

# 目 次

## 第 I 編 破壊力学の基礎理論と解析法

<b>0</b>	<b>序 論</b>	<b>3</b>
0.1	構造物破壊の歴史	3
0.2	破壊力学の発展過程	4
0.3	破壊力学の分類	6
0.4	設計における破壊力学の意義	7
0.5	構造健全性および余寿命評価における破壊力学の意義	8
0.6	本書の構成	9
	文 献	9
<b>1</b>	<b>線形破壊力学</b>	<b>11</b>
1.1	線形破壊力学の立場	11
1.2	応力拡大係数	13
1.2.1	き裂の変形様式	15
1.2.2	き裂先端の応力-変位分布	15
1.2.3	応力拡大係数(次元解析)	17
1.2.4	エネルギー解放率(energy release rate)	18
1.2.5	応力拡大係数とエネルギー解放率の関係	19
1.2.6	き裂先端の塑性域	20
1.3	応力拡大係数の解析	22
1.3.1	Westergaard の方法	22
1.3.2	有限要素法	26
1.3.3	影響関数法	28
1.3.4	主なき裂の応力拡大係数	31
	文 献	36
<b>2</b>	<b>非線形破壊力学</b>	<b>37</b>
2.1	延性不安定破壊	37
2.2	2次元き裂材の延性不安定破壊解析	41

2.3	3次元き裂材の延性不安定破壊解析	51
2.3.1	停滞き裂の有限要素解析	51
2.3.2	き裂進展解析	55
文 献		58

## 3

### 動的破壊力学

59

3.1	き裂先端近傍の動的弾性応力変位場と動的応力拡大係数	59
3.1.1	静止き裂が衝撃的な荷重を受ける場合	59
3.1.2	き裂が高速で進展する場合	60
3.2	動的エネルギー解放率	62
3.3	動的破壊挙動を支配する方程式	64
3.4	動的応力拡大係数の簡便決定法	65
3.4.1	3点曲げ試験片の $K_I(t)$ の簡便決定法	65
3.4.2	二重片持はり試験片の $K_I(t, \nu)$ の簡便決定法	68
3.5	動的応力拡大係数の有限要素解析	69
3.5.1	特異要素を用いる方法	69
3.5.2	経路(領域)独立積分を利用する方法	72
3.6	き裂の高速進展挙動のシミュレーション	78
3.7	おわりに	82
文 献		82

## 4

### 環境破壊・疲労破壊

85

4.1	き裂の安定成長	85
4.2	疲労破壊	87
4.2.1	疲労き裂成長特性	87
4.2.2	き裂開閉口現象	89
4.2.3	下限界条件	91
4.2.4	微小き裂の成長特性	93
4.2.5	線形破壊力学の適用限界	95
4.3	環境破壊	96
4.3.1	応力腐食割れ	96
4.3.2	腐食疲労き裂成長特性	99
4.4	高温破壊	101
4.4.1	高温破壊の特徴と分類	101
4.4.2	クリープき裂	102
4.4.3	高温疲労き裂	103
4.4.4	クリープ・疲労き裂伝播	106
文 献		108

## 第II編 破壊力学の設計および構造健全性評価への応用

5	<b>破壊力学の設計への応用</b>	<b>113</b>
5.1	はじめに .....	113
5.2	機器の構造健全性保証 .....	114
5.2.1	設計時の手順	114
5.2.2	製造時の手順	114
5.2.3	稼動前の手順	114
5.2.4	稼動中の手順	115
5.2.5	欠陥評価に必要な情報	115
5.2.6	非時間依存形破壊の評価	116
5.2.7	時間依存形破壊の評価	119
5.2.8	欠陥評価の手順	121
5.2.9	有害な欠陥	122
5.2.10	保証試験	122
5.3	欠陥評価に関する ASME 規格の概要 .....	123
5.3.1	欠陥評価に関する Sec. III の概要	123
5.3.2	欠陥評価に関する Sec. XI の概要	125
5.3.3	低合金鋼圧力容器に関する欠陥評価の概要	126
5.3.4	オーステナイト鋼管に関する欠陥評価の概要	130
5.4	弾塑性破壊の 2 パラメータ法と破壊評価線図 .....	137
5.5	損傷許容設計 .....	140
5.5.1	損傷許容設計の背景	140
5.5.2	損傷許容設計の概念	140
5.5.3	き裂進展の定量的解析	142
5.5.4	構造健全性の再評価	143
文 献	.....	144

6	<b>LBB 評価——構造健全性評価への応用</b>	<b>145</b>
6.1	はじめに .....	145
6.2	LBB の評価手順 .....	146
6.3	未貫通き裂の疲労進展挙動 .....	148
6.3.1	未貫通き裂の応力拡大係数	148
6.3.2	未貫通き裂の疲労進展解析	152
6.4	配管の不安定破壊条件 .....	150
6.4.1	J 積分ティアリングモジュラス条件	154
6.4.2	正味応力概念	166
6.4.3	2 クライテリア法	169
6.4.4	数値解析による配管のき裂進展解析	171
文 献	.....	174

<b>7</b>	<b>破壊評価の工学的アプローチ</b>	<b>177</b>
7.1	設計における工学的アプローチの役割	177
7.2	き裂の HRR 特異場モデルと全面塑性解	178
7.3	全面塑性解の解析とその応用	182
7.3.1	工学的アプローチの流れ	182
7.3.2	非圧縮性有限要素法	184
7.3.3	2次元き裂問題	185
7.3.4	突き裂の挙動評価	195
7.4	HRR 特異場モデル適用のための必要条件	197
	文献	198

<b>8</b>	<b>確率論的破壊力学</b>	<b>201</b>
8.1	はじめに	201
8.1.1	確率論的破壊力学とは	201
8.1.2	歴史	201
8.1.3	安全率と破壊確率	202
8.1.4	適用分野	204
8.2	解析方法	205
8.2.1	解析方法の概要	205
8.2.2	数値積分法と Monte Carlo 法	206
8.2.3	重み付き Monte Carlo 法	209
8.3	入力データ	211
8.3.1	入力データの種類	211
8.3.2	初期欠陥に関するデータ	211
8.3.3	非破壊検査に関するデータ	217
8.3.4	疲労き裂進展データ	218
8.3.5	破壊靱性	219
8.3.6	その他の入力データ	220
8.4	許容破壊確率	220
8.5	使用例	221
8.5.1	圧力容器に使用した例	221
8.5.2	配管に使用した例	222
8.5.3	航空機に使用した例	223
8.5.4	その他の使用例	224
8.6	おわりに	224
	文献	225

### 第III編 欠陥評価のためのソフトウェアと材料データ

## 9

### 数値解析コード

229

9.1	破壊力学パラメータの評価法 .....	229
9.1.1	経路積分法 230	
9.1.2	仮想き裂進展法 233	
9.1.3	最適な仮想き裂進展量 $\delta\alpha$ 238	
9.1.4	経路積分法と仮想き裂進展法との関係 239	
9.2	アイソパラメトリック有限要素を用いた特異性の表現 .....	241
9.2.1	$r^{-1/2}$ の特異性 241	
9.2.2	$r^{-1}$ の特異性 245	
9.3	破壊力学パラメータを評価するための有限要素法プログラム .....	247
9.4	有限要素法プログラムを用いた数値解析例 .....	248
9.4.1	CT試験片の解析 248	
9.4.2	無限体中の埋没き裂の解析 250	
文 献	.....	253

## 10

### 破壊靱性試験と破壊靱性データ

255

10.1	破壊力学パラメータと破壊靱性試験法 .....	255
10.2	平面ひずみ破壊靱性試験 (ASTM $K_{Ic}$ 試験) .....	256
10.3	高速負荷平面ひずみ破壊靱性試験 (ASTM $K_{Ic}(t)$ 試験) .....	263
10.4	き裂伝播停止靱性試験 ( $K_{Ia}$ 試験) .....	267
10.5	弾塑性破壊靱性 $J_{Ic}$ 試験 .....	270
10.6	COD 試験 .....	276
10.7	延性領域の破壊靱性試験 .....	280
文 献	.....	282

索 引	.....	283
-----	-------	-----