

論文の内容の要旨

論文題目 伸びフランジ成形性に及ぼす幾何形状および材料特性の影響とその成形支配因子

氏名 伊藤 泰弘

1. 緒言

自動車業界には、地球環境保護を背景とした CO₂ 排出量削減が求められている。車体部材に関しては、軽量化および衝突安全性の向上を図るため、高強度鋼板の適用による薄肉化が検討されている。ところが、高強度鋼板は延性が低く、特に薄肉材を用いた場合にはプレス成形時の破断の発生が顕著となる。したがって、これら成形不良の発生メカニズムを解明する必要がある。

前述の破断の中で、伸びフランジ成形部位にて生じる破断の発生メカニズムは明らかになっていない。この要因について以下に説明する。プレス成形様式は、Fig.1-1 に示す 4 種に分類される。Fig.1-2 に示す深絞り成形（および張出し成形）では、壁面のある一帯にプレス方向に沿った張力が付与され、均一な変形場が生じる。張力の付与により壁面が形成されるが、成形のある段階で周囲より板厚が減少した板厚くびれが発生し、その後はくびれ帯内部に変形が集中して破断する。そのため、深絞り成形の壁面については、板厚くびれの発生を成形限界と見なすことが可能である。一方、Fig.1-3 に示す伸びフランジ成形では、成形前後で生じる線長変化に対応するためにつば（フランジ）が周方向に伸ばされながら形成される。その際、周方向応力（およびひずみ）はフランジ端部からの距離に応じて変化し、半径方向に沿った変形勾配が生じる。この変形勾配の存在によって生じる変形拘束効果により、板厚くびれ限界に達しても明瞭なくびれ帯は確認されない。したがって、深絞り成形の壁面のような均一変形場と異なり、板厚くびれ限界を成形限界と見なせない。そのため、材料の分離自体（破断限界）に着目した研究が行われている。一方、伸びフランジ成形部位のプレス成形性（伸びフランジ成形性）に及ぼす変形勾配の影響

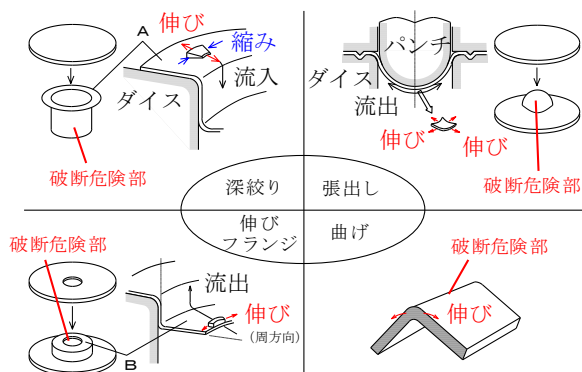
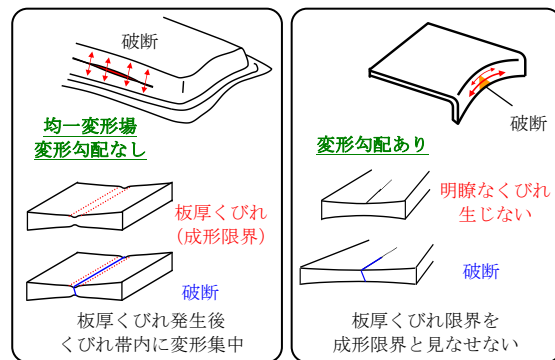


Fig.1-1 板材のプレス成形における基本成形様式



(a) 深絞り成形 (b) 伸びフランジ成形

Fig.1-2 プレス成形における破断挙動

響については多岐に渡る報告があるが、そのメカニズムについては明らかになっていない。

以上より、本研究では、変形勾配が存在する伸びフランジ成形部位における破断発生メカニズムの解明と、伸びフランジ成形性の普遍的な支配因子の確立を目的とする。具体的には、伸びフランジ成形性評価試験として一般的に用いられている穴広げ成形試験を用い、伸びフランジ成形部位の変形挙動および変形勾配と、幾何形状因子の因果関係について研究し、破断発生メカニズムを体系化する。

2. 円錐穴広げ成形における破断限界に及ぼす変形勾配の影響

破断限界に及ぼす変形勾配の影響について解明するため、円錐穴広げ成形試験（予め設けた直径 d_0 の初期穴を円錐形状の金型で拡張して破断径 d を求め、穴広げ率 $\lambda=(d-d_0)/d_0 \times 100$ にて伸びフランジ成形性を評価）を実施した。変形勾配を変化させる目的でパンチ頂角 $\theta=30 \sim 90^\circ$ と変更した。パンチ頂角 θ によらず、伸びフランジ端部に相当する穴縁にて破断（縁割れ）する。

Fig.2-1 に、穴広げ率 λ と破断限界（破断部の板厚ひずみ ε_t ）に及ぼすパンチ頂角 θ の影響を示す。パンチ頂角 θ が鋭角であるほど穴広げ率 λ は増大するが、破断限界は概ね一定の値を示す。すなわち、破断限界はパンチ頂角 θ によらない材料固有の値である。また、図中の写真より、パンチ頂角 θ が鋭角であるほど穴縁が均一に変形し、穴広げ率 λ が増大したと言える。そこで、穴縁の変形均一性に及ぼすパンチ頂角 θ の影響を解明するため、穴縁の局所変形挙動（穴縁全体の平均ひずみ $\varepsilon_{\theta-average}$ と、破断部の局所ひずみ $\varepsilon_{\theta-local}$ の比較であり、破断部にひずみが集中していく挙動）について調査した。**Fig.2-2** に示すように、パンチ頂角 θ が鋭角であるほど、局所変形は緩やかに進行する。そのため、破断部近傍に変形が集中し難く、穴縁が均一に変形する。**Fig.2-3** に、周方向応力分布に及ぼすパンチ頂角 θ の影響を示す。パンチ頂角 θ が鋭角であるほど、周方向応力分布の傾き（応力勾配）が大きい。これにより、変形拘束効果が生じ、局所変形が緩やかに進行したものと推察される。

以上より、縁割れ条件下の伸びフランジ成形性は、「材料固有の値である破断限界」と「変形勾配によって変化する伸びフランジ端部の変形均一性」によって決定される。また、穴縁の変形均一性は、パンチ頂角 θ に伴う応力勾配によって変化する局所変形挙動に影響される。

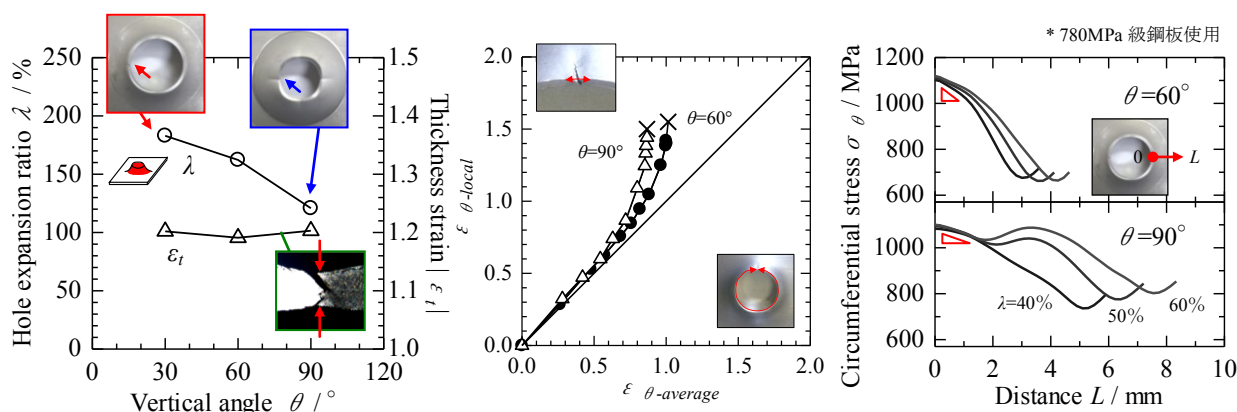


Fig.2-1 穴広げ率 λ 、破断限界に及ぼすパンチ頂角 θ の影響 **Fig.2-2** 局所変形挙動に及ぼすパンチ頂角 θ の影響 **Fig.2-3** 周方向応力勾配に及ぼすパンチ頂角 θ の影響

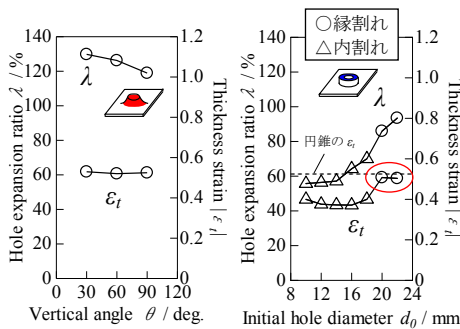
3. 破断限界に及ぼす成形形態の影響

上述の破断発生メカニズムの普遍性について検証することを目的として、伸びフランジ成形部位が面外変形を伴う円錐穴広げ成形試験と、面内変形が主体となる円筒穴広げ成形試験を実施し、両試験の結果を比較した。

Fig.3-1 に、穴広げ率 λ と穴縁における破断部の板厚ひずみ ε_t に及ぼすパンチ頂角 θ および初期穴径 d_0 の影響を示す。円錐穴広げにおいては全条件にて縁割れを生じ、板厚ひずみ ε_t はパンチ頂角 θ に影響されない。一方、円筒穴広げでは初期穴径 d_0 が大きい場合は縁割れし、板厚ひずみ ε_t は円錐穴広げ時と同等の値を示したが、初期穴径 d_0 が小さい場合は伸びフランジ内部で

破断（内割れ）し、板厚ひずみ ε_t は一致しなかった。また、縁割れした場合であっても、円錐穴広げと比較して、穴広げ率 λ は低い値を示した。内割れについては次章より検討することとし、縁割れ条件について着目する。Fig.3-2 に、破断部近傍の穴縁の板厚ひずみ ε_t の分布を示す。破断部における板厚ひずみ ε_t は成形条件によらず一致するが、穴広げ率 λ の低い円筒穴広げでは、破断部近傍が不均一に変形している。Fig.3-3 に、周方向応力分布に及ぼす成形形態の影響を示すが、円筒穴広げにおける応力勾配は小さいと言える。このことは、円筒穴広げにおける局所変形挙動が急激に進行し、穴縁が不均一に変形することを示唆する。

以上より、面内変形および面外変形の違いによらず、縁割れ条件では、前章で明らかにした破断発生メカニズムの適用が可能であることを立証した。一方、内割れが生じた場合、破断限界の値が一致せず、破断発生メカニズムが適用できなかった。



(a) 円錐穴広げ (b) 円筒穴広げ
Fig.3-1 穴広げ率 λ 、破断部ひずみに及ぼす成形形態の影響

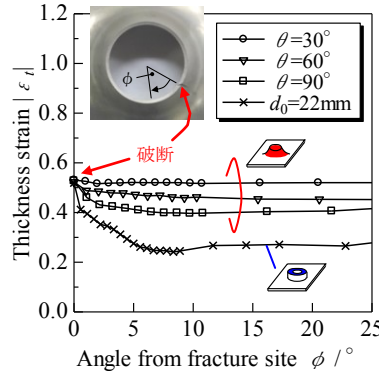


Fig.3-2 破断部近傍の板厚ひずみ分布

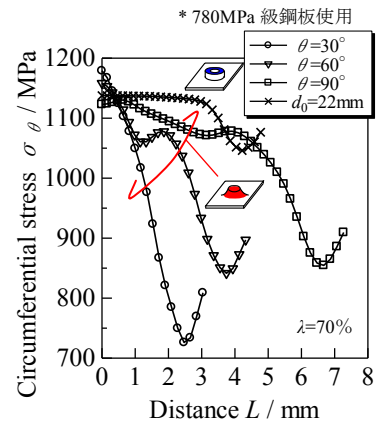
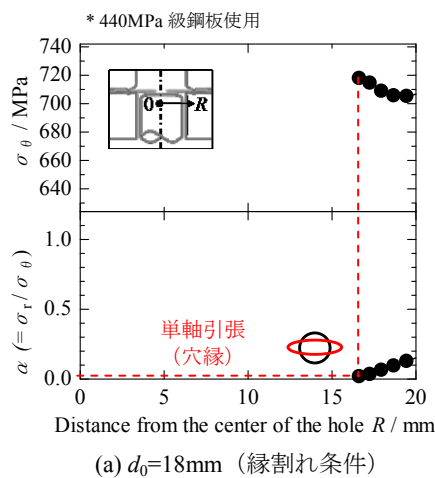


Fig.3-3 周方向応力勾配に及ぼす成形形態の影響

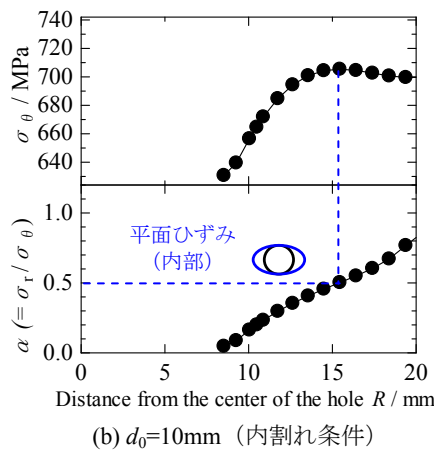
4. 内割れ発生条件（破断形態に及ぼす幾何形状の影響）

前述の内割れ発生条件について解明するため、初期穴径 d_0 を変更した円筒穴広げ成形試験を実施し、幾何形状によって変化する伸びフランジ成形部位の塑性変形挙動が破断形態に及ぼす影響について検討した。

Fig.4-1 に、FEM による数値解析より得られた周方向応力 σ_θ および応力比 α ($=\sigma_r / \sigma_\theta$) の分布に及ぼす初期穴径 d_0 の影響を示す。Fig.4-1(a) に示す初期穴径 d_0 が大きい縁割れ条件では、穴縁の単軸引張変形下 ($\alpha=0.0$) にて周方向応力 σ_θ が最大となる。一方、Fig.4-1(b) に示す初期穴径 d_0 が小さい内割れ条件では、伸びフランジ内部に平面ひずみ変形下 ($\alpha=0.5$) の部位が存在し、本部位にて周方向応力 σ_θ が最大となる。



(a) $d_0 = 18$ mm (縁割れ条件)



(b) $d_0 = 10$ mm (内割れ条件)

Fig.4-1 周方向応力 σ_θ および応力比 α の分布に及ぼす初期穴径 d_0 の影響

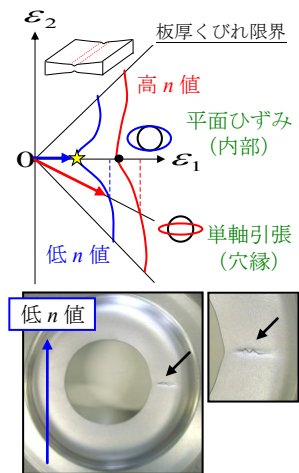


Fig.4-2 内割れ成形品

Fig.4-2 に、内割れが生じた成形品の外観写真を示す。内割れは、 n 値が最も低い方向にて生じる。ところで、 n 値が低い材料ほど板厚くびれ限界は低く、特に平面ひずみ変形下においてその影響が顕著であることが知られている。このことから、 n 値が低い方向において、単軸引張変形下の穴縁と比較して、平面ひずみ変形下の伸びフランジ内部の方が先行して破断に至ったものと推察される。また、破断限界に律則される縁割れの場合と異なり、内割れは板厚くびれ限界と相関があることを示唆する。

5. 内割れ時の伸びフランジ成形性を決定する破断発生メカニズム

次に内割れが生じた場合の伸びフランジ成形性を決定する破断発生メカニズムについて検討する。本検討では、 n 値が同等であり、破断限界が異なる 2 種 (590R, 590B : 共に 590MPa 級鋼板) の材料を用いた。

Fig.5-1 に、各破断形態における穴広げ率 λ を示す。内割れ時と比較して、縁割れ時における穴広げ率 λ の方が高い値を示すと共に、鋼種間の穴広げ率 λ の差が大きい。この理由について、Fig.5-2 に示す局所変形挙動を用いて考察を加える。破断形態および鋼種によらず、成形初期は $\epsilon_{\theta-local}$ と $\epsilon_{\theta-ave}$ が概ね 1:1 の関係で推移するが、縁割れ条件では $\epsilon_{\theta-local} \doteq 0.2$ にて、内割れ条件では $\epsilon_{\theta-local} \doteq 0.1$ にて、 $\epsilon_{\theta-ave}$ に対して $\epsilon_{\theta-local}$ が増大し、局所変形を開始する。この 0.2 という値は単軸引張変形における、0.1 は平面ひずみ変形における Hill および Stören-Rice の板厚くびれ限界に概ね一致する。すなわち、変形勾配の生じる伸びフランジ成形部位においても、局所変形は板厚くびれ限界にて開始する。一方、局所変形開始以降の挙動は破断形態によって異なる。縁割れ条件では局所変形は緩やか進行し、破断に至るまでに周方向全体のひずみである $\epsilon_{\theta-ave}$ も増大する。そのため、伸びフランジ成形性は破断限界に強く影響される。これにより、両鋼種の破断限界の差異が、穴広げ率 λ に顕著に現れる。一方、内割れ条件では局所変形が急速に進行し、直ちに破断に至る。そのため、両鋼種の破断限界の差異が穴広げ率 λ に及ぼす影響は小さい。また、局所変形挙動が急激に進行するため、破断限界ではなく、局所化が開始する板厚くびれ限界を概ね成形限界と見なせると考えられる。このことは、内割れは、深絞り成形における壁割れと同様のメカニズムで破断に至ることを意味する。

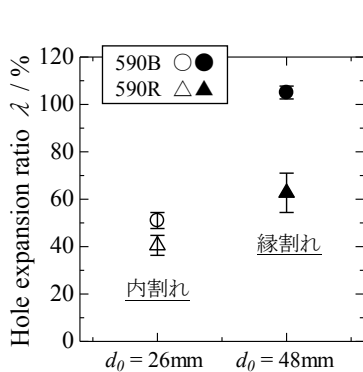


Fig.5-1 穴広げ率 λ に及ぼす破断形態の影響

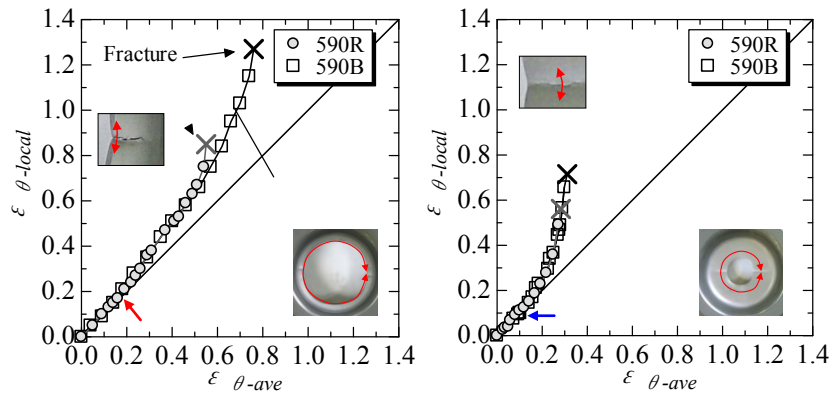


Fig.5-2 局所変形挙動に及ぼす破断形態の影響

7. 結 言

- (1) 縁割れが生じる場合の伸びフランジ成形性は、「材料固有の値である破断限界」と「変形勾配によって変化する伸びフランジ端部の変形均一性」によって決定される。
- (2) 平面ひずみ変形下にて内割れが生じる場合、局所変形挙動が急激に進行するため、局所化開始後は直ちに破断に至る。したがって、板厚くびれ限界を概ね成形限界と見なすことができる。

以上