

## 小特集

## プレス成形のナレッジとシミュレーション

安藤知明\*・常木優克\*・古林忠\*

**ABSTRACT** Numerical simulation is becoming an effective approach to predict the springback during Sheet Metal Forming process of high-tension steel. However, the know-how of skilled techniques in industry is also indispensable, and still plays a significant role in production. This paper tends to point out that it is very important to combine the numerical simulation and the know-how in Sheet Metal Forming. A generalized database system is very necessary and must have the following 4 features: 1) easy to operate for data input; 2) capable of establishing complex relationship between simulations and know-how; 3) realization of constant technology update; 4) ability to explain various behaviors in Sheet Metal Forming. Finally, examples of such a database system are presented.

## 1. はじめに

日本では少子高齢化時代を迎え高度成長期時代を支えてきた熟練技能者が減少しつつあり、ものづくり産業の将来が危ぶまれている。これらの課題に対する対策は国や産業界でも進められている。経済産業省でH13～H17年度に行われたデジタルマイスタープロジェクト(ものづくり・IT融合化推進技術の研究開発)もそのひとつである。

一方、コンピューターの発達に相伴って、ものづくりの設計・製造・流通・販売すべての領域でIT化が進みつつある。設計・製造領域では主にCAD・CAM・CAEという形で普及しつつあり、大企業のみならず中小企業においても、ものづくりの必須の道具となりつつある。

しかしながら、この中でCAEはものづくり現場の中の多様性、複雑さのために、現実とのギャップを埋めきれず、必ずしも十分に使える道具となっていないのが現状である。

本稿では、プレス成形分野を対象に、現実のものづくりノウハウとシミュレーションの関連を取り上げ、これらを融合することにより真にものづくりの道具として役立つ仕組みについて考察するとともに事例を紹介する。

2章ではプレス成形シミュレーションの現状と課題、3章ではものづくりノウハウのナレッジ化、4章では成形シミュレーションとノウハウの融合化とその事例、5章ではまとめについて述べる。

## 2. プレス成形シミュレーションの現状と課題

近年プレス成形シミュレーションは目覚しい発展と普及をみせている。その背景には、発展する自動車産業での環境対策のための軽量化に起因する高張力鋼板の使用増加がある。高張力鋼板のプレス成形ではスプリングバック現象(型から製品を取り出した際に、板が大きく変形して正規の製品形状にならない現象)が発生し従来の経験や知識では解決できずにトライ&エラーによる多数の試作によっているのが現状である。さらにグローバリゼーションによる競争激化のため経済的要請(試作回数の低減や工期短縮)も益々強くなり、シミュレーションによりこれらを開拓しようという機運が盛んになってきている。また、コンピューター能力の飛躍的発達や解析技法の発展により実用的にシミュレーションができるようになってきたことも大きな要因である<sup>1)</sup>。

プレス成形シミュレーションを解析の観点から見ると、大変形、接触、弾塑性、多工程、構造変化(トリムなどによる切断)と非常に難しい解析である。しかしながら上記に述べた背景から、中小企業レベルにおいても多用され始めている。

ここで成形シミュレーション活用のメリットを以下に示す。

Knowledge Database and Sheet Metal Forming Simulation Software. By Tomoaki Ando, Masakatsu Tsuneki and Tadashi Furubayashi (Advanced Simulation Technology of Mechanics Co., Ltd.).

\* (株)先端力学シミュレーション研究所

① バーチャルトライにより試作回数の低減ができる  
試作回数の低減により、費用の低減と工期短縮が図られる。

② 条件変更が容易なため多くの条件を検討できる

板厚、材質、ビード(板の流入抵抗を増すための帯状の小突起)等の条件変更が簡単に行える。これは検討が多数行えることを意味しており、経験の蓄積にとって重要である。図1には、ビードがある場合と無い場合の成形品の違いを示す。ビードがある場合板の流入が減少している事が判る。

③ 理論的バックを持つため正確である(個人差は無い)

解析手法は有限要素法という確立した手法に基づいており、個人差(経験による差)は無く論理的に明解である。また、現在の高張力鋼板のスプリングバック現象のように、経験だけでは予測できない時に、理論に基づいて答えを出すことは非常に有効となる。図2には、スプリングバックの解析結果(金型から外した状態

と下死点(金型の押し切った状態)の差)を示す。事例では7mmのバック量を生じている。高張力鋼板ではこの量が大きく経験に基づく予測が難しくなる。

④ プロセスの視覚的情報が得られる

プレス加工は金型内部で行われるため、途中の状況を見ることがない。シミュレーションでは途中プロセスをアニメーション的に見ることができ、成形の詳細な検討が可能となる。図3には、S-rail(S字状のレール形状)のフォーム成形(板の外側を押えないで成形する方法)の途中経過を示している。途中では若干のシワが発生しているが、下死点では解消している事がわかる。

⑤ 教育に有用である

上記②~④の特徴から非熟練技能者であっても、経験を早く積むことができ、また論理的理得もできるため、技能者が早く育つ。

しかしながら、現在の成形シミュレーションは以下

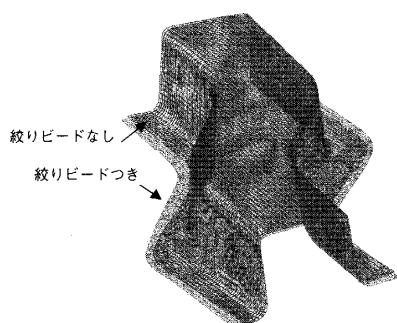


図1 成形条件の違いの比較(ビード有無)

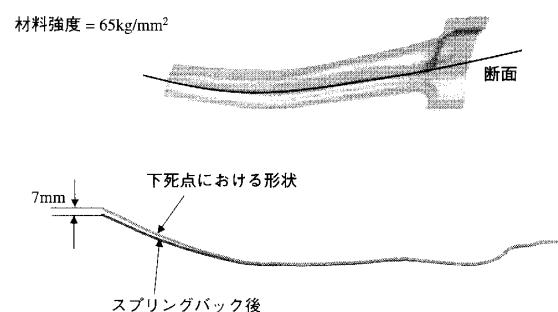


図2 スプリングバック解析事例

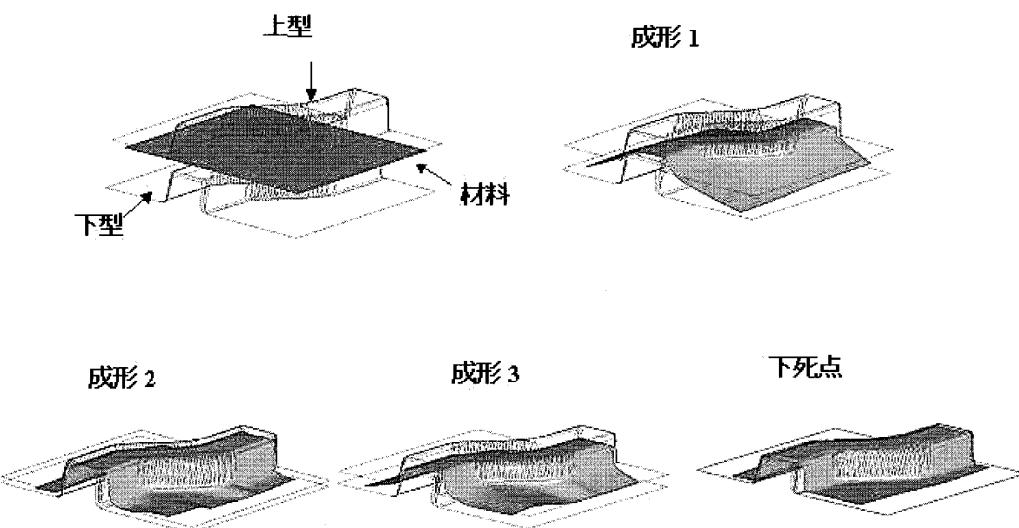


図3 成形過程の可視化(S-rail form 成形事例)

の課題を抱えている。

#### ① モデルに限界がある

シミュレーションは当然のことながら現象を完全に反映しているわけではない。現実を何らかのモデルに置き換えて解いているわけであるが、このモデル化の際に切り捨てられた要因(例えば、気候の影響、プレス機の機差、材料のバラツキなどである)があること、および解析手法の持つ誤差や要素サイズの問題(計算時間やコンピューター記憶容量の限界から無限に小さくはできない)があるわけである。

#### ② 経験が必要である

プレス成形シミュレーションは、大変形、接触、弾塑性材料、多工程、構造変化(トリムなどによる切断)等を含む複雑な解析のため、解析で妥当な結果を得ることおよび結果の解釈(現実との対応)について経験を要する。一種の経験工学となっている。特に現実との対応については経験の蓄積が判断を左右する。

#### ③ 現実無視に陥りやすい

現実から遊離したデータを入力しても解析結果は得られる。それをチェックする手段はシミュレーションそれ自体には備わっていない。あくまで使用者が現場状況を確認したデータを準備しなければならない。

#### ④ データ作成工数大である

通常ものづくりの世界ではCADをベースにすることが当たり前となってきた。しかし、CADデータがあっても解析の準備まで工数を要する。またCADデータの品質も精度のよいものが要求される。

また、不具合対策として工具の形状修正(例えばフィレットR修正、ダイ肩Rの変更、ビード形状変更など)は、ビード形状変更を別にすれば元のCADから作成しなおさざるを得ず、大きな工数がかかる。

#### ⑤ 対策案は出ない

シミュレーションは、想定したモデルに基づいて結果を予測するもので、解析結果が不具合を示しているとき、自動的にその対策案が出てくるわけではない。不具合対策はあくまで技術者が考えることであり、ここが最も知識との融合が望まれているところである。

以上、プレス成形シミュレーションのメリットと現状での課題を見渡すと、社会的要請からシミュレーションのモデル化や解析手法は今後も発展を続け解析精度は高まっていくと予想される。例えば、最近型たわみの問題が注目されて、プレス成形シミュレーションにこのような影響を取り入れる研究がなされている<sup>2, 3)</sup>。

しかしながら成形シミュレーションが、ものづくり現場で活用していくには、精度面の向上のみならず現実との対応や不具合対策との結合が重要となり、必然的にものづくりノウハウ(知識)とシミュレーションの結合が重要となる。次節以降にこの問題を論ずる。

### 3. ものづくりノウハウのナレッジ化

プレス成形の設計製造現場では、熟練技能者のノウハウが極めて大きな役割を果たす。これらのノウハウは熟練技能者個々人の暗黙知として存在し、従来、熟練技術者から若手技術者へと時間をかけて伝承されてきた。そして、その技能伝承過程では多くの試行や失敗を伴うのが必然であった。

しかし、前述の様に現在は納期の短縮、厳しいコスト削減の中、失敗を繰り返すという効率の悪い方法での技術習得は成り立たない状況になっている。

一方、2007年問題や生産拠点の海外への移転による熟練技術者の減少は、国内企業の競争力維持にとって重大な問題であり、若手技術者の早期育成への取り組みが急務となっている。

これを受け、技術情報を蓄積し活用することを目的とするデータベースシステム(以下ノウハウデータベース)が提供されるようになり、一般に標準化の行い易い分野からその導入も進みつつある。プレス成形の分野では、まだ導入が始まったばかりであるが関心は急速に高まっている。

ここで、その様なノウハウデータベースは、従来の個人から個人への技術伝承による進化の過程を、組織レベルに拡大し、継続的な進化を目指すことが肝要であり、その為には、図4に示す様なナレッジマネジメントのプロセスを実現する必要がある。

この一連のプロセスはSECI(セキ)モデルと言われ、

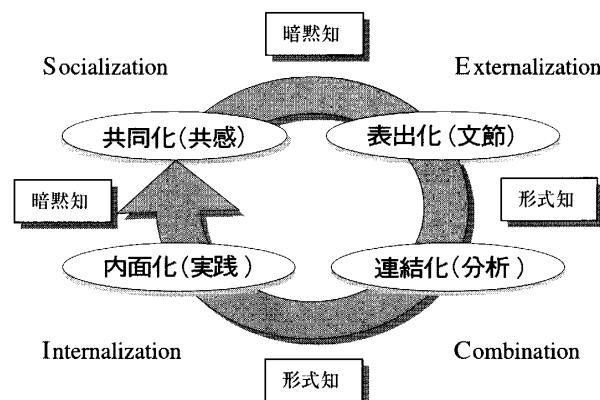


図4 知識循環プロセス(SECI モデル)

野中郁次郎氏により提唱されたものである。

「共同化」は、個人における暗黙知の習得・創出であり、「表出化」はその暗黙知を共有できる形に形式知化する。次に「連結化」は、形式知を組み合せて活用することで知識を体系化し、「内面化」では、行動や実践を通じて形式知を具現化し、新たな暗黙知として理解学習するという循環モデルとなっている。

ここで、プレス成形における技術蓄積について、これらの知識循環プロセスを支援するシステムへの期待及び考慮すべき課題について示す。特にプレス成形の領域は、複数の成形性要因が多工程に渡り複雑に影響し合うことから、特定のケースを除き標準化は非常に難しく、現場の暗黙知を如何に有効に活用できるかといったことがポイントとなる。

まず、ノウハウデータベースへの期待は以下のようになる。

#### ① 再発防止(事前防止)

工程設計の際に、適切な設計標準の参照、過去の類似ケースの不具合事例／設計変更履歴を容易に参照することで、同じミスの繰返しを防止でき、個人による設計のバラツキも低減する事ができる。

#### ② 問題解決の効率化

試作時に発生した不具合についても、対策標準書や、過去の類似事例(対策と効果)、そしてその発生原因に関する情報が容易に参照できれば、現場における問題解決を大幅に効率化することができる。

#### ③ 若手の活用・育成

熟練技術者の設計手順や思考手順をワークフロー等

の形で形式化する事により、若手技術者であっても漏れ・ムダのない作業を行うことが可能となり、設計ノウハウの修得にも繋がる。

また、上記の設計作業を通して発生する問題・対策の局面では、それに関連する情報を容易に得ることで、技術修得の効率が上がる。

#### ④ ノウハウの蓄積促進

プレス成形技術は本質的に標準化の難しい領域であるが、事例を意味的に体系化し効率よく整理・分析することで、標準化が促進されることが期待される。

次に、現状提供されるシステムの抱える課題・求められる要件について記す。

#### ① サポート範囲(狙い)の狭さ

現在のシステムの多くは、知識循環プロセスにおける「連結化」の領域をサポートするに留まるものが殆どであり、他の領域について考慮されたものは非常に稀である。

最もシンプルなものはファイル管理システムで、技術情報の蓄積は容易であるがその活用といった点では十分に機能しないと言った問題がある。それを補うものとして、「表出化」の領域を部分的に加味したナレッジマップやワークフロー(設計プロセス)をベースとした設計ナビゲーションシステムが登場して来ている(図5参照)。

但し、プレス成形のように設計過程の随所において過去の事例を効率よく活用することが求められるケースに対し、有効な仕組みを提供するものは少ないのが

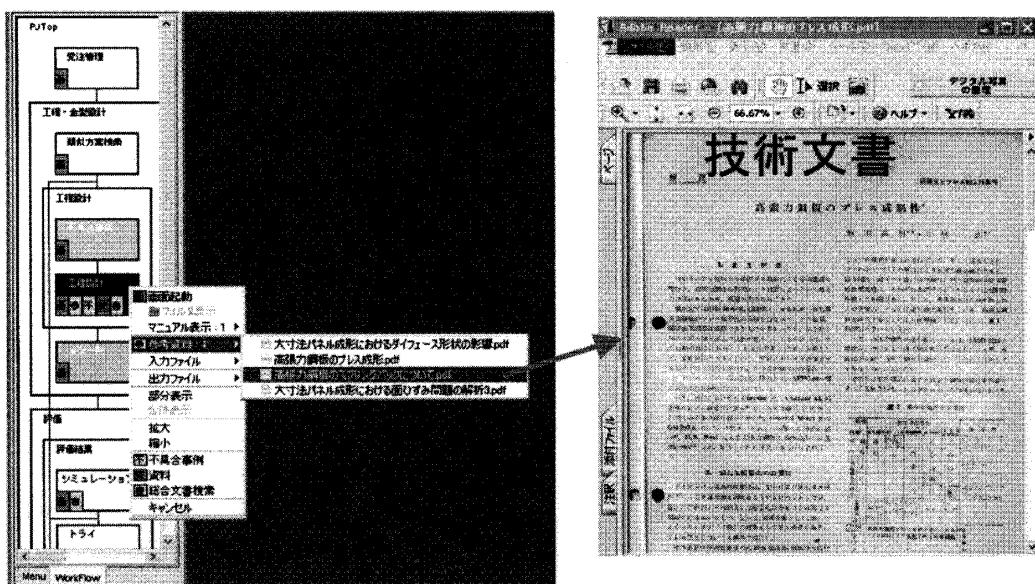


図5 ワークフローからの設計情報参照

現状である。

更に、性能要件の高度化や技術進化の盛んな領域では、常に現状を分析し標準を改定して行く仕組みが伴わないと、システムの陳腐化は避けられず、技術の進化を継続する事は困難となることが想定される。一般に、システムの立ち上げ時に専任プロジェクトを設け、技術情報の収集・標準化分析を行い、ナレッジデータベース(設計ナビゲーションシステム)を立ち上げるケースが多いが、その後専任部隊が解散してしまうと、システムは陳腐化の一途を辿ることとなる。

## ②表現力の低さ

蓄積された技術情報を、設計の過程において活用する際の利便性、効果は、その蓄積形態に大きく左右される。

最も一般的な技術情報の蓄積手法は、設計・製造現場で作成される文書、データといったものを、そのままの形でキーワードを付与し一元登録するものであるが、このままではファイル単位での活用に止まり、よほど厳密にキーワード付けを行わない限り実際に開いてみると内容が分からぬ。従って、探索にかかる時間的制約から、情報の利用効率は自ずと制限される。特に、情報量が増大してくるとシステムとして機能しなくなる傾向がある。この為、ナレッジデータベースの機能を果たすためには各種ファイルは、順序、因果関係、物理構造といった意味的な情報連関を伴い蓄積されることが望まれる。プレス成形の場合、工程、金型といった基礎的な情報と、シミュレーションや実試作(材料、加工条件を含め)との関係が論理的に結びついている必要がある。(図6参照)

特に、製造設計の領域では、蓄積すべき技術の中核は問題対策にあるため、これらの関係がその発生原因

を含め論理的に結合されていることが肝要である。すなわち、設計上データベース上からそれに関わる情報が得られたとしても、その活用の為には、その根拠(なぜ)が分かる必要があるが、それには、関連する情報をきめ細かく簡単に引っ張り出せることが求められる。

また教育といった面についても、未熟練技能者が自ら育つためには、単に回答が出てくるだけではなく、なぜが理解できるよう関連資料(教科書、論文、技術レポートなど)が芋づる式に引っ張り出せるようなシステムでなくてはならない。なぜが納得できないと理解が浅いものとなり、実体験しない限り身につかないからである。

更に、蓄積された技術情報をより有効に活用するために、実行可能なルールという形で蓄積することが考えられる。CADの領域では幾何形状の自動設計の為のツールとしてサポートされる場合が多いが、ナレッジデータベースとしてのサポートは、まだごく一部のシステムに限られる。この場合にも重要なことは、ルールは誰にでも分かる形で表現・蓄積される必要があるということである。これにより、ルールの理解、変更を継続することが可能となる(図7参照)。

## ③試作・生産現場情報の収集

プレス成形の現場では、設計段階でのCAD、CAEといった情報とは異なり、「もの」という本来IT化され難い情報を扱っており、そこには多くの暗黙知が含まれる。この様な、ものつくりの現場において発生する情報を、現場作業者が容易に電子化し、データベースに蓄積できることが求められる。これに対し有効な仕組みを提供する為には設計現場での登録ツールとは異なるアプローチが必要となるが、全般的に対応が遅れている。

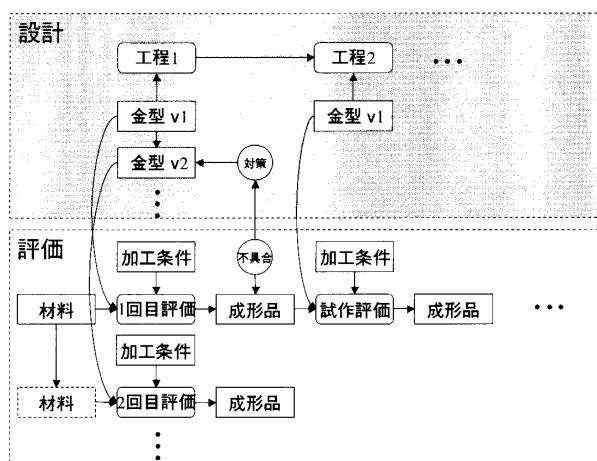


図6 プレス成形加工に関する情報構成の例

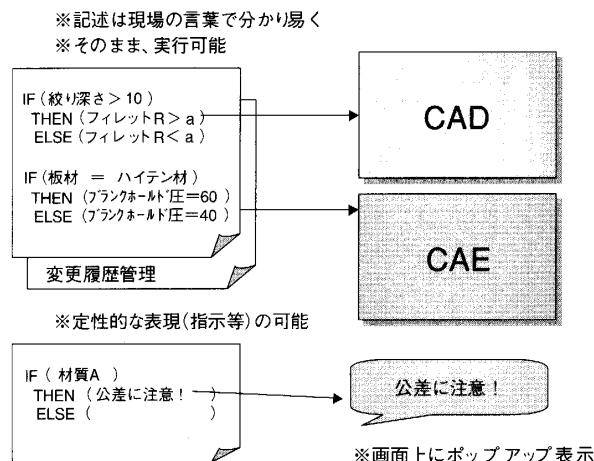


図7 設計ルールの表現事例

以上のようにナレッジデータベースは、ものつくりのノウハウを扱うシステムとしてはまだまだ発展途上にあるが、対象となる技術特性(特に、標準化のレベル)や組織体制、目標に合わせ適切に選択すれば、将来へ向け非常に大きな効果が期待されるものである。また、ナレッジデータベースは、ものつくりに係わる様々なナレッジ領域を包含する形で適用することができる。次章では、ものつくりにおいてその活用効果が期待される、シミュレーションソフトウェアとの融合について説明する。

#### 4. 成形シミュレーションとノウハウの融合

成形シミュレーションだけでは、ものづくりに寄与する割合は少ない。現場ノウハウと融合して初めて真に役立つものづくりの支援システムとなる。ナレッジとシミュレーションの融合は2つの側面で考えられる。一つは、シミュレーションにおけるノウハウの蓄積活用基盤としての利用であり、もう一つは、ノウハウデータベースにおけるものづくりプロセスの中でのシミュレーションの活用に関わるものである。

具体的にプレス成形の試作段階に適用してみると図8のようになる。

ここで、まず一つ目の融合である成形シミュレーションを実行する際の専門ノウハウの蓄積活用について示す。

## ① 解析パラメータ設定

解析に用いるパラメータは物理的に決定しているも

の以外に解析ノウハウとして設定しなくてはならないものがある(例えばメッシュサイズなど). 設定が必要なパラメータは解析手法やプログラムによっても異なる(例えば動的解析手法を用いた成形シミュレーションでは減衰パラメータなどが相当する).

## ② 解析結果の評価

プレス成形現場では、われ、しわ、スプリングバック、ショックライン、型かじりなどの不具合現象が生じる。シミュレーション結果とこれらの不具合とを結びつけることは、必ずしも簡単でない場合もある。そのような場合解析結果を解釈するノウハウが必要となる。**表1**にこれらの不具合項目毎の解析における指標との対比を示す。

### ③ 合せ込み作業

成形シミュレーションを使いこなすためには、上記①,②に関するノウハウが必要であるが、現実には最初にシミュレーション上の情報(条件や結果)と実際の試作結果との合せ込みを行う為の作業が必要となる。そこで、それを行う為の手段をノウハウ化することも重要であり、これにより常に新しい問題へのシミュレーション活用が可能となる。

特に評価指標が未確立な指標においては、解析結果と実際の不具合の対比事例を蓄積し、適切な指標を見出していく必要がある。

以上のような、成形シミュレーションの利用に関するノウハウも、シミュレーションが設計段階に採り入れられていくようになると、プレス成形分野における

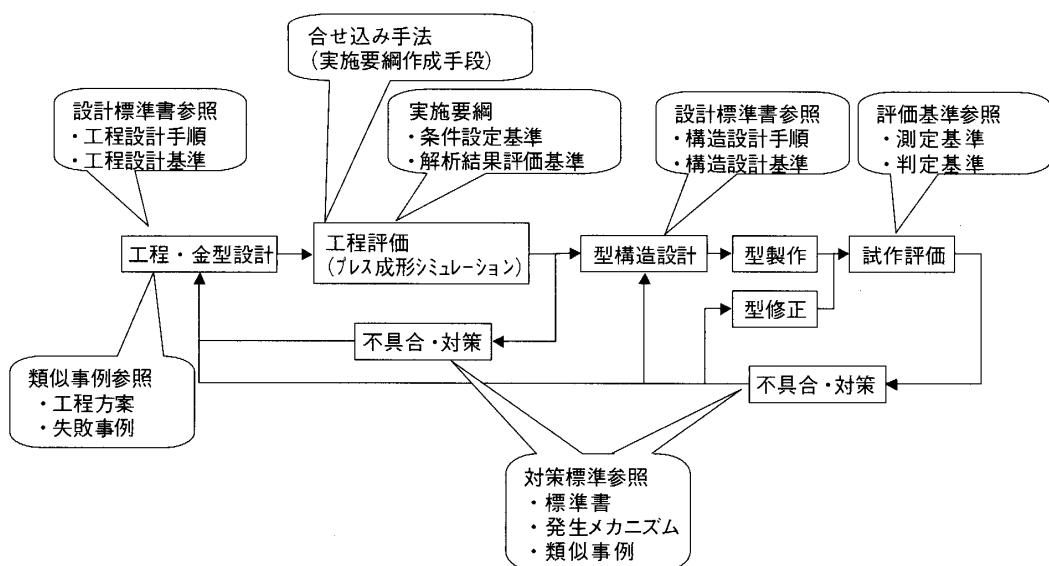


図8 プレス成形工程設計における成形シミュレーション、ノウハウの活用

表1 不具合と解析結果指標

不具合項目	解析結果評価指標		指標の信頼性
	簡略的評価	高精度評価	
われ	板厚ひずみ	FLD	確立
しわ	形状		確立
スプリングバック	形状		確立
面ひずみ	ガウス曲率, 応力変化		未確立
型かじり	接触面の面圧およびすべり量		未確立
ショックライン 位置 程度	ダイエッジライン 応力変化		確立 未確立

重要なノウハウのひとつとなることは必然である。

次に、もう一つの融合である、プレス成形工程設計プロセスにおけるシミュレーションの活用上重要となるノウハウについて示す。

### ① 活用方法

シミュレーションを設計プロセスで効果的に活用するためには、どの様な場合にどの様な目的でシミュレーションによる評価を行うかということに関する状況判断が必要となる。これについては、設計のワークフロー上に取り入れられるべきものである。

### ② 不具合対策案

プレス成形において発生した不具合対策案の策定は、今のところ完全にノウハウの世界に属する。1つの不具合に対して対策案は時と状況に応じて(同じ不具合でも発生過程が異なると対策が異なる)、また技術者の個人的経験に応じて幾つも存在し、不具合の解決できるものであれば全て正解である。また、シミュレーション結果として得られた不具合対策においては、その結果形状モデルを、CADデータの修正に活用するなど、固有のノウハウが存在する。システム上、シミュレーション結果に基づき、これらを、簡単に抽出できる仕組みが重要である。

### ③ 様々な経験の蓄積手段

プレス成形における複雑な成形技術を習得、新たな技術を探求する為の手段として成形シミュレーションの活用は効果的である。特に、若手技術者が習得した技術について、自分の観点で様々な試行を行う事は、技術の深い理解につながり本質的な技術力向上が可能となる。システム上、これらを論理的に整理するための枠組みが必要となる。

またその結果を、データベースとして蓄積し活用することの意義も大きい。

成形シミュレーションとノウハウの結合を考慮した

システムの事例を図9に示す<sup>4)</sup>。

このシステムでは、プレス工程設計プロセスがワークフロー化され、その中で成形シミュレーションの結果を体系的に管理するために専用画面を利用している。この例では、当初設計後、成形シミュレーションを行った結果、われ(板厚ひずみ30%領域)や、しわが発生した。そこで類似の過去事例や、標準を簡単に参照できる仕組みを使い、過去の対策(プランク変更、ビード変更、フィレットR変更など)から有効な対策を探索、それに基づき金型の変更(ビードの変更)、プランク材の形状変更を行い、再度成形シミュレーションで検証している。この結果、変更金型形状を用いればしわもわれもそれほど大きな問題にはならないと判断し、実際にこれに基づき金型を製作し、試作の結果問題はなく成形が行われ大きなコストダウンを実現できた。

## 5.まとめ

本稿では、まずプレス成形シミュレーションの現状とそのメリットや課題について示した。解析としては、かなり難易度の高い解析であるにもかかわらず社会的要請から実用化されてきている。次にものづくりノウハウの基本的考え方を示し、ノウハウデータベースへの期待と課題を示した(表2)。

また真にものづくりに役立つ支援システムを構築するには、成形シミュレーションとものづくりノウハウとの融合が重要であることを述べた。ナレッジとシミュレーションの融合は2つの側面で考えられ一つはシミュレーションにおけるノウハウの蓄積活用基盤としての利用であり、もう一つは、ノウハウデータベースにおけるものづくりプロセスの中でのシミュレーションの活用に関わるものである(表3)。

今後、成形シミュレーションの世界では年々精度は向上していくものと考えられるが、同時にシミュレーションとものづくりノウハウとの融合が強く要請されていくものと考えられる。

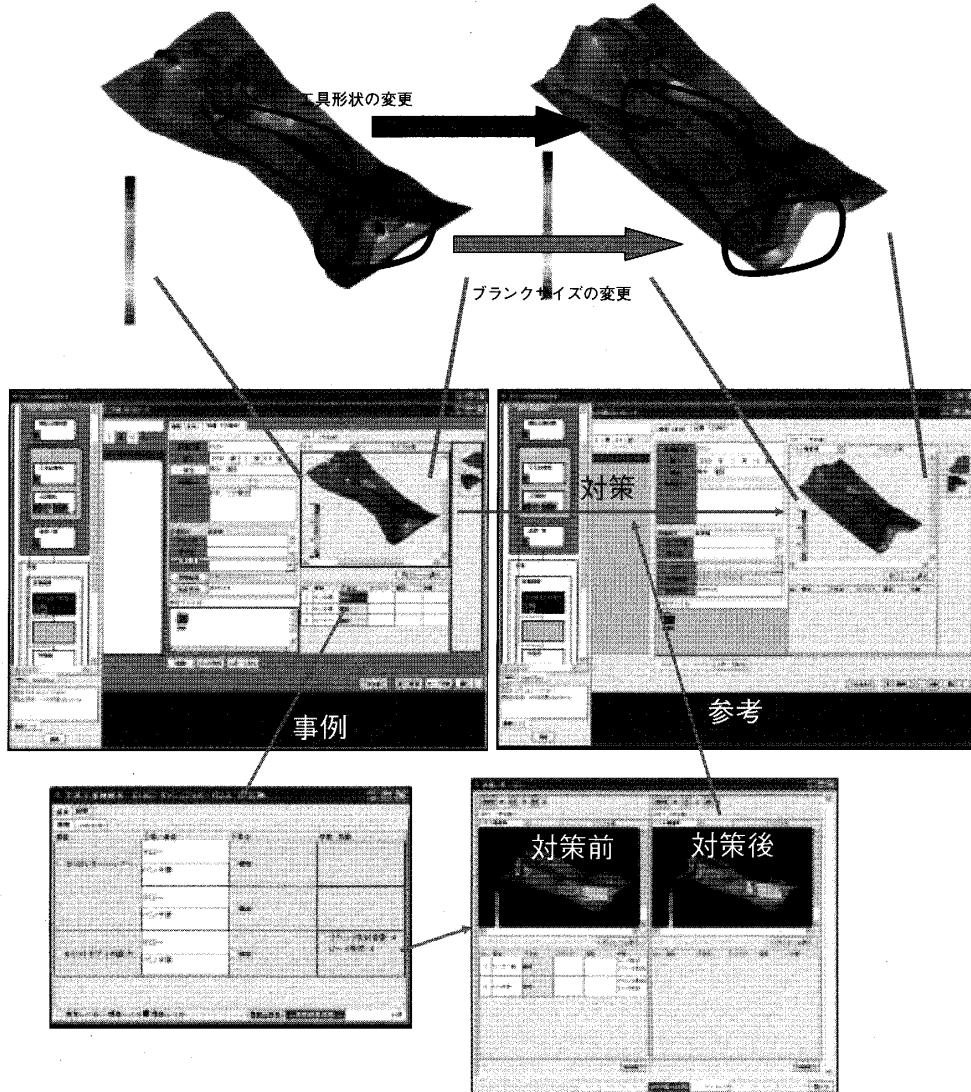


図9 成形シミュレーションとノウハウの結合事例

表2 ノウハウデータベースへの期待項目と課題

期 待	①再発防止 ②問題解決の効率化 ③若手の活用・育成 ④ノウハウの蓄積促進
課 題	①サポート範囲(狙い)の狭さ ②表現力の低さ ③試作・生産現場情報の収集

表3 ナレッジとシミュレーションの融合項目

ノウハウの蓄積活用基盤	①解析パラメータ設定 ②解析結果の評価 ③合せ込み作業
ものづくりプロセスでの活用	①活用方法 ②不具合対策案 ③様々な経験の蓄積手段

## 参 考 文 献

- 1) 吹春, 安藤, 牧野内: 弹塑性静的陽解法 FEM ソフトウェア「ASU/P-form」によるスプリングバック解析, 計算工学会講演会論文集, 7, 355/358 (2002)
- 2) 高村, 浜, 須長, Teodosiu, 牧野内: 金型弹性変形を考慮した板成形シミュレーション, 理研シンポジウム「ものつく

- り情報統合化研究」講演予稿集, 61/68 (2003)
- 3) 蔦森, 吉田: 板成形中の金型たわみを考慮したスプリングバックの有限要素解析, 塑性と加工, 46-532, 55/59 (2005)
- 4) 常木, 安藤: 技能蓄積形プレス工程・金型形状デジタル設計システムの開発, 型技術, 19-1, 34/38 (2004)