



第1編
材料破壊の基礎と
フラクトグラフィの原理

はじめに
破面解析(フラクトグラフィ)の
重要性と位置付け.....服部 敏雄 3

- 1. 事故解析の重要性 3
- 2. 事故解析の手順 4
- 3. 破面解析(フラクトグラフィ) 5
- 4. マクロフラクトグラフィ 6
- 5. ミクロフラクトグラフィ 9
- 6. 破壊起点調査 10

第1章
破壊の力学とフラクトグラフィ..... 15

- 1節 破壊の理論と分類.....塩谷 義 17
- 2節 ぜい性破壊と破壊力学.....塩谷 義 21
 - 1. クラック先端近傍の応力場と応力拡大係数 23
 - 2. エネルギー・バランスの考え方 26
- 3節 延性破壊と塑性変形.....塩谷 義 29
- 4節 動的破壊.....塩谷 義 33
- 5節 疲労破壊.....服部 敏雄 36
 - 1. 疲労の機構 36
 - 2. 疲労破面 38

3. 内部欠陥起点疲労破面	46
4. 破面解析による負荷応力の推定	51
6節 応力腐食割れ	服部 敏雄 54
1. 応力腐食割れの特徴と機構	54
2. 応力腐食割れの材料・環境因子と破面	56
2.1. 低合金鋼	56
2.2. ステンレス鋼	59
2.3. アルミニウム合金	60
2.4. 銅合金	62
7節 クリープ破壊	服部 敏雄 63
1. クリープ現象	63
2. クリープ破壊	64
8節 接触疲労破面（転がり疲労，フレット疲労）	服部 敏雄 68
1. 接触疲労現象の種類	68
2. 転動疲労	68
3. フレット疲労	73
3.1. フレット疲労のメカニズム	76
3.2. フレット疲労の解析	78

第2章 破面解析の具体的手法と非破壊検査

1節 目視・光学顕微鏡	松尾 陽太郎 87
1. 光学顕微鏡の原理と特徴	87
2. 応力状態の相違による延性破壊・ぜい性破壊の特徴	89
2.1. 引張破壊	89
(1) 延性破壊	89
(2) ぜい性破壊	90
2.2. 圧縮破壊	91
(1) 延性破壊	91
(2) ぜい性破壊	91
2.3. ねじり破壊	92
(1) 延性破壊	92
(2) ぜい性破壊	93
3. 金属の疲労破面	93

4. 巨視的破面写真撮影における注意点	94
2節 SEM, TEM, 成分分析	服部 敏雄 96
3節 AFM- 原子間力顕微鏡	塩田 忠 101
はじめに	101
1. AFMの測定原理と動作モード	101
2. カンチレバーと試料	103
3. 破面解析手法としての展望	104
4節 非破壊検査	松尾 陽太郎 106
はじめに	106
1. 非破壊検査技術の種類とその特徴	106
1.1. 超音波探傷試験	107
1.2. 超音波顕微鏡	108
1.3. アコースティック・エミッション法(AE)	108
1.4. X線CT法(X線断層映像法)	108
1.5. NMR-CT法(核磁気共鳴断層映像法)	108
1.6. 中性子ラジオグラフィ	108
1.7. 浸透探傷法	109
1.8. 磁気探傷法	109
2. セラミックスの非破壊検査実施時に必要な理論的基礎	110

第2編

各材料のフラクトグラフィ

第1章 鉄と鉄鋼

1節 鋳鉄のフラクトグラフィ	野口 徹 115
1. 鋳鉄の破壊過程の特徴とフラクトグラフィ	115
2. 鋳鉄の巨視フラクトグラフィ	117
3. 片状黒鉛鋳鉄・球状黒鉛鋳鉄の微視フラクトグラフィ	119
3.1. 片状黒鉛鋳鉄の静的破壊	119
3.2. 球状黒鉛鋳鉄の静的破壊	121
3.3. 片状黒鉛鋳鉄・球状黒鉛鋳鉄の疲労破面	122

3.4. ADIの疲労破面	124
4. 白鉄系のフラクトグラフィ	126
5. 鑄造欠陥	127
6. 破損品のフラクトグラフィ事例	127
2節 炭素鋼と鉄基合金のフラクトグラフィ	田川 哲哉, 服部 敏雄 130
1. 延性破壊とぜい性破壊	130
2. 疲労破壊	135
3. 破壊靱性(疲労き裂からの静的破壊)	141
4. 水素ぜい性破壊	142
3節 耐熱鋼・耐熱合金のフラクトグラフィ	関原 傑 146
4節 耐食性合金のフラクトグラフィ	林 眞琴 154
1. オーステナイト系ステンレス鋼における疲労破面	154
2. 高Ni基合金 Inconel 600 鋼の室温大気中疲労破面	161
3. 13Cr鋼の腐食疲労破面	162
4. 沸騰水型原子炉の純水中における応力腐食割れ破面	165
4.1. オーステナイト系ステンレス鋼の破面	165
4.2. 高張力Ni基合金の応力腐食割れ破面	171
5節 各種条件下の鋼の破壊例	阿部 富士雄 173
1. フェライト系耐熱鋼のシャルピー衝撃破面	173
1.1. 核融合炉用低放射化フェライト鋼のシャルピー衝撃破面形態に及ぼす母相組織の影響	173
1.2. シャルピー衝撃破面と破壊過程, 試験片サイズ効果	177
1.3. シャルピー衝撃破面形態に及ぼす加工・熱処理の効果	180
2. フェライト系耐熱鋼の引張破面形態に及ぼす中性子照射の効果	181
2.1. 引張試験におけるぜい性破面形態	181
2.2. 引張試験における延性破面形態	181

第2章 非鉄金属

1節 アルミニウム合金のフラクトグラフィ	戸田 裕之 187
1. 展伸用アルミニウム合金	187
2. 鑄造用アルミニウム合金	193
2節 マグネシウム合金のフラクトグラフィ	向井 敏司, 丸山 典夫 200
1. マグネシウム合金の組織と延性および靱性の関係	200

2. マグネシウム合金の破壊機構	202
3. マグネシウム合金の破壊靱性値と内部組織の関係	206
4. マグネシウム合金の疲労特性	208
5. マグネシウム合金の疲労特性に及ぼす湿度の影響	215

3節 低温用チタン合金のフラクトグラフィ

緒形 俊夫 222

1. 低温用チタン合金	222
2. 低温用チタン合金のフラクトグラフィの実例	222
3. 低温でのTi-5Al-2.5Sn ELIのフラクトグラフィ	224
3.1. 引張破断のフラクトグラフィ	224
3.2. 衝撃破断のフラクトグラフィ	224
3.3. 疲労破断のフラクトグラフィ	227
3.4. 疲労き裂進展のフラクトグラフィ	228
4. Ti-6Al-4V ELI合金の低温でのフラクトグラフィ	229
4.1. 引張破断のフラクトグラフィ	229
4.2. 疲労破断のフラクトグラフィ	232

4節 銅, 銅合金の破壊とフラクトグラフィ

宇佐美 三郎 236

1. 銅, 銅合金の疲労き裂発生・進展抵抗	236
2. 銅における弾性疲労き裂進展の破面	238
2.1. マクロ・フラクトグラフィ	240
2.2. マイクロ・フラクトグラフィ	240
3. 銅合金の室温低サイクル疲労	245
4. 銅の高温低サイクル疲労	246
5. 黄銅の応力腐食割れと鑄造割れ	251

第3章 高分子および高分子系複合材料

253

1節 熱可塑性樹脂

佐野 博成 255

1. 高分子材料(ポリマーアロイ)のモルフォロジー解析の必要性	255
2. 電子顕微鏡の種類と特徴, 最近の進歩	256
3. 電子顕微鏡による高分子材料微細構造の観察技術	257
3.1. エッチング技術	258
(1) イオンエッチング	258
(2) 液エッチング	259
(3) フリーズエッチング	259
(4) SS法	259

3.2. 染色技術	259
(1) 四酸化オスミウム(OsO_4)染色	259
(2) 四酸化ルテニウム(RuO_4)染色	260
(3) リンタンゲステン酸染色	263
3.3. 超薄切および精密切削	263
4. 微細構造と化学情報の解析	264
5. 三次元構造の解析	264
6. 今後	268
2節 環境応力割れ川口 隆文	270
1. 環境応力割れの重要性	271
2. 環境応力割れの事例	272
3節 熱硬化性樹脂・複合材料岸 肇, 川口 隆文	279
はじめに	279
1. 未改質樹脂	279
2. エラストマー添加エポキシ樹脂	281
3. ポリアミド粒子添加エポキシ樹脂	284
4. ガラス粒子添加エポキシ樹脂	285
5. エポキシ/熱可塑性樹脂ポリマーアロイ	291
4節 短繊維強化プラスチックのフラクトグラフィ黄木 景二, 矢代 茂樹	294
1. 破面解析上の注意	294
2. 一般的な破面様相	295
3. 破面と破壊仕事	298
4. SMCの破面	299
5節 繊維強化プラスチック積層板の層間破壊松田 聡	304
1. 層間はく離	304
2. 炭素繊維/エポキシ積層板の層間破壊	306
3. 延性マトリックスを有するCFRPの層間破壊	309
4. 試験環境の影響	310
5. 繰返し荷重による破壊	313
第4章 セラミックス, その他	317
1節 はじめに松尾 陽太郎	319
1. セラミックスの性質と結合様式	319
2. 結晶構造	320

3. セラミックスと岩石の関係	321
2節 自然界における破面と石器松尾 陽太郎	322
1. 岩石の破面	322
2. 岩石の摩耗面と圧縮破面	323
3. 破壊の制御による石器の製造	324
3節 ぜい性破壊面の特徴 — ミラー, ミスト, ハックル松尾 陽太郎	326
1. 応力状態による巨視的破壊形態の相違	326
2. ガラスの破面——ミラー, ミスト, ハックル	327
3. き裂の枝分かれと破面の制御	331
4節 破壊源の同定とその破壊統計への応用松尾 陽太郎	333
1. 破壊源(破壊原因)の同定と破壊源関連情報	333
2. 破壊原因の種類数と強度分布の理論式(1変数分布関数)	335
2.1. 単一の破壊原因に適用される一軸分布関数(単一モードワイブル分布)	335
2.2. 多種類の破壊原因に適用される分布関数(多重モードワイブル分布)	335
2.3. 多軸応力状態に適用される分布関数(多軸分布関数)	336
2.4. 未知パラメータの推定	338
2.4.1. 最尤法による推定(単一モード2母数ワイブル分布)	338
2.4.2. 多段最尤法(多重モードワイブル分布)	338
(1) 完全データの解析	339
(2) 不完全データの解析(修正EMアルゴリズム)	339
3. 破壊応力と破壊位置を確率変数にもつ分布関数(2変数分布関数)	341
4. 破壊応力, 破壊位置, 欠陥方向を確率変数にもつ分布関数(3変数分布関数)	343
5節 セラミックスのフラクトグラフィと破壊靱性安田 公一	345
はじめに	345
1. 破面のフラクタル次元と破壊靱性	345
2. 多結晶セラミックスの破面と破壊靱性	348
2.1. マグネシアセラミックスの破壊靱性に及ぼす添加物の影響	349
2.2. マグネシアセラミックスの破壊靱性に及ぼす粒径の影響	351
2.3. アルミナセラミックスの破壊靱性に及ぼす粒径の影響	353
3. 繊維強化セラミックスの破面とワーク・オブ・フラクチャー	355
おわりに	357
6節 生体材料立石 哲也	360

はじめに	360
1. 骨折の分類とメカニズム	361
2. 試料および実験方法	361
3. 結果および考察	363
3.1. 動的弾性率の測定	363
3.2. 非骨軸方向における骨の破壊	370
まとめ	373

第5章 溶接・接合のフラクトグラフィ…………… 375

1節 溶接・接合概論……………	鈴木 暁男	377
1. 各種溶接・接合技術の概要		377
1.1. 熔融溶接		378
1.2. 抵抗溶接		378
1.3. 固相接合		380
1.4. ろう接		382
2. 溶接・接合界面の組織と特性		385
2.1. 溶接継手マクロ形状と強度および溶接欠陥		385
2.2. 炭素鋼溶接部の組織と特性		387
2.3. ステンレス鋼溶接部の組織と特性		391
2節 熔融溶接部のフラクトグラフィ……………	鈴木 暁男	395
1. 熔融溶接部組織の特徴と熱応力の発生		395
2. 高温割れ		396
3. 低温割れ		397
4. ラメラーテア		398
5. 後熱処理割れ(SR割れ)		399
6. 液体金属ぜい化割れ		400
7. 溶接部の形状欠陥に起因する割れ		400
8. 溶接部の腐食および水素アタック		401
3節 固相接合部のフラクトグラフィ……………	池庄司 敏孝	402
1. 拡散接合		402
2. 超音波圧接		413
4節 ろう付部のフラクトグラフィ……………	池庄司 敏孝	418
1. ろう付		418
2. はんだ付		421

2.1. 鉛フリーはんだ		426
3. ろう付破面のフラクタル性		427
5節 接着のフラクトグラフィ……………	佐藤 千明	431
はじめに		431
1. 接着剤の種類と破壊形式		432
2. 接合部の形状および負荷条件と破壊形式		433
3. 破断面の観察・測定方法		437
まとめ		440

第3編

破壊事例，事故解析事例

第1章 著名な破壊事例…………… 宇佐美 三郎 443

はじめに	443
1. 静的負荷，衝撃荷重による破壊	443
1.1. ピラミッド外壁の崩落	443
1.2. 航空機突入による高層ビルの崩壊	443
2. ぜい性破壊	445
2.1. タイタニック号が氷山に衝突して沈没	445
2.2. 全溶接船のぜい性破壊折損	447
2.3. ロケット・モータケースの破裂	448
2.4. 発電機・蒸気タービンロータの遠心破壊	449
3. 応力腐食割れ(SCC)	450
3.1. 吊り橋アイバーのSCCによる落橋	450
3.2. 発電機リテイニングリングのSCCによる遠心破壊	451
3.3. 原子力配管のSCCによる漏えい	452
4. 振動による破損	453
4.1. 兵隊行進による吊り橋の共振落下	453
4.2. 風による橋のフラッターリング破壊	454
5. 高サイクル疲労破壊	455

5.1. 水車ランナ翼の共振疲労き裂	455
5.2. 照明ポール基部の疲労強度向上構造	455
5.3. ローラーコースター車軸固定ボルトの疲労破壊	456
5.4. 発電機回転子シャフトのフレットング疲労き裂	457
6. 低サイクル疲労破壊	458
6.1. 航空機の内圧疲労破裂	458
6.2. はんだ接続部の熱疲労き裂	459
6.3. ガスタービン高温部品における熱疲労き裂進展	460
7. その他の原因による破損	460
7.1. クランク軸高周波焼入れ端に疲労き裂発生	461
7.2. ロケット主噴射器溶接部の熱疲労き裂	461
7.3. 空中通路支持構造の変更による崩落	462
7.4. 鉄道レールの温度上昇による座屈変形	463
7.5. 乗用車追突火災への対応	464
7.6. スペースシャトル・チャレンジャー号の爆発	464
おわりに	466

第2章 繊維強化プラスチックの 酸応力腐食割れ

藤井 善通 468

1. 破損事例	468
2. 実験室環境での破面観察との比較	472
2.1. ガラス繊維の酸による劣化	472
2.2. FRP の破面	473
まとめ	476

第3章 はんだ・ボンディングワイヤ

北野 誠 478

1. 半導体パッケージの構造と破壊原因	478
2. BGA パッケージはんだ接合部のフラクトグラフィ	479
2.1. 熱疲労破壊	479
2.2. 機械的せん断疲労	480
2.3. 衝撃破壊	481
2.4. き裂進展実験および解析	481

3. ボンディングワイヤのフラクトグラフィ	484
3.1. ワイヤボンディング工程	484
3.2. 引張および熱疲労破壊	484
3.3. 接合面の破壊	486

第4章 エラストマーの破面写真と 破壊プロセスに関する研究事例

深堀 美英 487

1. ゴムの破断面凹凸形成のメカニズム	487
2. FEM (有限要素法) による破断面凹凸形成のシミュレーション	492
2.1. 破断面凹凸の形成過程	492
2.2. 破断面凹凸の大きさを支配する因子	496

索引	499
----	-----