三次元形状モデルを用いたズーミング解析システムの開発*

西垣 一朗^{*1}, 横張 孝志^{*1}, 斉藤 直人^{*1}Development of a Zooming Analysis System
using 3-dimensional Geometric ModelIchiro NISHIGAKI^{*2}, Takashi YOKOHARI and Naoto SAITO^{*2} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
Kandatsu 502, Tsuchiura Ibaraki, 300-0013 Japan

This paper describes a zooming analysis system that uses a three-dimensional geometric model. A finite element analysis (FEA) using a zooming technique is needed for the estimation of stresses in a very small area. However, it takes a long time to make an FEA mesh model and set the analysis conditions of any part of the model. We have developed a technique that automatically creates the FEA mesh model and sets the analysis conditions of any part of the model. In this system, a user inputs a geometry and analysis conditions of the entire model as well as the geometry of any part of the model and carries out a whole-model analysis and a detailed analysis of the target part. Employing this zooming technique significantly reduces the analysis time.

Key Words: Finite Element Method, Computer Aided Engineering, Geometric Modeling, Automatic Mesh Generation, Computer Aided Design

1. 緒 言

高性能、高信頼性の電子機器の開発においては、非常に微小な部分の物理現象を解明するために高精度な解析技術が必要である。しかし、有限要素法解析を用いて注目する微小領域を含む全体の領域を解析する場合、メッシュ数が増大し解析時間を長大化させるという問題がある。また、注目する領域のみを解析領域とする場合には境界条件等の解析条件の設定が非常に難しくなる。さらに、製品設計での三次元CADモデルの普及により、複雑な三次元形状モデルを解析領域として用いることが多くなり、いっそう解析規模の増大を加速している。

そこで、著者らは全体解析の結果を用いて注目する部分の詳細な解析ができるズーミング解析法^{(1)~(3)}に三次元形状モデリング技術と自動メッシュ生成技術^{(4)~(6)}を適用し、形状モデル上で全体解析から注目する部分の詳細解析までを一貫して行えるズーミング解析システムを開発した。これにより、全体形状モデルを高密度な有限要素メッシュで一度に解析する通常の

有限要素法解析に比べ、解析規模を低減できる。さらに、従来解析規模が大きいため高精度な解析ができなかった問題に対しても、全体解析と部分解析に分けて行うことにより高精度解析が可能になる。

本研究の目的は、三次元形状モデルを用いて部分解析に必要な各種の解析条件を自動生成することにより、解析作業時間と解析計算時間を大幅に短縮することである。

本報では、解析領域を表す形状モデルの表現方法と、全体形状モデルの解析条件と解析結果を部分形状モデルの解析条件として自動継承させる方法について述べる。

2. システム構成と処理フロー

2・1 システム構成 ズーミング解析システムの全体のシステム構成を図1に示す。本システムは、解析対象の形状モデルと解析条件を入力するCAEモデル、有限要素解析で用いるメッシュと解析条件を自動生成する自動メッシュジェネレータ、有限要素法解析ソルバ、および解析結果を表示するポストプロセッサから構成される。この中で、使用者が直接対話的に操作するプログラムはCAEモデルとポストプロセッサであり、これ以外のプログラムはCAEモデルから起

* 原稿受付 1998年11月11日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所 (〒300-0013 土浦市神立町502)。

E-mail: nishi@merl.hitachi.co.jp

動され、自動的に処理される。また、これらのプログラムで取扱う形状データ、解析条件データ、有限要素メッシュデータ、および解析結果データは一組のモデルデータとして関連付けて、CAE データベースで一括管理する。

2・2 操作手順と処理フロー 本システムのズーム解析の処理手順について説明する。図2は全体解析の処理手順、図3は部分解析の処理手順である。全体解析は通常の有限要素法解析と同じ手順で行われる。まず、解析対象の形状モデル(以下、全体形状モデルと呼ぶ)と解析に必要な条件(材料、拘束、荷重条件等)を前述のCAE モデラを介して入力する。その後、自動メッシュジェネレータで形状モデルから有限要素メッシュを生成し、形状モデルに設定した解析条件を有限要素メッシュに継承させる。これを入力データとして解析ソルバを実行し、その結果をポストプロセッサで表示する。

一方、部分解析では使用者は精度良く計算したい領域の形状モデル(以下、部分形状モデルと呼ぶ)を作成するだけで解析が行える。通常、この部分形状モデル

はCAE モデラの形状モデリング機能を用いて全体形状モデルから切り出す方法で作成できる。部分形状モデルの有限要素メッシュを自動生成した後、部分形状モデルの解析条件については、次の二つの方法を用いて自動生成する。

(I) 全体形状モデルの解析条件を継承する。

(II) 全体解析の解析結果から境界条件を生成する。

これらの方法については、3章以降で詳しく説明する。

全体形状モデルから部分形状モデルへ解析条件を継承させたくない場合もある。例えば、全体形状モデルでは仮に一つの材料として解析し、部分解析では詳細に解析するために実際の複数の材料として解析する場合がある。このような場合には使用者はCAE モデラで部分形状モデルに対して新たに解析条件(材料条件)を優先的に設定できる。

通常は全体解析の結果を評価し、さらに詳細に解析したい部分形状モデルを作成するが、あらかじめ部分形状モデルが全体解析を行う前にわかっている場合には、全体解析から部分解析を一貫して自動的に処理することができる。この処理手順を図4に示す。図2、3、4の太線で囲まれた部分は自動処理である。

3. モデル表現方法

3・1 形状モデルの表現方法 本システムでは全体形状モデルと部分形状モデルの包含関係、および形状モデルと有限要素メッシュの包含関係を計算機内部に記述することにより、部分形状モデルの解析条件の

Fig. 1 Zooming analysis system

Fig. 2 Whole-model analysis process

Fig. 3 Part model analysis process

自動生成を実現している。まず、3・1節では三次元の解析領域を表現するための形状モデル(GM)を定義する。特に、有限要素法解析で用いる解析領域は、点、線、面、立体が混在する非多様体形状を表現する必要がある。そこで、この非多様体形状を零次元から三次元までの多様体(以下、形状要素と呼ぶ)である点(P)、線(L)、面(F)、立体(V)の集合として表現する。すなわち、非多様体形状を表す形状モデル(GM)は式(1)のように定義できる。

$$GM=(D, T) \dots\dots\dots (1)$$

$$D \subset E^3$$

$$T=\{P_i, L_j, F_k, V_m\}$$

D は解析領域が占める三次元ユークリッド空間(E^3)の部分集合(点集合)である。以下、 D を形状モデルの『領域』と呼ぶ。 T は解析領域を構成する点(P)、線(L)、面(F)、立体(V)等の形状要素の集合である。以下、 T を形状モデルの『位相』と呼ぶ。

形状モデルはこの『領域(D)』と『位相(T)』の組として表現する。

さらに、『位相』の元である形状要素は式(2)、式(3)を満足するように選択することにより、最少の形状要素から構成される『位相』が求まる。この『位相』を『基底』と呼ぶ。ソリッドモデルの表現方法の一つである境界表現(B-Reps)も『基底』を持つケースとして位置付けることができる。

$$D=\bigcup_i X_i, \quad \exists X_i \in T \dots\dots\dots (2)$$

$$\forall X \in T, \quad \forall Y \in T, \quad \exists Z_i \in T$$

$$\Rightarrow X \cap Y = \bigcup_i Z_i \dots\dots\dots (3)$$

式(2)は『位相』に含まれるいくつかの形状要素の和集合で『領域』を覆うことができることを表す。また、式(3)は『位相』に含まれる任意の形状要素の積集合は『位相』に含まれるいくつかの形状要素の和集合として表現できることを示している。すなわち、多様体と多様体が交差あるいは接合する領域はまた多様体となり、その多様体を『位相』の要素に加えるという意味でもある。特に、有限要素法解析では形状要素が接合する領域は解析上も重要であり、この領域を形状要素として表すことは、有限要素メッシュの自動生成の際にも有用である。

3・2 有限要素メッシュの表現方法 有限要素メッシュ(FM)も前述の形状モデルの一つとして式(4)のように表すことができる。

$$FM=(D, T') \dots\dots\dots (4)$$

$$D \subset E^3$$

$$T'=\{P_i, L_j, F_k, V'_m\}$$

形状モデルを有限要素メッシュに分割しても、形状モデルが表す解析領域は変わらないので、 D は形状モデルの『領域』と同じである。一方、形状要素の P_i 、 V'_m は有限要素の節点、要素に対応し、形状要素 L_j 、 F_k は有限要素の稜線、表面を表す。さらに、有限要素メッシュの『位相』は式(2)、式(3)を満たし『基底』を成している。

3・3 全体形状モデルと部分形状モデルの包含関係

全体形状モデル(GM)を式(1)で表し、部分形状モデル(gm)を式(5)で表す。

$$gm=(d, t) \dots\dots\dots (5)$$

$$d \subset E^3$$

$$t=\{p_i, l_j, f_k, v_m\}$$

部分形状モデルは全体形状モデルの一部であるから、 $d \subset D$ が成り立つ。また、部分形状モデルの『位相』は式(6)が成り立つように決定する。

$$\forall x \in t, \quad \exists X \in T, \quad x \subset X \dots\dots\dots (6)$$

部分形状モデルを全体形状モデルから切り出して作成した場合には、式(6)は必ず成り立つ。しかし、部

Fig. 4 Full automatic analysis process

分形状モデルを新たに作成して式(6)が成り立たない場合でも、部分形状モデルの形状要素を分割することにより、式(6)を満足することができる。この形状要素間の包含関係をすべて求め、全体形状モデルと部分形状モデルとの関係データとして、データベースに保持する。全体形状モデルの形状要素と部分形状モデルの形状要素との包含関係の例を図5に示す。

3・4 形状モデルと有限要素メッシュの包含関係

形状モデル(GM)を式(1)で表し、有限要素メッシュ(FM)を式(4)で表す。部分形状モデルの場合と同様に有限要素メッシュの『位相』は式(7)が成り立つように決定する。

$$\forall X' \in T', \exists X \in T, X' \subset X \dots\dots\dots (7)$$

有限要素メッシュは形状モデルを分割して生成するため、有限要素メッシュの形状要素は式(7)を満足している。この包含関係は形状モデルと有限要素メッシュの関係データとして、データベースに保持する。図6に全体形状モデルの形状要素と有限要素メッシュの形状要素との包含関係の例を示す。また、部分形状モデルに関しても同様にこの包含関係を記述できる。

3・5 解析条件の設定 全体形状モデルの解析条件(拘束, 荷重, 材料条件等)は形状モデルの形状要素に対して設定する。例えば, 拘束, 荷重等の境界条件は面, 線, 点に設定し, 材料条件は立体に設定する。逆に, 解析条件を設定すべきところに形状要素が存在しない場合には, 形状要素を追加する。その際, 追加

する形状要素が複数の形状要素と交差する場合は式(3)を満足するように追加する形状要素を分割する。

4. 解析条件の自動生成方法

4・1 解析条件の自動継承 4・1節では全体形状モデルに対して設定した解析条件を部分解析用の有限要素メッシュに継承させる方法について述べる。全体形状モデルの形状要素に対して付加されている解析条件を以下の手順に従って継承させる。

(1) 解析条件が付加されている全体形状モデルの形状要素を検索する。

(2) 全体形状モデルの形状要素と部分形状モデルの形状要素の包含関係データから, 検索した全体形状モデルの形状要素に含まれる部分形状モデルの形状要素を検索する。

(3) 部分形状モデルの形状要素と, 部分形状モデルの有限要素メッシュの形状要素との包含関係データから, 検索した部分形状モデルの形状要素に含まれる有限要素メッシュの形状要素を検索する。

(4) 検索された有限要素メッシュの形状要素に対して, 解析条件を継承させる。

図7を例に二次元の場合の全体形状モデルから部分形状モデルへの解析条件継承方法を具体的に説明する。

全体形状モデルの『位相(T)』と部分形状モデルの『位相(t)』は次のように表せる。

$$T = \{F_1, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$$

$$t = \{f_1, l_1, l_2, l_3, l_4, p_1, p_2, p_3, p_4\}$$

ここで, これらの包含関係は次のようになる。

$$f_1 \subset F_1, l_1 \subset L_5, l_2 \subset F_1, l_3 \subset F_1, l_4 \subset L_4$$

$$p_1 \subset P_5, p_2 \subset L_5, p_3 \subset F_1, p_4 \subset L_4$$

この場合, 全体形状モデルの線 L_4 に設定されている拘束条件が部分形状モデルの線 l_4 と点 p_4 に継承さ

Fig. 5 Inclusion relation of geometric models

Fig. 6 Inclusion relation of Geometry and Mesh

Fig. 7 Inheritance of analysis conditions

れる。また、全体形状モデルの面 F_1 は部分形状モデルの面 f_1 を含んでいるため、面 F_1 に設定した材料1が面 f_1 に継承される。形状モデルと有限要素メッシュの間でも同様に解析条件を継承することができる。

4・2 解析条件の自動生成 ズーミング解析では、部分形状モデルの境界面の中で全体形状モデルの内部に含まれる面(以下、ズーミング境界と呼ぶ)には全体解析の解析結果から境界条件を生成する必要がある。具体的には全体解析結果の変位データからズーミング境界の強制変位データを生成している。自動生成手順を以下に示す。

- (1) 全体形状モデルの中で立体の形状要素に含まれる部分形状モデルの面の形状要素を検索する。ここで検索された面がズーミング境界になる。
- (2) 検索された面に含まれる部分形状モデルの有限要素メッシュの点の形状要素(節点)を検索する。
- (3) 全体形状モデルの有限要素メッシュの中から、検索された節点を含む有限要素を探し出す。
- (4) 検索された有限要素と変位データから、形状関数を用いて検索された節点の変位を算出し強制変位条件とする。

図7の場合には、線 l_2 と線 l_3 が面 F_1 の内部に含まれるため、これらをズーミング境界として抽出でき

る。このように、ズーミング境界の抽出に形状要素の包含関係データを用いることにより、精度良く安定してズーミング境界を抽出できるようになった。また、本システムではズーミング境界上の節点を上記のようにあらかじめ選択できるので、部分形状モデルの節点と全体形状モデルの有限要素との包含を判定する処理回数が減る。これにより、ズーミング境界の境界条件作成時間を短縮することができる。

5. ズーミング解析の適用と効果

5・1 解析モデル 図8に解析形状、図9に解析条件を示す。

温度を変化させながら異なる材料(材料1と材料2)を積層していくプロセスの熱応力をズーミング解析と通常の解析で計算した。まず、20°Cで材料1を追加し、温度を120°Cまで上昇させ、材料2を追加した。その後、温度を20°Cまで下降させた。ここでは、評価点での解析精度が同等になる有限要素メッシュをそれぞれに用意して、ズーミング解析と通常の解析との解析規模と解析時間を比較した。解析に用いたメッシュを図10に示す。

5・2 解析結果と適用効果 表1にズーミング解析と通常の解析の解析規模と解析時間を示す。ここで

Fig. 8 Zooming analysis model

Fig. 9 Zooming analysis conditions

Table 1 Analysis time

	Common Analysis	Zooming Analysis
Whole Mesh	5852nodes 3541elements	1784nodes 934elements
Part Mesh		3735nodes 620elements
CPU Time	3384 s	987 s

Fig. 10 FEM mesh models

は、評価点近傍を十分細かくした有限要素メッシュを用いてあらかじめ応力値を算出し、この応力値に対して解析精度が5%以内になる有限要素メッシュをそれぞれ使用している。この結果から解析時間を約1/3に短縮できることを確認した。さらに、従来は手作業で行っていた部分解析の解析条件を求める処理を自動化することにより、解析作業時間を1/5程度に短縮できた。

また、ズーム解析を適用する際には、評価点の精度を低下させないために、以下の配慮が必要である。

(1) 評価点から十分離れた位置にズーム境界を設定する。

(2) ズーム境界部の有限要素の構成節点はズーム境界から大きく離れないように全体形状モデルの有限要素メッシュを作成する。ズーム境界付近の有限要素メッシュを細かくすることも必要である。

(3) 全体形状モデルの有限要素メッシュと部分形状モデルの有限要素メッシュとの要素の寸法比を大きくしないように、ズーム解析を段階的に繰返し行う。

6. 結 言

三次元形状モデルを用いたズーム解析システム

を開発し、以下の結論を得た。

(1) 部分解析の解析条件生成処理を自動化することにより、ズーム解析の操作性を向上させた。その結果、従来に比べ1/5程度に解析作業時間を短縮した。

(2) ズーム解析手法により1回の解析規模を低減し、解析時間を1/3に短縮した。

(3) ズーム解析における、評価点の解析精度を低下させないためのモデル作成の注意点を示した。

文 献

- (1) Hirai, I., Wang, B. and Pilkey, W.D., An Efficient Zooming Method for Finite Element Analysis, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **20** (1984), 1971-1978.
- (2) 畑直子・西垣一朗・横張孝志・岡本紀明・江澤良孝, 完全自動分割ルーチンを利用したズーム解析, 日本機械学会茨城講演会論文集, (1995-5), 55-56.
- (3) 西垣一朗・横張孝志・斎藤直人, 三次元形状モデリングをベースとしたズーム解析システム, 日本機械学会第10回計算力学講演会講演論文集, (1997-7), 423-424.
- (4) 高橋宏明・ほか4名, 形状認識を用いた三次元自動要素分割システムの開発, *機論*, **59**-560, A (1993), 279-285.
- (5) 滝澤千恵・ほか4名, 形状制御可能な六面体メッシュ自動生成システム, *機論*, **62**-603, A (1996), 28-34.
- (6) 横張孝志・ほか2名, FEMモデリングにおける六面体メッシュと四面体メッシュを混合する自動メッシング技術の開発, *機論*, **64**-623, A (1998), 47-52.