

目次

第1編 基礎編

1	有限要素法	2
	まえがき	[手塚 明] … 2
1.1	X-FEM (拡張有限要素法)	[長嶋利夫] … 2
1.1.1	X-FEM の概念	3
1.1.2	レベルセット法	4
1.1.3	エンリッチ関数を含む内挿関数	4
1.1.4	数値解析例	7
1.2	重合メッシュ法	[鈴木克幸] … 11
1.2.1	重合メッシュ法とは	11
1.2.2	重合メッシュ法の理論	12
1.2.3	解析例	13
1.3	ボクセル解析法	[鈴木克幸] … 16
1.3.1	ボクセルモデリング	16
1.3.2	ボクセル解析法と有限被覆法	18
1.3.3	ボクセルモデルによる大変形解析	20
1.3.4	ボクセルを用いた浸透流解析	21
1.3.5	現物ベースの解析法	21
1.4	アダプティブ有限要素法	[手塚 明] … 23
1.4.1	アダプティブ有限要素法の概論	23
1.4.2	ノルム, 標準誤差評価式とアダプティブ有限要素法	25
1.4.3	アダプティブ有限要素法のアルゴリズム	26
1.4.4	アダプティブ有限要素法の問題点	31
2	CIP 法	[青木尊之] 34
	まえがき	34
2.1	CIP 法の基本形	34
2.2	多次元への拡張	36
2.3	有限関数 CIP 法	38
2.4	保存形 CIP 法	39
2.5	界面追跡のための識別関数法	40
2.5.1	識別関数法による移動境界の計算	40
2.5.2	レベルセット法	41
2.5.3	CIP デジタイザー法	41
2.6	CCUP 法	42
2.7	局所補間微分オペレータ法	42
2.7.1	Runge-Kutta 法による時間積分	43
2.7.2	多次元化	44
2.8	IDO 法による拡散方程式の解法	44
2.9	IDO 法による Poisson 方程式の解法	45
2.10	IDO 法による非圧縮性流体の計算	46
2.11	速度と圧力の安定化カップリング	47
2.12	保存形 IDO 法	48
2.12.1	質量保存方程式	48
2.12.2	波動方程式	49
2.12.3	Euler 方程式	50

3 境界要素法 [松本敏郎] 51

まえがき	51
3.1 二重相反法の応用	52
3.1.1 基礎式	52
3.1.2 非均質媒体の解析法	54
3.1.3 radial basis function (RBF)	54
3.1.4 非均質媒体の解析例	56
3.1.5 温度依存性材料の定常熱伝導問題	57
3.1.6 非定常熱伝導問題への適用	59
3.1.7 温度依存性材料定数を有する媒体の熱弾性問題	62
3.2 局所境界積分方程式に基づくメッシュレス法	66
3.3 高速多重極展開境界要素法	69

4 メッシュレス法 / 粒子法 73

まえがき	[酒井 譲] 73
4.1 エレメントフリー Galerkin 法 (EFGM)	[萩原世也] 74
4.1.1 移動最小2乗法 (MLSM)	74
4.1.2 EFGM の形状関数 (近似関数) の性質	75
4.1.3 平衡方程式の弱形式表示と離散化された平衡方程式	76
4.1.4 変位と節点値のリカバー	77
4.1.5 ひずみと応力	77
4.1.6 領域積分 (バックグラウンドセル)	77
4.1.7 Dirichlet 型境界条件 (変位境界条件) の処理	78
4.1.8 弾塑性 EFGM 解析例	79
4.2 フリーメッシュ法—節点処理型有限要素法	[松原 仁] 80
4.2.1 基本と特徴	80
4.2.2 局所要素生成手法	81
4.2.3 高精度化手法	82
4.2.4 コンクリートの破壊解析への適用	85
4.2.5 フレッシュコンクリートの流動解析への適用	86
4.2.6 き裂進展解析への適用	87
4.2.7 音響解析への適用	88
4.3 SPH 法	[酒井 譲] 90
4.3.1 SPH 法の理論	90
4.3.2 SPH 法による弾性解析	92
4.3.3 弾塑性解析	94
4.3.4 圧縮性流体解析	95
4.3.5 非圧縮粘性解析 (SMAC-SPH 法)	96
4.3.6 SPH 法の展開	98
4.4 MPS 法	[越塚誠一] 98
4.4.1 離散化の考え方	98
4.4.2 流体力学解析	99
4.4.3 固体力学解析	101

5 電子・原子・転位シミュレーション 105

まえがき	[澁谷陽二] 105
5.1 第一原理計算	[尾方成信] 106
5.1.1 第一原理分子動力学法	106
5.1.2 第一原理計算に基づく材料の理想強度の	評価 110
5.2 分子動力学法	[中谷彰宏] 117
5.2.1 基礎理論	117
5.2.2 運動方程式と初期条件, 境界条件	118
5.2.3 力場とポテンシャル	123
5.2.4 運動方程式の数値解法	123
5.2.5 ポストプロセス	128
5.3 転位動力学法	[高橋昭如] 129
5.3.1 転位の表記法	130
5.3.2 2次元転位動力学法	130
5.3.3 3次元転位動力学法	132

6 創発的手法 137

まえがき	[吉村 忍] 137
6.1 遺伝的アルゴリズム	[三木光範] 137

6.1.1 基礎	137	6.1.3 手法	147
6.1.2 操作	139	6.1.4 応用	153
6.2 ニューラルネットワーク	[古川知成] … 155		
6.2.1 ニューロンの情報伝達メカニズム	155	6.2.4 ニューラルネットワークの実行	160
6.2.2 ニューロンのモデル化	156	6.2.5 計算力学への応用例	162
6.2.3 ネットワークトポロジー	156		
6.3 セルオートマトン法	[森下 信] … 164		
6.3.1 概要	164	6.3.3 2次元セルオートマトンとその周辺	166
6.3.2 1次元セルオートマトン	165	6.3.4 いくつかの応用例	170
6.4 格子 Boltzmann 法	[松隈洋介] … 174		
6.4.1 背景	174	6.4.5 境界条件	177
6.4.2 格子 Boltzmann 法の基礎モデル	174	6.4.6 乱流モデル	179
6.4.3 平衡分布関数	175	6.4.7 熱流体モデル	179
6.4.4 巨視的方程式の導出	176		
6.5 マルチエージェント法	[吉村 忍] … 180		
6.5.1 知的情報処理とマルチエージェント法	180	6.5.5 マルチエージェント法のシミュレーションツール	183
6.5.2 エージェントの定義と設計	181	6.5.6 マルチエージェント法のシミュレーションの利用法	183
6.5.3 環境の設計	182	6.5.7 適用事例	184
6.5.4 マルチエージェント法	182	6.5.8 信頼できるマルチエージェント・シミュレーションを実現するために	184
6.5.5 マルチエージェント法のシミュレーション			

7 大規模並列計算手法 [塩谷隆二] 186

まえがき	186		
7.1 並列効率	186		
7.1.1 スピードアップ	186	7.1.3 負荷均衡	188
7.1.2 粒度	187	7.1.4 通信時間, 同期待ち	188
7.2 並列計算機	188		
7.2.1 ベクトル計算機	189	7.2.3 グリッド, ネットワークコンピューティング	190
7.2.2 スカラー型並列計算機	189		
7.3 並列プログラミング	190		
7.4 並列数値解析手法	191		
7.4.1 直接法	191	7.4.3 領域分割法	192
7.4.2 反復法	191		
7.5 バランシング領域分割法	193		
7.5.1 領域分割法の基礎理論と前処理	193	7.5.5 階層型バランシング領域分割法	195
7.5.2 バランシング領域分割法	194	7.5.6 階層型領域分割法の高速化	196
7.5.3 3次元構造問題への適用	195	7.5.7 バランシング領域分割法の並列化	196
7.5.4 非正則問題に対する解法	195	7.5.8 コースマトリックスの並列作成	196
7.6 数値解析例	197		
7.6.1 3500万自由度 ABWR 原子炉圧力容器モデルの解析	197	7.6.2 1億自由度圧力容器モデルの解析	198

8 CAD・プレプロセッシング [山田知典] 200

まえがき	200		
8.1 CAD	201		
8.1.1 CAD の概要	201	8.1.2 幾何データの表現手法	203
8.1.2 境界表現 (B-Rep) による形状モデリング			

8.1.4 CAD データの変換	205	8.1.5 市販 CAD と CAD カーネル	206
8.2 プレプロセッシング	207		
8.2.1 プレプロセスの概要	207	8.2.4 並列環境における要素生成手法	214
8.2.2 メッシュ生成法	208	8.2.5 境界条件の付与と CAD モデル	215
8.2.3 要素形状改善手法	213	8.2.6 新しい解析モデル作成手法	215

9 CG・可視化 217

まえがき	[鈴木克幸] … 217
9.1 固体系における CG, 可視化	[鈴木克幸] … 217
9.1.1 可視化	217
9.1.2 可視化と CG	218
9.1.3 CG における力学シミュレーション	218
9.2 流体系における CG, 可視化	[白山 晋] … 220
9.2.1 可視化の概要	220
9.2.2 可視化の現状	220
9.2.3 可視化プロセス	221
9.2.4 データの加工と近傍場の決定 (何を見るのか)	221
9.2.5 可視化操作 (どのように見るのか)	222
9.2.6 可視化環境の多様化 (どこで見るのか)	228
9.2.7 可視化研究の最前線	229
9.2.8 ROI と LOD	229
9.2.9 計算プロセスとの統合	230
9.2.10 CG との融合	231

第2編 応用編

10 材料強度・構造解析 234

まえがき	[宮崎則幸] … 234
10.1 高分子材料の応答評価	[富田佳宏・陸 偉] … 234
10.1.1 ゴム材の構成式	235
10.1.2 ガラス状ポリマー材の構成式	238
10.1.3 ガラス状ポリマー材の構成式の一般化	239
10.1.4 結晶性ポリマー材の結晶相の構成式	239
10.1.5 高分子材料の各種変形挙動の数値解析	240
10.2 単結晶材料の強度	[宮崎則幸] … 244
10.2.1 単結晶育成プロセスにおける熱応力解析	245
10.2.2 単結晶育成プロセスの転位密度評価	
10.2.3 単結晶の熱応力起因割れの評価	250
10.3 座 屈	[山田聖志] … 252
10.3.1 各種座屈解析法	252
10.3.2 座屈実現象の数値シミュレーション	253
10.3.3 有限要素法による減少剛性座屈解析	256
10.4 塑性加工	[只野裕一] … 261
10.4.1 塑性加工における計算力学	261
10.4.2 塑性加工解析に用いられる有限要素法	261
10.4.3 数値解析のための材料モデリング	264
10.4.4 塑性不安定現象	267
10.4.5 成形限界解析	267
10.4.6 各種の実問題への適用例	268

11 破壊力学解析 271

まえがき	[池田 徹] … 271
11.1 破壊力学パラメータの解析法	[岡田 裕] … 271
11.1.1 線形破壊力学 (応力拡大係数とエネルギー解放率)	272
11.1.2 線形破壊力学における破壊力学パラメータの計算法	273

11.1.3 3次元問題や混合モード問題への拡張 276	ラメータの計算法 280
11.1.4 非線形破壊力学問題における破壊力学パ	11.1.5 その他 (Barsoum の特異要素) 281
11.2 界面破壊力学 [池田 徹] ... 282	11.1.6 最近の動向 281
11.2.1 等方性異種材界面き裂の応力拡大係数 283	286
11.2.2 等方性異種材界面き裂の応力拡大係数の 解析方法 284	11.2.4 異方性異種材界面き裂の応力拡大係数の 解析方法 287
11.2.3 異方性異種材界面き裂の応力拡大係数	11.2.5 解析精度の検証例 288
11.3 動的破壊力学 [西岡俊久] ... 292	
11.3.1 動的破壊力学の基礎事項 292	11.3.3 破壊のシミュレーション形態 296
11.3.2 Delaunay 自動要素分割に基礎をおく移 動有限要素法 295	11.3.4 破壊経路予測手法 296
11.4 確率論的破壊力学 [柴田勝之] ... 303	11.3.5 破壊の数値シミュレーション例 297
11.4.1 破損確率解析 304	11.4.5 構造安全性規制への確率論的破壊力学の 利用 317
11.4.2 解析パラメータの確率モデル 307	11.4.6 研究開発動向 318
11.4.3 破壊クライテリアと破壊評価法 312	
11.4.4 PFM 解析コード 315	

12 熱・流体解析

322

まえがき..... [江口 譲] ... 322	
12.1 マルチスケール LES 解析 [江口 譲] ... 323	
12.1.1 乱流の物理的特徴 323	12.1.3 マルチスケール LES モデル 328
12.1.2 従来型 LES モデル 326	12.1.4 今後の課題 334
12.2 反応燃焼流体解析 [店橋 護] ... 334	
12.2.1 支配方程式 334	12.2.3 層流火災の数値解析 336
12.2.2 化学反応機構, 熱化学定数および輸送係 数 335	12.2.4 乱流燃焼の数値解析 336
12.3 環境流体解析 [花崎秀史] ... 341	
12.3.1 環境流体と成層流体 341	12.3.4 静力学近似 345
12.3.2 成層流体の数値計算と Boussinesq 近似 342	12.3.5 重力波抵抗 347
12.3.3 非弾性近似 345	12.3.6 非静力学モデル 348
12.4 熱工学における分子シミュレーション [丸山茂夫] ... 348	
12.4.1 分子シミュレーション手法 348	12.4.4 核生成 351
12.4.2 熱工学における分子動力学法 349	12.4.5 ナノスケール物質の熱伝導と界面熱抵抗 354
12.4.3 相界面 349	

13 電磁界解析

[藤原耕二] 359

まえがき..... 359	
13.1 有限要素法による定式化 359	
13.1.1 支配方程式 359	13.1.3 残差方程式 362
13.1.2 補間関数—辺要素と節点要素 361	
13.2 電流項の取扱法 363	
13.2.1 励磁電流項 363	13.2.2 渦電流項 365
13.3 磁性材料の非線形磁気特性の考慮法 365	
13.3.1 直線探索を導入した Newton-Raphson 法 365	13.3.2 磁気特性近似上の留意点 369

13.4 ICCG 法による連立 1 次方程式の解法	371
13.4.1 シフトパラメータを導入した不完全 Cholesky 分解	371
13.4.2 Newton-Raphson 法と ICCG 法の収束特性を利用した非線形反復計算の高速化	372

14 相変化・相変態解析 376

まえがき	[高木敏行] 376
14.1 フェーズフィールド法による相変化解析	[高木知弘] 376
14.1.1 フェーズフィールド法の手順	377
14.1.2 融液の凝固モデル	379
14.1.3 2 次合金の等温凝固モデル	383
14.1.4 多結晶凝固モデル	385
14.1.5 量子ドットの自己組織化成長モデル	386
14.2 形状記憶合金の相変態に伴う変形解析	[羅 雲・高木敏行] 389
14.2.1 形状記憶合金の歴史と応用	389
14.2.2 相変態の構成モデル	390
14.2.3 変形解析	390
14.3 相変態・熱・力学連成解析	[井上達雄] 395
14.3.1 変態・熱・力学	395
14.3.2 連続体熱力学と支配方程式	395
14.3.3 CAE ソフトの構築と解析に用いるデー	399
14.3.4 シミュレーション結果の例	401

15 波動・振動・衝撃解析 407

まえがき	[萩原一郎] 407
15.1 地震解析	[堀 宗朗] 408
15.1.1 地震と波動伝播の基礎理論	408
15.1.2 波動方程式の数値解析の基礎	410
15.1.3 地震問題の数値解析	413
15.2 津波解析	[今村文彦・越村俊一] 417
15.2.1 津波シミュレーションの歴史—発生から伝播・遡上まで	417
15.2.2 地震以外の原因による津波のシミュレーション—さまざまな発生機構の解明	419
15.2.3 数値シミュレーションの利用—何に役立てられるか?	421
15.2.4 津波災害のシミュレーションに向けて	422
15.3 スポーツ用具における衝撃解析	[宇治橋貞幸] 424
15.3.1 ゴルフにおける計算力学的手法の適用	424
15.3.2 テニスにおける計算力学的手法の適用	428
15.3.3 野球における計算力学的手法の適用	429
15.3.4 シューズにおける計算力学的手法の適用	429
15.3.5 ヘルメットにおける計算力学的手法の適用	430
15.3.6 人体モデルの構築とその利用	432
15.4 自動車衝突解析	[萩原一郎] 433
15.4.1 衝突解析技術の変遷	434
15.4.2 シェル有限要素法による衝突解析の適用例	437
15.4.3 衝突に関する数値解析の今後の課題	441
15.4.4 まとめ	442
15.5 高速衝撃解析	[片山雅英] 443
15.5.1 ハイドロコードの由来と系譜	443
15.5.2 衝撃解析コードの定式化法	445
15.5.3 相互作用計算法	449
15.5.4 その他の計算手法	453
15.5.5 衝撃解析の材料モデル	454
15.5.6 高速衝撃解析の事例および注意事項	457

16 ナノ構造体・電子デバイス・マルチスケール解析 461

まえがき	[澁谷忠弘] 461
16.1 ナノ構造体	[平方寛之] 461

16.1.1 ナノ構造体の特徴	462	467
16.1.2 ナノ構造体の強度解析	463	16.1.4 原子シミュレーション
16.1.3 結合力モデルによる破壊のモデル化		467
16.2 電子デバイス		[澁谷忠弘] … 469
16.2.1 電子デバイスと CAE	469	16.2.4 LSI 配線内の原子輸送現象の解析
16.2.2 はんだ接合部のシミュレーション	470	474
16.2.3 異種材接合界面強度評価シミュレーション	473	16.2.5 信頼性設計のためのシミュレーション技術
		475
		16.2.6 今後の CAE の課題
		475
16.3 マルチスケール解析		[寺田賢二郎] … 477
16.3.1 均質化法に基づくマルチスケールモデリング	477	と局所化
		480
16.3.2 マルチスケール材料解析における均質化		16.3.3 マクロ材料挙動とマイクロ応答の評価例
		484

17 連成問題

492

まえがき		[堀江知義] … 492
17.1 流体・構造連成		[久田俊明] … 492
17.1.1 ALF 法に基づく連成解析	493	17.1.5 空間時間有限要素法
17.1.2 IBM	495	499
17.1.3 IFEM	497	17.1.6 粒子法
17.1.4 fictitious domain method	498	500
		17.1.7 連成法方程式の解法
		500
17.2 電磁・構造連成		[堀江知義] … 502
17.2.1 概要	502	504
17.2.2 磁気剛性と磁気減衰	502	17.2.4 連成解析手法と今後の課題
17.2.3 種々の電磁・構造連成問題と解析例		507
17.3 電磁熱流体連成		[柿本浩一] … 510
17.3.1 総合伝熱解析モデル	511	17.3.2 Czochralski 法の計算結果の例
		512
17.4 熱流体連成		[白崎 実] … 517
17.4.1 流体と固体との熱的な現象	517	17.4.3 強連成手法
17.4.2 連成手法	518	519
		17.4.4 連成手法と並列化アルゴリズム
		520

18 生体力学

522

まえがき		[安達泰治] … 522
18.1 固体力学関連		[安達泰治] … 522
18.1.1 骨の力学解析と臨床バイオメカニクスへの応用	523	バイオメカニクス
		526
18.1.2 骨の形態形成と適応リモデリングの計算		18.1.3 人工関節ステムと骨再生用スcaffolds
		設計への応用
		532
18.2 流体力学関連		[姫野龍太郎] … 538
18.2.1 生物外部流シミュレーション	539	18.2.3 呼吸に関連した流れのシミュレーション
18.2.2 血流シミュレーション	539	546

19 接触・界面

548

まえがき		[池田 徹] … 548
19.1 タイヤの接地解析		[中島幸雄] … 548
19.1.1 ドライ路面のタイヤ接地解析	549	19.1.4 雪の路面のタイヤ接地解析
19.1.2 氷の路面のタイヤ接地解析と活用	551	554
19.1.3 水で覆われた路面のタイヤ接地解析	552	19.1.5 土の路面のタイヤ接地解析
		556
		19.1.6 今後の課題
		558
19.2 異材接合界面端部の応力特異場		[古口日出男] … 559

19.2.1 2次元異材接合体端部の応力特異場 559	562	19.2.3 中間層を有する3次元接合体界面端部角 部の応力特異場 568
19.2.2 3次元異材接合体界面端部の応力特異場		
19.3 接合・破壊における界面のモデル化……………	[村川英一] … 570	
19.3.1 界面要素の概要と界面ポテンシャル 570	19.3.6 異材接合界面での破壊 575	
19.3.2 モードI, II複合型の界面要素 571	19.3.7 相似則 575	
19.3.3 平衡方程式の導出 572	19.3.8 単純モデルを用いた破壊モードと相似則 の説明 576	
19.3.4 界面要素の剛性行列 572	19.3.9 動的破壊への応用 577	
19.3.5 界面特性を定めるパラメータ 573		
19.4 接着継手の界面強度……………	[池田 徹] … 578	
19.4.1 接着継手の機械的強度試験 579	582	
19.4.2 破壊力学を用いた接着強度試験 579	19.4.5 接着剤層中のき裂先端近傍のダメージ ゾーンの観察 584	
19.4.3 応力拡大係数に及ぼす接着剤層厚さの影 響 581	19.4.6 有限要素法による損傷解析 585	
19.4.4 破壊靱性に及ぼす接着剤層厚さの影響		
19.5 複合材料の界面強度……………	[田中 拓] … 588	
19.5.1 複合材料の特徴 588	19.5.4 界面要素 596	
19.5.2 複合材料の界面 588	19.5.5 不均質構造を考慮した高効率解析手法 596	
19.5.3 複合材料積層板の層間応力と層間剥離 593		

20 逆問題

600

まえがき……………	[天谷賢治] … 600
20.1 き裂および欠陥の検知……………	[久保司郎] … 602
20.1.1 逆問題と逆問題解析 602	20.1.4 渦電流探傷および電場計測による欠陥形 状の定量評価 608
20.1.2 能動型電気ポテンシャルCT法によるき 裂の同定 603	20.1.5 動特性あるいは熱的応答を用いた欠陥同 定 609
20.1.3 受動型電気ポテンシャルCT法によるき 裂の同定 606	20.1.6 波動応答を用いた欠陥同定 609
20.2 腐食防食問題の逆解析……………	[天谷賢治] … 611
20.2.1 境界要素法による解析方法 611	615
20.2.2 腐食速度の逆問題解析 612	20.2.5 鉄筋コンクリート腐食同定のための多段 階GAの適用 618
20.2.3 カソード防食の最適化 614	
20.2.4 迷走電流腐食における腐食速度の推定	

21 最適化

[畔上秀幸] 619

まえがき……………	619
21.1 パラメトリック最適化問題……………	619
21.1.1 感度解析 620	21.1.2 最適化法 621
21.2 形状最適化……………	624
21.2.1 形状最適化問題の定式化 624	21.2.4 形状最適化法 627
21.2.2 形状変動の表現と公式 625	21.2.5 解析例 631
21.2.3 形状勾配 625	
21.3 位相最適化……………	632
21.3.1 位相最適化問題の定式化 632	21.3.3 位相最適化法 634
21.3.2 密度勾配 633	21.3.4 解析例 636

22 生産現場への CAE

[西浦光一] 638

22.1 CAE の生産現場への展開の歴史.....	638
22.2 CAE への期待.....	638
22.3 日本における CAE の普及.....	639
22.4 現代の CAE の傾向.....	640
22.5 現場の CAE	641
22.6 CAE を行う方法.....	642
索引.....	645