

二輪車燃料タンクにおけるプレス成形性評価手法の確立

Establishment of a Method for Formability Evaluation on Motorcycle Fuel Tank

荻野 孝*
Takashi OGINO
斎藤 実**
Minoru SAITO

鴨 弘之*
Hiroyuki KAMO
横田 裕樹**
Hiroki YOKOTA

田上 友之*
Tomoyuki TAGAMI
桑原 正二**
Shoji KUWABARA

要 旨

燃料タンクのプレス成形性机上検討ツールとして、簡易・高速検討型の「成形マップ手法」と、詳細・高精度検討型の「プレス CAE 解析手法」をそれぞれ開発し、設計段階においてプレス成形性を評価できる手法を構築した。これらの手法を実務モデルに適用して解析結果と実測データとの相関を確認して当手法の有効性と信頼性を検証した。

ABSTRACT

“Press map method” for simple and high speed and “Press CAE analysis method” for in-depth and high accuracy were developed as tools for considering a press formability of motorcycles’ fuel tank. The methods enabling evaluation of press formability in the design stage were established. The effectiveness and reliability of the methods were verified by confirming the correlation of actual measurement data with the analysis result in applying the method to the actual models.

1. はじめに

燃料タンクは燃料を密閉保持する部品である。外装タンクにおいては、それと同時に車両全体の機能美を構成する部品でもあり、エンジン形式およびフレーム形式によって様々な形状が要求される。特に近年では、ユーザーニーズの多様化、環境問題への対応等で、燃料タンクに求められる形状も新規形態のものが増えている。新規形態の燃料タンクを製造する上で、期間短縮とコスト削減を計っていくためには、従来の試行錯誤による金型製作手法に代わり、設計段階で製造要件を検討できる手法の開発が求められている。

2. 製品開発における成形性評価

2.1. プレス成形

燃料タンクをプレス成形する場合の金型構造を Fig. 1 に示す。ダイとblankホルダーで板材を挟み、ダイとパンチ間で板材を塑性変形させることによって成形する。このとき、不具合として発生する代表的な事象にき裂としわがある。鉄板の伸びと縮みの許容限度内であれば、うまく成形できるが、その限度を超えるときき裂やしわが発生する。Fig. 2 にそれぞれの実例を示す。き裂としわは相反する関係にあり、

き裂を対策するとしわの発生につながることが多い。しわの発生は見た目が悪いだけでなく、部品強度の低下、あるいは金型の損傷を招く。その発生の原因は多くの場合、金型形状の急激な凹凸の変化により引き起こされるので、それを緩和する方向で対策がとられる。

対策は大きく分けて以下の二つの方法に大別される。

(1) プレスマシン設定、絞りビード高さ調整等、成形条件の修正

(2) 製品形状や余肉部を含む金型形状の変更

成形条件の変更や余肉部分の修正であれば、製品形状には影響がないが、不具合の内容によっては製品形状の変更が必要となる場合もある。そのときには、燃料タンクだけでなく他の部品の意匠面や機能形状の変更にもつながり、大きな修正工数および費用が発生することとなる。

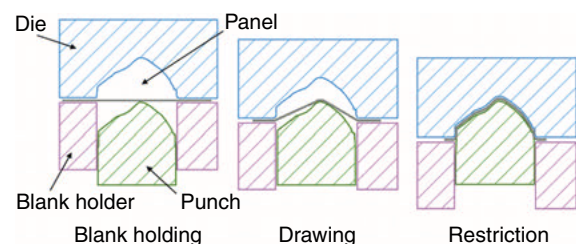


Fig. 1 Press die structure and motion

* 朝霞研究所

**ホンダエンジニアリング(株)

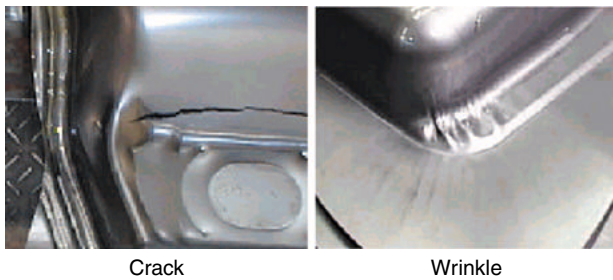


Fig. 2 Press defect

2.2. 成形性予測ツールと開発での適用タイミング

成形性予測ツールを製品開発で使うとき、製品設計段階と金型設計段階では、それぞれ求められる機能が異なる。製品設計段階では、タンクおよびその関連部品の機能設計と同時に成形性検討を行う必要がある。そのためには、種々の形状に対し成形性検討を簡易に短時間でできること、成形性に関する大きな不具合を対策しておくことが重要である。

一方、金型設計段階では、製品設計された部品を量産工程で精度良く作るために、金型形状および成形条件の検討を行う必要がある。そのためには、実際のプレス加工工程を模した予測を行うことができ、成形結果を詳細に精度良く評価できることが重要である。そこで、製品設計と金型設計段階で使える机上検討ツールとして、簡易な高速検討型の「成形マップ手法」と、詳細・高精度検討型の「プレス CAE 解析手法」をそれぞれ開発した。Fig. 3に開発フロー内での各設計段階の位置付けと、ツール適用タイミングを示す。

3. 成形マップ手法の開発

2章で示したように、製品形状に急な凹凸があると成形性に対して不利であり、それを製品設計段階で対策しておくことは、後の不具合発生も少なくなる。急な凹凸を定量化し、種々な形状検討を行い易くする金型設計手法として使っていた周長差法を応用し「成形マップ手法」を開発した。

3.1. 成形マップ手法

Fig. 4に示すような形状をプレス成形した場合、段差Dを持つ突起部で板が変形される。板A部は板B部に引っ張られながら成形され、逆に板B部はその反力で板A部に引っ張られて成形される。このときの板A部の状態は、Fig. 5に示す

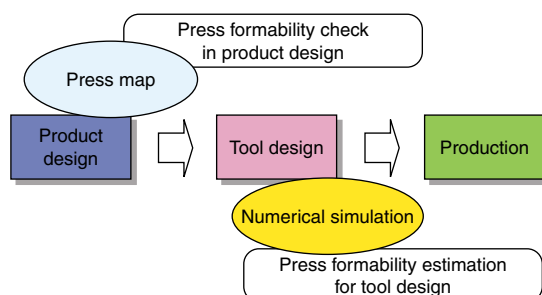


Fig. 3 Simulation map in a product flow

ように平板を面内方向に単位長さ当たりの荷重 P_i を長さCの範囲に荷重した場合に近似できる。板を破断限界まで引っ張った場合の荷重を一定に保つと、段差 d_a は荷重付加長さCに比例し、変形開始点Oを基準として長さEをとると段差 d_a はEにも比例する。

長さEと d_a の関係を図示するとFig. 6のようになる。変形パターン3種類(i, j, k)を併せて表示している。パターンi, jは破断限界の形状を示し、パターンkはパターンiに更に荷重を負荷した場合を表し、破断状態を示している。変形形状の両肩を結んだ線a, bを引き、領域I, II, IIIを区切ると、各領域の特性は以下となる。

- ・領域Iは、板の任意の点Qが変形可能な領域
- ・領域IIは、パターンi, j, kが混在する領域であり、荷重付加長さCによって変形の可否が共存する領域
- ・領域IIIは、変形不可能な領域

これらの特性によって、板の任意の点Qの変形可否が長さLと段差 d_a で表せることがわかる。次に板B部の変形であるが、ここも板Aの破断荷重 P_i で引っ張られており、その変形量 d_b は断面幅Wのみに比例する。板A, B部の変位を合わせると成形可能な最大変形段差Dを求められる。

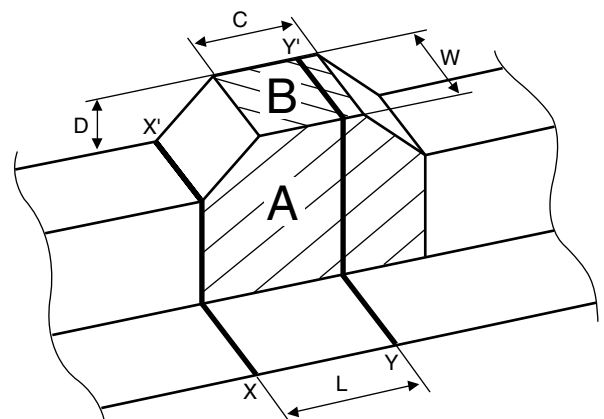


Fig. 4 Typical press shape

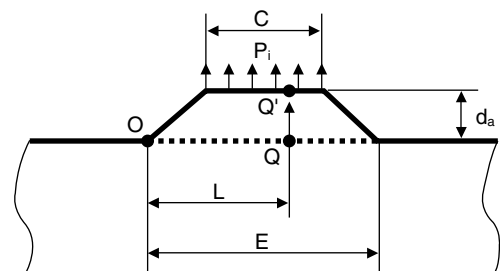
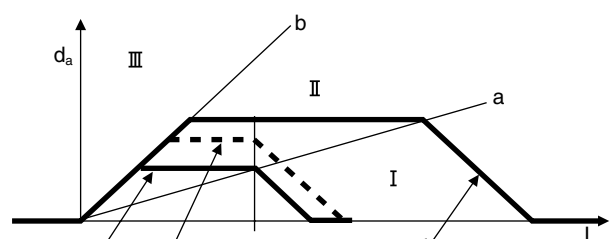


Fig. 5 Deformation of plate A

Fig. 6 Relationship between L and d_a

$$D = d_a + d_b \quad (1)$$

すなわち、成形可能な最大変形段差Dは、長さLと断面幅Wで表せることがわかる。このとき、二つの断面(Fig. 4のXX', YY'断面)の長さの差F(周長差)をとると、段差Dと同一であり、段差を周長差に置き換えられる。この関係を、Wを一定としてLとFで図示するとFig. 7のようになる。この関係を成形マップと呼び、前述した領域I, II, IIIをそれぞれ成形安定領域、生技検討領域、成形不可領域としている。

Fig. 8に示す形状に対し成形性を判定する場合、基準断面に対する断面x, y, zの断面間距離と周長差を計り、マップに書き入れる。Fig. 7にそれぞれの数値を示す。断面x, zは成形可能領域にあるが、断面yは成形性の共存領域に入っている。しかし、断面zまで段差が伸びているので、この場合は成形可能な段差であると判定できる。

実際の製品は、複雑な形状を持っているが、このような段差形状の集合体とみなせばこの手法を適用できる。そこで、実際の成形品の周長差を測定し、それぞれについて成形性を確認した。その結果をFig. 9に示す。マップの判定値と実際の事象とはよく一致し、実製品にも適用可能であることが確認できた。

3.2. 成形マップシステムの構築

成形マップの判定をより効率的に行うツールとして、CAD上に成形マップシステムを構築した。Fig. 10のような製品形状に対し、プレス方向を通る断面を平行に複数作成し、作成された各断面の長さ(周長)を計算する。作成された複数断面の中から任意の二つを選ぶと

周長差 = $L_a - L_b$, 断面距離 = L_c が求められる。

これを先の成形マップに当てはめ、プレス成形時の不具合判定を行うものである。断面線の色と太さを分けることにより、判定値を表示している。太さによって成形性判定領域を表し、色によって周長の長短を表している。長短を区別することで形状修正の指針を示している。

製品形状の段差が大きく成形の難しい形状の場合、従来からダイフェース部分を曲面にして成形性を確保するが、その曲面ダイフェースにも対応している。また逆に、平面ダ

イフェースでの周長余りを計算し曲面ダイフェースを作成する機能も付加している。成形判定に要する時間は約1-2分であり、形状検討あるいは、ダイフェース設計に活用している。

3.3. 成形マップシステムの適用事例

Fig. 11に成形マップシステムの適用例を示す。この適用例の場合、当初平面ダイフェースで金型仕様を考えていたが、成形マップシステムで検討したところ、成形不可領域が多かったので曲面ダイフェース仕様に変更した。赤と黄の断面線はどちらも成形不可領域の断面である。赤が周長の短いもの、黄色が周長の長いものを表す。対策として、黄色の周長を短くするためにダイフェースを盛り上げた。このときの試作結果はFig. 12に示すように大きな不具合がなく成形できた。

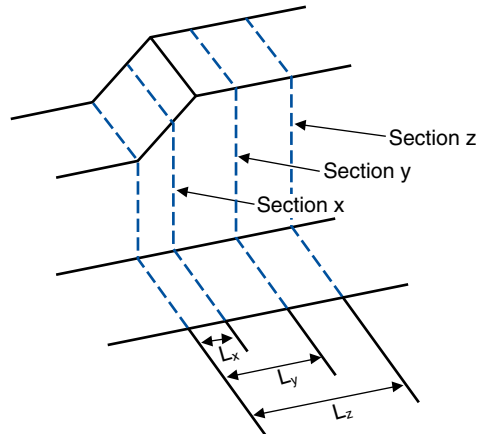


Fig. 8 Sections on a shape

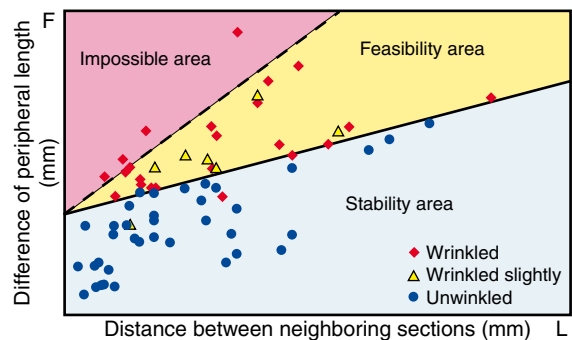


Fig. 9 Measured data on press map

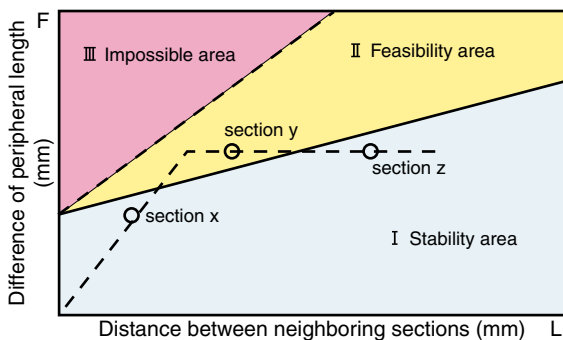


Fig. 7 Press map

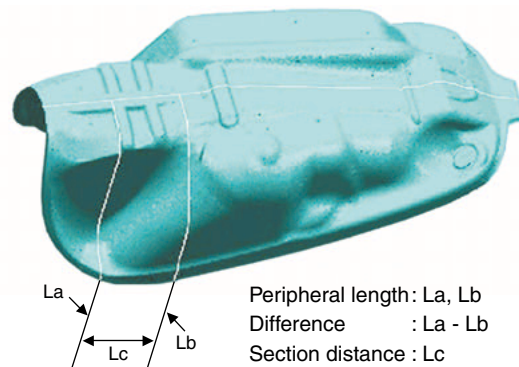


Fig. 10 Press map system

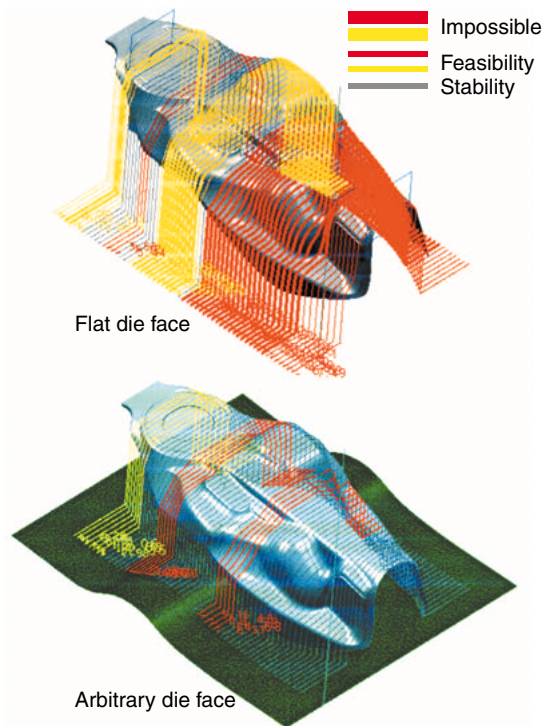


Fig. 11 Example of product shape



Fig. 12 Result of press forming with arbitrary die face

この結果から、成形性判定ツールの有効性を実証できた。また、試作型を量産と同じ曲面ダイフェースにしたことで、金型仕様に試作結果の不具合対策を織り込むことができ、金型設計の効率向上に寄与した。

4. プレス CAE システムの開発

金型設計段階では、製品形状を含めた金型形状と成形条件を含めた成形性を検討する必要がある。そのためには、実際のプレス加工工程を同条件でシミュレートでき、成形過程における板材のき裂、しわ、ひずみを評価できる機能を有することが求められる。これらを実現するシステムとして有限要素法(FEM)を用いた弾塑性変形解析(プレスCAE)を活用している。

4.1. プレス CAE

プレス加工工程をシミュレートするには、以下の機能が必要である。

- ・複雑な製品形状を取り扱える
- ・素材の非線型現象(素材の大変形、塑性域変形、型との接触)を解析できる
- ・ドロービード、トリム等のプレス成形固有の問題を取り扱える
- ・解析が安定していて、実用的な時間で解析できる
- ・成形性を正確に評価できる

この要件を満足する手法として、FEMを用いた手法が幾つか提案されているが、大きく分けると動的陽解法、静的陰解法に区分される。それぞれの手法に長所および短所があるが、解析時間と精度の観点から動的陽解法ソフトを選択した。この手法は、もともと衝撃解析や衝突解析をシミュレートするために開発されたものであるが、それを準静的なプレス加工解析に応用したもので、大変形や接触のような非線型解析に対して、解が確実に得られ計算が安定していることが特徴である。反面、この手法は解析時間ステップの刻みを非常に小さく(10⁻⁶sec程度)とる必要があり、数秒かかるプレス工程を解析するには、多大な計算時間がかかってしまう。そのため、実用的にシミュレートするには何らかの工夫が必要であり、現状では、解析結果の精度に影響をあたえない範囲で、成形速度を10～100倍に上げて対応している。

4.2. プレス CAE システムの導入とカスタマイズ

動的陽解法手法による成形性予測をより効率的に行うため、プリポストシステムを導入しカスタマイズを行った。このシステムには以下の特徴がある。

- ・プレス加工専用システムであり、パラメータ入力においてシングルアクションプレス、ダイ、パンチ、ビード等のプレス加工用語を用いて入力でき、プレス設計者にとって扱いやすいシステムとなっている。また、解析に用いられる内部パラメータはデフォルト値が設定されており、動的陽解法ソフトを意識せず解析が実行できるようになっている。
- ・絞りビードによる板材の変形抵抗を数値パラメータとして入力できる。絞りビードを型形状でモデル化する場合に比べ大幅な計算時間短縮となる。このパラメータ値は実験と解析との同定を行い、正確な数値を導出している。
- ・材料データベース機能をもっており、当社固有のデータが登録可能となっている。現在、製品に使用している材料で引っ張り試験を行いひずみ-応力線図、r値(異方性パラメータ)を測定し登録してある。
- ・多くの結果表示機能をもっており、様々な角度から成形性を評価できる。表示機能として板厚減少率分布、FLD(成形限界線図)、スクライブドサークル、ショックライ

ン、加工圧、素材と型との接触分布などがある。

- ・社内イントラネットにデータベースを設け、解析条件と解析結果を保存している。製品と金型設計者に開示され、金型設計に活用している。

このシステムを用いた解析手順を Fig. 13 に示す。

(1) 3D モデルの作成

製品モデルに対し、余肉形状、ダイフェース形状を付加し、金型形状を作成する。プレス成形上重要なフィレット部は忠実に作成する必要がある。

(2) メッシュ作成

ダイ、ブランクホルダ、パンチおよび素材を全て有限要素メッシュによる多面体近似で表す。

(3) 成形条件設定&解析

材料特性、クッション圧、マサツ、絞りビード荷重、ストローク量等の成形条件を設定し、解析を実行する。

(4) 結果評価

成形過程における板材のひずみ、変形、板厚、応力、面圧を出力し、この結果から金型形状、素材の種類、板厚、形状および配置、クッション圧、摩擦、絞りビードパラメータの検討を行う。

(5) 結果の蓄積

これらの結果を先に述べた解析データベースに保存する。

解析結果の一例を Fig. 14 に示す。このグラフは燃料タンクの板厚を対称面沿いに出力しており、実測と解析結果を併せて表示している。両者はグラフ全域でよい相関を示しており、実製品に適用可能であることが確認できた。

4.3. プレス CAE システムの適用事例

しわ、き裂に対するプレス CAE システムの適用事例を示す。

4.3.1. しわの予測

Fig. 15 に解析結果の変形形状を示す。上図が改修前、下図が改修後である。改修前は凹形状部に板余りが発生していたがダイフェース形状を変更することでその板余りを防ぐことができた。

解析では、型が剛体であることから下死点でのしわの発生は実際より少なくなる。そのため、現状では成形過程における板の変形具合、しわの発生タイミング、しわの高さなどを前述したデータベースから類似機種の燃料タンク形状を参考に設計者のしわ判定に役立てている。

4.3.2. き裂の予測

Fig. 16 に解析結果の板厚分布図と各仕様ごとの最小板厚グラフを示す。初期仕様でき裂の判定値はクリアしたものの限界値に近く量産時のバラツキを考えると成形余裕度がないため、素材配置と形状を修正し余裕度を増した事例である。最小板厚部の板厚を基本仕様と改修案 1、2 で比較した。き裂の判定には、このほかに板厚減少率、成形限界線図、板厚減少履歴を総合して判定を行っている。

5. 今後の課題

- (1) き裂、しわの次に多い成形不具合に面ひずみがある。これは製品形状上に微少なしわ、あるいは、うねりが生じたもので、外観品質の低下を招く。変形状態、応力、ひずみ等で判定する手法があるがまだ、精度が十分でない。今後、事例数を増やし判定技術を確立していく必要がある。
- (2) 金型形状の中で余肉形状は成形性に大きく影響する部位である。この形状によって周長差も調整出来、板の流入もコントロールすることができる。しかし、クッション圧のように解析パラメータでチューニングする場合と異

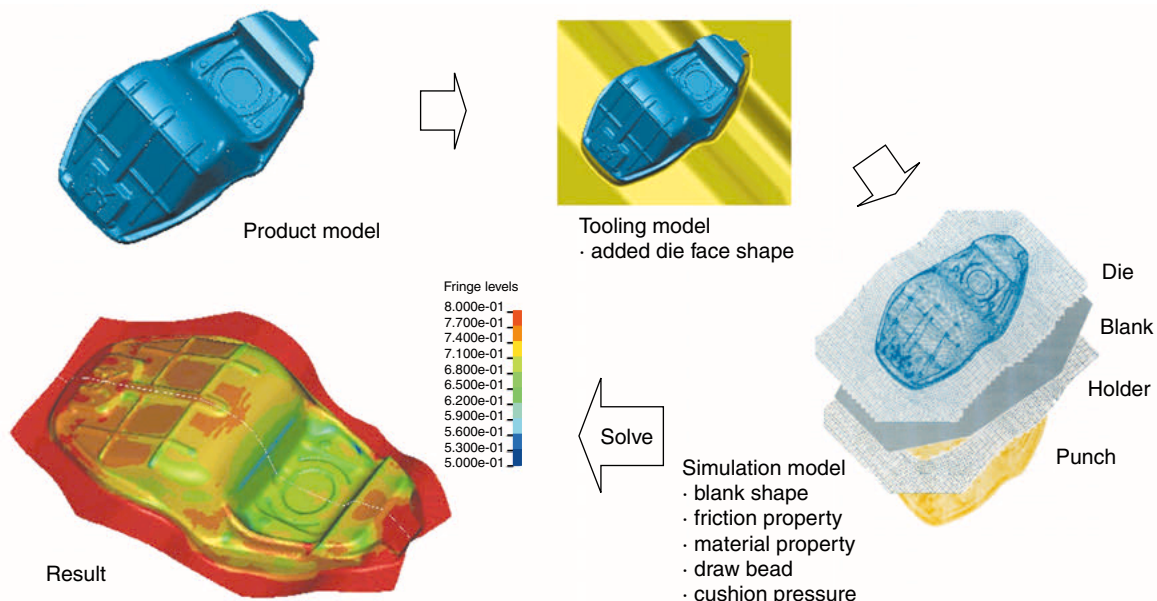


Fig. 13 Simulation flow

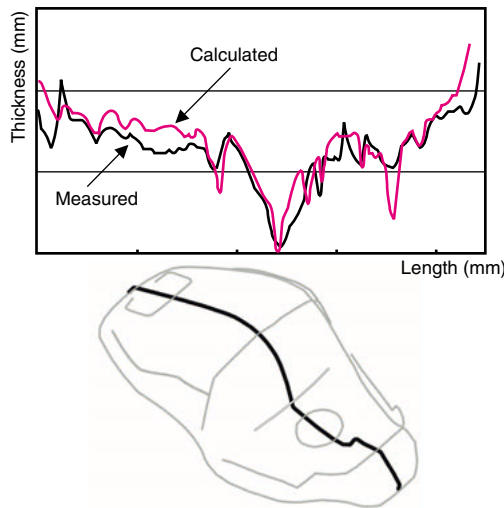


Fig. 14 Measured and calculated thickness distribution on a product shape

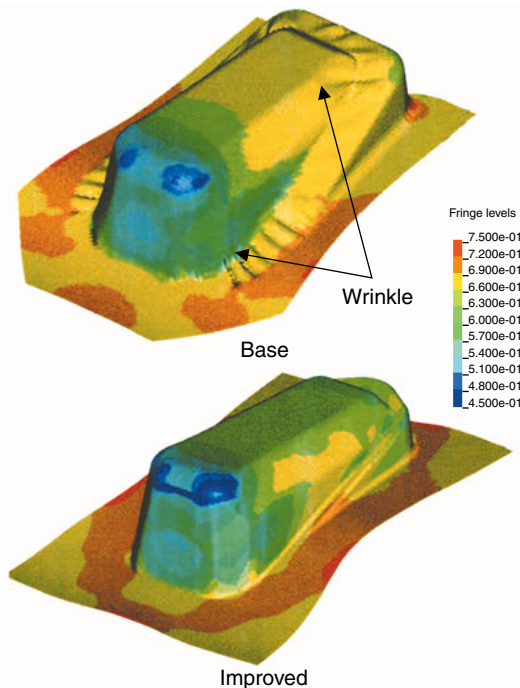


Fig. 15 Countermeasure implementation for wrinkle

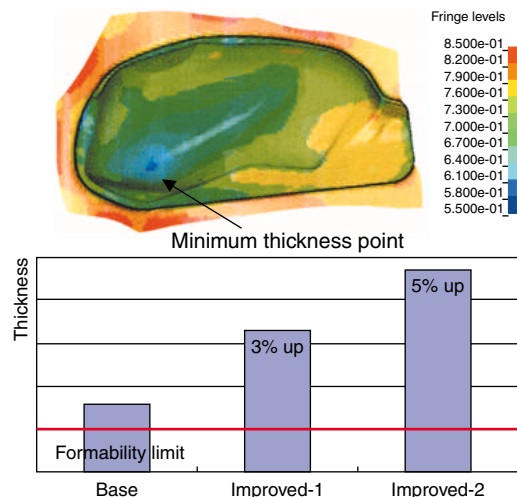


Fig. 16 Countermeasure implementation for crack

なり、この形状を検討するには余肉形状モデルを複数用意する必要がある。現在簡易ツールを検討中である。

- (3) 海外生産のシフトに伴い、現地設備・現地材料でのプレス加工が増えてきている。それぞれ成形性が異なるため、現地材料の材料特性を今後揃えていく必要がある。

6. まとめ

プレス成形性評価手法として以下の二つのシステムを構築した。

(1) 簡易・高速検討型の「成形マップ手法」

段差形状の板の変形形態に着目した「成形マップ手法」を開発した。製品設計段階での形状検討、また、金型設計段階でのダイフェース設計に活用し、有効性を検証した。

(2) 詳細・高精度検討型の「プレス CAE 解析手法」

FEM を用いた「プレス CAE 解析手法」を開発した。金型設計段階での金型形状成形条件設定の検討に活用し、その有効性を検証した。

これら二つのシステムを使うことにより、設計段階で製造要件を定量的に検討することが可能となった。

参考文献

- (1) 桑原正二：薄鋼板プレス成形におけるパンチ面沿い周長差としわの関係，HONDA ENGINEERING TECHNICAL REVIEW Vol.2, p.118-124 (1994)
- (2) 牧野内昭武：板成形シミュレーションとその関連技術に関する世界の現状，塑性と加工，第 40 巻，第 460 号，p.12-21 (1999-5)

■ 著 者 ■



荻野 孝



鴨 弘之



田上 友之



斎藤 実



横田 裕樹



桑原 正二