

AE 法と延性破壊条件式を用いた塑性加工時のボイド量の評価

横浜国立大学理工学部化学・生命系学科

准教授 笠井 尚哉

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014011)

キーワード: 延性破壊条件式, AE 法, 光ファイバ

1. 緒言

製品に要求される軽量化, 形状の複雑化に伴い, 高度な塑性加工への要求が高まっている. 従って, 塑性加工が厳しくなり, 割れの予測や検出へのニーズが高まっている. また, 塑性加工において破断限界を把握しておくことは, 割れを発生させずに成形を完了するために重要である. そこで, リアルタイムで塑性加工時の材料状態のモニタリングを行い, 破断限界に近づいていることを把握するとともに, 割れてしまった場合でもそれを検出することにより下工程への流出を防ぐことができれば, 経済的なメリットも大きい. そこで, 塑性加工の効率化, 高度化に資するため, 不適切な塑性加工の際に生じる, 欠陥や割れの前段階の現象であるボイド損傷をリアルタイムで検出, 評価することを試み, ボイドを検出する非破壊検査手法として Acoustic Emission 法(以下, AE 法という)を, ボイド損傷の評価手法として延性破壊条件式を用い, それらで得られる結果を基に, AE 法によりボイド損傷の評価を行う.

AE 法とは, 固体が変形もしくは破壊するときに発生する弾性波(以下, AE という)を圧電素子などのセンサで測定し, 得られた結果から材料の損傷量などを評価する手法である.

本研究では, まず, 基礎的検討として平板試験片及び溝付試験片の引張試験中のボイド損傷を評価することを試みた. ボイド損傷プロセス全体を連続的に評価する AE 法と, 部分的に評価するボイド測定によりボイド損傷を実験的に評価することに加え, 延性破壊条件式を用いた有限要素解析を用いてボイド損傷の理論的評価も行い, AE 計測との相関関係を考察した.

本報告書では, 前半部では AE 法と延性破壊条件式の関係についての結果を, 後半部では光ファイバを用いた AE 計測システムの開発に関する結果を示す.

2. GTN モデルを用いた延性破壊条件式

本研究では延性破壊条件式として, ボイド損傷理論に基づく Gurson-Tvergaard-Needleman モデル(以下, GTN モデルという)を用いた. GTN モデルでは材料の破壊の進行を空隙率 f (=単位体積中のボイドの体積/単位体積)で評価する. 空隙率 f を用いてボイドを有する材料の降伏関数は次式で定義される.

$$\left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f \cosh\left(\frac{3}{2}q_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right) - (1 + q_1^2 f^2) = 0 \quad (1)$$

ここで, $\bar{\sigma}$ は相当応力, σ_y は降伏応力, σ_m は静水圧応力, q_1, q_2 は Tvergaard により導入された調整パラメータである.

空隙率 f はひずみ依存のパラメータで, その微小増分(df)は次式のようにボイド形成項($df_{\text{nucleation}}$)とボイド成長項(df_{growth})からなる.

$$df = df_{\text{nucleation}} + df_{\text{growth}} \quad (2)$$

$$df_{\text{nucleation}} = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{\epsilon}^p - \epsilon_N}{S_N}\right)^2\right] \cdot d\bar{\epsilon}^p \quad (3)$$

$$df_{\text{growth}} = (1 - f)(d\epsilon_1^p + d\epsilon_2^p + d\epsilon_3^p) \quad (4)$$

ここで, f_N は形成したボイドの空隙率, ϵ_N, S_N はボイド発生分布が正規分布に従うと考えた際のひずみの平均と標準偏差である. $d\bar{\epsilon}^p$ は相当塑性ひずみ増分, $d\epsilon_1^p, d\epsilon_2^p, d\epsilon_3^p$ は主塑性ひずみ増分である. 空隙率 f が限界空隙率 f_c に達すると, ボイド結合により強度が低下し, 破壊する. 本研究では, この GTN モデルを用いたボイド損傷評価を有限要素解析により実施した.

3. 引張試験における AE 計測

3.1 実験方法

厚さ 2 mm の高張力鋼板から平行部長さ 17 mm, 幅 10 mm の平板試験片を作製した. さらに, その内の概ね半分の試験片の平行部中央の表裏両面に溝幅 4 mm, 深さ 0.5 mm の溝加工を施した. 以下, これらの試験片を溝付試験片という. 平板試験片では 3 mm/min, 溝付試験片では 1.8 mm/min の変位速度で, 油圧式試験機により引張試験を行い, 試験中の AE を計測した. 溝付試験片は最初からくびれが発生している状態を模擬しているため, 平板試験片のくびれ発生後の AE を詳細に計測できると考えた. 従って 2 種類の試験片を用いると材料のくびれ発生前後の AE 発生の違いを測定及び考察し易くなり, 破断限界の評価のための知見が拡充できると考えた. 試験荷重はロードセルによって測定し, 各試験片の伸びはデジタル画像相関法を用いて測定した.

AE 計測には, 共振型 AE センサ(共振周波数 300 kHz)を 2 個使用し, プリアンプのゲインを 60 dB, 周波数フィルタを通過帯域 100 kHz~2 MHz に設定した. AE センサはエポキシ系接着剤を用いて試験片表面に 50 mm 間隔で上下 2 か所に貼り付けた.

3.2 AE 計測結果

図 1(a)に平板試験片, (b)に溝付試験片における公称応力-公称

ひずみ線図と AE(絶対エネルギー)の関係を示す。

公称応力-公称ひずみ線図において、平板試験片の引っ張り強さが 740 MPa 程度、溝付試験片のそれが 870 MPa 程度であった。平板試験片に比べ、溝付試験片の引っ張り強さの方が大きい値を示し、溝付試験片が平面ひずみ状態となっていることがわかる。また、溝付試験片の伸びは、最初からくびれの状態が模擬されているため小さい。

試験中に計測された AE には振幅が大きく変化する突発型 AE と振幅が一定の連続型 AE の 2 種類が存在した。図 1 より、絶対エネルギーの高い連続型 AE は、平板試験片でのひずみ初期の塑性変形領域のみで多数発生しており、突発型 AE は平板試験片では最大荷重点付近以降で、溝付試験片では全ひずみ領域で発生していることが分かった。

4. ボイド測定

引張試験でのボイド損傷プロセスを直接評価するため、ボイド観察を行った。ボイド観察用試験片の準備のため、平板試験片に対しては公称ひずみ $\epsilon_r=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ 、溝付試験片に対しては公称ひずみ $\epsilon_r=0, 0.05, 0.09, 0.12$ を付与した。これらのひずみを付与した試験片を、ひずみ量が一番大きい中央部分が残るようシャーリング、又はファインカッターを用いて幅方向に切

断し、樹脂に埋め込んだ。その後、研磨機にて、粒度 180 番、500 番、1200 番の研磨紙を用いて湿式研磨を行い、さらに粒径 3 μm 、1 μm のダイヤモンド研磨剤を琢磨布に吹きかけてバフ研磨を行い、最後に粒径 0.05 μm のアルミナ研磨剤を溶かした水を琢磨布に垂らしながらアルミナ研磨を行った。研磨後鏡面状態になった試験片の表面を光学顕微鏡で観察し、ひずみ量が一番大きい中央部付近の写真を 10 枚撮影し画像データとして取り込んだ。取り込んだ画像に対して、ボイド部が黒く、その他の部分が白くなるよう 2 値化処理を施し、試験片表面上のボイドを抽出した。抽出したボイドの数を「ボイド数」とし、ボイドの面積率(黒色部分の画素数/全画素数)を「空隙率」とした。なお、通常、空隙率はボイドの体積率で表示するが、ここではボイドの体積率と面積率はほぼ等しいと仮定した。計測範囲の面積は、0.0149 mm^2 である。

図 2(a)に平板試験片の、図 2(b)に溝付試験片のボイド観察結果を示す。各ひずみのボイド数と空隙率の値は 10 回の平均を示した。ボイド数については、増加傾向を明確にするため、0%の試験片のボイド数の平均を除いて示した。ここで、ボイド数はボイド発生、空隙率はボイド成長により増加する。図 2(a)より、平板試験片ではボイド数は $\epsilon_r=0.05$ 以降、特に $\epsilon_r=0.1\sim 0.15$ で増加した。空隙率は $\epsilon_r=0.05\sim 0.15$ で僅かに増加し、 $\epsilon_r=0.15$ 以降で増

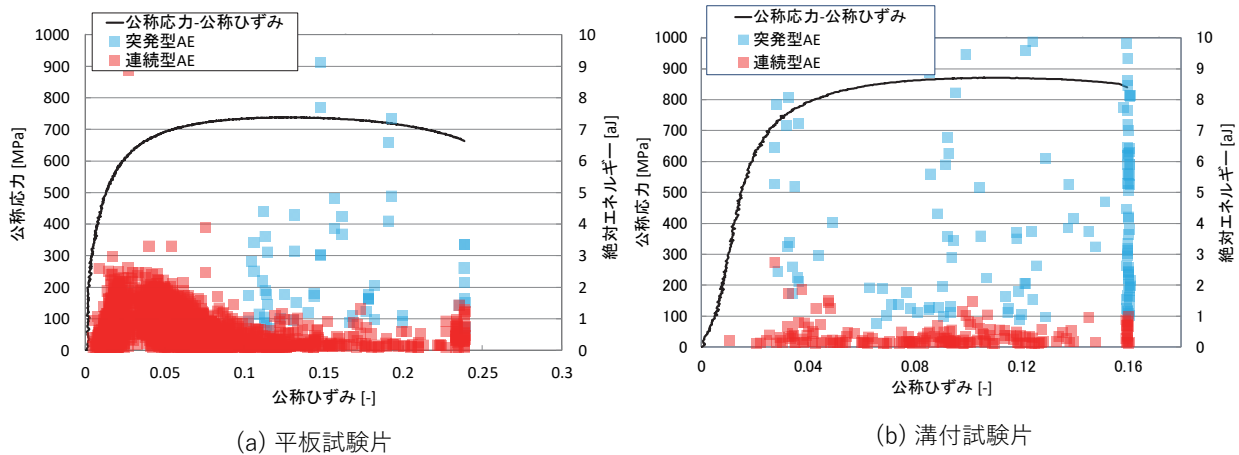


図 1 公称応力-公称ひずみ線図と AE 絶対エネルギーの関係

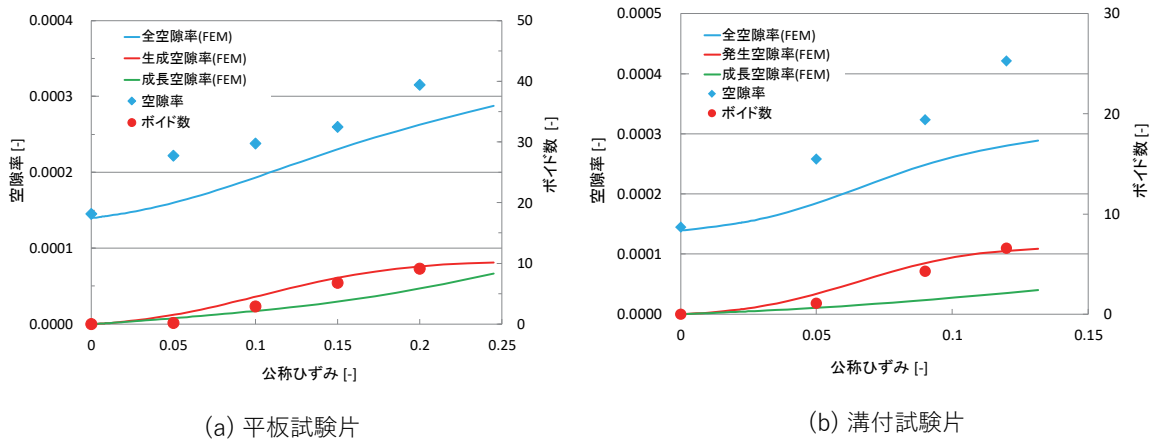


図 2 ボイド測定結果と GTN モデルを用いた有限要素解析結果

加速度は大きくなった。溝付試験片ではボイド数、及び空隙率ともに全ひずみ領域で増加した。特に、ボイド数は $\epsilon_r=0.05\sim 0.09$ 、空隙率は $\epsilon_r=0.09$ 以降で著しく増加した。

5. ボイド測定結果に基づいたボイド空隙率解析

ボイド測定結果に基づきボイド空隙率の有限要素解析を行った。この解析では、高張力鋼板のヤング率を206 GPa、ポアソン比を0.3とし、等方硬化を仮定して真応力-真ひずみ線図を多直線近似して用いた。ボイド形成パラメータはボイド測定結果より、平板試験片では $f_0=0.00014$ 、 $f_c=0.00032$ 、 $f_N=0.00009$ 、 $\epsilon_r=0.14$ 、 $S_N=0.042$ 、溝付試験片では $f_0=0.00014$ 、 $f_c=0.00042$ 、 $f_N=0.00012$ 、 $\epsilon_r=0.064$ 、 $S_N=0.021$ としてボイド空隙率解析を行った。

図2(a)に平板試験片、図2(b)に溝付試験片の有限要素解析による空隙率の解析結果を実線で示した。両試験片ともにボイド発生、成長に関して、有限要素解析による空隙率の増加傾向はボイド測定と類似した結果が得られたが、ボイド成長に関しては、若干小さく評価された。従って、現在、補正パラメータの導入等のGTNモデルの若干の改良に取り組んでいる。

6. AE計測結果とボイド損傷結果との相関関係

平板試験片では、ボイド数及び有限要素解析による発生空隙率が増加し始めるひずみ領域(最大荷重点付近)以降で突発型AEが発生し、それ以前のひずみ領域でのみ高エネルギーの連続型AEが発生した。一方、溝付試験片では、ボイド数及び有限要素解析による発生空隙率が増加する全ひずみ領域で突発型AEが発生した。

この2種類の試験片によるAE計測、ボイド測定及び有限要素解析による結果の違いから、高エネルギーの連続型AEは材料の塑性変形(転位移動)に、突発型AEはボイド発生、成長などのボイド損傷に起因するAEであると考えられる。つまり、突発型

AEが計測され始めると材料の破断限界に近いことがわかる。

7. 光ファイバを用いたAE計測システムの開発

従来のAE法では、圧電素子が用いられているが、外部環境からのノイズが混入しやすいという問題点があった。そこで、光ファイバセンサであるファイバー・ブラッグ・グレーティング(以下、FBGという)を用いたAE測定システムを開発することで、外部環境からのノイズが混入しにくいAE測定が実施できると考え、ナローバンドレーザとFBGを用いたAE測定システムの開発を行った。

7.1 透過光を用いたAE測定

FBGの概要を図3に示す。FBGは光ファイバのコアの屈折率を周期的に変化させ、光の干渉が起こるようにしたセンサである。つまり、入射した光の内、特定の波長の光が反射し、残りが透過する。反射される波長は格子間隔に依存するので、FBGに加わる変位が変化すれば、格子間隔が変わり、反射波長も変化する。

次に、FBGと透過光を用いたAE測定原理を図4に示す。FBGの反射波長領域に対して狭い波長帯を持つ光を入射する。AEによりFBGの格子間隔が変化すると、透過光量が変化する。例えば、②の場合は透過光の波長が最も反射される波長から外れて

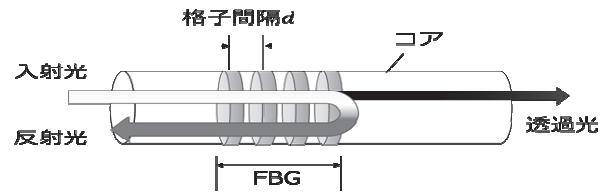


図3 FBGセンサの概要

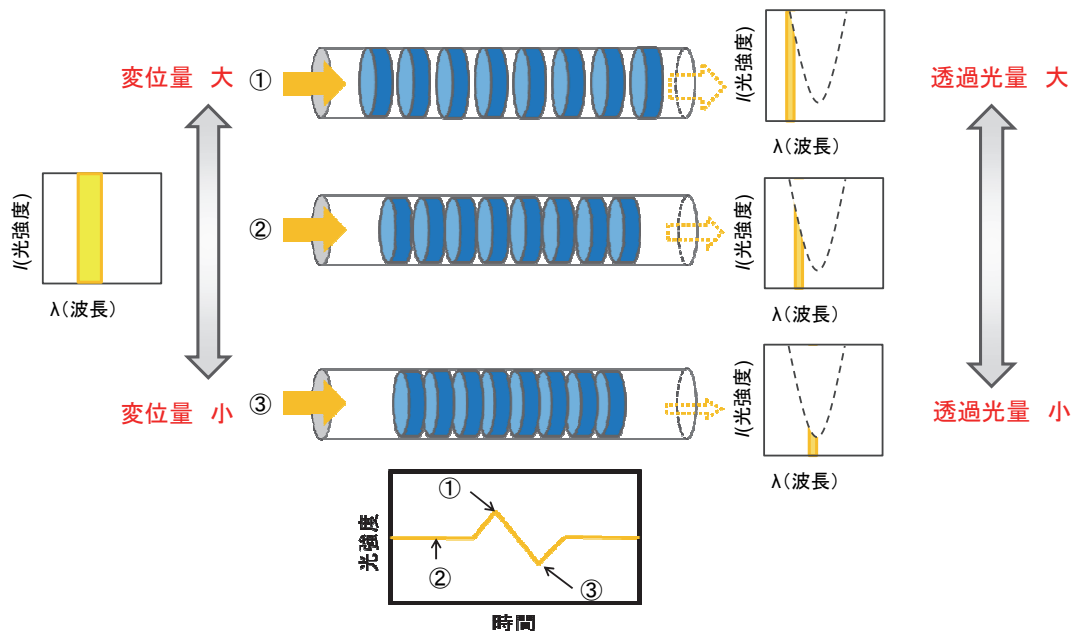


図4 FBGと透過光を用いたAE測定原理

いるため、この透過光量の光強度は図4の下図のように②の位置になる。同様に、①の場合は②の場合と比べ、光強度が強くなり、③の場合は②の場合と比べ弱くなる。これらの光強度をフォトレシーバを用いて電圧の変化として計測することで、圧電素子と同様にAEを電圧の波形として測定することができる。

7.2 FBGを用いたAE測定システムと結果

FBGを用いたAE測定システムの概略図を図5に示す。ナローバンドレーザを用いてFBGに光を入射し、FBGからの透過光をフォトレシーバにより電圧に変換した。フォトレシーバとオシロスコープの間に低周波のノイズを取り除くためにハイパスフィルタを設置した。試験片上でシャープペンシルの芯を折ることにより疑似AEを発生させ、オシロスコープにより波形を計測した。

実験で測定されたAEを図6に示す。本測定システムを用いてAEが測定可能であることがわかった。また、センサの性能を表すS/N比は約30dBであり、今後、引き続き研究を行い、精度向上を検討することで、塑性加工時のAE測定に適用できるものになると考えられる。

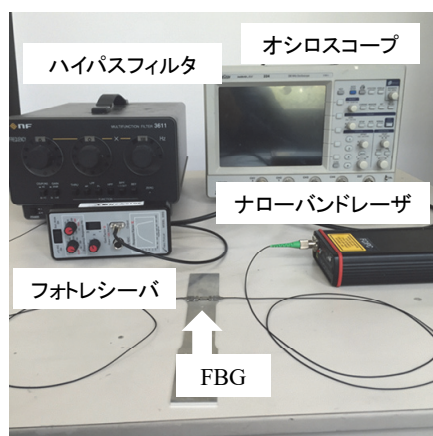


図5 FBGを用いたAE測定システム

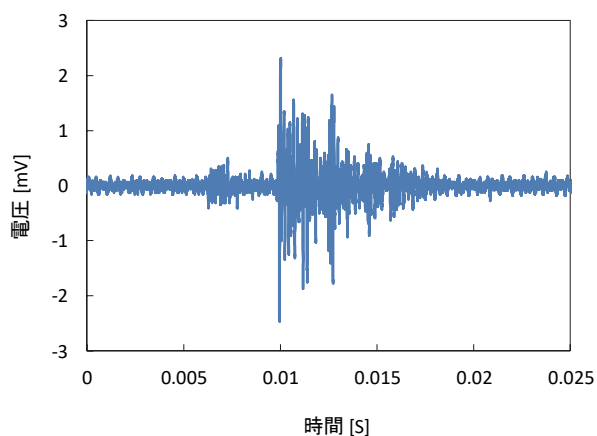


図6 FBGを用いたAE計測結果

7.3 FBG用の温度補償治具の開発

本手法の現場適用を想定すると、測定環境の温度が変化してしまうことが考えられる。これに伴い、FBGの格子間隔が変化してしまうため、FBGの反射特性が変化し、AEが測定できなくなる。これを防ぐために、FBG用の温度補償治具の開発を試みた。本研究では線膨張係数の異なる2種類の材料を使用し、線膨張係数の小さい材料で作製した口の字型の本体の内部に、線膨張係数の大きい材料で作製した立方体の補助部品を設置する構造とすることで、FBGの熱膨張を打ち消すことを検討した。本体の材料にSS400を、補助部品の材料としてアルミ合金のA5052Pを用いて治具を作製した。恒温槽にFBGを設置して昇温させながら、治具を用いた場合と用いない場合でインテロゲータを用いてFBGの反射波長を計測した。その結果、得られたFBG反射波長と温度の関係から、治具を用いない場合に比べ、治具を用いた場合では温度変化に対するFBGの反射波長の変化を若干抑制できることが確認された。つまり、FBG用の温度補償治具を用いることで、本手法の適用可能な温度範囲を広げることができた。

8. 結言

本研究では、平板試験片及び溝付試験片の引張試験におけるAE計測、ボイド測定及びGTNモデルを用いた有限要素解析によりボイド損傷評価を行った。実験結果と解析結果から、突発型AEはボイド損傷に、高エネルギーの連続型AEは塑性変形(転位移動)に起因することが分かった。また、ナローバンドレーザとFBGを用いたAE測定システムを構築し、疑似AEの検出に成功した。さらに、実用化の妨げになるFBGの熱膨張を抑制する手法として、FBG用の温度補償治具の開発も行った。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究助成により遂行致しました。ここに厚く御礼申し上げます。また、本研究を遂行するに当たり、試験片を提供して頂くとともに、試験片の研磨に関して御指導・御助言を頂きました新日鐵住金(株)名古屋技術研究部の皆様と、試験片の研磨に関して御助言を頂きました岐阜大学工学部機械システム工学科の吉田佳典准教授に深く感謝申し上げます。