

海底パイプラインの不安定延性破壊に関する

実験と数値解析

Experimental and Numerical Analyses on Unstable Ductile Fracture in Offshore Pipelines

東京大学工学系研究科システム創成学専攻 106346 中居 寛明

指導教員 栗飯原 周二 教授

1. 序論

1.1 背景

近年、アジアやアフリカの発展途上国の急速な経済成長に伴い、世界におけるエネルギー消費は増加し続けている[1]。中でも天然ガスはその豊かな確認埋蔵量、偏在性の小ささ、熱効率の高さ及び、二酸化炭素排出量の少なさといった他の一次エネルギーに勝る利点をもっており、供給増加が顕著である。また、近年注目を浴びているシェールガスやメタンハードレート等の非在来型天然ガスの生産も増加すると予想されている[2]。これら天然ガスを輸送する際には、数千 km 以下の輸送距離においてはパイプラインによる輸送が経済的であるという試算がなされており[3]、地理的又は経済的条件より海底パイプラインの敷設が必要になる状況が考えられる。

1.2 海底パイプラインの敷設状況

90 年代の欧州において、北海石油天然ガス田の開発を契機に大規模な海底パイプラインの敷設が加速した。現在も、天然ガスの埋蔵量が豊富なロシア、アフリカ、そして中央アジアから欧州へ向けて海底パイプラインの敷設計画が相次いでおり、各国のエネルギー政策の柱となっている[4]。代表的な海底パイプラインとして、近々完成予定のロシアとドイツをバルト海を縦断して結ぶ海底パイプライン”Nord Stream”と、2015 年完成予定のロシアとブルガリアを黒海を横断して結び、イタリア等の欧州諸国へ天然ガスを輸送する”South Stream”がある。前者は総距離 1222km、後者は最大水深 2160m と長距離化及び大水深化が進んでいる。

一方、日本国内においては大規模な海底パイプラインは皆無である。2000 年代前半に基幹天然ガスパイプラインとなるべく、サハリン産天然ガスを主要都市まで輸送する海底パイプラインを敷設する構想があったが、LNG 基地を有する電力・ガス業界が既存の船による輸送を主張したため一旦計画は中断された。しかし、東日本大震災後、多岐に渡るエネルギー供給手段の必要性や分散型電源など電力自由化

に向けた議論が高まり、サハリンパイプライン構想に再検討の兆しが見られる。

1.3 不安定性延性破壊と既存研究

本研究では、海底パイプラインの不安定延性破壊に着目した。不安定延性破壊とは、Fig.1 に示すように、き裂伝播速度とパイプ内の減圧波速度が平衡状態になり、一定の内圧を保ち続けながらき裂が伝播し続ける破壊形態である。地上のパイプラインにおいてこの破壊形態を記述する数値モデルは数多く提案されてきたが、海底パイプラインにおいては漏出ガスと水との相互作用等、水中に特有の現象を物理的考察から定式化した数値モデルは開発されていない。また、海底パイプラインの実大実験はその困難さから過去に数例しか存在せず、安全設計のために技術的根拠を提示する数値モデルの開発が必要である。

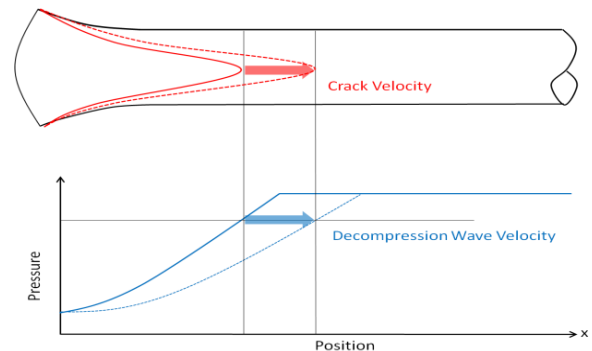


Fig.1 不安定延性破壊機構

1.4 研究の目的

本研究では、水中に特有な現象を物理的仮説に基づいて定式化したガス減圧モデルとき裂伝播モデルを開発することを目的とした。ここで水中に特有な現象とは、

- バブル生成・成長によるガス漏出の抑制
 - バブル生成・成長によって周囲の水が押し退けられることに起因する動的な外圧変化
 - 周囲の水によるパイプ開口変形抑制
- である。

2. ガス減圧モデル

2.1 概要

Fig.2 にガス減圧モデルの概要を示す。任意の面積の漏出口が瞬間的に開口すると仮定し、ガス漏出によるパイプ内での減圧波の伝播とバブル成長及び、バブルが水を押し退けることで生ずる動的な外圧変化を数値的に解析した。

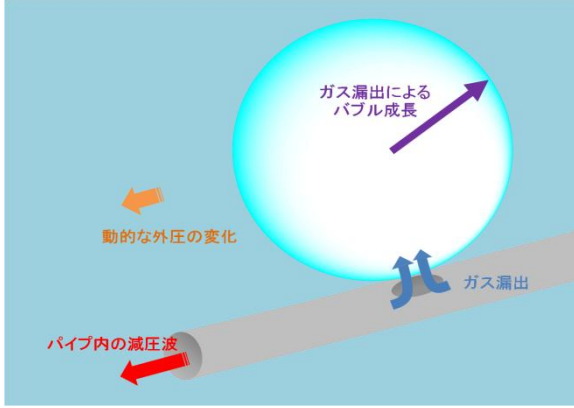
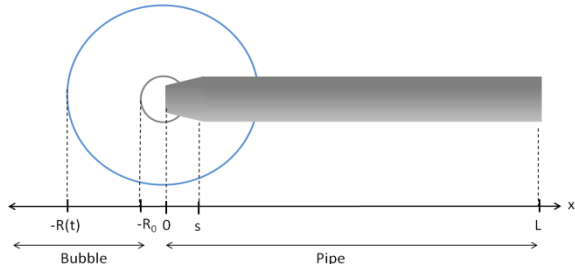


Fig.2 ガス減圧モデル概要

2.2 支配方程式と座標系

本モデルでは、Fig.3 に示すようにパイプ内及び



バブル内の圧力を同一軸上で連続的に解いた。

Fig.3 ガス減圧モデルの座標系

ガスは等エントロピー的に状態変化すると仮定し、パイプ内及びバブル内の支配方程式は、

- パイプ内支配方程式

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u A)}{\partial t} = -A \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial(\rho u^2 A)}{\partial x} \quad (2)$$

- バブル内支配方程式($r=|x|$)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial(p r^2)}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial(\rho u^2 r^2)}{\partial r} + \frac{2p}{r} \quad (4)$$

- 共通

$$\rho = \rho(p) \quad (5)$$

となる。ここで、 ρ は密度、 u は流速、 A はパイプ断面積である。パイプとバブルの連結部($x=0; -R_0$)にお

ける圧力及び密度の時間方向の傾きは、仮にその点がパイプ及びバブルであった場合の傾きの平均であるとした。

2.3 バブルの成長と動的な外圧の変化

バブル端においては、バブル成長速度 u_B 、加速度 \dot{u}_B 、バブル端の圧力 p_B 、及びバブル半径 R_B を用いて以下の関係が成り立つ[5]。

$$\frac{p_B - p_\infty}{\rho_L} = R_B \dot{u}_B + \frac{3}{2} u_B^2 + \frac{4\nu_L}{R_B} u_B + \frac{2S}{\rho_L R_B} \quad (6)$$

ここで、 p_∞ は水圧、 ρ_L は水の密度、 ν_L は水の動粘性係数、 S は表面張力である。数値解法においては、バブル端を移動境界として扱うことでバブルの成長を記述した。

また、バブルが成長することで水が押しのけられ、周囲の水が流れることで圧力が変化する。これを動的な外圧の変化 $p_{out}(r)$ とし、次式で表される。

$$p_{out}(r) = \rho_L \left[\left(\frac{2R_B}{r} - \frac{R_B^4}{2r^4} \right) u_B^2 + \frac{R_B^2}{r} \dot{u}_B \right] + p_\infty \quad (7)$$

3. 大気・水中ラブチャータ試験

ガス減圧モデルを検証するためのデータ収集を目的として、2011年8月及び9月に釧路にて大気・水中ラブチャータ試験を実施した。

3.1 試験方法

ラブチャータ試験とは、Fig.4 に示すように一定の圧力で破裂するようにスリット加工されたラブチャータディスクをパイプ中央に取り付けた状態でパイプを窒素で加圧し、ディスク破裂後の減圧・外圧の動的データを圧力変換器より得る試験である。ガス漏出口の面積が一定であることから、ガス減圧モデルの検証に有効であるために本試験を実施した。

スリット加工時の残厚が異なるディスクを用いて、異なる圧力での試験データを得た。なお、水中ラブチャータ試験ではFig.4 に示すように、水深2.3mの水槽に試験体を沈めて実施した。



(a)試験体全景

(b)ガス噴出装置



(c)ラブチャータディスク

(d)水槽

Fig.4 試験体とラブチャータディスク及び水槽の写真

3.2 試験結果

ラプチャー試験の結果、Fig.5 に示すようにディスクが吹き飛び、水中では大きな水柱が立った。Table.1 にディスクの残厚及び試験圧力の関係を示す。

大気及び水中試験の圧力変化を比較したものをFig.6 に示す。縦軸は試験圧力で割り無次元化してある。なお、パイプ内圧、外圧ともに漏出口付近とそこから 500mm 間隔で圧力変換器を取り付けて動的データを計測した。パイプ内圧力は、ディスク破裂後に減少を始め、漏出流れがチョークする時点で圧力が一定に保たれる。その後、パイプ端から反射してきた減圧波によって再び圧力が減少する。また、大気と水中を比較すると水中の減圧が遅いという結果になった。これは、バブル生成によるガス漏出抑制と水によりディスクの開口が遅延することの2つの要因が考えられる。続いてパイプ外の圧力は、大気では試験圧力の約 2 割しか増加が見られないのに対して、水中では約 6 割の外圧増加が確認され、その後も持続的に外圧が変化するという結果が得られた。



(a)試験後のガス噴出装置 (b)水中試験の様子
Fig.5 試験の様子

Table.1 試験結果

No.	Residual Thickness(mm)	Test Pressure(MPa)	Condition
A1	0.2	3.073	Air
A2	0.4	4.777	Air
A3	0.2	2.911	Air
A4	0.6	6.942	Air
A5	0.4	5.038	Air
A6	0.8	7.539	Air
A7	0.8	8.186	Air
W1	0.2	2.252	Water
W2	0.4	3.856	Water
W3	0.6	5.449	Water
W4	0.8	6.680	Water
W5	0.2	2.227	Water
W6	0.4	3.769	Water
W7	0.8	6.730	Water
W8	0.6	5.610	Water

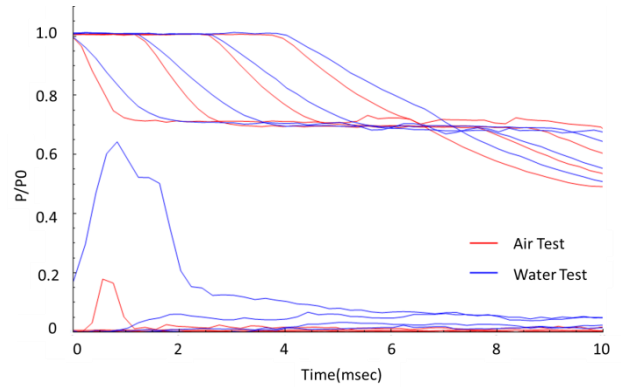


Fig.6 大気と水中の圧力変化比較

4. ガス減圧モデルの整合性検証

ガス減圧モデルを用いて、ラプチャー試験のシミュレーションを実施した。Fig.7 にパイプ内圧(W7)、Fig.8 にパイプ外圧(W4)のシミュレーション結果を示す。黒線が実験結果であり、橙色がシミュレーション結果である。いずれの場合も実験結果を良く再現しており、減圧モデルが現象を正しく記述できていることを確認した。

また、Fig.9 にシミュレーション上での大気と水中の減圧挙動を比較したものを示す。緑の点線はギロチン破断モデルによる解析解であるが、大気中の減圧速度が解析解と一致しているのに対して、水中では減圧が遅れている。以上より、ガス減圧モデルが Fig.6 に示した水中での減圧の遅れを再現できていることを確認した。

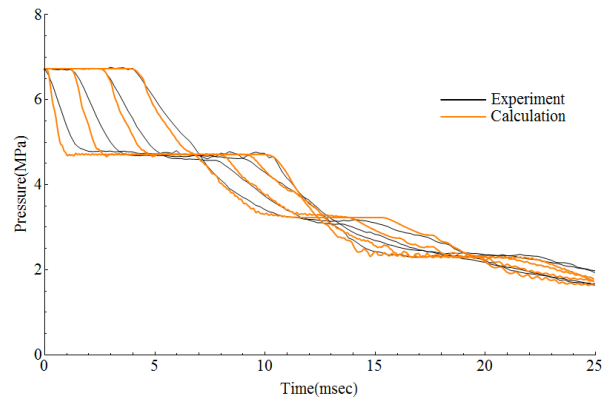


Fig.7 パイプ内圧のシミュレーション結果(W7)

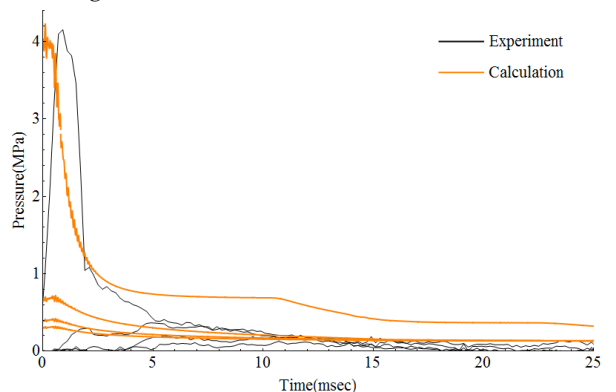


Fig.8 パイプ外圧のシミュレーション結果(W4)

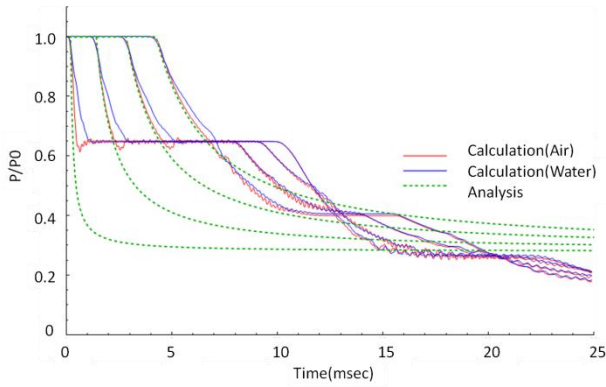


Fig.9 シミュレーションによる大気と水中の比較

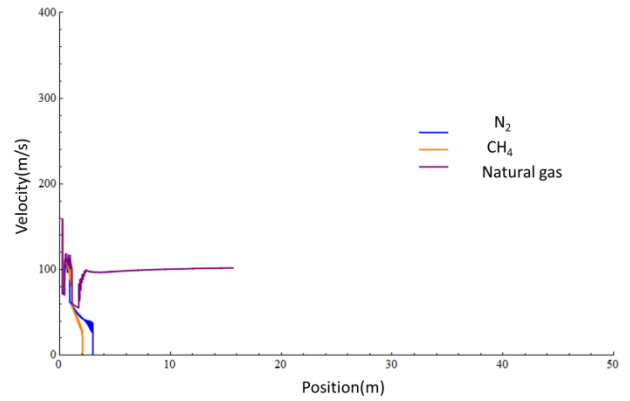


Fig.11 ガス種によるき裂伝播挙動の変化

5. き裂伝播モデルと諸因子の影響分析

5.1 モデル概要

従来 HLP 委員会によって提案されていた実験式に基づくき裂伝播モデルは、き裂伝播速度がき裂先端位置のパイプ内圧力で決まると仮定していたが、本研究ではパイプ内圧力からパイプ外圧力及びフラップ抑制圧力を差し引くことで、水中の減少を考慮したき裂伝播モデルを開発した。ここで、フラップ抑制圧力とは、Fig.10 に示すように、パイプがフラップする際に周囲の水を押し広げるのに必要な圧力である。本研究ではフラッピング速度及び加速度をパイプ先端での複数の仮定に基づいて求め、パイプのフラッピングをバブル成長に見立てることで、式(6)を変形しフラップ抑制圧力を定式化した。

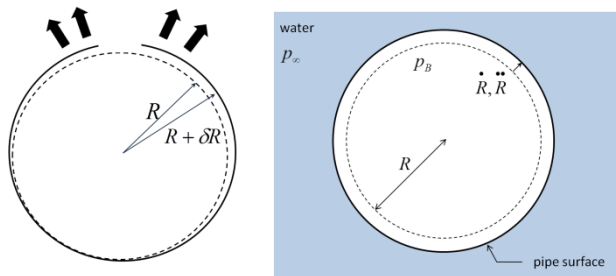


Fig.10 パイプフラッピング時の断面形状とバブル模擬

5.2 諸因子の影響分析

開発したき裂伝播モデルより、基本パラメータである、ガス種、初期圧力、靱性値、パイプ厚さ、降伏強度及び水深を変化させてシミュレーションを実施して、き裂伝播挙動に及ぼす影響を分析した。

Fig.11 と Fig.12 にガス種及び水深を変化させた場合のき裂伝播距離と速度の履歴を示す。軽い気体は音速が高くき裂伝播傾向が強まった。減圧過程で相変化を生じる天然ガスでは減圧が鈍り、伝播傾向が強まった。また、水深が増加するほどき裂伝播停止傾向が強まり、その支配的な因子はパイプ外の絶対圧の増加であることを確認した。

また、初期圧力の増加、靱性値の減少及びパイプ厚さの減少はき裂伝播傾向を強め、降伏強度の増加はき裂伝播速度を高めることを確認した。

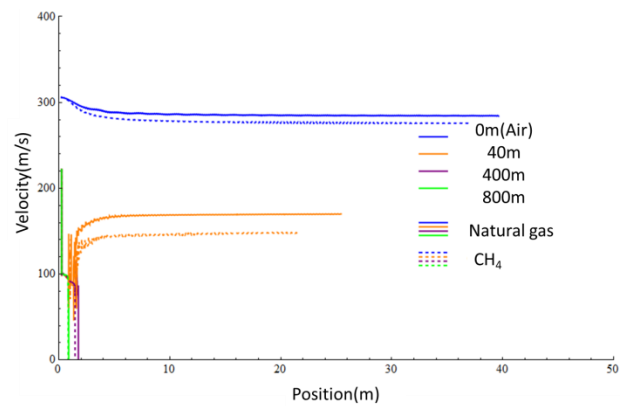


Fig.12 水深によるき裂伝播挙動の変化

6. 結論と今後の課題

本研究の成果は、

- 水中に特有な現象を考慮したガス減圧モデルを開発し、その整合性を確認した
- 水中におけるき裂伝播挙動の傾向を定性的に記述できるき裂伝播モデルを開発した

である。一方で、今後はガス減圧とき裂伝播を連成させること、及びき裂伝播・停止の判定を破壊力学的手法によって定式化し、実験式に依存せず定量的な評価の提示が可能なモデルにする必要がある。

参考文献

- [1] Key World Energy Statistics 2010, IEA.
- [2] 伊原賢. 非在来型天然ガスの開発技術の動向. 配管技術, Vol53, No.9, pp1-10, July 2011.
- [3] Asia Pacific Energy Research Centre. Natural gas pipeline development in northeast asia. March 2000.
- [4] 越後屋佐助. 世界の石油及び天然ガス・パイプライン計画(その 3). 配管技術, Vol53, No10, pp7-13, August 2011.
- [5] C.E.Brennen. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford University Press. 1995.