

高強度ラインパイプ用鋼の高速き裂伝播抵抗の動的測定

研究代表者 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 栗飯原周二

1. 緒言

21世紀は気体エネルギーの時代と言われており、世界的に天然ガスの利用が拡大し、将来的には水素ガス利用へ変遷していくものと予想されている。これに呼応して、高圧天然ガスパイプラインの建設と計画が我が国を含む世界各国で展開されている。これを実現するために、鉄鋼各社では高強度ラインパイプ用鋼が開発されている。

高圧・高強度ガスパイプラインの信頼性確保は喫緊の重要課題である。この中で最も重要なものは高速不安定延性破壊（100m/s以上の高速でき裂が長距離伝播する）を防止することであり、これまでに種々の評価手法が確立されている[1]。ところが、これまでにない高圧・高強度のパイプラインでは従来の手法では、精度よい評価ができないことが指摘されており、早急な解決が必要である[2]。

従来の高速不安定延性破壊に対する評価は半理論・半経験的なものであり、ラインパイプ材の延性き裂伝播抵抗もシャルピー衝撃試験やDWTT（Drop Weight Tear Test）試験による吸収エネルギーを指標としている。これらのパラメータを用いて実大試験のデータを整理しているが、経験的な要素が多く、従来以上の高強度・高圧パイプラインを対象とする場合の精度低下の原因のひとつと考えられる。

本研究では、破壊力学に基づいた高速不安定延性破壊の評価手法を確立するための第一歩として、破壊力学指標を用いてラインパイプ材の延性き裂伝播抵抗を評価し、その特性について考察するものである。

2. 解析方法

一般に、高強度・高延性鋼材の延性き裂伝播は大規模塑性変形を伴う場合が多く、非線形破壊力学の適用が必要である。本研究では、非線形破壊力学パラメータとしてJ積分[3]を適用し、J積分に基づいた延性き裂抵抗曲線(J-R曲線)によりラインパイプ材の評価を行うこととした。

Garwood [4]は、切欠付曲げ試験片について、基本的なJ積分算定式から、き裂成長によるエネルギー消費を考慮した次式のJ積分算定式を導出した。

$$J_n = J_{n-1} \frac{W - a_n}{W - a_{n-1}} + \frac{2U_4}{B(W - a_{n-1})} \quad (1)$$

ここで、 W は試験片幅、 B は試験片板厚、 a はき裂長さ、 U_4 はき裂が a_{n-1} から a_n まで成長する間に試験片に作用する仕事である(Fig.1)。これをもとに、J-R 曲線を導く微分方程式を次式

のように求めた。

$$\frac{dJ}{d\Delta} = -\frac{J}{W-a} \frac{da}{d\Delta} + \frac{2P}{B(W-a)} \quad (2)$$

ここで、 P 、および、 Δ は各々、切欠き付き3点曲げ試験片に作用する荷重と変位である。

式(2)を使えば、 $P-\Delta$ 曲線と $a-\Delta$ 曲線を実験により求めれば、 $J-R$ 曲線を算定できる。

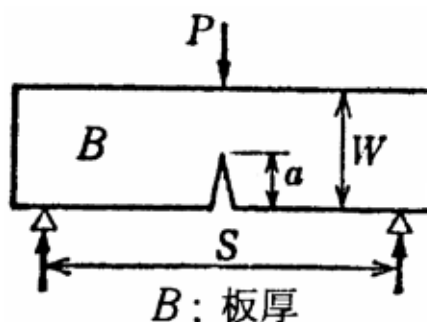


Fig.1 Three-point bend specimen

3. 実験方法

3. 1 動的試験方法

準静的負荷に対する延性き裂伝播抵抗の測定に関しては既に実験方法が確立されている。一方、動的負荷に対する試験法に関しては確立されたものは存在しない。本研究では、落重試験機に動的計測の機能を付け加えることにより、高速延性き裂伝播抵抗曲線の計測を可能とする破壊試験システムを構築した。

Fig.2 に、試験機の外観を示す。落錘は約 100～200kg の範囲で、落下高さは最大約 3m まで調整可能である。最大吸収エネルギーは約 6,000J であり、板厚が 20mm 程度までの試験片を供することができる。ロードセルにより荷重を動的に計測するとともに、レーザ変位計により試験片に与える変位を動的に計測する。両計測値から、 $P-\Delta$ 曲線を得ることができる。一方、高速カメラにより試験片のき裂伝播長さを動的に計測することにより、 $a-\Delta$ 曲線を求めることにした。



Fig.2 Drop-weight test machine

準静的、及び、動的試験によりラインパイプ材の延性き裂伝播抵抗を計測し、試験後の破面を SEM 等の通常の方法により観察した。

3. 2 供試鋼

供試鋼は、外径が 267mm、厚さが 6mm の API 5LX 65mod.鋼管である。Table 1 に機械的特性を示す。Fig.3 に示す切欠き付き 3 点曲げ試験片を鋼管周方向に採取した。切欠きの先端は 0.2mm 幅の機械加工とした。

Table 1 Mechanical property of tested steel

YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	vE(0°C) (J)
503	659	27	70

(Transverse direction)

4. 実験結果

Fig.4 に、準静的試験、及び、動的試験における载荷途中の試験片の変形とき裂伝播の挙動の例を示す。

Fig.5(a),(b)に、準静的試験における $P-\Delta$ 曲線と $a-\Delta$ 曲線を示す。また、Fig.6(a),(b)に、動的試験における $P-\Delta$ 曲線と $a-\Delta$ 曲線を示す。高速カメラにより測定したき裂伝速度は $V=3.0\text{m/s}$ であった。

Fig.7 に、計測結果をもとに、式(2)から求めた J-R 曲線を示す。き裂伝播距離が約 10~15mm の範囲で抵抗値はほぼ一定となることがわかる。この値を $J_{plateau}$ として、準静的試験、及び、動的試験において落錘高さを変化させることによりき裂伝播速度を変化させた場合の値を求めた。結果を Fig.8 に示す。準静的、及び、き裂伝播速度が約 4.5m/s 以下の範囲では $J_{plateau}$ はほぼ一定であった。

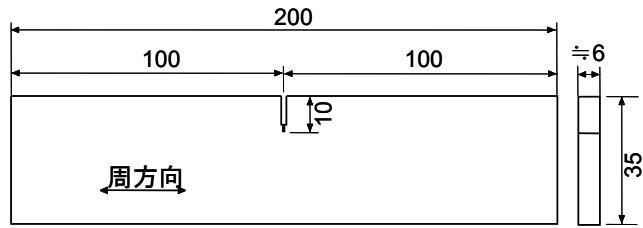
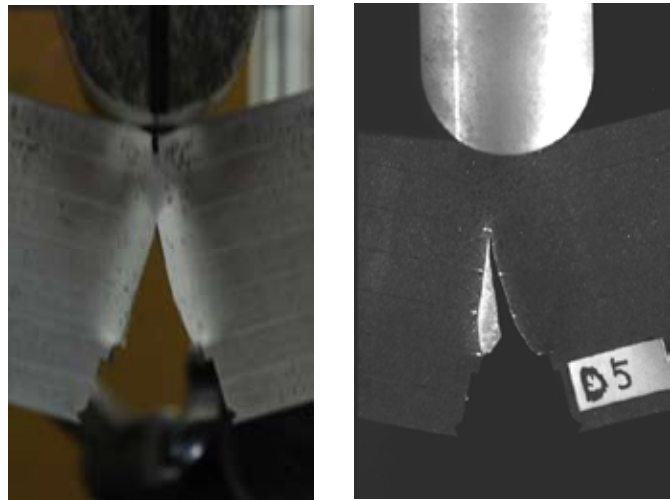


Fig.3 Three point bend specimen (unit in mm)



(a) quasi-static

(b) dynamic

Fig.4 Deformation and crack propagation behaviors.

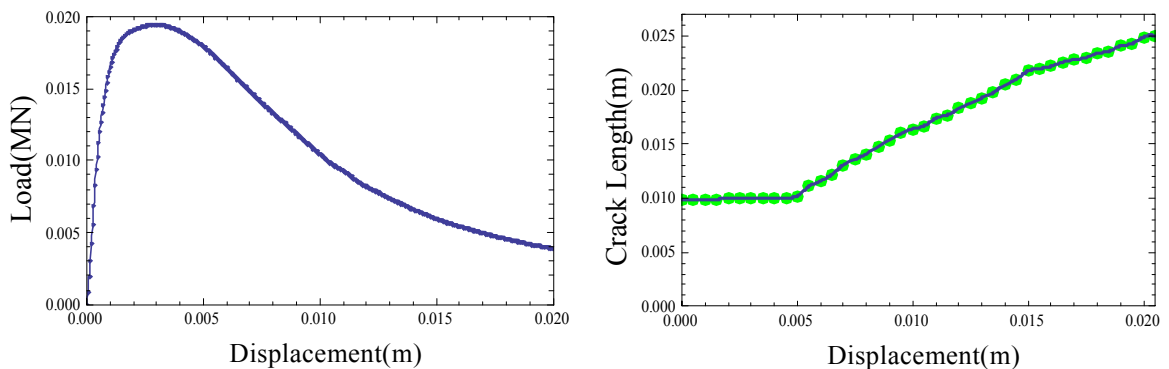


Fig.5 Load-displacement curve and crack length-displacement curve, quasi-static.

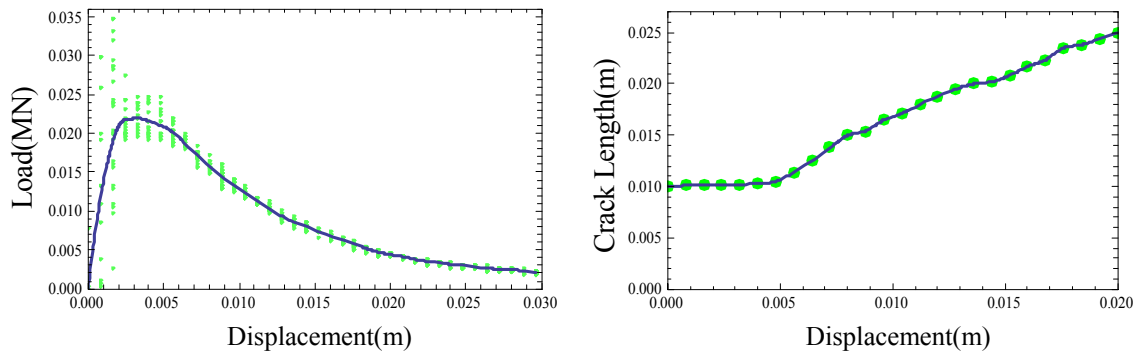


Fig.6 Load-displacement curve and crack length-displacement curve, dynamic.

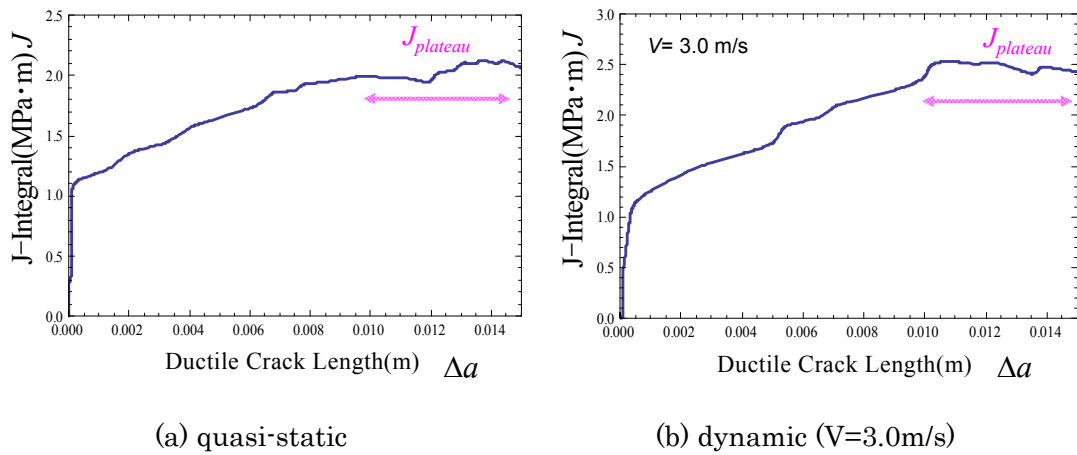


Fig.7 J-R curves

5. 考察

Fig.8 に示したとおり、き裂伝播速度が比較的小さい範囲では、J-R 曲線の飽和値のき裂伝播速度依存性はほとんど認められなかった。ところで、き裂伝播速度が大きくなると、き裂先端近傍塑性域の歪速度が上昇することに伴い、降伏強度は上昇することが予想される。J 積分はき裂先端近傍の変形の程度だけでなく、

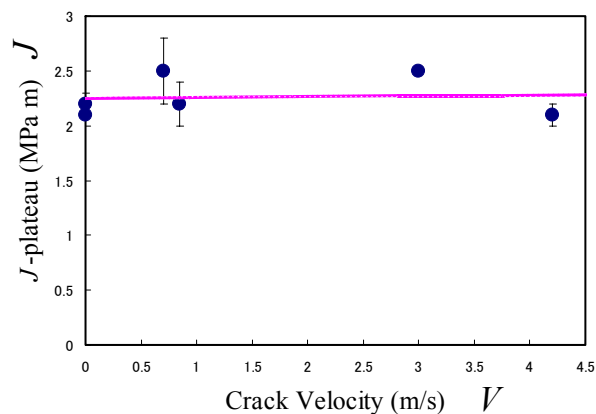


Fig.8 Dependence of J-plateau value on crack velocity.

材料の変形抵抗にも依存する。ここでは、簡単のために、き裂先端近傍変形の指標として CTOA(Crack-Tip Opening Angle;き裂先端開口角)を採り、材料の変形抵抗として、試験における最大荷重(き裂伝播開始点にほぼ一致すると考えることができる)を採り、き裂伝播速度に

よる両者の変化を調査した。ここで、CTOA は、Fig.4 と同様な観察から、伝播中のき裂先端から約 5mm の範囲における開口角度から求めた。結果を Fig.9 に示す。き裂伝播速度上昇に伴い、最大荷重は上昇し、CTOA は減少した。両者の相乗作用により $J_{plateau}$ がき裂伝播速度に依存しない結果が得られたものと考えることができる。

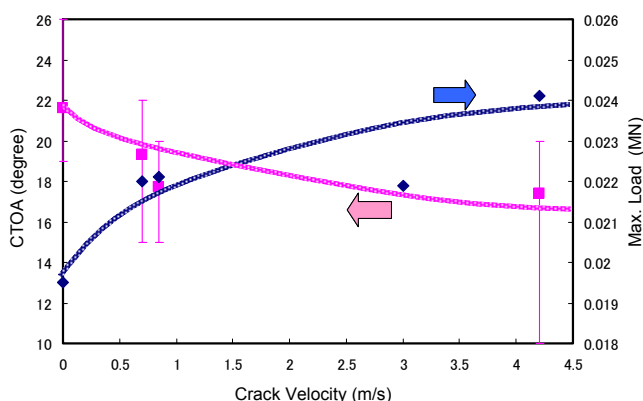
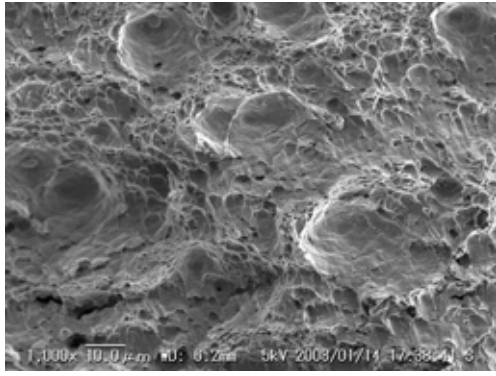


Fig.9 Dependence of CTOA and maximum load on crack velocity

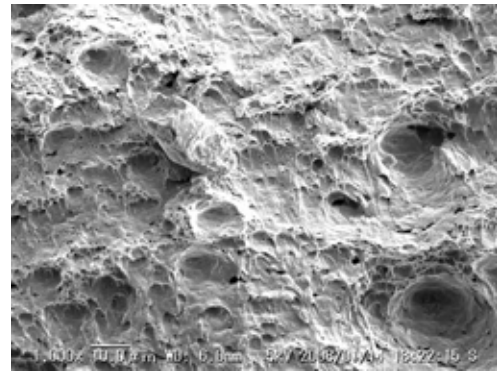
上記の結果から、き裂伝播速度が上昇するほど、CTOA が減少

することが明らかとなった。この理由を解明するために、延性き裂破面の SEM 観察を実施した。延性き裂は板厚のほぼ全体に亘って 45° のせん断破壊を呈していたので、この部分を観察した。結果を Fig.10 に示す。破面はすべてディンプルを呈していた。き裂伝播速度が上昇するに従って、ディンプル径が小さくなっている傾向が認められた。さらに、3次元計測 SEM により同じ破面の観察を行った。結果を Fig.11 に示す。これらの観察結果から、き裂伝播速度が上昇するほど、ディンプルが浅くなっていることがわかる。これらの観察結果から、き裂伝播に伴うき裂先端近傍の歪はき裂伝播速度が大きいほど低下する可能性が示唆される。これが CTOA のき裂伝播速度依存性の大きな原因であると推察される。き裂伝播速度上昇により延性破面上のディンプルが小さく、且つ、浅くなる原因は明らかではないが、歪速度上昇による降伏強度の上昇により介在物や第二相と地鉄界面に作用する剥離応力が上昇し、ディンプル生成が促進されたことが推察される。詳細の検討が必要である。

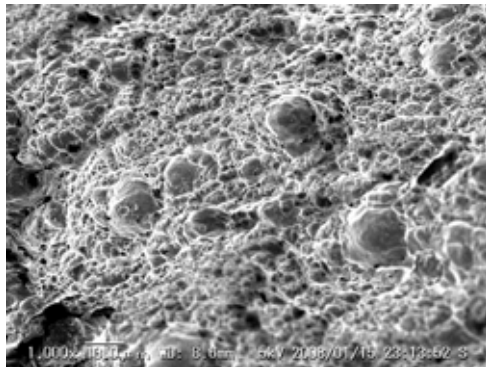
実際のパイプラインにおける延性破壊の伝播速度は 100m/s 以上であり、本研究では計測できない速度範囲である。このような速度域におけるディンプル生成やそれに伴う CTOA の変化を評価する必要がある。さらに、塑性波上限速度に漸近することにより、き裂先端近傍の塑性変形挙動が本研究のような低速度域から大きく変化する可能性も考えられる。高速域における延性破壊挙動のミクロ的・マクロ的な調査が必要である。



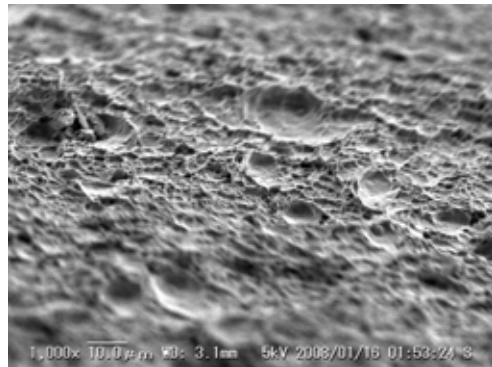
(a) quasi-static



(b) $V=0.7\text{m/s}$

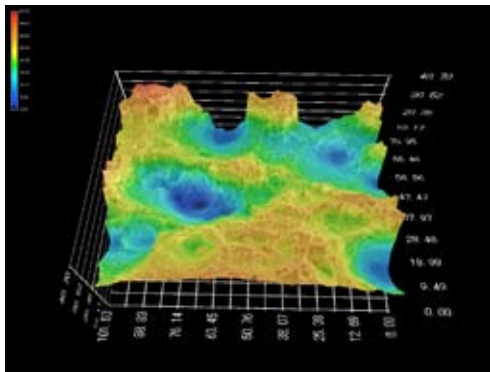


(c) $V=3.0\text{m/s}$

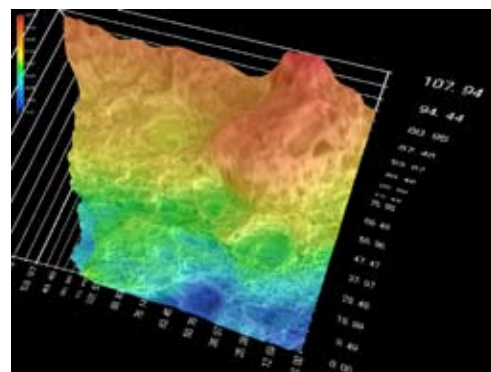


(d) $V=4.2\text{m/s}$

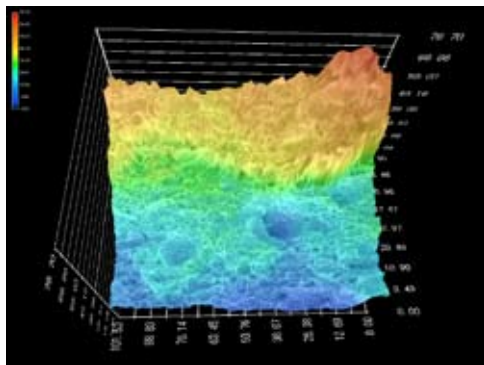
Fig.10 SEM fractography of the fractured surfaces.



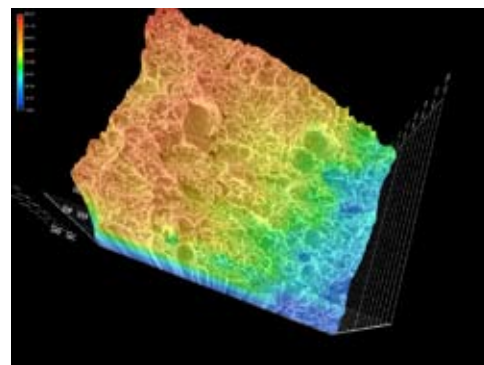
(a) quasi-static



(b) $V=0.7\text{m/s}$



(c) $V=3.0\text{m/s}$



(d) $V=4.2\text{m/s}$

Fig.11 3-D images of the fractured surfaces.

6. 結言

パイプラインの高速延性破壊現象を対象として、延性き裂伝播抵抗を計測するシステムの開発とラインパイプ材の評価を実施した。得られた結論を以下に記す。

- (1) J積分により評価した延性き裂伝播抵抗は、き裂伝播速度が約5m/s以下の範囲において、き裂伝播速度の影響をほとんど受けなかった。
- (2) き裂先端開口角(CTOA)はき裂伝播速度上昇に伴って低下した。CTOAの変化は延性破面のディンプルの形態の変化と対応した。
- (3) J積分で評価した延性き裂伝播抵抗がき裂伝播速度に依存しない結果は、CTOAの変化と歪速度上昇に伴う変形抵抗の変化が相殺した結果であると推定された。

実際のパイプラインにおいて生じる延性き裂伝播の速度範囲に対してさらに検討が必要である。

謝辞

本研究は JFE21世紀財団の研究助成により実施したものである。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] R.J.Eiber, T.A.Bubnik and W.A.Maxey: Fracture control technology for natural gas pipelines, PR-3-9113, PRCI, 1993.
- [2] 牧野ほか、CAMP ISIJ vol.19(2006)-356.
- [3] T.Anderson, Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications, Taylor&Francis, 2005.
- [4] S.J.Garwood, ASTM STP 677, 1979, pp511-532.