

第 8 章 構造解析システムによる解析演習

第8章 構造解析システムによる解析演習

学習のねらい

構造解析の目的、有限要素法による解析の留意点を理解し、3次元CAD／CAEシステムを使った構造解析および機構と構造の連成解析手法を習得する。

- 第1節 構造解析の理論と基礎
- 第2節 構造解析システムを使った基本演習
- 第3節 理論解析と有限要素法との同定
- 第4節 連成解析の概要
- 第5節 機構解析と構造解析の連成解析手順演習

8-1

【章全体のねらい】

- ・構造解析の目的と基礎知識、有限要素法の概要について学ぶ。
- ・設計者用CAEシステムによる構造解析手順を習得する。
- ・有限要素法による解析の精度や留意点について理解する。
- ・機構と構造の連成解析の概要、留意点を理解する。
- ・設計者用CAEシステムによる機構と構造の連成解析手順を習得する。

【章全体の解説】

構造解析とは何か、その目的とそれを利用される有限要素法について学び、そのノウハウや精度に留意しながら、実際に設計者用3次元CAD／CAEシステムを使った構造解析の手順を習得する。

さらに、機構解析の結果を利用した構造解析を行うため、連成解析の概要を理解し、その注意点到留意しながら、実際に設計者用3次元CAD／CAEシステムを使った機構と構造の連成解析手順を習得する。

第1節 構造解析の理論と基礎

学習のポイント

構造解析の目的と基礎知識、有限要素法による解析のしくみと解析手順の概要を理解する

- 1-1 はじめに
- 1-2 構造解析の基礎知識
- 1-3 有限要素法とは
- 1-4 有限要素の種類と特徴
- 1-5 有限要素法の基礎
- 1-6 構造解析の手順
- 1-7 解析の留意点

8-2

【節全体のポイント】

- ・構造解析の目的と基礎知識について学ぶ。
- ・有限要素法の特徴と基礎理論を理解する。
- ・構造解析の手順と留意点の概要を理解する。

【節全体の解説】

この節では構造解析の目的とそれに必要な基礎知識について説明し、CADソフトに広く使われている有限要素法の概要と基礎理論について解説する。
また、実際に解析を行う際の考え方や留意点について、概要を説明する。

1-1 はじめに

設計者の責任は重大（性能、品質、安全、コスト）
強度、剛性などの構造解析を手計算から3次元モデル
を使いコンピュータにより、より詳細に事前検討したい



CAEの活用

CAEとは（Computer Aided Engineering）

製品の設計・開発工程において、設計案の機能や性能
をコンピュータ上での数値解析によりシミュレーションを
行い予測・評価すること

8-3

【ポイント】

設計者の責任は重大である。機械や製品の性能、品質、安全、コストなどは、設計段階でその大部分が決まるといえる。

【解説】

特に安全については、使用者が使用中に部品の破損等により、危険にさらされることのないよう、十分な検討が必要である。

そこで設計者は、せつかく作った3次元CADモデルを使ってCAEの活用により強度、剛性などの構造解析を手計算からコンピュータ上でより詳細に事前検討したいと思うのは当然のことである。

CAEとは、製品の設計・開発工程において、設計案の機能や性能をコンピュータ上での数値解析によりシミュレーションを行い予測・評価することである。

設計者のためのCAE

- ・コンピュータ性能の飛躍的向上、低価格化
- ・3次元CADと連携した使いやすい
CAEソフト（いわゆる設計者CAE）の登場



設計者自身が解析を行う時代



8-4

【ポイント】

これからは3次元CADと連携した使いやすいCAEソフト使って設計者自身が解析を行う時代である。

【解説】

近年のコンピュータ性能の飛躍的な向上と低価格化により、3次元CADと連携した使いやすいCAEソフト、いわゆる「設計者CAE」といわれるものが登場した。これらはオペレーションをナビゲートしてくれる機能もあり、設計者だけでなくでも容易に使えるようなものになっている。



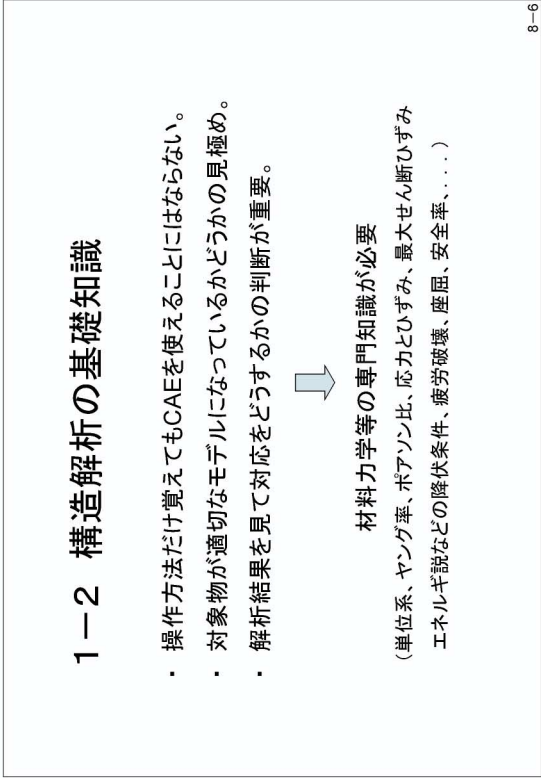
8-5

【ポイント】

CAEの活用効果としては、開発期間の短縮、製品品質の向上、コスト削減などが挙げられる。

【解説】

CAEの活用効果としては、開発期間の短縮、製品品質の向上、コスト削減などが挙げられ、これらは製造業が直面している課題であり、企業間競争力の強化につながる。3次元CADと同様にCAEソフトの普及が広がっている。



8-6

【ポイント】

CAEを使いこなすためには、ある程度の材料力学などの専門知識が必要である。

【解説】

しかし、いくら簡単に使えるようになったCAEとはいえ、操作方法だけを覚えても使えることにはならない。大事なのは出てきた結果が妥当かどうかを見極め、それをどう評価し、設計にフィードバックしていくかということである。そのためにはある程度の材料力学などの専門知識が必要である。例えば、単位系であるとか、ヤング率などの材料特性、主応力や相当応力による降伏条件、疲労評価などの知識である。

解析しようとする現象の種類は？

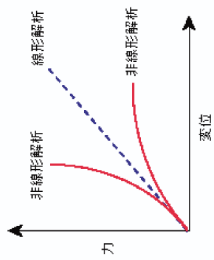
- ・ 静解析 … 荷重が時間とともに変動しない一定状態にある場合
- ・ 動解析 … 荷重が時間とともに変動する場合（慣性、減衰などを考慮）

- ・ 線形解析 … 力（入力）と変位（出力）の

関係が線形（比例）な挙動を示すもの。

- ・ 非線形解析 … 力（入力）と変位（出力）が比例しない挙動を示すもの。

- ・ 材料非線形
- ・ 形状非線形
- ・ 境界非線形



8-7

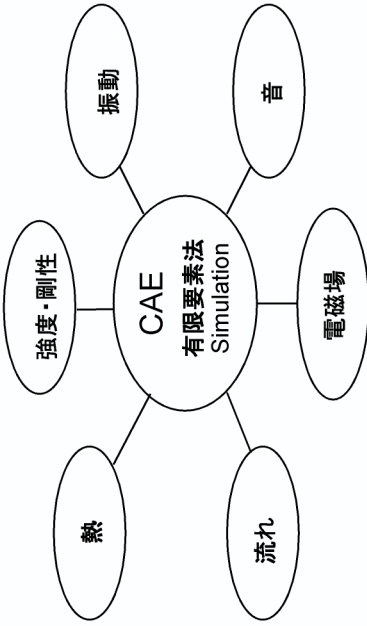
【ポイント】

解析しようとする現象についても見極めが必要である。

【解説】

たとえば、ここで示すようにまず、構造解析問題は大きく静解析と動解析に分けられる。静解析は、荷重が時間とともに変動しない一定状態にある場合であり、動解析は、荷重が時間とともに変動する場合（慣性、減衰などを考慮）である。また、力（入力）と変位（出力）の関係が線形（比例）な挙動を示すものを線形解析といい、力（入力）と変位（出力）が比例しない挙動を示すものを非線形解析といい、さらに非線形解析は、材料非線形、形状非線形、境界非線形などにわけられ、それぞれに適した解析ソフトや機能を選択する必要がある。

対象とする現象と使用ソフトの使い分け



8-8

【ポイント】

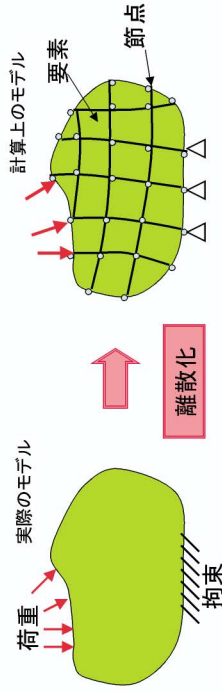
CAEは構造解析だけでなく、ここに示すように広い範囲で利用されており、それぞれに適した解析ソフトを選択する必要がある。

【解説】

例えば、流体の流れの解析や音、電磁場、最近では医療分野でもCAEは活用されている。その中で最も多く使われているのが、有限要素法という数値解析手法であり、特に設計者用構造解析CAEソフトにも、この有限要素法が使われている。この有限要素法の基本的概念について次に説明する。

1-3 有限要素法とは

FEM (Finite Element Method)



連続体を、いくつかの小領域（要素）に分け、その要素の特性を単純な方程式で近似的に表し、それを組み合わせて解を求めることによって、全体の挙動を予測しようとするもの

8-9

【ポイント】

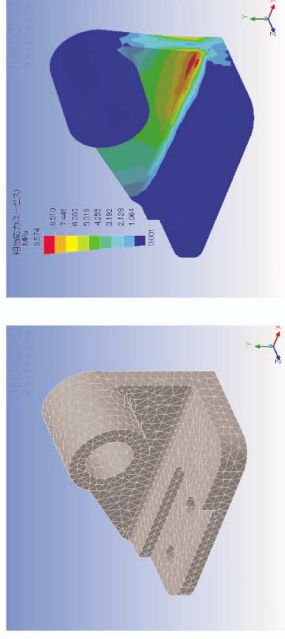
有限要素法とは、このように、連続体を、いくつかの小領域（要素）に分け、その要素の特性を単純な方程式で近似的に表し、それを組み合わせて解を求めることによって、全体の挙動を予測しようとするものである。

【解説】

有限要素法（FEM）の基本概念について説明する。
このように連続体を計算できる形の小部分に分けて考えることを離散化と呼んでいる。また、格子状に分割したものをメッシュと呼び、そのひとつひとつを要素、格子点のことを節点と呼んでいる。

有限要素法の特長

1. メッシュを切れば答えが出せる便利な手法



8-10

【ポイント】

有限要素法の特長その1
メッシュを切れば答えが出せる便利な手法

【解説】

有限要素法の特長（長所）について説明する。
まず、なんと言っても便利なのはメッシュさえ切れば、何かしら答えを出してくれるということである。ただし、この答えが正しいかどうかは人間が見極める必要がある。間違った入力をするれば当然答えも間違ったものが出てくる。

有限要素法の特長

2. 答えがビジュアルに表現でき理解しやすい

8-11

【ポイント】
有限要素法の特長その2
答えがビジュアルに表現でき理解しやすい。

【解説】
次に、コンピュータで計算した結果をこのように色分けして視覚的にわかりやすく表示してくれることである。色の赤いところが応力の高いところとか、変形の形や変形が大きいところを、一目で把握することができる。

有限要素法の特長

3. 形状変更を行っても、すぐに答えが出せる

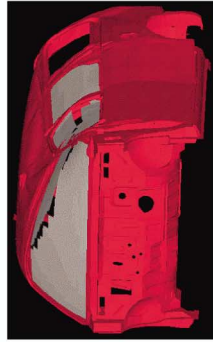
8-12

【ポイント】
有限要素法の特長その3
形状変更を行っても、すぐに答えが出せる。

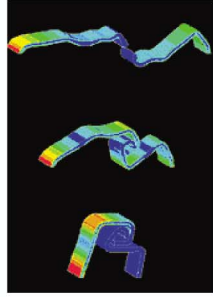
【解説】
次に、形状変更を行っても、すぐに答えが出せる点である。たとえばこのようなブラケットに軽量化のために穴を開けたいと思っても、これを実際の物でやるには相当の時間とコストがかかるが、CAEソフトであれば短時間でこのようないろいろなケースを検討することができる。

有限要素法の特長

4. 非常に汎用性があり、適用分野が広い



自動車ボディの衝撃解析
(米国ADINA社より)



フックの大変形解析
(米国ANSYS社より)

8-13

【ポイント】

有限要素法の特長その4
非常に汎用性があり、適用分野が広い。

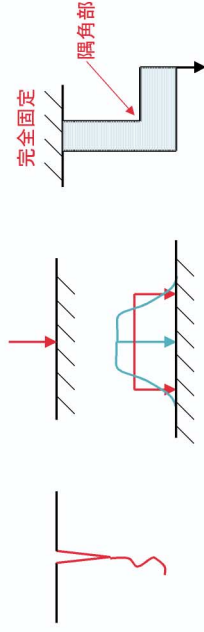
【解説】

また先ほど話したように、非常に汎用性があり、適用分野が広いということである。たとえば、自動車で言えば、このような自動車のボディの衝突解析やフックなどの部品の大変形解析、エンジンのピストンの熱解析や燃焼ガスの流れ解析などさまざまな分野で利用され、自動車の開発にはなくてはならないものになっている。

有限要素法の弱点

1. FEMは元々一般的な問題向きの近似解法であり、特殊な問題にはそのままでは適用できない

亀裂問題、集中荷重、分布荷重、反力分布、隅角部、完全固定……



局所的で特殊な事情は難しい！

8-14

【ポイント】

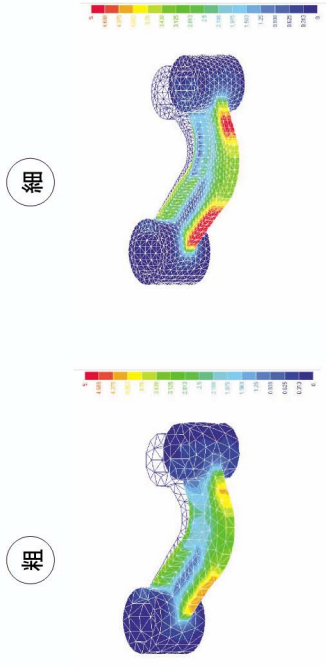
有限要素法の弱点その1
FEM(有限要素法)は元々一般的な問題向きの近似解法であり、特殊な問題にはそのままでは適用できない。

【解説】

しかし、有限要素法は、よい点ばかりでなく、弱点もある。まず、有限要素法(FEM)は一般的な問題向きの近似解法であり、このように亀裂の問題や荷重点付近の評価、角部の評価のような問題を評価するには不向きである。

有限要素法の弱点

2. メッシュの切り方によって答えが変わる場合がある



8-15

【ポイント】

有限要素法の弱点その2

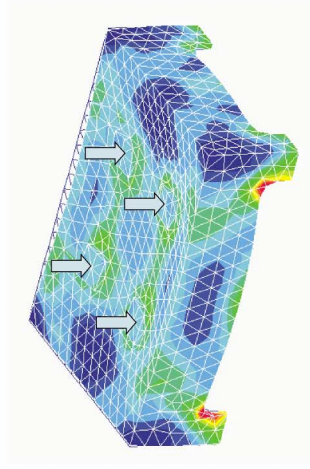
メッシュの切り方によって答えが変わる場合がある。

【解説】

また、次に有限要素法の大きな問題として、メッシュの切り方によって答えが変わるということが挙げられる。このように同じ部品を解析してもメッシュの大きさにより出てくる値が違ってくるので注意が必要である。一般的には粗いメッシュよりも細かいほうが精度がよいと言える。そのため特に応力集中部などはメッシュを細かくしておく必要がある。

有限要素法の弱点

3. 現実と同じ条件を与えるのが難しい



完全固定？すべり面？マサツの影響？片当り？

均質材料？、塑性化？

8-16

【ポイント】

有限要素法の弱点その3

現実と同じ条件を与えるのが難しい

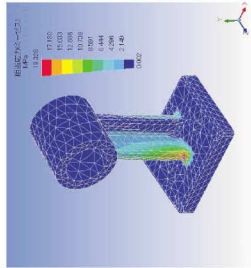
【解説】

次に計算モデルでは、実際と同じ条件を与えるのが難しいところがある。たとえばこのような架台を解析する場合、4つの足は完全固定でよいのか、実際にはすべっているのではないか、そのときの摩擦はどの程度か、などは計算ではなかなか表現しにくいところである。また、4つの足の足も実際には片当たりになっていることも考えられる。他にも板金物では板厚は均一なのか、塑性化していないか、といったこともある。

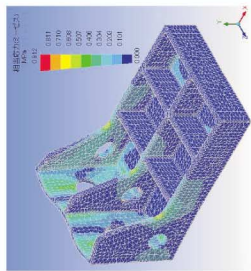
有限要素法の弱点

4. モデル規模が大きいとメモリを消費し、時間がかかる

節点: 9970
要素: 5800
時間: 17秒



節点: 99411
要素: 59868
時間: 180秒



8-17

【ポイント】

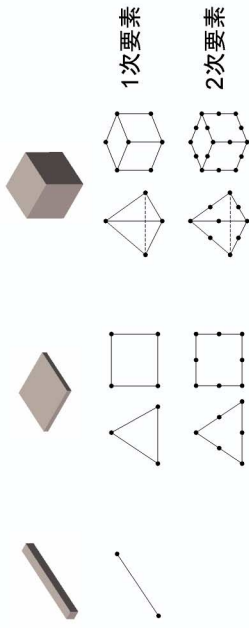
有限要素法の弱点その4
モデル規模が大きいとメモリを消費し、時間がかかる。

【解説】

次に、このようにモデル規模が大きくなるとメモリを消費し、計算に時間がかかることである。最近ではコンピュータ性能が飛躍的に向上し、部品レベルではあまり問題にならないが、それでも自動車の衝突解析などの大規模モデルでは計算に何時間もかかるといったことがある。

1-4 有限要素の種類と特徴

一般的な要素タイプの種類
ビーム(梁)モデル シェルモデル ソリッドモデル



8-18

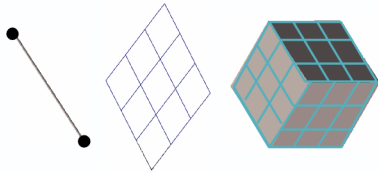
【ポイント】

有限要素法で使われる要素には、ビームモデル、シェルモデル、ソリッドモデルがあり、1次要素と2次要素がある。

【解説】

有限要素法で使われる要素には、このようにビームモデル、シェルモデル、ソリッドモデルがあり、解析対象物によって適した要素を使う必要がある。ビームモデル、シェルモデルでは通常1次要素で問題ないが、ソリッド要素は自動メッシュを使うと四面体要素になり、この四面体要素は1次要素では精度が悪いため、より精度のよい各辺の間に中間節点を持った2次要素が使われる場合が多い。

要素タイプのまとめ



ビーム要素	1本の線(面積なし) 属性として、断面積(A)、 断面2次モーメント(I)、 断面ねじりモーメント(J)	フレーム構造物に向いている 計算時間が早い 属性データの準備が必要 仕口などの応力評価ができない
シェル要素	サーフェス(体積なし) 属性として、板厚(t)	薄肉形状に最適 精度が高く、計算時間も早い 板厚変化があると、中立面と るのが難しい、 フ illet部分などの応力度が評価 出来ない
3次元ソリッド	ソリッド(体積あり) 属性データは不要	厚肉形状に向いている モデル化のノウハウが少ない 薄肉に対して精度が悪い メモリーと計算時間がかかる

※すべての要素において、
材料特性(E, ν)は必須

8-19

【ポイント】

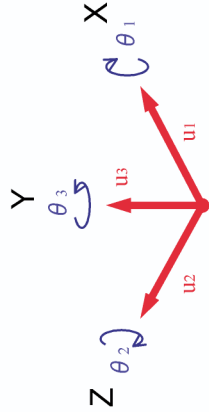
一般的に、ビーム要素はフレーム構造物、シェル要素は薄板の板金物、3次元ソリッド要素は、厚肉部品などに適する。

【解説】

ビームモデルは細長い部材を使った鉄塔のような構造物の解析などに使われる。シェル要素は薄肉の板金構造物の解析に使われ、鉄物などの厚肉部品の解析にはソリッド要素が使われる。各要素の特徴をまとめると表のようになる。(表の説明をする)

自由度とは

構造解析の場合、変位や境界条件の方向を表現するために使われるもので、並進方向(X,Y,Z)、回転方向(X軸まわり、Y軸まわり、Z軸まわり)の合計6自由度で表される



8-20

【ポイント】

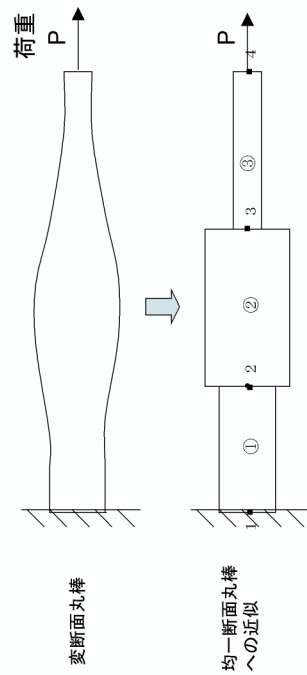
機構解析と同様に、物体の動きや境界条件の方向などを6自由度で表す。

【解説】

機構解析と同様に構造解析においても、荷重や変位の方向をこのように6つの自由度を使って表すが、解析ソフトによっては、この自由度が表に出てこないものもある。

1-5 有限要素法の基礎

解法の考え方としくみ



8-21

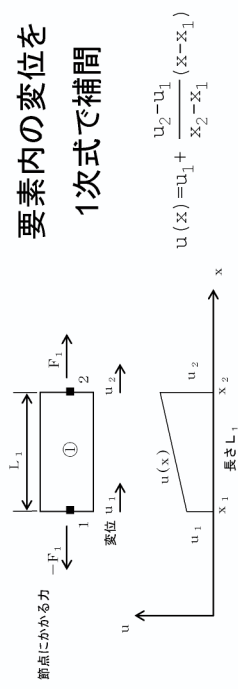
【ポイント】

有限要素法の解法の考え方としくみについて、簡単な例で説明する。

【解説】

まず、このような変断面丸棒の引張りの問題を考える。
これを有限要素法的解法では、このように均一断面の要素に分けて近似をして考える。ここでは、①、②、③の3つの要素に分けて考えたとする。

要素①の変形



要素内の変位を 1次式で補間

$$u(x) = u_1 + \frac{u_2 - u_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

8-22

【ポイント】

要素内の変位をある近似方程式で仮定する。

【解説】

次にそのひとつの要素①について、その要素内の変位をこのように1次式で補間できると仮定する。

要素内のひずみ

$$\epsilon = \frac{u_2 - u_1}{L_1} \quad (\text{一定})$$

ヤング率

応力

$$\sigma_1 = E\epsilon_1 = \frac{E}{L_1} (u_2 - u_1)$$

節点に作用する力

$$F = A\sigma \quad (A: \text{断面積})$$

節点1に働く力を f_1 、節点2に働く力を f_2 とすると、 $f_1 = -F_1$ 、 $f_2 = F_1$ より

$$f_1 = \frac{E_1 A_1}{L_1} (u_1 - u_2)$$

$$f_2 = \frac{E_1 A_1}{L_1} (-u_1 + u_2)$$

k_1 とおく

【ポイント】

そうすると、要素内のひずみは一定となり、応力、力はこのように表される。

【解説】

そうすると、要素内のひずみは一定となり、それにヤング率をかけて、応力はこのように表される。また、応力に断面積をかけると力になり、要素①の両端の節点1と節点2に働く力を f_1 、 f_2 とすると、このように表せる。ここでこれ $(E_1 A_1 / L_1)$ を K_1 と置く。

前式より

$$k_1 u_1 - k_1 u_2 = f_1$$

$$-k_1 u_1 + k_1 u_2 = f_2$$

これをマトリックス表示すると

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}$$

$$\{f\} = [K]\{u\}$$

要素剛性方程式

【ポイント】

1つの要素における $\{f\} = [K]\{u\}$ の関係を要素剛性方程式という。

【解説】

前式より、 f_1 と f_2 はこのように表され、これをマトリックスで表示するとこのようになる。これを要素剛性方程式といい、フックの法則と同様の式となる。

要素②に働く力を f_2' 、 f_3 要素③に働く力を f_3' 、 f_4 とすると同様に

$$\begin{bmatrix} f_2' \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} f_3' \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_3 & -k_3 \\ -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}$$

となり、それぞれの左辺と右辺を加え合わせると

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 + f_2' \\ f_3 + f_3' \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}$$

全体剛性方程式

8-25

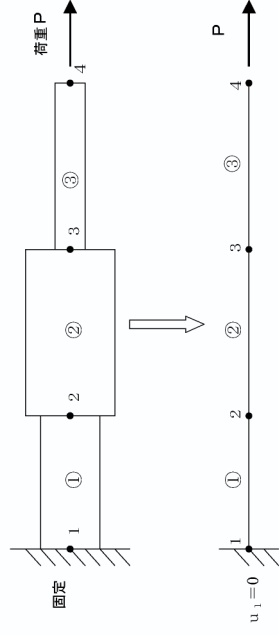
【ポイント】

要素ごとの要素剛性方程式を組み合わせて、全体剛性方程式を作る。

【解説】

同様にして、要素②、要素③の両端に働く力をマトリックスで表すと、このようになり、それぞれ左辺と右辺を加え合わせるとこのように書き表される。
これを全体剛性方程式と呼んでいる。

前式にある境界条件 ($u_1 = 0$ 、 $f_4 = P$) のもとで解く



8-26

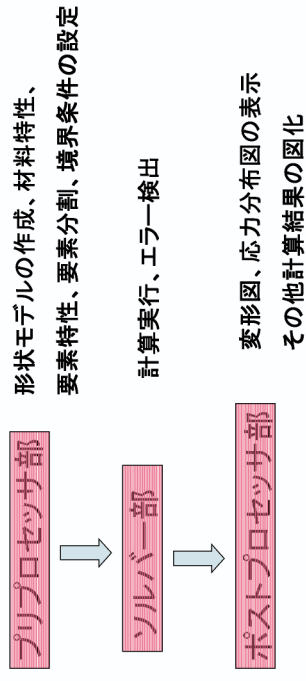
【ポイント】

全体剛性方程式を、ある境界条件のもとで解く。

【解説】

前式にある境界条件、ここでは、左端を固定し、右端に引張り力Pをかけるという条件のもとで解いていく。

1-6 構造解析の手順



8-29

【ポイント】

構造解析の一般的な手順としては、大きく分けてプリプロセッサ部、ソルバー部、ポストプロセッサ部の順に分けられる。

【解説】

以上、有限要素法の解法の考え方としくみについて説明したが、これはここでいう計算部分すなわち、ソルバー部にあたる。構造解析の一般的な手順としてはこのように、まず、計算するためのモデルを作るプリプロセッサ部、計算を行うソルバー部、結果の図化などを行うポストプロセッサ部に分けられることが多く、同一ソフトで連続して行えるが、それぞれに別のソフトを使う場合もある。

解析に対する誤解

シミュレーションの結果がそのまま実際の現象を表していると考えられている。
CAEを行えば実験は不要になり問題がすぐに解決すると考えている。
シミュレーションの結果が実際と合わないから使えない



誤解

8-30

【ポイント】

CAEは、あくまでも近似計算であり、出てきた値をそのまま信じるのではなく、妥当な結果かどうかを見極めることが大事である。

【解説】

次に、中には解析に対する間違った認識があるので少し説明する。

それは、コンピュータを使ったシミュレーションはいかにとも正確で、その結果がそのまま実際の現象を表していると考えている、CAEを行えば実験は不要になり問題がすぐに解決すると考えている、といったことであり、また逆にシミュレーションの結果が実際と合わないから使えない、といったこともある。これは解析すなわちCAEが、あくまでも近似計算であるというこの認識不足であり、出てきた値をそのまま信じるのではなく、妥当な結果かどうかを見極め、違ふとすればどこにその原因があるのかを見極めることが大事であるということである。

1-7 解析の留意点

- ・ モデルの材料特性、構造は実際と合っているか？
- ・ 荷重条件、拘束条件は実際と合っているか(妥当か)？
- ・ メッシュ分割の大きさは適当か？
- ・ 解析結果をどう判断するか、評価基準は？
- ・ 定量評価よりも定性的評価、比較評価

8-31

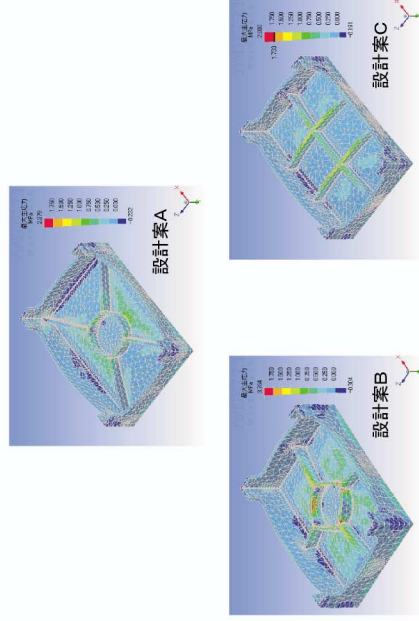
【ポイント】

解析を行う上での主な留意点として、このようなことが挙げられる。

【解説】

このように解析を行う上での主な留意点としては、モデルの材料特性、構造は実際と合っているか、荷重条件、拘束条件は実際と合っているか(妥当なモデルか)、メッシュ分割の大きさは適当か、などに注意を払い、また、解析結果をどう判断するか、評価基準をどう設定するかも重要である。評価基準があいまいな場合には定量評価よりも定性的評価、比較評価を行うということも必要である。

解析適用例：架台のリブパターン検討



8-32

【ポイント】

このようなリブの配置を検討する場合でも、コンピュータ上であれば、いろいろなパターンを容易に検討することができる。

【解説】

これはひとつの解析適用例である。精密機械のような重たいものをのせる架台を裏から見ただけであり、リブの通し方を解析で検討している。どのようなリブの通し方が一番剛性が高く、重量も軽く、応力集中も小さくできるかといったことが、コンピュータ上でさまざまな角度から検討することができる。これを実際のもので行うことは大変な時間とコストがかかることになるが、コンピュータ上であれば、いろいろなパターンを容易に検討することができる。

解析技術確立のためには

- ・ 現物の実験によるデータ取り
- ・ モデル、解析条件変更等による整合取り
- ・ 実験値との比較検討による基準作り



データ・ノウハウの蓄積が重要

8-33

【ポイント】

解析技術の確立のためには地道なデータ・ノウハウの蓄積が重要である。

【解説】

最後に、解析技術の確立のためには、ということであるが、やはり、解析を実現象とあわせるためには、現物を使って実験を行い、それを解析結果と比較して、どこが違うのかを分析し、合わせるためにモデルの修正や境界条件などの変更による整合取りを行うことが重要になる。

また、これにより、破壊に至る応力値がある程度見出せれば、以後は同様のモデルであれば、解析で定量的評価ができることになり、解析の効果が大きく期待できることになる。このように解析技術の確立のためには地道なデータ・ノウハウの蓄積が大へん重要であるといえる。

第2節 構造解析システムを使った基本演習

学習のポイント
設計者用構造解析は、使い易くなり誰もが使える環境になりつつある。しかし、当然ながら操作手順のみならず、その意味を理解して使う必要がある。線形応力解析を中心にその意味、用語を理解する。

- 2-1 設計者用構造解析システム
- 2-2 DesignSpaceの機能と特徴
- 2-3 リンクASSYモデルを用いたDesignSpaceの基本的使い方の演習

8-34

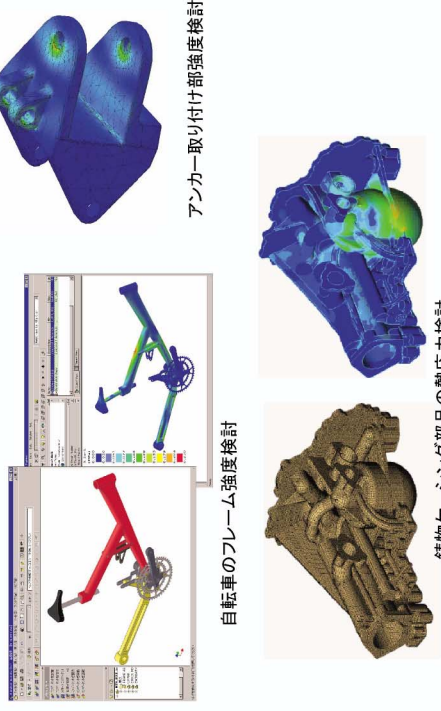
【節全体のポイント】

使うことは誰でもできる環境になりつつあるが、その意味を理解し、結果を正しく評価することが重要である。

【節全体の解説】

前章では、構造解析(有限要素法)の理論と基礎を勉強した。ここでは、実際のツールを使って構造解析を行う。但し、使用する際には解析の意味や基本的用語を押さえておく必要がある。

2-1 設計者用構造解析システム



8-35

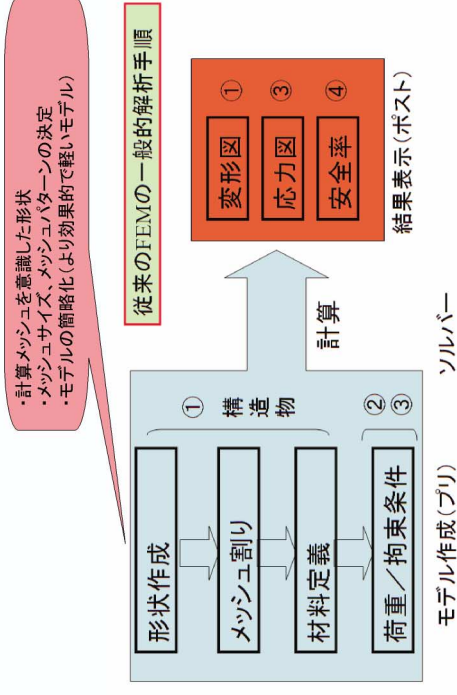
【ポイント】

実設計では、机上の理想化されたモデルではなく、実際の製品モデルに対して検討をしなければならない。

【解説】

実際の設計モデルは複雑であり、設計用の3次元モデルを使って変形や強度、安全率を求めることができれば便利である。スライドに各種の解析例を示す。現在、SolidWorksをはじめとする代表的なCADデータを直接やり取りして、構造解析がそのままできる便利なツールが多く出ている。その中でも特に設計者用に考えられたDesignSpaceというツールをここでは紹介する。但し、ハード、ソフトが発達したとはいえ、解析負荷を軽減するために、解析にほとんど影響の無い微小な詳細形状等は省略するべきである。

従来の構造解析の手順



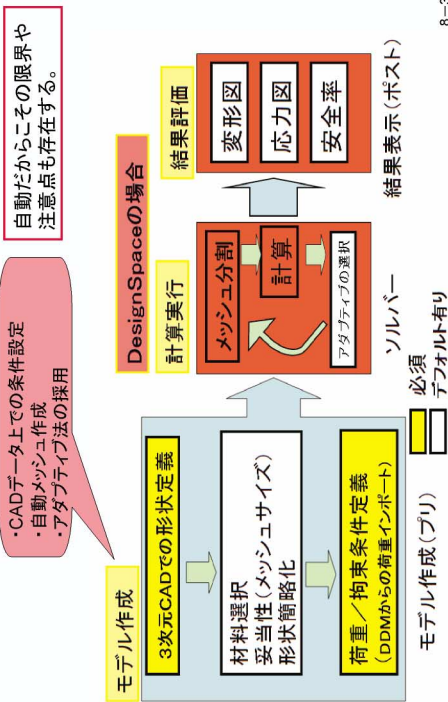
【ポイント】

従来の構造解析(FEM)ツールの一般的手順を示す。個々の作業が単独で行われ、個々にノウハウが必要である。

【解説】

形状データを作成した後に計算用のメッシュ作成(分割)を行い、計算に必要な諸条件を定義してから始めて解析を実行する。そして、形状データを作成する作業に大きな工数を使っていた。もちろん、3次元CADデータを利用することはできるが、バージョンが異なっていたりファイル形式の相違により完全に読み込むことが困難な場合も少なくなかった。ここでは、ユーザーに対して、計算メッシュを考慮した形状作成、メッシュサイズやメッシュパターンのノウハウ、モデルの簡略化技術などが自然と要求された。

設計者用構造解析の手順



8-37

【ポイント】

設計者用構造解析 (FEM) ツールの一般的な手順を示す。3次元CAD内ですべての作業が行える環境である。

【解説】

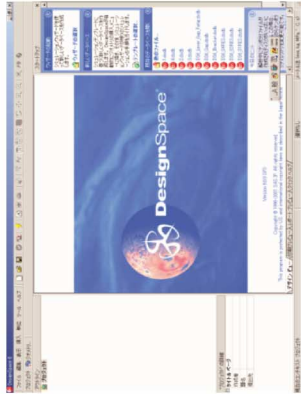
近年の設計者用ツールは、最初から3次元CADを使うことを前提としており、3次元CADデータとの親和性を第1に作られている。設計者は、設計検討用の3次元データと解析形状データを区別することなく使え、効率化を図ることが可能となる。

荷重データについても、以降で示す機構解析との連成解析においては、荷重ファイルを読み込むだけで設定可能である。また、理論のところでも述べたようにFEMの計算結果は計算メッシュの切り方や細かさにより影響を受ける。そのメッシュ作成を自動的に最適な状態まで修正してくれるアダプティブ法を使用すれば、計算精度についてもある程度自動で保証することが可能となる。

但し、使い易くなり誰でも結果が得られるからこそ、その結果の考察が重要になる。また、メッシュ数や計算時間などの制約もあることに注意が必要である。

構造解析の解析タイプ(DesignSpaceの例)

- 1) 線形静解析
- 2) 熱伝導解析 (定常状態)
- 3) 固有値解析
- 4) 連成解析
- 5) 形状最適化 (トポロジー最適化)



設計者用CAEでは、線形解析機能が基本となる。

線形解析をいかに設計に適用するか、または、出来ること出来ないことの切り分けが重要になってくる。

8-38

【ポイント】

代表的な設計者用構造解析ツールの計算機能を示す。その他にも構造解析の現象はいくつあり複雑であるが、設計者が手軽に計算できなおかつ基本的で重要な機能に限定している。従って、出来ること出来ないことの切り分けも重要になってくる。

【解説】

DesignSpaceを例に解析機能について簡単に解説する。

(1) 線形静解析

製品に力、圧力、重力などの外力が作用した場合に、製品がどのように変形しその外力と釣り合うかを計算する。そして、そのときの変位、ひずみ、応力を求め、強度的な安全率を評価する。一番基本的で頻繁に使用する機能である。

(2) 熱伝導解析

製品内に発熱体が存在したり、高温体や低温体などから熱の出入りがある場合の製品の温度分布を計算する。フィンや形状設計などは温度状態を計算する必要がある。

(3) 固有値解析

破損や騒音の原因となる製品の共振現象を計算する。共振時の振動モードとその周波数を計算し、共振を起こす可能性があるか、またその場合どの部位を補強すれば共振を避けることができるかを検討する。

(4) 連成解析

連成解析とは異なる物理現象と一緒に考慮することを意味し、DesignSpaceの場合、熱伝導解析をした温度結果を使って静解析を行う熱応力解析、静解析の応力結果を使って固有値解析をする荷重状態での共振解析を示す。

(5) 形状最適化

形状最適化とは、ある制約条件(最大応力値がある値以下になるとか)のもとでのどの部位をどのくらい削ることができるかを計算し、重量を最小化するものである。DesignSpaceでは削れる可能性のある部位を色で表示してくれる。

2-2 DesignSpaceの機能と特徴

線形静応力解析の前提条件

- ある物体に荷重をかけると、その物体は変形し、荷重の影響は物体全体に伝わる。
- 荷重の影響を吸収するために、物体に内力が生じ、拘束点には外荷重に釣り合うように反力が生じる。
- 線形静解析では、二つの基本的な仮定(静的仮定、線形仮定)の下で外荷重の影響での変位、ひずみ、応力の計算を行う。



8-39

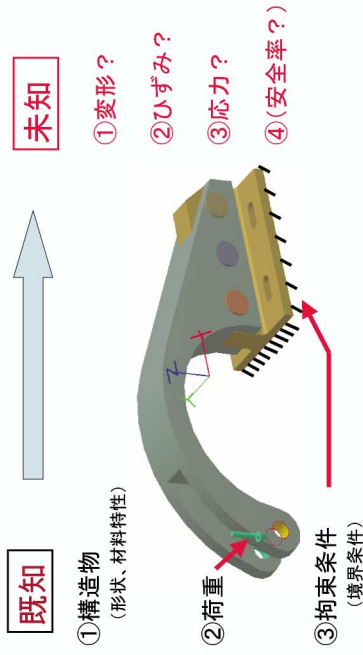
【ポイント】

実際にDesignSpaceを使用する前に、一番良く使用する線形静応力解析の機能について以下に説明する。

【解説】

- ・繰り返しになるが、線形静解析とは、製品に外力が作用した場合の変形や応力を求めるものである。その際、以下の前提条件があることに注意する。
- ・荷重はゆっくりと静的に作用するものとする。つまり、時間的に大きさや方向が変化しない一定荷重が作用している状態である。
- ・材料は降伏などの現象を起こさない範囲の状態である。つまり、荷重を除去すれば完全に元に戻る状態である。
- ・製品は当然荷重を受ければ変形するが、その変形量は一般に微小である。ゴムのように元の形状に対して大きく変形してしまうものは極えない。

線形静的応力解析の入力と出力の関係



8-40

【ポイント】

線形静解析の入力と出力の関係を把握しておく。

【解説】

既知の状態(形状、材料、荷重、拘束)を定義して、未知の状態(変形、ひずみ、応力、安全率)を求める過程となる。形状情報については、CADデータをそのまま使うことになるので、形状変更が頻発する設計初期段階ではCADと解析ツールのシームレスな連携が特に重要になる。その点、設計者ツールではCADデータと解析モデルが常に連動している。

線形静応力解析で必要な材料データ

- ヤング率(E) (必須)
- ポアソン比(NU) (必須)
- 密度(DEN) (自重、遠心力、加速度が作用する場合に必要)
- 熱膨張係数(ALPHA) (熱応力解析を行う場合に必要)
- 比熱(C) (非定常熱応力解析をする場合に必要)
- 降伏応力、極限応力 (安全率を算出する場合に必要)

注)せん断弾性係数Gは、 $G=E/(2(1+\text{NU}))$ より、プログラム内部で算出される。

8-41

【ポイント】

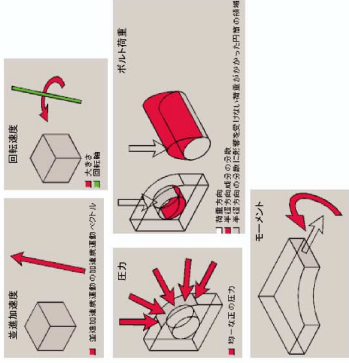
ここでは、解析に必要なデータのうち、材料データについて記述する。

【解説】

線形静応力解析では、材料のヤング率とポアソン比は必須である。その他は計算種類によっては必要ないが、定義されている限りは問題ないので、極力この6つは定義しておくように習慣付けると良い。

線形静応力解析で使う荷重データ

- (物体力)
 - 並進加速度(eg. 重力加速度)
 - 回転速度(eg. 遠心力)
- (表面力)
 - 圧力
 - 面、辺、頂点に対する力
 - ボルト荷重
 - モーメント
 - 面、辺、頂点に対する強制変位
- (熱荷重)
 - 熱荷重(熱応力解析の時)



8-42

【ポイント】

ここでは、解析に必要なデータのうち、荷重データについて記述する。

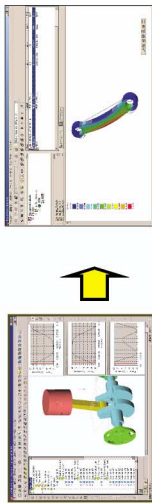
【解説】

荷重には大きく分けて、物体力と表面力がある。物体力は重力や遠心力など物体の質量に比例して作用する荷重であり、表面力は面や辺、頂点など特定の場所のみに作用する荷重である。また、温度も温度差により物体は熱収縮や熱膨張など変形を引き起こすので、荷重の一種となる。

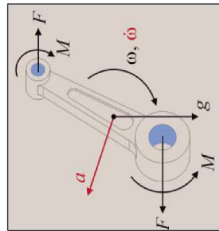
ある規定値の変位を条件として与える強制変位は、拘束と同時に荷重ともなる。その場合、そこに発生する反力が荷重値となる。

ボルト荷重とは、円筒面の半円部分に接触圧相当の不等分布圧力を定義するものである。

線形静応力解析で使う荷重データ (モーションからの荷重)



DesignSpaceは、COSMOSMotionで解析したジョイント反力と物体力を、DesignSpaceの荷重として、自動的に取り込めることができる。



8-43

【ポイント】

ここでは、荷重データの1つとしてモーションからの荷重について記述する。

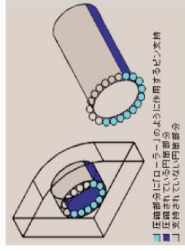
【解説】

荷重データを機構解析結果ファイル (COSMOSMotion) から取り込むことが可能である。その場合、必要な物体力と表面力が自動的に設定されるのでユーザが新たに荷重を設定する必要はない。更に、動いている部品は、力の釣り合い状態は保たれているものの、絶対空間上には拘束されていないので、一般に拘束条件も不要である。

線形静応力解析で使う拘束データ

■ 拘束

- 面、辺、頂点に対する拘束
- 半径方向と軸方向に支持された円筒
- 半径方向に指示された円筒
- 円筒固定
- 摩擦のない面⇒対称モデル
- ピン固定円筒⇒境界非線形
- 節点強制変位を使った、成分 (X,Y,Z) 別の拘束



8-44

【ポイント】

ここでは、解析に必要なデータのうち、拘束データについて記述する。

【解説】

拘束条件は、面、エッジ、頂点など特定の指定した部位について定義する。その際に、完全固定なのかある方向のみ固定なのかなどの違いがある。たとえば、ある面を指定した場合、その面の法線方向は固定であるが、面内方向には動ける場合はすべり面となり、「摩擦のない面」となる。

ピン固定円筒とは、円筒面の半円部分のみ固定で、なおかつすべり面となる。

線形静応力解析で得られる結果データ(1)

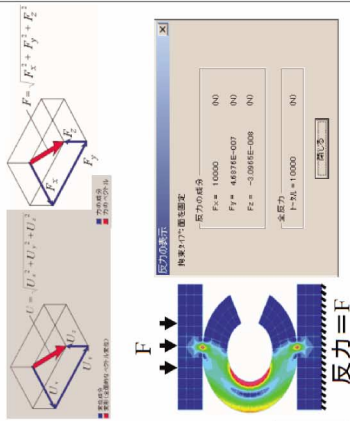
■変位

- 変形(全面的なベクトル変位)
- X,Y,Zの変位成分

■反力

- 全反力(全面的なベクトル変位)
- X,Y,Zの反力成分

※与えた荷重の総和と拘束点に発生する反力の総和が等しいことを確認するのは重要である。



8-45

【ポイント】

ここでは、解析結果データのうち、変位、反力について記述する。

【解説】

変位とは初期位置よりどの程度変形したかの移動量を示す。全体座標系のX,Y,Z方向の各移動量を出力することもできるし、合成量(X,Y,Z変位量の合成ベクトルの大きさ)として出力することもできる。一般には変位の合成量を色付きコンター図で出力することが多い。また、変形量の表示倍率を上げてアニメーション表示することにより、変形モードを感覚的に把握できる。

更に、拘束位置には外力と釣り合いを保つための反力が発生しているはずである。その反力値を出力し外力と同程度の値が出ていることを確認することも必要である。

線形静応力解析で得られる結果データ(2)

■歪

■応力

■主応力

要素の成分はそれが計算される方向によって変わるが、ある点で応力表示の座標軸を回転していくと、せん断力が無くなる場所がある。そのときに残っている3つの垂直応力を「主応力」という

■相当応力(フォンミーゼス応力)

フォンミーゼスの相当応力は材料(一般に金属)が降伏し、塑性化し始める時に必要な応力の強さを示す指標のひとつ。3つの主成分を用いると以下のように示される。

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

8-46

【ポイント】

ここでは、解析結果データのうち、歪、応力について記述する。

【解説】

ひずみとは伸び量を元の長さで割った無次元量であり、伸び率とか変形率などとも呼ばれる。つまり、伸び量だけではその材料がどのくらい元の形状から離れているのか分からないので元の形状で割った率で示したのが、ひずみである。従って、ひずみが大きい箇所はそれだけ大きな無理が生じているところと言える。更に、そのひずみに材料のヤング率をかけたものが応力である。応力はヤング率と同じ(単位面積あたりの力)の単位系を持つ。ひずみと同様に応力の高い部位はそれだけ材料的にストレスが溜まっている箇所と言え、その部位より破損に至るケースが多い。

応力種類の中でも設計的に良く使われるのは、主応力と相当応力である。主応力は垂直応力の最大、最小値であり、それぞれ最大引張応力と最大圧縮応力に相当する。相当応力は、せん断応力の度合いを示す。相当応力は主応力とは違い、方向を持たないスカラー量である。

また、応力やひずみも変位量と同じく色付きコンター図で表示し、どの部位がつかいかを色でまず判断するのが一般的である。

線形静応力解析で得られる結果データ(3)

■応力安全性ツール

- | | |
|------------------------------|----------------------|
| ①最大相当応力
(フォンミーゼス応力)安全性ツール | } ■延性破壊向け
(金属など) |
| ②最大せん断応力安全性ツール | |
| ③モールクーロン応力安全性ツール | } ■脆性破壊向け
(ガラスなど) |
| ④最大引っ張り応力安全性ツール | |

※いずれのものも、降伏強さや破壊強さなどを許容応力として設定し、それに対する「安全率」「安全許容率」「無次元応力」を表示する機能

8-47

【ポイント】

ここでは、解析結果データのうち、安全率について記述する。

【解説】

安全率とは、設計基準応力/最大発生応力であり、その材料の強度的余裕度を示す。安全率が大きいほど余裕があり、1以下であれば破損するという判断ができる。ここで、設計基準応力とは一般にはその使用している材料の降伏応力または引張破断応力を用いることが多い。しかし、独自に基準値を設定しているのであればそれを使用してもよい。

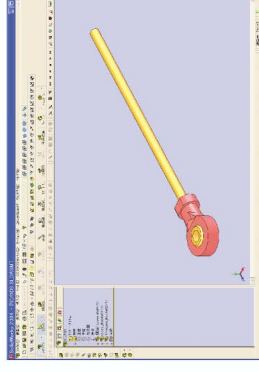
そして、最大応力値の方であるが、先に説明したように計算される応力はいろいろな種類があり、対象材料により使い分ける必要がある。一般金属のような延性材料については、計算応力として相当応力またはせん断応力を用いる。また、ガラス、ブロック、セラミックなどの脆性材料は、最大主応力(最大引張応力)を用いる。これらは、過去の様々な実験データより裏付けされたものであり、実際の破損と良く合うことが知られている。

安全率の結果も色付きのコンタート図で表示することが多く、設計許容安全率以下と以上で色分けをすると分かり易い。

2-3 リンクASSYモデルを用いたDesignSpaceの基本的使い方

前章で作成したリンクモデルを使って、DesignSpaceの基本操作を習得する。リンクが軸力を受けた場合の応力集中問題を解いてみる。

SolidWorksを立ち上げ、作成した「リンクDS. SLDASM」モデルを開いた状態から始める。



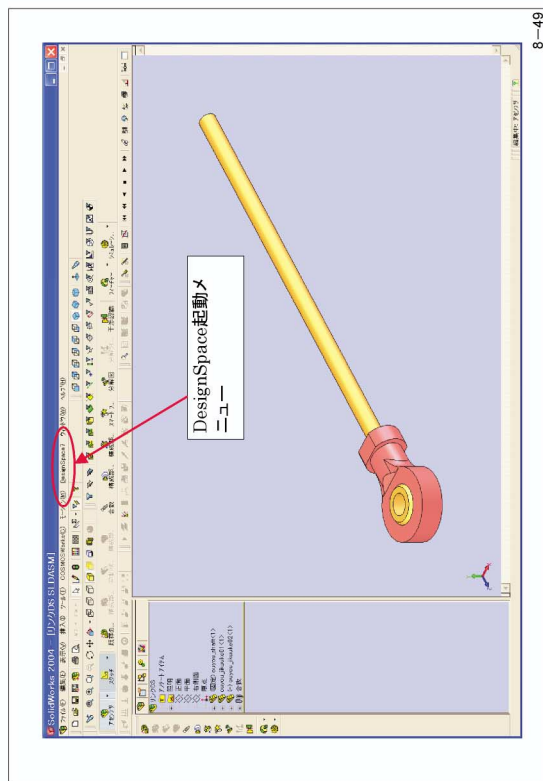
8-48

【ポイント】

手順1) CADモデルの読み込み

【解説】

CAD(SolidWorks)を立ち上げ、¥リンクDS.SLDASMを開く。今回、このアセンブリー部品が軸力を受けた場合の応力集中問題をDesignSpaceを使って計算する。



8-49

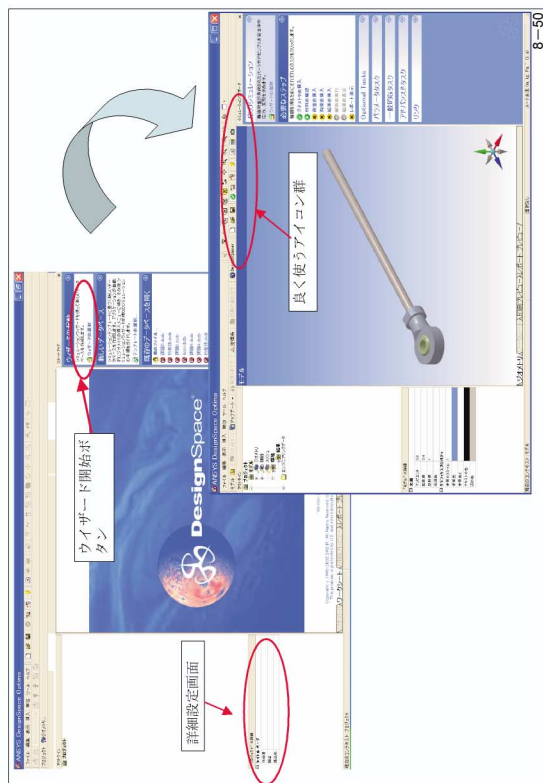
【ポイント】

手順2) DesignSpaceの起動

【解説】

CAD上の[DesignSpace]メニュー(バージョンによってはDesignSpace7となっている)から[DesignSpace起動]を選択し、DesignSpace画面を立ち上げる。SolidWorksの画面とは別のDesignSpace専用の画面が起動する。

(注) DesignSpaceがインストールされているにも拘わらず、[DesignSpace]メニューがない場合は、[ツール]→[アドイン]でDesignSpace PlugInにチェックが入っているか確認する。なければ、チェックを入れる。



8-50

【ポイント】

DesignSpaceの基本画面

【解説】

まず、右上のウィンドウで、

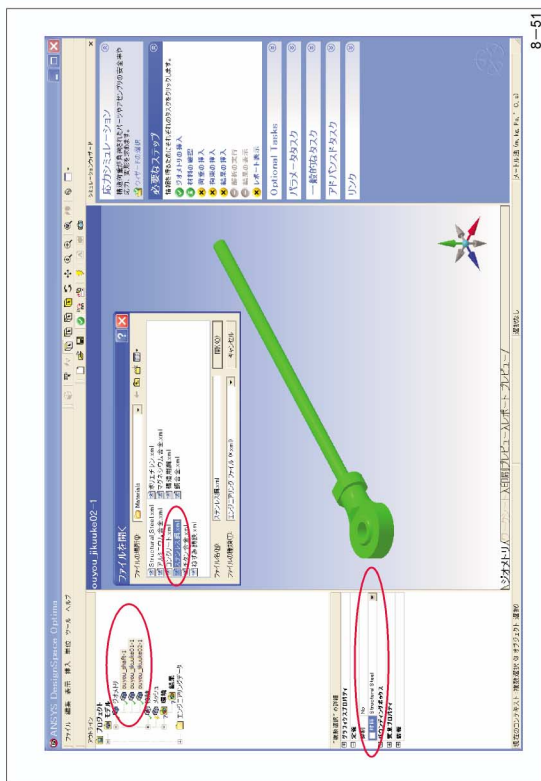
・[ウィザードの選択]を選択する。

・次に[安全率や応力変形を求めます]を選択する。

・次に[ジオメトリの挿入]で、アクティブなCADファイルの「リンクDS.SLDASM」を選択する。

以上で、SolidWorks上のモデルが、DesignSpace画面にアタッチ(読み込み)される。

テキストに、良く使うアイコンやモデルの移動、回転に関するアイコンの説明があるので、参照しながら実際に操作してみる。



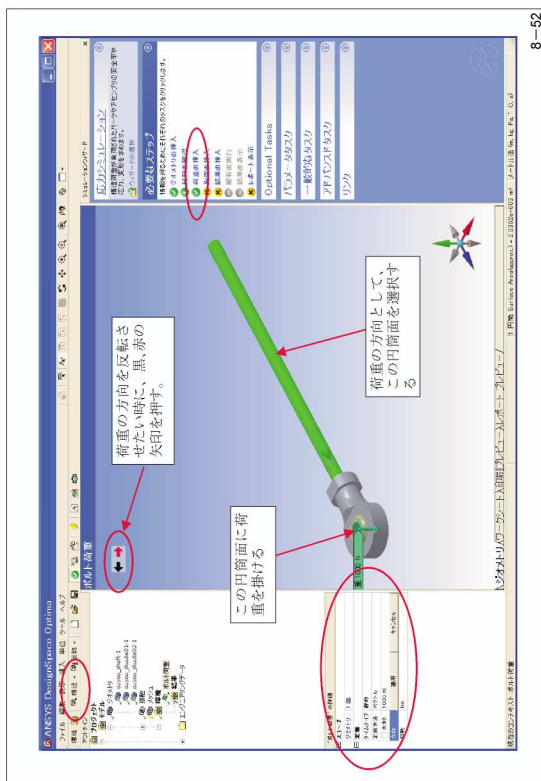
8-51

【ポイント】

手順3) 各パーツへの材料の定義

【解説】

左上ツリー内の[ジョイントリー]の中の各パーツを選択して、左下の詳細設定画面内で材料を確認する(デフォルトはStructural Steelになっている)。材料を変更するときには、材料のところで[検索]を選択して変更する。たとえば、ouyou_shaft-1をピックし、左下の詳細画面で、Structural Steelの右にある三角マークをピックして[検索]を選択し「ステンレス鋼」を選択し材料を変更する。すべてのパーツの材料を変更するには、CtrlキーまたはShiftキーを押しながら変更するすべてのパーツを選択して、一度に変更することも可能である。ここでは、すべてのパーツを「ステンレス鋼」に変更する。



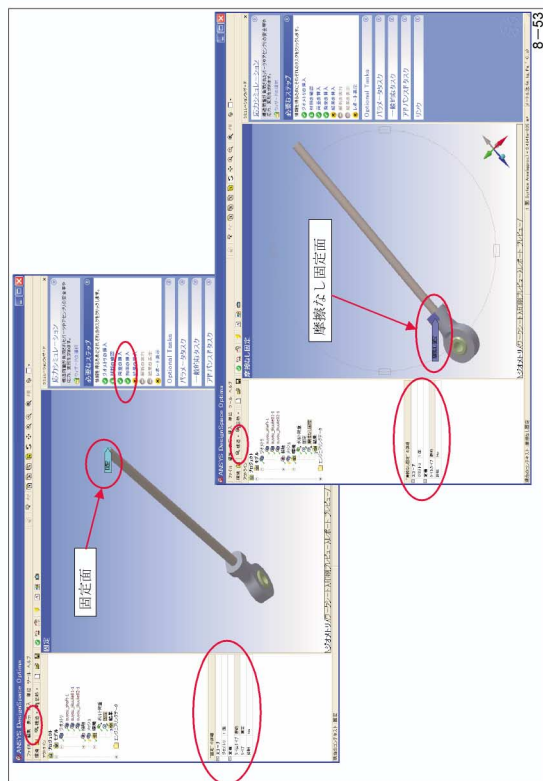
8-52

【ポイント】

手順4) 荷重の定義

【解説】

ウィザード内での[荷重の挿入]をピックすると設定する個所のメニューが吹き出しで示される。ここで、[構造]→[ボルト荷重]を選択する。
まず、左下の詳細設定画面の[ジョイントリー]入力ボックスをピックし、ouyou_jikuuke02-1の穴の内側円筒面を選択し適用を押す(注:面が選択できない場合は、選択フィルターアイコンで面選択がOnになっているか確認する)。次に、[大きさ]ボックスをピックし1000と入力する(1000N)。さらに荷重の方向設定のために[方向]ボックスをピックし、ouyo_shaft-1の円筒面を選択する。すると円筒面の軸方向に荷重が向く。向きを逆にしたい場合は画面左上の黒と赤の矢印を押す。画面に対して手前に向くようにして適用を押す。



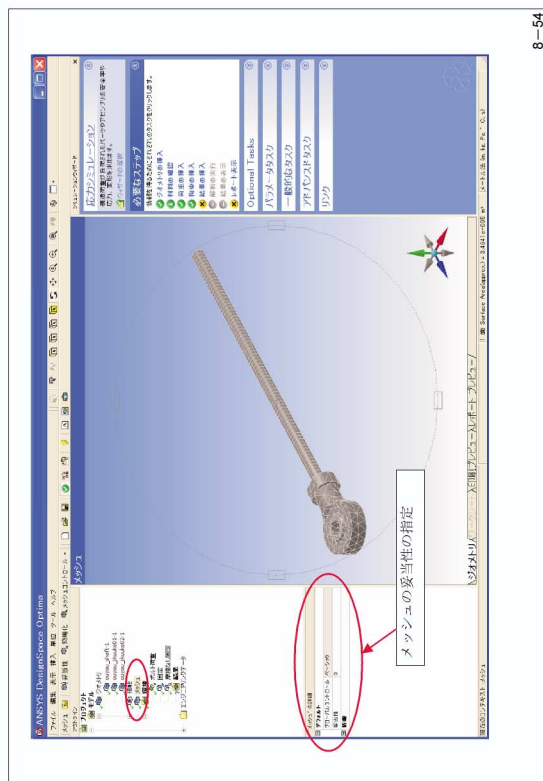
8-53

【ポイント】

手順5) 拘束条件の定義

【解説】

ウィザード内での[拘束の挿入]をピックすると設定する個所のメニューが吹き出しで示される。ここで、[構造]→[固定]を選択、固定するouyou_shaft-1の端面を選択して[適用]を押す。また、[構造]→[摩擦なし固定]を選択し、ouyou_jikuuke01-1の平らな面を選択して、適用を押す。



8-54

【ポイント】

手順6) 計算用メッシュの作成

【解説】

左上ツリー内の[メッシュ]を右クリックし、[メッシュレビュー]でメッシュ作成及びメッシュ図を確認する。

(注) メッシュの妥当性とは全体の平均メッシュサイズであり、デフォルトでは0に設定され、-100に行くほど粗く、+100に行くほど細くなる。計算上はメッシュサイズを細かくした方が解析の精度が上がるが計算時間がかかるためその兼ね合いを考える必要がある。ここでは、デフォルトでも細かく切れているのでデフォルトで行なう。



8-55

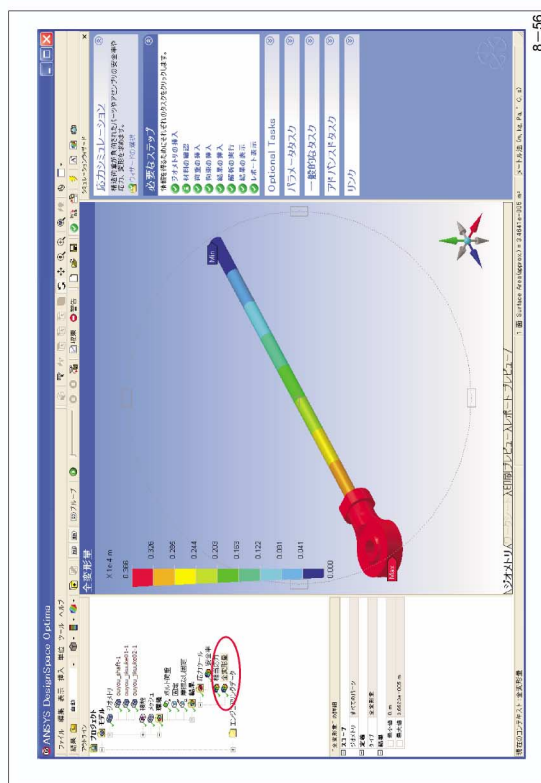
【ポイント】

手順7) 計算結果の定義

【解説】

ウィザード内での[結果の挿入]をピックアップすると設定する個所のメニューが吹き出しで示される。ここで、[応力ツール]→[最大相当応力]を挿入する。更に[安全率]を挿入する。その他には、[応力]→[相応応力]、[変形]→[全変形量]を挿入する((注): 選択出来ない時は、一度、ツリー上の[結果]をピックアップしてから挿入する)。

注) Ver7では[ツール]→[応力ツール]を選択することにより安全率も挿入される。



8-56

【ポイント】

手順8) パーツ間の接触面の定義

手順9) 計算の実行

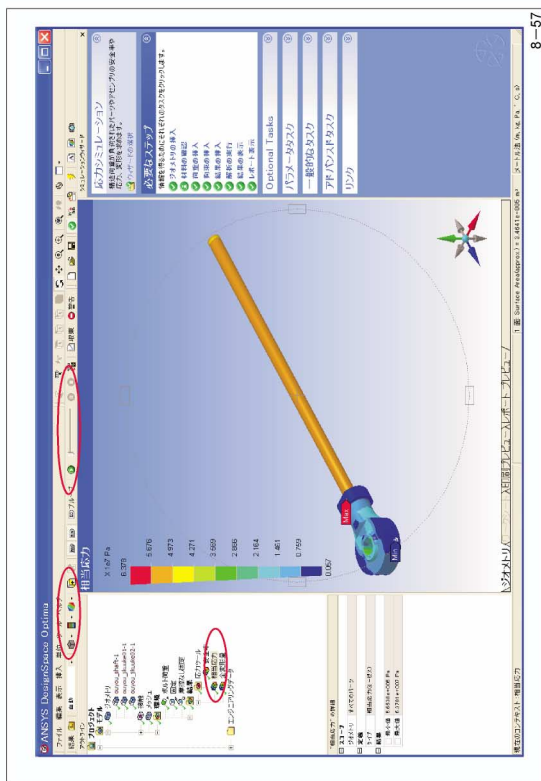
手順10) 計算結果の表示

【解説】

手順8) ツリー上の「接触」をピックアップし詳細設定画面でトールランスが0、ツリー上の「接触」の中の「接触領域」をピックアップし詳細設定画面でタイプが「ボンド」になっていることを確認する。ボンドとはパーツ間の接触面が固着しているイメージである。その他、すべり面や接触分離面のタイプもここで定義できるが、ここでは時間がかかるのでボンドのみとする。

手順9) ウィザード内での「解析の実行」をピックアップすると設定する個所のメニューが吹き出しで示される。ここでは、解析実行のためのカメラリ形のアイコンをクリックする。解析実行の画面が起動し実行プロセスの推移が示される。

手順10) 計算が終了したら、見たい解析結果のアイコンを選択する。たとえば、「結果」フォルダー内の「全変形量」をクリックして変形図をプロットする。



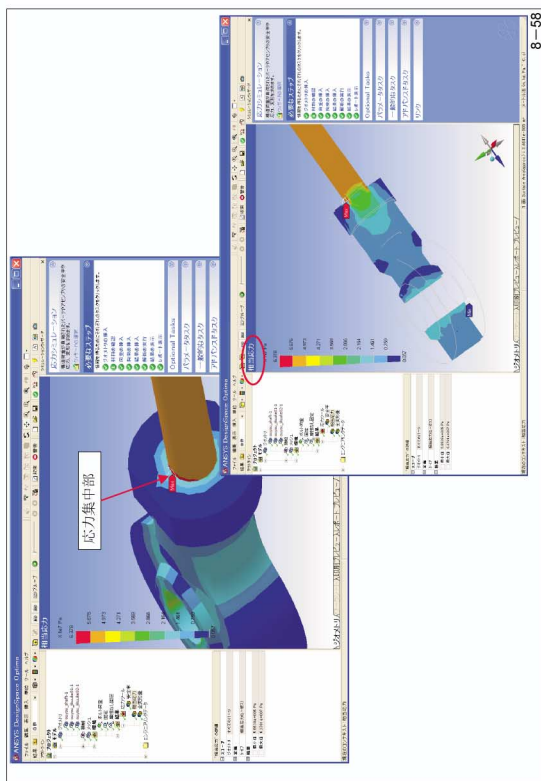
【ポイント】

アニメーション結果の表示

【解説】

同様に[結果]アオルダー内の[相当応力]をクリックして応力コンター図をプロットする。モデルの拡大、回転などを使って見やすい図とする。

中央上の緑の三角形アイコンで、アニメーション表示が可能である。停止するには右側の停止ボタンを押す。更に、左上アイコンで、変形倍率、スムーズコンター、メッシュ図表示などの表示オプションを変更できる。また、アニメーションさせながらモデルを移動、回転させることも可能である。



【ポイント】

断面結果の表示

【解説】

取り付け部を拡大してみると、角部に最大応力値 (約 6.4×10^7 Pa) が発生していることが分かる。今 shaft の直径が 5mm (断面積 19.6 mm^2) であるので shaft の平均引張応力は 5.1×10^7 Pa (= $1000 \text{ N} / 19.6 \text{ mm}^2$) となる。従って、コーナー部では shaft の平均軸応力の 1.3 倍程度の応力集中があることが分かる。

断面図は、ツリー上の[相当応力]を右クリックし[挿入]→[図]で、図を挿入後に詳細設定画面で断面を指定する(同時に複数断面可)。詳細画面で[断面の追加]ボックスをピックし、画面のモデル上で断面開始位置と終了位置をピックする。モデルを回転すれば断面が切れているはずである。注) Ver7 では左上の断面アイコンを選択して断面作成する。

その他、安全率結果なども同様に表示し、強度的な安全率が設計許容値内に収まっているかなどを確認する。