

実用的なCAEの活用方法*

鳥飼 岳**

Practical Utilizing Method of CAE*

Gaku Torikai**

Keywords: CAE, simulation, plasticity processing, rolling, extrusion

1. はじめに

CAE (computer aided engineering) がものづくりに導入されて数十年が経過し、製品の設計・製造における工学現象をシミュレートするCAEは、仮想設計・仮想試作のキーテクノロジーとして、さらなる拡大・発展が期待されている。CAEを用いることで、開発期間が短くなり、開発費用を削減できる。また、実験では測定しにくい応力やひずみを可視化することで、複雑な構造体の工学現象のメカニズムを考察できる。新製品の開発に必要なコスト低減が求められている現代において、CAEは必須アイテムともいえる。

一方、CAEの普及に伴う問題も表面化している。汎用のCAEソフトウェアを用いれば、解析対象となる工学現象やCAEに関する知識(例えば、モデル化に関する知識)が無くても、何かしらの計算結果を得ることができる。CAEを導入しても、期待した成果を上げられないのは、上記の問題に起因すると考える。

誰でも簡単に、工学現象をコンピュータ内で再現し、現象のメカニズムを解明できるようなCAEソフトウェアが存在しない限り、CAEを有効に活用するための技能や専門知識が必要になる。ただし、CAEの活用方法は解析者で異なり、CAEの活用事例に関する報告は数多くある^{1)~5)}が、CAEをどう行えば、より効率的に成果が上げられるかは不明である。そこで、本稿では、一例として、CAEの効率的活用に関する研究⁶⁾及びCAEの信頼性の検証方法であるASME V&V⁷⁾について紹介し、最後に筆者の考えるCAEの活用方法について事例を基に解説する。

2. CAEを有効に活用する方法

2.1 CAEの効率的活用に関する研究

片山ら⁶⁾は、CAEを効果的に活用するには、条件設定や材料特性の把握など、経験が必要であるとし、『長岡モノづくりアカデミー』の中でCAE講座を設けることで、技術者にCAEを教育している。また、共同研究や技術相談で得られた情報を共有化することで、CAEを効率的に活用しようとしている。新潟県工業技術総合研究所では、メインサーバを下越技術支援センターに置き、県央・中越・上越支援センターとはネットワークを經由してANSYSなどのライセンスを共有している。このネットワークを用いて、共同研究による報告書や技術相談におけるANSYS Workbenchレポート機能によるPDFなどをメインサーバに保存し、過去の解析事例から材料特性や境界条件を参照できるようにしている。過去の解析事例を参照することで、モデルの検証時間を1/2~1/4程度に短縮している。

共有化された解析情報の一例として、LS-DYNAを用いた鋳物の曲げ破壊解析がある。曲げ破壊試験の解析モデルをFig. 1に示す。曲げ支点間距離は450 mmとし、中央部にポンチを押し込んでいく際の荷重変位線図を採取し、LS-DYNAの解析結果と比較した。

LS-DYNAでは、ポンチ、支点ともに剛体とし、表面のみを作成した。材料モデルはTable 1に示す3パターンとし、ヤング率およびポアソン比は同じとした。

条件1では、破壊判定は最大主応力、条件2および条件3では、塑性ひずみにて破壊判定を行った。また条件3では、引張方向と圧縮方向の降伏応力および加

* 本稿の主要部分は、軽金属, 65 (2015), 184-189に掲載。

The main part of this paper has been published in Journal of Japan Institute of Light Metals, 65 (2015), 184-189.

** (株)UACJ 技術開発研究所 第三研究部

No. 3 Research Department, Research & Development Division, UACJ Corporation

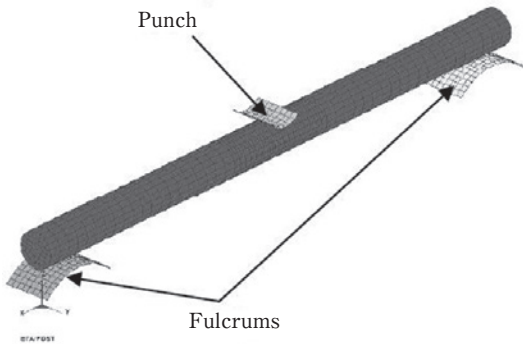


Fig. 1 FE model for the fracture bending test.⁶⁾

Table 1 Material model.⁶⁾

Condition	Material model
1	MAT_PLASTIC_KINEMATIC MAT_ADD_EROSION
2	MAT_PLASTIC_KINEMATIC
3	MAT_PLASTICITY_COMPRESION_TENSION

工硬化係数を異なるものとした。これは、圧縮荷重に対して強い鋳物の特性をモデル化したものである。

曲げ破壊試験と解析結果の比較をFig. 2に示す。解析結果では、降伏後の挙動に差異がある。条件3において、特に実験値と近い傾向を示していることから、鋳物については引張および圧縮の特性をそれぞれ設定することが重要であることが明らかとなった。また、鋳物など脆性材料を扱う場合、塑性変形を無視することが多いが、破壊まで計算する場合は降伏応力および加工硬化係数を現実に近い値にする必要があることが分かった。

このように、情報を共有することで、予備解析を省略し、少ない工数で、現実に近い解析結果を得られるようになる。また、材料定数を決定した経緯を含めて共有化すれば、解析技術の向上にもつながる。

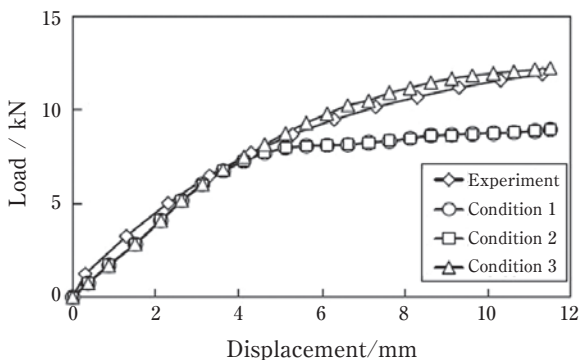


Fig. 2 Comparison between the bending fracture experiment and the analysis results.⁶⁾

2.2 ASME V&V

2.2.1 ASME V&Vの概要

ASME V&V⁷⁾とは、アメリカ機械学会 (American Society of Mechanical Engineer) が提案する解析モデルの確かさを評価するためのガイドラインである。CAEを行う際、CAEソフトウェアを無条件に信用することが多いため、解析結果の信頼性を維持できない可能性があることから、解析者や解析ソフト開発者に対して検証確認の枠組みを提供することを目的としている。ASME V&Vでは、Fig. 3に示すようにCAEの数理モデルや解析条件を検証するよう提案されている。ここで、Verificationは数式化された物理モデルが数値的に正確に解かれているかを「数学的な視点から検証」することであり、Code VerificationとCalculation Verificationがある。市販のCAEソフトウェアを使用する場合において、Code Verificationは解析ソフト開発者が担当すべき仕事であり、Calculation Verificationは解析者が実施すべき作業である。CAEを行う際の材料モデルや要素の種類など、対象とする工学現象に対して適切な解析条件を設定することは、極めて重要である。Validationは、実験結果と解析結果を比較することで、物理モデルが現実の現象を表現できているか否かを「物理的 (実験的) な視点から妥当性を確認」することである。以下に、市販のCAEソフトウェアを使用する際に必要となるCalculation VerificationとValidationの事例を示す。

2.2.2 Calculation Verificationの事例

構造体の変形や衝突問題を扱う場合、各部材は曲げ変形となることが多い。そこで、Fig. 4に示すような3点曲げ時のはりのたわみについて、材料力学から導かれる理論値とCAEによる解析値を比較させ、解析条件を検証する。

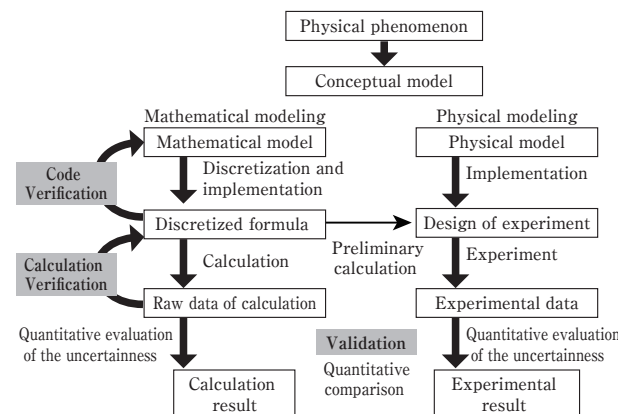


Fig. 3 Diagrammatical view of ASME V&V. ⁸⁾

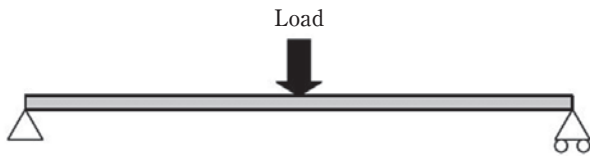


Fig. 4 Three points on bending beam.⁹⁾

はりの長さ $l = 100$ mm, 断面形状を幅 3 mm, 高さ 2 mm の矩形 (断面 2 次モーメント $I = 2$ mm⁴) とし, 材質をアルミニウム (ヤング率 $E = 70$ GPa), はり中央に集中荷重 P が 1 N 作用した場合, はりのたわみ δ の理論値は式 (1) になる。このように, 理論値は一意的に決まる。

$$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} = 0.1488 \text{ (mm)} \quad (1)$$

一方, CAE による解析結果は, Fig. 5 に示すように, 要素の種類やそのサイズによって, 解析値が大きく変化する。ここで, 要素はシェル要素とし, 三角形 1 次要素と四角形 1 次要素を用いた。要素の大きさは, 2 mm (板厚方向に 1 層) と 0.5 mm (板厚方向に 4 層) とした。また, ポアソン比は 0.33 とし, はりの長さなどの寸法や物性値は全て上記のはりのたわみ式に入力した値と同じとし, 線形弾性解析を実施した。

本事例では, 四角形 1 次要素を板厚方向に 4 層作成することで, 理論値と解析値はほぼ同じとなった。このように, 対象とする工学現象を再現できるよう, 解析条件には常に注意する必要がある。

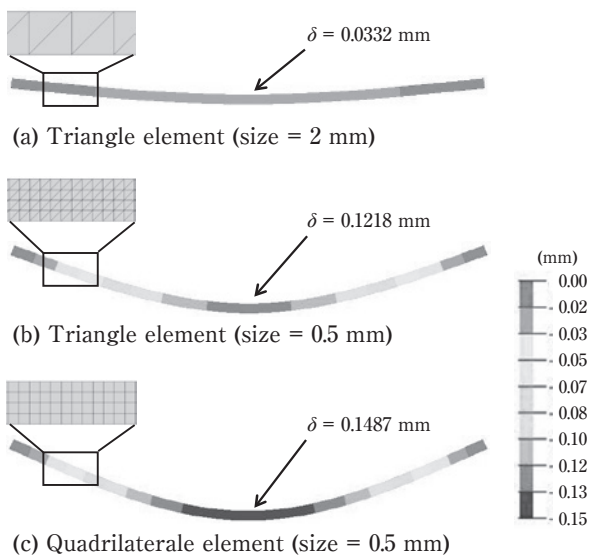


Fig. 5 Influence on the deformation by the element configuration and size.⁹⁾

2.2.3 Validation の事例

アルミニウムの熱延解析モデルの Validation の事例を以下に示す。

(1) 実験条件

圧延するスラブの材質は 1050 とし, 半連続鋳造法で鋳込んだ後, 873 K × 20 h → 空冷にて均質化処理を行った。鋳込んだスラブは厚さ 30 × 幅 150 × 長さ 300 mm の寸法に切断および面削を実施した。圧延後の材料内部の変形状態を観察するため, スラブの幅中央を切断した後, 切断面にレーザーカットにて格子を描き, 切断面を接触させてからスラブ長手の前後を MIG 溶接した。また, 圧延中の温度を測定するため, スラブ長手方向から 150 mm, スラブ幅方向から 60 mm, スラブ厚さ方向に表層から 7.5 mm (1/4 t), 15 mm (1/2 t) の位置に熱電対を埋め込んだ。スラブ温度は 673 K, 圧延速度は 133 mm/s, 圧下量は 9 mm (圧下率 = 30%) とし, 4 段圧延機にてスラブを圧延した。実験前に予備圧延を実施し, ロール温度を 373 K まで加熱した。潤滑油は油分濃度 5% のエマルジョンとし, 予備圧延では供給したが, 実験時には供給しなかった。

(2) 解析条件

SFTC 社製 DEFORM-3D を用いて, ラグランジュ法にて, 剛塑性解析を行った。Fig. 6 に示す面を対称面とし, 1/4 形状にて計算した。スラブ後端の押板がスラブをロールに押し当てることで, 熱延を開始する。

要素は六面体 1 次要素とし, スラブ表層付近を細かくした。材質は実験と同じ 1050 とし, 変形抵抗は熱間圧縮試験により求めた。Fig. 7 に材料温度 673 K, ひずみ 0.3 のときの真応力とひずみ速度の関係を示す。

スラブがロールに咬み込むのに必要な摩擦係数 μ は, 以下の式より求め^{10)~13)}, 圧延中は一定とした。

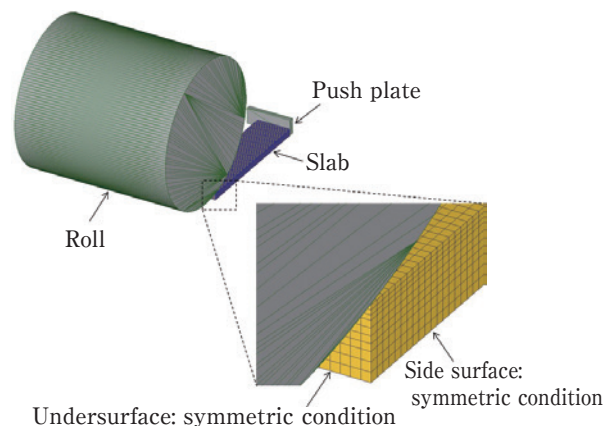


Fig. 6 FE mode for the rolling.

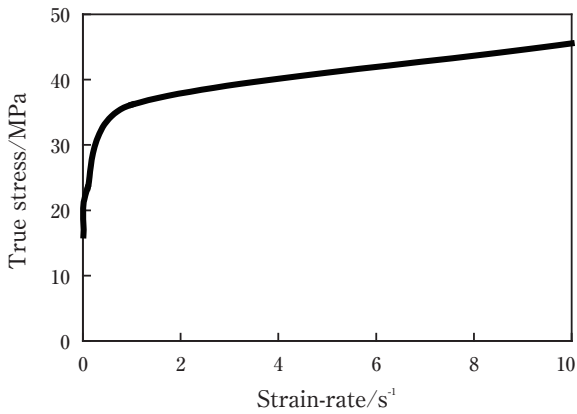


Fig. 7 Relationship between the true stress and the strain-rate (material=1050, temperature=673 K, $\epsilon=0.3$).

$$\mu = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (2)$$

ここで、 Δh : 圧下量 (mm), R : ロール半径 (mm) である。

スラブ-ロール間の熱伝達係数は、実験と解析の温度履歴を比較することで決定し、 $22.5 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした。

また、安定的に熱伝導解析するため¹⁴⁾、以下の式に示すしきい値より時間増分は Δt 小さくし、 0.004 s とした。

$$\Delta t = \frac{\rho c (\Delta x)^2}{2\lambda} = 0.006 \text{ (s)} \quad (3)$$

ここで、密度 ρ は $2700 \text{ kg}/\text{m}^3$, 比熱 c は $900 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 最小要素長さ Δx は 0.001 m , 熱伝導率 λ は $200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ である。一般的に、密度、比熱、熱伝導率は温度によって変化するが、本解析では一定とした。

スラブ温度や圧延速度、圧下率などの圧延条件は実験と同じとした。

(3) 実験と解析の比較

(a) 熱延中におけるスラブ内部の温度変化

Fig. 8に熱延中におけるスラブ内部の温度変化を示す。スラブ中央 (1/2 t) では、加工発熱のため、温度が上昇している。一方、スラブ表層側 (1/4 t) では、ロールへの抜熱のため、温度が低下した。これらの温度履歴を解析で再現した。

(b) 熱延後におけるスラブ内部の変形状態

Fig. 9に熱延後におけるスラブ内部の変形状態を示す。実験と解析のスラブ内部の変形状態は、ほぼ同じであった。

(c) 圧延荷重の実験と解析の比較

Fig. 10に圧延荷重の実験と解析の比較を示す。実験

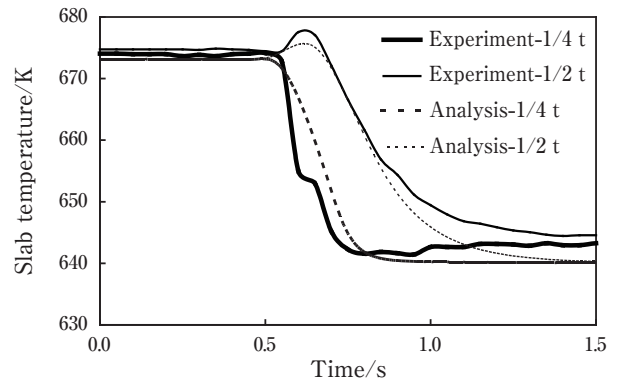


Fig. 8 Comparison between the experiment and the analysis of the temperature behavior in the slab during the hot rolling.

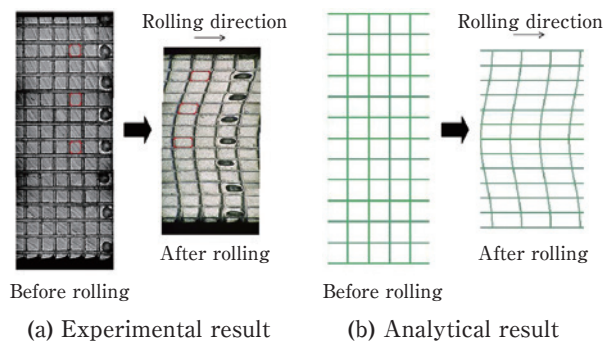


Fig. 9 Comparison between the experiment and the analysis of the deformation behavior in the slab during the hot rolling.

と解析の定常部における圧延荷重は、ほぼ同じであった。実験では、圧延開始時にスラブがロールに咬み込んだ抵抗により、圧延速度が低下している (**Fig. 11**)。そのため、スラブからロールへ熱が伝達し、スラブ温度が低下することで、圧延荷重が高くなった。一方、解析では、圧延速度は一定のため、圧延荷重に初期ピーク

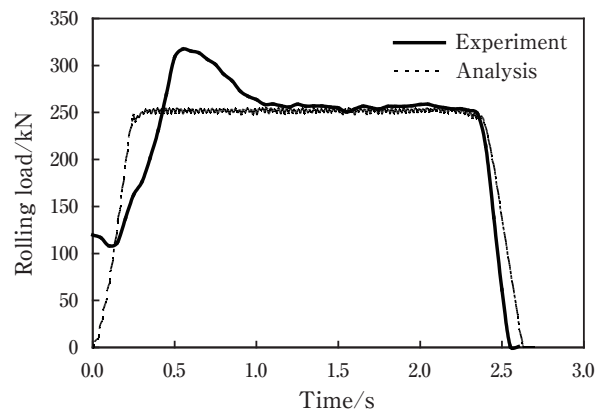


Fig. 10 Comparison between the experiment and the analysis of the rolling load.

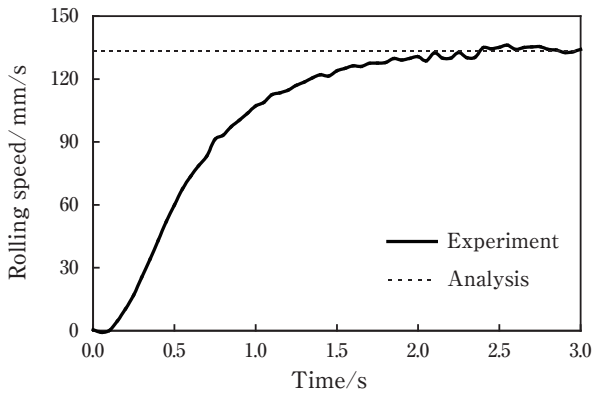


Fig. 11 Comparison between the experiment and the analysis of the rolling speed.

がなかった。

(d) 実験と解析の比較のまとめ

実験と解析を比較した結果、本解析モデルは、圧延中における材料内部の温度履歴や材料内部の変形状態を再現し、かつ、圧延定常部における圧延荷重を予測できた。これらの結果から、本解析モデルは解析結果が実現象と大きくかい離したものではないと考える。

3. 筆者の考えるCAEの活用方法

第2章で示したように、CAEを行う場合、解析条件を正しく設定することは極めて重要である。また、検証済みの解析条件をドキュメント化し、ネットワークなどを介して、関係者で共有できれば、解析のやり直しや誤った解析結果を基に試作するリスクを低減でき、CAEを効率よく活用できる。ただし、解析精度を注視するあまり、『CAEとは正しく解析を行うこと』という考えに陥っていないかが問題となる。本来、CAEの和訳がコンピュータ支援工学であるように、工学である以上、CAEとはものづくりの一種であると考え。ところが、安価で高性能なパソコンが普及し、汎用のCAEソフトウェアの適応範囲が拡大することで、CAEがものづくりの一種であるという認識が薄れてきているように感じる。実際に、割れや壊れなどのメカニズムを考察する場合において、『まずは解析してからメカニズムを考える』という手順を踏むエンジニアが増えている。そこで、筆者は『CAE ≠ 解析』という観点から、Fig. 12に示すような活用方法を提案する。ここで重要なのは、解析の目的は評価であり、CAEの目的はものづくりであると意識することである。解析する前に現象に対する仮説を立てれば、どの物理量で評価するかを決めてから解析条件を設定するので、結果として、現象を再現できる解析モデルを構築しやすくなる。極

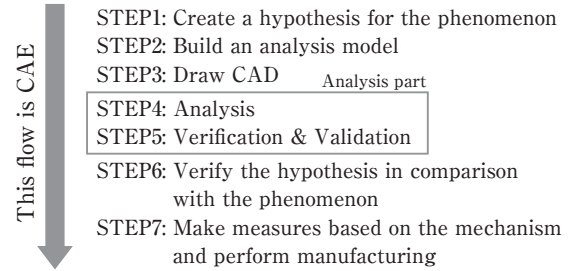


Fig. 12 Suggestion on Practical utilizing method of CAE.

端な話、加工発熱による材料の温度履歴を把握するのに、熱伝導解析を省略しては解析する意味がない。もちろん、本活用法においても、解析条件を正しく設定することは重要である (STEP3 ~STEP5に相当)。また、STEP1 ~STEP7までをSTEPごとにドキュメント化することで、どの部分で問題があったのかを明確にできる。以下に、肉厚差のある型材の偏肉問題について、Fig. 12に基づいて現象のメカニズムを考察した事例について解説する。

3.1 現象に対する仮説

Fig. 13に示すように、2ポートホールの押出ダイスにおいて、型材に肉厚差があると、薄肉が厚く、厚肉が薄くなるように偏肉が発生する。

偏肉が発生するのは、Fig. 14に示すように、型材の薄肉側と厚肉側の面積比 (=ポートホール面積/型材面積) が異なるため、材料内部に発生する応力に差異が生じ、マンドレルがたわむためであると考え (仮説)。

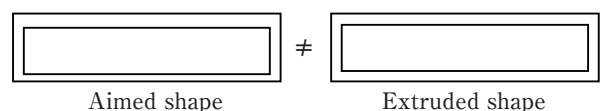


Fig. 13 Thickness deviation of the asymmetric extruded shape.

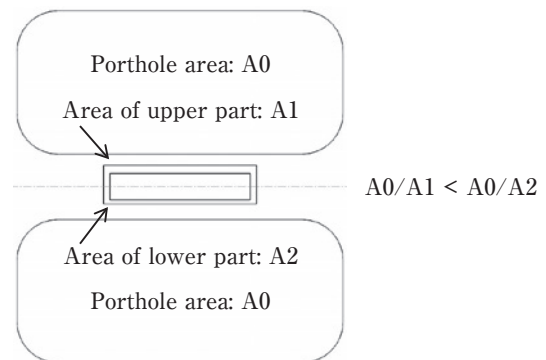


Fig. 14 Schematics of the porthole and the extrusion profile.

押出中におけるダイスの変形を測定するのは非常に難しいため、CAEにより上記の仮説を検証する。

3.2 解析モデルの構築

SFTC社製DEFORM-3Dを用いて、オイラー法にて、剛塑性解析を行った。ここで、熱伝導解析は省略した。**Fig. 15**に示す面を対称面とし、1/2形状にて計算した。材質は1050、材料温度は773 K、製品速度は500 mm/sとした。要素は四面体1次要素とし、材料-工具間は固着条件とした。

押出解析により材料内部に発生する応力を求めた後、ポートホールダイスに力を転写することで、ダイスの変形解析を実施した。SFTC社製DEFORM-3Dを用いて、ラグランジュ法にて、弾性解析を行った。**Fig. 16**に示す面を対称面とし、1/2形状にて計算した。材質はSKD61、材料温度は673 Kとした。要素は四面体1次要素とし、材料-工具間はクーロン摩擦係数0.3とした。また、オス型とメス型の側面およびメス型の下面を拘束した。

3.3 解析モデルの検証

Fig. 17に示すように、5回実施した収束計算に対して、押出荷重はおおむね一定であった。ここで、押出解析における材料の要素を四面体1次要素とし、材料-

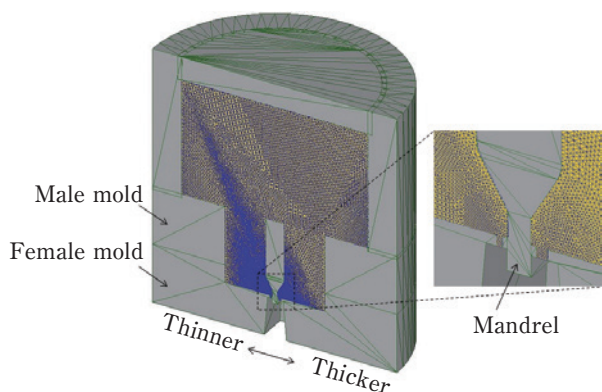


Fig. 15 FE model for the extrusion.

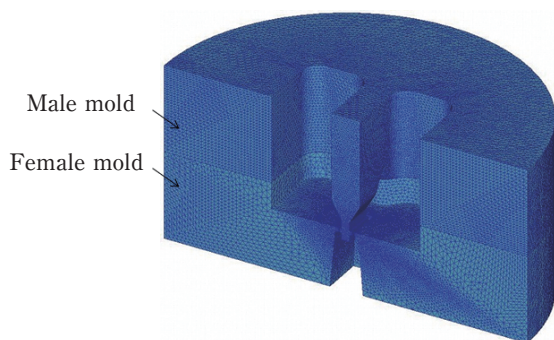


Fig. 16 FE model for the extrusion die.

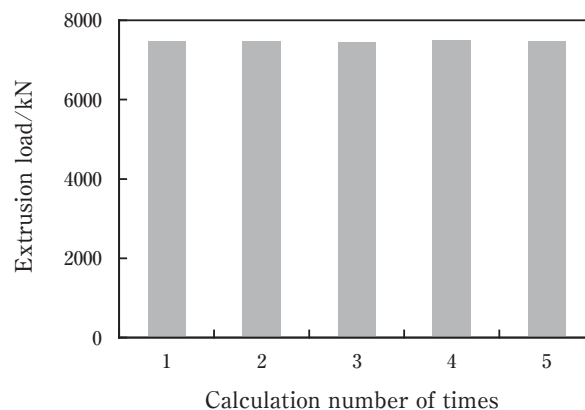


Fig. 17 Relationship between the extrusion load and the calculation number of times.

工具間は固着条件としたことから、実際の押出荷重よりも本解析モデルの押出荷重は高くなる傾向となる。また、材料の流入流出量は同じであった。以上の結果から、本解析モデルは、マンドレルの変形方向を再現できないほど、大外れな解析条件ではないと考える。

3.4 偏肉発生メカニズムの検証

Fig. 18にダイスの変形解析結果を示す。ここで、変形状態は20倍に誇大表示している。Fig. 18より明らかなように、ダイスのマンドレルは、薄肉側から厚肉側に傾いている。この原因は、**Fig. 19**に示すように、押出時において、薄肉側の平均応力の方が厚肉側よりも高いためである。以上の結果から、2ポートホールの押出ダイスにおいて、型材に肉厚差があると、型材の薄肉側と厚肉側のポートホールに対する面積比が異なるため、材料内部に発生する平均応力に差異が生じ、マンドレルが薄肉側から厚肉側に傾くことで、偏肉が発生するという仮説をCAEにより検証できた。

3.5 筆者の考えるCAEの活用方法のまとめ

以上のように、解析する前に現象の仮説を立て、解析モデルを構築し、解析条件がその仮説を実現できる

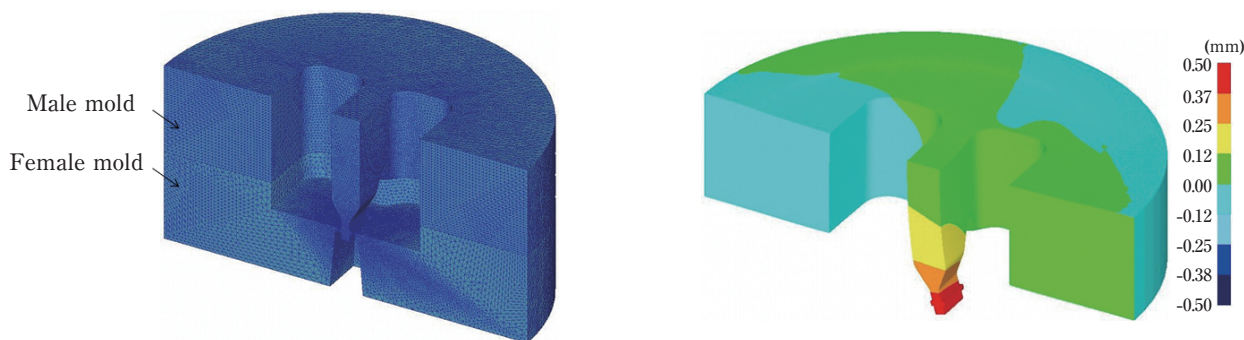


Fig. 18 Displacement of the male mold of the extrusion die.

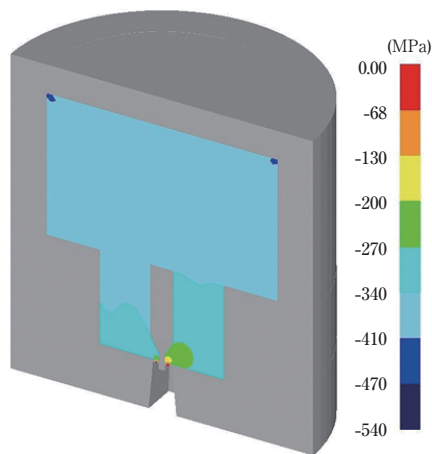


Fig. 19 Mean stress during the extrusion.

条件を満足しているかどうかを確認した上で、解析結果から得られる物理量で仮説を検証すれば、押出中におけるダイス変形のような、実操業で測定しにくい現象について検証することができる。今回は、筆者が全てのSTEPを実施したが、部署を跨るような場合には、仮説や解析条件をドキュメント化し、どんな理屈でその仮説や解析条件を決めたか、また、どのようにして解析条件や仮説を検証したかを明記すれば、問題点を把握しやすく、早期に問題を解決できると考える。

4. おわりに

新潟県工業技術総合研究所のCAEの効率的活用に関する研究およびCAEの信頼性の検証方法であるASME V&Vについて紹介し、最後に筆者の考えるCAEの活用方法について事例を基に解説した。

CAEを行う場合、解析条件を正しく設定することは極めて重要であり、検証済みの解析条件をドキュメント化し、ネットワークなどを介して、関係者で共有できれば、解析のやり直しや誤った解析結果を基に試作するリスクを低減でき、CAEを効率よく活用できる。

また、解析する前に現象の仮説を立て、解析モデルを構築し、解析条件がその仮説を実現できる条件を満足しているかどうかを確認した上で、解析結果から得られる物理量で仮説を検証するという手順でCAEを行えば、解析精度を注視するあまり、肝心のものづくりが疎かになるような事態になりにくい。大切なのは、解析という手段を用いて、質の高いものづくりを行うことである。

- 1) 佐久間庄一郎：プラスチック, **54** (2003), 28-32.
- 2) 中村智一, 田窪 毅, 平澤慶二郎：三菱電線工業時報, **107** (2010), 21-25.
- 3) 渡辺保幸, 才木和紀, 山川隆史：富士通テン技報, **20** (2002), 32-40.
- 4) 藤澤一志, 太田雅昭, 姫野哲見, 丸山誠司：MAEテクニカルレポート, **10** (2001), 13-25.
- 5) 中谷祐二郎：東芝レビュー, **61** (2006), 70-71.
- 6) 片山 聡, 須貝 裕：新潟県工業技術総合研究所工業技術研究報告書, **37** (2008), 104-106.
- 7) ASME. Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10-2006. NAFEMS, 2006.
- 8) 小國健二, 高野直樹：第2回HQC分科会ASME V&V関連資料, (2009).
- 9) 鳥飼 岳, 高橋昌也：軽金属, **63** (2013), 461-465.
- 10) 板圧延-世界をリードする圧延技術-日本塑性加工学会編, コロナ社, (1993), 231.
- 11) 鈴木 弘：圧延百話 圧延の疑問と基礎知識, 養賢社, (2000), 241-242.
- 12) 板圧延の理論と実際 日本鉄鋼協会共同研究会 圧延理論部会, 日本鉄鋼協会, (1984), 18-19.
- 13) 木村紘：圧延加工学, 社内資料, (2000), 43.
- 14) パタンカー著, 水谷・香月訳, コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, (1985), 59.



鳥飼 岳 (Gaku Torikai)
(株)UACJ 技術開発研究所 第三研究部