

討19 中強度高靱性鋼の弾塑性破壊靱性試験におけるAEの役割

東京大学工学部 栗林一彦、岸 輝雄

1. 緒言、J積分は弾塑性破壊力学の基本概念であり、中、低強度高靱性鋼の破壊のクライテリオンとして、線形破壊靱性 K_{Ic} に代る弾塑性破壊靱性 J_{Ic} の有用性が早くから注目されてきている。弾塑性破壊靱性の試験法としては、ASTM, JSMEが中心となり、破壊抵抗曲線から J_{Ic} を求めるいわゆるR曲線法、鈍化曲線側から鈍化の打ち切り点を定めるストレッチゾーン幅(SZW)法等が有力とされてきているが、いずれも多数の試験片を必要とすることが、これらの手法を煩雑なものにしてきている。この問題点を克服する単一の試験片による破壊のクライテリオンの物理的な意味の明瞭な方法の確立が強く望まれてきている。J積分は均質、等方、連続的な非線形弾性体を前提としたものであり、硫化物、炭化物、窒化物等の介在物、析出物を含む複雑な組織を有する鋼への適用にある程度の困難さが伴うことは、もともと予想されるものである。特に、中、低強度高靱性鋼の延性破壊は、ほとんどの場合、介在物(MnS)を起点とした大きなボイドの成長と、それに続く微細な炭化物の周囲の小きなボイドの生成との合体連結により引き起こされる⁽¹⁾。MnSはマトリックスとの結合が弱く、低荷重時において容易にマトリックスからはく離し、大きなボイドの核となる。さらにMnSは熱間の存在で容易に変形するため、破壊靱性の異方性の原因となることが知られている。実際、弾塑性破壊靱性試験の適用が求められる典型的な中強度鋼の60キロ級高張力鋼においては、試験片の採取方向によらず、MnSの不均一分布による靱性のばらつきが著しく、板厚の中央付近で必ずかびもき裂の進展した場合を破壊のinitiationとみなすか、あるいは板厚全面にわたって相当量のき裂の進展が認められる場合を破壊のinitiationとみなすかにより、結果はまったく異なるものとなる。前者の場合には、極端には同一のロットから採取した試験片でも、それぞれ異なる J_{Ic} を与える場合があることになる。したがって問題はき裂の進展開始点を正確に捉えるというよりは、弾塑性破壊靱性をどのように定義するかという点に集約されることになる。

一方、単一試験片による弾塑性破壊靱性の評価法としてのアコースティックエミッション(AE)の有用性は早くから注目されており、種々の材料に適用されてきている。特に、中、低強度鋼の延性破壊においてはMnSの割れ、およびマトリックスからはく離が顕著なAE源となり得ることが報告されている⁽²⁾。さらにMnSのマトリックスからはく離、ボイドの成長、合体という延性破壊の機構とAEを対応づけようとする試みもあるが、十分に定量的な結果が得られているわけではない。一方、大振幅のAEはMnSが起点となる延性ポアインキ裂の進展に対応する⁽⁴⁾ことを知られているが、材料、力学的条件による差異を大きく、材料内の局所的な脆い個所の破壊を拡大して捉えているという指摘もあり、 J_{Ic} の評価に対しては十分な検討が必要と考えられている。さらに、弾塑性破壊靱性試験時のAEの発生パターン⁽³⁾の分類から、現象論的にAEの適不適を個々の材料に対して議論しようとする試みもあるが、最適な方法とはいえない。なぜならば、き裂の進展時に計測されるAEは、材料が

表1. 材料の化学組成と力学的性質

	Chemical Composition (wt.%)											Mechanical Properties		
	C	Si	Mn	P	S	Co	Ni	Cr	Mo	Al	V	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_f (%)
HT 60	0.13	0.44	1.15	0.018	0.014			0.18				568	856	22
LS 41	0.12	0.2	0.62	0.022	0.022							274	421	29
HT 60	0.11	0.26	0.64	0.017	0.007	0.17	0.03	0.18	0.41		0.04	784	813	21
SN 50	0.17	0.25	1.39	0.013	0.011							352	529	23
SMN 8	0.37	0.28	0.74	0.014	0.016	0.14	1.22	0.26	0.12			931	1077	24
Motor Steel	0.32	0.35	0.55	0.024	0.022		2.78	0.22	0.41		0.06	539	700	23
A 533 B	0.21	0.31	1.38	0.01	0.008	0.08	0.64	0.09	0.52	0.02	0.01	477	428	28
SUS 304	0.08	0.45	1.22	0.031	0.020		8.41	18.05				294	647	>40
2024 T351		0.12	0.52			4.15	0.24	0.01	0.07	0.26	0.03	375	489	14

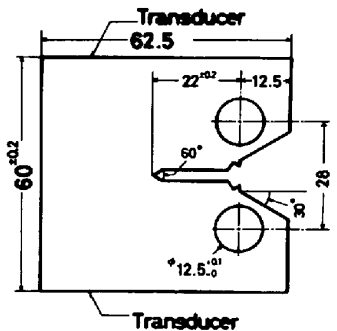


図1. 1 TCT試験片(B=25)

けでなく、試験片の力学的条件(平面応力状態 or 平面ひずみ状態)の影響を強く受けるものと考えられるからである。したがって、個々の試験におけるAEの計測結果を比較検討する場合には、まず、試験片の力学条件を同一にすることから始めなければならないことになる。本研究は、以上の点を基礎として、試験片の力学的条件のAEにおよぼす影響を検討し、種々の材料に対して試験片の力学的条件をとりえたAEの比較を行い、最後に延性破壊とAEの発生様式との関係の検討からAEによる弾塑性破壊靱性の評価を議論することを骨子として構成されている。

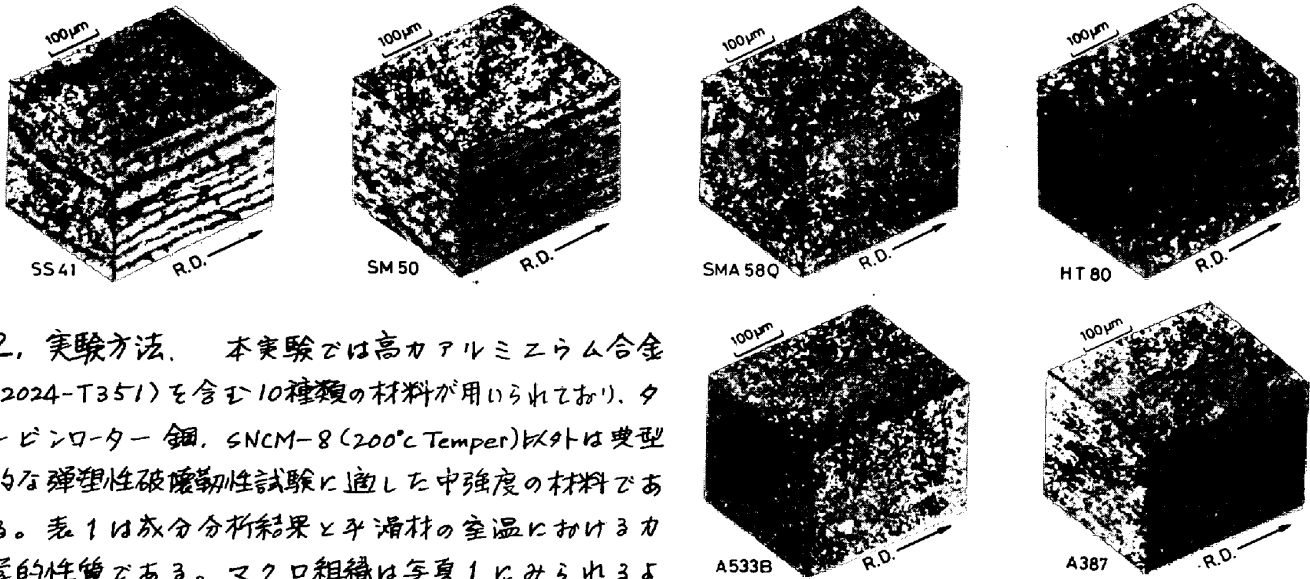


写真1. マクロ組織

2. 実験方法. 本実験では高カアルミニウム合金(2024-T351)を含む10種類の材料が用いられており、タービンローター鋼, SNCM-8(200°C Temper)以外は典型的な弾塑性破壊靱性試験に適した中強度の材料である。表1は成分分析結果と平滑材の室温における力学的性質である。マクロ組織は写真1にみられるように、非調質のSS41, SM50はバンド組織を呈しており、HT-80, SMA58Q, A533B, A387は微細な炭化物が一様に分布した典型的な焼入れ、焼戻し組織を示している。試験片は図1に示された板厚(B)が25mmの1TCTである。J積分の計算にはASTME24委員会が採択された次式

$$J = (2A/Bb) [(1+\alpha)/(1+\alpha^2)]$$

$$\alpha = \{(2a_0/b)^2 + 2(2a_0/b) + 2\}^{1/2} - (2a_0/b + 1)$$

が用いられた。ただしAは荷重(P)-荷重点変位(δ)の面積、bはリガメント長さ、a₀は予き裂長さである。試験片の採取方向は図2に示されているように、基本的にはL-TとT-L、であるが、

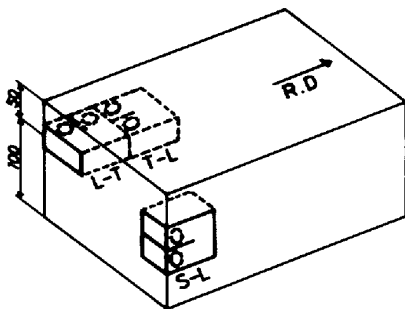


図2. 試験片の採取方向と名称

A387, A533BにおいてはL-TとS-Lである。図3は本実験の計測システムのブロック図である。本実験では、単一試験片においてき裂の進展をモニターできる手法として電位差法を併用している。AEは図3に示されているような時間分解能が2µsの2ch同時計数法により測定されており、ピン荷重による

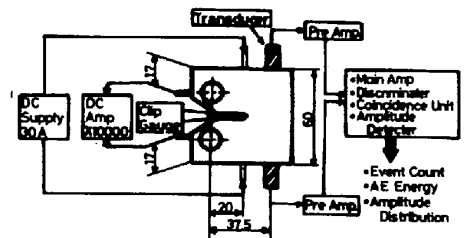


図3. 計測システムのブロック図

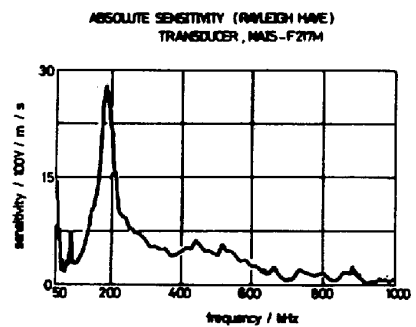


図4. 用いられたAE変換子の感度校正曲線

機械的雑音が除去されている。用いられたAE変換子は、文部省の総合研究「AE法による弾塑性破壊靱性試験法の確立」の標準変換子であるNAIS F217Mであり、図4の絶対感度校正曲線に示されるように、200kHz付近に共振点を有する高感度小型差動型変換子である。変換子は図1に示される位置にマグネットホルダーと真空グリースにより取り付けられた。

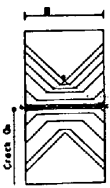
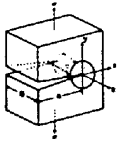


図6. 主裂先端塑性域のモデル図

3. 実験結果 (破壊靱性試験時のAEにおよぼす試験片の力学的条件の影響) 延性材料の破壊靱性試験時のAEと応力拡大係数Kとの関係から、AEはき裂先端塑性域の大きさに比例すると考えられてきているが、最近に到り、AEは応力の三軸度に強く依存することが明らかになり、破壊靱性試験時においてもAEに影響をおよぼす塑性域が平面ひずみ状態なのか平面応力状態なのか十分に検討する必要に迫られてきた。そこで本研究ではHT-60材について極厚の異なる試験片においてAEの発生挙動を検討した。

図5は2次元寸法を同一にして極厚だけを5mm, 8.5mm, 13.5mm, 20mm

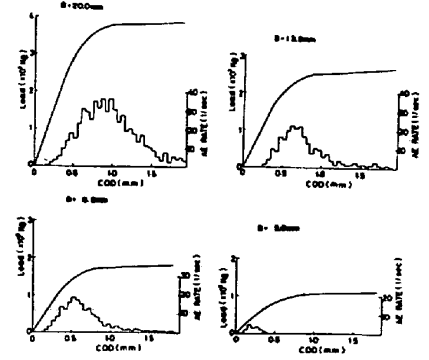


図5. 極厚を変化させた時のAEの発生挙動 (HT-60)

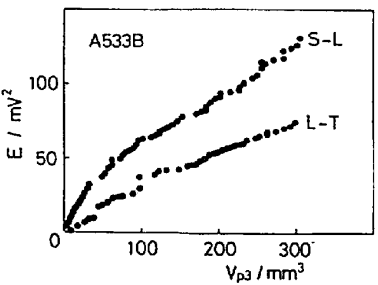
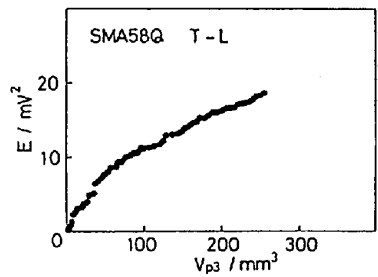
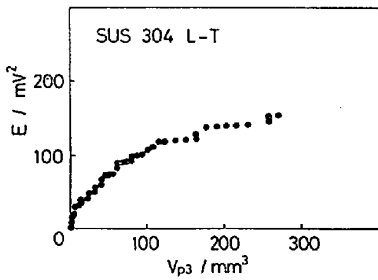


図9. 種々の材料におけるAEエネルギーとVp3との関係

と変化させた各種のCT試験片について荷重・変位曲線とAEの計数率との関係を示したものである。AEの計数率は最大値を有し、荷重・変位曲線の平坦な領域では、減少の傾向を示している。しかも極厚の減少に伴い、AEの計数率の最大値、および最大値をとる変位の位置は小さくなる傾向を示しており、AEが単なる塑性域寸法だけで記述されることが理解される。図6はき裂先端塑性域の形状と拡大をモデル化して示している。Trescaの降伏条件より平面ひずみ塑性域寸法 V_{p3} は平面応力塑性域寸法 V_{p2} によって $V_{p3} = V_{p2} / 2\sqrt{1-\nu^2}$

と記述されると仮定すると、小規模降伏の条件により

$$V_{p2} = E \cdot J / 2\pi \sigma_f^2$$

と与えられるので、 $V_{p3} = E \cdot J / 4\sqrt{2} \pi \sigma_f^2 (1-\nu^2)$

となり、平面ひずみ塑性域は図5の点線で示された軌跡を描くことになる。ただしEはヤング率、 ν はポアソン比、 σ_f は変形応力である。これらの関係から全塑性体積 V_p 、および平面応力塑性域体積 V_{p2} を求め、AEエネルギーに対してプロットすると図7のようになり、極厚によって異なる関係を示すことが理解される。一方、平面ひずみ塑性域体積 $V_{p3} (= 0.4V_{p2}^3 + 0.5BV_{p2}^2)$ とAEエネルギーとの関係は図8のようになり、極厚によらず一本のマスターカーブで表わされることが理解される。このことより、本材料の破壊靱性試験におけるAEは平面ひずみ塑性域体積の増加に伴うものであり、三軸応力

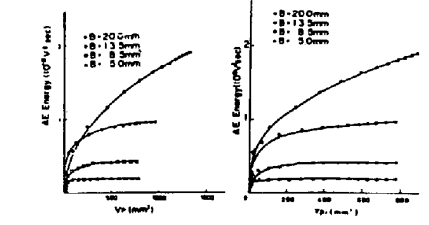


図7. AEエネルギーとVp(左図) およびVp2(右図)との関係

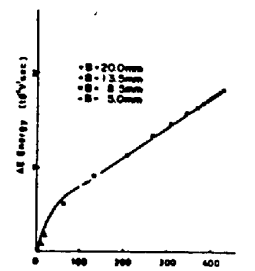


図8. AEエネルギーとVp3との関係

状態下での介在物の割れ、およびマトリックスからのはく離等の微視き裂の生成が主なAEの音源であることが理解される。同様の傾向は他の材料においても明らかであり、図9に示されるようにAEエネルギーと V_p3 は図8と類似の関係を示している。このようにAEは同一材料においても板厚によって異なり、き裂先端の応力状態に強く依存するため、異なる材料間においては、応力状態を規格化して比較する必要があることになる。応力状態を規格化する無次元パラメータとして、塑性域寸法と板厚の比 β

$$\beta = E \cdot J / B \sigma_f^2$$

を用いてAEの強度を示すと図10のようなになる。 β はき裂先端の拘束の強さを表すパラメータであり、 β の増加は、同一材料では板厚の減少、同一寸法の異種材料間では σ_f の減少に対応することになる。図より明らかのように、AEの計数率は $\beta=1$ 以下の拘束の強い状態では近似的には一定となり、 β の増加に伴

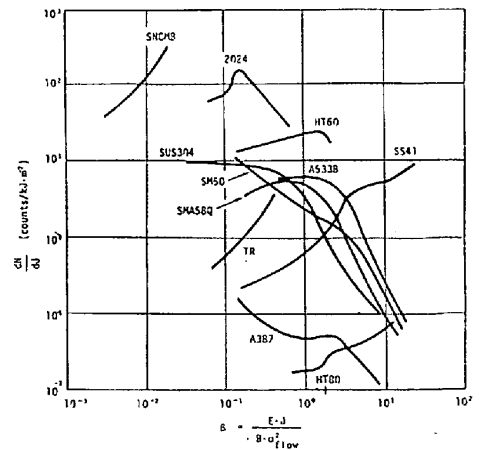


図10. 試験片の力学的条件を示す β とAEの計数率との関係

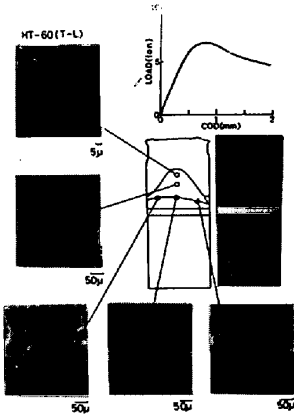
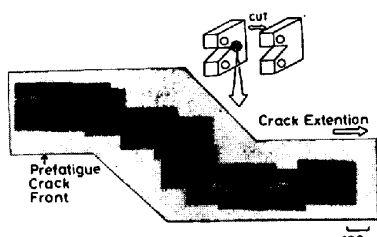


写真2. HT-60の安定き裂成長過程の破面写真



HT-60の安定き裂成長過程の縦断面写真

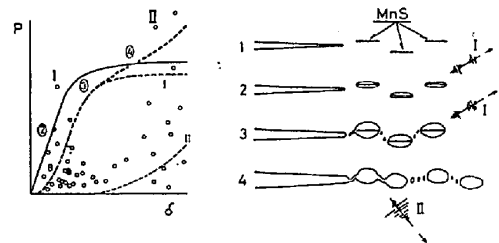


図11. 弾塑性破壊靱性試験におけるAEとき裂先端の状況

って減少する傾向を示しており、平面ひずみ状態から平面応力状態に移移するにわたってAEの強度の低下が認められることになる。
 4. 考察. 中強度高靱性鋼の弾塑性破壊靱性試験における荷重・変位曲線と測定されたAE、およびき裂先端の状態を示したのが図11である。Iと示されたAEはMnSの割れ、およびマトリックスからのはく離に対応するものであり、前述のように V_p3 の変化を示している。一方、IIと示されたAEは微細な析出物の周囲に形成された小さいボイドの合体連結に対応したものである。これは写真2に示された破面のSEM写真、およびき裂面の縦断面写真からも明らかであり、MnSの周囲の大きなボイドとその間の小さなボイドの剪断連結の状況が理解される。したがって、き裂進展をボイドの合体連結と定義するならば、AEより破壊靱性を評価するにはIとIIのAEを分離して計測する必要があることになる。

5. 結言. 弾塑性破壊靱性試験時に計測されるAE、特に疲労荷重近傍より発生するAEは、平面ひずみ状態塑性域の拡大によるものであり、三軸応力状態下における介在物の割れ、マトリックスからのはく離等の微視き裂の生成に対応する。塑性域寸法と板厚の比 β とAEの計数率との間にはよい対応があり、試験片の力学的条件を評価するパラメータとして β が適当であり、したがってAEは同一の β において計測比較される必要があることになる。(本研究は文部省科学研究費総合研究A「AE法による弾塑性破壊靱性試験法の確立」の補助⁽⁵⁾によって行なわれたことを付記する)

参考文献 (1) J.F. Knott; Metal Science 14('80)327. (2) K.Ono; Fundamental of AE, UCLA('79)167 (3) K.Sano; Proc. 4th AE Symp., Tokyo, 1978, 8-46 (4) M.A.Khan, et al; Proc. 5th AE Symp., Tokyo, 1980, 395 (5) 北川英夫, 科研費報告書'81