

## 討23

低強度高靱性鋼の靱性評価への破壊挙動図（負圧-破壊歪み-温度の関係図）の応用

東北大学 金属材料研究所 ○ 斎藤 栄, 志村 宗昭  
田中 英八郎

## I. 緒言

亀裂先端の破壊過程のメカニズムは、組織因子が重要な役割を司るが、より単純な変形場における破壊のメカニズムと比較できるものである。亀裂先端における応力と歪の解析は普通、組織因子を無視して材料を連続体として扱うことによりおこなわれるけれども、亀裂先端部の変形を特徴づけるような、あるパラメータの臨界値を予測しようとする場合には、力学と微視的組織の相互関係について理解することが必要である。それ故、単純な流動場ではしかめられた破壊条件を、亀裂先端部の変形を特徴づける応力と歪の勾配に適用することは十分に意味のあることである。

高靱性材料は構造用材料の多くを占めているが、そのような材料からなまている構造物が通常の使用条件下で破断する場合、その多くは延性破壊モードで破壊する。亀裂先端部における変形は、そこで形成される応力の多軸状態に依存し、またそれは破壊過程で自体に強い関係をもっている。

本報告では、亀裂先端部で形成される塑性変形域内における破壊の発生のメカニズムに対する Rice-Johnson の解析結果と、単純な多軸応力状態の下での微小空洞の発生、成長と連結および劈開等の挙動を各種の低強度高靱性鋼について調べた実験結果（負圧-破壊歪み-温度関係図）とを関連させて、高靱鋼の靱性を論じる。

## II. 亀裂先端部における変形

脆い材料でも、亀裂先端部における塑性はその破壊過程の中心的特徴である。この塑性の効果は剪断応力の大きさを流動応力の大きさを制限するように、弾性応力の分布を限定することであるが、しかし平面歪条件の下ではその主応力は静水応力成分と三軸応力状態によって、単軸降伏応力よりも大きくなりうる。亀裂先端部塑性域における応力と歪の状態については、古くは Prandtl のすべり線場、近くは Hutchinson, Rice-Rosenfield の漸近表示等が提示されているが、Rice-Johnson は亀裂の開口に伴って大きい幾何学的変化がおこなわれる場合について、三軸性と有効塑性歪  $\bar{\epsilon}^p$  の両方を  $\sigma/\delta$  の関数として提示した。<sup>1)</sup> ここでは初期の鋭い亀裂先端からある一点までの距離であり、 $\delta$  は亀裂の開口度である。 $\bar{\epsilon}^p$  は亀裂先端部は無限大であり、対数ラセンの端（塑性域の端）ではゼロとなる。三軸性を示すなら、相当応力  $\bar{\sigma}$  と平均又は静水応力の比 ( $\sigma_m/\bar{\sigma}$ )、と  $\bar{\epsilon}^p$  の関係を表わす図は、亀裂開口に伴う、塑性域内の一点の変形履歴図でもあり、それらは材料の歪硬化特性に影響される。この一点における材料の、歪、応力またはその組合せがある臨界値に達すると、適当な破壊メカニズムが作動し、こうして亀裂が進展する。応力と歪が  $\sigma/\delta$  の関数であるから、破壊のクライテリオンが応力と歪の特定の組合せを要するものとすれば、その条件をみにす距離  $\delta$  は破壊事象を規定する特定の組織（材料）因子、 $\sigma_m/\bar{\sigma}$  となり、 $\delta$  が臨界値に達すれば破壊がおこなわれることになる。 $\delta$  は COD と同等のものであり、塑性域が小規模であれば一意的に post-yield パラメータ  $J$  および応力拡大係数  $K_t$  と関連づけられる。

しかし、亀裂先端部前方塑性域が全面降伏になれば、応力は  $\sigma/\delta$  の一意関数ではなくなり、変形モードは試片形状および荷重系に依存するようになる。 $J$  や COD による評価が、どんな塑性流動域の範囲まで有効であるかということは、高靱性材料にとって一つの中心問題である。

### Ⅲ. 延性破壊における $\bar{\epsilon}_f \sim \sigma_m/\sigma$ の関係とその応用

微小空洞の発生、成長、連結の過程をとる延性破壊の特質については多くの研究があるが、その本質的な特徴は、破壊を発生させるために必要な  $\bar{\epsilon}_f$  は三軸性  $\sigma_m/\sigma$  の関数である、ということである。亀裂の先端の塑性域内にある一粒子に対して、亀裂の開口に伴ってかかる応力と歪の履歴を考慮して、亀裂先端の変形に延性破壊における  $\bar{\epsilon}_f \sim \sigma_m/\sigma$  関係を重ね合わせることにより、厳密にはないが、その材料の靱性を評価することが出来る。

#### 1. 各種鉄鋼材料における $\bar{\epsilon}_f \sim \sigma_m/\sigma \sim T$ 関係

Dondikの式<sup>2)</sup>にしたがって natural necking profile をもつ引張試験片をNC施盤により削りだし、その引張り試験を行った。この場合、試験片のneck部の中心に形成される静水引張応力はneck部の形状(最小断面の径および曲率半径)から計算出来る。すなわち、三軸性  $\sigma_m/\sigma$  を規定した塑性流動場の中で、その材料の破壊をおこさせることが可能である。このような実験を、S25C, S45C, SM50 および高純度高クロム・フェライト系ステンレス等の鉄鋼材料について、試験温度を変えておこす。その結果を  $\bar{\epsilon}_f \sim \sigma_m/\sigma \sim T$  関係図としてまとめた<sup>3)</sup>。図1はS45Cの場合であるが、 $\bar{\epsilon}_f \sim \sigma_m/\sigma \sim T$  の三次元空間内の曲面として、この材料の破壊挙動が示されている。図中の記号は破壊モードを示すもので、○: 延性破壊, ⊕: 劈開破壊, ⊙: 破壊の開始は延性破壊であるが、亀裂の進展に伴って劈開破壊へ遷移する場合を示す。曲面は破壊モードにより区別されている。試験したすべての鉄鋼材料の破壊挙動は、 $\sigma_m/\sigma$  と  $T$  に依存し、破壊モードに遷移がみとめられる。

#### 2. 亀裂先端塑性域における変形履歴 $\sigma_m/\sigma \sim \bar{\epsilon}_f$ 関係への材料特性 $\bar{\epsilon}_f \sim \sigma_m/\sigma$ の重ね合せ

亀裂先端塑性域(小規模)における  $\sigma_m/\sigma \sim \alpha/\delta$ ,  $\bar{\epsilon}_f \sim \alpha/\delta$  関係から  $\alpha/\delta$  を相殺して求めた  $\sigma_m/\sigma \sim \bar{\epsilon}_f$  関係(歪硬化率を考慮)に、前述の実験から求められた材料特性を示す  $\bar{\epsilon}_f \sim \sigma_m/\sigma$  を重ね合せ、両曲線の交点の  $\alpha/\delta$  の値を求める。この  $\alpha/\delta$  は先の議論から、材料の特性値としての  $\alpha/\delta_c$  である。(図2)

$\alpha/\delta_c$  を一定とすれば、 $\delta_c \propto K_{Ic}^2/\sigma_y E$  の関係にしたがえば、 $\alpha/\delta_c$  の変化は  $K_{Ic}$  の変化に対応する筈である。図3は、温度と  $\alpha/\delta_c$  の関係を示すものであるが、すべての材料で  $\alpha/\delta_c$  が上昇しており、破壊靱性が低下することとあらわしている。この点は、高カルミニウム合金の場合とは対照的である。

組織因子  $\alpha/\delta_c$  の評価は、破壊のマイクロ・メカニズムを破壊靱性と関係づける場合および材料学上、重要な意味をもつものであるが、そのためには  $\delta_c$  の値を評価する必要がある。 $\delta_c$  は、破面の形態や、COD試験または他の破壊靱性試験の結果から推定することも可能である。

### Ⅳ. 劈開破壊条件とその応用

劈開破壊についての研究の集積によれば、劈開は劈開面における主応力(引張)の臨界値をおこるが、そのレベルに静水応力成分  $\sigma_m$  および  $\sigma$  からの歪硬化が寄与する。我々の実験結果は、主応力レベルに対してもプロットしており、また、前述の変形履歴と材料特性の重ね合せにより求められた  $\alpha/\delta_c$  における破壊モードには全面劈開の場合が含まれている。しかし、この場合には、破壊の発生よりも、亀裂伝播のコントロール・プロセスにより、靱性値が規定されるであろう。

注目する必要があるのは、破断が延性破壊によって開始され、つづいて劈開破壊に遷移する場合である。前述の破壊挙動図における ⊙ の領域がこれである。低強度高靱性鋼ではこのようなケースは無視できない。この問題に、前述の亀裂先端における変形の議論を適用すれば、亀裂の伝播に伴って、亀裂先端が初期より鋭くなり、三軸性が増加することを考慮しなければならぬ。すなわち、前からの変形プロセス三軸性の突然の増加により、応力レベルが劈開のレベルとなり、破壊モードが遷移する。

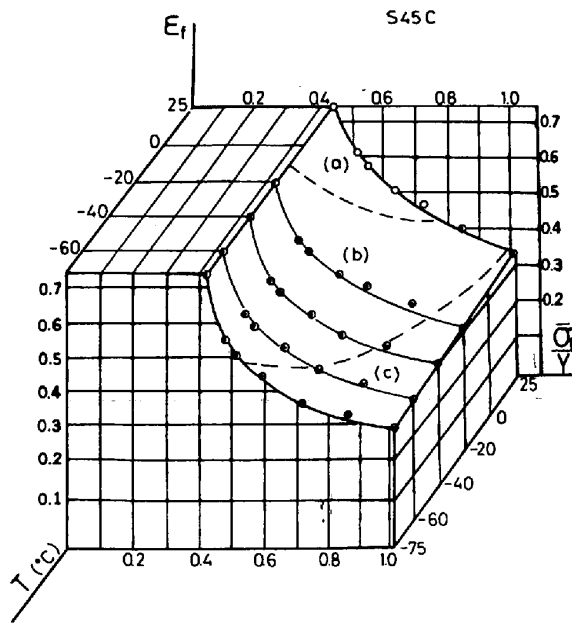


Fig.1

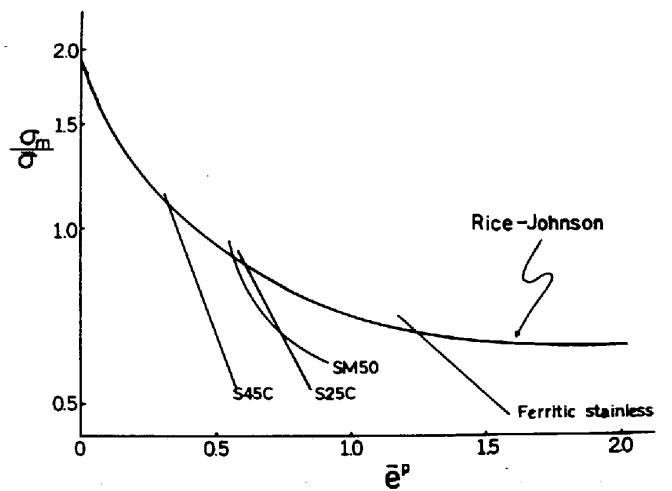


Fig.2

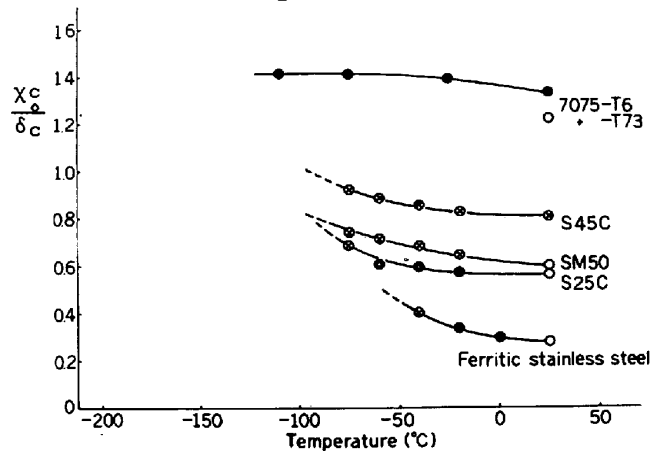


Fig.3

参考文献

- 1): J.R. Rice and M.A. Johnson ; "Inelastic Behavior of Solids " ed. M. Kanninen , McGraw - Hill . (1970) p. 641
- 2): I. G. Dondik ; Strength Mater. , (1972) p. 937
- 3): M. Shimura and S. Saito ; Sci. Rep. RITU 29 (1980) p. 50