

包装容器開発における CAE 利用の第一歩 (1)



まつもと・おさみつ
1983年大和製罐株式会社入社。技術部に配属，金属材料関係，構造解析業務を担当。2004年技術開発センターに異動。2006年CAE技術室創設，同室長。2017年缶詰技術研究会事務局長。

松本 収 充

1. はじめに

近年のコンピュータの性能向上に伴って，製品開発力強化のために，CAEシミュレーション技術が広く活用させています。（本稿ではCAE：Computer Aided Engineering，シミュレーション，解析は同義語として使っていますのでご了承ください）その最たるものは自動車であり，車体全体や各部品の強度だけではなく，プレスなどの製造プロセス，操安性，車体空力，エンジン内の燃焼，電磁モーターの特性，さらには人体モデルを用いた事故時の搭乗者損傷などあらゆる方面の解析が行われています。それは自動車メーカーのみならず周辺の部品サプライヤーなどにも広範囲に普及しています。その他にも原子力，航空宇宙，素材，家電，医療，スポーツ用品など様々な産業分野でも積極的に利用されています。

それらに対し，解析分野で最もポピュラーな強度計算を行う構造解析についてみると，包装容器分野では一部の大手企業で使われていますが，まだあまり普及していないように感じます。これは初心者が（しかも少人数で）いきなり取り組むには，材料力学などの応用力学の学問をベースに煩雑なソフトの操作やコンピュータの知識などの様々なスキルを必要とするため，立ち上げのハードルが高いことがあります。さらに包装容器分野特有の形態のため，より難解な非線形構造解析を必要とすることが原因の1つにあります。

私は大和製罐で解析の黎明期^{れいめいき}から30年以上業務を担当し，この業界では希少な解析専門の組織

（CAE技術室）を立ち上げ，ISOに則った解析のInputからOutputの業務体制を整えると共に，構造解析を中心に流体解析など様々な分野の解析テーマに取り組み，室員の力量に応じた教育計画の作成実行，解析ソフトメーカーや他社解析担当者などとの幅広い人脈作りなどを行ってきた経験があります。本稿においては包装容器分野で解析を始めたばかりの方，これから解析に取り組もうとしている方などに向けて参考となるべく，解析の特徴，プロセス，用途などを紹介します。

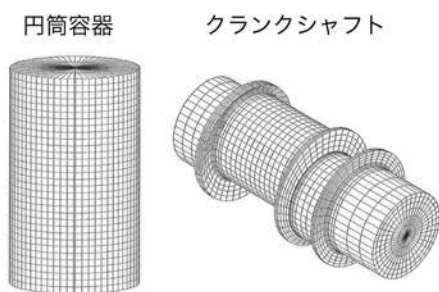
なお，解析分野の説明は数式を用いた方が正確ですが，それを難しいと思ひ敬遠される方もいますので，用いないようにします。内容的には多少私の経験によるところがあり，感覚的な面もありますがご容赦ください。詳しく知りたい方はインターネットでの検索や専門書が多数ありますのでご参照ください。

2. 構造解析

2-1. FEM 構造解析とは

構造解析とは固体構造物が外力によって変形する現象を解析するものです。つまり強度についての解析です。その解析手法は幾つかありますが，市販の汎用ソフトが豊富で普及しているのはFEM（Finite Element Method；有限要素法）です。固体が変形する現象の基本は弾性変形理論ですが，これは小中学校での力によるバネの伸び変形と同様であり，引っ張る力の大きさに比例して伸び変形が増大するものです。固体物性値である弾性率がわかって，形状が一様単純な棒や板で，外力も

単純なものならば、弾性変形理論で変形量を求めることができます（機械工学便覧などに幾つかの変形理論式が掲載されています）が、複雑な形状や荷重の場合では単純に求めることができません。そこで形状を細かく分割して個々を単純な形状とみなし、そこで分割した個々について変形量を求め、それらを総合計して全体の変形を近似的に求めることがFEMの原理手法です。なお、ここで分割した個々の部材を要素（Element）、角の点を節点（Node）と呼びます（第1図）。原理的には要素分割を細かくし、曲率をもった形状でもなるべく忠実に再現するようにすれば、結果の精度は高まります。

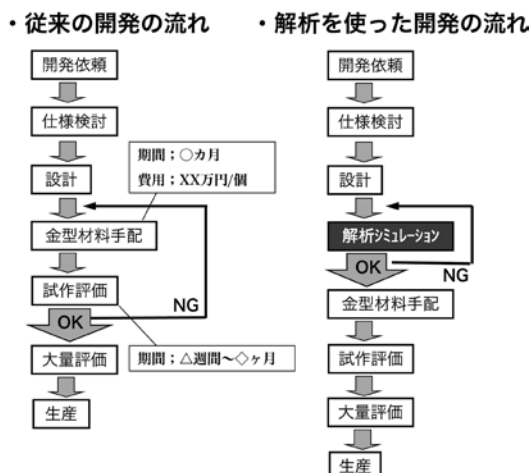


構造物を要素メッシュ（3角形、4角形、4面体、5面体、6面体など）に分割します

第1図 FEM解析要素メッシュ例

2-2. 解析の目的, メリット

従来の製品開発のプロセスは第2図に示すように、開発依頼に対し仕様を検討し、試作を行うために設計、金型材料手配した後、試作実験を行って評価し、これでOKならば現場での大量評価を行い、生産へ進んでいくわけですが、なかなか試



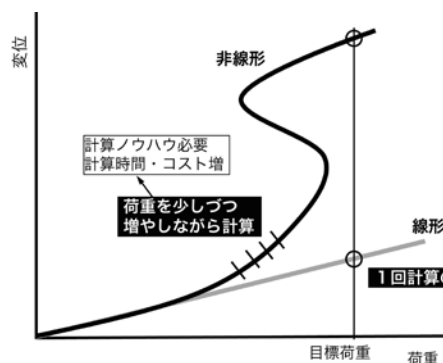
第2図 解析による開発プロセスのちがひ

作実験1回で済むことはなく、何度も設計まで戻って繰り返し試作実験を行うことが常であります。この間、金型製作には一般に1カ月以上要し、金型費用もかかるのでそんなに多くのパターンで金型を注文することもできません。そして金型が上がってきても、試作実験評価に数週間~数カ月かかってしまいます。これに対し、適切な解析モデルが確立できていれば、解析に要する時間は様々ですが経験的に1~2週間位として、スピーディに試作実験の代わりが行え、試作実験の回数を大幅に削減できます。つまり工数、費用のかかる試作実験の回数を削減して、開発のスピードアップとコストダウンを図り、効率良く製品を市場に出すことが解析の最大の目的となります。

その他、構造解析ではどの部分に応力が集中しているか、どこを補強すべきかなど、試作実験では得られない結果を得ることができ、それを設計にフィードバックさせて、合理的に開発が進められるというメリットもあります。

2-3. 包装容器分野の構造解析の 特徴-非線形解析

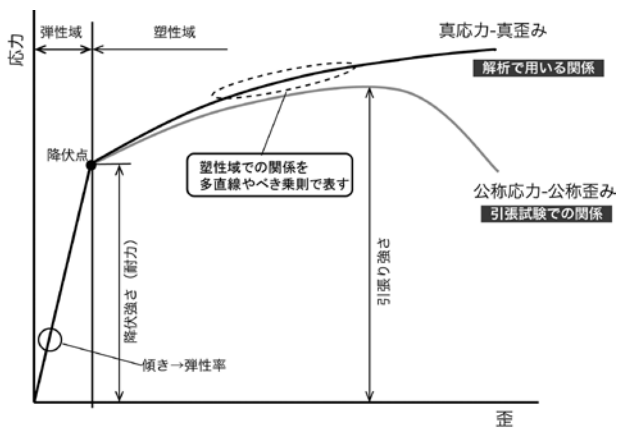
包装容器はその形態から金属や樹脂などによる薄肉部材で構成されているものが主ですが、そのために構造解析には非線形現象を取り扱うことが必然となります。非線形現象とは荷重に対する変形の関係が直線（比例）ではない現象のことです（第3図）。この非線形現象になるのは、大きく3つタイプがあります。



第3図 変形挙動の線形・非線形のちがひ

①材料非線形

一般的な金属材料の引張試験結果例を第4図に示します。荷重の小さな弾性変形領域では荷重と



第4図 金属材料の引張試験結果例(応力-歪関係)

変形の関係は比例であり、除荷すると元の形状に戻りますが、耐力を超えると塑性変形を起し、荷重と変形の関係は直線にならず、除荷しても元の形状に戻らず永久変形が残ってしまいます(塑性変形)。普通の機械部品(ギヤ、シャフトなど)は弾性領域で用いるように設計されていますが、容器では塑性領域まで踏み込んだ強度が必要になる場合があります。例えばビール缶ボトムの耐圧強度などです。他にはクリープ現象など時間によって強度特性が変化する現象なども材料非線形に当たり、これらは金属材料よりも樹脂材料の方が顕著です。

②幾何学的非線形

これは簡単にいうと形状による効果で、容器で用いられている薄肉構造部材で起きやすい現象です。構造物が板厚を超えて変形する場合に発生し、微小歪大変形といわれています。例えば薄肉のドームが荷重に耐えきれず、反転するような現象です(スナップスルー:飛び移り座屈という)。普通の機械部品は、薄肉ではなく肉厚を持った固まりであり、肉厚を超えるような変形は起きません。

③接触

構造物ボディどうしが接触する場合、変形に相互の剛性、運動が影響し合いますので非線形現象となります。これは拘束条件の非線形現象といえるものです。各ボディ表面の節点間距離などに着目して、ある閾値しきい値以下では接触していると判断し、反発するような変位などが与えられます。解析のある時点から接触を起し、ある時から乖離かいりするような複雑な現象も計算します。また、接触して

いる状態では摩擦を取り扱うことができます。

接触するボディの1つが変形体、他方が変形しない剛体ならまだ計算しやすいですが、変形体どうしの接触解析は厄介になることがあります。接触解析での不具合の代表として、収束しない(後述の陰解法の場合)、貫通(表面節点の異常食い込み)、要素メッシュのクラッシュなどがあります。接触は特に成形加工解析を行う際、必須の解析要件です。

2-4. 非線形解析の解法

第3図に示すように線形解析の計算は求める荷重に対して1回のみ解析計算を行えば済みますが、非線形解析の計算は求める荷重までを複数回のステップに分割して進めることになるので、計算量が膨大になります。

またこれら非線形現象を解析するには、非線形構造解析ソフトを使用する必要があります。一般的な上級3D-CADに付属しているような構造解析ソフトは線形解析のものが多く、非線形構造解析ソフトは別個で高価なものです。

非線形構造解析ソフトには静的陰解法と動的陽解法の2タイプあります。

まず静的陰解法について、静的というのは慣性項を無視、つまり質量の効果が作用しない意味であり、時間については静的つまり長時間的な内容です。(ソフト上では変数timeを用いているが、ダミーです)陰解法は連立方程式を解くために1回の計算量は多く、釣り合い式を反復法を使ってある収束値に収まるようにするため、解の厳密性は良い状態にあります。収束性の良い状態では解析ステップは大きく取れ、早く解が得られますが、悪い状態ではステップを細かくしたり、多く反復数になるなど計算時間がかかります。私の経験では容器の耐圧や座屈などの多くの強度解析に適していましたが、接触を伴う成形加工解析では収束性が悪くなる場合があります。特に3次元の複雑な接触では、計算途中で収束できず停止することもありました。

もう1つの動的陽解法は、動的ということで慣性項、つまり質量が作用します。クーラン条件のもとで行われるので、時間の概念が入り、瞬間、

衝撃や短時間の問題が本来の解析対象です。陽解法は連立方程式を解かず、反復計算も行わないので収束性は関係なく、1ステップの計算は早いのですが、クーラン条件により1ステップ時間を極めて微細にする必要があります。微細なステップ時間のおかげか接触問題に強い特徴があるので、成形加工解析で用いられます。強度解析では質量、時間の影響で振動が発生することがあるので、得られた強度値は確認、注意が必要です。

2-5. 包装容器分野の構造解析の適用分野

包装容器開発でどのような分野に構造解析が用いられているかという点、もう既に述べてますが、主には容器本体の強度解析と製造に関わる成形加工解析になります。強度解析は垂直軸荷重による座屈強度解析、内圧（陰圧、陽圧）による耐圧強度解析が多いと思いますが、最近は陽解法で落下衝撃解析も行われています。成形加工解析はプレス成形やブロー成形などに多く用いられています。これらの解析テーマに特化し、初心者向けに設定、操作性などを簡易化した専用ソフトも出ています。

これらの解析テーマは一例であり、次回述べる形状、荷重、拘束条件などを臨機応変に変更することにより、様々な解析テーマを取り扱うことが可能となります。例えば強度解析では非対称な偏荷重による強度や容器のある部分だけの強度などが求められます。成形加工解析ではスピン加工など、ありとあらゆる解析テーマの可能性があると信じています。これらにどれだけ対応できるかは、解析担当者の力量にかかっていると考えます。

※ ※ ※

今回は構造解析の作業プロセスなどを述べます。

なお、私は包装容器や内容物の開発で解析がもっと活用され、広く普及することを望んでいます。解析導入を検討されている方や解析初心者でわからないことでお困りの方などに対し、私のできる範囲でご相談やご協力に応じたいと思っています。そのような方は、巻末記載の缶詰技術研究会のメールか、o-matsumoto@kangiken.net にご連絡ください。

新刊紹介

ソフト・ドリンク技術資料 No.183 発刊のお知らせ

(一社)全国清涼飲料工業会では、「ソフト・ドリンク技術資料183号」を発刊しました。ご希望の方はホームページよりお申し込み下さい。

◇書名：ソフト・ドリンク技術資料 No.183
(2017年・第3号) B5判 119ページ

※従来、本技術資料は年3回発行して参りましたが、より多くの方にご利用頂くため、第182号以降は専用サイトへのカラーでの全文掲載に伴い、書籍としての発行は不定期になります。

◇価格：1部購入の場合=4,620円（全清飲または日清研会員は3,080円）、閲覧料金1年分（有効期限：2018年3月末）で、9,250円（全清飲または日清研会員は6,170円）

◎価格はいずれも消費税込、送料サービス、10部以上お求めの場合には1割引。

◇申し込み先：<http://www.j-sda.or.jp>

◇お問合せ先：(一社)全国清涼飲料工業会
TEL 03 (6260) 9260 担当：館野

◇内容

1. 天然水、フレイパーウォーター兼用無菌充填ラインの導入

(サントリープロダクツ株式会社 亀崎耕太)

2. アサヒ飲料富士吉田工場 環境を配慮した自然の中の最新鋭 PET ライン (アサヒ飲料 阿部 亨)
3. 食品産業の洗浄・殺菌操作における次亜塩素酸ナトリウムの効果的な使用 (三重大学大学院 福崎智司)
4. 微酸性次亜塩素酸水の活用によるバイオフィルム対策の新たな可能性 (森永乳業株式会社 中村 慎一)
5. 食品包装資材への“水性フレキシ印刷”の用途拡大～フレキシ印刷の劇的な技術革命、その経緯と現状そして未来～ (日本フレキシ技術協会 塚田 昌)
6. 第40回コーデックス委員会報告－FAO/WHO 合同食品規格計画－
(特定非営利法人 国際生命科学研究機構 岩田修二)

ティータイトム

- ▶ダンボールと折り紙 (大塚製薬株式会社 畑井龍一)
- ▶ネコノミクスと生物多様性
(サントリー食品インターナショナル(株) 中西 徹)