

Abaqus による圧力容器の疲労評価とその自動化

宮本裕平ⁱ 眞崎浩一ⁱⁱ 小坂部和也ⁱⁱⁱ

Fatigue analysis of pressure vessels using Abaqus and its automation

Yuhei MIYAMOTO Koichi MASAKI Kazuya OSAKABE

運転中に温度と内圧が変化する圧力容器について、疲労評価を行った事例を紹介する。疲労評価の手順は JIS B 8265 附属書 8 に基づいており、CAE 解析ソフトによる応力解析をポスト処理して実施した。本稿では、疲労評価の概要に加えて、ポスト処理の効率化及び自動化の工夫についても紹介する。

(キーワード): 圧力容器, 疲労評価, CAE 解析, 自動化

1 はじめに

各産業分野において、消費者やユーザーの利便性の向上や安全の保証を目的として様々な規格が存在し、満たすべき性能が定量的に示されている。これらの規格を満たしていることを確認するために、実際の製品について実験や試験を行うことに加えて、数値解析に基づいて性能を評価することがある。特に、試験によって結果を取得することが困難であったり、使用期間が長く試験の実施に長い歳月を要したりする場合には、数値解析による評価が有効である。

当社では数十年にわたって CAE 解析業務を行っており、規格条件に照らした性能評価を目的とした数値解析を受託することがある。本稿では、具体例として圧力容器の設計時に CAE 解析で金属疲労を評価した事例を紹介する。

2 金属の疲労とその評価

金属で作られた頑丈な構造物であっても、比較的小さな応力が繰り返し作用することで、強度が低下し破壊する場合がある。これを疲労と呼び、運転・使用期間が長期であるが容易に交換ができない構造物においては、疲労を考慮した設計が必要となる。

具体的な疲労評価においては、発生する応力の時

間的な変化を定量化し、損傷あるいは強度低下を数値化することになる。最も簡便な疲労評価手法としては、荷重履歴を簡略化、すなわち 1 次元的にある軸に沿って応力が繰り返し作用することを前提として評価するものが挙げられるが、近年は形状や荷重履歴が複雑になる場合や、より精度よく疲労寿命や損傷部位を評価したいという要求が高まり、3 次元形状の有限要素解析を用いて疲労評価を行うことが増えつつある。なお、対象となる材料の特性の違いや、テンソル量である応力テンソルの履歴からどのように特徴的な量を定義するかなどにより、多くの現象論的な評価式が存在する。本事例では設計圧力が 30MPa 未満の圧力容器の構造を規定する JIS B 8265 の、応力解析及び疲労解析について規定した附属書 8 に基づいて圧力容器の疲労評価を行った。

3 疲労評価に関する規格

本節では、本事例で参照した JIS B 8266 附属書 8 に記載されている疲労評価について、簡潔に述べる。疲労解析に用いる応力は、一次一般膜応力、一次局部膜応力、一次曲げ応力、二次応力、ピーク応力の和であり、ピーク応力には応力集中や局部的な熱応力が含まれる。疲労評価の際には、疲労評価対象となる応力サイクル中の複数の時刻において、対象とする部

ⁱ サイエンスソリューション部 デジタルエンジニアリングチーム 主任コンサルタント 博士 (理学)

ⁱⁱ サイエンスソリューション部 デジタルエンジニアリングチーム 主任コンサルタント 博士 (情報工学)

ⁱⁱⁱ 経営企画部 参事役

位における応力が求められている。まず、各時刻において、応力テンソルから最大主応力と最小主応力の差、すなわちトレスカ応力が定まる。次に、この差をすべての時刻について算出し、考えている応力サイクル中の主応力差の振幅を算出する。最後に、応力振幅と許容される応力サイクルの繰り返し数の関係を表す S-N 曲線を用いて、算出した応力振幅に対応する許容繰り返し回数を求める。S-N 曲線のイメージを図 1 に示す。なお、S-N 曲線は規定のものを用いるが、算出した応力振幅に対して、材料のヤング率で除して規定のヤング率を乗じることで、ひずみと許容繰り返し数を対応させている。これにより、压力容器がどの程度の応力サイクルに耐えられるかを評価し、想定する供用年数内で破損に至らないことを確認する。

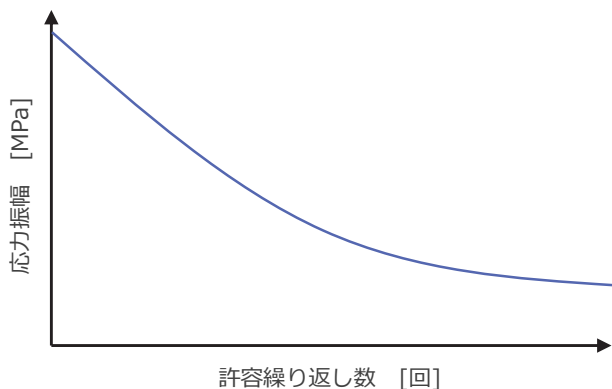


図 1 S-N 曲線のイメージ

4 本事例の概要と作業フロー

本事例で対象としている压力容器には、容器内の流体の温度に起因する熱応力と、内圧による応力が生じることが分かっている。運転中は加熱と冷却が行われ、かつ内圧が変化するため、压力容器に生じる応力が変化し、疲労が生じる。そのため、想定される供用期間中に压力容器が破損することがないように、前述の規格条件を満たしていることを確認する必要があった。本事例は CAE 解析を用いて、対象とした压力容器が想定する供用期間に対して、規格条件を満たすことを確認したものである。

本事例の作業フローを図 2 に示す。まず、許容繰り返し数の評価は、評価対象のあらゆる板厚に対して実施するのが理想であるが、厳しい疲労が予想される位置をあらかじめ選定して評価を行えば十分であると考えられるため、本事例では解析実行前に評価

対象箇所として応力振幅が大きくなることが分かっている上蓋とノズルの接合部を選定した。次に、運転中の温度と内圧の変化を考慮した応力分布の時間変化を CAE 解析によって評価した。さらに、CAE 解析の結果を用いて疲労評価を行うために作成した別プログラム（以降、「ポスト処理プログラム」という。）を用いて、応力振幅や許容繰り返し数を算出し、最後に評価結果を取りまとめた。この作業を、容器本体の形状は同じであるがノズルの位置等が異なる 2 つの形状の压力容器に対して行った。

なお、最後に算出された許容繰り返し数が小さい場合には、補強材を追加するなどの対策を講じ、形状を変更して解析することも可能であるが、本稿で紹介する事例では許容繰り返し数が十分に大きく、形状の変更は不要であった。次節より、各作業内容の詳細について説明する。

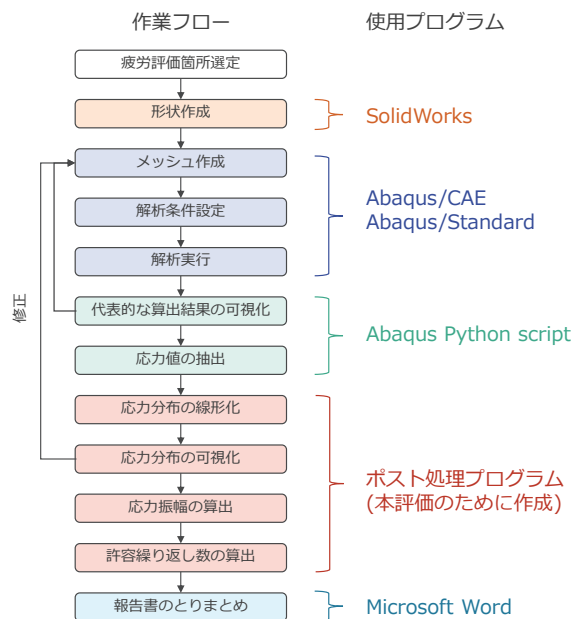


図 2 作業フローと使用プログラム

5 CAE 解析

本節では CAE 解析の詳細について述べる。压力容器の形状を図 3 に示す。解析対象となる压力容器の形状は大域的には軸対称であるが、複数のノズルが含まれるため、軸対称や面対称の解析モデルを用いることはできず、3次元の解析モデルを使用した。压力容器は母材とクラッドの 2 種類の金属からなり、特に線膨張係数の違いによってこれらの境界で応力が大きく変化することになる。ソルバーは

Abaqus/Standard を使用し、有限要素法で非定常の変位・温度連成解析を実行した。压力容器は、容器内部、ジャケット内部、外部の 3 つの領域で外気や攪拌材料などの流体と接触しているとし、設定した流体の温度変化や内圧変化によって容器に発生する応力を評価した。

本事例では陰解法による解析を行った。陰解法では、温度や応力を求める時間間隔を大きく設定することができるが、疲労評価において重要となる応力振幅を適切に評価するためには、応力が最大値や最

小値をとる時刻を見逃さないことが重要である。このため、CAE 解析では、供用時に想定される温度や圧力の時刻歴データに基づき、変化が単調な時間では出力時間間隔を大きく、逆に激しく変化する時間では出力時間間隔を小さく設定した。

本 CAE 解析により、先に選定した疲労評価箇所の応力履歴が得られた。この応力履歴を用いて、次項の疲労評価を行った。



図3 解析対象の形状 上段左から、俯瞰図、下から見た図、断面図 下段左から、クラッド（黄色）と母材（青色）、压力容器内表面（赤色）、ジャケット内表面（赤色）

6 解析ポスト処理と疲労評価

本節では、疲労評価とそのために行ったポスト処理について述べる。疲労評価は、先に選定した压力容器の疲労評価箇所に注目し、CAE 解析により得られた応力履歴をポスト処理して行う。まず、JIS B 8265 附属書 8 が規定する疲労評価に用いる応力のうち、二次応力とピーク応力は、膜曲げ応力ではなく複雑な空間分布を持つ場合があるが、膜曲げ応力との和を

とった応力を用いて疲労評価を行うことから、板厚内の局所的な応力ではなく全体的な応力が重要であると考えられる。このため、本事例では、図 4 に示すように、CAE 解析で算出した板厚内の応力分布を 1 次関数で回帰（以降、「線形化」という。）して用いた。次に、線形化後の応力について、板厚の内側と外側でそれぞれ応力振幅を評価し、JIS B 8265 附属書 8 が規定する S-N 曲線を用いて、解析により得られた応力振幅に対応する許容繰返し数を算出した。なお、

有限要素解析と疲労評価を組み合わせた汎用 CAE 解析ソフトは存在するが、簡便な手法、あるいは独自の手法が組み込まれていることが多い。これらの機能は有用であるが、本稿の手法では後述するスクリプトで処理を行うことで、種々の規格の手法に適用できる。

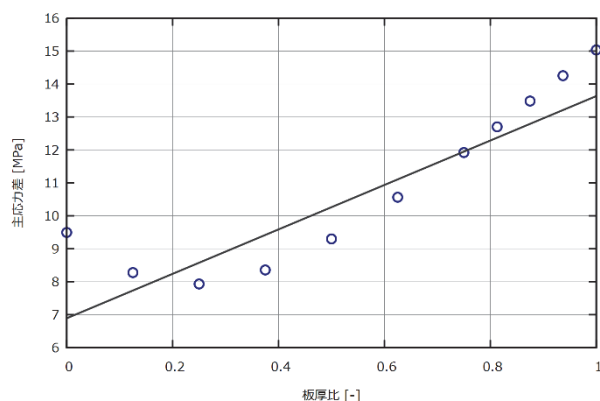


図4 板厚内の応力の線形化（点は線形化前の応力分布）

7 結果

本事例で対象とした圧力容器においては、内圧が大気圧と同程度であり、変化も小さいことから、熱応力が支配的であった。運転中の温度変化は約 100℃程度であり、生じた応力振幅は 100MPa 以下であった。これに伴い、選定したほとんどすべての板厚において、許容繰返し数は 100 万回を上回った。これは評価対象とした圧力容器に想定される使用年数においても、十分な許容繰返し数であり、規格条件を満たすことが示された。

8 自動化の工夫

本節では、CAE 解析並びに疲労評価を行う際に導入した作業の自動化について述べる。CAE 解析ソフトを用いた解析では、たとえ解析が終了して結果が得られても、物理的・工学的に正しい結果が得られている保証はない。実際の解析では、解析条件の再確認や結果の妥当性を確認すると、やり直しが生じることがある。特に、有限要素法においてはメッシュ分割が解析の品質を大きく左右し、数回から数十回のやり直しが生じることがある。このとき、解析をやり直すたびに解析者が手作業で結果の可視化や整理を行うの

は非効率的であり、人為的なミスも発生する。そこで、当社では比較的単調な作業を自動化し、作業の効率化と人為的なミスの低減に努めている。具体的には、先に示した作業フローにおいて、以下の 3 つの作業を自動化した。

8.1 自動化 1 大量の画像出力

Abaqus のプリポストである Abaqus/CAE では、マウスとキーボードによる操作に加えて、Python スクリプトを用いてプリポスト処理を記述・実行することができる。このスクリプトによる処理の自動化は、単調な処理を繰り返し行う必要がある場合に特に効果を発揮する。この機能を用いて、代表的な 4 つの時刻において、温度と Tresca 応力の 2 つの変数を、7 通りの方向から見たコンター図を生成した。これら 56 通りのコンター図に加えて、解析前の形状やメッシュ分割の様子についてもスクリプトにより画像を作成した。この画像作成作業を 2 つの形状に対して行うことで、約 150 枚の画像をスクリプトにより生成した。これだけの画像を生成する場合、マウスやキーボードを使って人間が手動で生成すると非常に長い時間と労力を必要とするが、本スクリプトを用いることで数分程度の時間で画像を自動生成できた。

8.2 自動化 2 疲労評価の計算

有限要素法では変数は節点や積分点等で定義されており、複雑な空間分布を表現できる。規格では板厚内の応力分布を膜・曲げ応力としており、変換が必要である。ソフトによっては変換機能を備えているが、今回は Abaqus で利用できる Python スクリプトを用いて応力の抽出を行い、別途作成したポスト処理プログラムで線形化した。応力分布や時刻歴、線形化結果については、選定した 38 個の板厚について、選定した板厚の最も内側と外側における主応力変化の時刻歴と、選定した板厚の最も内側と外側のそれぞれにおいて Tresca 応力が最大値と最小値をとる時刻における応力分布と線形化結果とをグラフ化した。これを 2 つの形状に対して行い、約 450 枚のグラフを自動生成した。さらに、線形化した応力から応力振幅を算出し、S-N 曲線と組み合わせて疲労評価回数を算出した。本作業についても、人間が行うことでミスが混入する恐れがあるが、スクリプトにより自動化することでミスを低減させることができる。

8.3 自動化3 報告書への画像ファイル貼り付け

CAE 解析を行った結果をまとめるにあたっては、解析モデルの様々な箇所や変数について報告書に記載する必要がある。そこで、作成したコンター図やプロットを Microsoft Word などの報告書に貼り付ける作業が発生するが、本作業を手動で行う場合、長い作業時間と大きな労力を要する。本事例では、数百の画像を報告書にまとめるにあたって、Microsoft Word のマクロ機能を用いて自動的に貼り付けた。これにより、画像の抜け落ちが防止できるとともに、作業時間も大幅に短縮できた。

9 おわりに

本稿では、JIS B 8265 附属書 8 に基づいて圧力容器の疲労評価を行った事例を紹介した。当社では、本稿で紹介した疲労評価だけでなく、CAE 解析ソフトによる数値解析やそのポスト処理、さらにはソルバー開発も含めて、数値解析によるソリューションをご提供していく。また、数値解析のポスト処理についても、作業の効率化や説明性の向上に資するため、ツールの整備や製品化に向けた検討を行っていく。

SolidWorks, Abaqus/CAE, Abaqus/Standard はダッソー・システムズの登録商標です。

Microsoft Word は米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標または商標です。