

薄板アルミ材プレス成形の亀裂予測手法の開発

A New Crack Predicting Method for Press Forming of Aluminum Thin Sheet Material

石田 義謙*
Yoshinori Ishida

畑下 文裕**
Fumihiro Hatashita

要 旨

自動車用熱交換器製品では、多くの薄板アルミニウム合金材が利用されており、プレス成形工程において製品形状内に亀裂が発生することがある。本報では、現場で発生している不具合から仮説と検証を通し、プレス成形シミュレーションの最適なモデル構築とFLDの活用により薄板アルミ材の亀裂予測手法を開発した事例を報告する。

Abstract

Aluminum thin sheet material is widely used for automotive heat exchange products. Cracks occur on the sheet parts in some cases during the press forming process. In this report, a new effective crack predicting method using accurate CAE model and FLD is described.

Key Words : Press Forming, Crack, Material, FLD, Strain, CAE

1. はじめに

カルソニックカンセイは、熱交換製品、空調製品で多くの薄板アルミニウム合金材（以下薄板アルミ材と略す）を使用したプレス部品を生産している。

プレス生産現場では、不具合を未然に防ぐ為に定期的な金型のメンテナンスや作業標準の順守を実施しており、安定的な生産をしているが、材料ロット切替え等の変化点がある場合、亀裂が発生する事があり、その根絶が求められている。Fig. 1に亀裂の例を示す。

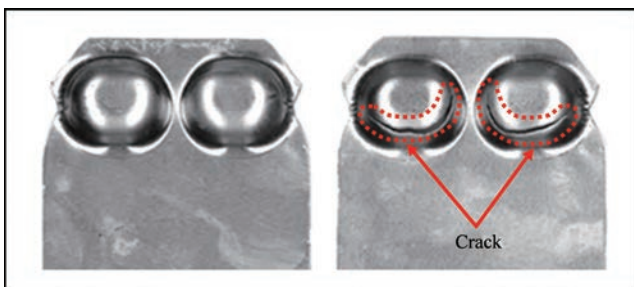


Fig. 1 Example of Crack

亀裂を根絶するためには、開発初期段階において、材料特性やプレス成形性を考慮した製品設計と工程設計が求められる。この際、亀裂発生を高精度で予測し評価できる手法が必須となる。

今回、現場で発生している現象に対してメカニズムに関する仮説立案と検証を詳細に実施することにより、CAE解析上でプレス成形状態を正確に再現して亀裂を予測する手法を構築できたため、事例として紹介する。Fig. 2に構築した亀裂予測手法の概略を示す。

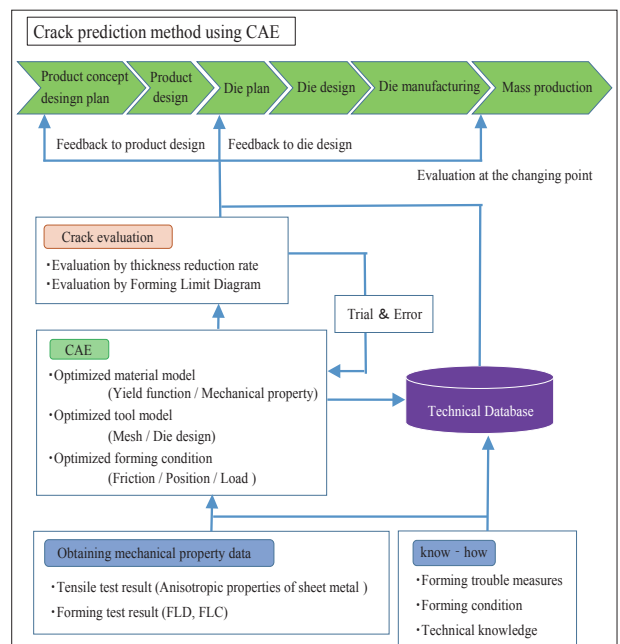


Fig. 2 Crack Analysis Process

* グローバル生産本部 生産技術開発・試作計測グループ
** グローバル生産本部 生産技術センター ツーリンググループ

2. 亀裂高精度予測における課題

CAE 解析で亀裂を高精度に予測するためには、以下二点が重要である。

- (1) CAE 解析が高精度であること
- (2) 亀裂の判断基準が正確であること

CAE 解析を高精度化する為には、精度の良い材料モデル、工具モデル、及び詳細な成形条件の設定が重要となる。カルソニックカンセイでも上記を踏まえ CAE 解析を活用しているが、材料モデルのデータベースなどが十分でなく、薄板アルミ材特有の成形状態を高精度に再現しきれない場合があった。

亀裂の判断基準は、一律の板厚減少率を用いているが、ひずみ状態の違いによる亀裂発生の有無を判断しきれない場合があり、さらに正確な判断基準が求められていた。

3. 対象部品及び対象工程

3.1. 対象部品

対象部品は、自動車用エアコンユニット内のエバポレーター構成部品であるチューブシート（以下 T/S と略す）とした。

3.2. 対象工程

対象工程は、T/S の最初の絞り成形工程とした。Fig. 3 に絞り成形部品の概要を、Fig. 4 に金型仕様を示す。被加工材は、板厚 0.3mm の薄板アルミ材であり、成形難易度が高い。さらに、一對の絞り形状が接近配置されており、絞り形状の接近部では、亀裂の発生リスクが高い。

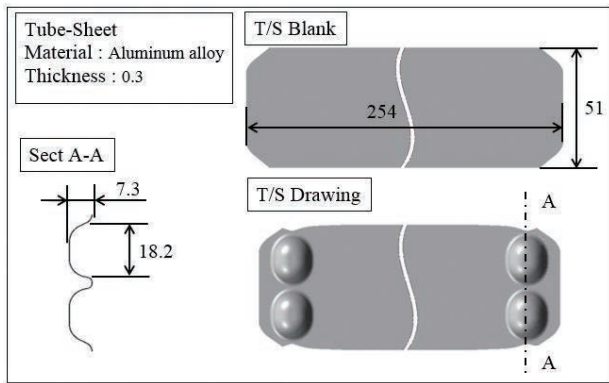


Fig. 3 Drawn Part

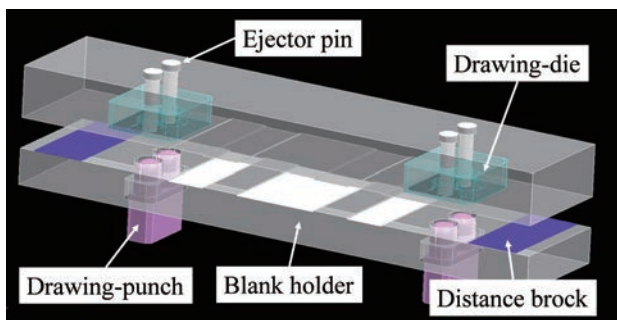


Fig. 4 Die Specification

4. CAE 解析高精度化の方策

CAE 解析を高精度化するために、高精度な材料モデルを構築した。

具体的には、引張試験による材料データの実測と降伏関数の適正化を実施した。薄板アルミ材の中には、異方性を有するものがあり、異方性の明確化と異方性を表現できる降伏関数が必要となるからである。

4.1. 引張試験

引張試験では、異方性を考慮して、圧延方向に対して 5 方向の機械的特性値を実測した。

Fig. 5 に示すように、試験片の取得方向を、圧延方向に対し 0° から 90° まで 22.5° 刻みで変化させた。

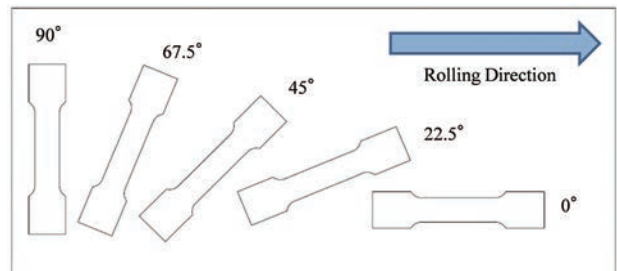


Fig. 5 Tensile Direction

機械的特性値として、真応力-真ひずみ曲線、ランクフォード値 (r 値)、加工硬化指数 (n 値) を測定した。

Fig. 6 に示すように、5 方向の真応力-真ひずみ曲線、r 値、n 値には幅があり、T/S の被加工材は、異方性を有する材料であることが確認された。

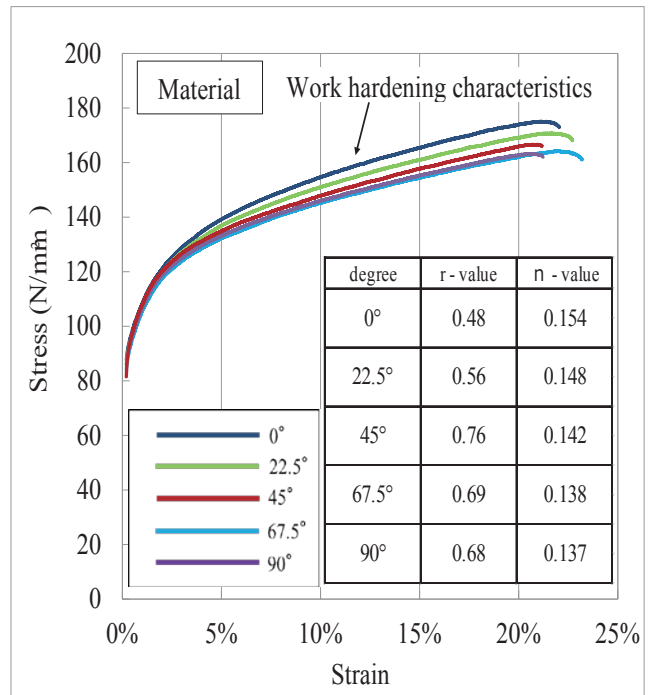


Fig. 6 Result of Tensile Test

4.2. 降伏関数の検討

降伏関数とは、材料がある一定の応力を受けた際に、どのように材料が変形するかを数的に表現する為の関数である。この降伏関数の選定を誤ると材料変形挙動を正確に再現出来ず CAE 解析精度に影響を及ぼす。

引張り試験結果から被加工材に異方性があることが確認出来たため、本手法では、異方性の影響を考慮した降伏関数を選定することとした。

4.3. 材料モデル検討結果

引張試験結果と降伏関数検討結果から本手法で CAE 解析に使用する材料モデルは Table 1 の通りとした。

Table1 Material Model

Type	Thickness (mm)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/mm ³)		
Aluminum alloy	0.3	74.3	0.36	2.70E-06		
Material law		r-value				
		0°	22.5°	45°	67.5°	90°
Optimal yield function		0.48	0.68	0.87	0.65	0.43

5. 亀裂判断基準の検討

亀裂判断基準は、従来の板厚減少率だけではなく、薄板アルミ材特有の成形手法に着目し、FLD (Forming Limit Diagram) における FLC (Forming Limit Curve) も使用することとした。

FLC を用いることにより部位毎のひずみ状態が成形限界を超えているかどうか明確に可視化出来るからである。

5.1. FLC の検討

FLC は、材料特性値を CAE 解析ソフトウェアにインプットすることにより計算可能であるが、今回は、正確性を求めるため、FLC を実測して比較検討した。

(1) FLC の導出 FLC を実測するため FLD 試験を行った。FLD 試験とは、Fig. 7 に示すように試験材料にスクライブドサークルと呼ばれる重なり合った多数の小円を描き、プレス変形様式毎に一定の成形レベルまで塑性変形させ、ひずみ状態を測定する試験である。各小円は、プレス成形後にさまざまな形の楕円状になる。楕円の長軸方向のひずみを最大ひずみと呼び、短軸方向のひずみを最小ひずみと呼ぶ。

各小円の最大ひずみを縦軸、最小ひずみを横軸にプロットして、くびれや破断する領域と正常に成形出来る領域を区別することで材料の FLC を取得した。

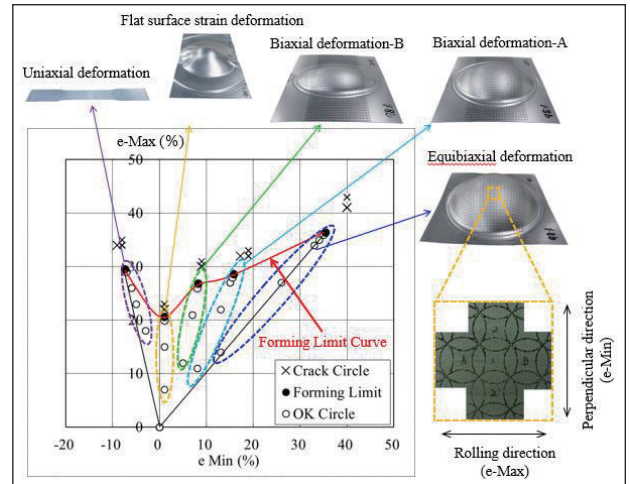


Fig. 7 Derivation of FLC

(2) FLC の比較 CAE 内で材料特性値から算出される FLC と、FLD 試験により取得した FLC の比較を実施した。引張り領域と平面ひずみ部においては、差異は 1~2% 以内と小さいが、等二軸引張りにおいては、差異が広がる傾向が確認された。Fig. 8 に比較結果を示す。

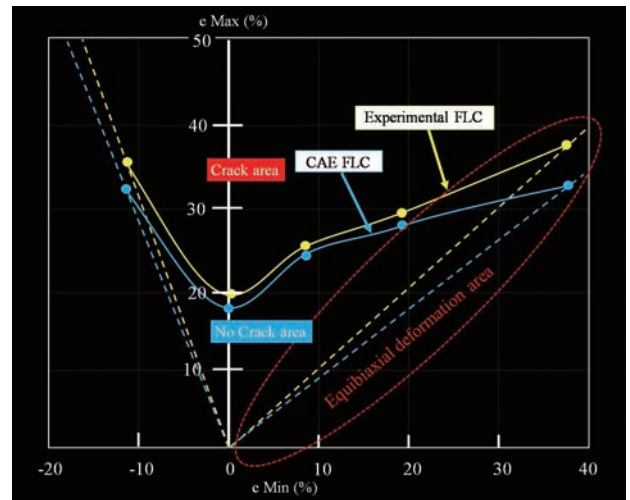


Fig. 8 Comparison of FLC

5.2. FLC の検討結果

上記の比較検討結果に基づき、本手法では、実測した FLC を用いることとした

6. 結果

CAE 解析結果の精度を検証するため、検証サンプルの実成形結果と CAE 解析結果を比較した。さらに、亀裂判断基準の妥当性を検証するため、検証サンプルの亀裂発生有無と CAE 解析上での亀裂発生判断結果を比較した。

6.1. 実験サンプル取得条件

検証サンプルは、T/S 絞り成形工程の金型を製作し 200t サーボプレスにて実施した。Table 2 に検証サンプルを取得したプレス成形条件を示す。

Table 2 Press Forming Condition

Material set position	≤0.2 mm
Lubricant layer thickness	5~10μm
Speed	> 30 shot per minute

6.2. CAE 解析条件

(1) 要素サイズ 計算領域は計算時間を考慮し Fig. 9 の最小領域に限定し、要素サイズは□0.2mm×0.2mm×0.1mmを三層に細分化して実施する(要素数は約30万)。

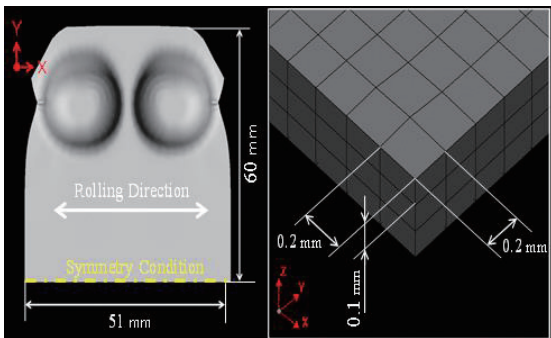


Fig. 9 Element Size

(2) 金型条件 CAE 解析の金型条件(プランクホルダー圧, エジェクタ-ピン圧, ディスタンス等)は、実金型条件値をそのまま利用し計算を実施する。なお、摩擦係数は0.12, 加工速度は、3.0mm/msecとした。

6.3 実際の成形結果と CAE 解析結果の比較

(1) 板厚減少の検証結果 Fig. 10 が実際の成形と CAE 解析における板厚減少を比較した結果である。

材料モデルを高精度化したことにより、サンプル実測値と CAE 解析結果との差異は、最大でも約1%とわずかとなり、従来活用していた降伏関数と比較しても高精度化が図れており、板厚減少を精度よく再現出来ていることが確認できた。

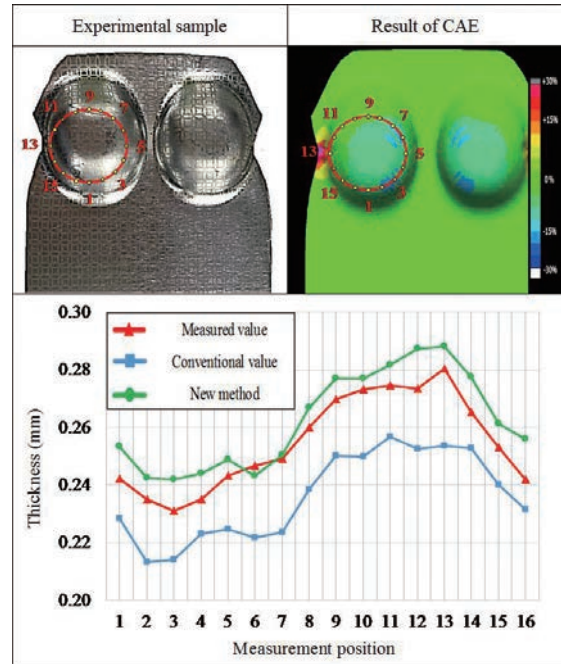


Fig. 10 Comparison Result of Thickness

(2) 成形ひずみの検証結果 Fig. 11 は、T/S 張出し成形側壁部において、実験検証サンプルのひずみ状態(黄色)と、CAE 解析結果のひずみ状態(白色)を比較した図である。

実験検証サンプル, CAE 解析結果ともに、ひずみ状態は、ほぼ等二軸引張であり、ひずみ量も同程度であり、CAE 解析により、ひずみ状態を精度良く再現出来ている事が確認出来た。

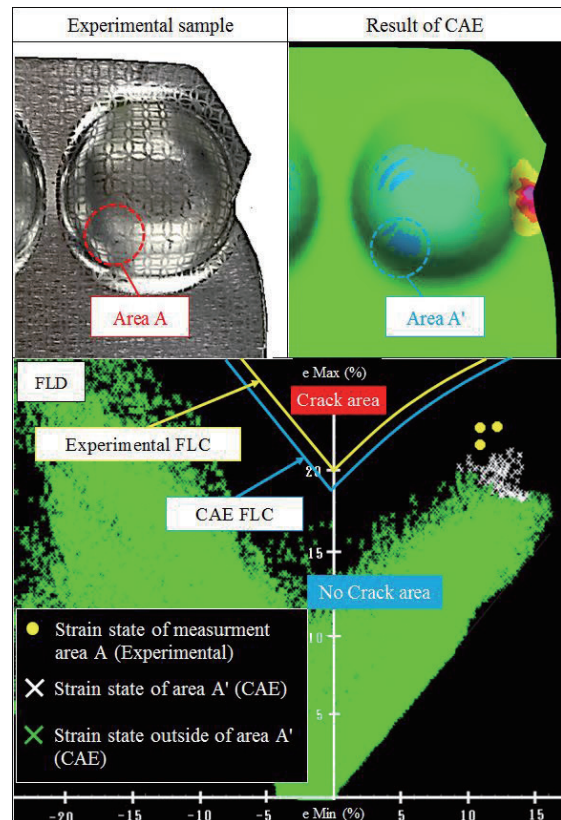


Fig. 11 Comparison of Forming Strain

6.4 亀裂判断基準の妥当性検証

Fig. 12は、実験で張出し成形側壁部に亀裂が発生した成形条件におけるCAE解析結果に対して、FLCを用いて亀裂発生の有無を判断した結果である。張出し成形側壁部は、成形後のひずみ状態が破断領域に入っており亀裂発生を示している。FLCを亀裂判断基準として用いることにより、精度よく亀裂発生を予測できる事が確認出来た。

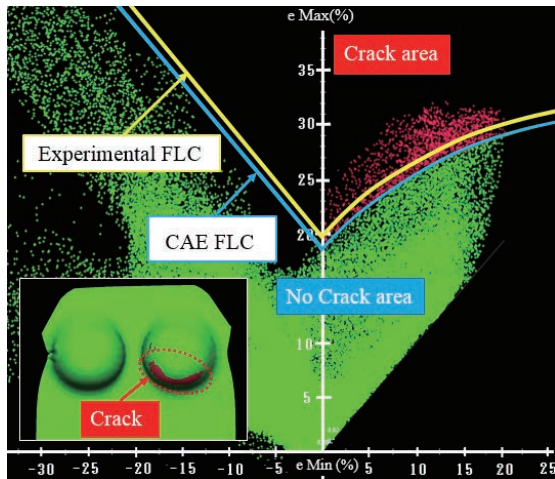


Fig. 12 Comparison of Forming Strain (Crack)

7. まとめ

上記事例から薄板アルミ材の亀裂予測に必要なCAE解析条件、亀裂判断基準を決定した。

(1) CAE解析条件 メカニズムの仮説立案と実験検証を通して取得したデータから高精度な材料モデルを構築したことにより、薄板アルミ材プレス成形についてCAE解析の高精度化を達成できた。Table 3にCAE解析条件を示す。

Table 3 Calculation Condition of CAE

Item		Parameter
Solid analysis Material model	Young's modulus	Applied the tensile test result
	Poisson's ratio	
	Density	
	r-value	
	n-value	
	Material law	Optimal yield function
	Mesh size	0.2×0.2×0.1
Press forming condition	Coefficient of friction	0.12
	Die specification	Production tool

(2) 亀裂判断基準 薄板アルミ材特有の成形手法に着目して亀裂判断基準としてFLCを採用したことにより、亀裂発生を高精度に予測できる手法を確立出来た。本検証結果から亀裂判断基準は、実測したFLCとする。

8. おわりに

本手法が活用できる範囲は、薄板アルミ材の亀裂予測と限定的な所もあるが、今後も実験検証を通してプレス成形技術の蓄積を進めて行く。また、本手法を薄板アルミ材だけではなくスチール材やステンレス材等でも検証を進め汎用解として適用領域の拡大を図っていきたい。

最後に本手法を製作にするにあたり、ご協力していただいた関係者の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 難波：ソリッド要素を使用したプレス成形シミュレーションの検討, Calsonic Kansei Technical Review, vol.7, p.80-83 (2010)
- (2) 桑原 利彦ほか：異方性降伏関数を用いた6000系アルミニウム合金材の液圧バルジ成形シミュレーションと実験検証, 軽金属, 第62巻, 第1号, p. 7-13.



石田 義謙



畑下 文裕