

## 思索なき解析は問題を解決できない\*

鳥飼 岳\*\*

### Analysis without Contemplation can't Solve Problems\*

Gaku Torikai\*\*

#### 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。世の中のニーズが多様化し、市場のグローバル化がますます進む中、製品寿命の短命化や新たな商品による既存製品の無価値化など、変化の激しい時代となっている。この時代の変化に適応して生き残るためにも、製品の開発スピード向上とコスト削減は至上命題となっている。この命題に対する回答の1つにCAEがある。CAEを用いて仮想設計・仮想試作することで、試作回数を減らし、開発スピード向上とコスト削減を両立できる。また、実験では計測しにくい応力やひずみを可視化することで、複雑な工学現象のメカニズム解明にCAEは役立っている。現代の製品開発において、CAEは必須アイテムとも言える。ところが、安価で高性能なパソコンが普及し、汎用のCAEソフトウェアの適用範囲が拡大することで、CAEは単なる解析作業という認識が高まっているように感じる。実際に、変形や割れ・破壊などの不良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。また、工学現象に対する五力(材料力学、工業力学、熱力学、流体力学および運動力学)に基づく考察よりも、工学現象をモデル化した解析結果を顧客から求められることも多い。そこで、本稿では、最初に解析の性質について言及し、次に解析の活用方法を挙げ、最後に「解析することと問題解決は異なる」という観点から解析の使い方に関する自らの考えを述べる。なお、

広辞苑によると、「解析」の意味は、「物事を細かく解き開き、理論に基づいて研究すること」である<sup>1)</sup>が、本稿では、自作の数値計算プログラムや市販のCAEソフトウェアを用いて、工学現象を数値解析することを指すとする。

#### 2. 解析の性質

塑性加工分野での解析手法には、上界法、下界法、スラブ法、すべり線場法など様々な手法があるが、本稿では一般的に使用頻度の高い有限要素法を例に解析の性質である、①前提条件が存在する、②入力データに結果が左右される、について言及する。

##### 2.1 有限要素法の起源

1950年代、Boeingの技術者Turner氏らがジェット機の翼構造の振動特性を解析する画期的な手法を開発した<sup>2)</sup>。その手法とは、翼を小さな要素に分割し、各要素の特性を数式で表現し、それらを組み合わせることで翼全体の特性を表現する連立方程式をつくり、それを解くという方法であった。これが機械系分野において現在使用されている有限要素法と呼ばれる手法の始まりである。

##### 2.2 有限要素法的前提条件

有限要素法を使用する際、前提条件として近似解法であることに気を付ける必要がある。この前提条件を意識せず、適当な要素分割、適当な材料構成式、適当な収束法を用いても正しく解析できない。以下に、有限要素法の概要を述べながら、どの部分に近似を用いているかについて説明する。

\* 本稿の主要部分は、塑性と加工、57(2016)、1042-1046に掲載。

The main part of this paper has been published in Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 57(2016), 1042-1046.

\*\* (株)UACJ 技術開発研究所 第七研究部

Research Department VII, Research & Development Division, UACJ Corporation

(1) 物体の要素分割 (近似①)

複雑な形状の物体の一部を固定し、力を加えた際の変形を求めるのは非常に難しい。理由の1つとして、変形が複雑すぎて、はりの3点曲げのように変形状態をあらかじめ予測できないためである。そこで、有限要素法では、Fig. 1に示すように、物体を節点とそれらに囲まれる要素に分割し、1つ1つの要素の変形を求め、それらを統合することで、物体の変形を取扱いやすくしている。

(2) 要素内の変位分布 (近似②)

要素内の変位分布が不明であると、分割した要素内の変位を求められず、ひずみや応力も計算できない。そこで、有限要素法では、Fig. 2に示すように、要素内の変位分布を形状関数で仮定している。変位分布を仮定し、節点の変位に未知数 ( $u_1, u_2, u_3, u_4$ ) を割り当てることで、要素内の任意の場所の変位を求めることができる。

(3) 要素の統合

要素内の変位分布を仮定することで、要素内の変位が求まり、変位からひずみ、ひずみから応力を求めることができる。また、ひずみと応力と要素の大きさ (2次元解析なら面積、3次元解析なら体積) を掛けることで、要素の変形エネルギーを求めることができる。要素1つ1つの変形

エネルギーを足し合わせることで、Fig. 3に示すように、物体全体の変形エネルギーを計算できる。

(4) 外力とのつり合い (近似③)

節点に割り当てた変位は仮の値であるため、どのような値もとりにうる。ここで、Fig. 4に示すように、物体の変形状態について考える。物体を上から下に押ししているのに、下から上へ変形するのは不自然である (Fig. 4 (a))。同様に、物体を右から左に押ししているのに、左から右へ変形するのも不自然である (Fig. 4 (b))。これらの状態は、外力による仕事に比べて、内部エネルギーが高い状態である。一方、外力による仕事

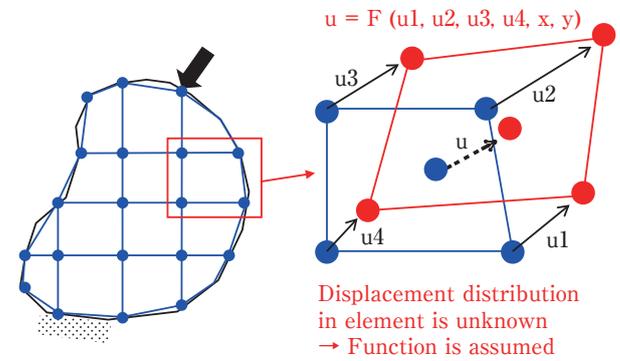


Fig. 2 Schematics of displacement distribution in the element<sup>3)</sup>.

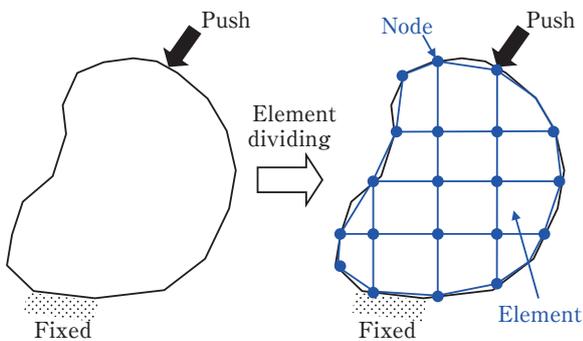


Fig. 1 Schematics of element division of the object<sup>3)</sup>.

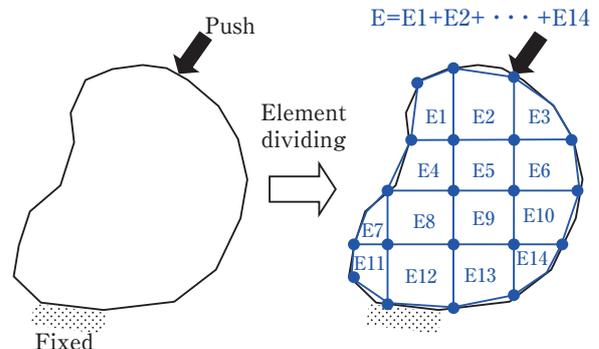


Fig. 3 Schematics of unification of the element<sup>3)</sup>.

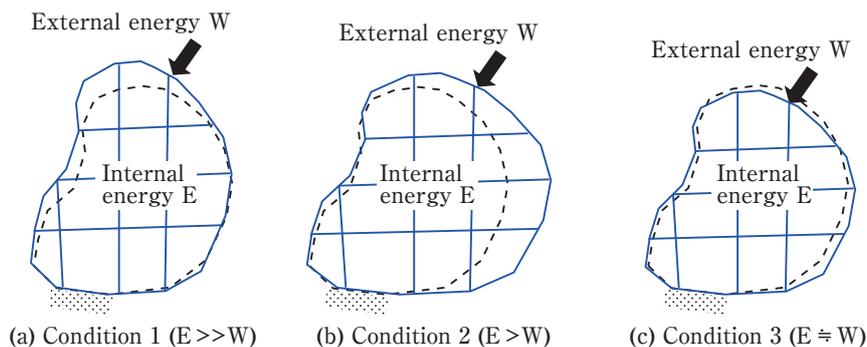


Fig. 4 Schematics of deformation of the object<sup>3)</sup>.

と物体内部の変形エネルギーが最も近いとき、自然な変形状態となる (Fig. 4 (c))。

(5) 有限要素法における近似

以上のように、有限要素法では、要素分割(近似①)、要素内の変位分布(近似②)および外力とのつり合い(近似③)と多くの近似が用いられている。また、変位からひずみを求める際に用いる偏微分も近似式であるし(微分の定義を参照方)、材料の加工硬化則も実験データを近似したものである。このように、有限要素法は近似解法であることを前提としている。

2.3 有限要素法で用いる入力データ

有限要素法を用いて、理論に基づいて研究するには、正しい入力データが必要である。ここで、有限要素法の入力データは、形状、材料物性、要素の種類、材料モデル、ソルバーの解法など多岐にわたっている。これらの入力データを間違えると、解析結果は実体とかけ離れたものとなる。一例として、Fig. 5のような、はりのたわみを考える。

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  $I = 2 \text{ mm}^4$ ) とし、材質をアルミニウム (ヤング率  $E = 70 \text{ GPa}$ )、はり中央に集中荷重  $P$  が 1N 作用した場合、はりのたわみ  $\delta$  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、有限要素法による解析結果は、Fig. 6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、変形状態は100倍に誇大表示している。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すべ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

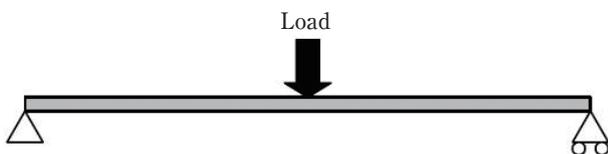


Fig. 5 Simply supported beam with a concentrated load <sup>4)</sup>.

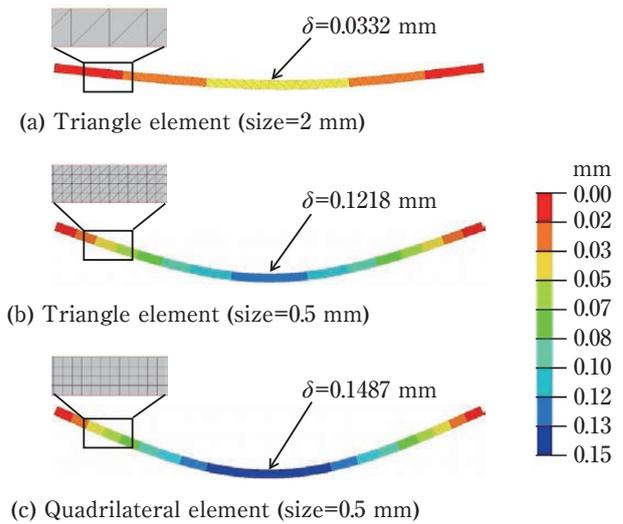


Fig. 6 Influence of the type and the size of the mesh on deformation <sup>4)</sup>.

る工学現象を再現できるよう、入力データには常に注意する必要がある。

2.4 解析の性質

例として有限要素法を挙げたように、解析には、①前提条件が存在する、②入力データに結果が左右される、という不可避の性質がある。その他の解析手法についても有限要素法と同じく、解析するための前提条件が必ず存在し、その結果は入力データに左右される。正しい解析を行い、工学現象のメカニズムを正確に把握するためにも、この解析の性質を意識することは極めて重要である。

3. 解析の活用方法

前章で述べたように、解析には前提条件が存在し、その結果は入力データに左右される。工業問題をボタン1つで解決できるようなCAEソフトウェアが存在しない限り、解析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、解析の活用方法は、各社・各人で異なり、解析の活用事例に関する報告は数多くある<sup>5)~9)</sup>が、どう解析すれば、より効率的に成果が上げられるかは不明である。そこで、本章では、解析の活用方法の事例として、正しく解析するための仕組み (ASME V&V<sup>10)</sup>) や製品設計への積極的な解析の適用 (フロントローディング設計<sup>11)</sup>) について紹介し、最後に筆者の考える解析の活用方法<sup>12)</sup>について述べる。

3.1 正しく解析するための仕組み (ASME V&V)

ASME V&Vとは、アメリカ機械学会 (American

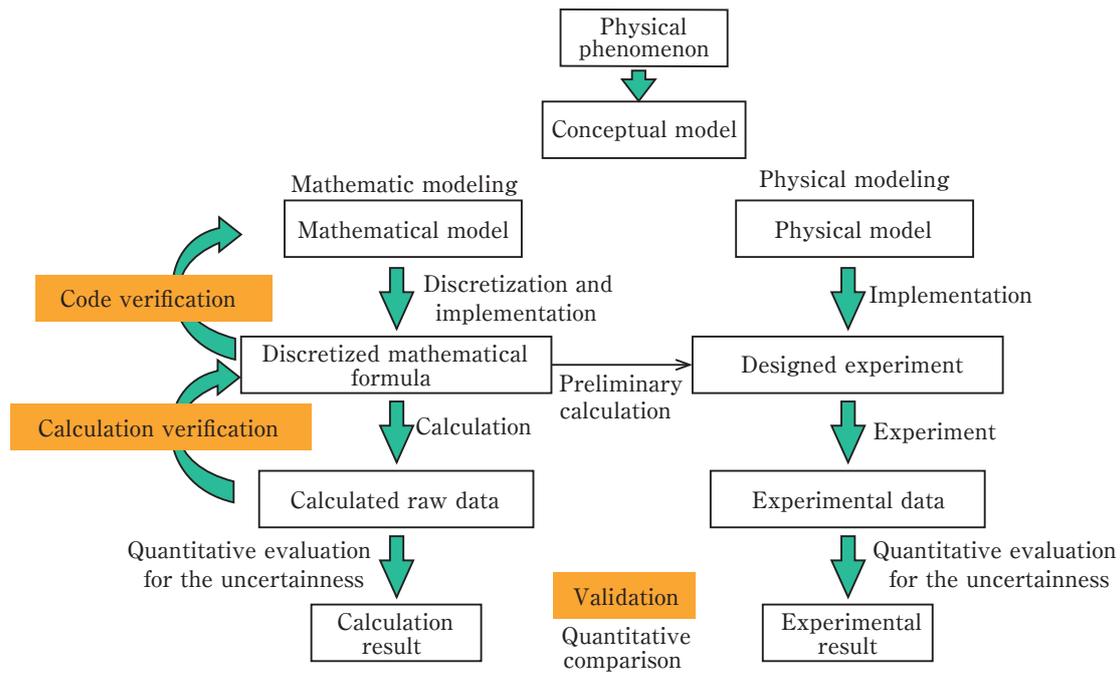


Fig. 7 Diagrammatical view of ASME V&V<sup>13)</sup>.

Society of Mechanical Engineers) 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。解析を行う際、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。そこで、解析者やCAEソフトウェア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. 7に示すように、verificationとvalidationによって、解析の数値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CAEソフトウェア開発者が担当すべき作業であり、calculation verificationは解析者が実施すべき仕事である。2.3節で述べたような要素の種類や要素数に関する検証はcalculation verificationに当たる。また、数値計算プログラムを自作する場合は、code verificationを行う体制も必要である。そのcodeを作成したプログラマーだけでcode verificationを行うのではなく、プログラマー同士が互いのcodeを確認できる体制が望ましい。一方、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。例えば、Fig. 8に示すような熱延後におけるスラブ内部の変形状態やFig. 9に示すような圧延荷重

を実体と解析で比較して、解析の妥当性を確認することがvalidationに当たる。

このように、ASME V&Vというガイドラインに沿って解析モデルを構築することで、解析モデルの確かさを評価でき、仮想設計・仮想試作を正確に行うことができる。ただ、企業において、ASME V&Vというガイドラインに沿うには、①解析モデルの確かさを評価する必要性を理解して工数増大を容認すること、②解析の数値モデルを理解した解析者を育成すること、③正しく実験できる作業者を育てることなどが必要である。これらの課題を解決し、工学現象を再現できる解析モデルを構築できれば、得られたノウハウをデータベース化することで、組織全体の解析技術を向上できる。そして、結果的には、開発スピードの向上やコスト削減を実現することができる。

### 3.2 製品設計への積極的な解析の適用(フロントローディング設計)<sup>11)</sup>

製品を開発する全体プロセスを考える際、これに要するコストは、単に作業プロセスが進行する割合に比例して発生していくわけではなく、一般にFig. 10に示すようなS字カーブ状の累積曲線となる。

上流の構想・設計段階では、関与する関係者も少なく、机上検討が主となるため、発生コストは比較的小さいが、製造・試験段階では、多くの人々が関与して部品や材料を手配し、一般には大人数で高価な装置やツールを用いて製造や試験を行うため、発生コストは

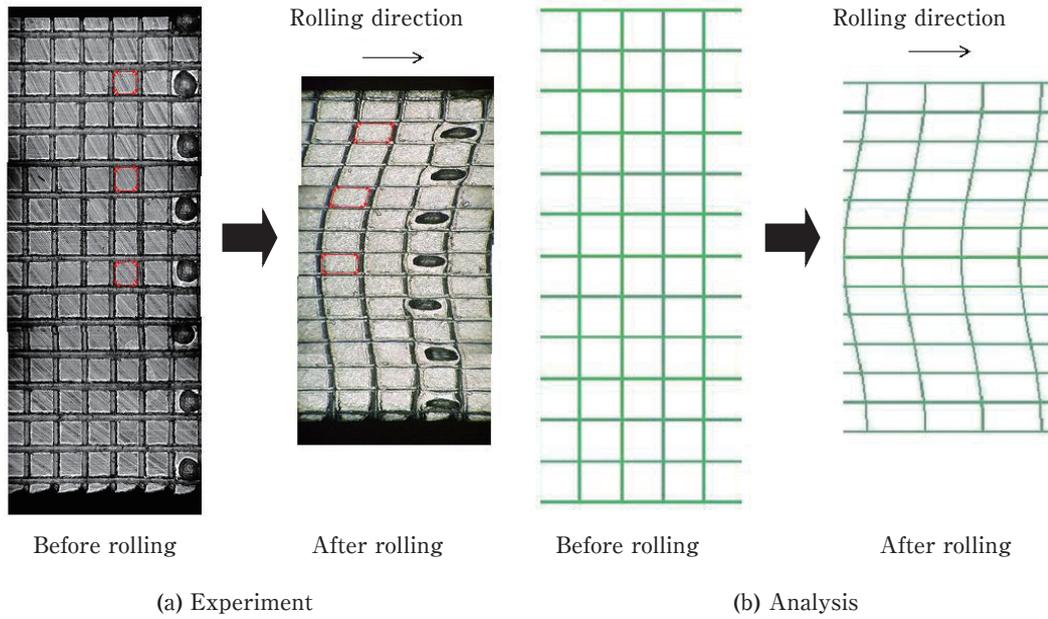


Fig. 8 Comparison between the experiment and the analysis of the deformation behavior in the slab during the hot rolling<sup>12)</sup>.

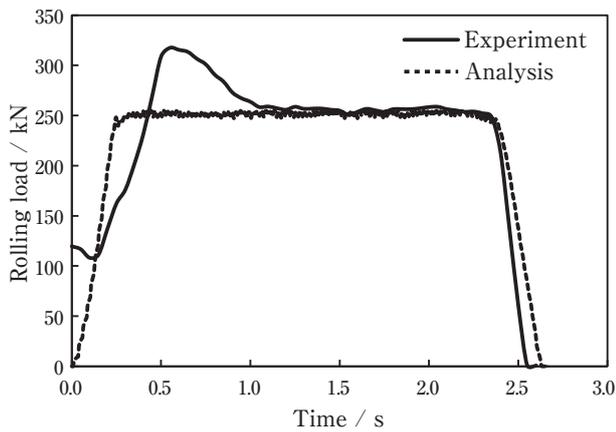


Fig. 9 Comparison between the experiment and the analysis of the rolling load<sup>12)</sup>.

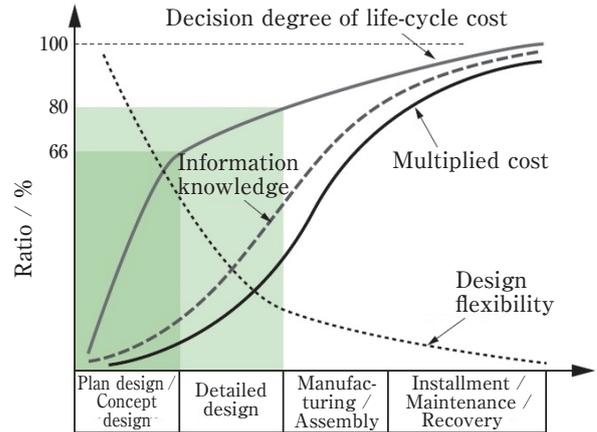


Fig. 10 Importance of the design in the product development process<sup>11)</sup>.

相対的に大きくなる。このことから、上流段階で十分な検討を加え、プロセスが進行した段階では、停滞なく作業を進めることが重要である。ところが、組み立て時の部品干渉や試験時の性能未達などにより、開発中の製品に変更を加える後戻り作業が発生する。この後戻り作業に要する手間はプロセスが進行するほど大きくなり、そのコストは累積的に増大し、プロセスの影響範囲も拡大し、最終的には開発スケジュールにも影響する。したがって、下流プロセスでの後戻り作業の発生を防ぐには、上流の設計段階で十分に深く検討することが極めて重要である。実際に、製品ライフサイクルコストの80%が設計段階で確定するとも言われている<sup>14), 15)</sup>。そこで、製品開発プロセスでの後戻り作業の発生を抑えるため、フロントローディング設計が

必要となる。フロントローディング設計とは、従来は試作後に実施していた検討を試作品のない設計初期にデータを使って検討することである。ここでは製品開発プロセスの強化を図るため、特に上流の設計力・開発力強化を念頭に置き、Fig. 11に示す3つのフロントローディング(①設計検証のフロントローディング、②仕様検証のフロントローディングおよび③設計工程のフロントローディング)を設定する。これらの3つのフロントローディングにおける工学現象を解析することで、試作品のない段階で製品開発プロセスの見直し検討を行い、後戻り作業が発生する可能性を大きく減らすことができる。

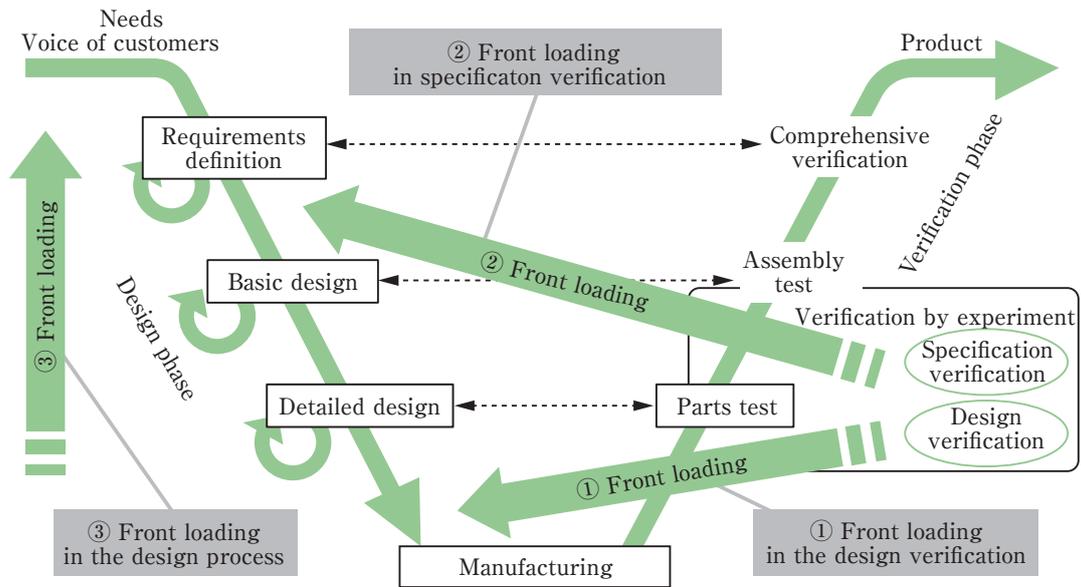


Fig. 11 Three concepts of the front-loading<sup>11)</sup>.

3.3 筆者の考える解析の活用方法<sup>12)</sup>

「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べきと考える。そこで、筆者は「CAE ≠ 解析」という主張の下、「解析することと問題解決は異なる」という観点から、Fig. 12に示すような解析の活用方法を提案する。

ここで重要なのは、解析する前に五力に基づいて現象に対する仮説を立てることである。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、現象を再現できる解析モデルを構築しやすい。極端な話、加工発熱による材料の温度履歴を計算するのに、熱伝導解析を省略しては意味がない。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。

(1) 現象に対する仮説 (STEP1)

Fig. 13に示すように、2ポートホールの押出ダ

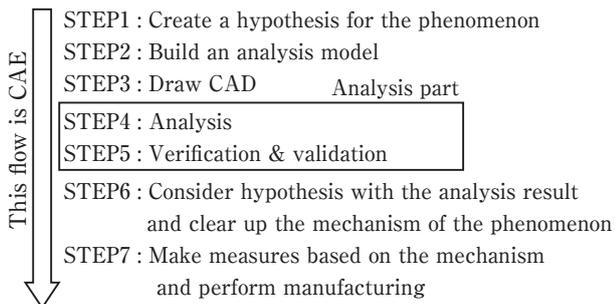


Fig. 12 Suggestion on the Practical utilizing method of CAE<sup>12)</sup>.

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られる(仮説)。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、解析により上記の仮説を検証する。

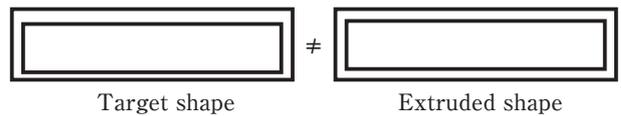


Fig. 13 Thickness deviation of the asymmetric extruded shape<sup>12)</sup>.

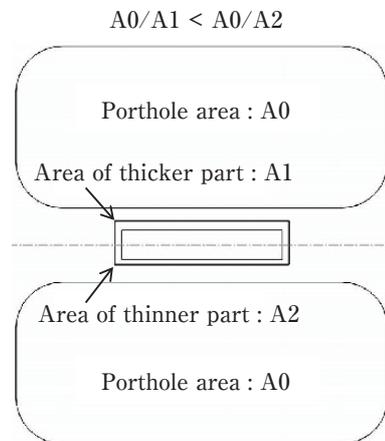


Fig. 14 Schematics of the porthole and the extrusion profile<sup>12)</sup>.

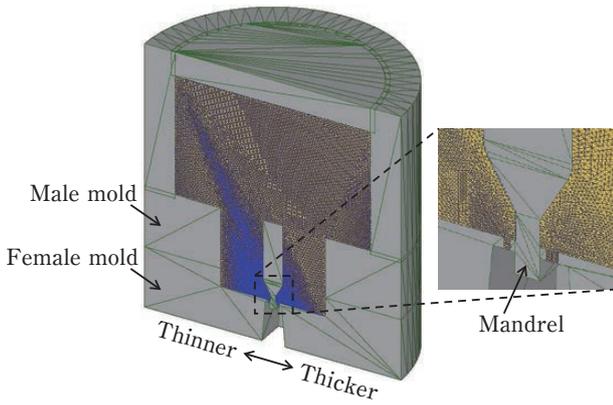


Fig. 15 FE model of the extrusion <sup>12)</sup>.

(2) 解析モデルの構築 (STEP2 ~ 4)

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500℃、製品速度は30 m・min<sup>-1</sup>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400℃とした。要素は四面体1次要素とし、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) 解析モデルの検証 (STEP5)

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。また、材料の流入流出量は

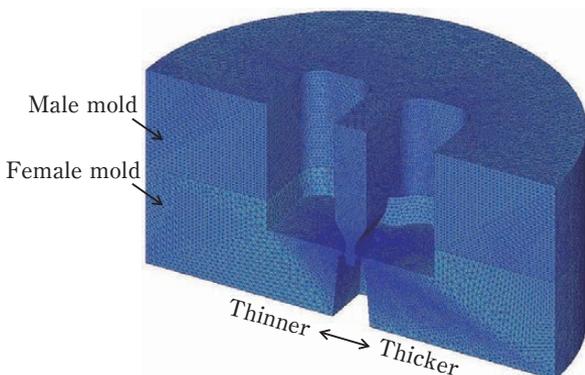


Fig. 16 FE model of the extrusion die <sup>12)</sup>.

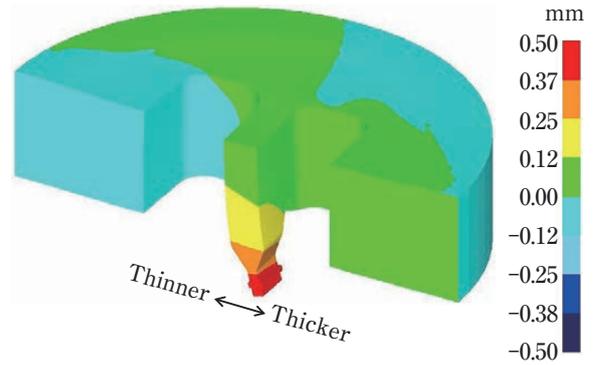


Fig. 17 Displacement of the extrusion die <sup>12)</sup>.

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判断した。

(4) 偏肉発生メカニズムの検証 (STEP6)

Fig. 17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. 17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. 18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解析により検証できた。

(5) 対策の立案 (STEP7)

(1) ~ (4) により、偏肉の原因は、型材の薄肉

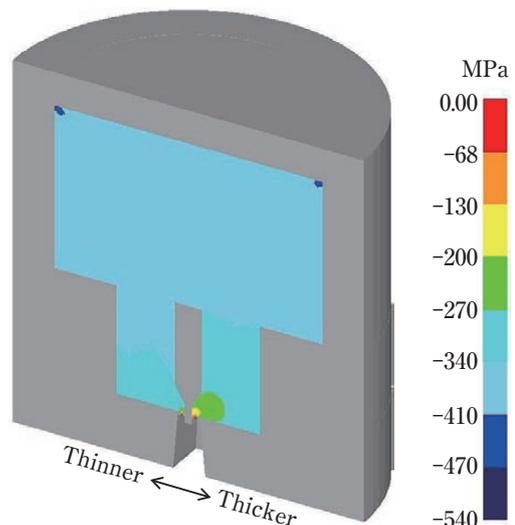


Fig. 18 Mean stress during the extrusion <sup>12)</sup>.

側と厚肉側の材料内部に発生する平均応力の差異と特定できた。そこで、①平均応力の差異を小さくすること、②平均応力の差異があっても変形しにくいダイス構造にすること、を対策指針とし、工具設計を変更した結果、偏肉を抑制することができた。製造ノウハウに抵触するので、本稿では、詳細を割愛する。ご容赦願いたい。

#### 4. おわりに

最初に解析の性質について言及し、次に解析の活用方法を挙げ、最後に「解析することと問題解決は異なる」という観点から解析の使い方に関する自らの考えについて述べた。解析には、①前提条件が存在する、②入力データに結果が左右される、という不可避の性質があるため、工学現象をよく観察し、「何を考慮し、何を省略したのか？」を常に念頭に置きながら、現象をモデル化することが重要である。

また、解析の活用方法は、各社・各人で異なるが、大切なのは、①ものづくりの流れの中で解析の役割を明確にすること、②解析の目的をよく理解することおよび③正しく解析することである。これらを継続的に達成するには、担当者の努力だけでなく、「思索することなく解析しても問題は解決できない」という周囲からの温かい理解が必要である。解析を用いて成果を上げても、ボタンを押すだけの簡単な仕事と見なされれば、担当者のモチベーションを低下させ、「思索の放棄と問題解決できない解析」に繋がるであろう。

なお、本稿は決して解析やCAEソフトウェアを否定するものではない。解析手法の研究やCAEソフトウェアの開発に邁進してくださる方々のおかげで、開発スピード向上とコスト削減の両立という難題に我々は挑むことができる。心より感謝したい。ただ、解析を活用する企業が増加する中、ボタンを押すだけで工業問題を解決できると考える方々も多い。本稿が解析の使い方について再考する機会となって頂ければ幸いである。本稿は、2016年11月に塑性と加工へ投稿した広場記事「解析すれば問題は解決するのか？」を加筆・修正したものである。

#### 参考文献

- 1) 新村出：広辞苑第六版，岩波書店，(2008)，463.
- 2) M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin and L. J. Topp: AAIA J., **23** (1956), 805-823.
- 3) 鳥飼岳：塑性と加工，**57** (2016)，1042-1046.
- 4) 鳥飼岳，高橋昌也：軽金属，**63** (2013)，461-465.
- 5) 佐久間庄一郎：プラスチック，**54** (2003)，28-32.
- 6) 中村智一，田窪毅，平澤慶二郎：三菱電線工業時報，**107** (2010)，21-25.

- 7) 渡辺保幸，才木和紀，山川隆史：富士通テン技報，**20** (2002)，32-40.
- 8) 藤澤一志，太田雅昭，姫野哲児，丸山誠司：MAEテクニカルレポート，**10** (2001)，13-25.
- 9) 中谷祐二郎：東芝レビュー，**61** (2006)，70-71.
- 10) ASME, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10-2006. NAFEMS, 2006.
- 11) 池田義雄：東芝レビュー，**62** (2007)，2-8.
- 12) 鳥飼岳：軽金属，**65** (2015)，184-189.
- 13) 小國健二，高野直樹：第2回HQC分科会 ASME V&V関連資料，(2009).
- 14) W. J. Fabrycky and B. S. Blachard: Life-Cycle Cost and Economic Analysis, Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, (1991)，352.
- 15) 大富浩一：東芝レビュー，**60** (2005)，30-35.



鳥飼 岳 (Gaku Torikai)

(株)UACJ 技術開発研究所 第七研究部