超高圧天然ガスパイプラインにおける亀裂発生時のガス減圧特性

The Characteristics of Natural Gas in the Pipeline under Crack Occurrence and Pressure Reduction

杉江壮志,　東大院, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, tsugie@fel.t.u-tokyo.ac.jp
高木周,　東大工, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, takagi@mech.t.u-tokyo.ac.jp
松本洋一郎,東大工, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, ymats@mech.t.u-tokyo.ac.jp
Takeshi SUGIE, Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN
Shu TAKAGI,　Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN
Yoichiro MATSUMOTO, Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656

In recenr year, the pressure in the pipeline is getting higher and higher and once the crack initiated, the crack runs on the surface of the pipeline. This propagating shear fructure may lead to the catastrophic failure of the pipeline. In this study, the decompression in the pipeline with the propagating shear fructure is simulated. In this rapid decompression, condensation can occur. It results in higher pressure and agrivation of the propagating shear fructure. The condensation is assumed as the gas-to-particle conversion and is simulated using the homogeneous and the heterogeneous nucleation theory. The decmpression is simulated with Harten-Yee's upwind TVD scheme.

１．緒言

近年，エネルギー源の安定供給，安全保障のために天然ガスの使用が検討されている．また天然ガスはクリーンなエネルギーとしても注目されている．輸送量が多量で中短距離の輸送においてはパイプラインによる輸送が経済的に優位と言われており，天然ガスの普及にはパイプラインによる輸送の実現が重要となってくる．従来の安全基準は設計圧力 10MPa であったが，技術の発達および輸送効率の問題などから，近年の天然ガスパイプラインでは 15MPa 以上が想定されている．このため従来の安全基準は最新のパイプライン建設技術に対して安全性が十分確保されておらず，改めてパイプラインの安全性を検討する必要がある．パイプラインには高速延性破壊（Propagating Shear Fracture）という独特の破壊形態がある．この破壊はパイプの周方向に延性破壊を起こしながら，亀裂が軸方向に数百 m/sec で伝播するというものである．この破壊の際，内部ガスはパイプ外部へと吹き出し減圧する．内圧が素早く減圧すればパイプ壁への負荷は低減し破壊はおさまりやすくなると考えられるが，減圧過程で生じる凝縮現象によって内部ガスは減圧を妨げられる．このため減圧過程での凝縮現象を解析することが重要となっている．

２．減圧数値解析手法

パイプ内の圧力を解析するため数値解析を行ってきた．高速延性破壊では亀裂がパイプ上を伝播すると共にパイプが開口していって内部ガスが外に吹き出す．急速に開口するため，そのモデルとして図１のようなギロチン破断モデルを採用してきた．内部を１次元流とし１次元 Euler 方程式を Harten-Yee's Upwind TVD を用いて差分化した[(1)]．内部ガスは C2 ガスと呼ばれる天然ガスを用いた．C2 ガスの組成を表１に示す．

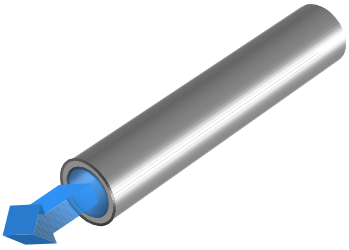

Fig. 1 Full-Bore Opened Model

C2 ガスの状態方程式として，

$$p = rRT + \left(B_0RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4}\right)r^2 + \left(bRT - a - \frac{d}{T}\right)r^3 + a\left(a + \frac{d}{T}\right)r^6 + \frac{c}{T^2}r^3\left(1 + \gamma r^2\right)\exp\left(-\gamma r^2\right) \tag{1}$$

で与えられる BWRS 状態方程式を用いた[(2)]．図２に初期圧力を 15MPa:2.0MPa，温度 273.15K とした場合の圧力の解析結果を示す．減圧の過程で圧力が一定に保たれる部分が現れるがここでは凝縮現象が起こり，潜熱が発生することで圧力・温度が一定に保たれると考えられる．

Table 1 C2Gas Compositions (mol %)

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	iC_4H_{10}	
89.57	4.70	3.47	0.24	
nC_4H_{10}	iC_5H_{12}	nC_5H_{12}	nC_6H_{14}	
0.56	0.106	0.106	0.075	
nC_7H_{16}	NC_8H_{18}	nC_9H_{20}	N_2	CO_2
0.017	0.008	0.001	0.50	0.72

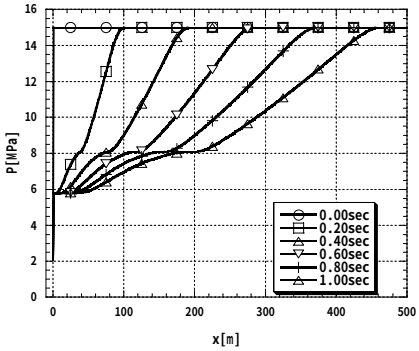

Fig. 2 History of Pressure Distoribution (15MPa:1.5MPa, 273.15K)

この解析では開口形状をギロチン破断，かつ亀裂伝播を無視して解析を行ったが，次にパイプ開口形状の変化を考慮した解析を行った．支配方程式は

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \mathbf{H} = \mathbf{0} \tag{2}$$

Copyright © 2000 by JSCFD

$$\mathbf{Q}=\begin{pmatrix} r \\ ru \\ e \end{pmatrix}\frac{A}{A_0},\quad \mathbf{E}=\begin{pmatrix} ru \\ ru^2+p \\ (e+p)u \end{pmatrix}\frac{A}{A_0},\quad \mathbf{H}=\begin{pmatrix} 0 \\ -p\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{A}{A_0}\right) \\ 0 \end{pmatrix},$$

となる．ここで A は局所での管断面積，A_0 は元の管断面積であり，A/A_0 は管の開口比となる．初期条件を 15MPa:2.0MPa，温度 273.15K とし様々な開口比での解析結果を図３に示す．これは時刻１秒でのパイプ内の圧力分布であるが，開口比の小さいものは出口でチョークを起こし高圧に保たれている様子が確認できる．ここでやはり開口形状および亀裂伝播の影響を無視することは出来ないと考えられるため，現在亀裂伝播を考慮した解析及びモデル化に取り組んでいるところである．

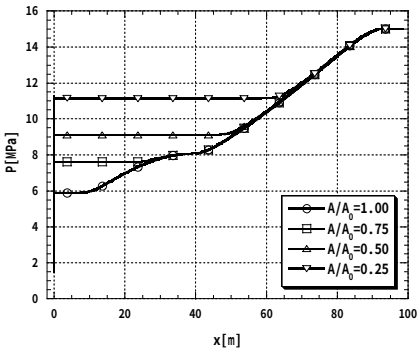

Fig. 3 Pressure Distoribution with Area Ratio
(15MPa:1.5MPa, 273.15K)

３．凝縮数値解析手法

次に圧力を高く保つ要因である凝縮現象の解析について述べる．高速延性破壊における凝縮では空中にミストが発生し流れていくと仮定し，その凝縮機構は均一核生成及び不均一核生成であるとして解析を行う[(3)]．

均一核生成では気体中に半径 a^* m

$$a^*=\frac{2s}{\left(r_\ell \Re_g T \ell n\left(\dfrac{p_g}{p_s}\right)\right)} \tag{3}$$

の液滴が生成速度 J 個/m^{3}sec

$$J=\frac{p}{\sqrt{2mkT}}\cdot 4pa^2\cdot n\cdot \exp\left(-\frac{\frac{4}{3}pa^2 s}{kT}\right) \tag{4}$$

で生成される．ここで s は表面張力，m は分子１個あたりの質量，k はボルツマン定数である．飽和蒸気圧 p_s は半径 r の液滴表面で

$$p_s=p_{s\infty}\exp\left(\frac{2s}{r_\ell \Re_v T_w r}\right) \tag{5}$$

となり，p_∞ は平板上での飽和蒸気圧である．

不均一核生成では既存の液滴核の表面で凝縮が生じ液滴が成長する．機構としては拡散，分子衝突，化学反応などが挙げられる．ここでは液滴表面への分子衝突によるもののみを考えると，液滴半径の成長速度[m/sec]は

$$\frac{dr}{dt}=\frac{v_\ell(p-p_s)}{\sqrt{2pmkT}} \tag{6}$$

となる．

初期状態として 293K，10MPa の水蒸気を考え，均一核生成および不均一核生成によって徐々に凝縮を起こしていった場合の解析を行った．図４にこのときの圧力変化を示す．凝縮が起こるにつれ内部圧力が上昇していることが確認される．このとき飽和度は 1.0 に近づいていく．

図 4 に 293K，10MPa の水蒸気が徐々に凝縮を起こしていった場合の圧力変化を示す．凝縮が起こるにつれ内部圧力が上昇していることが確認される．このとき飽和度は 1.0 に近づいていく．このとき径がある値以下の液滴はすべてなくなり，径が約 8.2x10^{-7}m，個数が 6.801x10^{0}個という液滴が存在するのみとなる．

以上の手法で凝縮を計算し，前述の減圧解析と組み合わせて，膨張波のもとでの非平衡凝縮現象の数値解析を行い，その影響を調べていきたい．

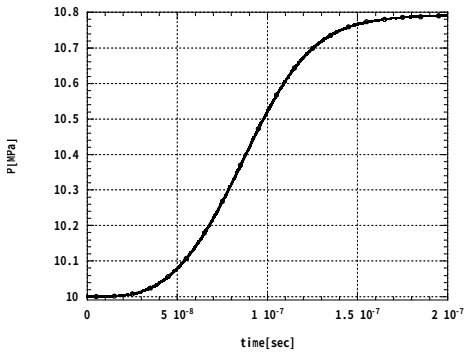

Fig. 4 History of Pressure of H_2O

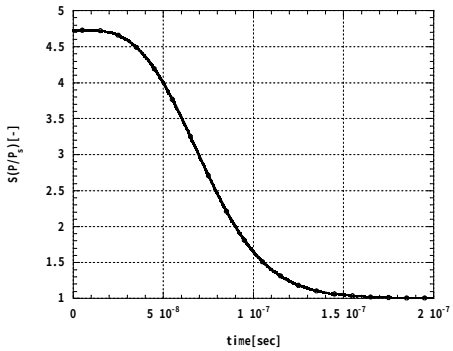

Fig. 5 History of Pressure Ratio
to Saturated Vapor Pressure of H_2O

４．結言

今後，圧縮性流体の解析に凝縮現象解析を組み込み，凝縮をともなう減圧過程の解析を行う．さらに凝縮性ガス成分を複数含む気体での解析を行い，気体組成が凝縮現象及び減圧過程に与える影響を解析したい．

参考文献

(1) 藤井孝蔵，流体力学の数値計算法，東大出版会，1994
(2) Starling,K.E.Powers,J.E.，*Ind.Eng.Chem.Fundam.*，Vol.9，1970，p531-537
(3) 高橋幹二，基礎エアロゾル工学，養賢社，1972

Copyright © 2000 by JSCFD