

RIIS-RR-29-3
UDC 662.61 : 534.222

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-29-3

「燃料～空気混合ガスの爆ごう濃度限界」

松 井 英 憲

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

燃料-空気混合ガスの爆ごう濃度限界*

松 井 英 憲**

Composition Limits of Detonability in Fuel-Air Mixtures

by Hidenori MATSUI

On the view point of prevention of accidental explosions, it is important to clarify the criteria of propagation of a detonation wave in fuel-air mixtures. These criteria are called limits of detonability such as limit of composition, limit of tube diameter and limit of initial pressure. These three limits are related each other. One of the fundamental properties of an explosive gas mixture is the composition limit of detonability at atmospheric pressure in a certain tube diameter. It is known that the composition limits obtained experimentally are strongly influenced by initiation methods and the size of the testing vessels. At the present time no standard operational definition for the detonability limits based on experiments has been established.

In this study influence of the initiation methods, tube diameters and existence of an obstacle in the tube on the composition limits of detonability was investigated using the detonation tubes. Detonation parameters have been determined in fuel (hydrogen, methane, ethylene and propane)-air mixtures for ambient pressure and temperature in 1 in. (2.8 cm) and 2 in. (5.4 cm) diameter tube, with self-initiating by flame acceleration with spiral wire and with direct-initiating impact from driver detonations of stoichiometric oxy-hydrogen mixture and equimolar oxy-acetylene mixture.

* 第17回燃焼シンポジウム(1979年12月)及び第12回安全工学研究発表会(1979年12月)において一部発表

** 化学研究部 Chemical Engineering Research Division

It is found that the detonable composition range of fuel-air mixtures which is obtained with direct-initiating impact from driver detonation depends on the strength (i.e., wave velocity) of blast wave from the driver at the end of the testing tube measured in non-reactive medium (i.e., air or nitrogen). Thus, the stronger the initiation source, the shorter and wider the testing tube are, the measured composition limits of detonability result in wider range. It was suggested that the most of the data of composition limit obtained in laboratory scale vessel using strong initiator were not for self-sustained but for overdriven detonation waves.

1. 緒 言

爆ごう (Detonation) は燃焼伝播の一形態であるが、これは高速の燃焼反応に支えられた衝撃波であるといえる。従って、その波面速度は未燃媒質中の音速より大きく、一定条件下では定速で伝播する。

爆ごう波が定常に伝播しうる限界の条件を爆ごう限界 (Detonability limit) と呼ぶ。爆ごう限界には組成限界 (または、濃度限界、不活性ガスなどによる希釈限界を含む)、圧力限界及び管径限界がある。これらの限界は相互に関連しており、それぞれの限界は他の二つの条件を一定して初めて決定することができる。水素～酸素系でのこれらの限界値の測定例を Table 1 に示す。通常我々が利用する限界値は、圧力が大気圧下での種々管径における可燃性ガスの濃度限界の場合が多い。

可燃性混合ガスの爆ごう濃度限界は、起爆方法、起爆空間の形状や大きさによって異なる値が得られることが知られている^{3~7)}。今のところ爆ごう濃度限界を決定する標準的な測定方法が確立されておらず、爆ごう濃度限界の測定データはあまり多くない。

爆ごうが生ずる過程には通常二通りの場合がある。濃度限界の測定方法もそれに依拠して二種類に大別することができる。一つは自己起爆 (Self-initiation) と呼ばれるもので、これは通常の着火で生じた火炎が、次第に加速して自ら爆ごうへと転移する場合である。他の一つは、直接起爆 (Direct initiation) と呼ばれるもので、衝撃波を伴う強い起爆源によって直接に爆ごうを起こさせる場合

である。この場合、起爆源からの衝撃波が主要な役割を演ずるので衝撃波起爆 (Blast initiation) とも呼ばれる。

自己起爆による方法では、管中での火炎から爆ごうへの転移が生ずる限界の濃度を測定するもので、この場合は、弱い着火で生じた火炎を十分に加速させるために、非常に長い爆発管が必要であり、測定された濃度限界は、装置依存性が強く、一般性がないという欠点がある。しかしながら、実際の事故の状況では、この様な過程を経て爆ごうが生ずる場合が多い。

直接起爆による方法では、衝撃波を伴う強力な点火源で爆ごうを直接に起こすもので、この方法の一つに球状の容器を用いて、強力な電気スパークや爆薬を起爆源に用いる方法がある^{10~13)}。この場合、生ずる爆ごう波は球面となり、起爆源からの衝撃波の減衰が早いので爆ごうの生成が難しく、得られる爆ごう限界濃度範囲も狭い場合が多い。

一般に、濃度限界の測定には爆ごう波管を用い、起爆させ易い燃料～酸素系の管中の平面爆ごう波をドライバーにして、これを試料混合ガス中へ打ち込み、濃度限界を測定する方法が用いられる^{1, 3, 14~16)}。この場合でも、起爆用ドライバーの強さや、用いた爆ごう波管の径及び長さによって、爆ごう濃度範囲は異なる値が得られることが知られている。

本研究では、爆ごう波管を用いて、爆ごう濃度限界に及ぼす起爆方法、管径及び管路の障害物の影響について実験を行い、従来あいまいに利用されている爆ごう濃度限界に対する正しい認識を得ることを目的としている。

Table 1 Some experimental results of detonability limit in hydrogen - oxygen mixture
水素～酸素混合ガスの爆ごう限界の測定例

	Pressure	Tube diameter	Composition	Ref.
Limits of composition	1 atm.	2.5 cm	15.5 ~ 92.6 %	1)
Limit of initial pressure	23 mmHg	2.5 cm	50 %	2)
Limit of tube diameter	1 atm.	0.25 cm	60 %	3)

2. 実験装置及び方法

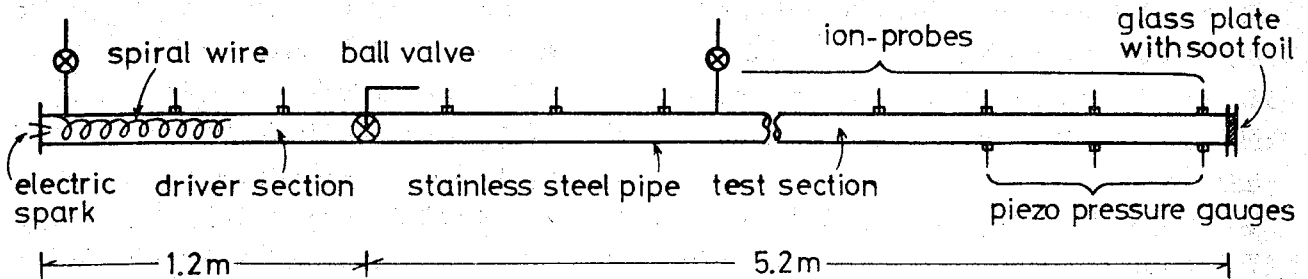


Fig. 1 Schematic of the apparatus.

実験装置の概略

実験装置の概略を Fig.1 に示す。測定容器には主として、長さ 6.4 m の 1 インチ (内径 28mm) 及び 2 インチ (内径 54 mm) のステンレス・スチール製爆ごう波管を用いた。これらの管の点火端から 1.2 m の位置にボールバルブを取り付け、点火端には長さ 70cm の金属スパイラル線^{*1}を挿入した。

自己起爆による爆ごう濃度限界の測定時には、ボールバルブは開いたまま、全管長にわたって同一組成の試料混合ガスを大気圧に満たした状態で、管端において通常の電気スパーク^{*2}で点火した。

直接起爆による爆ごう濃度限界の測定では、これらの爆ごう波管を二室に分割し、一方の側 (駆動部、長さ 1.2 m) へ、ドライバーガスとして水素-酸素の当量組成混合ガスまたは、アセチレン-酸素等モル混合ガスを導入した。他方の側 (試験部、長さ 5.2 m) へは、試料混合ガスを導入し、両ガスを大気圧に調整した後にボールバルブを開き、直ちにドライバーガスに電気スパークで点火した。この場合、ドライバーガスの火炎は、駆動部の点火側に挿入した金属スパイラル線によって加速され、直ちに爆ごうへと転移し、定常な爆ごう波が試料ガス中へ打ち込まれる。

試料ガス及びドライバーガスは、分圧法によって予め混合タンク内に調製したものをを用いた。ガス濃度の測定は、主として干渉計型ガス濃度計を用いた。

*1 素線径 2.5 mm, スパイラルの内径 13 mm, 外径 18 mm, 全長 70 cm, ピッチ: 1 turn/cm

*2 EG&G 社製, TM-11A Trigger Module を使用

燃料との混合に用いる空気は、小型コンプレッサーからの空気を、長さ 1 m のシリカゲル管を通して乾燥させたものを用いた。管壁には、20~40cm 間隔で多数のイオンプローブが取り付けられており、これらの出力をタイムカウンターへ入力することによって、プローブ間の平均火炎速度を管路全体にわたって測定した。また、管終端部には幾つかのピエゾ圧力計を取り付け、同時に衝撃波速度の測定も行なった。試料ガス側の管端には、煤を表面に付着させたガラス円盤を置き、爆ごう波によって生ずる煤模様を観察した。

爆ごうが生じたか否かの判定は、火炎と衝撃波の速度の同時測定により、管の終端近くでの速度の定常性と、両者の合体を基準とした。イオンプローブによる火炎速度変化を、限界濃度付近の混合ガスについて測定した結果の例を Fig. 2 に示す。この図に示すように、爆ごうが生じた場合には、管終端付近ではほぼ定常な爆速が得られるが、爆ごうが生じない場合には、火炎速度は急激に低下し、ときには消炎してしまう場合も見られた。しかしながら、火炎速度が急激に低下するにもかかわらず、管端近くで異常に高い火炎速度が観測される場合があり、火炎速度のみから爆ごうの判定が困難な場合が見られた。Fig. 3 に管端近くでの管軸に対称の位置で、イオンプローブとピエゾ圧力計の出力を同時にシンクロスコープで観測した例を示す。上段の写真では、明らかに衝撃波の到達が見られるが、同時にイオンプローブの出力は認められず、衝撃波は火炎を伴っていないことを示している。従って、爆ごう波は管

終端部まで維持されなかったと判定することができる。しかしながら、管端からの反射衝撃波によって未燃ガスが発火していることがわかる。この反射衝撃による発火のために、イオンプローブによる火炎速度値が見かけ上異常に高い値を示す場合があった。^{*3} 下段の写真では、衝撃波の到達とほとんど同時に火炎が生じており、衝撃波と燃焼波が一体となってい^{*4}

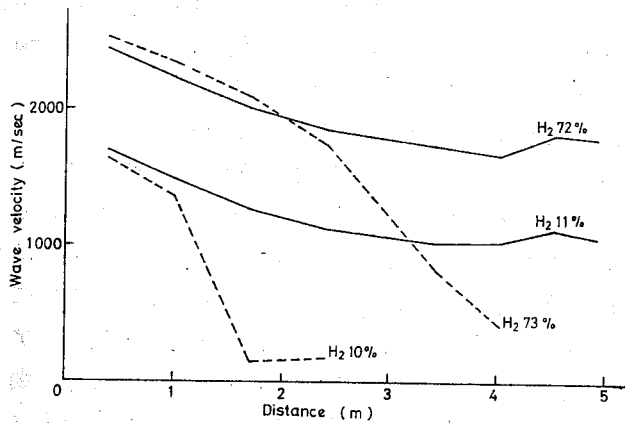


Fig 2 Wave profile near the detonability limits. Hydrogen-air mixtures were driven by equimolar oxy-acetylene detonation in 2 inch tube.

爆ごう濃度限界近くでの火炎速度変化、2インチ管において水素-空気混合ガスを等モルのアセチレン-酸素混合ガスの爆ごう波で駆動した場合

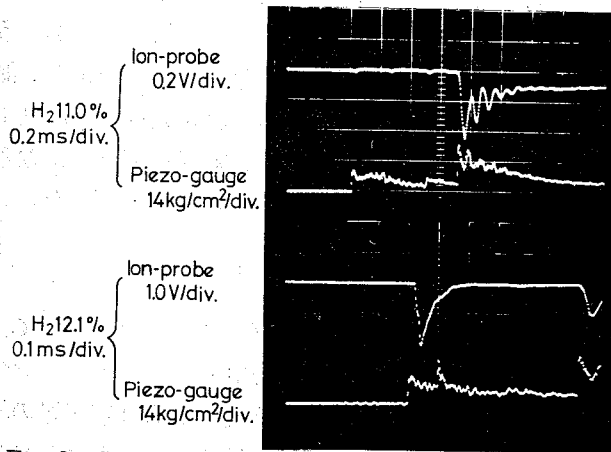


Fig 3 Synchronoscopic records of piezo-gauge and ion-probe near the detonability limit of hydrogen-air mixture in 1 inch tube.

1インチ管における水素-空気混合ガスの爆ごう濃度限界近くでのピエゾ圧力計とイオンプローブの出力の同時記録例

*3 時間差20μs以下

ることを示しており、爆ごう波が維持されていると判定することができる。Fig.4の(a), (b), (c)は、管端で得られた煤模様の場合である。(a)は多頭構造を持つ定常爆ごう波を示しており、(b)はスピン爆ごう波を示すものと思われる。(c)は反射衝撃波による過大爆ごう波(Overdriven detonation)を示しており、微細で不規則な網目模様が見られる。

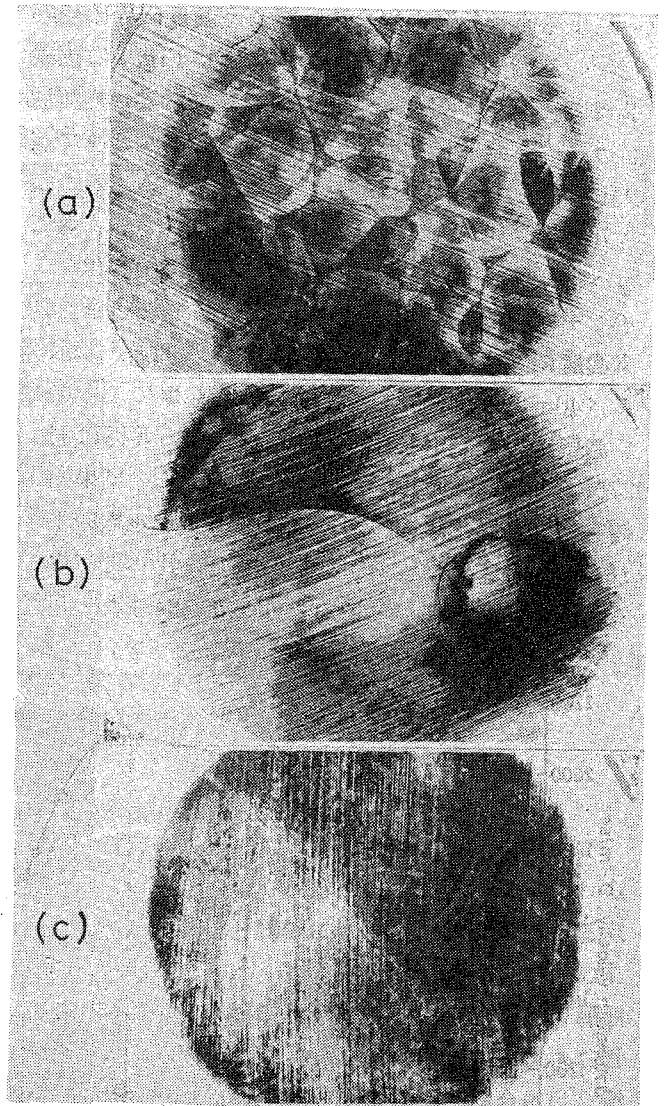


Fig 4 Soot track records of transverse wave structure in hydrogen-air detonations taken on the end plate of 1inch tube. (a) : multi-head structure, (b) : single-spin structure, (c) : overdriven structure by reflected shock wave

水素-空気混合ガス爆ごう波の1インチ管管端での煤模様、(a) : 多頭構造、(b) : シングルスピン構造、(c) : 反射衝撃波による過大爆ごう波構造

*4 厳密には爆ごう限界近くでは、爆ごう波はスピン構造を取っており、衝撃波と火炎面は数cmの間隔で分離、合体を繰り返して進行している。

3. 実験結果及び考察

3.1 起爆方法の影響

水素～空気混合ガスについて、1インチ管におけるスパイラル線による自己起爆の場合と、ドライバーによる直線起爆の場合の、爆ごう濃度限界の差異について調べた。自己起爆の場合は、Fig. 1の実験装置で、ボールバルブは開の状態、水素～空気混合ガスを管全体に満たし、管端で電気スパークで点火した。生じた火炎は、点火端近くに挿入された長さ70cmの金属スパイラル線によって加速され、爆ごうへと転移する。この場合の爆ごう濃度限界は、1インチ管中で、 H_2 17～56%であった。このときの水素濃度に対する爆ごう速度の測定値をFig. 5に示す。長さ40mのガラス管を用いて、自己起爆による爆ごう濃度限界を測定した実験では、爆ごう範囲は H_2 27～35%であったという報告がある¹⁷⁾。この結果と比較して、自己起爆の場合には、スパイラル線のような管路の障害物は、それが無い場合と比べて、爆ごう範囲を極めて広くすることがわかる。また、自己

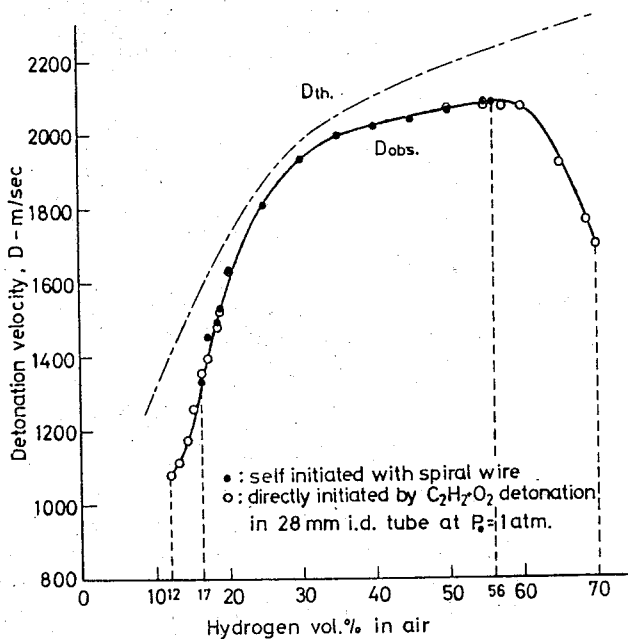


Fig 5 Variation of the detonation velocity on hydrogen concentration at different initiation methods.

起爆方法が異なる場合の水素濃度と爆ごう速度の測定値

起爆では、管径が大きくなるほど火炎の加速が起こりにくいため、爆ごうが生じ難くなることが知られている。

従来、爆ごう濃度限界は、水素～酸素の当量組成混合ガスの爆ごう波を起爆源にして、内径20～25mmの爆ごう波管を用いて、直接起爆によって得られた値が一般的に採用されている¹⁸⁾。この方法によるBretonらの水素～空気系の爆ごう濃度限界は、 H_2 18.3～59%と報告されており、本実験において内径28mmの爆ごう波管を用いて同様の実験を行なった結果、得られた爆ごう濃度限界は、 H_2 14～61%であった。Bretonらの結果との相異は、管径がやや異なることと、微量の水分(反応を抑制する⁶⁾)の影響によるものと思われる。Gordonらの結果⁶⁾では、下限界は H_2 15%と報告されており、本実験の結果はこれに近い値を示した。次に、同じ1インチの管路で、アセチレン～酸素の等モル混合ガスの爆ごう波を起爆源にした場合の爆ごう濃度範囲は、 H_2 12～70%とさらに広い値を示した。これは、起爆源の爆ごう圧力が、水素～酸素のドライバーの場合に比べて約2.5倍高いため(Table 3参照)、起爆のエネルギーが大きいことによるものと考えられる。この場合の水素濃度と爆速の関係をFig. 5に同時に示した。

Fig. 5からわかるように、爆ごう速度に関しては、自己起爆の場合と、直接起爆の場合との間に相異はみられなかった。このことから、一旦生じた爆ごう波の速度は、起爆過程には依存しないといえる。測定された爆ごう速度は、化学量論組成近くの濃度で理論爆速との差が最も小さく、限界濃度近くになるにつれて、その差が著しくなることが示された。

3.2 管径の影響

水素、メタン、プロパン及びエチレンについて、1インチ管及び2インチ管を用いて、アセチレン～酸素等モル混合ガスの爆ごう波による直接起爆の場合の爆ごう濃度範囲の測定結果及び、限界における爆速の測定値をTable 2に示す。水素-空気混合ガスについて、1インチ及び2インチ管における本実験結果は、内径10cmの管中の爆ごう波を内径4～16mmの細いガラス管中の試料混合ガス中へ打ち込んで、

*5 水素～空気混合ガスの化学量論組成は H_2 29.5%である。

爆ごう濃度限界に対する管径の影響を調べたWagnerらの実験結果の外挿線上に良い一致を示した。これらの結果をFig. 6に示す。この図で、管径の逆数(1/d)が零の位置、すなわち、管径が無限大での爆ごう濃度限界の外挿値は、H₂ 9 ~ 76%となる。従って、爆ごう濃度限界は、開放空間で最も広い濃度範囲を示し、その値は、ほとんど燃焼濃度限界に近い値になりうることが推定される。しかしながら、一方では、開放空間での爆ごう波の起爆は最も困難

であることが知られている。Fig. 6に示した測定値を、逆に管径が小さくなる方向へ外挿していくと、上限と下限はある点で交わるはずである。(図中破線で示した)この点は、水素~空気混合ガスにおいて、爆ごう波が伝播しうる限界の管径と、そのときのガス濃度を示しており、水素~空気混合ガスでは、化学量論組成近くの濃度で、爆ごう限界管径が4~5mmであることを示唆している。

Table 2- Detonability limits of fuel-air mixtures in different tube diameter
管径が異なる場合の燃料~空気混合ガスの爆ごう濃度限界と限界での爆速

Fuel	Tube diameter (mm)	Lower limit (vol. %)	Detonation velocity (m/s)	Upper limit (vol. %)	Detonation velocity (m/s)
Hydrogen	28	12	1080	70	1695
	54	11	1070	72	1655
Methane	28	7.2	1527	11.2	1684
	54	6.8	1466	11.5	1713
Propane	28	2.9	1525	6.5	1625
	54	2.3	1502	7.6	1598
Ethylene	28	3.5	1453	15.2	1605
	54	2.9	1352	18.0	1578

Detonations were initiated by equimolar oxy-acetylene detonation.

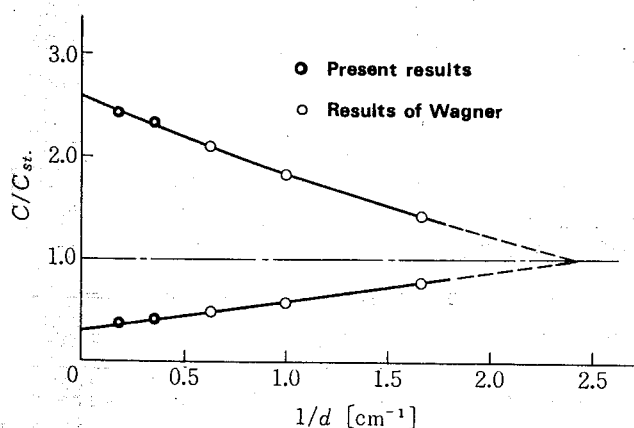


Fig. 6 Composition limits of detonability in hydrogen-air mixtures as a function of inverse of tube diameter.
水素~空気混合ガスの管径と爆ごう濃度限界

メタン、プロパン及びエチレンについても、同じ起爆源の場合には、1インチより2インチ管中での爆ごう濃度範囲は広くなることが示された。これらの値を水素の場合と同様に、管径が無限大になる点まで外挿することは、管径別の測定値が少ないので無理があるが、管径無限大では更に広い爆ごう範囲を示すものと思われる。この様に、比較的大きな管径の管中で、強い衝撃波で起爆させた場合には、燃焼濃度限界に近い範囲まで爆ごう波が伝播しうることがわかる。しかしながら、等モルのアセチレン~酸素混合ガスの爆ごう波より弱い水素~酸素の当量組成混合ガスの爆ごう波で起爆させた場合には、1インチ管中では、メタン、プロパンの空気との当量組成混合ガスでも爆ごうは観測されなかった。従って、爆ごう濃度限界は、起爆源の強さに大きく影響されることが明らかとなった。

3.3 駆動爆ごう波の影響

起爆用の駆動爆ごう波(ドライバー)の影響を調べるため、ドライバーからの衝撃波の強さの比較、検討を行なった。その方法として、管路別に試料混合ガスの代わりに空気を用いて、水素-酸素の当量組成混合ガス及び、アセチレン-酸素の等モル混合ガスの爆ごう波をテスト部の空気中へ打ち込み、透過衝撃波の減衰状態を測定した。その結果を Fig. 7 に示す。両ドライバーガスの爆ごう特性値と、それら

が空気中へ透過するときの透過衝撃波の初期値の計算結果を Table 3 に示す。この透過衝撃波の初期値と実測値の外挿値は良い一致を示した。爆ごう波は波面背後に希薄波を伴っているため、衝撃派管などによる純粹の衝撃波より減衰が早く、ドライバー部の長さを変えれば、透過衝撃波の減衰の状態も変わってくる。空気中の透過衝撃波の管終端部(ボールバルブから 5 m の位置)での波面速度の実測値と、その速度から計算した波面圧力及び温度を Table 4 に示す。

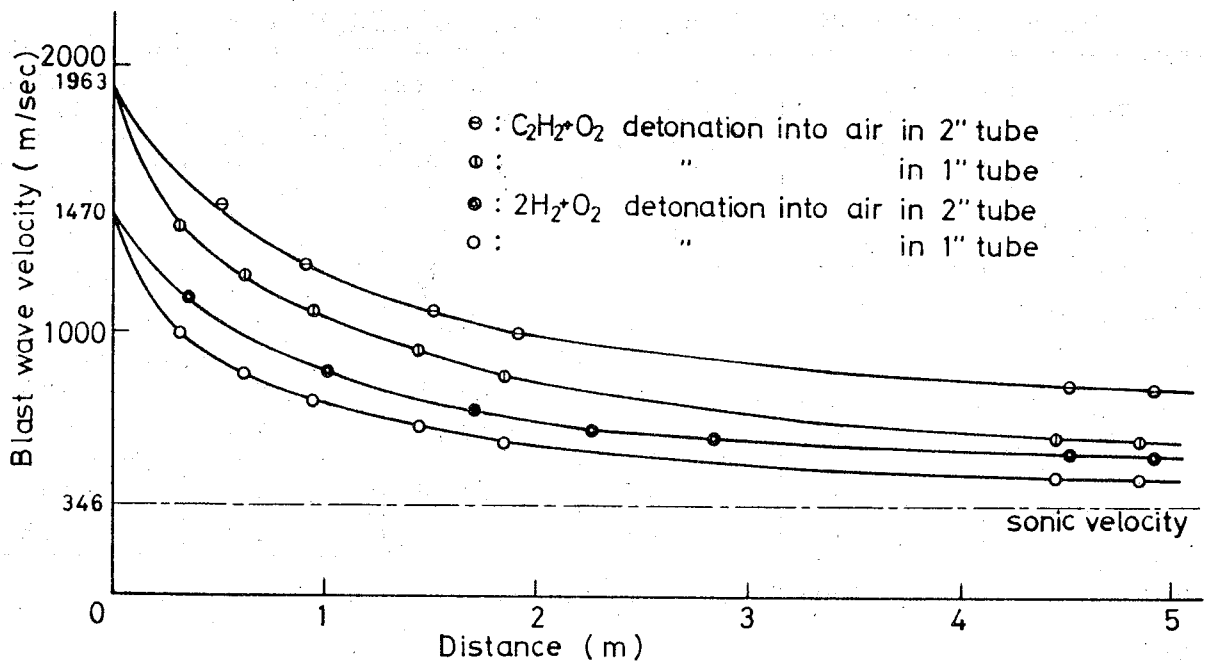


Fig. 7 Decaying profile of the blast wave velocity in air at different drivers and tube diameters.

駆動爆ごう波から管中空気への透過衝撃波の減衰

Table 3 Propertis of the driver detonation and the blast wave at the interface of driver detonation and air.

駆動爆ごう波の特性値及び空気中への透過衝撃波の初期値

Mixtures	Properties of detonations			Blast wave in air	
	Velocity (m/s)	Pressure (atm.)	Temperature ($^{\circ}K$)	Velocity (m/s)	Pressure (atm.)
$2H_2+O_2$	2834	18.8	3682	1470	20.8
$C_2H_2+O_2$	2935	45.8	4512	1963	37.3

$P_0 = 1 \text{ atm.}, T_0 = 298^{\circ}K$

*6 計算方法は文献19)に詳しく述べられている。

Table 4 Blast wave properties in air at the end of tube.
 駆動爆ごう波から管中空気への透過衝撃波の管終端部での特性値

Mixtures	Tube diameter (mm)	Blast velocity (m/s)	Mach number M_s	Pressure P_2/P_0	Temperature ($^{\circ}K$)
$2H_2 + O_2$	28	460	1.33	1.90	361
	54	539	1.56	2.66	405
$C_2H_2 + O_2$	28	603	1.74	3.38	444
	54	800	2.31	6.07	584

これらの結果から明らかなように、アセチレン～酸素等モル混合ガスの爆ごう波からの透過衝撃波の初期速度や圧力の方が、水素～酸素当量組成混合ガスのそれらよりも大きく、管終端での波面圧力、温度も高い。また、管径の大なる方が透過衝撃波の減衰は小さく、管終端での波面圧力や温度が高いことがわかる。このことから、ドライバーによる可燃性混合ガスの起爆の場合には、透過衝撃波の初期速度や圧力及び、その後の減衰の程度に対応して、測定される爆ごう濃度限界値は影響を受けるものと考えられる。すなわち、起爆に用いたドライバーが強すぎたり、測定に用いた爆ごう波管が短い場合には、起爆源からの衝撃波が、試料混合ガスの爆ごう波にエネルギーを付与することとなり、得られた爆ごう波は自己維持型 (Self-sustain) とはいえず、過大爆ごう (Overdriven detonation) になっているものと思われる。

3. 4 管路途中の障害物の影響

前節 3, 3の結果から、ある管径における真の爆ごう限界を測定するためには、ドライバーの影響を避けるために、管の長さを極めて長くしなければならないことになる。この場合、実験室で使用する管の長さには限界があるので、管路途中に障害物としてスパイラル線を挿入し、ドライバーからの衝撃波を人為的に弱めることを試みた。

まず、試験部の管路のボールバルブから 1.2 m の位置に、駆動部に用いたものと同じ金属スパイラル線を挿入したときの、管中空気への透過衝撃波の減衰状態を測定した。Fig. 8 に、1 インチの管中で、アセチレン～酸素等モル混合ガスの爆ごう波を空気

へ打ち込んだ場合の、透過衝撃波に対するスパイラル線の有無の影響を示す。この図から、衝撃波は、管路の障害物によって急激に減衰することがわかる次に、水素～空気混合ガスについて、同じ管路で、同じドライバーによって生じた爆ごう波の伝播に対するスパイラル線の影響を調べた。 H_2 30% 及び 25% では、スパイラル線の部分で、爆速が定常値よりそれぞれ 300 m/s 及び 400 m/s だけ低下するが波面がスパイラル線を過ぎると再び定常な爆速へ戻った。 H_2 20% では、スパイラル線の部分で爆速は 600 m/s 以上低下し、かつ、衝撃波と火炎面の分離が起こり、爆ごう波は中断した。その後、スパイラル線を過ぎて火炎速度は徐々に加速し、過大爆ごう (Overdriven) の領域を経て再び定常な爆速へと戻った。この間の火炎速度の変化を Fig. 9 に示す。更に水素濃度を下げていくと、 H_2 14% まで管終端で爆ごう波が観測された。従ってこの場合の爆ごう下限界は 14% となり、この値は、同じ 1 インチ管で当量組成の水素～酸素混合ガスの爆ごう波をドライバーにしたスパイラル線のない場合の下限界に等しい。両者のドライバーから空気への透過衝撃波の減衰状態を比較してみると、管終端での衝撃波速度がほぼ等しいことがわかる。従って、ドライバーによる直接起爆では、得られる爆ごう濃度限界は、ドライバーからの衝撃波の管終端での強さに依存することが推定された。

管路の障害物は、火炎を加速して爆ごうへの転移を促進する一方で、衝撃波を減衰させ、限界近くの爆ごう波の伝播を減衰、中断させる場合があることが確認された。Lee らの実験²⁰⁾において、限界近くのエチレン～空気混合ガスの爆ごう波の伝播速度が、

燃料-空気混合ガスの爆ごう濃度限界

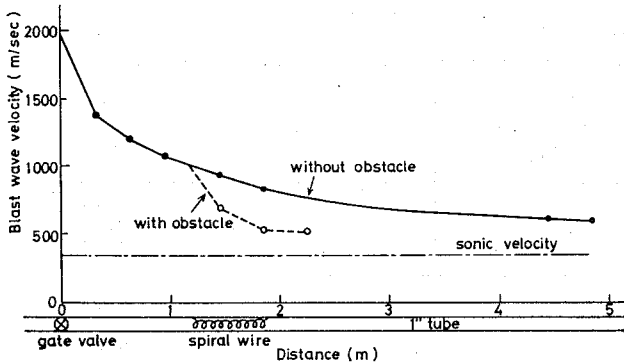


Fig. 8 Effect of spiral obstacle on blast wave propagation in air in 1 inch tube. The blast wave was driven by equimolar oxy-acetylene detonation. 衝撃波伝播速度に及ぼす管路の障害物の影響、アセチレン-酸素等モル混合ガスの爆ごう波を1インチ管中空気へ打ち込んだ場合

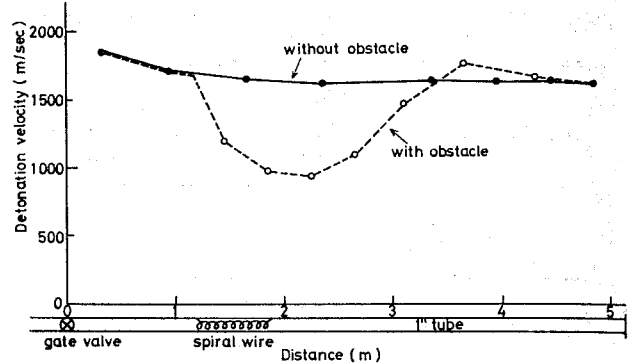


Fig. 9 Effect of spiral obstacle on detonation propagation of H₂ 20% in air in 1 inch tube. The detonation was driven by equimolar oxy-acetylene detonation. 爆ごう伝播速度に及ぼす管路の障害物の影響、アセチレン-酸素等モル混合ガス爆ごう波で1インチ管中のH₂ 20%-空気混合ガスを起爆した場合

管路に挿入したスパイラル線によって著しく変動する(900~2100m/s)ことが報告されている。これは、爆ごうの中断と再転移を周期的に繰返すような現象(Galloping detonation)とみなされている。

3. 5 燃料-酸素-窒素系の爆ごう濃度限界

起爆方法や測定に用いた爆ごう波管の管径の相異が爆ごう濃度限界に及ぼす影響は、一般に、燃料-酸素-不活性ガス系の爆ごう組成限界にも当てはまることが推定される。Fig. 10に、起爆源の強さ及び爆ごう波管の管径が異なる場合の、H₂-O₂-N₂系の爆ごう組成限界の測定値を三角図に示す。内側の組成範囲は、従来標準的とされている1インチ管中で、水素-酸素の当量組成混合ガスの爆ごう波で起爆した場合の結果であり、外側の爆ごう範囲は、アセチレン-酸素の等モル混合ガスの強い爆ごう波で起爆したときの管径無限大における結果である。後者の方が窒素添加量の多少にかかわらず、爆ごう組成限界が広がることわかる。

この様に、既存の爆ごう濃度限界の測定値を、起爆方法及び測定に用いた管路の管径が類似のものについて、燃料-酸素-窒素の三成分系の三角図にプロットしてみると、燃料の種類によらず一定のパターンが有ることが見出される。Fig. 11にエチレン-酸素-窒素系の燃焼組成範囲及び爆ごう組成範囲の

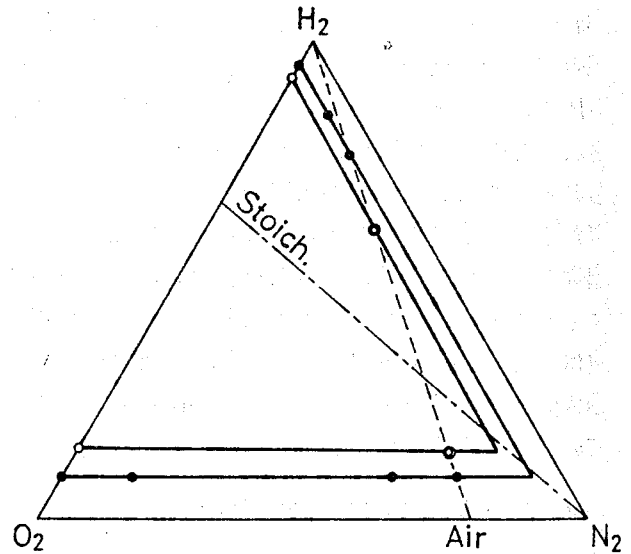


Fig. 10 Detonability limits in H₂-O₂-N₂ mixtures
 ● results for infinite tube obtained by extrapolation by Wagner, Ref. 3
 ○ results in 1 inch tube, detonation initiated by 2H₂+O₂ detonation, by Munday, Ref. 1
 ◎ Present results in 1 inch tube, detonation initiated by 2H₂+O₂ detonation

H₂-O₂-N₂系の爆ごう限界の測定例

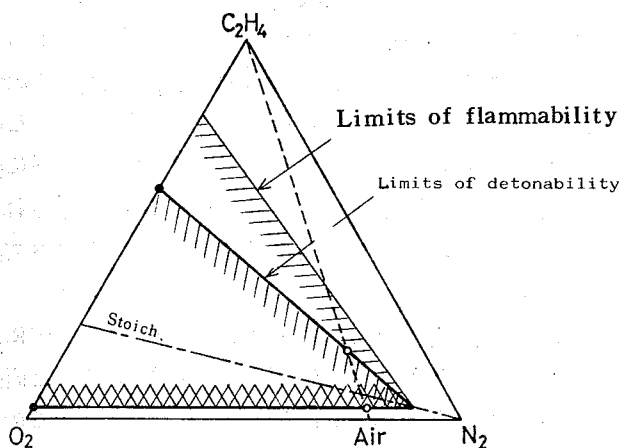


Fig. 11 Limits of flammability and detonability in C₂H₄-O₂-N₂ mixtures

- results for infinite tube obtained by extrapolation by wagner, Ref. 3
- detonation initiated by explosive in 6 inch tube by Takai, Ref. 24

C₂H₄-O₂-N₂系の燃焼及び爆ごう限界の測定例

例を示す。幾つかのこの様な三成分系の爆ごう組成限界の測定例から、燃料～酸素～窒素の三成分系の爆ごう組成限界は、類似の測定容器及び起爆方法で測定した場合、一般に次のことが推定される。

(1) 爆ごう組成限界は、おおむね直線で囲まれた三

角形の範囲で示される。

- (2) 爆ごう下限界は、酸素中でも空気中でもほとんど同じ値になる。これは、酸素と窒素とは、その熱的な性質、例えば比熱や熱伝導度がほとんど同じであることに起因しているものと思われる。
- (3) 窒素による最大希釈限界組成は、燃料と酸素の混合比が化学量論比近くで得られる。

これらの特性から、ある燃料について、酸素中の爆ごう濃度限界値がわかっていれば、その測定方法に対応した空気中の爆ごう濃度限界値を作図法によって推定することができる。酸素中の爆ごう濃度限界は、起爆が容易であるためかなり多くの測定例があり、これらを利用することによって、酸素中の爆ごう濃度限界の測定方法に対応した未知の空気中の爆ごう濃度限界を大まかに推定することができる。計算でこれを求める場合には、次式によって、空気中の爆ごう上限界を推算することができる。下限界は、酸素中の爆ごう下限界をそのまま採用すれば良い。

$$\text{空気中の爆ごう上限界 (vol. \%)} = \frac{A \cdot (21 - B) + C \cdot L}{C + 0.21A}$$

但し、 $A = U - L$, $B = L / S$, $C = 100 - (B + U)$
 L : 酸素中の爆ごう下限界 (vol. %), U : 酸素中の爆ごう上限界 (vol. %), S : 化学量論組成比 (燃料 vol. %) / (酸素 vol. %)

Table 5 に、幾つかの燃料について、推算値を示す。

Table 5 Upper limit of detonability in air predicted from detonability limits in oxygen.

酸素中の爆ごう濃度限界の測定値から推算した空気中の爆ごう上限界濃度

Fuel	Detonability limits in O ₂		Predicted upper limit in air	Corresponding initiation method and tube diameter in O ₂
	Lower limit	Upper limit		
Hydrogen	15.6 %	92.6 %	64.1 %	2H ₂ +O ₂ driver, in 1 inch tube (Ref. 1)
Methane	8.2	56	11.8	
Ethylene	4.1	60	15.2	
Propane	2.5	42.5	8.5	
Propylene	2.5	50	11.5	
n-Butane	2.0	38	6.8	
neo-Pentane	1.5	33	5.9	
Hydrogen	9.0 %	95.3 %	77.8 %	Strong driver, infinite tube diameter (Ref. 3)
Methane	6.7	53	13.3	
Ethylene	3.3	61	17.9	

*7 測定方法が同じという意味ではない。

4. 従来得られている爆ごう濃度限界値の検討

従来他の研究者によって、種々の方法で測定された燃料-空気混合ガスの爆ごう濃度限界を Table 6 に示す。これらの測定条件をよく検討してみると、結果として得られた濃度限界値は、起爆方法、起爆源の種類及び実験に用いた容器の大きさや形状によって著しく異なる値を示していることがわかる。これらの相異は、それぞれの値の測定条件を検討することによって、定性的に説明することができる。

通常の電気スパークで着火した場合、最も爆ごうを生じ易いガスであるアセチレンやエチレンオキシドと空気との混合ガスでも、管径が大きい場合には（例えば内径60cm）、管長がかなり長くても（例えば50m）、爆ごうは生じていない。これは、広い管中では、管壁による未燃ガスの乱れが管の中心部まで及ばないため、火炎の加速が十分でなく、衝撃波の生成にまで至らず、自己起爆しないものと解される。この場合、管の径が小さければ、管壁による未燃ガスの乱れが著しくなり、爆ごうへの転移が起こる。広い管中でも、管路に障害物があれば、未燃ガスの流れを乱し、爆ごうへの転移が起りうるものと思われる。

管径が比較的大きな管中での爆ごう濃度限界の測定では、爆薬を起爆源として試料混合ガスを直接起爆させる方法が用いられる場合がある。この場合に得られる爆ごう濃度限界は、起爆に用いた薬量が多いほど、広い爆ごう濃度限界が得られており、他のいずれの方法と比べても、最も広い爆ごう濃度限界が得られている。これは、断面一様の管中では、爆薬の爆ごうによって生じた衝撃波は、一次元平面波（Planar）であるため、衝撃波の減衰は最も小さく、薬量の増大と共に生ずる衝撃波の強さ（速度、圧力）が大きくなるためである。

同じ爆薬による直接起爆の場合でも、管中の様な制限された空間ではなく、ゴム風船やゴムのシートで囲まれた球状あるいは直方形の空間の中心近くで起爆した場合には、爆薬から生じた衝撃波は球面（Spherical）で拡がるため、その波面面積は衝撃波の進行と共に著しく増大し、当初の起爆エネルギーが発散してしまうので、衝撃波の減衰が非常に

早くなる。爆ごうの生成には、未燃ガスをおある一定の時間、ある一定の強さを保持した衝撃波によって加熱、加圧する必要がある²⁵⁾ので、急激な衝撃波の減衰はこれを不可能にすることとなる。従って、この様な形状における爆ごう限界の測定では、起爆に要する爆薬の薬量は数gから数10kg²⁶⁾になり、得られる爆ごう濃度限界は、一般に管中での測定に比べて狭くなる。

爆ごう濃度限界の測定では、断面一様の管中において、一次元平面ガス爆ごう波を起爆源にした直接起爆による方法が一般的に用いられている^{3,14,15,18)}。この場合、管断面積が一定であるため、起爆源からの衝撃波の波面面積の発散による減衰がないので、爆ごう波の生成は容易になる。しかしながら、管径が小さいほど管壁によるエネルギー損失が増大するので、爆ごうの伝播は容易でなくなる。従って、管径が大きいほど管壁によるエネルギー損失は少なく、広い爆ごう濃度限界が得られることになる。この場合、起爆源のエネルギーが大きいと、燃焼濃度限界より¹⁵⁾広い範囲まで爆ごうが伝播する場合も見られる。このことは、強い衝撃波を与えてやれば、燃焼範囲の外側の混合ガスでも、過大爆ごう（Overdriven）の状態¹⁵⁾で爆ごうしうることを示している。

爆ごう限界自体は、本質的には起爆過程には依存しないものであるが、實際上、爆ごうの生成には起爆条件によって大きな難易差がある。すなわち、広い空間では爆ごうは生じ難いが、一旦生じた爆ごう波の伝播は容易であるといえる。

5. 結 言

爆ごう限界について多くの論議があり、未だ標準的な濃度限界の測定方法が確立されていないことに対して、種々実験を試み、その原因を検討してみた。その結果、爆ごうの起り易い条件と、伝播し易い条件との間に、相反する局面があることが問題を複雑にしていることが認められた。従って、学問的に真の爆ごう限界（一つの定義として、開放空間における爆ごうが伝播しうる限界の濃度とする意見がある²⁰⁾）を追求しようとする、実験が大がかりなものとなり、現実の問題と遊離した結果が得られることが予測される。安全上の立場から、実際の爆ごう生成の

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-29-3

Table 6 Detonability limits in fuel-air mixtures.

燃料～空気混合ガスの爆ごう濃度限界の測定値

Fuels	Detonability limits(vol.%)		Initiation method	Test vessel		Ref.
	L.L.	U.L.		Dia. (cm)	Length (m)	
Hydrogen	27	35.5	Self initiation	(2)glass 40		17)
	18.3	59	(2H ₂ +O ₂ driver)	(2.5)		18)
	15	63.5	Explosive	30.5	12.2	22)
	9.0	76.5	(Strong driver)	∞	2.4~3.0	3)
Methane	6.5	13.5	Amatol 70g	30.5	12.2	23)
Acetylene	Failed		Self initiation	60	50	21)
	6.6	15.3	Self initiation	(2)glass 40		17)
	6	25	Penthrate 7g	184ℓ balloon		11)
	4.2	50	(2H ₂ +O ₂ driver)	(2.5)		18)
	2.0	100	Penthrate 10g	60	50	21)
Ethylene	5.3	9.1	Self initiation	8	27	8)
	3.3	14.7	C ₃ H ₈ +5O ₂ driver	7	18	15)
	2.8	18	Penthrate 20.3g	15	15	24)
Ethane	2.9	12.2	C ₃ H ₈ +5O ₂ driver	7	18	15)
Ethylene-oxide	Failed		Self initiation	60	50	21)
	5.3	18	Tetryl 10g	60	50	21)
		30	Tetryl 100g	60	50	21)
Ethanol at 100°C	5.1	9.8	3.25%C ₄ H ₁₀ -O ₂ driver	1.3	1.5	14)
Propylene	3.5	8.5	Sheet explosive	1.8mx1.8mx7.6m		7)
	3.5	10.4	C ₃ H ₈ +5O ₂ driver	7	18	15)
Propane	Failed		Self initiation	60	50	21)
	3	7	Sheet explosive	1.8mx1.8mx7.6m		7)
	2.6	7.4	C ₃ H ₈ +5O ₂ driver	7	18	15)
	2.2	9.2	Penthrate 10g	60	50	21)
Butane	2.5	5	Sheet explosive	1.8mx1.8mx7.6m		7)
	2.0	6.2	C ₃ H ₈ +5O ₂ driver	7	18	15)
Ethyl-ether	2.8	4.5	(2H ₂ +O ₂ driver)	(2.5)		18)
Benzene at 100°C	1.63	5.55	3.25%C ₄ H ₁₀ -O ₂ driver	1.3	1.5	14)
n-Octane at 100°C	1.45	2.85	"	1.3	1.5	14)
Hydrogen-sulfide	6.5	21	Penthrate 20.3g	15	15	24)

(): estimated.

燃料-空気混合ガスの爆ごう濃度限界

可能性を検討する場合には、考えられる点火源の種類、容器の形状、管の径や長さ、障害物の存在、空間の制限などを考慮して、それに類する爆ごう限界の測定値を参考にし、これらを過小あるいは過大に評価することなく、適正に評価することが妥当と考えられる。

(昭 56. 3. 30 受付)

引用文献

- 1) A. R. Ubbelohde, F. R. S. and G. Munday, 12th Symposium (International) on Combustion, p.809 (1969)
- 2) T. Fujiwara et al., Memoires of the Faculty of Eng., Nagoya Univ., 23, (2), p.309 (1971)
- 3) W. Pusch, H. Gg. Wagner, Berichte der Bunsengesellschaft, 69, (6), p.503 (1965)
- 4) 疋田強監修, 火災・爆発危険性の測定法, p.49 (昭52年)
日刊工業新聞社
- 5) Edited by A. Ferri, Fundamental Data Obtained from Shock Tube Experiments, p.336, Pergamon Press, (1961)
- 6) W. E. Gordon, A. J. Mooradian and S. A. Harper, 7th Symposium (International) on Combustion, p.752 (1959)
- 7) W. B. Benedick et al., Combustion and Flame, 15, p.83 (1970)
- 8) 塩田ら, 工火誌, 31, (5), P.310 (1970)
- 9) 一条, 真柄, 高圧ガス, 10, (6), P.353 (1973)
- 10) N. Manson and F. Ferrie, 4th Symposium (International) on Combustion, p.486 (1953)
- 11) H. Freiwald and H. W. Koch, 9th Symposium (International) on Combustion, p.275 (1963)
- 12) E. J. Litchfield, M. H. Hay and D. J. Cohen, U. S. Bureau of Mines Report of Investigation, RI-7061, (1967)
- 13) G. A. Carlson, Combustion and Flame, 21, p.383 (1973)
- 14) R. P. Fraser, 7th Symposium (International) on Combustion, p.783 (1959)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-29-3

- 15) A. A. Borisov and S. A. Loban, Fizika Goreniya i Vzriva, 13, (5), p.729 (1977)
- 16) G. Munday, P.R.S.L., A319, p.461 (1970)
- 17) Ia. B. Zel'dovich and A. S. Kompaneets, Theory of Detonation, p.196, Academic Press, (1960)
- 18) B. Lewis and G. Elbe, Combustion, Flames and Explosion of Gases, p.511, Academic Press, N.Y. and London, (1961)
- 19) 疋田, 秋田, 燃烧概論, P.105, コロナ社(昭46年)
- 20) I. O. Moen, M. Donato and J. H. Lee, The Influence of Confinement on the Propagation of Detonations Near the Detonability Limits, Paper Presented at the 18th Symposium (International) on Combustion, Waterloo, Canada, Aug. (1980)
- 21) D. S. Burgess et al., U. S. Bureau of Mines Report of Investigation, RI-7196, (1968)
- 22) S. M. Kogarko and Ia. B. Zel'dovich, Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 63, p.553 (1948)
- 23) S. M. Kogarko, Soviet Physics Tech. Phys., 3, p.1904 (1958)
- 24) R. Takai, Private Communication
- 25) Ia. B. Zel'dovich, S. M. Kogarko and N. N. Simonov, Sov. Phys. Tech. Phys., 1, p.1689 (1956)
- 26) 松井, 安全工学, 19, (6), P.319 (1980)

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-29-3

昭和56年8月24日 発行

発行所 労働省産業安全研究所

〒108 東京都港区芝5丁目35番1号

電話 (03) 453-8441 番(代)

印刷所 プロ製版印刷株式会社

UDC 007

人間の予測確率を用いた特異性の定量化 (第1報)

深谷 潔, 杉本 旭, 近藤 大二

産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-29-1

特異性の大きさ (特異度) を人間に与える「驚き」の大きさ (驚愕度) で定量化を行う手法を検討した。この驚愕度は、予測と現実のずれの大きさ (はずれ度)、特異現象の重要度・緊急度の関数となる。人間の予測を確率で表現し、はずれ度を表す式を提案した。

重要度、緊急度が一定と考えられる条件のもとで、追従制御動作を行わせ、その制御成績と、上述の方法で計算した特異度を比較した結果、両者の間に、良い一致が見られた。(図6, 表2, 参1)



UDC 007
Quantification of singularity by using expectation probability
and an example in pursuit tracking task (1st report)

By Kiyoshi Fukaya Noboru Sugimoto, Taiji Kondo
Research Report of the Research Institute of Industrial Safety,
RIIS-RR

The method of quantifying the singularity of events are discussed. The singularity is evaluated by the "surprisal" which event gives to the man. The "surprisal" is the function of following three factor;

- (1) the difference between expectation and the event which really happens
- (2) the degree of importance of the event to the man
- (3) the degree of urgency of the event or emergency.

In this paper the first factor is mainly discussed. This factor is defined by $-\log p_j$ and compensating term, where p_j is the subjective probability of event j which really happens.

To confirm the theory, we tried experiment of pursuit tracking. The "surprisal" were calculated and compared with the score of tracking task. A sufficient result was obtained.
(6 Figures, 2 Tables, 1 Reference)

