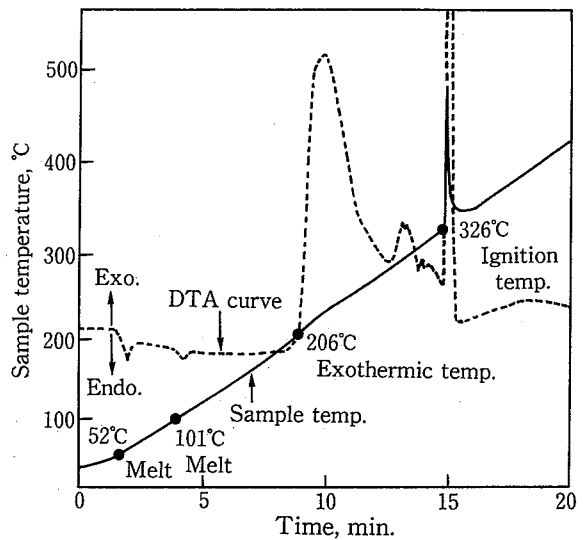


Fig. 5 A chart of differential thermal analysis of the substance adhered on inner surface of a oxygen hose in the case of analysis No. 2 on Table 3.

酸素用ゴムホース (25 mm ϕ) 内面付着物の示差熱分析例

波が伝ばした可能性が考えられる。そこで、この現象の可否を実験的に確かめてみた。

5.1 可燃物の熱分析

各種酸素用のゴムホースの内面に付着しているろう状の固形物をこそぎ取り、高圧示差熱分析装置を用いて熱分析を行った。一回の分析に用いる試料量は数 mg で、これをアルミニウム製の直径 5 mm の容器に入れ、一定速度で加熱昇温した。雰囲気は 10 kg/cm² の酸素中とし、昇温速度は 20°C/分一定とした。この熱分析で、試料の発熱開始温度、発火温度、燃焼残査量等を測定した。

5.2 ホース内面可燃物の熱分析結果

内径 25 mm の酸素用ゴムホースの内面付着物の示差熱分析によって得られたチャートの一例を Fig. 5 に示す。図中破線は示差熱曲線を、実線は試料温度曲線を示す。示差熱曲線における下側への出力は吸熱を、上側への出力は発熱の程度を示している。示差熱曲線の最初の二つの小さな吸熱のピークは、試料の融点を示しており、夫々 52°C 及び 101°C である。従って、試料は低融点を有する 2 種類以上の混合物であることがわかる。206°C で最初の大きな発熱ピークが見られるが、ここでは発火にまでは至らず、326°C において、急激な発熱と試料温度変化が表われ、この温度で発火が生じていることがわかる。各種ゴムホースの内面付着物の熱分析の結果を Table 3 に示す。

Table 3 の No. 1~4 のデータは、同一試料で、試料

量を変えた場合の結果を示し、No. 5~8 は、ホースの種類を変えた場合の適当な試料量における熱分析の結果を示している。No. 1~4 の結果から、試料量が少ない場合には、発熱開始温度に相当する温度で発火するが、限界量より少ないと発火しなくなることがわかる。この場合、昇温速度を更に遅くすると、試料量が多くても発熱開始温度で発火することが予測されるので、この場合の発熱開始温度は実際上の発火温度とみなすべきと考えられる。また、内径 25 mm の酸素ホースでは、燃焼後の残査量が、初期重量の 50% 以上を占めているが、これは無機の添加物等（炭酸カルシウム、酸化亜鉛、酸化鉄など）と思われる。

ホース内面の付着物の量は、内径 25 mm のホースでは 500~600 mg/m であるが、内径 6.8 mm の酸素ホースでは数 mg/m の微量であった。

ホース内面ゴムの熱分析も併せて行った結果、切片状の固形試料では、いずれも発熱開始温度が約 200°C、発火温度が約 400°C で、ホースの種類による差はほとんど無かった。しかしながら、試料を粉末状にして熱分析を行うと、切片状試料での発熱開始温度に相当する約 200°C で発火が生じた。燃焼残査量は、いずれも初期重量の 30% 以下であった。

5.3 油膜爆ごう波の実験

実験装置の概略を Fig. 6 に示す。全長 4~5 m、内径 6.8 mm 及び 25 mm の酸素用ゴムホース（一部の試験では、内径 25 mm の空気用ゴムホースも使用）に、夫々呼び 1/4"（内径 9.1 mm）及び 1"（内径 28 mm）で、

Table 3 Results of differential thermal analysis of the substance adhered on inner surface of oxygen rubber hoses.
酸素用ゴムホース内面付着物の示差熱分析結果

Analysis No.	Type of hose			Differential thermal analysis			
	Manufacturer	History	Inner dia. (mm)	Sample weight (mg)	Exotherm. starting temp.(°C)	Ignition temp. (°C)	Final residue (wt %)
1	A	Used	25	5.17	207	310	53
2	A	Used	25	3.98	206	326	54
3	A	Used	25	3.07	Not	212	55
4	A	Used	25	1.95	207	Not ig.	57
5	A	New	25	6.64	Not	227	65
6	B	(For air)	25	2.56	Not	224	16
7	B	New	6.8	1.88	Not	227	9
8	A	New	6.8	0.66	211	Not ig.	12

(Atmosphere : O₂ 10 kg/cm² G, temperature rise rate : 20 °C/min., sample contained in aluminum cup.)

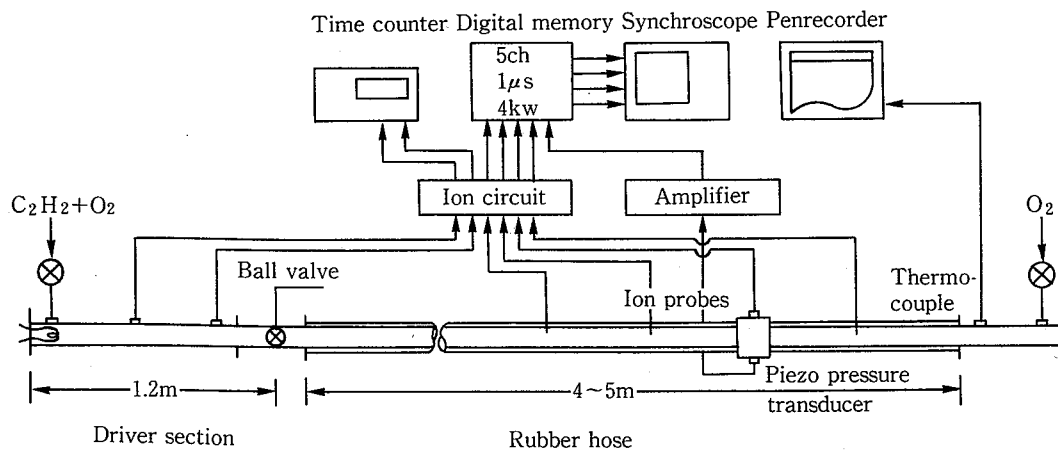


Fig. 6 Schematic diagram of the apparatus and diagnostics for fat film detonation.
 固体油膜爆ごう波の実験装置の概略

長さ 1.2 m のステンレス鋼管の駆動部を、ボールバルブ、ホース継手を介して接続し、駆動部にアセチレン～酸素等モル混合ガスを、酸素ホースに酸素を夫々所定の同じ圧力に導入し、ボールバルブを開にした後に、鋼管の管端でニクロム線ヒータを用いて駆動混合ガスに点火した。駆動部で生じた気体爆ごう波を酸素ホースへ打ち込み、酸素ホース中で火炎の伝ばが生ずるか否かを観測した。火炎速度の測定には、虫ピン 2 本をホース壁に刺し通し、ホース内面近くでイオンギャップを形成した。これらを 50 cm 間隔で 4~5 ケ所に取り付けた。また、ホース内の波面圧力を測定するため、ホース外周に長さ 10 cm の金属リングを取り付け、ピエゾ圧力変換器をこれに固定し、ゴムホース内壁面の圧力変化を測定した。

5.4 油膜爆ごう波の実験結果

内径 6.8 mm の小径の酸素ホースでは、酸素の圧力が大気圧から 3.0 kg/cm² までの範囲では、酸素ホース内に火炎の伝ばは認められなかった。これは、ホース内面の可燃性の付着物が微量であること、管路が細いため熱損失が大きいことによるものと考えられる。しかしながら、更に高い酸素圧力下での爆ごう波の伝ばの可能性については、本実験では確認できなかった。

内径 25 mm のホースでの実験では、A 社製、肉厚 7 mm、新品の酸素ホースにおいては、酸素圧 1.0 kg/cm² 以上でホース内に爆ごう波が生じた。また、同じ製品で、数年間使用した中古品、及び B 社製、内径 25 mm、肉厚 5 mm の空気用ホースにおいては、酸素圧 0.5 kg/cm² 以上でホース内に同じく爆ごう波が生じた。Fig. 7 に爆ごう波が生じた場合のイオン電流及びピエゾ圧力計の出力波形の例を示す。イオン電流の出力は、火炎面の到達を示しており、圧力計の出力は、衝撃波及び波面背後の圧力挙動を示している。3 番目のイオンギャップと同じ位置に対向して圧力素子を取り付けられており、火炎面と衝撃波面がほぼ合体していることがわかる。50 cm の間隔で取り付けられたイオン電流の出力が、ほぼ等時間間隔で出力していることから、波面速度がほぼ定常であることもわかる。

Table 4 に内径 25 mm の各種ゴムホース内で生じた爆ごう波の伝ば速度及び波面圧力の最高値を示す。爆ごう波面の伝ば速度は、いずれも約 1,400 m/sec、波面圧力の最高値は酸素の初圧の約 30 倍であった。酸素圧 1.0 kg/cm² では中古の酸素ホース及び新品の空気ホースは、生じた爆ごう波の反射衝撃圧によって、管路終

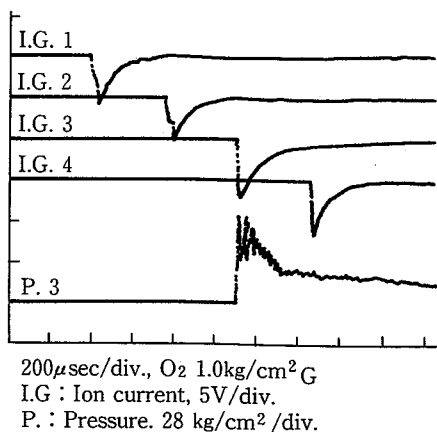


Fig. 7 Wave pressure and ion currents in fat film detonation.
 油膜爆ごう波におけるピエゾ圧力計とイオン電流の出力波形

Table 4 Wave velocity and peak pressure of the film detonations in rubber hoses of 25 mm in diameter.

ゴムホース(25 mm φ)で生ずる油膜爆ごう波の伝ば特性

Expt. No.	Type of hose	Lenght of hose (m)	Hose shape	Pressure of O ₂ (kg/cm ² G)	Wave velocity (m/sec)	Peak pressure (Pe/Po)
1	New for O ₂	4.5	Straight	1.0	1,418	30.7
2	Used for O ₂	5.0	Bended	1.0	1,428	(Hose ruptured)
3	Used for O ₂	4.0	Straight	0.5	1,449	32.2
4	New for air	4.0	Straight	1.0	1,350	(Hose ruptured)

端部が大音響を発生して破裂した。ちなみに各ホースの水圧による破裂圧力は、A社製の酸素ホースの新品では75 kg/cm²、中古品では60 kg/cm²、B社製の空気用ホースでは55 kg/cm²であった。

酸素ホースは、使用時には腕曲部を有するのが通常であるので、ホース後半部をJ字型に半径60 cmの曲率で腕曲させた部分での爆速も測定したが、Table 4のExpt. No. 2に示すように、直線状のホースの場合に較べて、爆速に差は認められなかった。

次に、現象がホース内面に付着した固体可燃物の油膜爆ごうであれば、一旦ホース内に爆ごうが生じて、可燃物が消費されたホースでは、再び爆ごう波は生じないはずである。Fig. 8は、A社製酸素ホースの中古品について、酸素圧1.0 kg/cm²で爆ごうが生じたときの爆ごう波面と、同じホースを用いて同一条件で再び起爆を試みた場合の、衝撃波の挙動を距離と時間の関係で示したものである。この図から、一回目の起爆では、終始ほぼ定常な爆ごう波がホース内を伝ばしており、

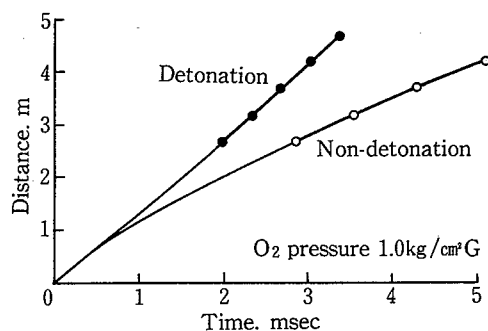


Fig. 8 Time-distance diagram for film detonation and non-detonation wave front in rubber hose.

酸素ホース(25 mmφ)中を伝ばする爆ごう波および非爆ごう波の距離—時間 記録

同じホースの2回目以降の起爆では、爆ごうはおこらず、駆動部からホース内へ入射した衝撃波(爆風)が減衰しつつホース内を伝ばしていることがわかる。

更に、爆ごう可能なホースの後半部に、一旦爆ごうを生じたホースを接続して起爆した場合には、最初のホース内では定常な爆ごう波が伝ばし、後半部では、ホース内面に可燃性の油膜が無いので、爆ごう波の減衰が生じ火炎は衝撃波と分離して、ついには消滅する。Fig. 9は、ホース壁面に対向して取り付けたいオンギャップとピエゾ圧力計の出力の記録例を示したものである。(a)は、内径25 mmの酸素ホースで生ずる典型的な固体油膜爆ごう波の場合の出力波形を示している。この場合、爆速は1,450 m/secで、イオンギャップの出力の立上りと衝撃波面がほとんど同時であり、火炎面と衝撃波面がほぼ合体していることがわかる。これは予想外の結果であり、ホース内面から無機物を半分以上含む*固体可燃物が、液体の油膜爆ごう波の場合と同様に、衝撃波によって剥離、霧化、蒸発、拡散という過程を経て、固体油膜の爆ごうを生ずるには反応帯(又は衝撃波の到達から可燃物の発火までの時間)が短かすぎるように思える。また、ホース内面に付着している油脂類の量は、これをステアリン酸と仮定して、酸素に対する化学当量比 ϕ を計算すると、酸素0.5 kg/cm²では $\phi=0.7$ 、1.0 kg/cm²では $\phi=0.5$ にしかない。従って、爆ごう衝撃波によってホース内面ゴムの一部が直接に酸素と反応して衝撃波の伝ばを支えていることも考えられる。圧力波形の初期には振動圧力が見られ、振動のピッチ p^{**} をホース内径 d で割った値 p/d が約2であることから、衝撃波面背後では、ホース内を半径方向に圧力波が反射を繰り返していることが推定される。

* 圧力振動の周期に爆ごう波面速度を乗じたもので、波面背後の圧力波が管内上下方向を1回往復する間に軸方向に進む距離を示している。

* 表2の燃焼残査量を参照

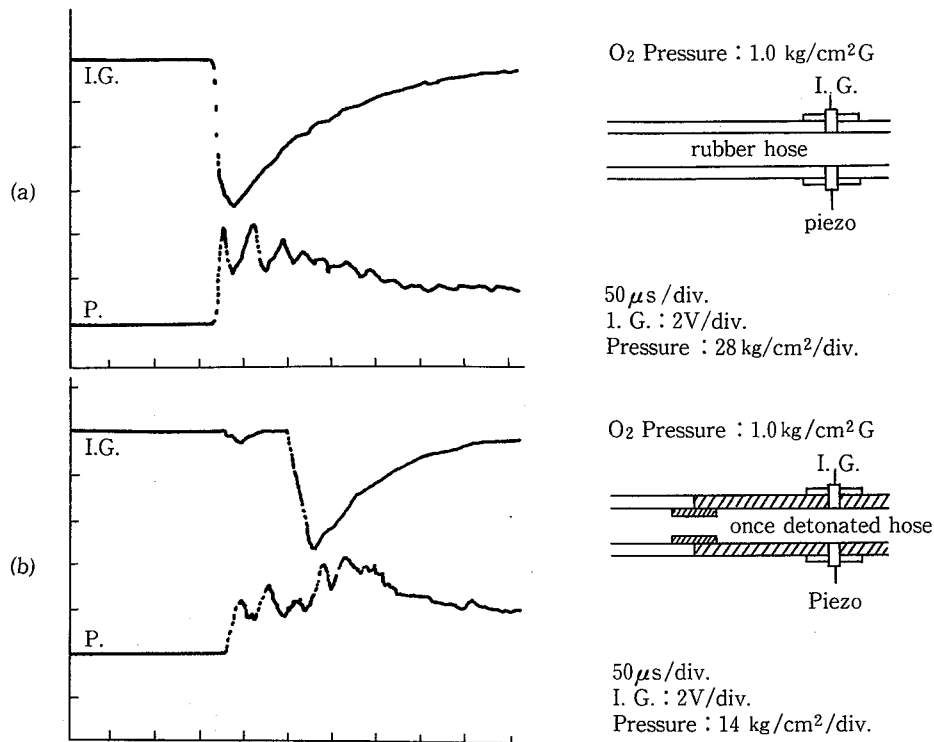


Fig. 9 Wave pressure and ion current for stable detonation (a), and attenuated detonation (b).
イオン電流とピエゾ圧力計の出力波形, (a): 定常, (b): 減衰状態

Fig. 9 (b)は、爆ごう可能なホースの下流側に、一旦爆ごうした経歴のホースを接続して、接続部から 25 cm 下流でのイオン電流とピエゾ圧力計の出力波形を示したものである。最初のホース内では Fig. 9 (a) に示した定常な爆ごう波が観測されるが、接続部直後では、このように、衝撃波と火炎面は分離 (約 10 cm) しており、先頭衝撃波の背後には、それよりピーク値の大きい二次衝撃波が見られるが、先頭衝撃波の圧力値は、定常な場合に較べてほぼ半減している。この場合、衝撃波は次第に減衰して爆ごう波は消滅してしまうものと考えられるが、その後火炎が加速して再び爆ごう波に復帰する現象が、一回だけであるが観測された。

このように、可燃性の固体油膜の存在は、酸素ホース内の爆ごう波の生起を促進することは間違いないが、ホース内面ゴムの一部も燃料として寄与している可能性がある。実験の安全のため、酸素の圧力は 1 kg/cm² までしか行わなかったが、更に高い酸素圧での実験を行えば、酸素ホースの内面ゴム自体が燃料となって伝ばする爆ごう波の存在を確認できるかもしれない。

6. 実験結果のまとめと結論

以上、酸素ホースで生ずる爆ごう波の可能性につい

て三種類の実験を行い、いずれの場合においても爆ごう波が伝ばしうることが確認された。

これらの実験結果から、前述の酸素ホースの爆発事故発生の過程及び防止対策まとめると次のようになる。

6.1 酸素ホースの爆発プロセス

まず第一段階として、静電気火花、吹管からの逆火、さびや切削くず (切子) などの粒子の摩擦火花、弁の急開によるガスの断熱圧縮熱、油脂類の自然発火などの着火源によって、酸素気流中で可燃物であるゴムホースの内表面の一部で発火が生ずる。発火に引続いてゴム表面は酸素気流中で拡散燃焼を起こす。このとき、ゴムの熱分解によって、ゴム表面からすすや水素、一酸化炭素などの可燃成分が生ずる。ゴム表面近くでは、これらの生成物に遮られて酸素の拡散が十分でないため、1,000°C 以下の温度では $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C (S)}$ などの反応により多量のすす (炭素) を生成する。生じたすすや水素、一酸化炭素などは未燃のまま酸素気流に乗ってホース内に拡散して行く。

次の段階では、このようにして生じた可燃物～酸素の混合物が爆発濃度範囲に入り、拡散燃焼部分での熱や、吹管からの逆火炎などが着火源となって、これら

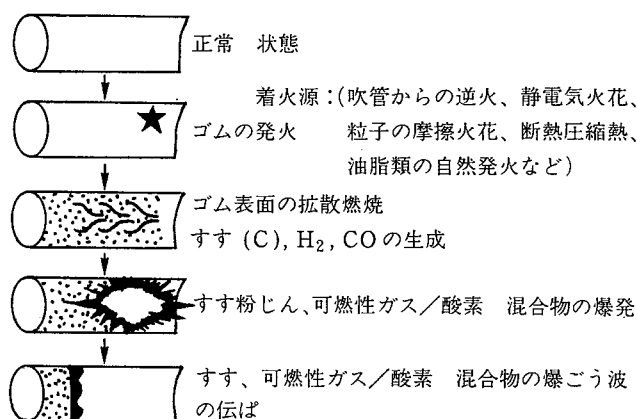


Fig. 10 The process of an accidental explosion of oxygen conveying rubber hoses.
酸素ホースの爆発プロセス

の可燃混合物中で火炎伝ばが生ずる。これは管路における酸素中での予混合火炎であるから直ちに爆ごうへ転移し、強い衝撃波を生ずる。ホース内全体にすすや水素、一酸化炭素などが充満していれば、加圧酸素中の爆ごう波の伝ばによって、ホース全体が一瞬に多点で破裂することになる。このような可燃性混合物がホース内全体に存在していなくても、ホース内の一部で爆ごうが生じ、一旦強い衝撃波が形成されると、ゴムホース材料の添加物、あるいはホースの製造工程や使用中にホース内面に付着したと考えられる。ステアリン酸、パラフィン類、鉱油などの油脂類による固体又は液体の油膜爆ごうが生ずる。また、酸素ホース内面ゴム自体が燃料となって伝ばする爆ごう波の可能性も考えられる。Fig. 10 にこのような酸素ホースの爆発過程をまとめて示す。

このような爆発過程は、着火源が酸素ホースの上流側に存在するときによく生ずるものと考えられるが、着火源が下流側にある場合、例えば吹管での逆火によって酸素ホースに着火したようなときには、酸素の流れに逆らって、ホース内面の拡散燃焼が上流側へ伝ばする。このときの熱によってホースが劣化し、酸素の圧力に耐えられなくなると、ホースの一部が火を吹いて破裂することがある。この場合、破裂箇所は一箇所に止まり、酸素の供給を止めない限り黒煙を伴った火炎が破裂孔から吹き出し続ける。このような爆発過程は、駒宮によって報告されている¹⁾。

6.2 事故防止対策

爆発事故防止の基本は、燃焼の三要素である可燃物、

酸素、着火源のいずれかを除くことにあるが、酸素ホースの爆発では、可燃物であるゴムホースを用いて、酸素を取り扱う宿命から、可燃物と酸素を除くのは無理である。従って、酸素ホースの爆発事故の防止には、ホース内面の油脂などの発火し易い可燃物を除去し、発火しにくいゴム材料のホースを用いるなどのほかは、着火源を除くことが防止対策の基本となる。

具体的には、静電気火花や粒子の摩擦火花を生じさせないために、ホースや酸素配管内のさびやゴミなどの粒子を定期的に除去し、電気絶縁性のあまり高くない材料のゴムホースを用いる。油脂類などの発火し易い可燃物の付着の恐れのあるホースや圧力調整器の使用を避ける。酸素の元バルブ（弁）は、断熱圧縮によるガスの加熱を避けるためゆっくりと開く。使用する吹管には、逆火炎を消滅するフィルターや逆流防止弁を内蔵したものを用いることが望ましい、などの対策が考えられる。

Fig. 10 に示した酸素ホースの爆発プロセスは、潤滑油などの可燃物を用いる空気圧縮機系の高圧空気配管や、エアレシーバーの爆発災害の場合にもあてはまるものであり、空気の断熱圧縮熱による潤滑油の発火を生じさせないことにより防止することができる。

また、内部に可燃物（油や冷媒のフロンなど）の存在する機器の圧力試験や漏れ試験、パイプの詰りをブローするなどの場合に、窒素や空気の代わりに酸素を使用して、爆発した例が多く生じている。加圧酸素中では、空気中では燃えない物も容易に発火、燃焼するので十分な注意が必要である。（昭和63年3月31日受理）

参考文献

- 1) 駒宮功額，“酸素用ゴムホースの爆発事故と原因の推定”，高圧ガス，16，(3)，p. 127 (1979)
- 2) 松井英憲，駒宮功額，“思いがけぬ爆発事故の原因と対策”，労働安全衛生広報，16，(359)，p. 12 (1984)
- 3) Kirow, S. M., Explosion of Oxygen Hoses., Schweisstechnik (Berlin), 34, (6), p. 266 (1984)
- 4) 岡野忠雄，亀田保男，“高圧機器”，化学工場，17，(11)，p. 125 (1973)
- 5) 労働省安全課編，“労働災害の事例と対策”，中災防，p. 243 (1984)
- 6) 駒宮功額，“媒と爆発事故”，災害の研究，10，p. 330 (1979)
- 7) 駒宮功額，松井英憲，“油膜燃焼におけるすすの生成”，第21回燃焼シンポジウム前刷集，p. 88 (1983)