

## 断熱圧縮現象によるガス温度上昇に関する数値解析とその検証

## Numerical Analysis of an Increase in Gas Temperature by an Adiabatic Compression and Evaluation of the Analysis Results

中林 宏行\*      長坂 徹\*      土屋 茂\*\*  
NAKABAYASHI Hiroyuki    NAGASAKA Toru      TSUCHIYA Shigeru

断熱圧縮によるガス温度上昇を定量的に把握するため、管閉端部を持つ高圧ガス配管において、弁を開操作する場合のガス挙動数値解析をCFDソフトによって実施した。その結果、高圧側の初期圧力が10 MPaの場合、ガス温度の最高値は733℃に、高圧側の初期圧力が25 MPaの場合、ガス温度の最高値は895℃にそれぞれ到達した。管内圧力挙動として、圧力最高値が高圧側の初期圧力値より高くなる現象も解析された。また、数値解析値を検証するため、試験装置によってガス挙動を測定した。解析値と測定値のガス圧力挙動は合致していたが、ガス温度の測定値は解析値に比べて低くなった。そこで、間接的にガス温度の評価を行うため、ポリマー材料を管閉端に設置してガス挙動測定と同じ条件で弁を開操作する材料発火試験を実施した。材料発火試験結果は数値解析により説明できることから、ガス温度は数値解析値の方に妥当性があることが分かった。

To quantify an increase in gas temperature arising from an adiabatic compression, fluid flow in high-pressure tube with closed end was studied using computational fluid dynamics (CFD). As a result, the maximum gas temperature reaches 733 °C with the initial pressure at high-pressure side being 10 MPa and 895 °C with the pressure being 25 MPa. Concurrently, the maximum gas pressures are found to be higher than the initial pressures at high-pressure side. The measurement of fluid flow with the experimental apparatus was also carried out to evaluate the simulated results mentioned above. Though gas pressure profiles between the simulated and experimental results are almost equivalent, gas temperatures of experimental results are much lower than those of simulated results. To indirectly evaluate gas temperature, ignition tests were conducted with placing a polymeric sample at the end of the tube. It has been concluded that the simulated temperature is more realistic than the measured temperature since the results of ignition tests can be generally explained from the simulated ones.

## 1. はじめに

近年、酸素充填工場において、バルブシートなどが焼損する事故が報告されている。主な発火原因として頻繁に議論されるのが、断熱圧縮現象によるガス温度の上昇である。この現象は主に弁を開操作する場合に起こるが、弁下流側の低圧ガスが弁上流側の高圧ガスによって圧縮され、低圧ガスが管閉端部で高温になる

現象である。高温部分にバルブシートなどの可燃物があると、その可燃物が自然発火し、さらに周囲の構造物に延焼することにより、事故に至ると考えられている。

断熱圧縮現象によるガス温度の上昇を推算する方法として、次の熱力学的な計算式が一般的に知られている。本計算式は、低圧ガスが等エントロピー的に断熱圧縮された場合について状態量を推算することができる。

\* 開発・エンジニアリング本部つくば研究所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

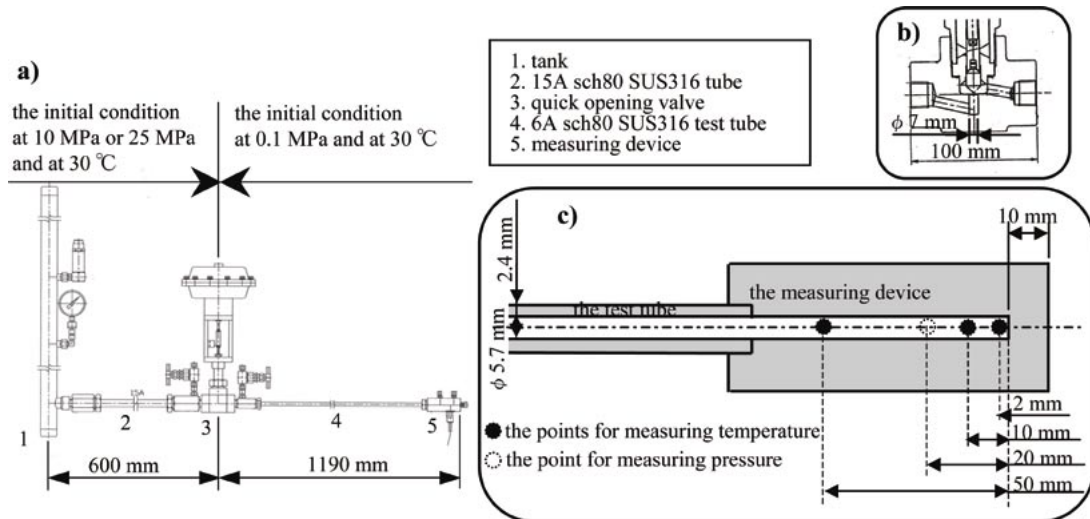


Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus: a) Overall diagram, b) Close-up diagram of the valve, c) Close-up diagram of the end of the tube.

$$\frac{T_f}{T_i} = \left[ \frac{p_f}{p_i} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1)$$

しかし、高圧ガス配管において弁を開操作する際に発生する低圧ガスの圧縮現象は、必ずしも等エントロピー的な現象だけではなく、非等エントロピー的な衝撃波による断熱圧縮現象も想定する必要がある。

断熱圧縮現象によるガス温度の上昇は、従来から測定されてきた<sup>1)</sup>。しかし、ガス温度測定方法の問題や現象が瞬時的であることから、ガス温度の測定値はバルブシートなどの自然発火温度より低くなり、実際の発火現象との整合性がとれていなかった。実際の高圧ガス配管で起こる断熱圧縮現象によるガス温度の上昇は、把握されていなかった。

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) ソフトで可能となってきた。高圧ガス配管において高圧ガスと低圧ガスを遮る弁を瞬時に開操作するケースを想定し、管内酸素ガス挙動の数値解析が実施された<sup>2)</sup>。しかし、計算機的能力不足のため長時間の計算ができず、ガス温度の最高値が解析できていないこと、実際の弁開操作を模擬していないことなどの問題があった。

本研究では、高圧ガス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、CFD ソフトによって弁開操作を模擬した数値解析を実施し、ガス挙動を定量的に把握することを目的とする。また、試験で得られたガス挙動と比較することにより数値解析法の評価を実施する。

## 2. 試験方法

数値解析結果を検証するためにガス挙動を測定した試験装置を Fig. 1 に示す。試験装置はバッファータンク、高速作動弁、測定配管、測定部等で構成される。約3Lの容量のバッファータンクには、接続管、高速作動弁 (フジキン製, Model M2D4-150D-004-ELB)、測定配管が順に接続され、さらに測定配管先端に測定部が接続される。高速作動弁以外の試験装置には、試験開始時のガス温度を一定にするため、リボンヒータを設置している。測定部は内部に管閉端を有し、またガス圧力、温度を測定するために圧力トランスデューサ (NEC 三栄製, Model 9E02-P3), K タイプ熱電対 (ネツシン製, シース外径φ 0.25 mm) を設置する。熱電対は管閉端から2, 10, 50 mm の各位置に、いずれも配管中央部に配置し、圧力トランスデューサは管閉端から20 mm の位置に配置する。

弁の上流側には10 MPaあるいは25 MPa, 30 °Cの酸素ガスを、弁の下流側には0.1 MPa, 30 °Cの酸素ガスを充填し、その状態から高速作動弁を作動させ、ガス挙動を測定部で測定する。ガス挙動データは、1 μs ごとにデジタルレコーダに取り込まれる。なお、酸素ガスは工業用酸素ガス (酸素濃度99.5 vol% 以上) を用いる。

間接的にガス温度を評価する方法として、Fig. 1 の試験装置を使用して材料発火試験を実施する。材料サンプルはディスク形状 (φ 5.7 mm, 厚み2 mm) とし、Fig. 2 に示すように試験装置の管閉端に設置される。試験手順は以下の通りである。まず材料サンプルを準備し、Fig. 2 のように試験装置に設置する。上述

したガス挙動測定試験と同じ条件になるように酸素ガスが充填される。弁を開操作して材料サンプルを断熱圧縮による高温場に曝露させた後、材料サンプルの発火の有無を確認する。材料の発火が起こらなければ、同じ材料サンプルを用いて5回発火試験を繰り返すこととする。材料サンプルの材質はポリマー材料とし、PTFE (Polytetrafluoroethylene, teflon) と Nylon6,6 (Polyamide) を使用した。

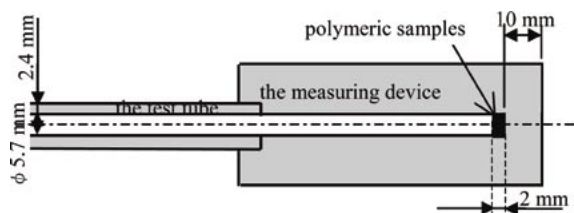


Fig. 2 A schematic diagram of the polymeric sample placed close to the end of the tube for the ignition tests.

### 3. 数値解析方法

Fig. 3に解析系を示す。Fig. 1の試験装置に対して、解析負荷を軽減するため管中心軸で対称性を考慮できるように二次元解析系を作成した。Fig. 3の計算格子数は約19000である。実際の弁は複雑な構造をしているが、計算の制約上厚みのないオリフィスとして取り扱った。また、酸素ガスと管の伝熱を精度よく解析できるように、管内壁近傍の最初のノード長さは60μmと細かくした。なお、CFDソフトにはFLUENT6.1.22を使用する。

実際の弁の開操作方法を模擬するために、弁は初期状態では閉じているが、時間が経過するとともに徐々に開き、一定時間で全開になるようにCFD上で模擬した。その模擬状況をFig. 4に示す。弁開操作は、時間と弁が開く面積が比例するよう模擬している。弁は0.028s後に全開となる。

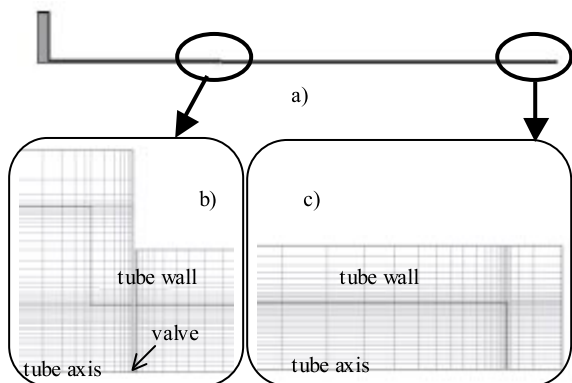


Fig. 3 A schematic diagram of the finite grid: a) Complete diagram; b) Close-up diagram near the valve; c) Close-up diagram close the end of the tube.

FLUENTでは、支配方程式を有限体積法により空間離散化する。対流項に流束差分法を用い、時間の離散化には、陽解法、陰解法を用いることができる。陽解法では多段階タイムステップアルゴリズムにより離散化し、陰解法では、前処理された支配方程式を二重タイムステップ法により扱う<sup>3)</sup>。本解析系では、解析初期から現れる可能性がある衝撃波を捕捉するため、タイムステップは全解析領域で同じである必要があり、前処理を行わない陽的線形化と陽解法が最適である。支配方程式(質量、運動量、エネルギーの各保存式)を以下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \mathbf{W} dV + \iint [\mathbf{F} - \mathbf{G}] \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho v_x \\ \rho v_y \\ \rho E \end{Bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{Bmatrix} \rho v v_x + p i \\ \rho v v_y + p j \\ \rho v E + p v \end{Bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix}$$

流れの粘性モデルには、Spalart-Allmarasモデルを用いた。Spalart-Allmarasモデルは、特に、壁に拘束された領域の流れが関与する航空宇宙分野への応用のために設計されたもので、逆圧力勾配のある境界層に対して良い結果を与えることが示されている<sup>4)</sup>。本解析では、管内ガス流れという壁に拘束された流れであり、さらに超音速流れが想定されるので、Spalart-Allmarasモデルを選択した。

管と管内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

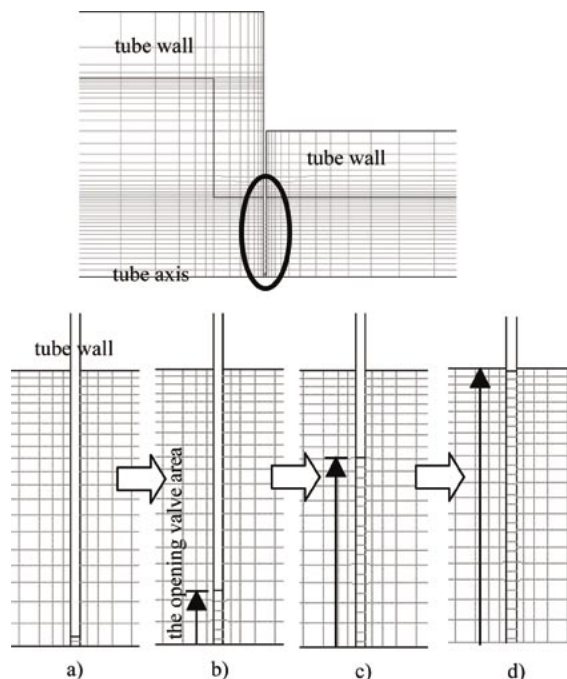


Fig. 4 A schematic diagram of the valve operation: a) at the initial condition; b) at 0.001 s; c) at 0.014 s; d) at 0.028 s (completely open).

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  $30^\circ\text{C}$  として計算される。管肉厚内の熱伝導伝熱も考慮し、管材質は SUS316 ( $\rho=7930\text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $C_p=550\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  $\lambda=16.3\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) 製とした。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。

弁の上流側と下流側の管内酸素ガス圧力、温度をガス挙動測定試験と同じ条件に初期化し、その状態から2次元の非定常数値解析を実施する。

#### 4. 結果と考察

##### 4.1 ガス挙動(数値解析結果)

Fig. 5 にガス最高温度挙動を示す。この図は、各時間において最も酸素ガス温度が高くなった値をプロットしたものである。酸素ガス最高温度は急激に上昇し始め、約  $0.02\text{ s}$  後に最高値に到達し、初期圧力が  $10\text{ MPa}$  の場合には  $733^\circ\text{C}$ 、初期圧力が  $25\text{ MPa}$  の場合には  $895^\circ\text{C}$  という高温となった。その後、ガス最高温度は低下していき、初期圧力が  $10\text{ MPa}$  の場合、 $3\text{ s}$  後には  $200^\circ\text{C}$  以下となった。管外壁からの放熱と弁上流側の常温ガスとの混合によって、ガス温度は低下すると考える。ガス最高温度が高温となる時間は短く、本現象は瞬時的であることが分かった。

Fig. 6 にガス分布挙動を示す。初期圧力が  $10\text{ MPa}$  の場合の数値解析結果である。ガス温度が高温となっているのは、管閉端部近傍のみであり、ごく限られた領域であることが分かった (Fig. 6 d)。ガス温度が最高値を示す位置は、時間が経過すると、管内壁近傍

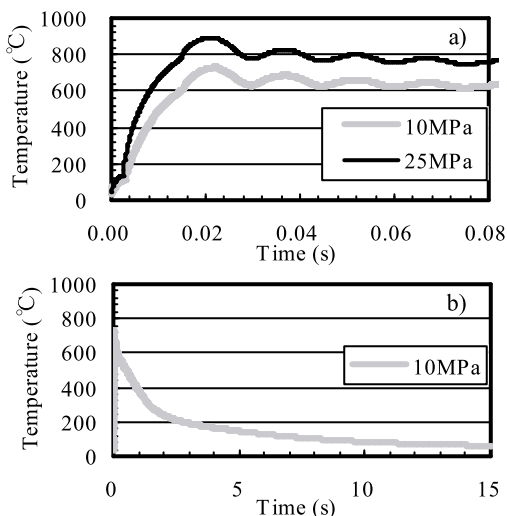


Fig. 5 Maximum of gas temperature profiles at a function of time: a) profiles to  $0.08\text{ s}$  at the initial pressure of  $10\text{ MPa}$  and  $25\text{ MPa}$ ; b) profiles to  $15\text{ s}$  at the initial pressure of  $10\text{ MPa}$ .

から管中心軸上に移行した (Fig. 6 g)。また、解析初期には弁近傍に高压ガスが膨張することによって形成される、初期温度  $30^\circ\text{C}$  より低い温度領域が存在する。その領域は、時間が経過していくと小さくなっていき、約  $0.02\text{ s}$  後には存在しなくなった。

Fig. 7 に管温度が最も高くなった時間における管温度分布を示す。初期圧力が  $10\text{ MPa}$  の場合の数値解析結果である。管内ガス温度は前述した通り、非常に高温となるが、管温度は最高  $8^\circ\text{C}$  程度しか上昇しなかった。管材質として熱伝導率の大きい金属材料 (SUS316) を想定して解析したため、熱が蓄積せず管温度が上昇しないと考える。しかし、ポリマー材料のような熱伝導率の小さい材料が管閉端部に存在すると、材料温度は金属材料より上昇すると予測でき、材

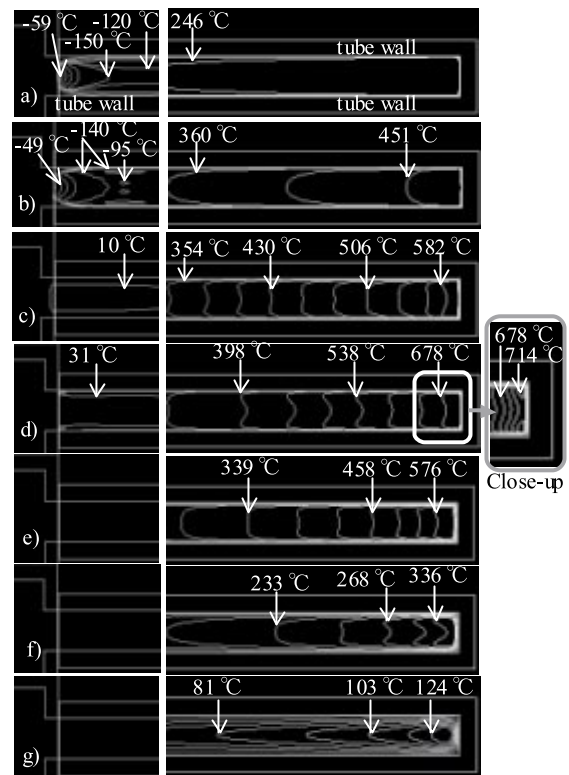


Fig. 6 Gas temperature profiles close to the end of the tube and close to the valve; the flow field from the tank to the valve is initially filled at  $10\text{ MPa}$ : a) at  $0.005\text{ s}$ ; b) at  $0.01\text{ s}$ ; c) at  $0.015\text{ s}$ ; d) at  $0.02\text{ s}$ ; e) at  $0.1\text{ s}$ ; f) at  $1\text{ s}$ ; g) at  $10\text{ s}$ .

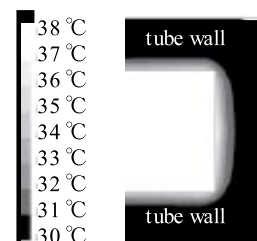


Fig. 7 Tube temperature profiles close to the end of the tube at  $0.039\text{ s}$ .

料の発火危険性も増大すると考えられる。

Fig. 8に管閉端から20mmの位置の圧力挙動を示す。圧力は一定の周期で振動していた。圧力の最高値は初期圧力より高く、初期圧力の1.1倍程度となった。解析初期から弁上流側を伝播する膨張波と圧縮波(衝撃波)との干渉によるものと考え。本現象は後述する試験結果でも観察されているし、他論文でも報告されている<sup>2)</sup>。

#### 4.2 解析値の検証

解析値と測定値のガス挙動を比較したものをFig. 9に示す。ガス温度測定値は、管閉端から2mmの位置の結果である。Fig. 9の時間0sは、管閉端から20mmの位置の圧力挙動において、圧力が上昇し始める直前の時間としている。ガス圧力挙動において解析値と測定値は、実際の弁の複雑さを考慮すると、概ね同じ挙動を示している。一方、ガス温度の測定値は、解析値に比べて大きく低下した。前述した数値解析結果から、本現象においてガスが高温となる領域は管閉端近傍のごく限られた領域であり、さらにガスが高温となっている時間は瞬時である。ガス温度の測定方法に問題があると考えられるが、ガス温度について

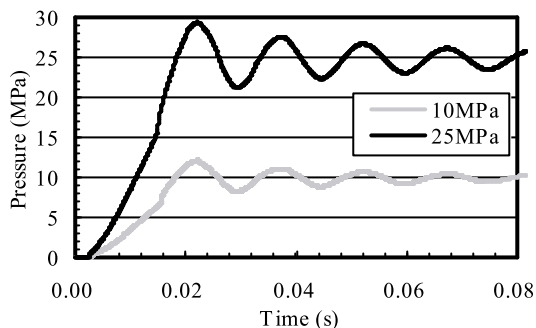


Fig. 8 Gas pressure profiles at a distance of 20 mm from the end of the tube at a function of time.

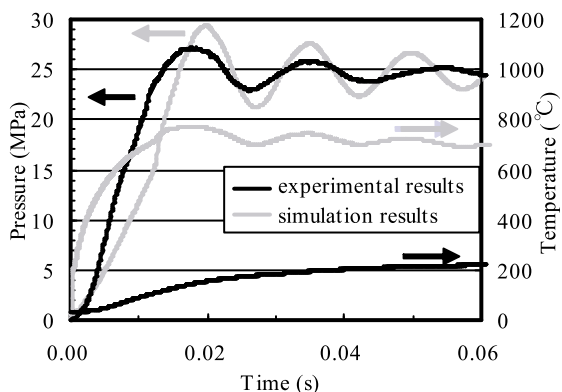


Fig. 9 Gas pressure and temperature profiles at a distance of 2 mm (temperature) and 20 mm (pressure) from the end of the tube at a function of time<sup>10)</sup>; the flow field from the tank to the valve is initially filled at 25 MPa.

は解析値と測定値の妥当性を次節で検討する。

#### 4.3 ガス温度評価

ガス温度について間接的な評価を実施するために材料発火試験を実施した。その結果をTable 1に示す。PTFEの発火数は、初期圧力が異なってもほぼ同じであった。一方、Nylon6,6においては、初期圧力が25MPaの場合の発火数は、初期圧力が10MPaの場合に比べて大幅に増加していた。材料による試験結果の違いを発火現象から以下のように考察した。本発火現象は、まず断熱圧縮によって生成される高温ガスからサンプルに熱が伝えられていき、材料サンプル温度が徐々に上昇していく。もし材料サンプル温度が材料の自然発火温度より上昇するならば、材料サンプルは自然発火し、燃焼すると考えられる。したがって、本材料発火現象が起こる直前のサンプル温度は、材料の自然発火温度にほぼ等しくなっていると推定される。

Table 1 Results of the ignition tests<sup>10)</sup>.

Material	Initial pressure of 10 MPa		Initial pressure of 25 MPa	
	Tests	Ignitions	Tests	Ignitions
PTFE	25	0	25	1
Nylon 6,6	25	0	26	13

\*Tests represent number of tests and ignitions represent number of ignitions.

Fig. 10に酸素圧力と試験材料の自然発火温度の関係を示す。本図は文献からのデータをまとめたものである。PTFEとNylon6,6の自然発火温度は、酸素圧力依存性があまりなく、それぞれ約400℃以上、約200℃であった。PTFEとNylon6,6の自然発火温度が異なるため、材料によって発火試験結果が異なると考えることができる。

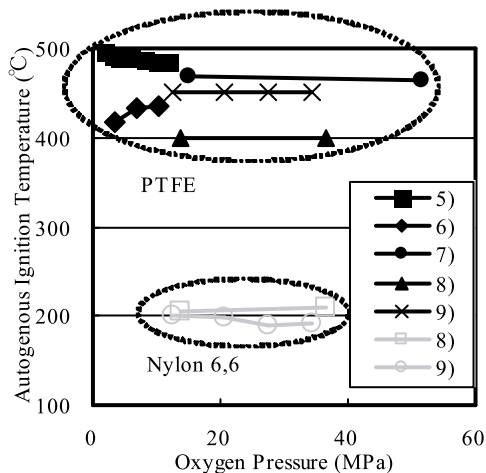


Fig. 10 Effect of oxygen pressure on the autogenous ignition temperature (AIT) of polymeric materials<sup>10)</sup>.

材料発火試験の状況について、CFDソフトを用いた数値解析を実施した結果をTable 2に示す。初期圧力が10MPaの場合、材料サンプル温度の最高値は113℃であったが、それと比較して初期圧力が25MPaの場合、材料サンプル温度の最高値は184℃と解析され、自然発火温度に近くなった。そのため、材料発火試験において初期圧力が25MPaの場合にNylon6,6の発火数が増加したと考えられる。材料発火試験結果は、必ずしも管閉端部のガス温度履歴を正確に反映しているわけではないが、定性的に考えて、材料発火試験結果はある程度数値解析によって説明できることが分かった。したがって、Fig. 9のガス温度については、解析値の方が測定値より妥当性があると考えられる。

Table 2 The simulation results in ignition tests<sup>10</sup>; sample material is Nylon6,6.

Initial pressure	Maximum temperature	
	Sample (°C)	Gas (°C)
10 MPa	113	703
25 MPa	184	908

## 5. まとめ

高压ガス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、CFDソフトによって弁開操作を模擬した数値解析を実施した。その結果、高压側の初期圧力が10MPaの場合、ガス温度の最高値は733℃に、高压側の初期圧力が25MPaの場合、ガス温度の最高値は895℃にそれぞれ到達した。また、管内圧力挙動として圧力最高値が高压側の初期圧力値よりも高くなる知見が得られた。

実験で得られたガス挙動と比較することにより解析値の評価を実施した。解析値と測定値のガス圧力挙動は合致していたが、ガス温度の測定値は解析値に比べてずっと低くなった。間接的にガス温度の評価を行うため、材料発火試験を実施した結果、数値解析により材料発火試験結果を説明できることから、ガス温度は数値解析値の方に妥当性があることが分かった。今後さらに実験などを追加し、詳細な検討を実施する予定である。

## 謝辞

本研究は経済産業省産業技術研究開発制度に基づき、「超臨界流体利用環境負荷低減技術研究開発プロジェクト」において、(独)新エネルギー・産業技術総

合開発機構の支援のもと実施されたものである。ここに記して謝意を表す。また、本研究を実施するにあたり、有用なご助言ご指導を頂いた東北大学 猪股宏教授に謝意を表します。

## 使用記号

$A$	: area	( $m^2$ )
$C_p$	: specific heat capacity	( $J kg^{-1}K^{-1}$ )
$E$	: total energy	( $J kg^{-1}$ )
$i, j$	: orthogonal unit vector	(-)
$p$	: pressure	(Pa)
$q$	: heat flux	( $W m^{-2}$ )
$T$	: temperature	(K)
$t$	: time	(s)
$V$	: volume	( $m^3$ )
$v$	: overall velocity vector	( $m s^{-1}$ )
$\gamma$	: specific heat ratio	(-)
$\lambda$	: thermal conductivity	( $W m^{-1}K^{-1}$ )
$\rho$	: density	( $kg m^{-3}$ )
$\tau$	: shear stress	(Pa)
添字		
$f$	: final condition	
$i$	: initial condition	
$x, y$	: Cartesian coordinates	

## 参考文献

- 1) 大阪府高压ガス安全協会. 高压ガス安全ニュース. 224, 21-40 (2002).
- 2) Ducrocq, J.; Barthelemy, H.; Roy, D. Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Ninth Volume, ASTM STP 1395, West Conshohocken, 2000, 224-239.
- 3) Fluent Inc. FLUENT 6.1 User's Guide. Lebanon, 2003.
- 4) Spalart, P.; Allmaras, S. Technical Report AIAA-92-0439, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
- 5) 駒宮功額, 森崎繁, 琴寄崇. 安全工学. 13 (3), 142-147 (1974).
- 6) 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.
- 7) Nihart, G.J.; Smith, C.P. Compatibility of Materials with 7500 psi Oxygen. Tonawanda, NY, Union Carbide, Linde Division, 1964, Report AD 608260.
- 8) McIlroy, K.; Zawierucha, R. Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Second Volume, ASTM STP 910, Philadelphia, 1986, 98-107.
- 9) Chou, T.C.; Fiedorowicz, A. Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Eighth Volume, ASTM STP 1319, Philadelphia, 1997, 319-349.
- 10) Nakabayashi, H.; Inomata, H.; Nagasaka, T.; Tsuchiya, S. Journal of Chemical Engineering of Japan, paper number: 05WE076, 2005.