

# 目 次

## 第1章 有限要素法の基礎

1.1 有限要素法概説	2	1.4.1 変分原理とガラーキン法	10
1.2 マトリックス法による構造解析	3	1.4.2 境界値問題と各種変分原理	10
1.3 弱形式とリッツ-ガラーキン法	6	1.4.3 変位型有限要素法	11
1.4 変分原理と有限要素法	10	1.4.4 各種変分原理	11

## 第2章 数値計算

2.1 数値計算とその環境	16	2.3.1 固有値問題と有限要素法	32
2.1.1 有限要素法で用いられる数値計算手法	16	2.3.2 実対称固有値問題に関する重要な性質	32
2.1.2 数値計算環境	16	2.3.3 繰返し法による固有値解析法	33
2.2 連立一次方程式	23	2.3.4 相似変換を用いる固有値解析法	35
2.2.1 有限要素法と連立一次方程式	23	2.3.5 代数的固有値解析	38
2.2.2 直接法	23	2.4 補間と数値積分	39
2.2.3 反復法	26	2.4.1 補間と関数近似	39
2.2.4 共役こう配法	28	2.4.2 数値積分	41
2.3 固有値問題	32		

## 第3章 有限要素

3.1 序	44	3.6.1 記号	55
3.2 トラス	44	3.6.2 特徴	55
3.2.1 記号	44	3.6.3 ミンドリン-ライソナ平板理論	55
3.2.2 特徴	44	3.6.4 低減積分法と安定化マトリックス法	56
3.2.3 要素定式化	44	3.6.5 ひずみ仮定法 (assumed strain method)	57
3.2.4 例題	45	3.6.6 離散キルヒホッフ法	57
3.2.5 利用上の注意	45	3.6.7 混合法	58
3.3 ビーム	46	3.6.8 シェル要素	59
3.3.1 記号	46	3.7 配管要素	62
3.3.2 仮定	46	3.7.1 記号	62
3.3.3 要素定式化	46	3.7.2 要素定式化	62
3.3.4 利用上の注意	46	3.8 立体要素	64
3.4 二次元ソリッド要素	48	3.8.1 記号	64
3.4.1 記号	48	3.8.2 セレンディピティ族長方柱要素	64
3.4.2 要素定式化	48	3.8.3 ラグランジュ族長方柱要素	65
3.4.3 利用上の注意	51	3.8.4 4面体要素族	65
3.5 軸対称要素	53	3.8.5 3角柱要素	66
3.5.1 記号	53	3.9 アイソパラメトリック要素	67
3.5.2 要素定式化	53	3.9.1 記号	67
3.5.3 利用上の注意	54	3.9.2 全体座標系と局所座標系の変換	67
3.6 板曲げ・シェル要素	55	3.9.3 形状関数の1階微分の座標変換	67

## 第4章 動的応答

4.1 序	72	4.2 動的問題における有限要素法の定式化	72
-------	----	-----------------------	----

4.2.1	仮想仕事の原理	72	4.4.2	モード加速度法	88
4.2.2	質量マトリックス	72	4.4.3	ハンステーンらの方法	89
4.2.3	減衰マトリックス	75	4.4.4	馬萩原のモード重合法	90
4.3	直接時間積分法	76	4.4.5	誤差解析	91
4.3.1	時間領域の離散化	76	4.4.6	構造-流体連成振動における正規化および直交条件	93
4.3.2	運動方程式に対する各種直接時間積分法	77	4.5	モード重合法の応用	94
4.3.3	陽解法と陰解法	81	4.5.1	固有モード感度解析	94
4.3.4	直接時間積分法による解の安定性	84	4.5.2	部分構造合成法	96
4.3.5	直接時間積分法の精度と事後誤差評価	86	4.6	まとめ	99
4.4	モード重合法の理論	88			
4.4.1	モード変位法	88			

## 第5章 幾何学的非線形問題

5.1	幾何学的非線形性	102	5.3	有限要素マトリックスの誘導と数値例	110
5.1.1	有限変形問題	102	5.3.1	はり	110
5.1.2	構造安定問題	102	5.3.2	平面問題	112
5.2	増分理論と有限要素法の一般的定式化	103	5.3.3	平板・殻	114
5.2.1	増分解法	103	5.3.4	三次元体	117
5.2.2	応力とひずみの定義	103	5.4	増分解法における計算法	120
5.2.3	ラグランジュ法の定式化	105	5.4.1	増分反復法	120
5.2.4	更新ラグランジュ法の定式化	106	5.4.2	弧長増分法	121
5.2.5	ラグランジュ法と更新ラグランジュ法の得失	108	5.4.3	臨界点の処理	122
5.2.6	座屈問題の固有値解析	109	5.5	まとめ	124

## 第6章 材料非線形問題

6.1	材料非線形問題	126	6.3	実時間に依存する材料非線形問題	139
6.1.1	材料非線形問題の分類	126	6.3.1	時間依存変形挙動の特徴	139
6.1.2	基本的な定式化	126	6.3.2	線形粘弾性モデル	139
6.2	実時間に依存しない材料非線形問題	128	6.3.3	クリープ理論	141
6.2.1	弾塑性解析の基礎	128	6.3.4	粘塑性理論	143
6.2.2	移動硬化/複合硬化理論	131	6.3.5	有限要素法による取扱い その1-初期ひずみ型解法	145
6.2.3	内部時間理論	132	6.3.6	有限要素法による取扱い その2-接線剛性型解法	145
6.2.4	弾塑性大変形理論	133	6.3.7	高温構造の非弾性解析の実際	146
6.2.5	選択低減積分	135			
6.2.6	静水圧仮定混合法	136			
6.2.7	ひずみ仮定混合法	137			

## 第7章 接触問題

7.1	支配方程式	152	7.3	接触問題に対する有限要素定式化	155
7.2	変分形式	153	7.3.1	接触領域に対する有限要素モデル	155
7.2.1	変位型変分形式-仮想仕事の原理の拡張	153	7.3.2	二次元問題に対する接触要素	156
7.2.2	変位・応力型変分形式ヘリンガーライスナの原理の拡張	153	7.3.3	三次元問題に対する接触要素	157
7.2.3	接触問題の有限要素定式化のための代表的なはん関数	154			

## 第8章 破壊力学問題

8.1 応力拡大係数の解析	160	8.4.1 動的破壊力学の基礎事項	177
8.1.1 応力拡大係数とエネルギー解放率	160	8.4.2 動的破壊のシミュレーション形態	181
8.1.2 特異要素	161	8.4.3 動的停留き裂問題の解析法	182
8.1.3 有限要素法による $K$ 値の解析	162	8.4.4 動的伝ばき裂問題の解析法	182
8.1.4 影響関数法	163	8.4.5 動的 $J$ 積分の適用	187
8.2 $J$ 積分と COD	166	8.5 異材接合構造の解析	191
8.2.1 $J$ 積分と COD	166	8.5.1 接合端部, 界面き裂先端における応力特異性	191
8.2.2 ラインスプリングモデル	168	8.5.2 応力特異性の次数の評価	192
8.2.3 全面塑性解	171	8.5.3 応力拡大係数・応力分布の一般式	192
8.3 き裂進展解析	172	8.5.4 有限要素法, 境界要素法による異材接合構造の応力解析	193
8.3.1 疲労き裂進展のシミュレーション	172	8.5.5 破壊力学的手法による接合材・接合構造の強度評価	194
8.3.2 延性不安定破壊のシミュレーション	173		
8.4 動的き裂問題	177		

## 第9章 加工解析

9.1 序	198	9.6 押し出し・引抜き	214
9.2 各種加工法とその解析に適した有限要素法	199	9.6.1 押し出し・引抜き加工における検討対象	214
9.2.1 各種加工過程における材料の変形挙動	199	9.6.2 押し出し・引抜き解析における境界条件	214
9.2.2 剛(粘)塑性有限要素法	199	9.6.3 特異点の扱い	215
9.2.3 弾塑性有限要素法	200	9.6.4 型材の押し出しの解析	216
9.2.4 熱粘塑性有限要素法	201	9.6.5 温度解析	216
9.2.5 変形の局所化過程の解析	201	9.6.6 二層材の加工解析	216
9.2.6 不安定問題の解析	201	9.7 粉末成形	218
9.2.7 微視組織の成長の予知	202	9.7.1 はじめに	218
9.3 板材成形	203	9.7.2 有限要素解析	218
9.3.1 有限要素法に期待される役割	203	9.7.3 粉末の弾塑性構成式	221
9.3.2 定式	203	9.7.4 おわりに	222
9.3.3 成形不良の予測	204	9.8 高エネルギー成形加工	224
9.4 鍛造	206	9.8.1 はじめに	224
9.4.1 鍛造加工における FEM の概要	206	9.8.2 衝撃成形シミュレーション	224
9.4.2 有限要素法による剛粘塑性体の釣合い式	206	9.8.3 高エネルギー成形現象の解明	226
9.4.3 非圧縮性・ペナルティ法	206	9.8.4 おわりに	227
9.4.4 素材形状が製品形状および品質に及ぼす影響	207	9.9 高分子の射出成形およびブロー成形	229
9.4.5 材料割れ・延性破壊の予測	208	9.9.1 射出成形およびブロー成形について	229
9.5 圧延	210	9.9.2 射出成形解析の支配方程式	229
9.5.1 平面ひずみ圧延	210	9.9.3 ブロー成形解析の支配方程式	231
9.5.2 板材圧延	210	9.9.4 シミュレーションでの留意点	231
9.5.3 孔型圧延	211	9.10 溶接	233
9.5.4 ロールの弾性変形	211	9.10.1 はじめに	233
9.5.5 温度分布	212	9.10.2 連成を考慮した基礎式	233
9.5.6 エキスパートシステム	213	9.10.3 溶接過程の解析例	234

## 第10章 複合材料

10.1 複合材料の分類	238	10.2.2 縮約弾性係数	240
10.1.1 複合材料の定義	238	10.3 二次元異方性理論	242
10.1.2 複合材料の分類	238	10.3.1 平面応力および平面ひずみ	242
10.2 異方性理論	239	10.3.2 材料方向性	242
10.2.1 異方性体の応力-ひずみ関係	239	10.4 特性値算出法	244

10.4.1 複合則	244	10.6.1 運動方程式と固有値問題	251
10.4.2 網目理論	247	10.6.2 異方性体の振動解析	251
10.4.3 積層理論	247	10.7 複合材料の強度評価	252
10.5 熱応力解析	250	10.7.1 最大応力説	252
10.5.1 熱応力問題	250	10.7.2 最大ひずみ説	252
10.6 振動解析	251	10.7.3 その他代表的な破壊則	252

## 第11章 構造最適設計

11.1 構造最適設計概説	256	11.3.4 トンネリングアルゴリズム	272
11.1.1 構造最適設計の考え方	256	11.4 再解析と感度解析	275
11.1.2 構造最適設計の歴史と新しい動向	257	11.4.1 構造再解析法	275
11.2 数理的最適化手法	260	11.4.2 静的問題の設計感度解析	276
11.2.1 経験的手法	260	11.4.3 動的問題	278
11.2.2 線形計画法	261	11.4.4 近似法	279
11.2.3 非線形計画法	263	11.5 最適設計例	282
11.2.4 最適性規準法	265	11.5.1 構造形態の最適設計例	282
11.3 発見的最適化手法	266	11.5.2 材料組織の最適設計例	285
11.3.1 GA法	266	11.6 はん用プログラムシステム	290
11.3.2 ニューラルネットワーク	269	11.6.1 はん用プログラムシステムの構成	290
11.3.3 シミュレーテッドアニーリング法	272	11.6.2 開発の歴史と現状	291

## 第12章 電子デバイス・電子機器設計への計算力学の応用

12.1 単結晶育成とシミュレーション	294	12.3 表面実装部品設計におけるシミュレーション技術	308
12.1.1 単結晶育成法概要とそのシミュレーションの意義	294	12.3.1 半導体パッケージ	308
12.1.2 融液の熱流動シミュレーション	294	12.3.2 はんだ継手の熱弾塑性クリープ解析	312
12.1.3 単結晶体の伝熱シミュレーション	296	12.4 電子機器設計におけるシミュレーション技術	318
12.1.4 単結晶体の熱応力シミュレーション	297	12.4.1 機構部品の解析	318
12.2 LSI設計のシミュレーション	300	12.5 電子機器の熱解析	324
12.2.1 回路設計	300	12.5.1 熱設計の分割	324
12.2.2 デバイス設計	302	12.5.2 半導体パッケージ	324
12.2.3 プロセス設計	305	12.5.3 ノートパソコンの熱設計	326

## 第13章 プリ・ポストプロセッサ

13.1 CADとプリプロセッシング	330	13.3 事後誤差評価	351
13.1.1 有限要素解析と設計	330	13.3.1 有限要素解の誤差	351
13.1.2 形状モデリング手法	330	13.3.2 ツィエンキーヴィッツズーの事後誤差評価法	352
13.1.3 B-Repモデルの概要	332	13.3.3 大坪-北村の事後誤差評価法	353
13.1.4 曲線・曲面の表現法	333	13.4 アダプティブリメッシング	356
13.1.5 幾何形状データの伝達	334	13.4.1 有限要素の精度とメッシュ	356
13.1.6 市販CAEソフトウェアの調査	336	13.4.2 r-法, h-法, p-法によるリメッシュ	357
13.2 メッシュ生成法	341	13.4.3 事後誤差評価に基づいたリメッシュ-アダプティブ(1)	358
13.2.1 半自動メッシュ生成法	341	13.4.4 事後誤差評価に基づいたリメッシュ-アダプティブ(2)	360
13.2.2 デラウニー(ドロネ)法	343	13.4.5 特異性が存在する問題におけるアダプティブリメッシング	363
13.2.3 局所変換法	344	13.5 ポストプロセッシング	365
13.2.4 (修正)四分木・八分木法	344	13.5.1 有限要素法のポストプロセッシング	365
13.2.5 フロント法(アドバンシングフロント法)	346		
13.2.6 四角形メッシュ生成法	347		
13.2.7 六面体自動メッシュ生成法	349		

13.5.2 解析結果の可視化 .....	365	13.6 統合解析システム .....	369
13.5.3 解析結果の設計へのフィードバック .....	367		
13.5.4 トラッキング, ステアリング .....	368		

## 第14章 先端技術の有限要素法への応用

14.1 パラレルコンピューティング .....	372	14.5.4 逆問題解析への応用 .....	394
14.1.1 序 .....	372	14.5.5 まとめ .....	395
14.1.2 パラレルコンピュータの種類 .....	372	14.6 創発的アルゴリズム .....	396
14.1.3 粒度と並列化効率 .....	372	14.6.1 序 .....	396
14.1.4 剛性方程式の解法の並列化 .....	373	14.6.2 遺伝的アルゴリズム .....	396
14.1.5 領域分割法 .....	374	14.6.3 セラオートマトン法 .....	397
14.1.6 まとめ .....	375	14.6.4 その他の手法 .....	399
14.2 メッシュレス法, グリッドレス法 .....	377	14.6.5 まとめ .....	399
14.2.1 序 .....	377	14.7 逆問題 .....	400
14.2.2 エlementフリーガラーキン法 .....	377	14.7.1 序 .....	400
14.2.3 フリーメッシュ法 .....	379	14.7.2 逆問題の分類 .....	400
14.2.4 まとめ .....	380	14.7.3 逆問題解析に必要な情報 .....	401
14.3 エキスパートシステム .....	381	14.7.4 逆問題解析の性質: 不適切性 .....	401
14.3.1 序 .....	381	14.7.5 逆問題解析手法 .....	401
14.3.2 エキスパートシステムの基本構成 .....	381	14.7.6 まとめ .....	403
14.3.3 エキスパートシステムの主要概念 .....	382	14.8 オブジェクト指向法 .....	404
14.3.4 エキスパートシステムの分類 .....	385	14.8.1 序 .....	404
14.3.5 構造力学的問題へのエキスパートシステムの適用 .....	385	14.8.2 用語と原理 .....	404
14.3.6 まとめ .....	386	14.8.3 オブジェクト指向システム .....	405
14.4 ファジィ推論 .....	387	14.8.4 有限要素法への応用例 .....	406
14.4.1 序 .....	387	14.8.5 まとめ .....	408
14.4.2 プリプロセッサ部への応用 .....	387	14.9 ハイパメディア・仮想現実感・仮想設計 .....	410
14.4.3 メインプロセッサ部への応用 .....	389	14.9.1 序 .....	410
14.4.4 ポストプロセッサ部への応用 .....	390	14.9.2 ハイパメディアの進歩 .....	410
14.4.5 まとめ .....	391	14.9.3 ハイパメディアと工学設計 .....	411
14.5 ニューラルネットワーク .....	392	14.9.4 情報通信ネットワーク技術 .....	411
14.5.1 序 .....	392	14.9.5 仮想現実感技術 .....	411
14.5.2 ニューラルネットワークとは .....	392	14.9.6 ハイパメディアと仮想設計 .....	412
14.5.3 順問題解析への応用 .....	392	14.9.7 まとめ .....	413