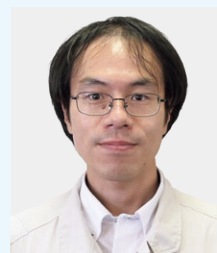
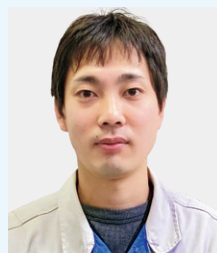


近年、成形解析や構造解析の高度化に伴い、実験に基づく変形挙動の高精度な評価の重要性が高まっている。変位・ひずみ計測については、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation、以降 DIC) が一般的手法になりつつあり、変形中の変位・ひずみを非接触にて高精度に測定可能である¹⁾。

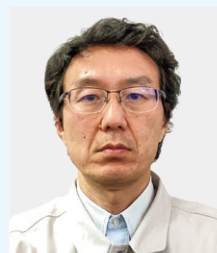
本稿では、通常のひずみ計算に加えて応力計算が可能である DIC ソフトウェア「MatchID」(MatchID 社の商標) に着目し、その技術的特徴と適用の可能性について検討した。単純な引張試験により得られたひずみ分布および応力分布を用い、有限要素法 (Finite Element Method: 以降 FEM) の解析結果との比較を行った。その結果、実試験と FEM 解析結果でひずみ分布、応力分布が一致し有効性が確認できた。また、応力計算の活用事例として、延性破壊モデルや穴広げ試験への適用事例を紹介する。



材料ソリューションセンター
技術部 鉄鋼材料技術室
井上 功之



材料ソリューションセンター
技術部 鉄鋼材料技術室
森野 勝也



計算科学センター
DX 技術室
中島 伸吾

C-1 DICでのひずみ計算、応力計算

DIC は、変形前後に撮影された試験体表面の画像から、特徴的な輝度パターンの移動量を追跡することにより、材料表面の変位およびひずみ分布を非接触で評価する手法である。

図1にDIC計測状況、図2にDICの原理を示す。試験体表面にランダムなスペckルパターンを準備し、変形前の基準画像と変形後の画像との間に対応領域の一致度を評価する。具体的には、基準画像中の微小領域 (サブセット) に対して、変形後画像内で最も類似度の高い位置を探索することで、サブセットの移動量を求める。

サブセットごとに得られた変位ベクトルを空間的に補間・微分することにより、ひずみが算出される。

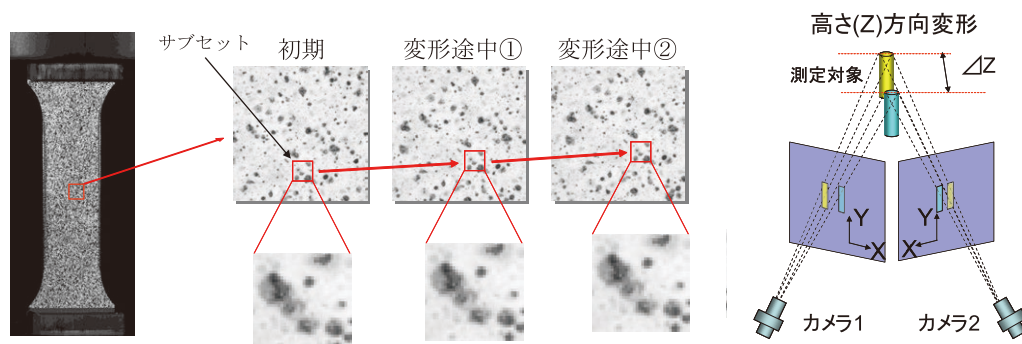
「MatchID」はこのDIC技術を基盤とし、試験体表面のひずみ分布の取得に加え、応力計算も可能である。応力計算機能は計測されたひずみに対して、平面応力状態を仮定し、材料モデルを指定することで応力が計算される。応力計算時には等方弾性や

弾塑性、塑性異方性などを指定することができ、実材料の力学挙動を反映した応力評価が可能となる。

図1 DIC計測状況



図2 DICの原理



C-2 応力計算の検証

本章では、単軸引張試験に対して、DIC データからひずみ・応力計算を行った。また、試験結果を基に FEM 解析を実施し、DIC 計算結果と FEM 解析結果との相当塑性ひずみ、応力分布の整合性の検証を行った。

素材は超高張力鋼を用い、試験片形状は JIS Z 2241 5 号試験片とした。引張試験中の変形挙動を DIC にて計測し、DIC によるひずみ計算結果と試験荷重から真応力-真ひずみ関係を算出し、応力計算を行った。図3に得られた真応力-真ひずみ関係を示す。Exp は試験によって得られた真応力-真ひずみ関係、Swift+Voce は Exp を基に近似した真応力-真ひずみ関係である。応力計算に当たり、材料モデルはミーゼスの降伏関数による等方弾塑性体を使用し、硬化則は Swift 則と Voce 則の混同硬化則を用いた。検証用の FEM 解析ではシェル要素を用い、メッシュ寸法は 2mm でモデル化し、動的陽解法応力解析を実施した。材料モデルは、DIC と同様にミーゼスの降伏関数による等方弾塑性体を使用した。

図4、5にDICの計算結果およびFEMの解析結果を示す。最大荷重近傍での相当塑性ひずみ、応力分布はDIC計算結果とFEM解析結果で良好な一致を示した。加えて、破断直前のネッ

キング領域においても、両者の相当塑性ひずみ、応力分布は高い整合性を有することが確認された。これにより、DICの応力計算は、FEM解析結果との整合性の観点から高い妥当性を有することが確認され、DICを用いた応力計算が、均一変形挙動だけでなく局所変形挙動の評価に対しても有効であることが分かった。

図3 引張試験での真応力-真ひずみ関係

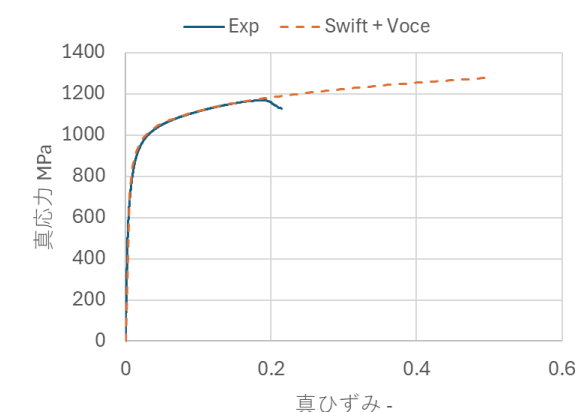


図4 DICとFEMの相当塑性ひずみ分布画像

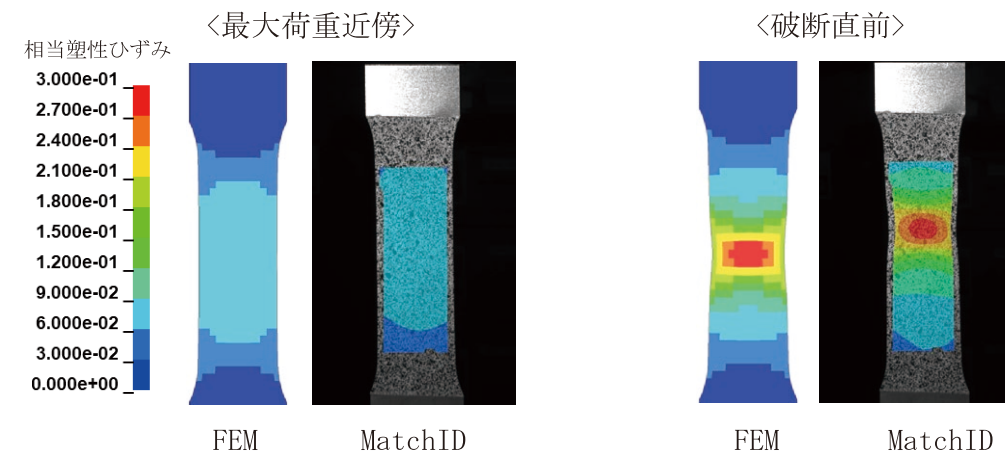
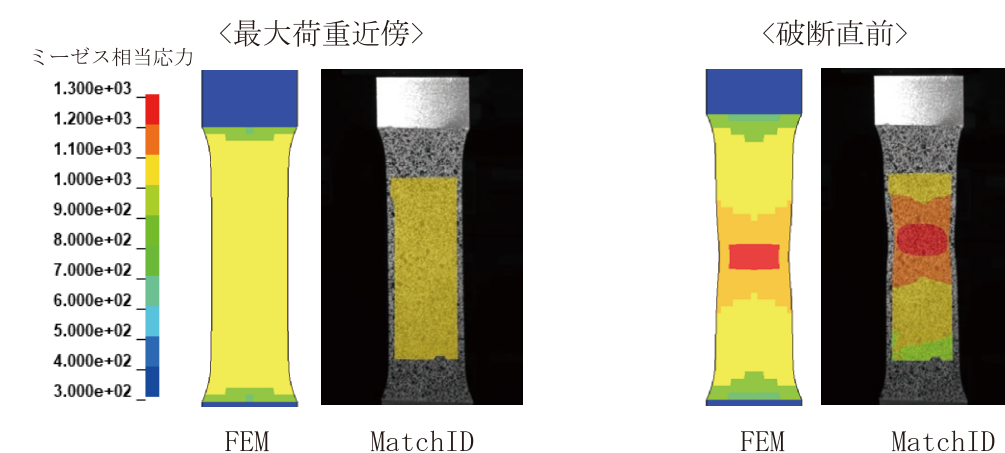


図5 DICとFEMのミーゼス相当応力分布画像



C-3 延性破壊モデルへの適用

本章では、衝突解析に使用される延性破壊モデルへのDICの応力計算の適用を検討した。自動車の開発では破壊挙動の予測技術が必要であり、衝突解析の精度向上のため、成形限界や衝突時の破断限界を適切に評価することが重要である。とくに延性破壊は、ひずみの大きさだけでなく、破壊までの応力状態に依存するため、応力三軸度の時間履歴を評価することが必要である。

例として図6にハット形状の軸圧壊試験を実施した際の試験体の外観状況とFEM解析結果を示す。軸圧壊試験のFEM解析では、応力三軸度を考慮した延性破壊の破断モデルを用いた。試験体には座屈変形した肩部付近で割れが発生しており、FEM解析結果でも同様の位置に割れが生じ圧壊試験の破壊挙動を再現できている²⁾。

応力三軸度 η は、静水圧応力 σ_m をミーゼスの相当応力 σ_{eq} で除した無次元量であり、式(1)で定義される。

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \quad \dots\dots (1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad \dots\dots (2)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ：主応力

σ_m ：静水圧応力

σ_{eq} ：相当応力

一般的に単軸引張状態では $\eta=1/3$ となるが、切欠きの導入や張出試験を行うことにより、応力状態が変化する。

DICの応力計算では平面応力状態と仮定し、 $\sigma_3 \approx 0$ とみなすことで応力三軸度を評価できる。図7に平面ひずみ状態、せん

断状態の応力三軸度分布を示す。素材は6000系アルミニウム合金、材料モデルはYld2000-2dの次数8、硬化則はSwift則を用いた。評価部の応力三軸度は、平面ひずみ状態が0.57、せん断状態 $\eta=0$ になっており、理論値(平面ひずみ状態 $\eta=1/\sqrt{3}$ 、せん断状態 $\eta=0$)と一致している。そのため、DICの応力計算は試験体の応力状態を把握することができ、計算された応力三軸度は試験体の破壊挙動を再現可能な破壊モデルへの適用が期待できる。

図6 軸圧壊試験とFEM解析結果

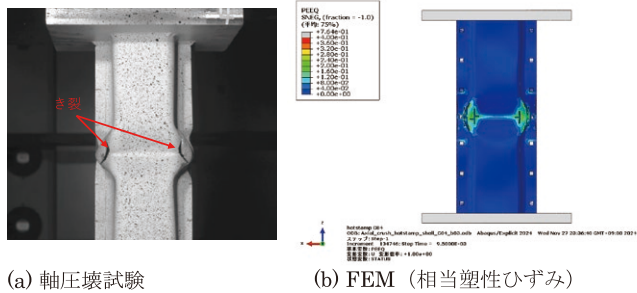


図7 試験片の応力三軸度分布画像

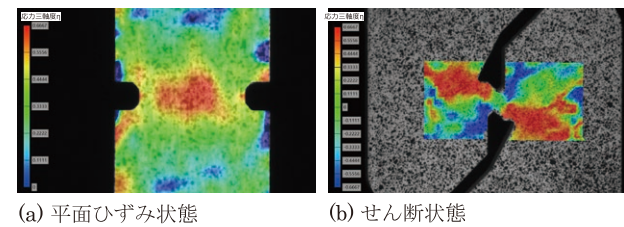
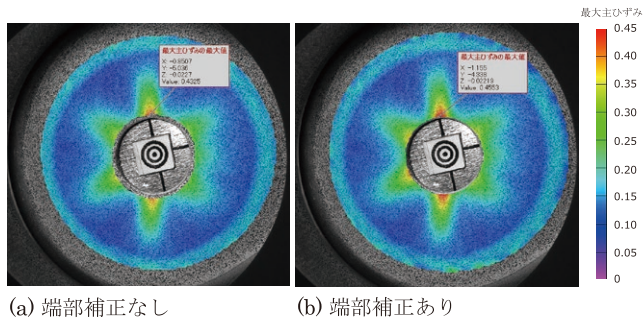


図8 穴広げ試験時のひずみ解析領域の比較



(a) 端部補正なし (b) 端部補正あり

C-4 穴広げ試験でのき裂発生予測への適用

本章では、複雑な応力分布をもつ製品の例として、伸びフランジ性評価に使用される穴広げ試験への応力計算の適用を検討した。穴広げ試験は、円孔を有する試験片に対してポンチを押し込むことにより穴径を拡大させ、き裂が発生した際の穴径の広がり量を計測する試験である。

穴広げ試験にDICを適用することにより、穴縁近傍に発生する不均一な変形挙動を定量的に把握することが可能となる。穴縁近傍に発生する局所変形はひずみゲージ法での評価が困難であるのに対し、DICを用いることで成形中の穴縁の変位およびひずみを連続的に取得することができる。また、「MatchID」は端部の補正機能を有しており、通常のDICでは不得意な穴縁近傍の変形を計測できる特徴がある。図8に、き裂発生直前における最大主ひずみの補正有無の比較結果を示す。穴縁の端部までひずみ計測ができていることが確認できる。

また、得られたひずみ分布に対して応力計算機能を用いること

で、穴縁近傍における応力分布を評価することが可能である。この際、弾塑性特性や材料異方性を考慮した材料モデルを選択することで、実際の材料挙動に即した応力状態の推定ができる。

図9に穴広げ試験時の最大主ひずみ、最大主応力、応力三軸度の分布画像を示す。素材は6000系アルミニウム合金、材料モデルはYld2000-2dの次数8、硬化則はSwift則を用いた。図9(a)の均一変形時の最大主ひずみは、穴縁が高く、周方向に均一になっている。穴周辺の最大主応力は均一であった。応力三軸度は、穴縁が単軸応力状態、穴縁から外れるにつれて二軸応力状態になっており、先行論文の応力状態と同一である³⁾。図9(b)(c)のネッキング開始時およびき裂発生直前の最大主ひずみは、穴縁6カ所に局所的なひずみの集中が認められ、ネッキングが生

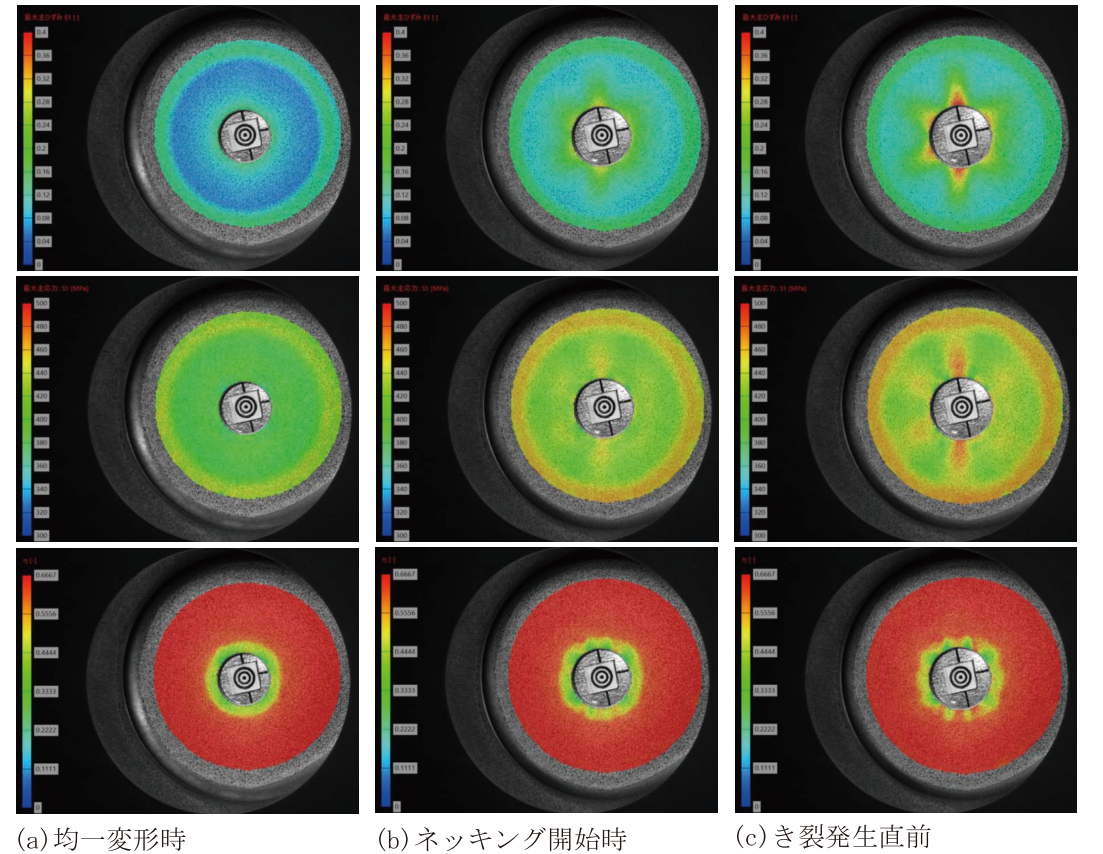
じている。最大主応力は、ネッキングと同様の個所で穴縁または穴縁から少し離れた個所に応力の集中が確認された。応力集中が一番高い箇所にて、き裂が発生するものと考えられ、き裂発生挙動の解明に役立つと思われる。また、応力三軸度はネッキングと同様の個所が等二軸応力状態になっており、ネッキングにより応力三軸度は等二軸応力状態側に遷移することが確認できる。このように、ひずみ分布に加え、応力状態を可視化することによりき裂発生の危険箇所を視覚的に理解できる。DICの応力計算は、FEM解析を用いずに応力状態を確認でき、より複雑な応力状態の製品を用いた破壊試験において応力三軸度の時間履歴から延性破壊による破壊挙動の解明に有効な手法である。

図9 穴広げ試験時の各種分布画像

(i) 最大主ひずみ

(ii) 最大主応力

(iii) 応力三軸度



「MatchID」を用いた応力計算の有効性と適用事例を紹介した。引張試験では、DICの応力計算とFEMの解析結果が一致しており、応力計算機能の有効性が認められた。また、適用事例では、試験体の応力三軸度を算出することにより、き裂が発生するまでの応力状態を定量的に測定でき、材料の成形性評価および破壊挙動の解明において有効な手法であることを示した。

応力計算機能は、試験体表面のひずみから応力解析ができるため、実現象の応力状態を解析可能である。今後も、試験体から算出した応力三軸度を活用することにより、輸送機分野での成形性評価や衝突破壊挙動のFEM解析の精度向上にむけて知見を深めていきたい。

- 参考文献 *1) 畠田道雄ほか：日本機械学会論文集(C編), 76巻 763号(2010-3)
*2) 中島伸吾ほか：こべるにくす, Vol.33, No.60
*3) 桑原利彦：ぶらすとす, 3巻31号(2020)