

## 高压酸素供給における安全技術の確立 (第2報) —有機材料ガスケットの発火特性に関する数値解析—

### Establishment of Safety Technologies in a High-Pressure Oxygen Supplying System (Part 2)

#### — Numerical Analysis of a Flammability of Gaskets by an Adiabatic Compression —

中林 宏行\*      土屋 茂\*\*  
NAKABAYASHI Hiroyuki   TSUCHIYA Shigeru

当社では、発火模擬試験装置を用いて、酸素雰囲気下において急速にバルブを開いた際の有機材料ガスケットの発火特性を測定している。本特性を検証するため、CFD (Computational Fluid Dynamics) ソフトウェアを用いて数値解析を実施した。発火模擬試験装置をモデル化して、試験条件と同じ初期状態から、2次元の非定常数値解析を実施した。その結果、数値解析結果として計算される試料表面温度の最高値が高くなるにつれて、試験結果の発火頻度が高くなる傾向を示した。試料表面温度が高くなるにつれて、試料の自然発火性が増すので、解析結果と試験結果は定性的に合致していた。また、試料表面温度の最高値と PCTFE (Polychlorotrifluoroethylene) の自然発火温度を比較することにより、解析結果は定量的にもある程度の妥当性があることが分かった。バルブ下流側圧力、バルブ開時間が、ガスケットの発火特性に与える影響について、解析結果から有用な知見を得ることができた。

A flammability of gaskets in the oxygen atmosphere when a valve is rapidly operated has been measured using an ignition testing device to interpret a phenomenon of the ignition by an adiabatic compression. Calculations by CFD (Computational Fluid Dynamics) were performed to evaluate those experimental results. The finite grid has almost the same configuration as that of the experimental apparatus, and a two-dimensional fluid flow analysis in a tube was conducted under the same condition as those in the experiment. As a result, the frequency of ignition was also high in case maximums of sample temperatures were high. A higher risk of ignition increases as maximums of gas temperatures are high. Therefore, it is found that the simulation results are in agreement with the experimental results. In comparison with the AIT (autogenous ignition temperature), it is concluded that the simulation results can be explained quantitatively from the experimental results. The effect of the flammability on a valve opening time and the initial pressure from the valve to the ignition device could be of great value.

#### 1. はじめに

高压酸素ガスに関する発火事故は、公表されている事例だけで毎年数件発生しているが、バルブ等で使用されるガスケットのみの焼損など、公表されていない軽微なものを含めると、さらに多くの事例があると考えられる。発火原因として考えられるのが、断熱圧縮

現象によるガス温度の上昇である。急速にバルブを開いた際に酸素ガスがデットエンド等で断熱的に圧縮され、ガス温度が上昇し、その熱によりガスケット等が自然発火する現象である。さらに周囲の構造物に延焼することにより、発火事故に至ると考えられている。

当社では、本現象の把握のために、発火模擬試験装置を用いて、酸素雰囲気下において急速にバルブを開いた際の有機材料ガスケットの発火特性を測定している。第1報では、有機材料ガスケットの発火特性を定

\* 開発・エンジニアリング本部ガスエンジニアリング統括部シミュレーションセンター  
\*\* 開発・エンジニアリング本部山梨研究所安全・物性研究室

量的に測定し、設備や操作条件の改善に役立つ知見が得られた<sup>1)</sup>。

近年の数値解析技術の発達によって、圧縮性流体として取り扱うべき解析が汎用のCFD (Computational Fluid Dynamics) ソフトウェアで可能となった。高圧酸素配管における断熱圧縮現象によるガス温度上昇について、バルブの開操作を模擬した数値解析を実施し、ガス温度などの挙動を検討した<sup>2)</sup>。また、バルブ下流側にオリフィスを設置した場合について、同様の数値解析を実施し、上記発火模擬試験装置での試験結果と解析結果を比較することにより、解析結果の妥当性を検証するとともに、その影響を検討した<sup>3)</sup>。

本書では、第1報<sup>1)</sup>のバルブ下流側圧力、バルブ開時間を変更した場合の試験に関して数値解析を実施して、試験結果と解析結果を比較することにより、解析結果の妥当性を検討するとともに、その定量的な影響を検討する。

## 2. 試験方法

試験方法は、第1報による<sup>1)</sup>。本報では概要を示す。**Fig. 1** に試験装置模式図を示す。バッファータンクに、接続配管、高速作動弁、測定配管が順に接続され、さ

らに測定配管先端に発火治具が接続される。発火治具には、ガスケットの試料(厚み2mm)を管閉端に設置できる。試料は、酸素ガスのシール材料としてよく用いられるPCTFE (Polychlorotri-fluoroethylene) を使用する。

試験手順は以下の通りである。まず試料を準備し、試験装置に設置する。バルブの上流側には10-25 MPa、30℃の酸素ガスを、バルブの下流側には0.1-0.6 MPa、30℃の酸素ガスを充填する。高速作動弁を開操作して試料を断熱圧縮による高温場に曝露させ、試料の発火状況を確認する。試料の発火が起これなければ、同じ試料を用いて最大5回試験を繰り返す。同じ試験条件で25回程度の試験を実施して、発火する割合を発火頻度として試験結果を整理する。

弁下流側圧力を変更した場合(0.1-0.6 MPa)、弁開時間を変更した場合(0.04-10 s)の試験をそれぞれ実施する。

## 3. 数値解析方法

数値解析方法は、筆者らによる<sup>2)</sup>。本報では概要を示す。**Fig. 2** に代表的な解析系を示す。Fig. 1の試験装置に対して、計算負荷を軽減するため管中心軸で対

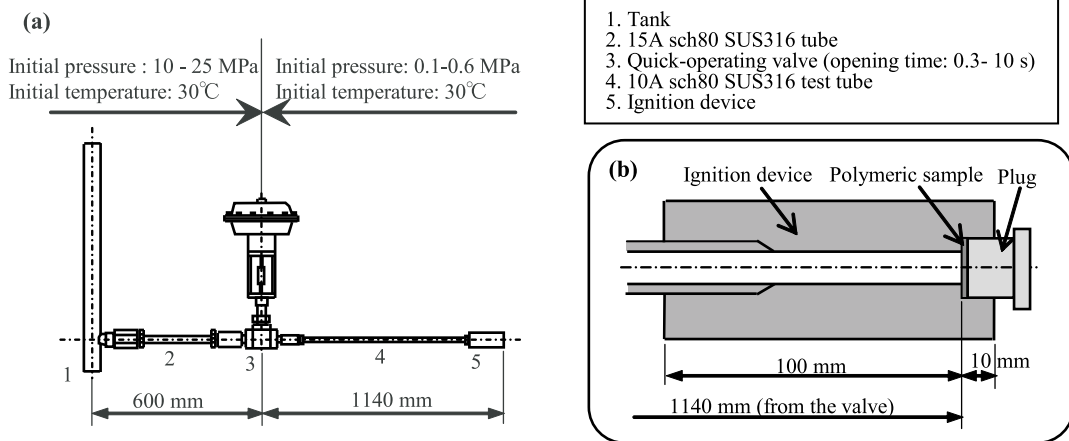


Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus. (a) overall diagram, (b) close-up diagram of the ignition device



Fig. 2 A schematic diagram of the finite grid. (a) overall view, (b) close-up near the sample

称性を考慮できるように2次元解析系を作成する。実際の弁は複雑な構造をしているが、厚みのないオリフィスとして取り扱い、弁操作を模擬する。

管および試料と酸素ガスのエネルギー輸送は、壁関数を使用することにより考慮する。管と外部雰囲気とのエネルギー輸送は、自然対流伝熱係数を  $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、外部雰囲気温度を  $30^\circ\text{C}$  として計算する。管内および試料内の熱伝導伝熱も考慮し、管材質は SUS316 (密度  $\rho = 7930 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 比熱  $C_p = 550 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 熱伝導度  $\lambda = 16.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) 製とした。また、PCTFE の物性値は、 $\rho = 2144 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $C_p = 864 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  $\lambda = 0.21 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  を使用する。酸素ガスの密度は理想気体の状態方程式で、比熱、粘性係数、熱伝導度は温度の多項式関数(4次)で入力する。試料の発火現象、すなわち試料の熱分解、熱分解ガスの反応などは計算せず、ガス温度、試料表面温度から試料の発火現象を検討する。

解析条件を Table 1 に示す。初期条件として、弁の上流側には 10–25 MPa,  $30^\circ\text{C}$  の酸素ガスを、弁の下流側には 0.1–1.1 MPa,  $30^\circ\text{C}$  の酸素ガスがそれぞれ静止状態で存在する。その初期状態から試料表面温度が最高値に到達する時間まで非定常数値解析を実施する。なお、CFD ソフトウェアには FLUENT6.2.22 を使用する。

Table 1 Simulation conditions.

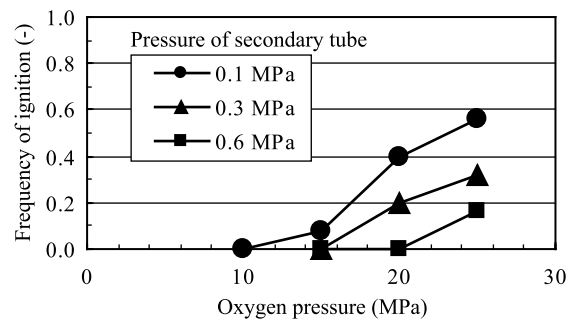
Time ※	Initial pressure up-stream of the valve	Initial pressure down-stream of the valve
Case 1		
0.045 s	10–25 MPa	0.1 MPa
	25 MPa	0.3 MPa
	15–25 MPa	0.6 MPa
	25 MPa	1.1 MPa
	4.17 MPa	0.1 MPa
Case 2		
0.24 s	15–25 MPa	0.1 MPa
1.5 s	15–25 MPa	0.1 MPa

※ Time : valve opening time

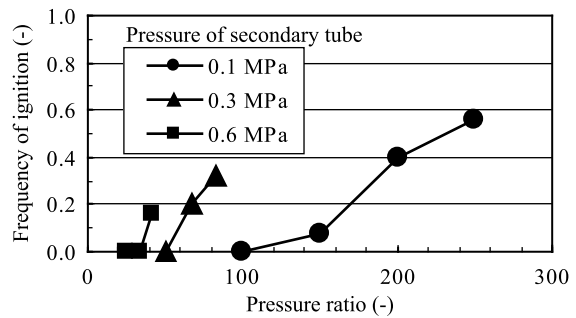
## 4. 結果と考察

### 4.1 試験結果

バルブ下流側圧力を変更した場合の試験結果を Fig. 3 に示す。Fig 3 (a) ではバルブ上流側圧力で発火頻度を整理した。バルブ下流側圧力が高くなるとともに、発火頻度は低下した。断熱圧縮現象によるガス温度上昇は、バルブ上流とバルブ下流の圧力比に依存すると考えられるので、発火頻度を圧力比で整理した (Fig 3 (b))。同じ圧力比の場合、弁下流側圧力が高く



(a) Oxygen pressure upstream of the valve



(b) Pressure ratio

Fig. 3 Effect of frequency of ignition on the oxygen pressure downstream of the valve<sup>4)</sup>.

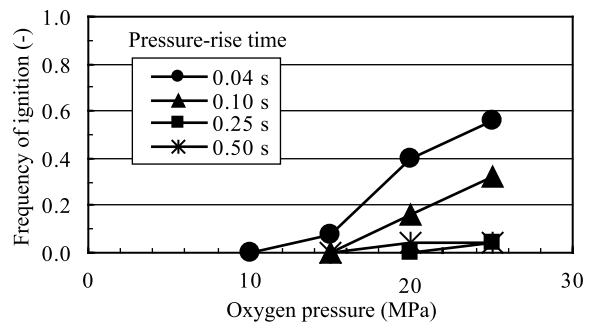


Fig. 4 Effect of frequency of ignition on the valve opening time<sup>4)</sup>.

なるにつれて発火頻度は高くなった。

バルブ開時間を変更した場合の試験結果を Fig. 4 に示す。凡例には試料近傍の圧力上昇時間を示した。圧力上昇時間が長くなると、発火頻度は低下した。

### 4.2 解析結果の検証

ガスケット試料の発火現象は、試料近傍のガス温度が高温になり、その熱が試料に伝熱することにより開始される。試料は他に発火源がない状態で自然発火するので、自然発火する直前の試料温度は、自然発火温度に近いと考える。試験結果として発火頻度が多い条件では、解析結果として試料表面温度は高く、自然発火温度と何らかの関係があると推測される。

試験結果と解析結果を比較した図を、Fig. 5 に示す。横軸は数値解析結果である試料表面温度の最高値であり、縦軸は試験結果である発火頻度である。試料表面

温度の最高値は、全解析時間において試料表面温度が最も高くなった時の値である。試料表面温度の最高値が高くなるにつれて、発火頻度が高くなった。解析結果と試験結果は定性的に合致していた。

Fig. 5にはPCTFEの自然発火温度(AIT: Autogenous Ignition Temperature)を記載しているが、これは、Fig. 6から引用した値である。PCTFEの自然発火温度の酸素圧力依存性はほとんどなく、その自然発火温度は約360℃であった。試料表面温度の最高値がPCTFEの自然発火温度と同じ値となるのは、Fig. 5より発火頻度が0.4-0.8の時と推測され、発火頻度が高い条件であった。数値解析は定量的にもある程度の妥当性があることが分かった。

発火頻度を試料表面温度の最高値で定量的に整理できる意義は大きいと考える。ある供給系に対して断熱圧縮現象によるガスケット等の発火危険性を検討する場合、本解析方法を用いて表面温度の最高値を算出して、その値から発火頻度をおおよそ予測できる可能性がある。そのためには、さらにデータを収集し、試料表面温度の最高値とガスケットの発火頻度の関係を明確にする必要がある。

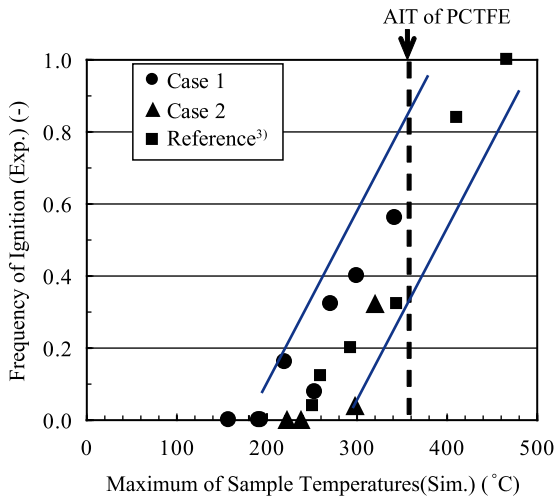


Fig. 5 Comparison between simulation results and experimental results.

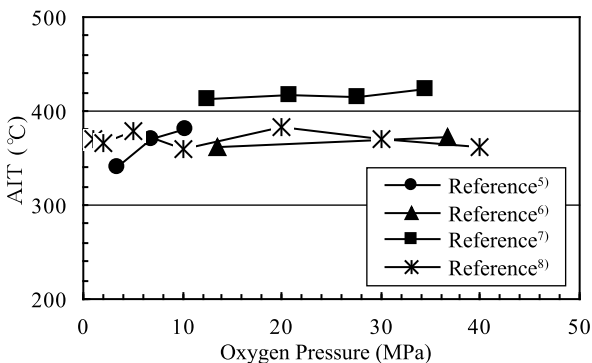


Fig. 6 Effect of oxygen pressure on the AIT of PCTFE.

4.3 バルブ下流側圧力の影響 (解析結果)

Fig. 7, Fig. 8に圧力比とガス温度の最高値、試料表面温度の最高値の関係を示す。ガス温度の最高値は、全解析系、全解析時間においてガス温度が最も高くなった時の値である。ガス温度最高値は、圧力比で整理可能であった。一方、試料表面温度の最高値はバルブ下流側圧力に依存しており、同じ圧力比の場合、バルブ下流側圧力が高くなるにつれて、発火頻度(試験結果)と同様に試料表面温度の最高値は高くなる傾向であった。Fig. 9に同じ圧力比の条件(圧力比:

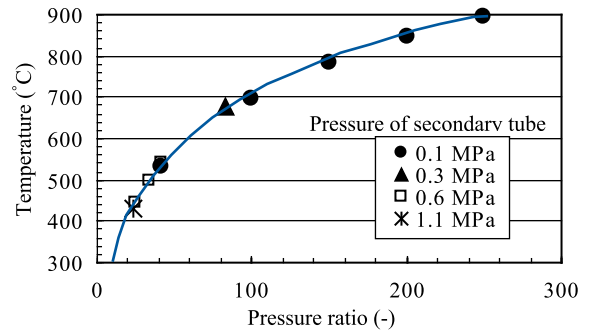


Fig. 7 Maximum gas temperature profiles at a function of pressure ratio.

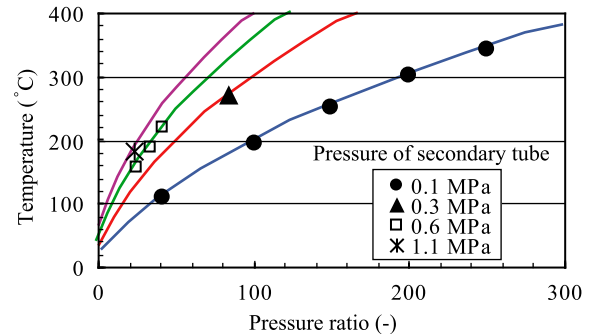


Fig. 8 Maximum sample temperature profiles at a function of pressure ratio.



(a) Pressure upstream of the valve: 25 MPa, Pressure downstream of the valve: 0.6 MPa at 0.044s



(b) Pressure upstream of the valve: 4.17 MPa, Pressure downstream of the valve: 0.1 MPa at 0.044 s

Fig. 9 Gas temperature profiles close to the ignition device (pressure ratio:42).

42) のガス温度分布を示す。試料表面温度が最高値に到達した時間の分布である。ガス温度最高値は同じであるが、試料表面近傍のガス温度分布が異なっていた。バルブ下流側圧力が高い条件のガス温度は、バルブ下流側圧力が低い条件より全体的に高くなった。本発火現象において、温度が上昇するガスは、初期にバルブ下流側に存在したものであり、そのガスがバルブ上流側の高圧ガスに圧縮されて高温になる。同じ圧力比の場合、バルブ下流側圧力が高くなるにつれて、バルブ下流側ガス量が増加するので、高温ガス領域が増加したガス温度分布となる。その結果、試料への伝熱量が増加して、試料表面温度の最高値が高くなると考える。

4.4 バルブ開時間の影響 (解析結果)

Fig. 10, Fig. 11 に圧力上昇時間とガス温度最高値、試料表面温度の最高値の関係を示す。横軸を試料近傍の圧力上昇時間として図示した。圧力上昇時間が長くなるとともに、ガス温度最高値、試料表面温度の最高値は低下する傾向であった。圧力上昇時間が長くなると、ガスから管への伝熱量や試料表面から試料内部への伝熱量が増加するので、ガス温度や試料表面温度が低下するためである。試料表面温度の最高値は、圧力上昇時間が200 ms 以上では一定値に近づく傾向が見られた。

5. まとめ

酸素雰囲気下において急速にバルブを開いた際の断熱圧縮による有機材料ガスケットの発火現象について、2次元の非定常数値解析を実施した。数値解析結果として計算される試料表面温度の最高値が高くなるにつれて、試験結果の発火頻度が高くなる傾向であり、解析結果と試験結果は定性的に合致していた。また、ガスケットの自然発火温度から、解析結果には定量的にもある程度の妥当性があることが分かった。バルブ下流側圧力、バルブ開時間が、ガスケットの発火特性に与える影響について、解析結果から有用な知見を得ることができた。

今後、数値解析による検証を続け、安全な酸素供給システムの確立に貢献するとともに、現象を明らかに

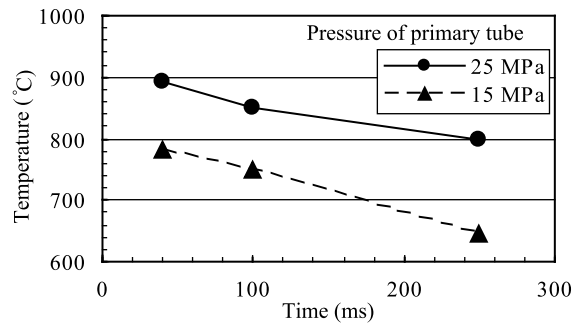


Fig. 10 Maximum gas temperature profiles at a function of the time of pressure increasing.

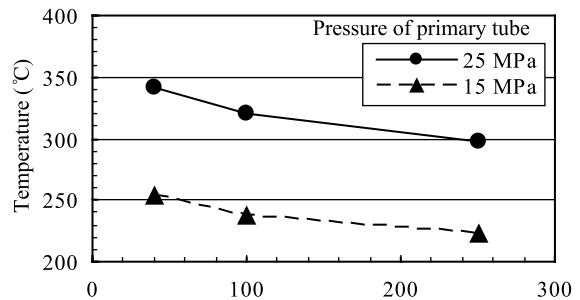


Fig. 11 Maximum sample temperature profiles at a function of the time of pressure increasing.

することにより事故防止に繋がりたいと考える。

参考文献

- 1) 土屋茂・大陽日酸技報 . (26) , 12-17 (2007) .
- 2) 中林宏行 , 長坂徹 , 土屋茂 . 大陽日酸技報 . (24) , 28-33 (2005) .
- 3) Nakabayashi, H.; Tsuchiya, S.; Inomata, H. *Journal of Fluid Science and Technology*, paper number: 08-0305, 2008.
- 4) 土屋茂 . 高圧ガス . 43 (8) , 646-651 (2006) .
- 5) Bryan, C.J.; Hirsch, D.B.; Haas, J.; Beeson, H.D. *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Ninth Volume*, ASTM STP 1395, West Conshohocken, 2000, 87-100.
- 6) McIlroy, K.; Zawierucha, R. *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Second Volume*, ASTM STP 910, Philadelphia, 1986, 98-107.
- 7) Chou, T.C.; Fiedorowicz, A. *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Eighth Volume*, ASTM STP 1319, Philadelphia, 1997, 319-349.
- 8) 中林宏行 , 鈴木明 . 新井邦夫 , 安全工学研究発表会講演予稿集 . 36, 67-68 (2003) .