

学位論文

局所パラメータの導入による
破面の特性格化に関する研究

山際謙太

目次

第1章	緒論	15
1	研究の背景	15
1.1	フラクトグラフィの概要	15
1.2	数値破断面解析の意義と従来の研究	16
2	研究の目的	25
3	論文の構成	26
第2章	破断面の局所性評価手法の提案	29
1	緒言	29
2	従来の破断面の局所性評価手法	29
2.1	従来の位置の局所性評価手法	31
2.2	従来の空間スケールの局所性評価手法	37
3	破断面の局所性評価手法	41
3.1	局所パラメータを導入した、破面の位置と空間スケールの特 性化手法	41
3.2	遷移領域を評価する理由	45
3.3	空間スケールの観点から破面を特性化する理由	45
3.4	周期性の観点をを用いる理由	46
4	本章のまとめ	47
第3章	ウェーブレット変換を用いた疲労破断面のストライエーション領域同 定手法	49
1	緒言	49
1.1	はじめに	49
1.2	本論文で取り扱うストライエーションについて	50
2	ウェーブレット変換による疲労破面特性化手法の提案	50
2.1	Gabor ウェーブレット変換を用いたストライエーションの特 微量算出	50
2.2	解析手順	53
2.3	しきい値の決定方法	55
3	仮想破断面による検証	57

	3.1	ストライエーション度の有効性の検証	57
4		実破断面解析結果	66
	4.1	破面観察とデータの作成	66
	4.2	2次元離散フーリエ変換によるストライエーションの周波数・ 方向の推定	67
	4.3	破面画像へ Gabor ウェーブレット変換の適用	76
5		考察	90
	5.1	実破面の領域判定結果について	90
	5.2	ストライエーション破面率について	92
	5.3	しきい値に影響を与える条件についての検討	92
6		結言	98
第4章 局所 Hurst 数を用いたストレッチゾーン幅の定量評価手法			99
1		緒言	99
	1.1	従来の破面解析における局所 Hurst 数の応用研究	100
	1.2	従来の破面解析におけるストレッチゾーン幅の定量化につい ての研究	103
2		局所 Hurst 数を用いた破断面遷移領域同定手法	105
	2.1	局所 Hurst 数	105
	2.2	2次元ウェーブレット変換における2次元局所 Hurst 数	107
	2.3	破断面遷移領域同定手法	108
3		実破面の解析結果	110
	3.1	解析対象の試験片	110
	3.2	解析画像と解析結果	111
4		考察	152
	4.1	2次元局所 Hurst 数の分布に関する考察	152
	4.2	目視により求めたストレッチゾーンと、2次元局所 Hurst 数 により求めたストレッチゾーンの比較	153
	4.3	SZW の評価	154
5		結言	157
第5章 フラクタル次元と観察倍率による破壊に支配的な大きさの評価手法			158
1		緒言	158
2		フラクタル解析	159
	2.1	フラクタルの定義	159
	2.2	フラクタルの例	159
	2.3	金属破断面のフラクタル解析方法	160
3		観察スケールとフラクタル次元を用いた解析手法の提案	162
	3.1	破面のフラクタル性	162

3.2	従来のフラクタル解析の問題点	162
3.3	破断面のスケールに関する局所性を評価する手法	164
4	試験片・装置	167
4.1	三次元解析機能付き走査型電子顕微鏡	167
4.2	TiAl 金属間化合物破面	168
4.3	フラクタル次元算出法	178
5	解析結果と考察	179
5.1	ボックスカンテイング法実行結果	179
5.2	観察スケールとフラクタル次元の関係	180
5.3	考察	181
6	結言	182
第 6 章	結言	189
1	本研究の総括	189
2	研究の展望	190
2.1	ストライエーション破面率の評価	190
2.2	2次元局所 Hurst 数を用いた破面性状の分類	191
2.3	フラクタル解析を用いた破壊に支配的な大きさの評価	191
2.4	ウェーブレット解析による破面の特性化	191
付録 A	軸応力疲労破壊試験	193
1	実験の主旨	193
2	試験方法	193
2.1	供試材	193
2.2	試験片	193
2.3	試験装置	195
2.4	試験条件	196
3	試験結果	197
3.1	較正曲線の計算	197
3.2	き裂進展曲線	197
付録 B	SEM の 3 次元像測定原理	206
1	走査型電子顕微鏡 (SEM ERA-4000) について	206
1.1	動作原理	206
1.2	分解能	206
1.3	二次電子像と反射電子像	206
2	凹凸測定装置の動作原理	209
2.1	動作原理 1	209
2.2	動作原理 2	209
3	装置の構成	209

付録 C	SEM(ERA-4000)の詳細 ¹	212
1	SEM(ERA-4000)の概観	212
2	SEM(ERA-4000)の仕様	213
2.1	主性能	213
2.2	主機能	213
2.3	仕様性能	213
2.4	装置寸法	217
付録 D	SEM(ERA-8800FE)の詳細 ²	218
付録 E	シャルピー衝撃試験破断面の解析結果	223
1	シャルピー衝撃試験片破断面・脆性破壊領域の同定手法	223
2	解析結果	225
2.1	遷移部の解析	226
2.2	遷移部前後の画像を含んだ解析	236
研究業績		240
謝辞		248

目次

1.1	Relationship between observation scale and device.	17
1.2	Striation. Material: A2017-T4. Magnification observation = 2000. CPD indicates the Crack Propagation Direction.	21
1.3	Illustration of texture analysis of fracture surface	23
1.4	本論文の構成図	27
2.1	破断面内に存在する遷移領域 (シャルピー衝撃試験破断面)	30
2.2	破断面のテクスチャ解析のフローチャート例 ³⁻⁶	31
2.3	共起行列	33
2.4	明瞭な境界と不明瞭な境界の例	35
2.5	境界を含む破断面の画像解析における特徴量の分布	36
2.6	フラクタル次元の概念	38
2.7	粗視化の度合いを変化させることで, プロファイルの長さを計測する	39
2.8	フラクタル性が成立する場合と成立しない場合における, 測定量と 基準長さの関係 ⁷	40
2.9	素性がよくわからない破面に対する局所パラメータ適用方法	42
2.10	Variation of appearance of fracture surface with magnification ob- servation.	46
2.11	ストライエーションのフーリエ解析結果	47
2.12	へき開面のフーリエ解析結果	48
3.1	The overview of the Gabor mother wavelet	52
3.2	The flow chart of the method to detect the striation region	54
3.3	The image of the fracture surface in which the striation is simulated	59
3.4	The relationship between the frequency and the frequency evalua- tion function.	61
3.5	The distribution of the degree of striation $C(f = 0.05, x_0, y_0)$	63
3.6	大津のしきい値選定法による領域判定結果	64
3.7	Kittler のしきい値選定法による領域判定結果	65
3.8	The SEM image of CrMo fatigue fracture surface: case1(×800)	68
3.9	The SEM image of CrMo fatigue fracture surface: case2(×800)	69

3.10	The SEM image of A2017-T4 fatigue fracture surface: case3($\times 2000$), $\Delta K = 11.4MPa\sqrt{m}$	70
3.11	The SEM image of A2017-T4 fatigue fracture surface: case4($\times 800$), $\Delta K = 5.9MPa\sqrt{m}$	71
3.12	Relationship between wave length and wave length evaluation function.	72
3.13	Relationship between wave length and wave length evaluation function.	73
3.14	Relationship between wave length and wave length evaluation function.	74
3.15	Relationship between wave length and wave length evaluation function.	75
3.16	Judgement result of striated surface area in Fig.3.8using frequency region B_0^{case1} . Left: Threshold ratio is 20%. Right: Threshold ratio is 40%.	76
3.17	Judgement result of striated surface area in Fig.3.9using frequency region B_0^{case2} . Left: Threshold ratio is 20%. Right: Threshold ratio is 40%.	77
3.18	Judgement result of striated surface area in Fig.3.10using frequency region B_0^{case3} . Left: Threshold ratio is 20%. Right: Threshold ratio is 30%.	77
3.19	Judgement result of striated surface area in Fig.3.11using frequency region B_0^{case4} . Left: Threshold ratio is 10%. Right: Threshold ratio is 15%.	78
3.20	Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from striation area in Fig.3.8using FFT.	78
3.21	Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from striation area in Fig.3.8using FFT.	79
3.22	Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from striation area in Fig.3.10using FFT.	80
3.23	Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from striation area in Fig.3.11using FFT.	81
3.24	The judgement result of the striated surface area in Fig.3.8and the striated surface ratio. Top left: the threshold ratio is 15%. Top right: the threshold ratio is 20%. Bottom right: the striated area judged by the human observation.	82

3.25	The judgement result of the striated surface area in Fig.3.9 and the striated surface ratio. Top left: the threshold ratio is 15%. Top right: the threshold ratio is 20%. Bottom right: the striated area judged by the human observation.	83
3.26	The judgement result of the striated surface area in Fig.3.10 and the striated surface ratio. Top left: the threshold ratio is 10%. Top right: the threshold ratio is 15%. Bottom right: the striated area judged by the human observation.	84
3.27	The judgement result of the striated surface area in Fig.3.11 and the striated surface ratio. Top left: the threshold ratio is 10%. Top right: the threshold ratio is 15%. Bottom right: the striated area judged by the human observation.	85
3.28	The judgement result of the striated surface area in Fig.3.8 using Ohtsu's and Kitter's thresholding method.	86
3.29	The judgement result of the striated surface area in Fig.3.9 using Ohtsu's and Kittler's thresholding method.	87
3.30	The judgement result of the striated surface area in Fig.3.10 using Ohtsu's and Kittler's thresholding method.	88
3.31	The judgement result of the striated surface area in Fig.3.11 using Ohtsu's and Kittler's thresholding method.	89
3.32	明度の変化としきい値の関係	95
3.33	コントラストの変化としきい値の関係	96
3.34	ストライエーションの明瞭さとしきい値の関係	97
4.1	フラクタル性の有る破断面の周期性 (ファセット)	99
4.2	1次元局所 Hurst 数による解析例	102
4.3	局所 Hurst 数と明度, コントラストの関係	104
4.4	ストレッチゾーンを含む破断面	109
4.5	ストレッチゾーン幅と局所 Hurst 数の関係	110
4.6	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 1 case 1). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	115
4.7	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 1 case 2). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	116
4.8	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 1 case 3). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	117
4.9	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 2 case 1). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	118
4.10	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 2 case 2). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	119

4.11	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 2 case 3). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	120
4.12	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 3 case 1). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	121
4.13	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 3 case 2). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	122
4.14	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 3 case 3). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	123
4.15	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 4 case 1). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	124
4.16	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 4 case 2). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	125
4.17	Image of fracture surface with stretched zone (試験片 4 case 3). White lines indicate stretched zone detected by human observation.	126
4.18	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.6(試験片 1 case 1).	128
4.19	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.7(試験片 1 case 2).	129
4.20	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.8(試験片 1 case 3).	130
4.21	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.9(試験片 2 case 1).	131
4.22	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.10(試験片 2 case 2).	132
4.23	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.11(試験片 2 case 3).	133
4.24	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.12(試験片 3 case 1).	134
4.25	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.13(試験片 3 case 2).	135
4.26	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.14(試験片 3 case 3).	136
4.27	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.15(試験片 4 case 1).	137
4.28	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.16(試験片 4 case 2).	138
4.29	Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.17(試験片 4 case 3).	139

4.30	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 1 case 1 $w=18\mu m$)	140
4.31	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 1 case 2 $w=18\mu m$)	141
4.32	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 1 case 3 $w=18\mu m$)	142
4.33	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 2 case 1 $w=18\mu m$)	143
4.34	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 2 case 2 $w=18\mu m$)	144
4.35	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 2 case 3 $w=18\mu m$)	145
4.36	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 3 case 1 $w=18\mu m$)	146
4.37	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 3 case 2 $w=18\mu m$)	147
4.38	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 3 case 3 $w=18\mu m$)	148
4.39	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 4 case 1 $w=18\mu m$)	149
4.40	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 4 case 2 $w=18\mu m$)	150
4.41	Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line).(試験片 4 case 3 $w=18\mu m$)	151
4.42	Relationship between J-integral and stretched zone width. J , α and β indicate SZW evaluated by proposed method, 1-dimensional hurst exponent, and roughness repectively.	156
5.1	Koch curve	159
5.2	Sierpinski gasket	160
5.3	Cantor curtains	160
5.4	Illustration of the fracture surface morphogy at variout scales . . .	163
5.5	The relationship between fractal dimension and observation scale .	165
5.6	観察倍率とフラクタル次元の関係を求めるフローチャート	166
5.7	The photograpy of Elionix SEM device	167
5.8	Test piece of DEN	169
5.9	Test piece of CT	169
5.10	Appearance of test piece of DEN (Creep)	170
5.11	Appearance of test piece of DEN (Creep fatigue)	171

5.12	Appearance of test piece of CT (800°C)	172
5.13	Appearance of test piece of CT (850°C)	173
5.14	Creep fracture surface of test piece of DEN	174
5.15	Creep fatigue fracture surface of test piece of DEN	175
5.16	Creep fracture surface of test piece of CT (800°C)	176
5.17	Creep fatigue fracture surface of test piece of CT (850°C)	177
5.18	Illustration of the fracture model of TiAl intergranular fracture.(left) The photography of the fracture surface of TiAl intergranular fracture. ($\times 1000$) (right)	178
5.19	Illustration of the fracture model of TiAl transgranular fracture.(left) The photography of the fracture surface of TiAl transgranular fracture ($\times 1000$). (right)	179
5.20	Illustration of the fracture model of TiAl transgranular fracture.(left) The photography of the fracture surface of TiAl intergranular fracture. ($\times 1000$) (right)	180
5.21	Illustration of the box counting method (The shaded boxes are counted)	184
5.22	Result of box counting method	185
5.23	Variations of fractal dimension of TiAl transgranular fracture surface(creep) with magnification of observation	185
5.24	Variations of fractal dimension of TiAl intergranular fracture surface(creep) with magnification of observation	186
5.25	Variations of fractal dimension of TiAl intergranular fracture surface(creep fatigue) with magnification of observation	187
5.26	Variations of coefficient of variation with magnification scale	188
A.1	試験片の形状・寸法	194
A.2	試験装置の写真	195
A.3	試験装置の概略	196
A.4	FEM model of CT test piece	198
A.5	較正曲線	199
A.6	a/W-N 線図 (R=0.1)	200
A.7	き裂進展曲線 (R=0.1)	201
A.8	a/W-N 線図 (R=0.2)	202
A.9	き裂進展曲線 (R=0.2)	203
A.10	a/W-N 線図 (R=0.5)	204
A.11	き裂進展曲線 (R=0.5)	205
B.1	Effect of reflected electron	207
B.2	Effect of secondary electron	208

B.3	Principle of measure	210
B.4	Device construction	211
C.1	Appearance of ERA-4000 SEM device	212
E.1	シャルピー衝撃破断面における破面のマクロ様相 (模式図)	224
E.2	シャルピー衝撃破断面における, 脆性・延性遷移領域 (観察倍率×400) CPD:き裂進展方向	225
E.3	シャルピー衝撃破断面における脆性・延性遷移領域と局所 Hurst 数 の関係	226
E.4	シャルピー衝撃試験片解析画像	227
E.5	破面番号と全体図の対応	228
E.6	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0542)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	228
E.7	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0543)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	229
E.8	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0544)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	229
E.9	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0545)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	230
E.10	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0546)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	230
E.11	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0547)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	230
E.12	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0548)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	231
E.13	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0551)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	231
E.14	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0557)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	231
E.15	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0562)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	232
E.16	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0568)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	232
E.17	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0571)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	232
E.18	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0576)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	233
E.19	シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0577)($w =$ $50\mu m, w_t = 300\mu m$)	233

E.20 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0583)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)	233
E.21 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0584)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)	234
E.22 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0585)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)	234
E.23 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0587)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)	234
E.24 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0590)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)	235
E.25 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0591)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)	235
E.26 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0592)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)	235
E.27 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0593)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)	236
E.28 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0594)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)	236
E.29 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0595)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)	237
E.30 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (目視)	237
E.31 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 ($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$) 脆性破面率=32%	238
E.32 シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 ($w = 50\mu m$)	239

表目次

1.1	破壊機構と従来の数値解析手法	18
2.1	局所パラメータと定量化する破面の特徴の関係	44
4.1	w とべき乗則の収束の関係	127
4.2	Result of quantitative evaluation of SZW(μm) by 2-dimensional hurst exponent and human observation.	155
4.3	Result of quantitative evaluation of SZW(μm) by 1-dimensional hurst exponent and roughness. ⁸	155
5.1	Chemical composition(wt%)	168
5.2	クリープ・クリープ疲労試験条件	168
A.1	A2017-T4 アルミニウム合金 成分表	193
A.2	Mechanical properties of A2017-T4 alloy	194
A.3	Physical properties of A2017-T4 alloy	194
A.4	疲労破壊試験条件	196
A.5	コンプライアンス回帰係数	197
E.1	SM490B・化学成分 (mass%)	226
E.2	SM490B・機械的性質	226

第1章 緒論

1.1 研究の背景

1.1.1 フラクトグラフィの概要

材料が破壊した際に形成される破断面には，破壊の進行状況を示す特徴的な模様が残っている．破断面解析（フラクトグラフィ）とは，この模様を解析し，破壊機構を推定する技術のことである．機械構造物の破損事故等の原因究明に，フラクトグラフィは非常に有効な手段であり，信頼性の高い構造物の設計の為に重要な役割を果たしており，安全設計の為に必要不可欠な技術である．

フラクトグラフィの創世記は，主に肉眼・虫眼鏡・光学顕微鏡を用いたマクロ観察による解析（マクロフラクトグラフィ）が主であった⁹⁻¹³．当時は，光学顕微鏡で，アームコ鉄のへき開面の観察などが行われていた¹¹⁻¹³．しかし，光学顕微鏡は焦点深度が浅く，破断面のように視野の広さに対して凹凸の形状が激しいような形状の観察には不向きであった^{10, 13-15}．また，光学顕微鏡の持つ倍率も50倍程度と限界があり，高倍率での観察は困難であった．

この問題に対して，焦点深度が深く，かつ観察倍率も高倍率である電子顕微鏡（SEM）¹⁶が登場し，フラクトグラフィは大きく発展した^{10, 14, 15}．SEMによる観察で，1視野の大きさが数 μm の破断面の形状を解析することが可能になり，ミクロレベルにおける破壊機構の解明が進んだ．その結果，事故原因の解析結果に多くの情報を与え，信頼度の高い結果を導くこととなった．特に，アメリカでは高強度鋼やチタン合金の疲労・疲労 SCC 等の破面に始まり多くの観察が行われ，航空機等の強度設計に役立った．これらの研究により得られた知見は ASTM の STP や Metals Handbook に載っている．また，TEM や AFM により，ナノオーダーの観察も可能になり，結晶粒界に沿って進展するき裂の様子や，ピッカース圧痕の側断面像等も観察されるようになった^{15, 17}．

しかし，電子顕微鏡は低倍率の観察を苦手としており，現在のフラクトグラフィは，Fig.1.1 に示すように低倍率の観察には，光学顕微鏡を用い，高倍率の観察には電子顕微鏡を使用することが一般的である．一般的に使用されるフラクトグラフィのルーティンワークでは，まず破断面を肉眼や光学顕微鏡で観察し，カップアンドコーン型破壊やチゼルポイント破壊等の判断をつけ，これにより破断面が

延性破壊か脆性破壊か等の大まかな検討をつける。その上で、電子顕微鏡を用い、疲労破面であれば縞状のストライエーションの観察、延性破壊であればディンプルの観察、脆性破壊であればへき開や擬へき開等のミクロ様相の観察を行うことで、詳細な破壊機構を明らかにしていく。従って、破断面の定性的な評価は、光学顕微鏡と電子顕微鏡の両者をスケールに応じて使用することが一般的であり、両者の使い分けにより詳細な解析を行うことが可能になった^{10, 14, 15}。

次に、SEMの登場は従来の観察主体の破断面解析に対して「数値破断面解析」という新しい分野を創り出した^{6, 7, 10, 14, 15, 18-47}。SEMやその発展系であるTOPO-SEMの登場により金属破断面の画像や3次元形状を電子化することが可能になり、これまでの観察のみによる主観的な解析から、数値解析による客観的な解析が可能になった。

破断面の数値解析には、大きくわけて2種類あり、

- 画像から3次元像を構築する研究
- 破断面の特徴を捉える量(特徴量)を計算し、作用応力の推定や破壊機構との対応付けを行う研究

である。

3次元観察は、従来の写真等の2次元観察と異なり、直接破断面の形状を認識することから、特に肉眼で観察することのできないミクロ破断面を理解する上で非常に有効である。また、特徴量と破壊機構の対応付けは、破断面の統計的な取り扱いを可能にした。つまり、従来のミクロ観察は、人間が観察することで行っていたわけであるが、これでは観察できる範囲に限界があり、仮に人手で計測した量から、特徴量を計算したとしても、調べた範囲が破断面全体の特徴量の分布のどの位置に存在しているのか不明であった。しかし、特徴量と破壊機構の対応が取れることで、破断面の詳細な画像や3次元形状のデータがあれば、あとは自動的に特徴量の計算が可能になり、破断面を広範囲に詳細に特徴付けることが可能になる。

つまり、従来のフラクトグラフィの結果は、観察者主導の主観的解析結果に、数値破断面解析は客観的側面を支えることが可能になり、より信頼性の高い結果となったと言えよう¹⁵。

1.1.2 数値破断面解析の意義と従来の研究

数値破断面解析とは、一般的にSEMやレーザー顕微鏡を用いて観察される破断面の写真や3次元形状のデジタル情報を数値解析し、その結果を用いて定量的に破断面の評価を行うことである¹⁵。数値破断面解析を行う意義は主に、

1. 肉眼や光学顕微鏡で観察することで行ってきた、言わば定性的な破断面解析とその結果に対して、数値解析の側面から、その結果の妥当性を客観的に支えること

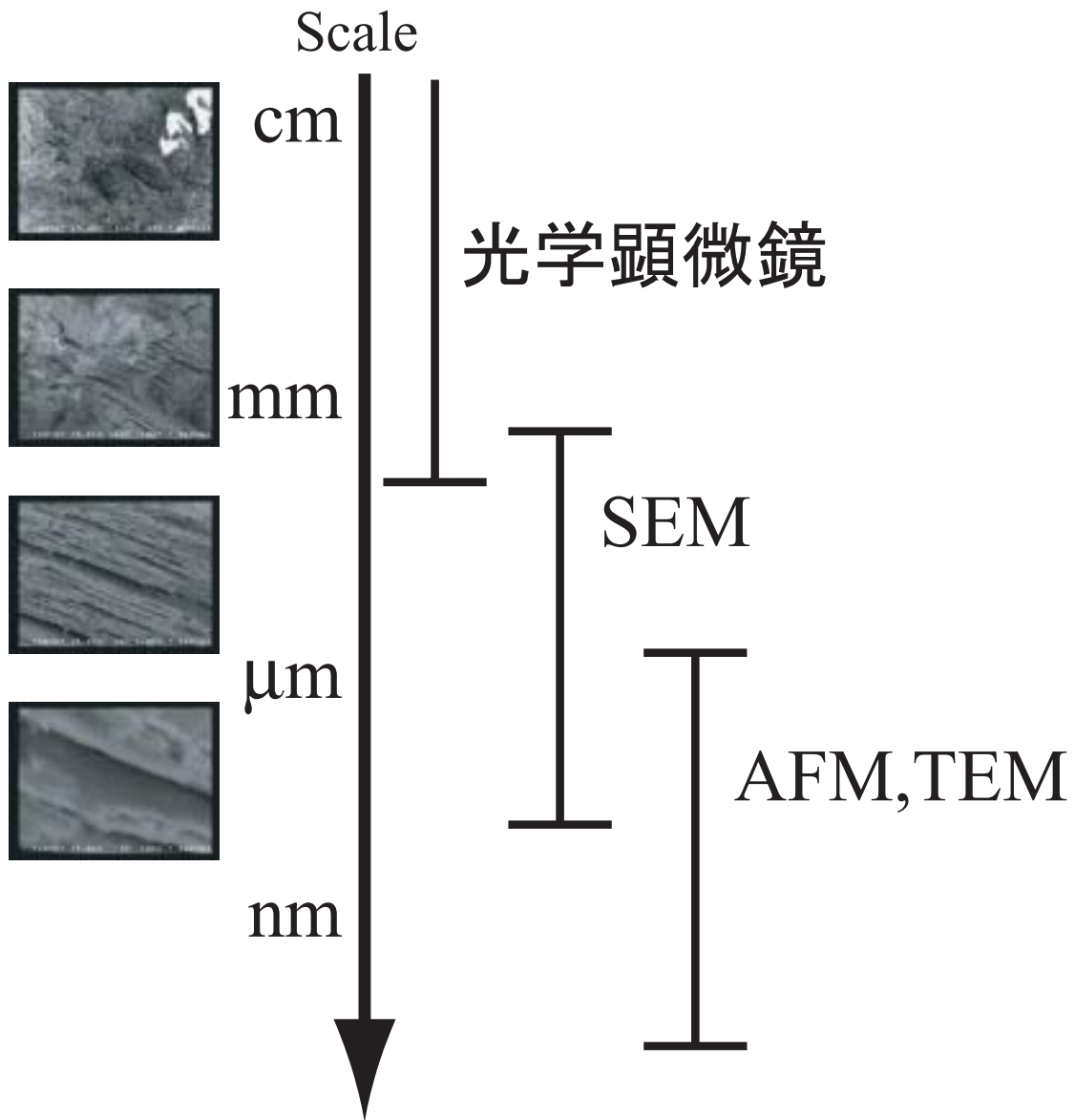


Fig. 1.1: Relationship between observation scale and device.

2. 人間の目には捕らえにくいスケールの破断面形状，破壊現象や周期性の情報等を可視化することで，破断面の理解を支援すること

である¹⁵。

また，破断面の定性的な解析は1960年代くらいに盛んであったが，21世紀に入り，熟練した破断面解析者は高齢化と共に減少してしまった。従って，特に熟練が必要とされる肉眼観察による破断面解析結果に関して，その信頼度が減少していることが指摘されている¹⁵。この問題に対して，数値破断面解析の分野は，解析技術の伝承と共に，解析者に依存しない結果を提供することから，解析初心者に対して，破断面解析における意思決定の支援を行うことが期待されている。

数値破断面解析の研究は，電子顕微鏡の登場も然ることながら，特に1980年後半にスーパーコンピュータの登場から，盛んになった。これまで行われている主な研究は，大きくわけて2種類あり，1つは破断面の画像から3次元形状を構成するための手法の研究^{6,10,14,15,18-25,44}と，破断面の画像から粗さやスペクトル等を解析することで破壊機構を推定する研究^{6,7,15,26-38,40-43}である。特に破断面から破壊機構を推定する研究の例としては，破断面のスペクトルからストライエーションの幅を測定する研究や，共役破断面を用いて破壊の履歴を再現するFRASTA等があり，これらの技術は破壊機構推定に有効である。主に行われてきた数値破断面解析のリストをTable1.1に示す。

Table. 1.1: 破壊機構と従来の数値解析手法

破壊機構	ミクロ破面様相	解析手法	
延性破壊	ディンプル	3次元解析 ^{15,19} ，フラクタル次元と吸収エネルギーの関係 ^{27,35,37} ， 第4章	
	すべり分離破面		
	蛇行すべり		
	さざ波模様		
	フルーティング		
脆性破壊	へき開ファセット	3次元解析 ^{15,28,41,44} ，ファセット破面単位の定量解析 ^{28,41} ， フラクタル特性の解析 ^{35,37,40,48,49} ，ファセット境界の抽出 ^{28,41} ， フラクタル次元と吸収エネルギーの関係 ²⁷	
	リバーパターン		
	タング		
	テアリッジ		
	擬へき開		3次元解析 ^{15,28,41,44} ，ファセット境界の抽出 ^{28,41} フラクタル特性の違いと破壊モードの関係 ^{30,50} ， 粒界・粒内割れの自動判別 ³⁻⁶ ，FRSATA ^{15,45-47}
	粒界割れ		
	粒内割れ		
環境割れ	水素誘起割れ		
	水素擬へき開		

	テラス	
	ウォール	
	応力腐食割れ	3次元解析 ^{15, 21-24} , 粒界・粒内割れの自動判別 ³⁻⁶
	APC型 SCC	3次元解析 ^{15, 21-24}
	HE型 SCC	3次元解析 ^{15, 21-24}
	ファンシェーブパターン	
	ステップ	
	ストライエーション状模様	
	方位性ピット	
	腐食ピット	3次元解析 ¹⁵
	プラトー	
疲労破壊	ストライエーション	3次元解析 ^{15, 20} , FFTによる幅の定量評価 ^{5, 6} , 破面率による応力推定 ^{15, 51} , FRSATA ^{15, 45-47} , 第3,4章
	延性ストライエーション	3次元解析 ^{15, 18, 20} , 破面率による応力推定 ^{15, 51} , FRSATA ^{15, 45-47} , 第3,4章
	脆性ストライエーション	3次元解析 ^{15, 20} , 破面率による応力推定 ^{15, 51} , FRSATA ^{15, 45-47} , 第3,4章
	タイヤトラック	
	ラブマーク	
	ストレッチゾーン	3次元解析 ^{18, 19} , FRSATA ^{15, 45-47} , 第4章
高温破壊	クリープ	第5章
	ボイド	フラクタル特性の違いと破壊モードの関係 ⁵⁰ , Aパラメータ法 ¹⁵
	キャビティ	

これまでの研究では、個々の詳細な破壊に対応した解析手法は別として、主に3次元解析・疲労破面の数値解析・破断面の性状分類の解析・破断面のフラクタル性と破壊機構を関連付けるフラクタル解析が主流であった。次に個々の解析に関する現状と問題点について述べる。

破断面の3次元解析

3次元解析は2枚のステレオ画像から、ステレオマッチング等を用いて破断面の3次元像を構築し、ミクロ領域の3次元形状を実スケール表示することを可能にし、破断面の理解を役立たせる解析である^{6, 10, 14, 15, 18-25, 44}。TOPO-SEMが登場して以来、ステレオマッチングを用いなくても、3次元形状を構築できるようになった¹⁶。しかし、TOPO-SEMから得られる像は特に破断面のように凹凸が激しい形状に対して、平滑化された形状として測定されるため、形状理解のために十分に活用されなかった。そこで、ステレオマッチングから得られた3次元形状と、TOPO-SEMから得られる形状とを組み合わせることで3次元形状を得る技術⁵²等

が開発されてきた。また，3次元形状を使った解析に FRASTA (FRacture Surface Topography Analysis) 解析⁴⁵⁻⁴⁷がある。破壊時に形成される破断面は必ず共役破断面であることから，両者の3次元形状を測定し，仮想空間内で再度組み合わせ，引き離すことで破壊現象を再現させる技術である。しかし，FRASTAは，共役破断面の組み合わせが，特に塑性変形をしている場合に，非常に困難であり，実用化は困難であった。これに対しても，3次元没入空間を用いて上下破断面のマッチングを行う研究⁵³も行われている。

疲労破断面の数値解析

フーリエ解析は一般に画像の周期性を評価する解析手法である⁵⁴。フラクトグラフィの分野において，特に疲労破面のストライエーションは，き裂進展方向に垂直な縞模様 (Fig.1.2) であり，周期性を持って評価することが可能な模様である。

ストライエーションを定量的に評価する際に求める特徴量には，

- ストライエーションの幅
- ストライエーションの高さ
- ストライエーション破面率 (ストライエーションの領域が破断面に占める割合)

がある。

ストライエーションの幅はき裂進展速度と対応しているため，幅を評価することで，き裂進展速度がわかり，き裂進展曲線と Paris 則から ΔK が得られる。従って，フーリエ解析によるストライエーションの周期性の特性化^{5,6}はフラクトグラフィのなかでも重要な技術である。しかし，ストライエーションの幅から ΔK はわかるものの，応力比 R は推定できないため，作用応力推定まで含めると幅の解析だけでは不十分である。また，大塚ら^{15,55}はストライエーション破面率と ΔK の関係を示している。また，注意しなければならない点として，フーリエ解析で評価をしているのは，あくまで周期性であり，周期性があるからと言って，ストライエーションが存在していて，疲労破壊の破断面であるとは限らないということである。疲労破面であるか否かは，その他の破損時の状況や構造物の構造等，複合的な要素から考察しなければならない。

応力比 R をストライエーションから推定する手法の研究も行われている。Jiang は⁵²，ストライエーション破面率と応力比に相関関係があることを示した。また，古川⁵⁵は，ストライエーションの高さ (H) と幅 (S) の比 (H/S) と応力比 R の相関関係を示した。しかしながら，これらの手法では，ストライエーション破面率もストライエーションの高さも目視による判断である。定量的に求める手法には未だ十分なものが提案されていない。高さは TOPO-SEM や先に述べたステレオマッチングで解決は可能と考えられるが，特に破面率に関しては，これまでにある手法の延長での解決は難しい。従って，破面率を定量的に評価する手法の開発が必要である。

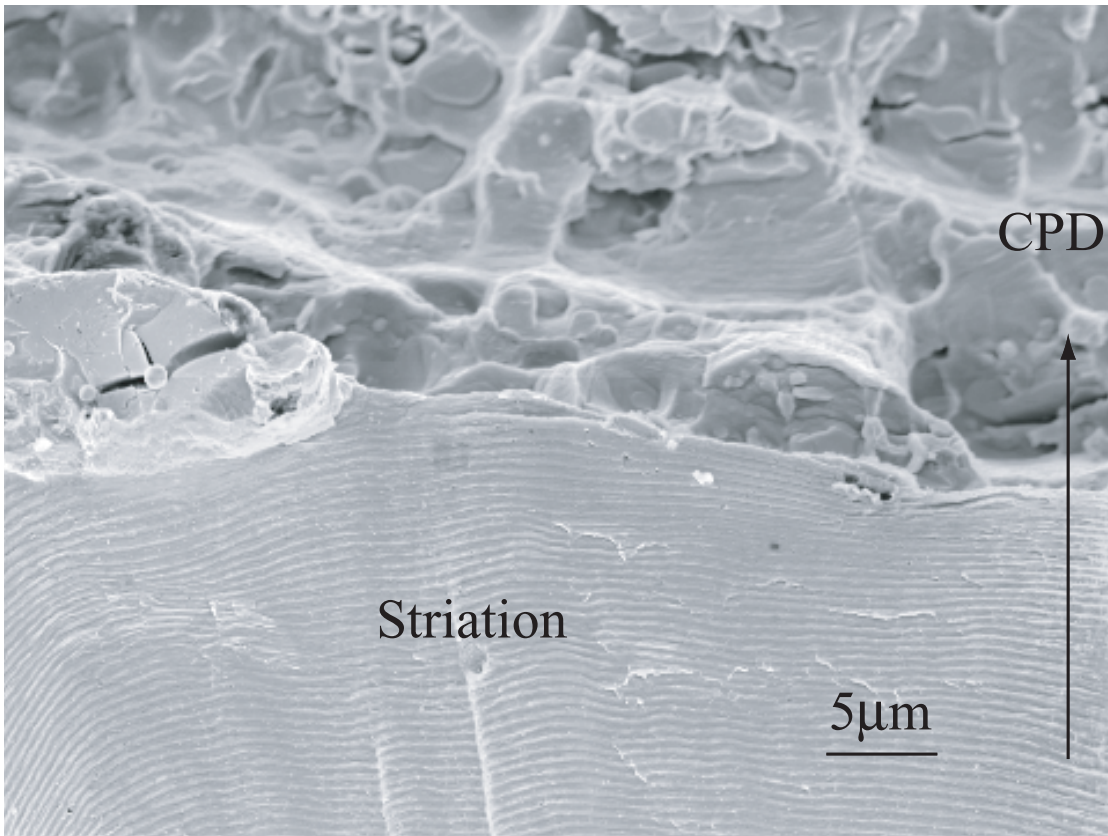


Fig. 1.2: Striation. Material: A2017-T4. Magnification observation = 2000. CPD indicates the Crack Propagation Direction.

破断面の性状分類の解析

テクスチャ解析は、破断面に複数存在する破面様相を分類するために行う解析である。一般には次のプロセスで解析が行われる。

1. 画像を小領域に分割
2. 個々の小領域における特徴量
3. 特徴量の分布から、破断面様相を分類

破断面解析におけるテクスチャ解析の代表的なものは、駒井ら³⁻⁶の研究である。Fig.1.3 にその例を示す。駒井らは、繰返し SCC 破面に存在する粒界割れ (IG) と粒内割れ (TG) を判別するテクスチャ解析の手法を提案した。しかし、ここで提案された手法には 3 つの問題点がある。それらは、

1. 小領域の大きさの決定に観察者の主観が入り、結果に熟練度が影響する
2. 使用する特徴量の選定は観察者が行うため、結果に観察者の熟練度が影響する
3. 特徴量の分布に対して、しきい値を設定し領域を分割しているが、しきい値は大津法^{56,57}等の画像処理的な手法を用いており、しきい値と破壊機構の関係が不透明

という点である。

一般に画像の局所的な特性の違いから、画像を複数の領域に分割するための手法は多く提案されている⁵⁶⁻⁵⁸。これらの手法は、例えば山と空といった明瞭な境界がある画像を分割するにはふさわしい手法である。しかし、破断面は破壊機構が徐々に遷移する以上、明瞭な境界というのは存在しにくく、何らかの遷移領域を含んだ面として形成されている。従って、破断面画像は明瞭な境界よりも、むしろ遷移領域を含んだ画像となる。つまり、従来の手法をそのまま適用しても分類は困難である。

そのため、特徴量の分布に対して、人の判断でしきい値を導入する、もしくは自動的にしきい値を定めてる手法よりは、むしろ、破壊機構を反映した特徴量を設定し、その特徴量の分布から人の判断や自動的にしきい値を決める手法の方が、破壊機構を特性化する観点や、初心者への解析の支援の観点から利点があるといえる。

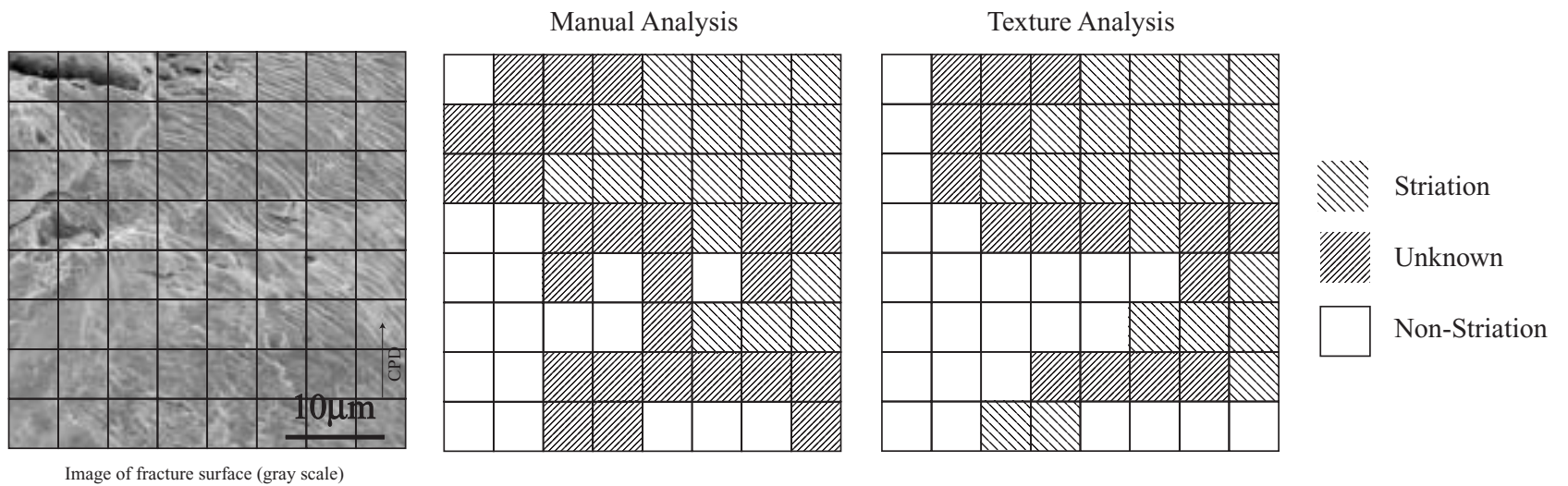


Fig. 1.3: Illustration of texture analysis of fracture surface

また、近年の研究(2002年)では、Petrらが数値解析を用いて A508 Cl.3 のシャルピー衝撃試験片の脆性破面率の計算を行っている⁵⁹。この中で、Petrらは、1試験片の破断面から 800 枚の写真を撮影し、個々の写真がディンプルのある延性破面か、へき開面のある脆性破面かの判定を行い、破面率の計算を行っている。従って、判断に任意性があり、かつ破面率の計算に膨大な作業が必要となっている。

破断面のフラクタル性と破壊機構を関連付けるフラクタル解析

破断面解析の一つにフラクタル解析がある。フラクタルの概念を破断面に適用し、破断面の複雑さを計測することで、破壊機構との関連を調べる手法である。一般的には形状の複雑さを定量化したフラクタル次元という値を持って破断面の評価を行う手法である。フラクタル解析自体は、1984年に Mandelbrot²⁷が、シャルピー衝撃試験片破断面の脆性破壊の部分のフラクタル次元と、吸収エネルギーの関係を見出したのが最初である。

それ以降、様々な研究が行われてきた^{27, 29-31, 40, 48-50, 60}。従来の研究は、破断面の写真や、縦断面のプロファイルのデータを作成し、その複雑さを計算する研究が主であった。すなわち、破断面がフラクタル性を満たすことが仮定されていた。しかし、破断面は数学的にフラクタル性を持つ図形ではない。なぜなら、フラクタル図形であるならば、観察倍率にかかわらず同じ様相が見えるはずである。しかし、Fig.1.1の左側の破断面画像に示したように、破断面はフラクタル図形ではなく、観察倍率を上げていけば、ある観察倍率を境に単純な形状に変化する。すなわちフラクタル性が失われる。しかし、従来のフラクタル解析は、倍率についての取り扱いが無く、観察者の主観に依存していた。つまり、求めていたフラクタル次元は、観察者の経験に依存した値であったと言える。従って、フラクタル次元を求める際には、観察倍率を考察の要素に入れなければならない。しかし、従来の研究は、そのことを考慮せずに行われてきた。従って、破壊機構とフラクタル性の間に明確な関係を調べるためには、観察倍率とフラクタル次元との関係をきちんと考察する必要があると考えられる。

以上に述べてきた解析は大量の破断面データを必要としたため、かつてはスーパーコンピュータに頼らなければいけないという側面があった。そのため、1破断面画像から1つの情報を引き抜くに過ぎず、特に破断面全体の中に複数破壊機構が存在するような破断面の分類は困難であった。

しかし、近年のコンピュータの目覚ましい進歩により、かつてのスーパーコンピュータ並みの性能がパーソナルコンピュータで実現されるようになり、破断面の局所的な性質を分類することが可能になった。その為、近年の数値破断面解析の研究は主に破断面の局所的な性質を特性化する研究が行われている^{6, 26}。

1.2 研究の目的

数値破断面解析は、Table:1.1にも示したように多くの手法が提案されてきた。しかし、これまでに開発されてきた数値破断面解析手法は、専ら1破断面に対し、1つの特徴量を計算し、その性状の違いを論じるのが大半であった。従って、前述のようにコンピュータ資源の問題も含め、破断面の中の局所的な性質の違いを計算し、破断面性状の違いを論ずるものは少なかった。

本研究は、破断面性状の様相の遷移に着目し、遷移する際の要件と破壊機構の間に相関関係があると考え、遷移する領域から破壊機構を推定するための技術を開発することを目的とする。これらの開発により、先にも述べた破断面解析の現在抱えている問題点である、

- 従来の観察者主導の解析結果に対する信頼性の付与
- 解析者減少にともなう解析技術の伝承

の中で、局所性に関しての解決を目的とする。

破断面の観察を行う際に重要なパラメータとして考えられるのは、

- 破断面様相
- 場所
- 観察倍率

である。

従って、局所的な様相の遷移を特性化するという観点からすると、画像内の位置による様相の違い(位置の局所的評価)と、観察倍率等のスケールによる様相の違い(空間スケールの局所的評価)が考えられる。本論文では、これらの様相の違いを評価するために、局所パラメータを導入する。そして、局所パラメータの有効性を検証する。破断面画像は、前述のように、明確な境界を持たない画像であることから、位置の局所的評価や空間スケールの局所的評価において、完全に人間の主観を排除することは困難であり、人間が判断しなければならない要件が手法内に導入される場合もある。しかし、本研究は、極力、人間の熟練度に依存しない手法を提案することで、結果に対しての客観性の向上することが目的である。

位置の局所的評価を行う目的

画像内の位置による局所性は、即ち、破断面画像から、破壊機構に対応した破断面様相を分類することである。破断面様相を分類することで明らかになるパラメータに破面率がある。

例えば、破断面から破壊機構を推定する為には破面率がキーパラメータである事が多い。例えば、疲労破断面内に広がるストライエーション破面率から作用応

力や応力比の推定を行うことが可能であると示されている^{51,52}。また、シャルピー衝撃試験では、脆性破面率が材料の脆性延性遷移温度の特定に有効である^{10,15}。また、ストレッチゾーンの幅は、破壊じん性値と相関があり、破断時の作用応力推定に有効である^{18,19}。つまり、破断面の位置に関して、局所的性質の違いを計算し、破断面性状の分類を行うことが数値破断面解析において重要な役割を担っていると考えられる。しかしながら、これらのファクターは現在のところ、肉眼による観察が主体であり、観察者の主観に依存することが多い。

以上の事から、空間での局所性を数値解析の観点から特性化する意義は大きい。本研究では、位置の局所的評価を行うために、破面に特化した位置の局所パラメータを提案する。そして、実破面に対し、局所パラメータを用いて破面率やストレッチゾーン幅の計算を行い、局所パラメータの有効性を検証する。

空間スケールの局所的な評価を行う目的

また、空間スケールの局所的な評価に関しては、前述のフラクタル解析で述べたように、破断面をフラクタルの概念で取り扱う際の、観察倍率に関する取り扱いが十分になされていないことから、観察倍率の観点から破断面のフラクタル性を考察する必要がある。スケールと破断面様相の観点から特性化することにより、明らかになるものとして、フラクタル性を示す限界のスケールがあり、限界のスケールは破壊機構との相関が強いと考えられる。従って、空間スケールの局所的評価を行う意義は大きく、本研究の目的とする。本研究では、空間スケールを局所的に評価するために、観察倍率とフラクタル次元の関係を調べる手法を提案する。従来は、観察者の主観に基づいた観察倍率で得られた破面の画像や3次元形状を元に、フラクタル次元を求め、破壊機構との相関を求めていた。本研究では、空間スケールの局所パラメータとして、観察倍率に依存したフラクタル次元を求め、破壊機構に関する考察を行う。

以上のことから、本研究は、位置と空間スケールについて、局所パラメータを導入し、破面の評価手法を提案したうえで、手法の検証を行う。空間的な局所性の変化に関しては、破断面画像の周期性に着目し、局所性の特性化を行う手法を提案する。スケールの局所性の変化については、前述のフラクタル解析の概念を利用した手法の提案を行う。

1.3 論文の構成

本論文は6章から構成され、その概要を Fig.1.4 に示す。

第1章では、本論文の研究の背景と破断面解析分野における論文の位置付けを述べた。次に、従来の破面解析における問題点を挙げ、研究目的を明確にした。

第2章では、まず本論文で提案する3つの手法の適用に関しての説明を行う章である。本論文で提案する手法は、

Title:局所パラメータの導入による破面の特性化に関する研究

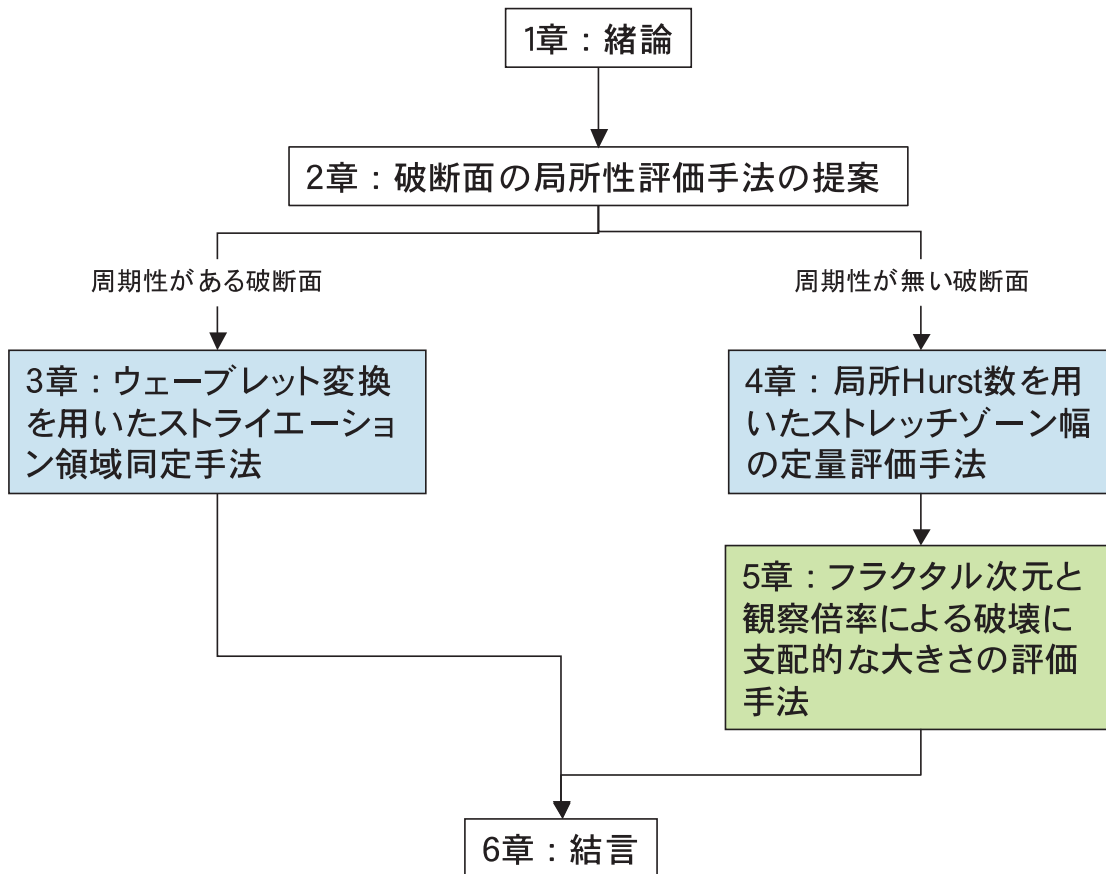


Fig. 1.4: 本論文の構成図

1. 空間の局所的評価を行う手法

- 破断面に周期性がある場合の特性化手法
- 破断面に周期性が無い場合の特性化手法

2. スケールの局所的評価を行う手法

である．これらの手法を適用する際のフローチャートを示すことで，本論文で提案される個々の手法を統括させる意味を持つ．

第3章と，第4章は空間の観点からの局所性を特性化する手法を提案する．特に，破断面画像の局所的な周期性に着目して特性化を行う手法を提案する．

第3章では，破断面画像に周期性がある場合の，解析手法について述べる．周期性がある場合は，疲労破面の可能性が高く，周期性は疲労破面の典型的な模様であるストライエーションを反映していると考えられる．従って，従来行われてきたストライエーションの数値解析を発展させ，破断面におけるストライエーション破面率を計算する手法を提案する．また，手法の妥当性を検証するために，A2017-T4 アルミニウム合金，2.25Cr-Mo 鋼の軸荷重疲労試験破断面に適用した結果を示す．

第4章では，周期性が無い場合に破断面を分類するための手法を提案する．提案する手法は，第5章で述べたフラクタルの概念を応用した Hurst 数⁶¹を利用した手法である．提案した手法は，圧力配管用炭素鋼配管 STPG370 の破壊じん性試験片破断面に適用し，結果の妥当性の評価を行う．

第5章は，空間スケールに関する局所性を評価する手法について提案する．ここで提案する手法は，従来行われてきたフラクタル解析の問題点を解決する手法である．従来の破断面のフラクタル解析では，フラクタルの概念を適用する際に必要な観察倍率に関しての考察が不十分であったことから，観察倍率に関しての考察を行う必要がある．提案する手法は，フラクタル解析により，破断面から破壊に支配的なスケールを同定することを可能にする手法である．提案した手法をチタンアルミ (TiAl) のクリープ・クリープ疲労試験の破断面に対して適用した結果を示す．

第6章は，本論文のまとめである．本論文で得られた結論をまとめと，本研究の展望について述べる．

第2章 破断面の局所性評価手法の提案

2.1 緒言

数値破断面解析の分野の研究は、SEMの登場と、1980年代にスーパーコンピュータの登場により、大きく発展してきた。Table1.1に示したように、破断面を数値解析することで、破断時の荷重や構造部材の環境等、多くの情報を引き出せることがわかってきた。

しかし、これらの手法の多くは、1つの破断面像から1つの情報を引き出す手法が多かった。Fig.2.1に示すような、破断面内に広がる複数の破面様相の分類を行う手法の研究はあまり行われてこなかった。その主な原因は、

- 破断面の数値解析には破断面の詳細な情報が必要
- SEMの解像度が低解像度¹であり、遷移領域を含むような広い領域を高解像度でデジタル化することが不可能

である。遷移領域を同定するためには、SEMが低解像度であることから、高倍率の画像を広範囲に取得し、重ね合わせるしかなく、非常に重労働であり現実的な作業では困難な状況であった。

しかし、近年のIT化の流れの中でパーソナルコンピュータがかつてのスーパーコンピュータ並みの性能を持つようになり、大容量かつ高速な計算が可能になった。従って、破断面の局所的な性質の評価を行うための研究が行われるようになってきた^{3,29}。また、SEMの解像度も高精度精密ステージの開発から、高解像度(最高解像度は16000×12000)になり、遷移領域を含む破断面画像を高解像度でデジタル化することが可能になった。

本章では、破断面の局所性を評価する手法を提案する。従来行われてきた局所性の評価に関する研究について述べ、次に、局所性評価のためのルーティンワークを提案する。

2.2 従来の破断面の局所性評価手法

第1章でも述べたように、本論文では、破断面の局所性について、

¹1997年当時、541×421画素

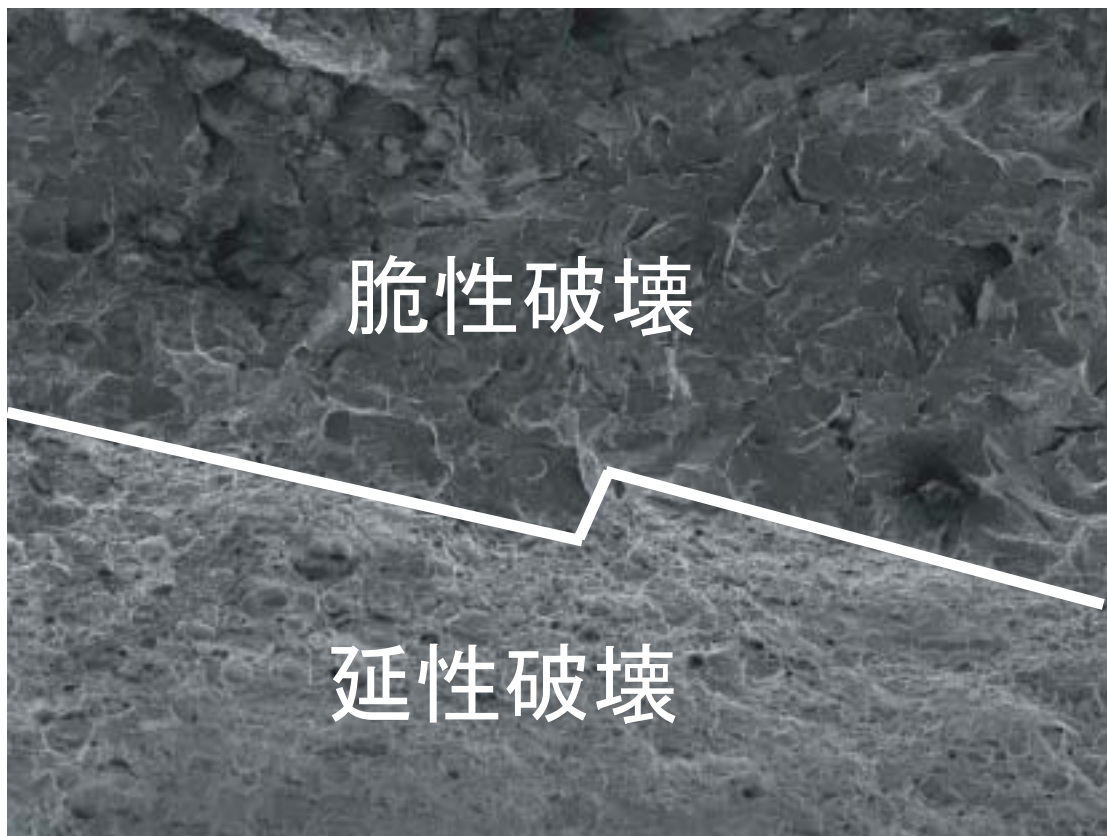


Fig. 2.1: 破断面内に存在する遷移領域(シャルピー衝撃試験破断面)

- 位置の局所的な評価
- 空間スケールの局所的な評価

を行う。

2.2.1 従来の位置の局所性評価手法

空間の局所性の評価の代表例は，駒井ら³⁻⁶の研究である。

これらの研究では，Fig.2.2 に示す手順にて破断面の空間の局所性の違いが評価されている。

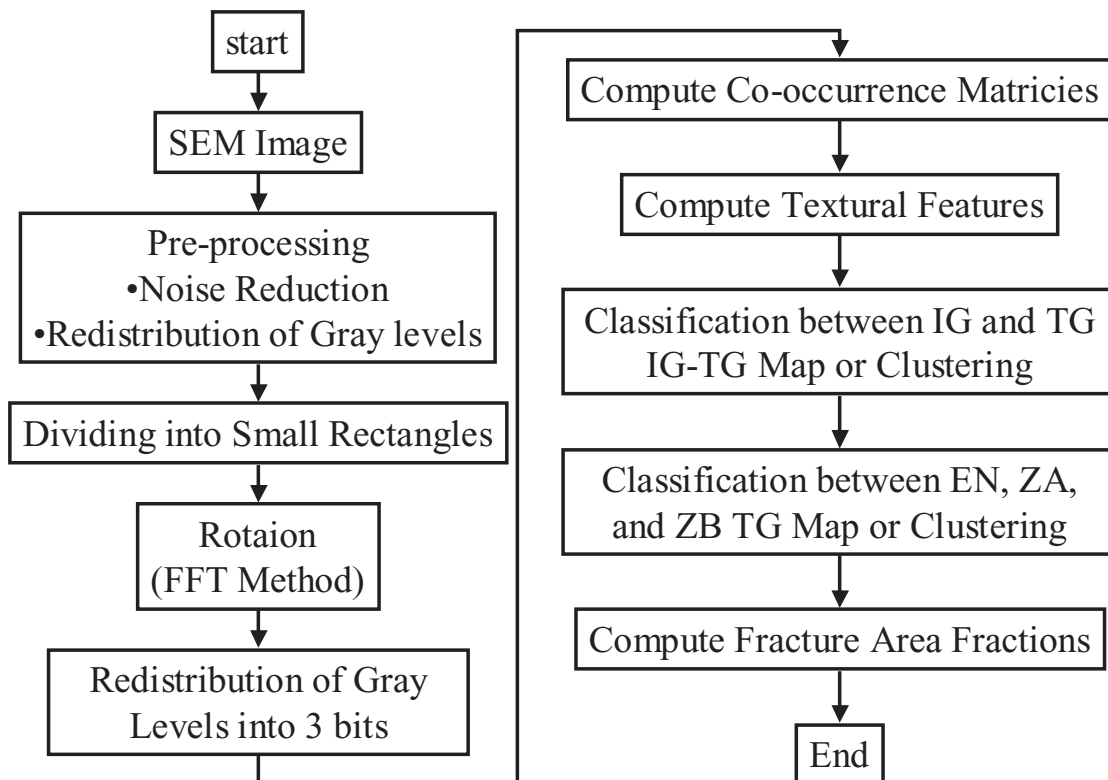


Fig. 2.2: 破断面のテクスチャ解析のフローチャート例³⁻⁶

この手法の特徴は，

1. 画像を小領域に分割する (Fig.2.2 内 4 番目)
2. 画像処理に一般に用いるテクスチャの特徴量を利用する (Fig.2.2 内 7,8 番目)
3. 特徴量の分類には MAP 法，クラスタリング法を用いる (Fig.2.2 内 9,10 番目)

である．

この手法における問題点に関して述べる．

特徴量に関する問題点

この手法で用いられている特徴量は画像処理のテクスチャ解析で一般的に用いられている特徴量である．小領域内の画素値から濃度共起行列や濃度差分行列を求め，次に示す特徴量⁶²の計算を行う．

1. F1 Angular second moment
2. F2 Contrast
3. F3 Correlation
4. F4 Vaiance
5. F5 Inverse difference moment

濃度共起行列 $P(d, \theta, i, j)$ とは、画像内の角度 θ 方向に、距離 d を持つ画素 $A(x, y)$ と $A(x', y')$ の明るさをそれぞれ、 $i(A(x, y)), j(A(x', y'))$ としたとき、 i, j の出現確率として、二次元の行列の形で得られる行列である (Fig.2.3)．従って、 N 値化された画像に関しては $N \times N$ 行列が得られる．また、画像処理において一般に θ に関しては、 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ が用いられる．

上記の特徴量は、この共起行列 $P(d, \theta, i, j)$ を用いて以下の式で計算される．

$$ASM(d, \theta) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P(d, \theta, i, j)^2 \quad (2.1)$$

$$CON(d, \theta) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i - j)^2 P(d, \theta, i, j) \quad (2.2)$$

$$COR(d, \theta) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} ij P(d, \theta, i, j) - \mu_i \mu_j}{\sigma_i \sigma_j} \quad (2.3)$$

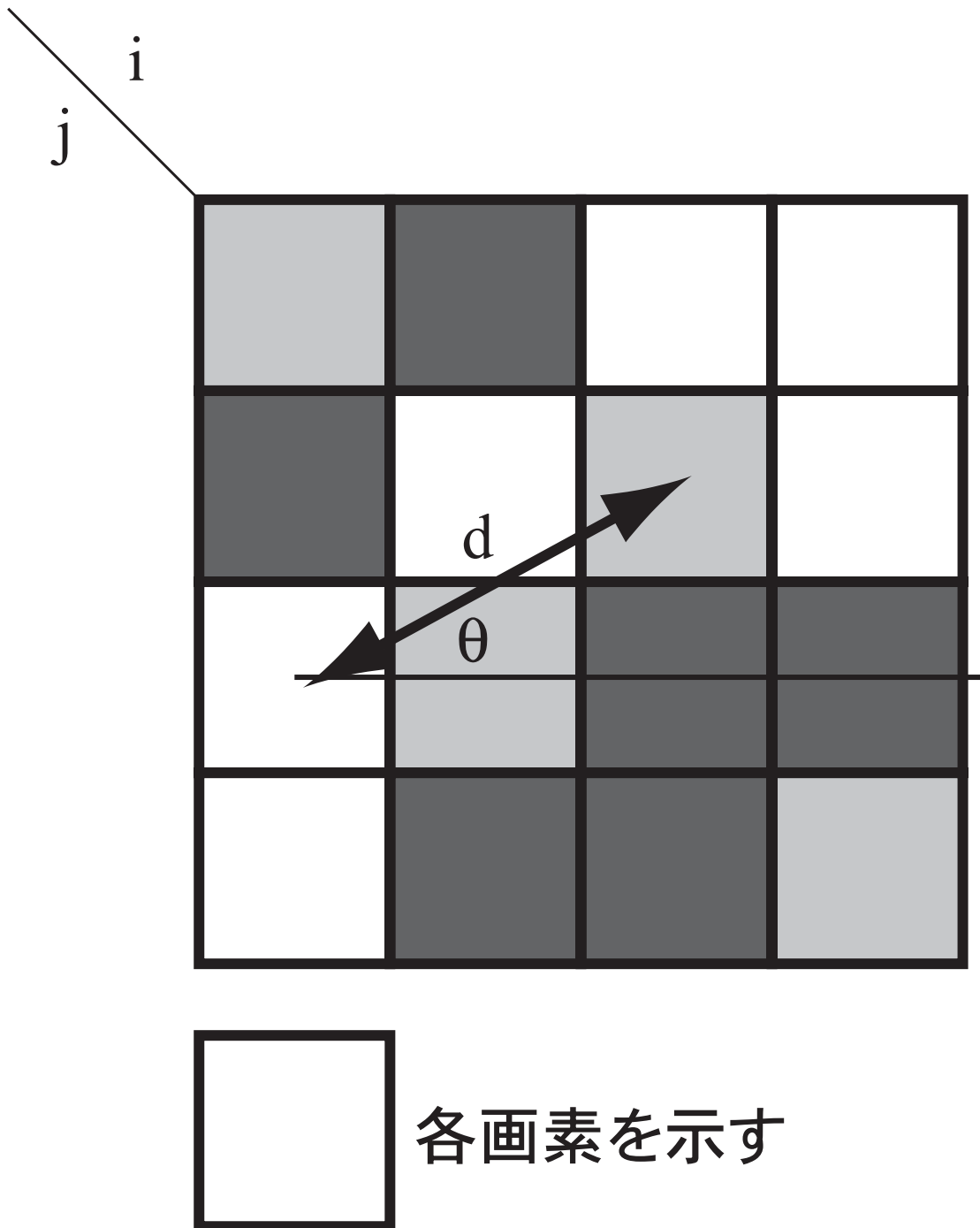


Fig. 2.3: 共起行列

但し

$$\begin{aligned}
 \mu_i &= \sum_{i=0}^{N-1} i \sum_{j=0}^{N-1} P(d, \theta, i, j) \\
 \mu_j &= \sum_{j=0}^{N-1} j \sum_{i=0}^{N-1} P(d, \theta, i, j) \\
 \sigma_i^2 &= \sum_{i=0}^{N-1} (i - \mu_i)^2 \sum_{j=0}^{N-1} P(d, \theta, i, j) \\
 \sigma_j^2 &= \sum_{j=0}^{N-1} (j - \mu_j)^2 \sum_{i=0}^{N-1} P(d, \theta, i, j)
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

$$VAR = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (P(d, \theta, i, j) - Average(P(d, \theta, i, j)))^2}{N^2} \tag{2.5}$$

$$IDM = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{Q_{d,\theta}(i)}{i^2 + 1} \tag{2.6}$$

また、これらの特徴量が示す画像の特徴は次のようなものである^{56,57}。

1. F1 Angular second moment 行列の要素の値が集中した場合に大きな値となることから、テクスチャの一様性を評価。
2. F2 Contrast 行列の値が主対角線から離れて分布する場合に大きくなる。すなわち濃度差が大きいことを示し、画像のコントラストを評価。
3. F3 Correlation 相関は行列の要素の値が主対角線上に分布するとき最大になる。すなわち σ だけ離れた2画素の濃度値を検討していることから、 σ 方向の一様性、つまりテクスチャの方向性を評価
4. F4 Variance 行列の要素の分散を示す。つまり、テクスチャの
5. F5 Inverse difference moment

これらの特徴量は、Fig.2.4に示す山と空といった、明瞭な境界を持つ画像を分類するには適した特徴量である。なぜなら、空に関する特徴量の分布と山に関する特徴量の分布は明瞭に異なるからである。しかしながら、空と雲に関して特徴量を計算した場合、これらの特徴量は、空と雲に分類するには不十分である。なぜなら、完全に空の領域の特徴量と、完全に雲の領域の特徴量は明らかに異なるが、空と雲の境界部分の特徴量に関しては、その両者を補完する値として計算されてしまうからである。

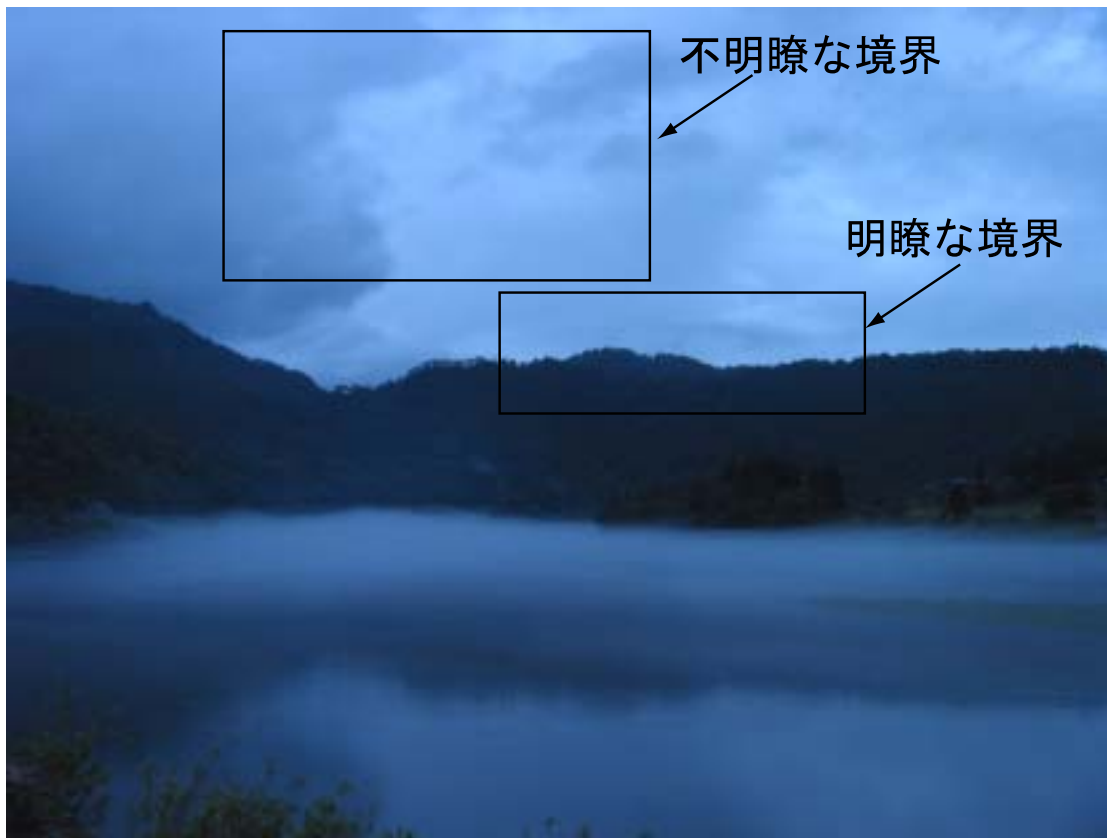


Fig. 2.4: 明瞭な境界と不明瞭な境界の例

Fig.2.5 に、破断面画像を用いて計算した特徴量の例を示す．解析した画像は 256 階調画像であり，大きさは 512×512 ピクセルである．画像は，シャルピー衝撃試験片破断面でき裂進展方向を CPD にて示す．観察倍率は 100 倍である．目視による判断では，下側がディンプルが観察されることから延性破壊領域であり，上側が擬へき開が観察されることから脆性破壊領域と判断される．

この画像を 128 ピクセル四方に分割し，各領域における特徴量を計算した結果を Fig.2.5 に合わせて示す．式 (2.1),(2.2),(2.4),(2.5),(2.6) において， $d = 8, \theta = 0$ を用いて計算をした．計算した特徴量は，前述の F1(ASM),F2(CON),F5(IDM) である．横はき裂進展方向（縦方向）の領域番号に対応している．また，横方向の領域の分割を R0,R1,R2,R3 とし，グラフ内に示す．

Fig.2.5 から，破断面の特徴量は連続的に変化することがわかる．領域の特徴が異なる場合でも，特徴量は明瞭に変化しない．従って，破断面にも同様の特徴があることが示され，破断面画像に関しても特徴量の分布から，明瞭に分類することは困難であると考えられる．

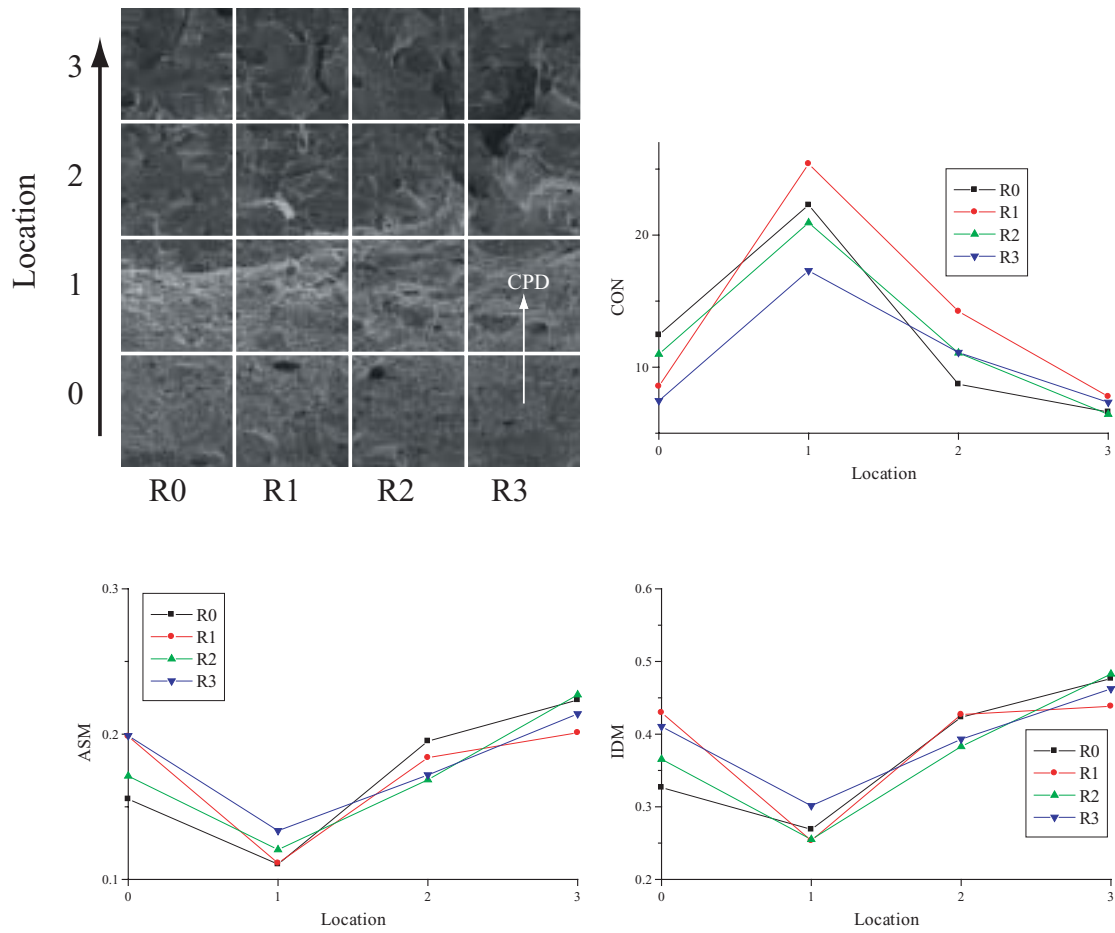


Fig. 2.5: 境界を含む破断面の画像解析における特徴量の分布

特徴量の分類に関する問題点

次に、特徴量の分類に関する問題点について述べる。

一般に特徴量の分布から画像を分類する際に、前述の F1～F5 に述べた特徴量をベクトルの要素とした特徴量ベクトルを設定し、そのベクトルの向きや長さを利用して分類を行う^{56,57}。

Fig.2.2 の中で、特徴量の分布から画像を分類するために、MAP 法とクラスタリング法^{56,57}が用いられている。

まず、この手法を用いる際に、F1～F5 のすべての特徴量を使用するわけではなく、ここでは、試行錯誤的に使用する特徴量を選別し、その上での MAP 法、クラスタリング法の利用となっている。従って、分類に使用する特徴量の選択に任意性が入ってしまう点が問題である。

また、MAP 法、クラスタリング法、どちらを用いた場合においても、前述のように特徴量が連続的に変化してしまうと、数値的な分類は困難である。MAP 法は、特徴量ベクトルのなかから、2 要素を抜き出し、平面状に並べて (MAP) その傾向を見ることで、境界線をひき、画像の分類を行う手法である。破断面に対して適用した場合、特徴量が連続的に変化する性質から、分類は人の手により行われており、この段階で任意性が入る可能性を持ってしまう。また、特徴量は、画像の特徴を表すものの、破断面の特徴を取ることを目的とした特徴量では無いことから、人手による分類結果の信頼性にも問題が生じると考えられる。

クラスタリング法は、 n 次元の特徴量ベクトルを n 次元空間にプロットし、いくつかのグループ (クラスタ) に分かれることを利用し、1 つのクラスタが 1 つの画像の特徴であると考え分類する手法である^{56,57}。クラスタリング法を用いる際の問題点は、前述の特徴量ベクトルのどの要素を使うのかに任意性がある点と、

以上のことから、画像処理の特徴量のみを用いて分類を行う際には、人手による任意性が、分類過程のなかで多く含まれてしまい、特に、

- 特徴量の選定
- 特徴量ベクトルの境界の設定

に関して任意性を持ってしまい、改善する必要がある。

2.2.2 従来の空間スケールの局所性評価手法

破断面画像を表示する場合、観察倍率や、もしくはスケールを入力する必要がある。スケールの入力により始めてその画像に意味が出て、破壊機構の推定が可能になる。しかしながら、数値破断面解析において、スケールが解析の要素として取り扱われてくることはなかった。なぜなら、これまでの解析は、主に、観察したい対象が決まっており、それに適切なスケールを当てはめていたからである。

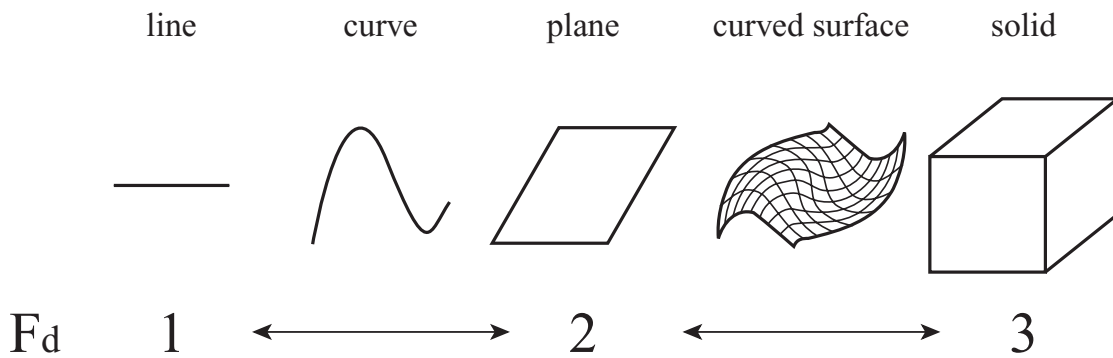


Fig. 2.6: フラクタル次元の概念

一方、破断面の解析の一つにフラクタル解析がある。第1章にも述べたように、フラクタルの概念を破断面に適用し、破断面のスケールによらない複雑さを定量化する手法である。定量化するには、フラクタル次元と呼ばれる次元を使用し、複雑さを評価する。従って、フラクタル次元はスケールに因らない値として定義されているが、観察画像にはスケールが存在していることから、フラクタル次元を用いる場合には、観察倍率やそのスケールを合わせて考察しなければならない。次にその理由について述べる。

フラクタル次元とは、線を1次元、面を2次元、立体を3次元としたとき、その間を補う非整数の次元値である。Fig.2.6に示すように、曲線のフラクタル次元(F_d)を $1 < F_d < 2$ とし、複雑であれば2に近い値をとる。また曲面のフラクタル次元(F_d)を $2 < F_d < 3$ として、複雑な曲面であれば3に近い値である。

従来の研究の中で、フラクタル次元は次に示すような手法を用いて求められてきた。

破断面の縦断面プロファイルのフラクタル次元を求める場合、Fig.2.7に示すように破断面を大きさ X の正方形で覆ったとき、プロファイルを含む領域の数を N とすると、

$$N = X^{-F_D} \quad (2.7)$$

の関係が成立する場合に、縦断面にはフラクタル性があり、 F_D をフラクタル次元として求めていた²⁷。それ以外では、フーリエ変換を使用したフラクタル次元算出法もあり、周波数 f のパワースペクトルを $S(f)$ とすると、

$$S(f) \propto f^{-5+2F_D} \quad (2.8)$$

の関係があるとき、破断面にはフラクタル性があり、 F_D をフラクタル次元として計算してきた⁷。

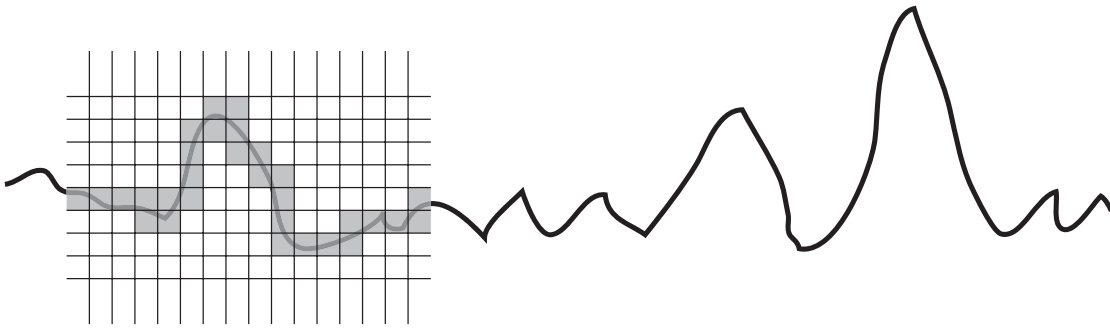


Fig. 2.7: 粗視化の度合いを変化させることで、プロファイルの長さを計測する

つまり、フラクタル次元は、ある測定する測定量 (例えば長さ・式 (2.7)における N) と、当てはめる基準長さ (式 (2.7) における X) の関係がべき乗則を満たしているときに、成立する値である。Fig.2.8 に、フラクタル性が成立する図形と、フラクタル性が成立しない場合の図形における基準長さとの測定量の関係を示す⁷。

Fig.2.8 からわかるように、半径 8km の円 (非フラクタル図形) については、測定量と基準長さの関係がべき乗則を満たしていない。逆に、海岸線といったフラクタル図形は、べき乗則を満たしていることがわかる。しかし、これらは Fig.2.8 の横軸 r をみてもわかるように基準長さの単位が 1km ~ 10km の範囲、つまり高々 10 倍の範囲の解析結果であり、例えば、数 μm ~ 数 km の基準長さ範囲でのフラクタル性を考察した場合に、海岸線がフラクタル性を持つか否かは不明である。逆に、半径 8km の円に関して言えば、Fig.2.8 から 1km ~ 8km 程度まではべき乗則が成立しており、フラクタル性の無い円がフラクタル性を持ってしまう。従って、これらのことから、フラクタル性を議論する際には、かならず基準長さの範囲を考察しなければならない。

破断面のフラクタル性に関しては、SEM を用いることで、ミリメートルのオーダーから、マイクロメートルのオーダーまでの観察、つまり 10^3 倍の範囲における議論が可能である。従って、破断面のフラクタル性を議論する際は、より広範囲の基準長さを用いて考察することが可能であることから、基準長さの範囲の取り扱いには、より注意する必要があると考えられる。

しかしながら、従来のフラクタル解析では、観察倍率等のスケールに関する取り扱いが十分ではなかった。従って、本論文では、基準長さの一つでもある観察倍率とフラクタル次元を併用することで、破断面のフラクタル性を考察する手法を提案する。

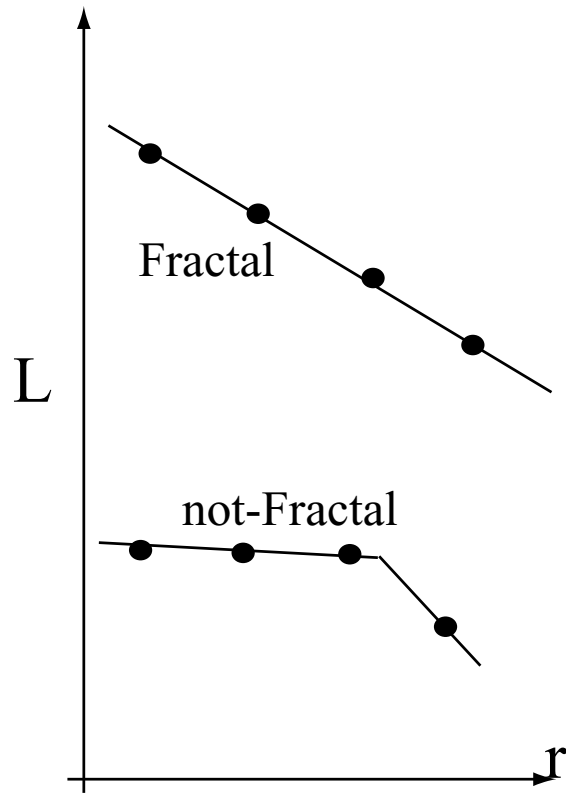


Fig. 2.8: フラクタル性が成立する場合と成立しない場合における，測定量と基準長さの関係⁷

2.3 破断面の局所性評価手法

2.3.1 局所パラメータを導入した，破面の位置と空間スケールの特性化手法

本論文では，これまでに述べた，位置と空間スケールの局所性を特性化するために，局所パラメータを導入した特性化手法を提案する．局所パラメータとは，破面性状について位置の観点と空間スケールの観点から特性化するために必要なパラメータである．

本論文では，

- 破面の位置と性状の関係を示すパラメータ
- 破面の空間スケールと性状の関係を示すパラメータ

の2種類の局所パラメータを提案する．これら2点に関して提案する理由と利点については，3.2，3.3で述べる．

本論文では，位置と性状の関係を示すパラメータとして，

- ストライエーション度 (第3章)
- 2次元局所 Hurst 数 (第4章)

を提案する．ストライエーション度は，疲労破面に観察されるストライエーション領域の画像内における分布を特性化するための局所パラメータである．ストライエーション領域の分布を特性化することで，ストライエーション破面率の計算ができ，破断時の作用応力の定量的な推定が可能になる⁵¹．また，Hurst 数は，破面の複雑さを評価するパラメータである．2次元局所 Hurst 数は，破面の場所における複雑さの違いを評価するためのパラメータである．複雑さの違いを評価することで，脆性延性遷移領域²⁹やストレッチゾーンの評価⁶³が可能になる．

次に，空間スケールと性状の関係を示す局所パラメータとして，観察倍率毎のフラクタル次元 (第5章) を提案する．フラクタル次元は，形状の複雑さを評価するパラメータである．幾何学的に厳密なフラクタル図形は観察倍率に関わらず一定の値を示す⁷．破面も観察倍率が低倍率の時は複雑な形状を示すことから，フラクタル次元を用いて破壊機構との関係を調べる研究²⁷が行われてきた．本論文では，観察倍率毎のフラクタル次元を提案し，この局所パラメータにより破面に存在する特徴的な長さを調べる．

以上に示した局所パラメータを，素性がよくわからない破面画像や破断面に適用する際のフローチャートについて，Fig.2.9に示す．

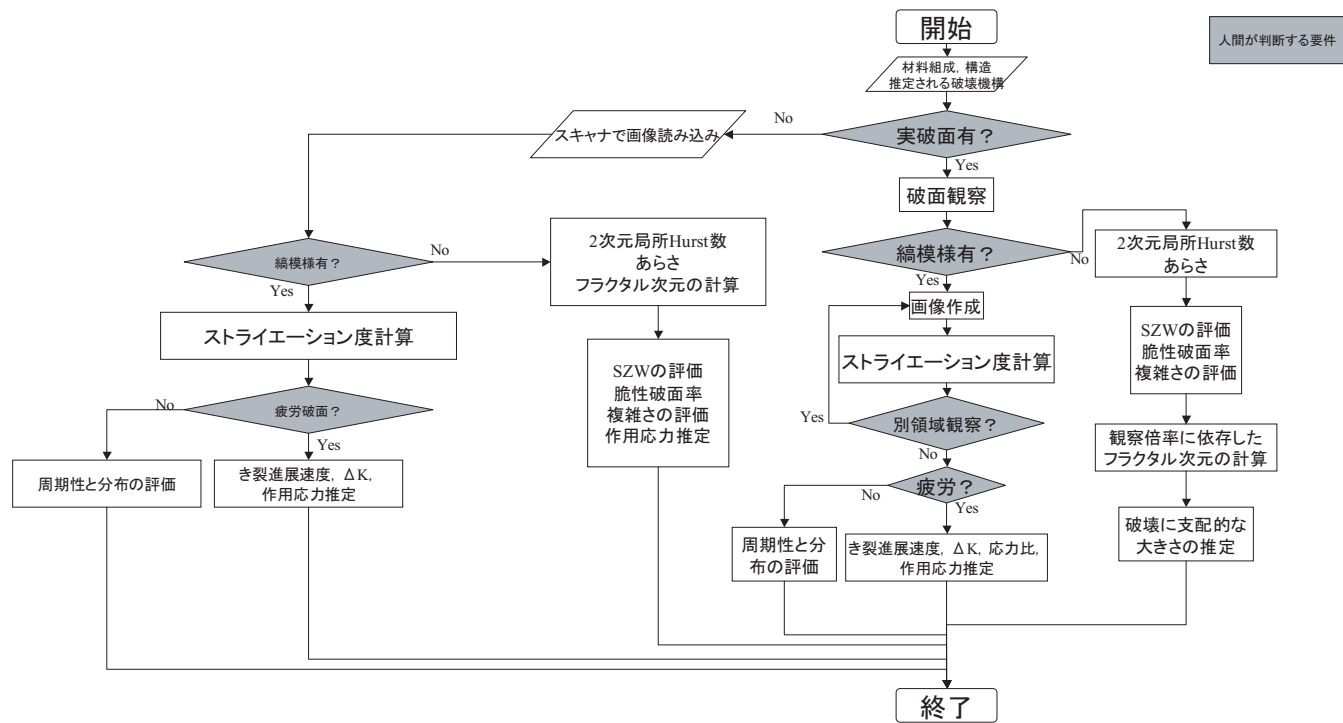


Fig. 2.9: 素性がよくわからない破面に対する局所パラメータ適用方法

破面画像のみが存在している場合

破面画像のみが存在している場合（実破面が存在していない場合）、まず、破面を数値処理するためにスキャナを用いてパソコンに読み込む。

次に、破断時の情報が残っていれば、その情報を利用し、また破面に縞模様が観察されるか否かを検討する。縞模様が観察される場合は、ストライエーション度を計算する。これにより、破面画像に特徴的な周期性と、その周期を持った領域の評価が可能になる。

従って、破断時の情報を含め、破面が疲労破面である場合は、ストライエーションの波長がわかることから、き裂進展速度が推定される。従って、Paris 則⁶⁴を用いることで ΔK が推定され、破断時の情報から作用応力の推定が可能になる。

一方、疲労破面で無い場合でも、縞模様が観察される場合がある。例えば、延性破壊のすべり面分離やさざ波模様¹⁴が相当する。これらの縞模様の間隔は、ストライエーション度を求める際に評価することができる。

一方、ストライエーションが観察されない場合は、疲労破面では無い可能性が高いため、2次元局所 Hurst 数の計算を行う。これにより、破面内の複雑さの分布が計算できるため、例えばストレッチゾーンの評価や、脆性破面率等が評価でき、作用応力が推定できる。

画像しかない場合は、観察倍率毎のフラクタル次元の計算は出来ないため、破面に特徴的な長さの評価を行うことはできない。

破面が存在している場合

実破面が存在している場合、まず、フラクトグラフィのルーティンワークに則り¹⁵、破面の観察を低倍率から高倍率にわたり観察を行う。一般的には、SEM を用いて 30 倍～30000 倍くらいの観察を行う。

その際に、縞模様が観察されるようであれば、画像の作成を行い、ストライエーション度を計算する。破面全体にわたりストライエーション度を計算する。疲労破面である場合は、き裂進展速度やストライエーション破面率がわかるため、 ΔK 、応力比がわかり、作用応力が推定される。それ以外の縞模様の場合、破面画像のみの解析の箇所にも記したように、すべり面分離やさざ波模様¹⁴の間隔の定量的な評価が行える。

一方、破面に縞模様が観察され無い場合、2次元局所 Hurst 数を用いて、破面の複雑さの評価を行う。破壊機構が遷移した場合、破面には必ず遷移領域が観察されるため、破面の複雑さも変化する。従って、2次元局所 Hurst 数により複雑さの違う領域を評価することで、例えば、ストレッチゾーンの評価により作用応力推定を行うことや、脆性破面率を求めることで、吸収エネルギーの推定を行うことが可能になる。

また、観察倍率毎のフラクタル次元を求めることで、破面に特徴的な長さを定量的に評価することができる。このパラメータにより、例えば粒界破壊の破面が

あった場合、破壊に特徴的な長さは結晶粒径に依存することから、このパラメータを用いることで、破面の特徴的な大きさの違いを評価できると考えられる。

以上のことから、破面様相と、本論文で提案する局所パラメータと推定される破面の特徴についての関係を Table.2.1 にまとめる。

Table. 2.1: 局所パラメータと定量化する破面の特徴の関係

破壊機構	マイクロ破面様相	ストライエーション度	2次元局所 Hurst 数	観察倍率毎のフラクタル次元
延性破壊	ディンプル	×	ディンプル底の位置 延性破面率, ディンプルの形状, ディンプルの大きさ	ディンプルの大きさ
	すべり分離破面	縞の間隔	×	×
	蛇行すべり	縞の間隔	×	×
	さざ波模様	縞の間隔	×	×
	フルーティング	縞の間隔	×	×
脆性破壊	へき開ファセット	×	脆性破面率, 複雑さの評価	ファセットサイズ
	リバーパターン	×	×	×
	タング	×	×	×
	テアリッジ	×	×	×
	擬へき開	×	脆性破面率, 複雑さの評価	ファセットサイズ
	粒界割れ	×	脆性破面率, 複雑さの評価	結晶粒サイズ
	粒内割れ	×	脆性破面率, 複雑さの評価	結晶粒サイズ
環境割れ	水素誘起割れ	×	脆性破面率, 複雑さの評価	結晶粒サイズ
	水素擬へき開	×	脆性破面率, 複雑さの評価	結晶粒サイズ
	テラス	×	×	×
	ウォール	×	×	×
	応力腐食割れ	×	脆性破面率, 複雑さの評価	結晶粒サイズ
	APC 型 SCC	×	脆性破面率, 複雑さの評価	結晶粒サイズ
	HE 型 SCC	×	脆性破面率, 複雑さの評価	結晶粒サイズ
	ファンシェーブパターン	×	×	×
	ステップ	×	×	×
	ストライエーション状模様	縞の間隔, 破面率	×	×
	方位性ピット	×	×	×
	腐食ピット	×	×	×
	プラトー	×	×	×

疲労破壊	ストライエーション	ストライエーション幅, ストライエーション破面率	×	×
	延性ストライエーション	ストライエーション幅, ストライエーション破面率	×	×
	脆性ストライエーション	ストライエーション幅, ストライエーション破面率	×	×
	タイヤトラック	×	×	×
	ラブマーク	×	×	×
	ストレッチゾーン	ストライエーション領域	ストレッチゾーン幅	×
高温破壊	クリープ	×	複雑さの評価	結晶粒サイズ
	ポイド	×	ポイドの大きさ, 位置, 数	ポイドの大きさ
	キャビティ	×	キャビティの大きさ, 位置, 数	キャビティの大きさ

2.3.2 遷移領域を評価する理由

次に、破面様相の遷移領域を同定することが必要な理由について述べる。

構造物が破壊に至るまでには、仮に単一の破壊機構であれば、破面様相にあまり変化は無く、例えば破断面にへき開面が観察されれば、脆性破壊である可能性が高く、ディンプルが出ていれば延性破壊である可能性が高い。住吉らは、へき開ファセットの数値解析を行っている²⁸。つまり、これらの破断面内が単一の破面様相で支配されている場合の破壊の評価手法は既に大半が確立されている。しかし、前述のように遷移領域を同定する手法については未だに確立されていないのが現状である。

破面解析の中で遷移領域の同定が必要な場面は多い。様相の遷移領域が明らかになることで、わかることは破面率等である。破面解析の中で破面率等が必要とされている例を挙げると、例えば、疲労破面におけるストライエーション破面率には、応力比や作用応力の推定が可能であることが示されている^{51,52}。また、シャルピー衝撃試験の中で、脆性破面率は、材料の脆性延性遷移温度の決定に重要なファクターである^{14,15}。弾塑性破壊じん性 J_{Ic} の評価にストレッチゾーンの幅の評価は重要である⁶³。しかし、今までの研究の中で、これらの値はすべて肉眼により定性的に評価されてきた。従って、破面率等の面情報を整理できる手法の確立が破断面の定量的評価には必要であると言える。

2.3.3 空間スケールの観点から破面を特性化する理由

従来のフラクタル解析は、前にも述べたように、特定の観察倍率で観察した破面からフラクタル次元を求め、破壊機構に関する議論を行っていた。しかし、破面性状は観察倍率により変化するため、観察者の主観により定めた倍率においてのみフラクタル性を論じていることになる。



Magnification observation

Fig. 2.10: Variation of appearance of fracture surface with magnification observation.

しかし, Fig.2.10 に示すように, 破面の様相は観察倍率により変化する. 従って, 特にフラクタル性を取り扱う場合は, フラクタルの性質からも, 特定の倍率で観察した破面と破壊機構を議論することは, 破面の微視的性質と巨視的性質を十分に反映しているとはいえない. 従って, 破面の微視, 巨視の性質を十分に反映するための評価方法が必要である.

観察者の主観に依存せずにフラクタル性を議論するためには, 観察倍率とフラクタル次元の関係を明らかにすることで解決すると考えられる. 本論文では, 局所パラメータとして, 観察倍率毎のフラクタル次元を提案し, 破面のフラクタル性を求める手法を提案する. この手法により, 観察倍率を決める際に入っていた観察者の主観を除くことが可能になり, 客観性のあるフラクタル次元を求めることができると思われる.

2.3.4 周期性の観点をを用いる理由

次に, 周期性の観点から遷移領域を同定する理由について述べる.

従来の破断面研究の中で, 遷移領域を同定する研究³は, 破断面を小領域 (i) に分割し, 小領域ごとの特徴量 C_i を用いて分類するものが主であり, 次に挙げる問題点を含んでいた.

- 小領域 i の大きさの物理的根拠が不明瞭であり, 大きさは観察者の熟練度に依存する
- 各小領域 i を分類する際に設定するしきい値 C_{th} の選択は観察者に依存しており, 熟練度に依存する

従って, まず小領域分割よりも詳細に解析するためにはデータの画素を単位とした解析を行う必要がある. 画素は画像の最小単位であることから, 観察者の主観が入る要素に関しては, 小領域を決定すると言う点が排除される. 従って, 画素単位で破面の評価を行うことは, 解析結果の客観性という観点から優位性がある.

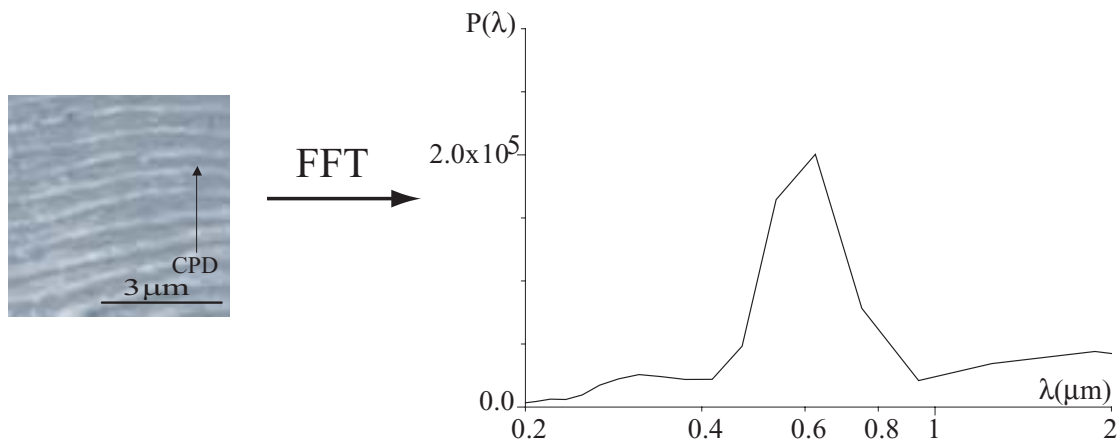


Fig. 2.11: ストライエーションのフーリエ解析結果

信号の局所的な性質を特徴付けるために有効な手法にウェーブレット解析^{65,66}があり、本研究ではウェーブレット解析を軸とした解析手法の提案を行う。また、ウェーブレット解析は窓関数フーリエ解析の発展した解析であり、ウェーブレット解析の分野でも、主に評価するのは画像の周期性である⁶⁵⁻⁶⁷。従って、本研究でも画像の周期性に着目した解析手法の提案を行う。

また、これまでに観察されている破断面の多くの特徴は、

- ストライエーション
- ディンプル
- ヘキ開（粒界・粒内）

等である。Fig.2.11と、Fig.2.12はそれぞれストライエーションとヘキ開の破断面画像の周波数解析結果である。この結果から、ストライエーションは縞模様が特徴であるため、ある波長にパワースペクトルのピークが存在するが、ヘキ開に関してはピークが存在しない。従って、周期性に着目した場合は、波長とパワースペクトルの関係から、ストライエーションであるか否かの分類が容易である。これらの点からも周期性に着目した場合、破断面の特徴づけが効果的であると考えられることから、本論文では周期性に着目して、破断面の遷移領域を同定する手法を提案する。

2.4 本章のまとめ

本章では、破断面画像から局所性を評価するための手法について述べた。

局所性には、空間的な局所性と、スケールに関する局所性があることについて述べ、次に、個々の従来研究について述べた。

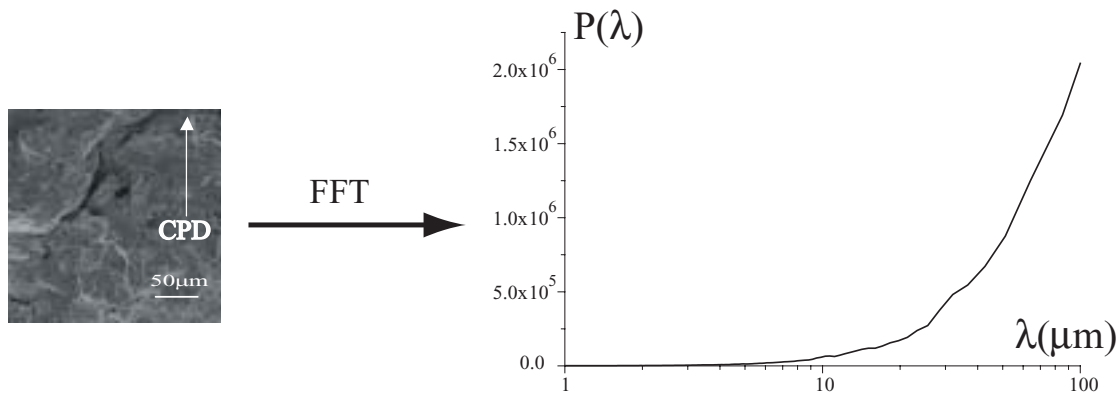


Fig. 2.12: へき開面のフーリエ解析結果

その中で、空間的な局所性に関しては、従来研究によって提案された特徴量とその分類方法についての問題点について述べた。特徴量の問題点に関しては、従来手法では、特徴量のもつ意味と破断面の様相との相関を理解することが困難であることを述べた。また、破断面の様相は連続的に変化するものであることを示し、境界を設定することが困難であることを述べた。また、従来手法が境界設定に関して、画像処理的な手法を用いていることを述べ、破面様相の境界決定には、不十分であることを述べた。その理由は、特徴量が連続的に変化するため、画像処理的に決まる手法が必ずしも破面様相の遷移を捕らえているとは限らないからである。

また、スケールに関する局所性に関しては、従来のフラクタルの研究が、フラクタル性を考察する際に、基準長さの取り扱いに関して不十分であることについて述べた。また、基準長さとのフラクタル性の関係を調べる必要があることについて述べた。

これらの研究の背景を踏まえ、本章では、空間的・スケールの局所性を評価する為の手法を提案した。提案した手法は、空間的局所性の評価にはウェーブレット解析を利用し、スケールの局所性に関してはフラクタル解析を利用する手法である。また、それらの手法を利用して局所性を評価する理由について述べた。

第3章 ウェーブレット変換を用いた疲労破断面のストライエーション領域同定手法

3.1 緒言

3.1.1 はじめに

本章では，破断面の空間的な局所性を評価するための手法について述べる．その中でも，特に破断面画像が特定の周期に目立った周期性を持つ画像である場合の解析方法を提案し，検証を行う．

破断面画像が，特定の周期に目立った周期性を持つ場合の代表的な例は疲労破断面に観察されるストライエーション破断面である．本章は，破面数値解析の中で，ストライエーションの破面内に占める割合（ストライエーション破面率）を定量評価する手法を提案する．ただし，本研究にて述べるストライエーションとは，破断面画像で濃淡や3次元形状に周期性がある場合の画像をストライエーションと定義する．本来，周期性がある形状がすべてストライエーションでは無いことから，最終的な判断はその他の破壊条件により複合的に行わなければならない．

ストライエーション破面率は，作用応力推定に有効な指標であることが報告されている⁵¹．大塚らはストライエーション破面率と，き裂進展速度の間に相関関係があることを報告している^{15,51}．また，Jiang は，ストライエーション破面率から応力比を推定する手法について提案している⁵²．しかし，これまで評価されてきた破面率は破断面の一部から目視で求めた結果のため，客観性の低さは否めない．また，破断面の一部を使用した破面率の評価は，破面全体の特徴を十分に評価しているか疑問の余地が残る．従って，破壊のメカニズムと破断面との対応関係を系統的に調べるには破面率を定量評価する手法の開発が望まれるが，これまでは必ずしも満足のいく方法が提案されていない．

破面率の定量評価には，破面画像の局所的性質を調べる必要がある．そのために，画像処理の分野では，ウェーブレット変換⁶⁵が，利用されている．ウェーブレット変換は其中で用いられるマザーウェーブレットに特性化する対象の特徴が適切に反映した関数を適用することで，対象となる特徴に特化した局所的性質

の特性化が本質的に可能である⁶⁶。これまでに画像処理のために提案されてきた手法⁶⁸⁻⁷¹は、明確に様相が異なるテクスチャ分析には有効であることが示されている。しかし、破面は様相の境界が不明瞭であることから、従来手法が領域同定に十分に有効な手法であるとはいえない。

また、従来行われてきた破面画像解析の分野では、破面画像を分割した上で、粒界割れ・粒内割れを評価する手法が提案・利用されてきた^{3,26}。従って、従来手法では、分割領域の大きさが判定精度の限界であり、破面様相が入り組んだ場合の領域評価は困難であった。

この問題を解決するため、本論文は、ストライエーションの領域を評価する為のウェーブレット変換を行い、画素単位にて評価する手法を提案する。破面画像は、高精度精密ステージを持った高解像度電子顕微鏡 (SEM) を用いて撮影した画像である。高解像度である為、ウェーブレット解析やフーリエ解析において周期性の検出や局所性の特性化が可能である。画像を画素単位で評価することで、複雑な領域の場合でも、破面率の詳細な定量的評価が行える。本論文では、提案手法を実破断面について適用し、目視によるストライエーション領域の境界と提案手法による境界を比較することで手法の評価を行う。

3.1.2 本論文で取り扱うストライエーションについて

ストライエーションには、延性ストライエーションと脆性ストライエーションが存在する。一般にストライエーションと呼ばれるものは、延性ストライエーションであり、塑性変形とき裂先端の鈍化の繰返しの結果である¹⁴。本章で用いた疲労破面のストライエーションは延性ストライエーションに属するものである。

脆性ストライエーションは、高硬度材料や腐食雰囲気における疲労破壊の破面に観察される模様である。また、アルミ合金などの延性材料においても、低き裂伝播速度域に関しては観察される模様である。延性ストライエーションの形成と異なるのは、引張行程において、延性ストライエーションは塑性変形を伴うき裂進展であるのに対し、脆性ストライエーションはへき開面に沿った脆性的進展の後に、延性ストライエーション同様のき裂先端の鈍化を起こすき裂進展である。

3.2 ウェーブレット変換による疲労破面特性化手法の提案

3.2.1 Gabor ウェーブレット変換を用いたストライエーションの特徴量算出

画像の局所的性質の特性化の為に、ウェーブレット変換には2次元ウェーブレット変換⁶⁵を使用する。2次元ウェーブレット変換の基本式を式(3.1)に示す。 $I(x, y)$ は解析対象とするSEM画像の (x, y) 点の濃淡を示す関数である。 $\psi(x, y)$ はマザーウェーブレット、またはアナライジング・ウェーブレットと呼ばれる関数であり、局在化した関数である。 (x_0, y_0) は位置のパラメータ、 a はスケールパラメータである。マザーウェーブレットは式(3.2)に示すアドミッシブル条件を満たさなけれ

ばならない。

$$\Psi_a(x_0, y_0) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \overline{\psi\left(\frac{x-x_0}{a}, \frac{y-y_0}{a}\right)} dx dy \quad (3.1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x, y) dx dy = 0 \quad (3.2)$$

ウェーブレット変換は、式 (3.1) からわかるように、マザーウェーブレットに特性化したい対象の性質を反映した関数を設定することで、特性化したい対象の空間的な局所性やスケール的な局所性を特性化することが可能である。空間的な局所性は、 (x_0, y_0) により可能になる。スケール的な局所性は a により可能になる。破断面を特性化する際も同様に、マザーウェーブレットには破断面の特徴が適切に特性化されるような関数を設定する必要がある。ストライエーション破断面画像を特性化するパラメータは、ストライエーションの周波数 f と、進行方向 θ である。従って、マザーウェーブレットはこれらのストライエーションの特徴を表現できなければならない。よって、マザーウェーブレット ψ に信号の局所的周期性を検出するのに有効とされる式 (3.3) に示す Gabor 関数⁶⁶の適用を試み、その有効性を検討することにした。

Gabor 関数を、式 (3.3) ~ (3.5) に示す。Gabor 関数は、正弦波関数とガウス関数 g の積である。Gabor 関数は空間周波数 f と、窓関数の大きさ σ 、波の進行方向を示す回転角 θ から構成される。そのため、ストライエーション画像の特徴である周期性と角度を局所的に特性化する為に有効なマザーウェーブレットであると考えられる。Gabor ウェーブレットを用いた場合のウェーブレット変換を式 (3.6) に示す。

$$\psi(\sigma, f, \theta, x, y) = g_{\sigma}(x(\theta), y(\theta)) (e^{i2\pi f x(\theta)} - e^{-(2\pi f \sigma)^2}) \quad (3.3)$$

$$g(\sigma, x(\theta), y(\theta)) = \frac{1}{4\pi^2 \sigma^2} e^{\left(\frac{-1}{4\sigma^2}(x(\theta)^2 + y(\theta)^2)\right)} \quad (3.4)$$

$$\begin{pmatrix} x(\theta) \\ y(\theta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$\Psi(\sigma, f, \theta, x_0, y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \overline{\psi(\sigma, f, \theta, x - x_0, y - y_0)} dx dy \quad (3.6)$$

Gabor ウェーブレット係数 Ψ の絶対値は、画素 (x_0, y_0) の σ に依存した大きさの周辺領域における、角度 θ 方向の周波数 f の波の強度を示す値である。従って、

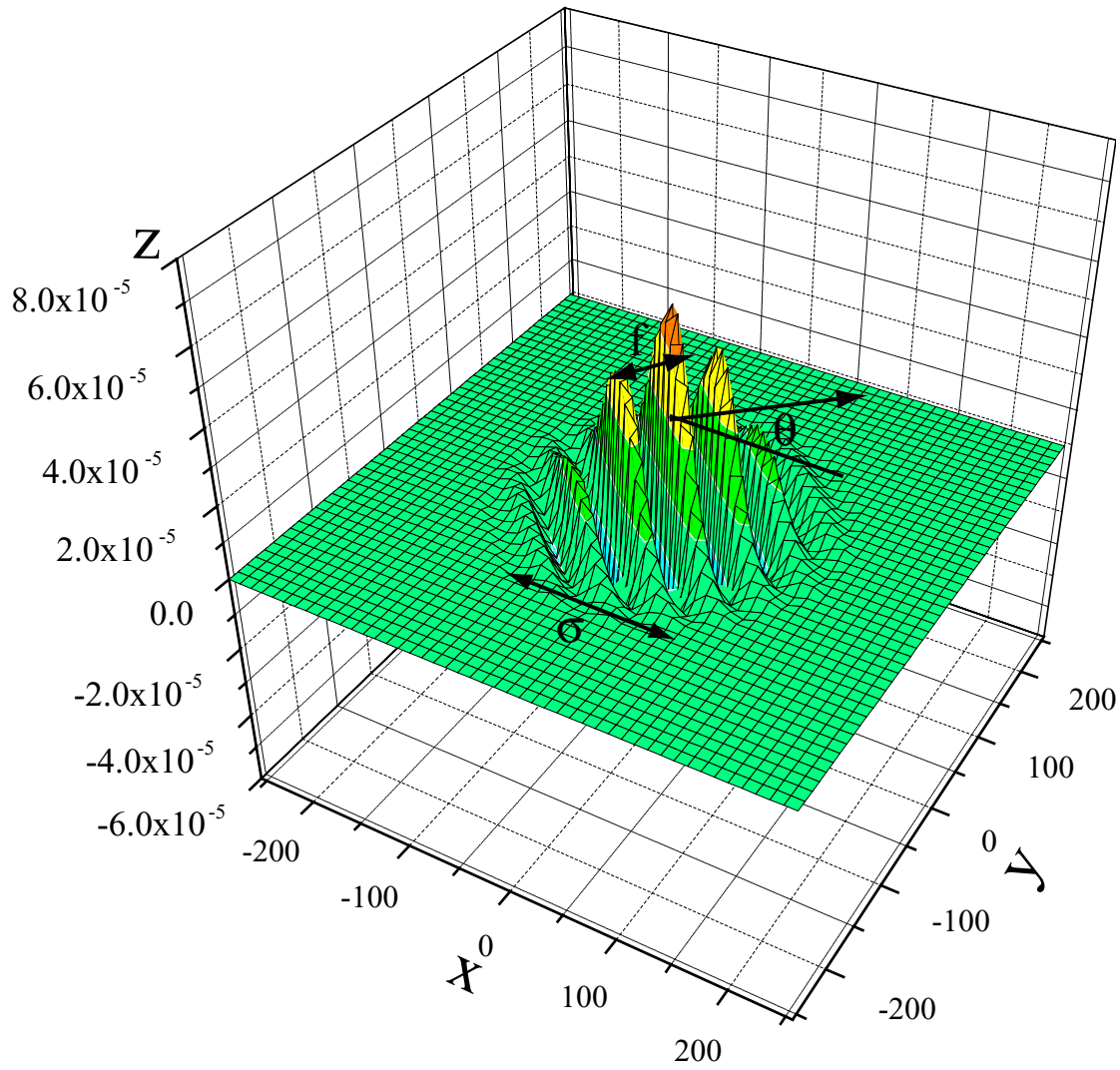


Fig. 3.1: The overview of the Gabor mother wavelet

SEM 画像の画素 (x_0, y_0) を中心とした Gabor ウェーブレット係数 Ψ を特徴量 C の計算に使用することで、画素単位の領域評価が可能になる。さらに、Gabor ウェーブレット係数 Ψ の集合の中で、周波数 f と角度 θ が、ストライエーションの周波数・角度であるウェーブレット係数 Ψ を特徴量 C の計算に用いることで、画像内に局所的に分布するストライエーションの領域を抽出することが可能になると考えられる。

しかし、ストライエーションの進行角度は、特にき裂進展速度が遅い場合に、結晶構造に依存しやすい¹⁴。そのため、特定の角度について解析を行った場合は、角度が異なるストライエーションを十分に検出できない可能性がある。一方、ストライエーションの周波数は、き裂進展速度に対応しているため、数百倍程度以上の観察倍率で観察した画像においては、ほぼ一定であるとみなせる。従って、特徴量 C は θ に関して全方位 ($0 \sim 2\pi$) にわたり積分することで、角度の異なるストライエーションの検出も可能になると考えられる。

特徴量 C の計算式を式 (3.7) に示す。つまり特徴量は画像内に存在する周期性を評価する値であり、ストライエーションの周波数に等しい周波数を持った領域の画像内の分布を調べることでストライエーション領域の画素単位の特性化が可能になると考えられる。

$$C(\sigma, f, x_0, y_0) = \int_0^{2\pi} |\Psi(\sigma, f, \theta, x_0, y_0)| d\theta \quad (3.7)$$

特徴量 C は周波数 f のストライエーションの度合いを示す量であることから、ストライエーション度と定義する。また、本論文の計算において σ は、 f の波 5 個が窓の中に入るように決定する。波数を一定とすることで、マザーウェーブレットの相似則を $a \simeq \sigma$ にて満たす。従って、 σ は f の従属変数となるので、 $C(f, x_0, y_0)$ と記述する。

3.2.2 解析手順

ストライエーション度計算のフローチャートを Fig.3.2 に示す。

まずストライエーションの周波数 f の範囲を決定する必要がある。周波数 f は、画像全体を 2 次元離散フーリエ変換し、画像の周波数分析を行い決定する。この段階で、ある周波数 f について、パワースペクトルに明瞭なピークが存在する場合は、画像全体がストライエーションである可能性が高く、ピークに相当する周波数はストライエーションの周波数の可能性が高い。よって、ストライエーション度 $C(f, x_0, y_0)$ を求める。明瞭なピークが存在しない場合、パワースペクトルの強度が強い周波数の範囲を調べ、周波数 f の範囲 A_0 を設定する。そして、 A_0 に含まれる周波数 f の値を用いてストライエーション度 $C(f \subseteq A_0, x, y)$ を計算する。

しかし、特にストライエーション破面率が低い場合、パワースペクトルの強度が強い周波数がストライエーションの周波数とは限らない。よって、 A_0 にはスト

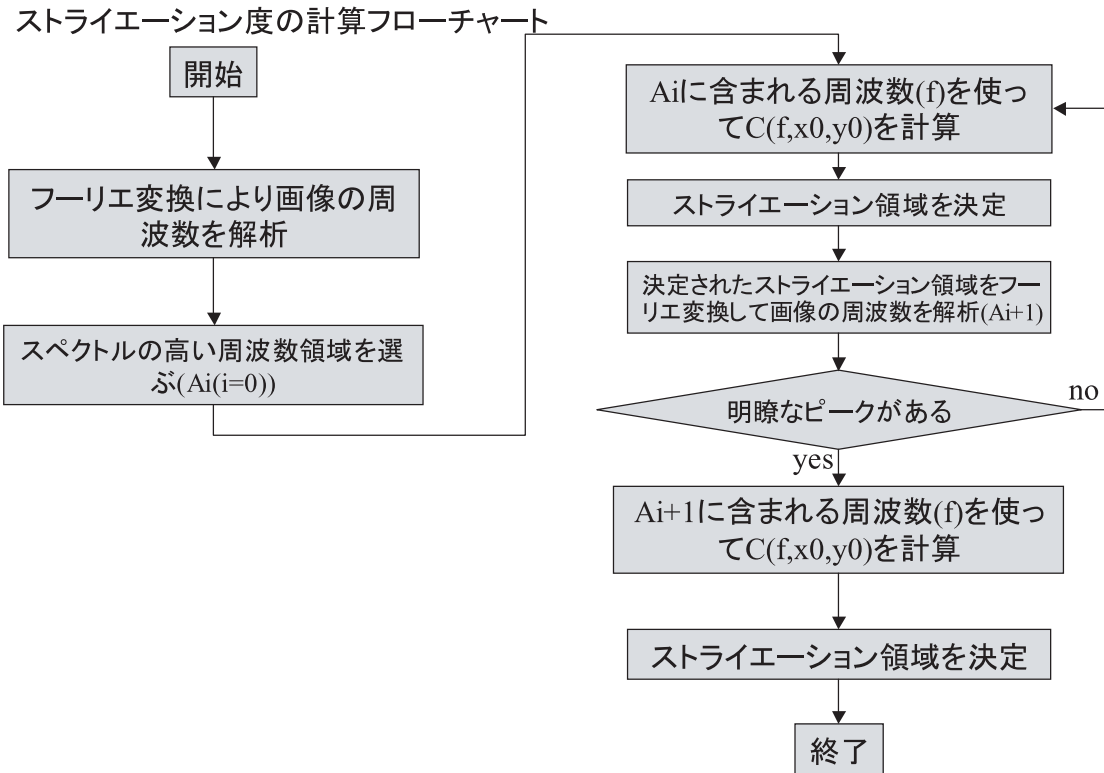


Fig. 3.2: The flow chart of the method to detect the striation region

ライエーションで無い領域の周波数成分も含まれてしまう。つまり、 A_0 を元に計算されたストライエーション度 $C(f \subseteq A_0, x, y)$ はストライエーションの特徴を十分に反映しているとは言えない。従って、本手法は周波数領域 A_0 から計算されるストライエーション度 $C(f \subseteq A_0, x, y)$ の高い領域を抜き出して、再度周期性の評価を行う。抜き出された領域は、ストライエーションの可能性が高い領域である。つまり、ストライエーションである可能性の高い周波数 f の範囲 A_1 を求めることができる。

仮に、 A_1 に明瞭なピークが存在しているなら、ストライエーション度 $C(f \subseteq A_1, x, y)$ を求め、ストライエーション領域を決定する。ここでもさらに明瞭なピークが見られない場合は、先に抜き出された領域の中から、再度ストライエーション度の高い領域を抜き出し、同様の計算を行う必要がある。ストライエーション度の高い領域を絞り、ストライエーションの周波数 f を推定することで、精度のよい領域判定が行えると考えられる。またこれにより、ストライエーション破面率が低い場合においても、領域の評価が可能になる。

最後に、求めたストライエーションの周波数から、特徴量 $C(f, x_0, y_0)$ を計算する。さらに、しきい値 C_{th} を設定し、 $C(f, x_0, y_0) > C_{th}$ であればストライエーション領域として決定する。本研究では、しきい値は対話的に決定する方法と、画像処理手法で自動的に決まる手法の2手法を用いてストライエーション領域を決定し、検討を行う。

3.2.3 しきい値の決定方法

対話的にしきい値を決定する手法

対話的にしきい値を決定する方法について述べる。対話的にしきい値を決定するためには、まず、目視により領域の評価を行う。次に、しきい値を変化させ、目視による判定結果を比較対照することで、最終的にしきい値を決定する。

本論文では、しきい値をストライエーション度の最大値に割合を乗ずることで決定した。すなわち式 (3.8) に示す C_{ratio} をしきい値として用いた。以下、 C_{ratio} をしきい値率と記す。

$$C_{th} = C_{ratio} \times \text{MAX}(C(f, x_0, y_0)) \quad (3.8)$$

従来、目視による領域の決定法は、第1章でも述べたように、破断面を小領域に分割して、その領域を分類してきた。この手法の場合、各小領域毎に判断することから、各小領域単位で観察者の主観が入り込む。つまり、小領域の数だけ不確定な要素があることになる。一方、しきい値によって領域を決定する場合は、しきい値のみで領域が決定する。すなわち、観察者の主観はしきい値のみということになり、目視による判定よりも観察者の主観が入りにくい。

大津・Kitter のしきい値決定法

画像処理の分野で，画素の濃淡の分布に対して，自動的にしきい値を決定し，2つの分布に分類する手法に大津のしきい値選定法^{57,72,73}と Kittler のしきい値選定法^{57,74}がある．以下にその手法について述べる．

大津のしきい値決定法は，2値化して得られる画像ともとの画像の平均2乗誤差が最小になるようにしきい値を決定する方法である^{57,72,73}．

各画素が区間 $[0, L]$ の範囲の濃淡値 g を持つような画像を考える．このとき，濃淡値の分布はヒストグラム $\{h(g)|g = 0, \dots, L\}$ で与えられる． $h(g)$ は濃淡値 g が現れる頻度である．これを全画素数で正規化して，正規化したヒストグラムを $p(g) = h(g)/N$ とする．

ここで，しきい値 k によって，各画素を2つのクラス S_1, S_2 に分類する（ここでは非ストライエーション領域とストライエーション領域）ことを考える． S_1 は， $[0, \dots, k]$ の範囲にある画素の集合で， S_2 は， $(k, \dots, L]$ の範囲にある画素の集合である．この時，しきい値 k に依存して各クラスの統計量は，

$$w_1(k) = \sum_{g \in S_1} p(g), w_2(k) = \sum_{g \in S_2} p(g) \quad (3.9)$$

$$\bar{g}_1(k) = \sum_{g \in S_1} gp(g)/w_1(k), \bar{g}_2(k) = \sum_{g \in S_2} gp(g)/w_2(k) \quad (3.10)$$

$$\sigma_1^2(k) = (g - \bar{g}_1(k))^2 \sum_{g \in S_1} p(g)/w_1(k), \sigma_2^2(k) = (g - \bar{g}_2(k))^2 \sum_{g \in S_2} p(g)/w_2(k) \quad (3.11)$$

となる．一方，全平均，および全分散は，

$$\bar{g}_T = \sum_{g=0}^L gp(g) \quad (3.12)$$

$$\sigma_T^2 = \sigma_W^2(k) + \sigma_B^2(k) \quad (3.13)$$

$$\sigma_W^2(k) = \sum_{j=1,2} w_j(k) \sigma_j^2(k), \sigma_B^2(k) = \sum_{j=1,2} w_j(k) (\bar{g}_j(k) - \bar{g}_T)^2 \quad (3.14)$$

である．

ここで， $\sigma_W^2(k), \sigma_B^2(k)$ はそれぞれ平均クラス内分散，および平均クラス間分散である．

ヒストグラムからしきい値を選択する際のしきい値の良さの評価として大津は判別基準として、

$$\eta(k) = \frac{\sigma_B^2(k)}{\sigma_T^2} \quad (3.15)$$

を用いた。 $\eta(k)$ が最大となるしきい値を調べ、最大となる時の k をしきい値として設定した。なお、 σ_T^2 は k に依存しない量であることから、平均クラス間分散を最大にすることと同じである。

大津のしきい値選定法で得られるしきい値は、対象領域の濃淡値の分散と背景の濃淡値の分散が極端に異なる場合や対象領域の画素数と背景の画素数が極端に異なる場合には、バイアスを持つことが指摘されている⁷⁴。

Kittler のしきい値選定法^{57,74}は、対象領域の濃淡値と背景の濃淡値が共に正規分布に従うという仮定のもとで、平均誤識別率に関する基準を最小とするようなしきい値選定法である。条件付き分布 $f(g|C_j)$, ($j = 1, 2$) が平均 $\bar{g}_j(k)$, 分散 $\sigma_j^2(k)$ の正規分布に従うとき、平均誤識別率 $P(k)$ は

$$P(k) = w_1(k) \log\left(\frac{\sigma_1(k)}{w_1(k)}\right) + w_2(k) \log\left(\frac{\sigma_2(k)}{w_2(k)}\right) + \frac{1}{2}(1 + \log(2\pi)) + \sum_{g=0}^L p(g) \log(p(g)) \quad (3.16)$$

と求まる^{57,74}。定数項を無視して、Kittler は、

$$J(k) = w_1(k) \log\left(\frac{\sigma_1(k)}{w_1(k)}\right) + w_2(k) \log\left(\frac{\sigma_2(k)}{w_2(k)}\right) \quad (3.17)$$

を最小とする k をしきい値として設定した。

しかしながら、これらの手法は、あくまで画像処理的な手法であって、簡易的に用いる、もしくは多くの破断面情報を処理しなければならない場合には有効であると考えられるが、結果に関しては必ず目視によって判定した結果と対応させなければならない。

3.3 仮想破断面による検証

以上に述べた手法を、まず仮想的に作成したストライエーションを含む破面に対し適用し、提案手法の妥当性を検討する。

3.3.1 ストライエーション度の有効性の検証

解析した画像

ストライエーションの代替として周波数と方向性があらかじめ既知の領域を含む画像を作成し、解析を行った。

Fig.3.3 に仮想的に作成した画像を示す．Fig.3.3 は 2048×2048 画素の 256 階調濃淡画像である．中央破線部の 512×512 画素 (以下 S 部) はストライエーションを模擬する為， $(f, \theta) = (0.05Hz, 0)$ ・振幅 0.1 の \sin 波に 0~1 の乱数を加えた．中央破線部以外の周囲 (以下 NS 部) は周期性の無い乱数のみで画像を構成した．ストライエーション破面率は 6.25% である．なお，周波数 (Hz) は画素を単位とした周波数で表記する．

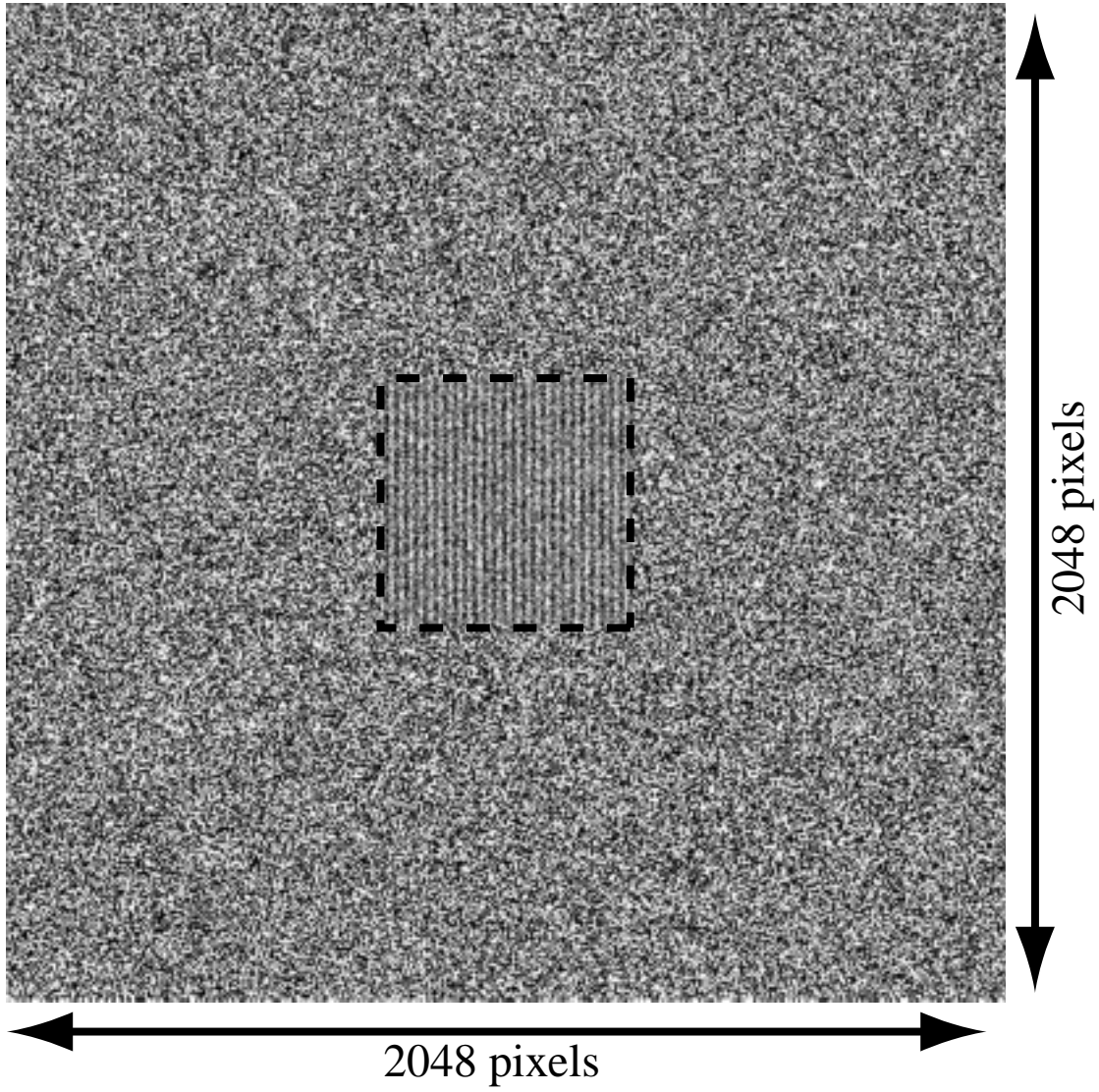


Fig. 3.3: The image of the fracture surface in which the striation is simulated

解析結果

まず, Fig.3.3 をフーリエ変換し, パワースペクトルの分布を求めた. また, フーリエ変換の結果に, 次に示す式 (3.18) を用いて, 画像の周期性の評価を行う⁵⁸. $|P_s(f, \theta)|^2$ は周波数 f , 角度 θ のパワースペクトルである. $P(f)$ はテクスチャの周期性を示す周期性評価関数である. Fig.3.3 の周波数 f と周期性評価関数 $P(f)$ の関係を Fig.3.4 に示す.

$$P(f) = \int_0^{2\pi} |P_s(f, \theta)|^2 d\theta \quad (3.18)$$

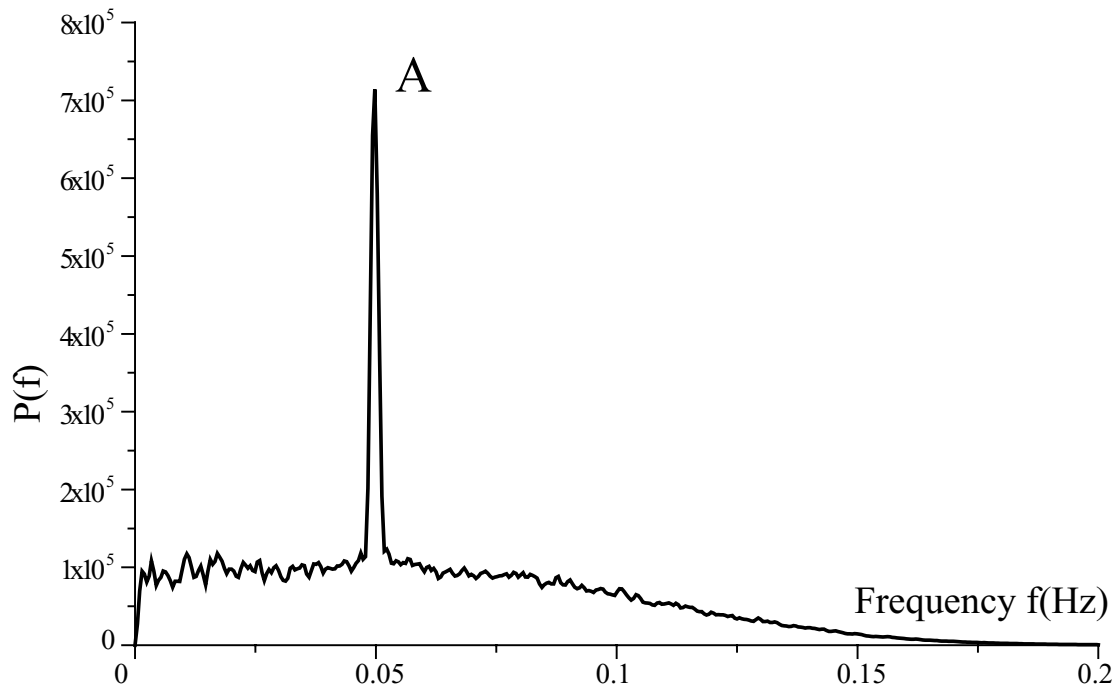


Fig. 3.4: The relationship between the frequency(f) and the frequency evaluation function $P(f)$ calculated from Fig.3.3 using FFT.

パワースペクトルのピークが Fig.3.4 内 A に示す部分に明瞭に現れている．従って，Fig.3.3 の主な周波数は $f = 0.05$ であることがわかり， $C(f = 0.05, x_0, y_0)$ を求めた．

しきい値率を 30%, 40%, 50%, 60% として，領域の同定を行った．計算結果を Fig.3.5 に示す．白い領域がストライエーション領域と判断された部分である．() 内は各場合のしきい値におけるストライエーション破面率である．計算時間は Intel Pentium Xeon 2.2GHz，OS は Linux の計算機にて 20 分程度である．

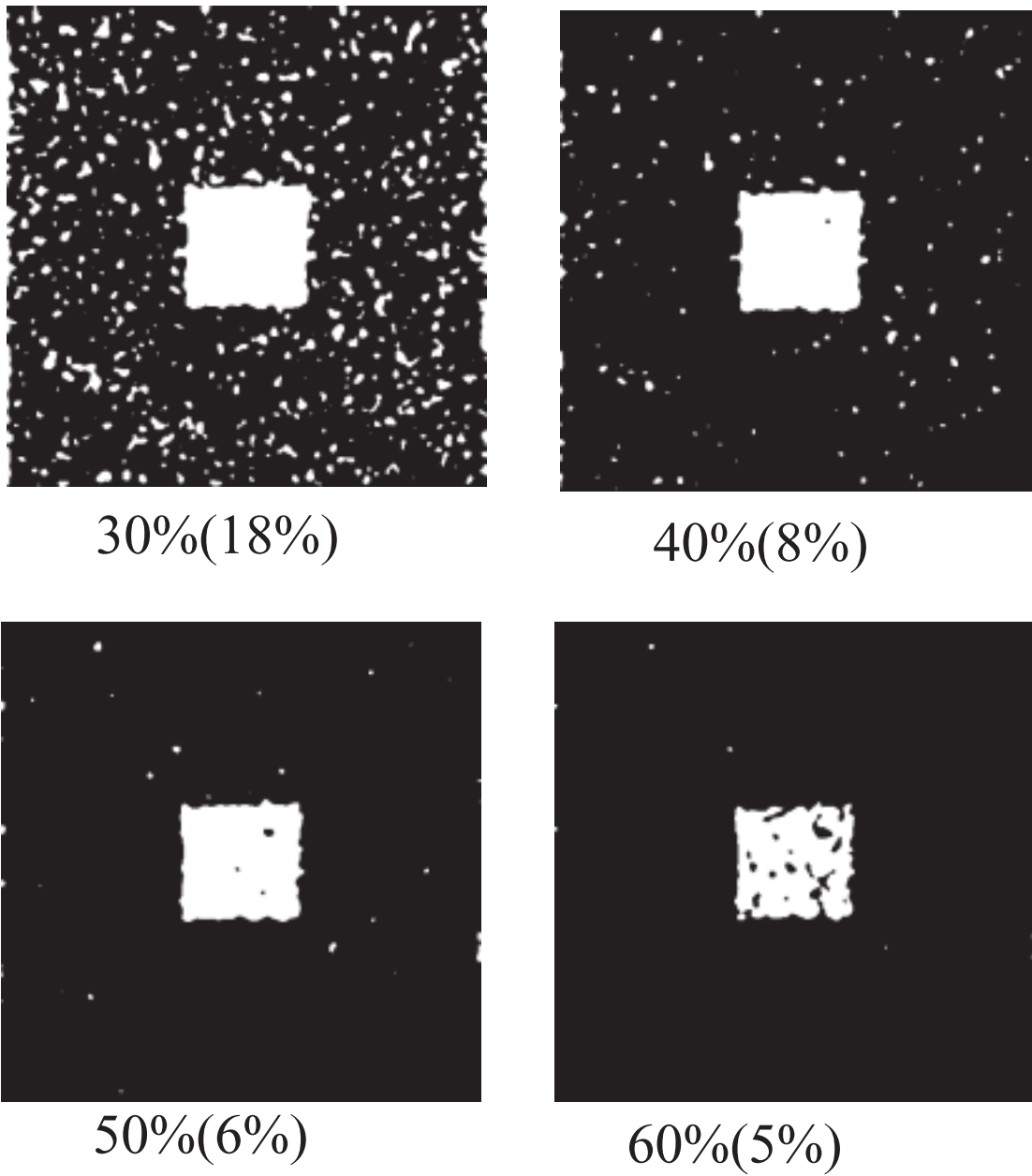


Fig. 3.5: The distribution of the degree of striation $C(f = 0.05, x_0, y_0)$. Top left: the threshold ratio is 30%. Top right: the threshold ratio is 40%. Bottom left: the threshold ratio is 50%. Bottom right: the threshold ratio is 60%.

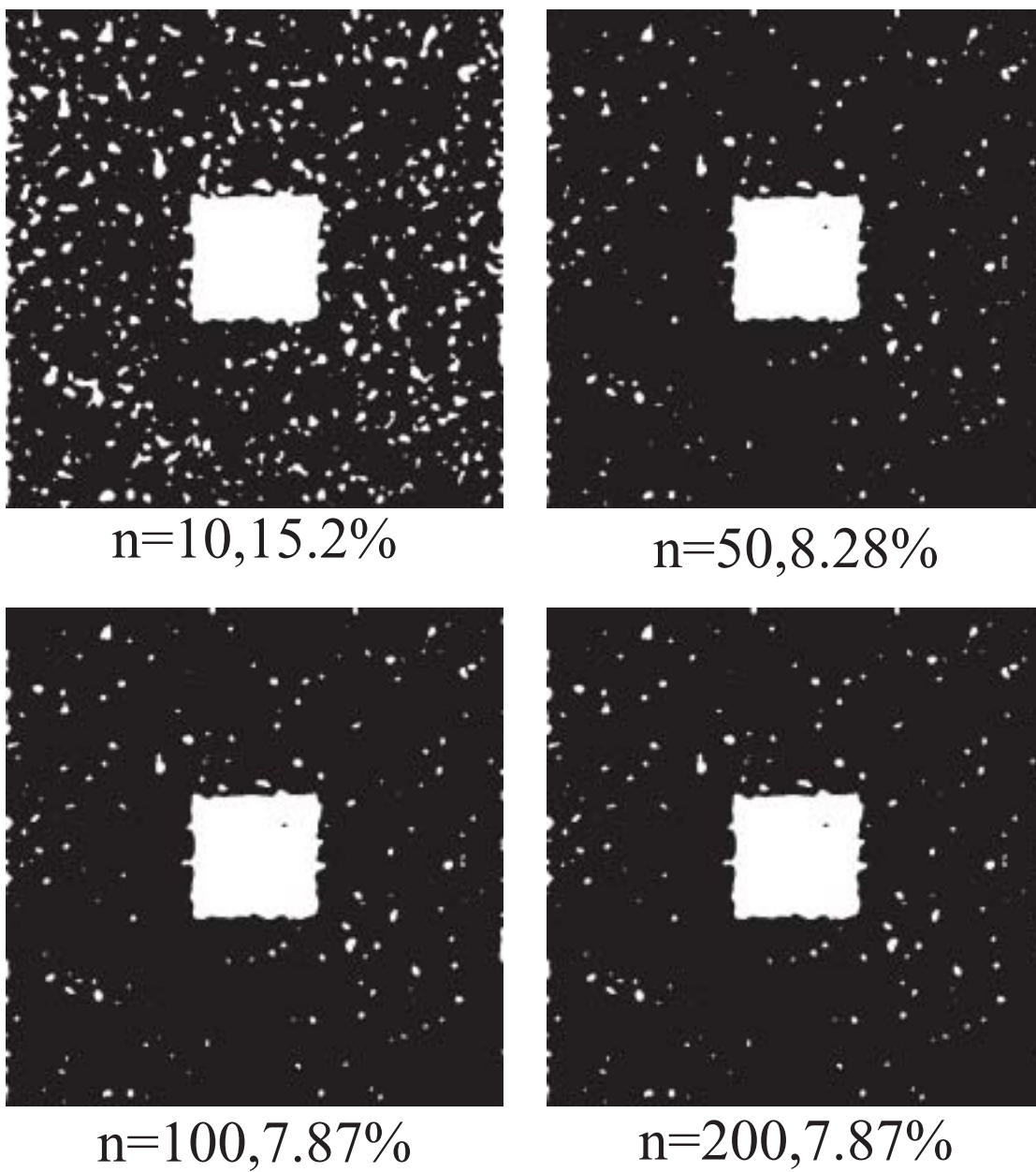
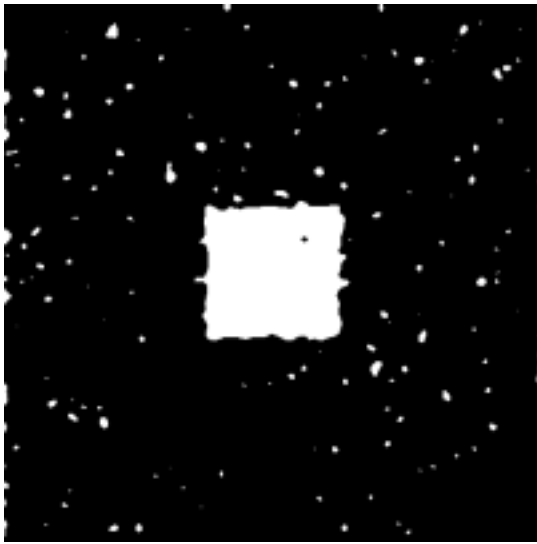
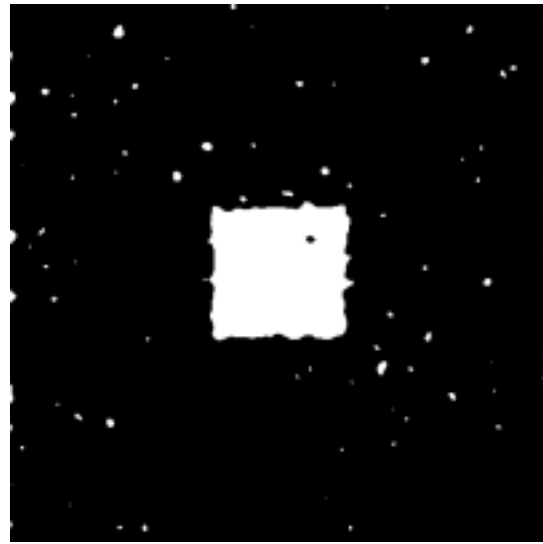


Fig. 3.6: 大津のしきい値選定法による領域判定結果



$n=10, 7.52\%$



$n=50, 6.62\%$



$n=100, 6.62\%$



$n=200, 6.54\%$

Fig. 3.7: Kittler のしきい値選定法による領域判定結果

Fig.3.5 から，中心の白い部分がストライエーション度が高い領域であることがわかる．これは Fig.3.3 に示した中央破線部の領域と対応している．また，ストライエーション破面率は，しきい値率 50% の時，正しい値である $6.25\% (= 512^2/2048^2)$ にもっとも近い値となった．

また，大津のしきい値選定法や Kittler のしきい値選定法を用いた場合の，領域判定結果を Fig.3.6,3.7 に示す． n は， C の分布を求める際の階級数である．

大津，Kittler のしきい値選定法を用いた際にも，あらかじめ設定したストライエーション領域が，ほぼよい精度で抽出されていることがわかる．また，大津のしきい値選定法のほうが，Kittler のしきい値選定法よりも精度が良くないのは，元々設定してある破面率が 6.25% と低いため，先に述べた大津のしきい値選定法の短所である「対象領域と背景領域の画素数に大きな差が有る場合は，どちらかによりがちな判定結果となる」という点が影響していると考えられる．

3.4 実破断面解析結果

第 2 章で提案した本論文の手法を実際の軸荷重疲労破断面に適用する．次に，ストライエーション度 C によりストライエーションの局所性の定量化を行う．解析対象の画像として用いたものは 2.25Cr-1Mo 鋼疲労破断試験片破面と A2017-T4 アルミニウム合金疲労破断試験片破面である．2.25Cr-1Mo 鋼の疲労破断試験は，Jiang によって行われた⁵²．A2017-T4 の疲労破断試験は，著者が行った．試験の詳細については付録 A にて述べる．

3.4.1 破面観察とデータの作成

疲労破断面の SEM 画像を，Fig.3.8, Fig.3.9, Fig.3.10, Fig.3.11 に示す．解像度はすべて 2048×2048 画素である．

Fig.3.8, Fig.3.9 は 2.25-Cr-1Mo 鋼の軸荷重疲労破断面の画像である．軸荷重疲労試験は CT 試験片を用い，繰返し速度 10Hz，最大荷重 2000kg，応力比 $R=0.5$ で行われた⁵²．破面観察倍率は 800 倍であり， $\Delta K = 10.8 \text{MPa}\sqrt{m}$ のところの破面画像である．

また，Fig.3.10, Fig.3.11 は A2017-T4 アルミニウム合金疲労破断面の画像である．軸荷重疲労試験は CT 試験片を用い，繰返し速度 10Hz，最大荷重 900kg，応力比 $R=0.5$ で行われた．破面観察倍率は，Fig.3.10 が 2000 倍であり，Fig.3.11 は 800 倍である．また， ΔK は，Fig.3.10 が $\Delta K = 11.4 \text{MPa}\sqrt{m}$ ，Fig.3.11 が $\Delta K = 5.9 \text{MPa}\sqrt{m}$ である．各図内に，き裂の進展方向 (CPD) を矢印にて図内に示す．Fig.3.8 は目視によりストライエーション破面率の高い画像，Fig.3.9 はストライエーション破面率の低い画像として選択した．Fig.3.10 は A2017-T4 を解析する際に，観察倍率を高倍率に挙げた時のシンプルなモデルとして解析をするために選択した．また，Fig.3.11 はその応用として解析するために選択した．

本研究に使用した SEM は，エリオニクス製 ERA-4000 である．SEM には，破

面解析用に最高 16000×12000 画素の高解像度画像を作成することが可能な高精度精密ステージを取り付けた。画像が高解像度であるので、破面の特徴を従来と比較して広領域に詳細なデータを取ることができる SEM である。

3.4.2 2次元離散フーリエ変換によるストライエーションの周波数・方向の推定

まず、Fig.3.8, Fig.3.9, Fig.3.10, Fig.3.11 に対し離散フーリエ変換を行い、ストライエーションの波長の範囲を推定する。周期性の評価は、式 (3.18) により行う。さらに、周波数を波長に換算した。

Fig.3.12, Fig.3.13, Fig.3.14, Fig.3.15 は、波長 λ と周期性評価関数 $P(\lambda)$ の関係である。ストライエーションはき裂進展速度に対応しており、1 サイクル 1 ストライエーションで形成される¹⁵とされている。

本手法でも、この定義を用いて、波長が $1\mu\text{m}$ 以上に関しては、き裂進展速度が 10^{-3}mm/cycle 以上になることから、き裂進展速度としては速すぎるため、明らかにストライエーションには該当しないと判断し、評価の対象から外した。

Fig.3.12, 3.13, 3.14, 3.15 から、特定の波長に周期性評価関数のピークが存在していないことがわかる。そのため、周期性評価関数 $P(\lambda)$ の値が $P(\lambda)$ の最大値の 10% 以上である λ の範囲をストライエーション度の計算範囲として適用した。

Fig.3.12, 3.13, 3.14, 3.15 に示された特徴はストライエーション領域と非ストライエーション領域が混在した特徴であるため、ストライエーション度の計算に使用する λ の範囲を広く設定した。設定した範囲を Fig.3.12, 3.13, 3.14, 3.15 にそれぞれ B_0^{case1} , B_0^{case2} , B_0^{case3} , B_0^{case4} として示す。

Fig.3.8, 3.9, 3.10, 3.11 に提案手法を適用して、ストライエーション度 C の分布を求めた。しきい値 C_{th} を変化させたときのストライエーション領域 (S 領域) の変化を Fig.3.16, 3.17, 3.18, 3.19 に、それぞれ元画像を重ね合わせて示す。白い部分が S 領域、黒い部分が非ストライエーション領域 (NS 領域) と判断された部分である。Fig.3.16, 3.17 は、しきい値率が 20%, 40% の領域判定結果であり、Fig.3.18, 3.19 は、しきい値率がそれぞれ 20%, 30% と、10%, 15% である。

Fig.3.16 から、画像内で右上部が常に S 領域として判定されていることから、もっともストライエーションである可能性が高い領域であると言える。従って、Fig.3.8 右上部に示す正方形領域を抜き出し、ストライエーションの波長を求める。Fig.3.17 からは、Fig.3.9 の中で右上部に示す正方形領域を S 領域と判定しているため、同様に抜き出してストライエーションの波長の範囲を求める。

Fig.3.18 からは、破線の部分がストライエーション度が高いことから、ストライエーションの波長の算出に利用した。また、Fig.3.19 からは、左側の四角で囲んだ領域がストライエーション度が高いため、ストライエーションの波長の算出に利用した。

Fig.3.8, Fig.3.9 右上部を 256×256 画素抜き出して周期性評価関数を求めた結果を、それぞれ Fig.3.20, Fig.3.20 に示す。また、Fig.3.18 と、Fig.3.19 から、それぞれ 256×256 画素抜き出して、同様に周期性評価関数を求めた結果を、Fig.3.22, 3.23

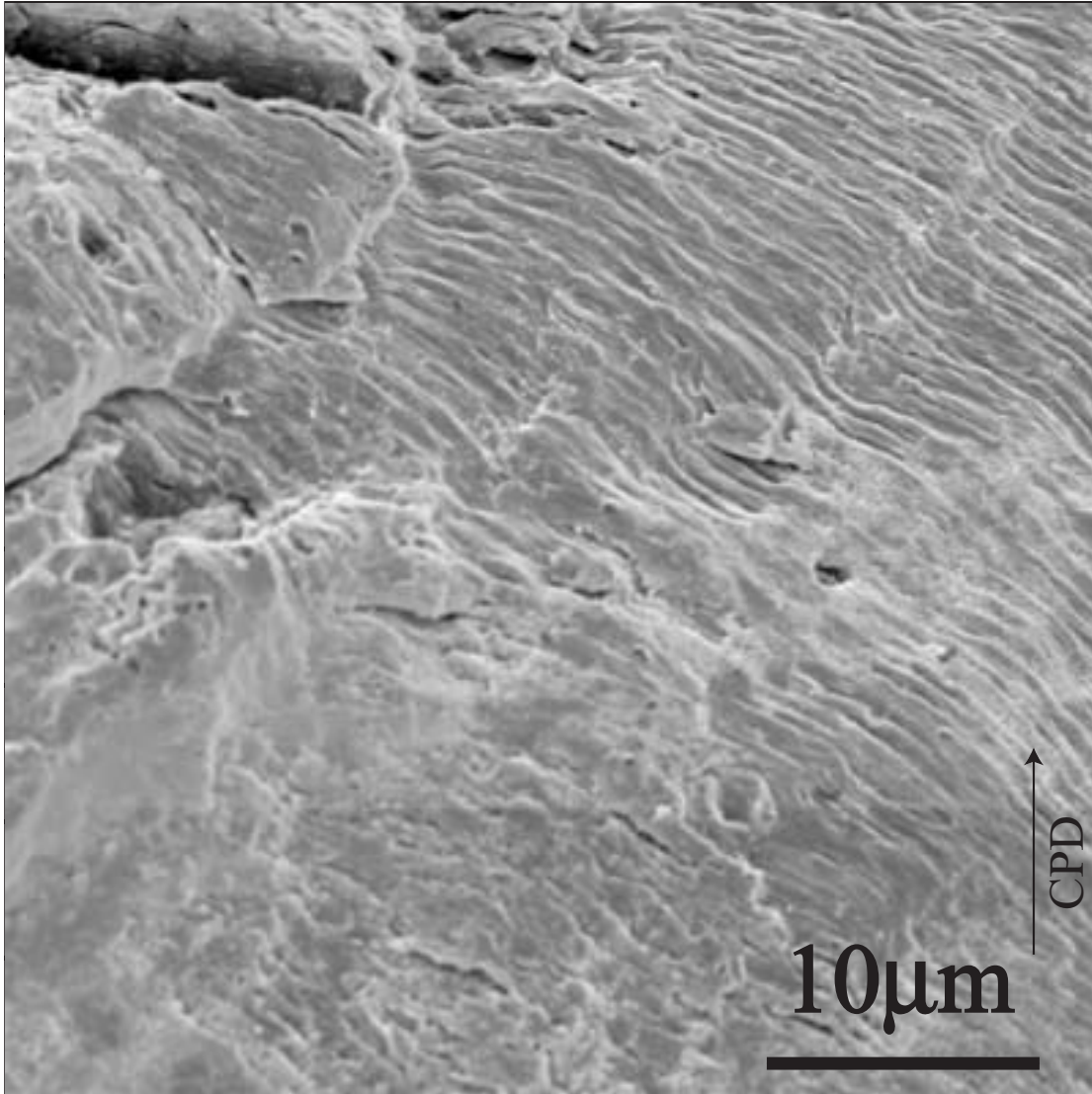


Fig. 3.8: The SEM image of CrMo fatigue fracture surface: case1($\times 800$)

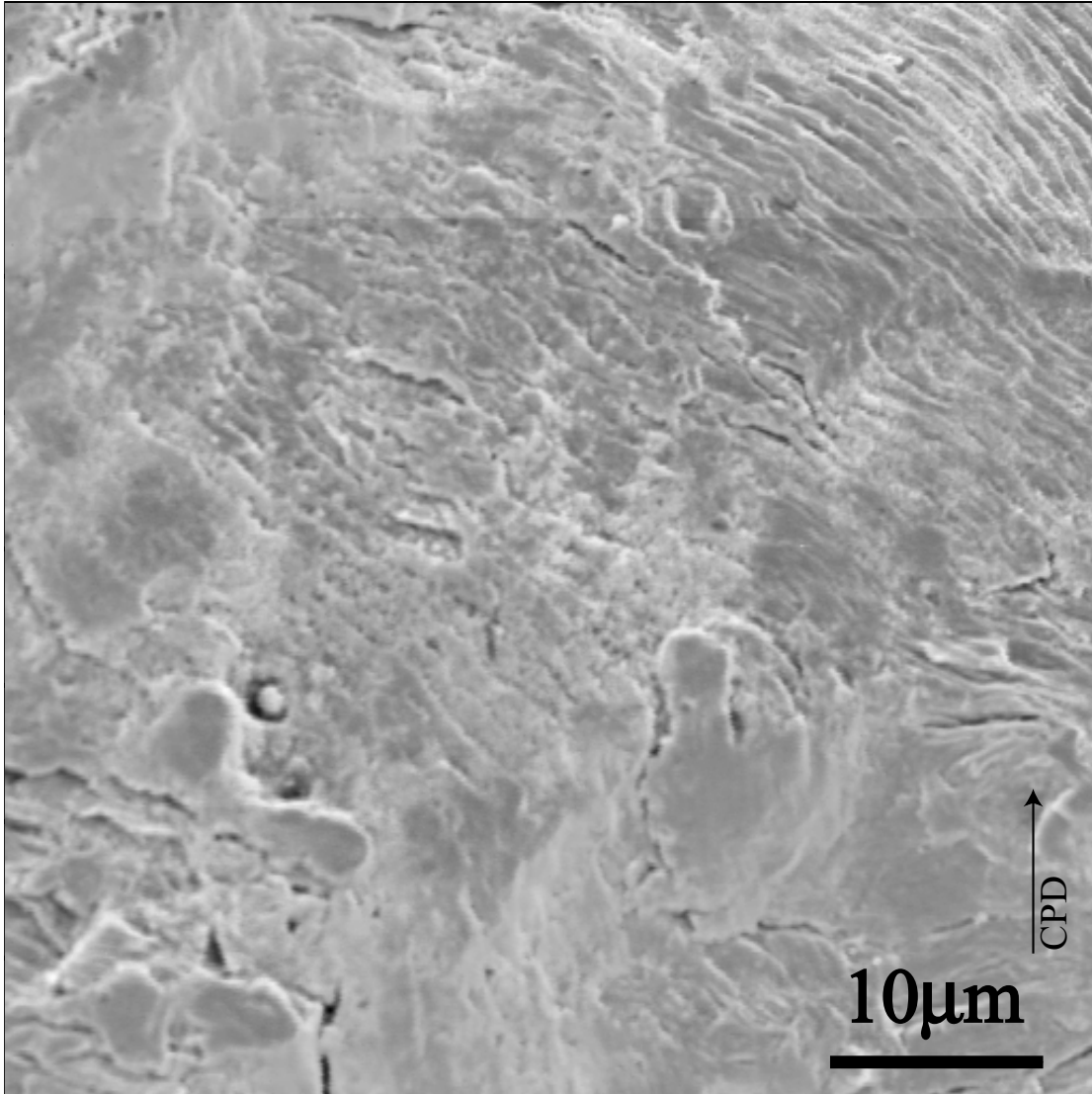


Fig. 3.9: The SEM image of CrMo fatigue fracture surface: case2($\times 800$)

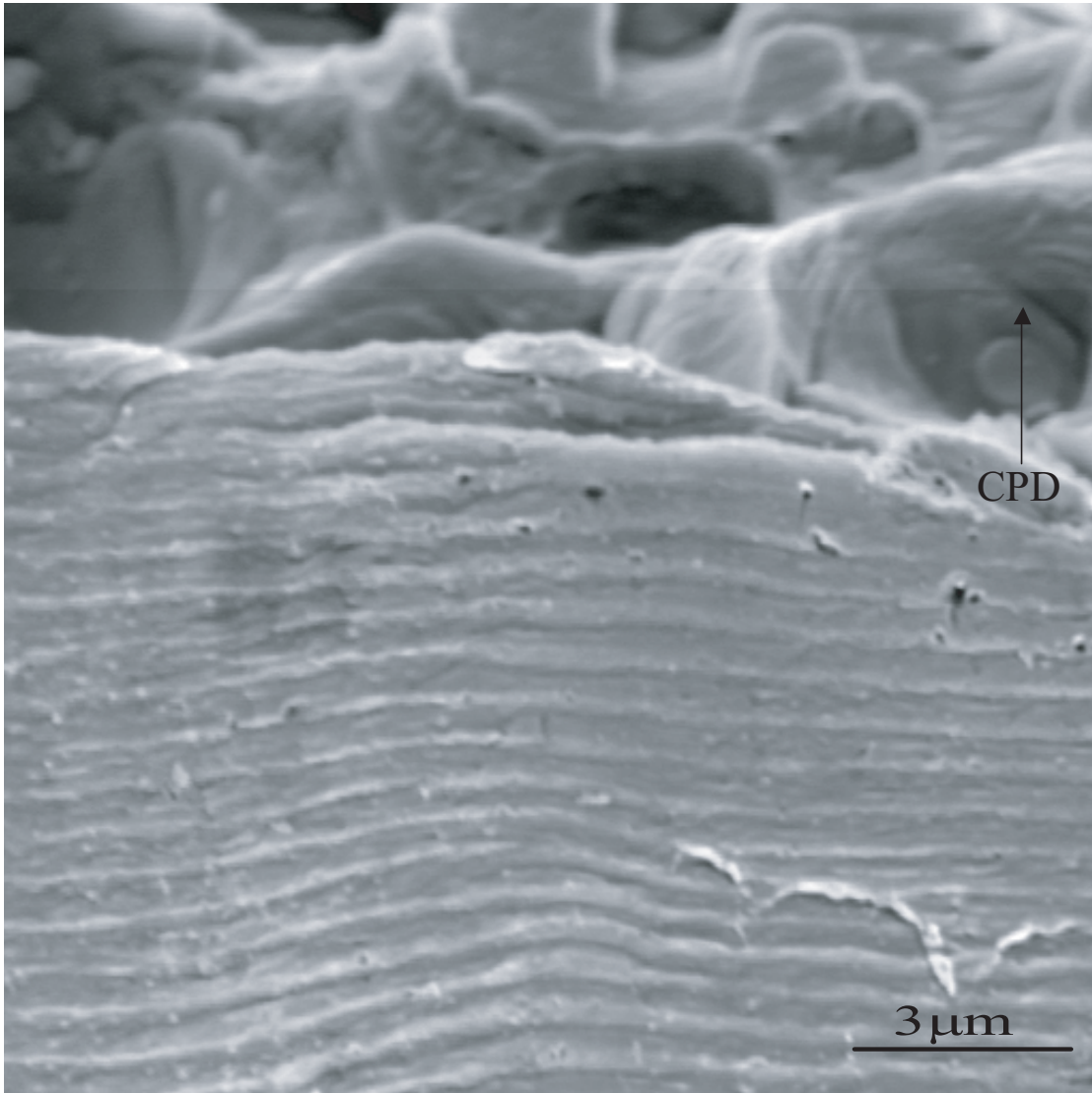


Fig. 3.10: The SEM image of A2017-T4 fatigue fracture surface: case3($\times 2000$), $\Delta K = 11.4 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

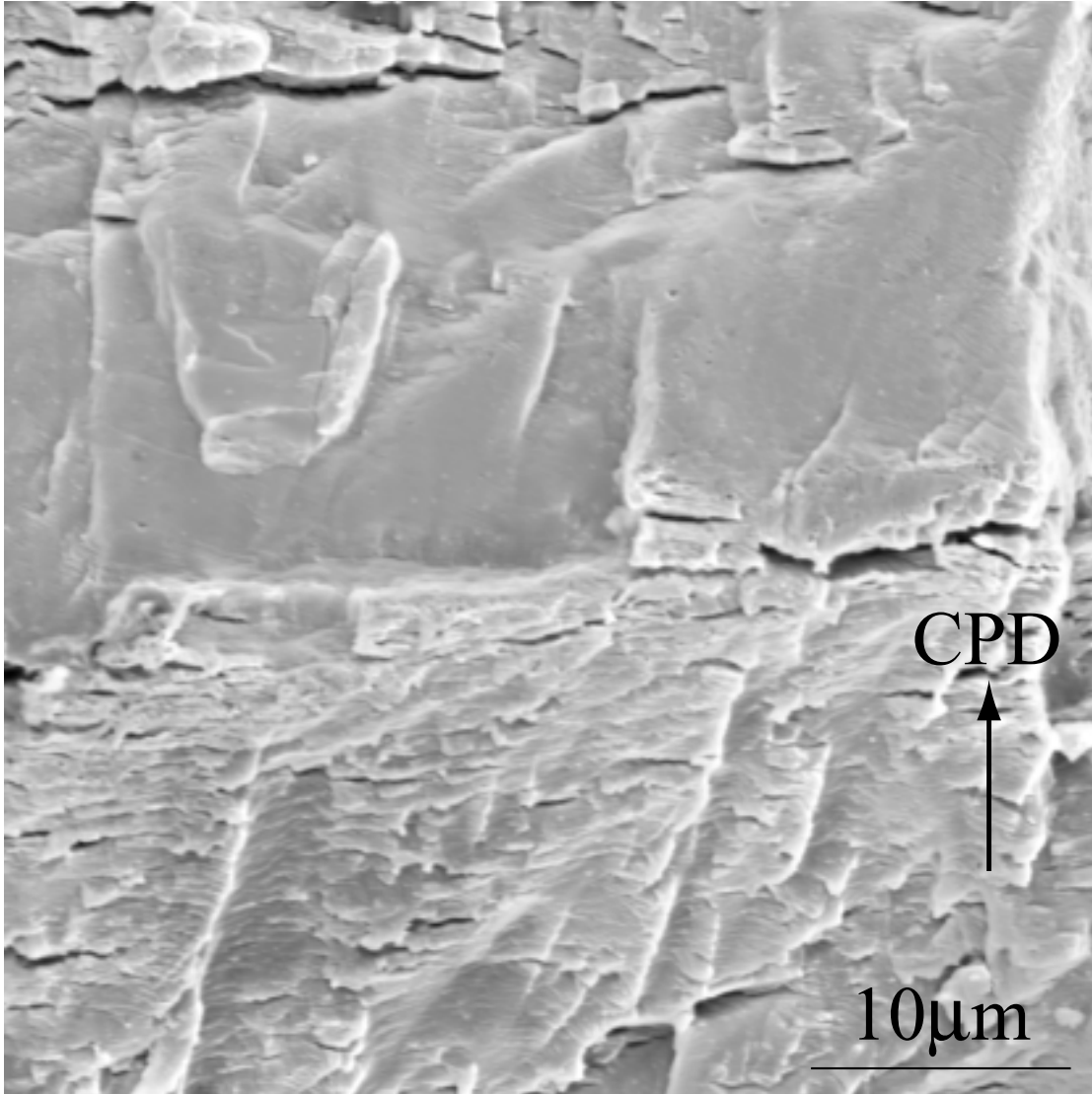


Fig. 3.11: The SEM image of A2017-T4 fatigue fracture surface: case4($\times 800$), $\Delta K = 5.9MPa\sqrt{m}$

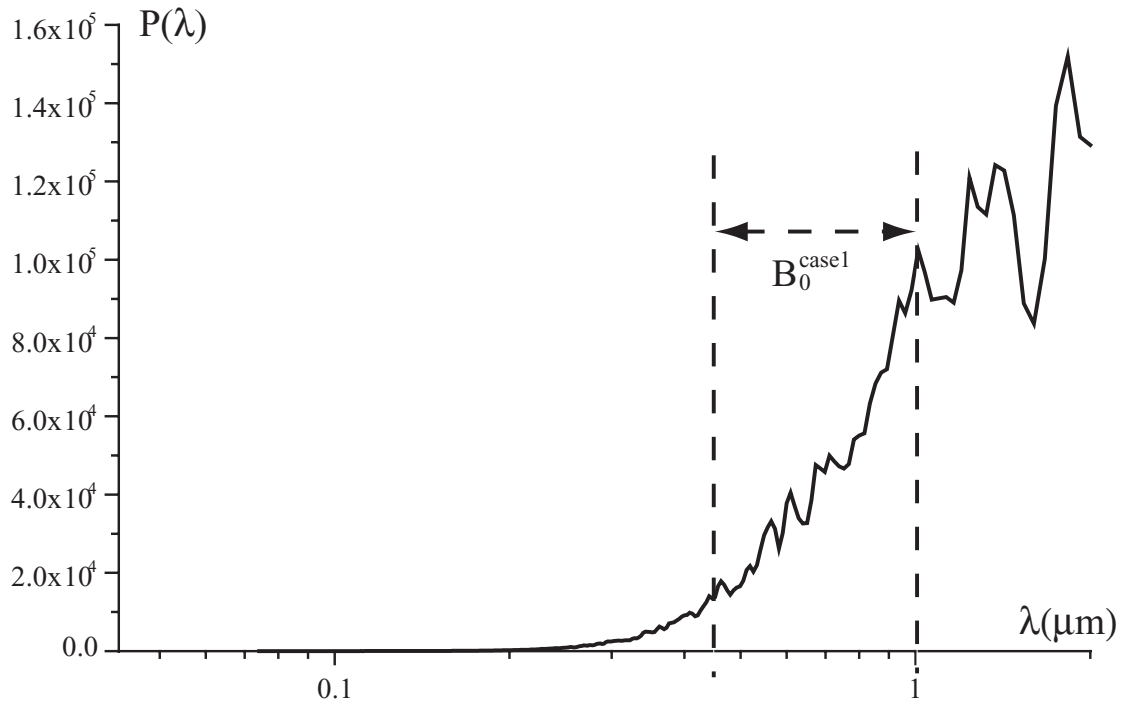


Fig. 3.12: Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from Fig.3.8

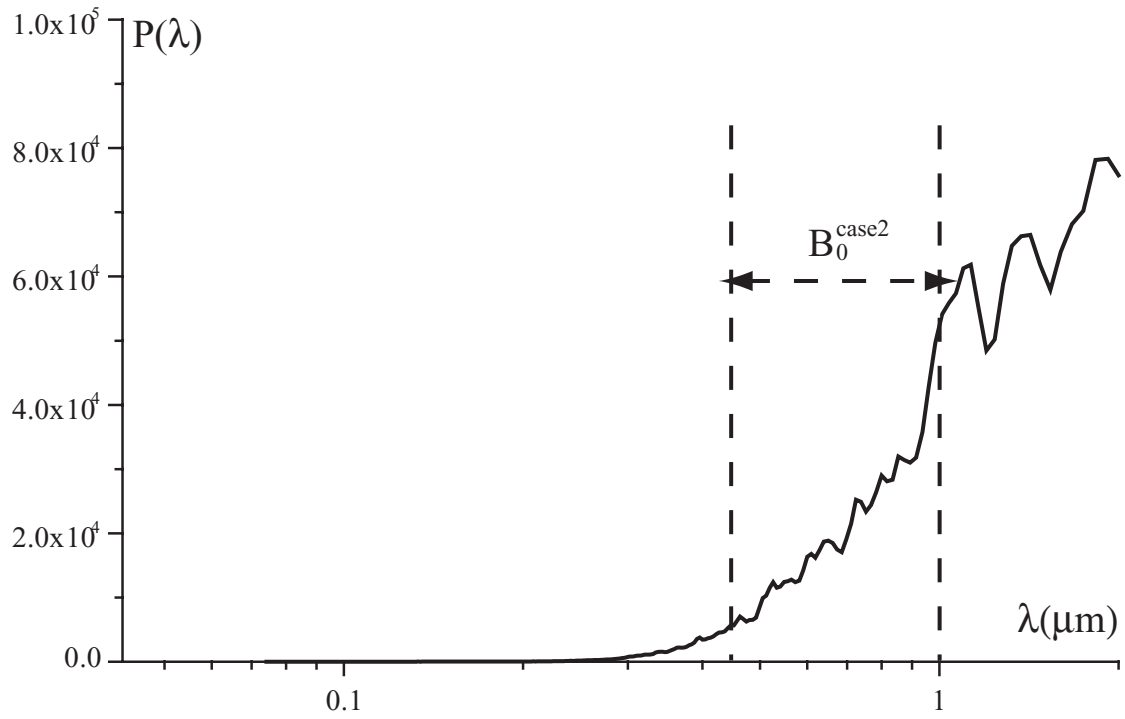


Fig. 3.13: Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from Fig.3.9

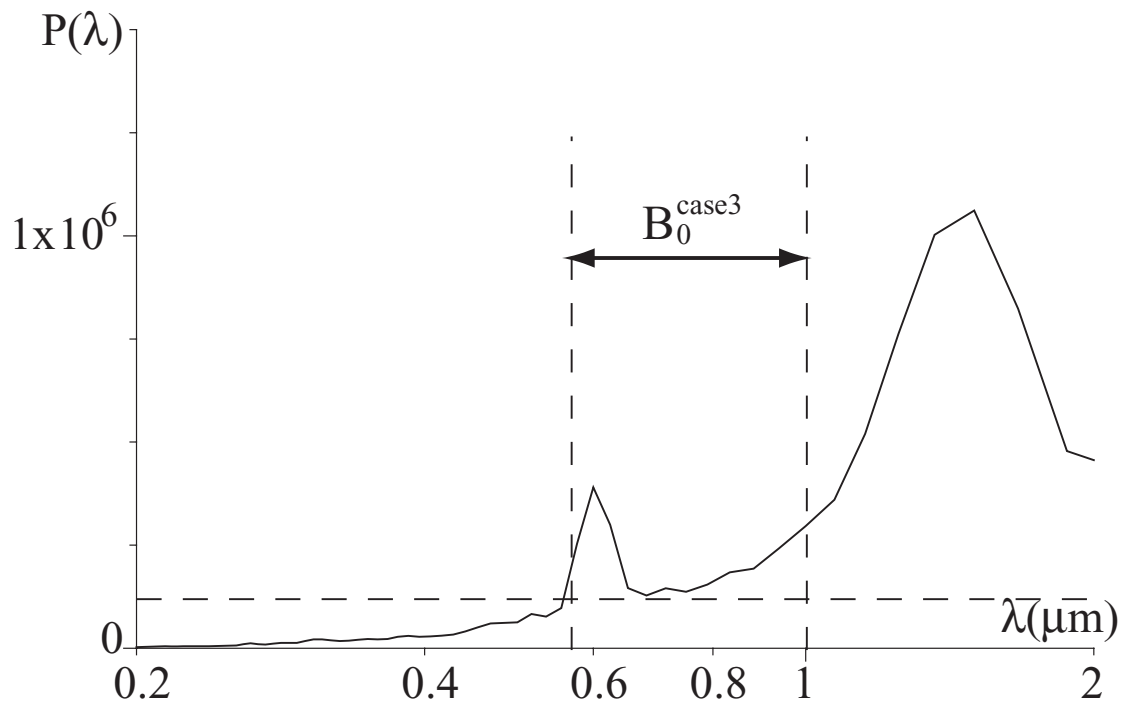


Fig. 3.14: Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from Fig.3.10

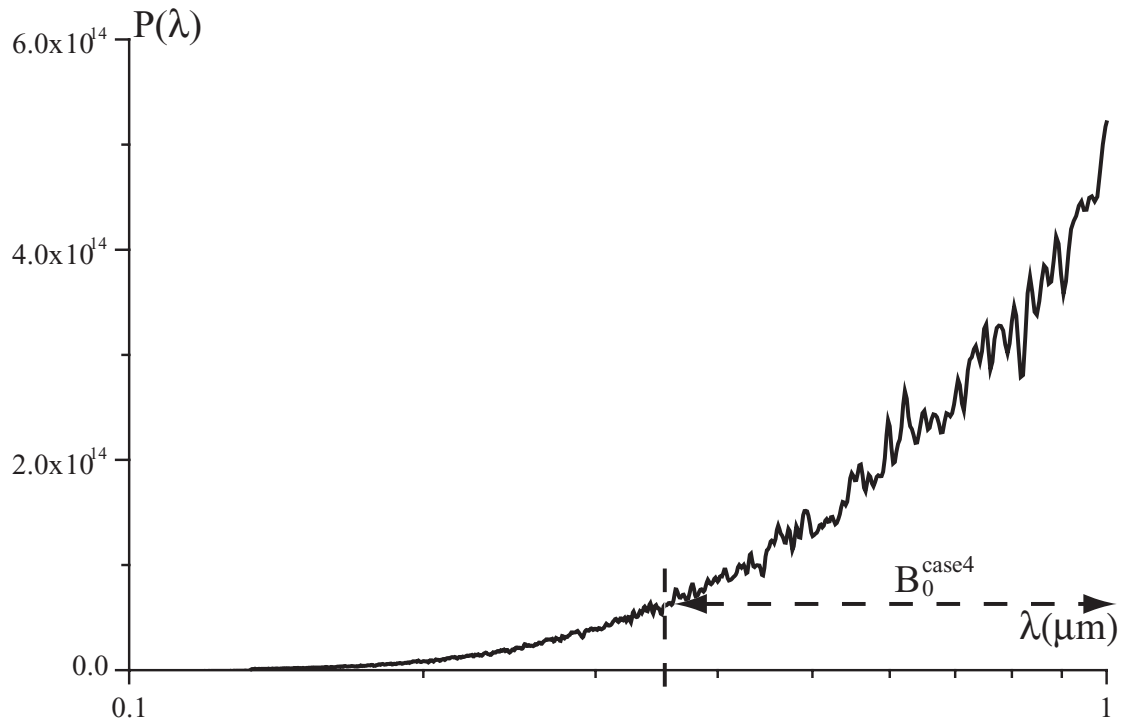


Fig. 3.15: Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from Fig.3.11

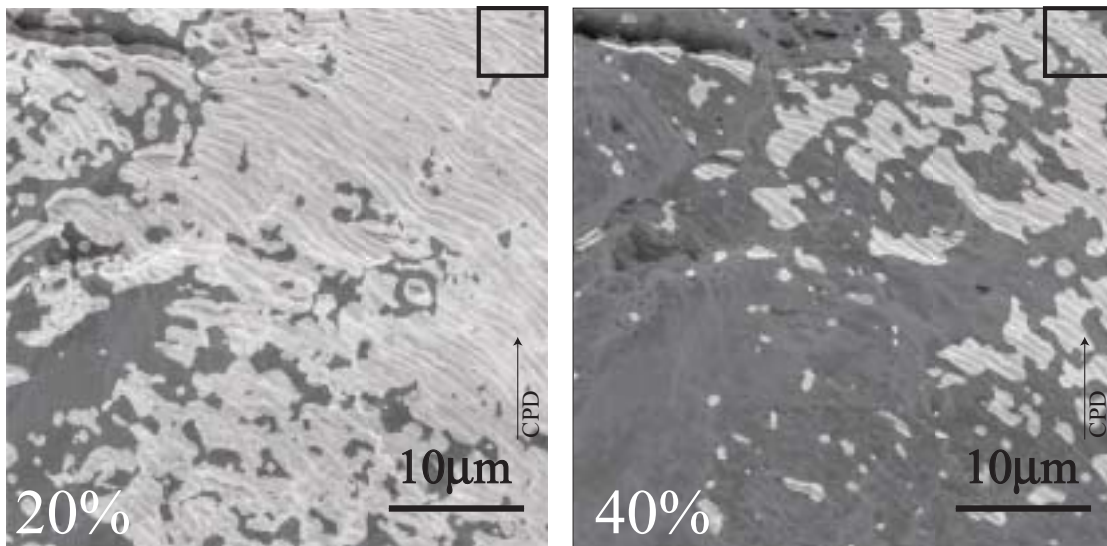


Fig. 3.16: Judgement result of striated surface area in Fig.3.8 using frequency region B_0^{case1} . Left: Threshold ratio is 20%. Right: Threshold ratio is 40%.

に示す．周期性評価関数 $P(\lambda)$ の値が最大値の 50%以上を満たす波長の範囲を，ストライエーションの波長 B_1^{case1} , B_1^{case2} , B_1^{case3} , B_1^{case4} として決定した．

3.4.3 破面画像へ Gabor ウェーブレット 変換の適用

B_1^{case1} , B_1^{case2} , B_1^{case3} , B_1^{case4} に示す範囲に含まれるストライエーションの周波数を用いて，ストライエーション度 C を計算し，領域同定を行った．Fig.3.24,3.25 は，Fig.3.8,3.9 の解析結果であり，しきい値率が 15%と 20%の場合の同定結果を示す．また，そのときのストライエーション破面率と，目視による領域判定結果を合わせて Fig.3.24,3.25 に示す．unknown と示したのは，ストライエーション領域の判断があいまいであった領域である．Fig.3.24,3.25 に示すストライエーション破面率の最大値は，目視による領域判定結果で unknown とした領域を全て S 領域とした場合の値である．また，最小値は unknown 領域を NS 領域とした場合の値である．同様に，Fig.3.10,3.11 の解析結果として，しきい値が 10%,15%の時の結果を Fig.3.26,3.27 に示す．また，Fig.3.28, Fig.3.29, Fig.3.30, Fig.3.31 に，大津のしきい値決定法，Kittler のしきい値決定法を用いて領域を決定した結果を示す．

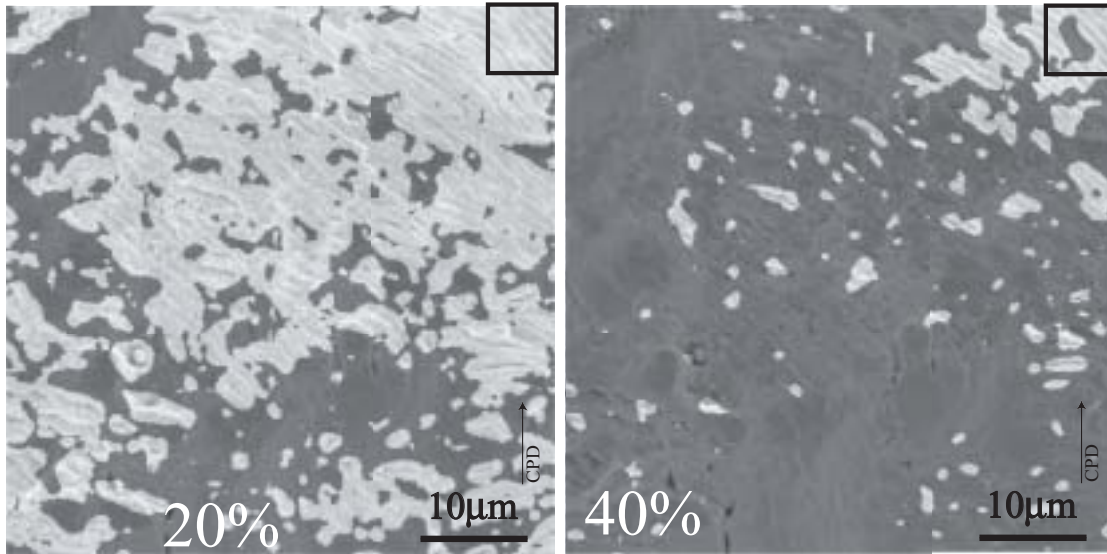


Fig. 3.17: Judgement result of striated surface area in Fig.3.9 using frequency region B_0^{case2} . Left: Threshold ratio is 20%. Right: Threshold ratio is 40%.

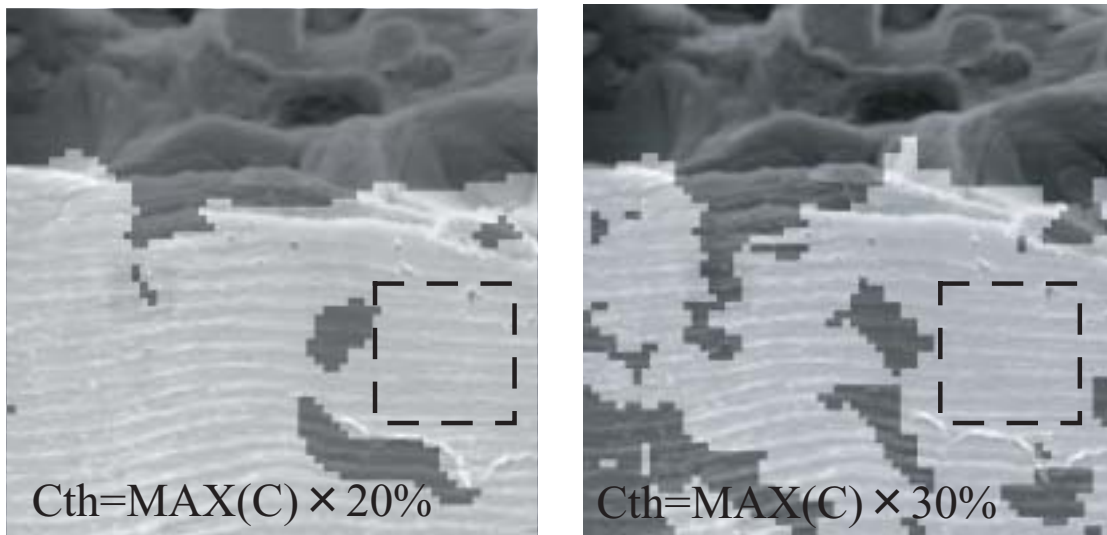


Fig. 3.18: Judgement result of striated surface area in Fig.3.10 using frequency region B_0^{case3} . Left: Threshold ratio is 20%. Right: Threshold ratio is 30%.

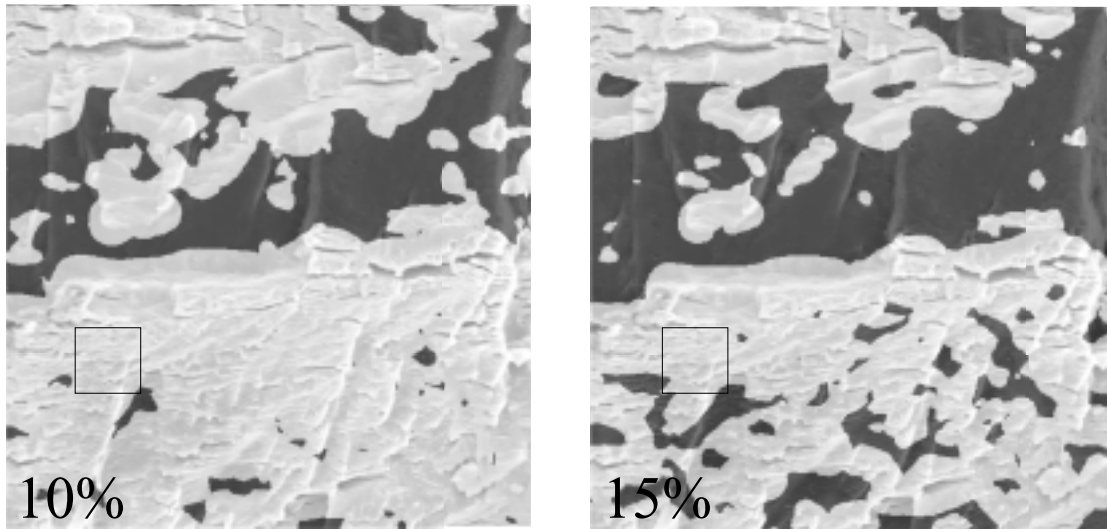


Fig. 3.19: Judgement result of striated surface area in Fig.3.11 using frequency region B_0^{case4} . Left: Threshold ratio is 10%. Right: Threshold ratio is 15%.

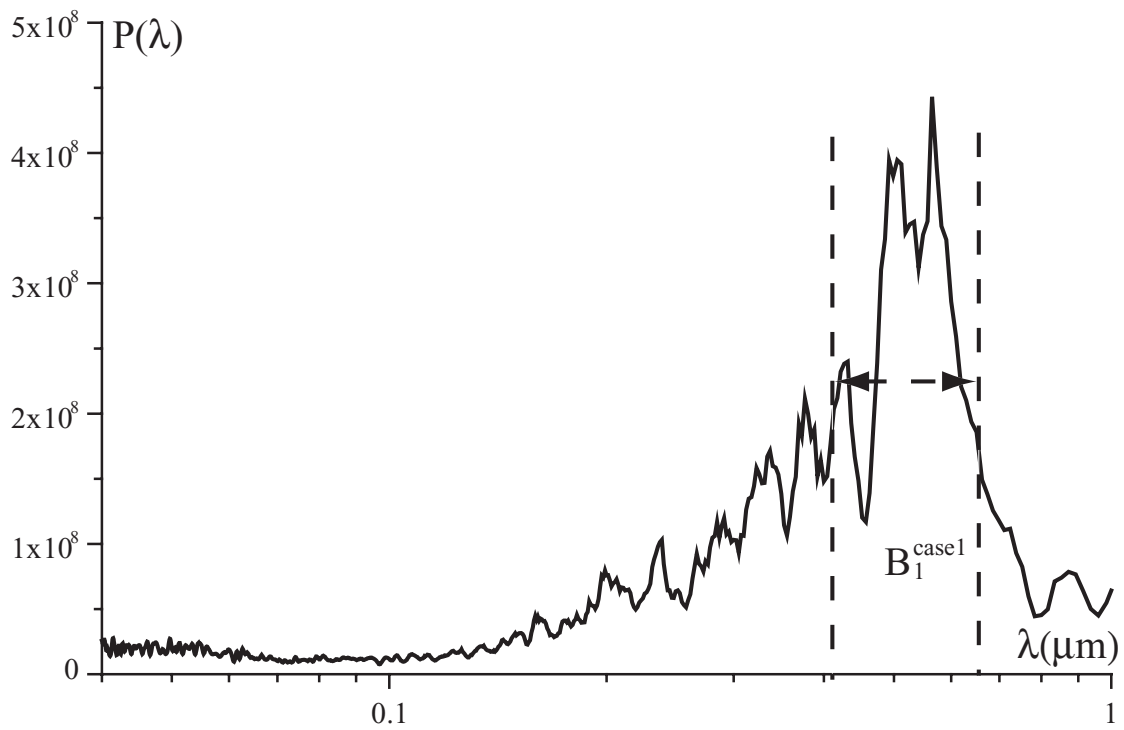


Fig. 3.20: Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from striation area in Fig.3.8 using FFT.

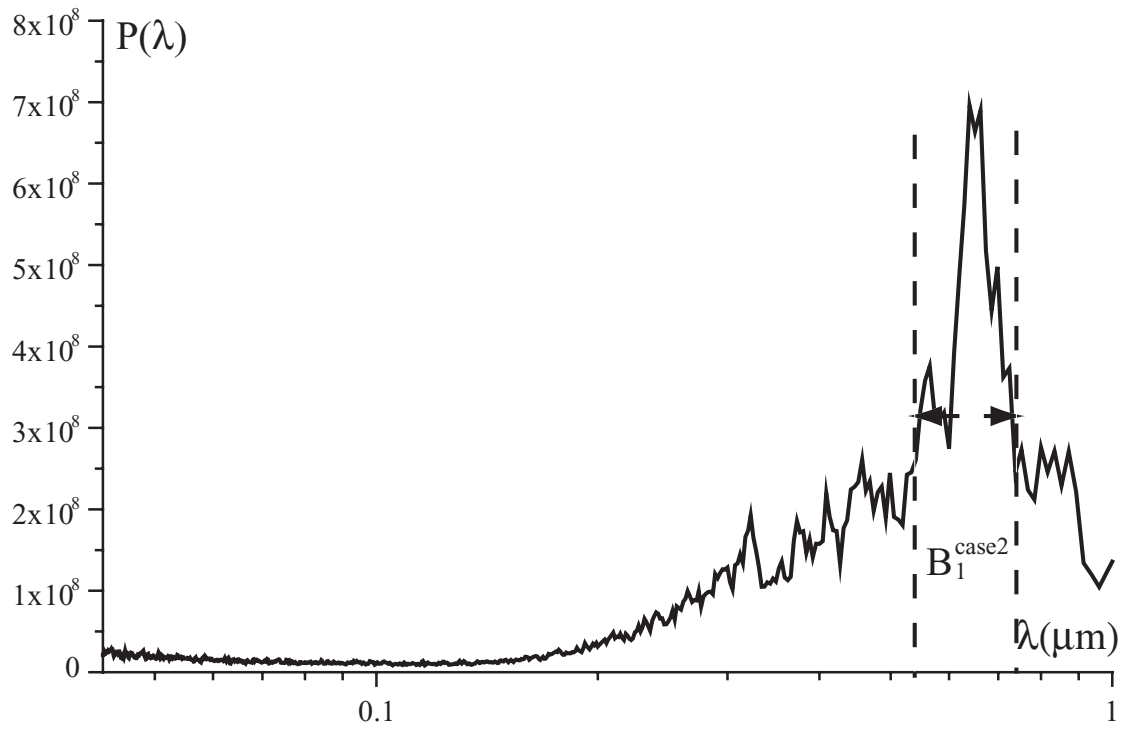


Fig. 3.21: Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from striation area in Fig.3.8 using FFT.

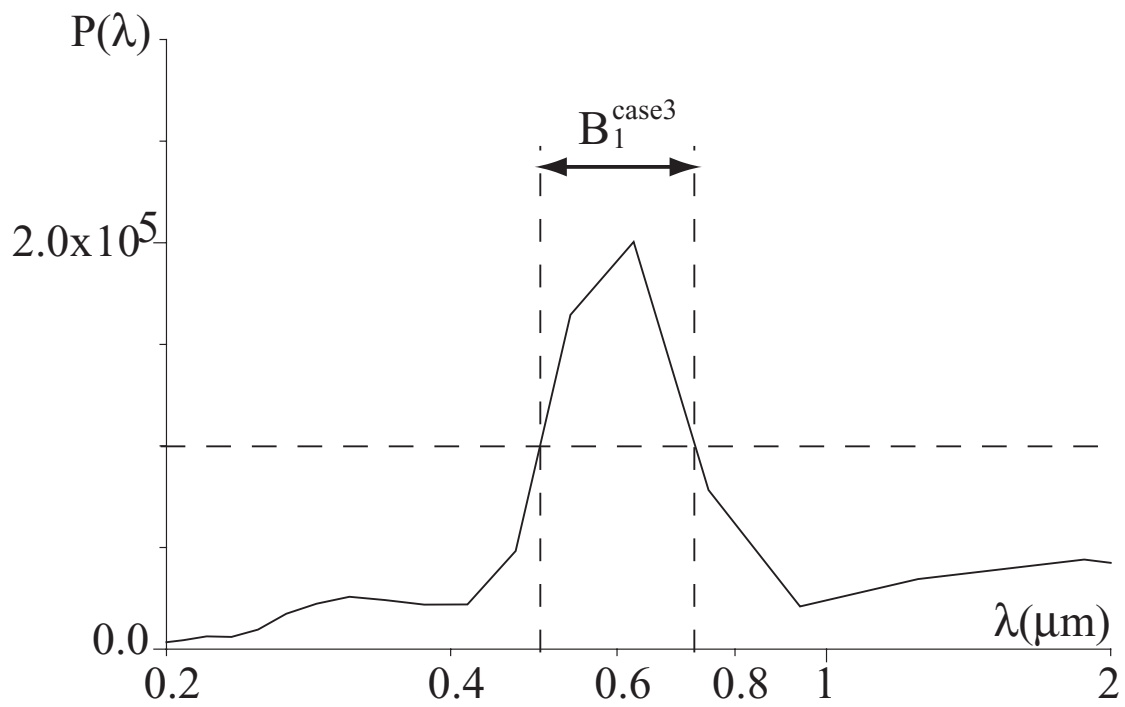


Fig. 3.22: Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from striation area in Fig.3.10 using FFT.

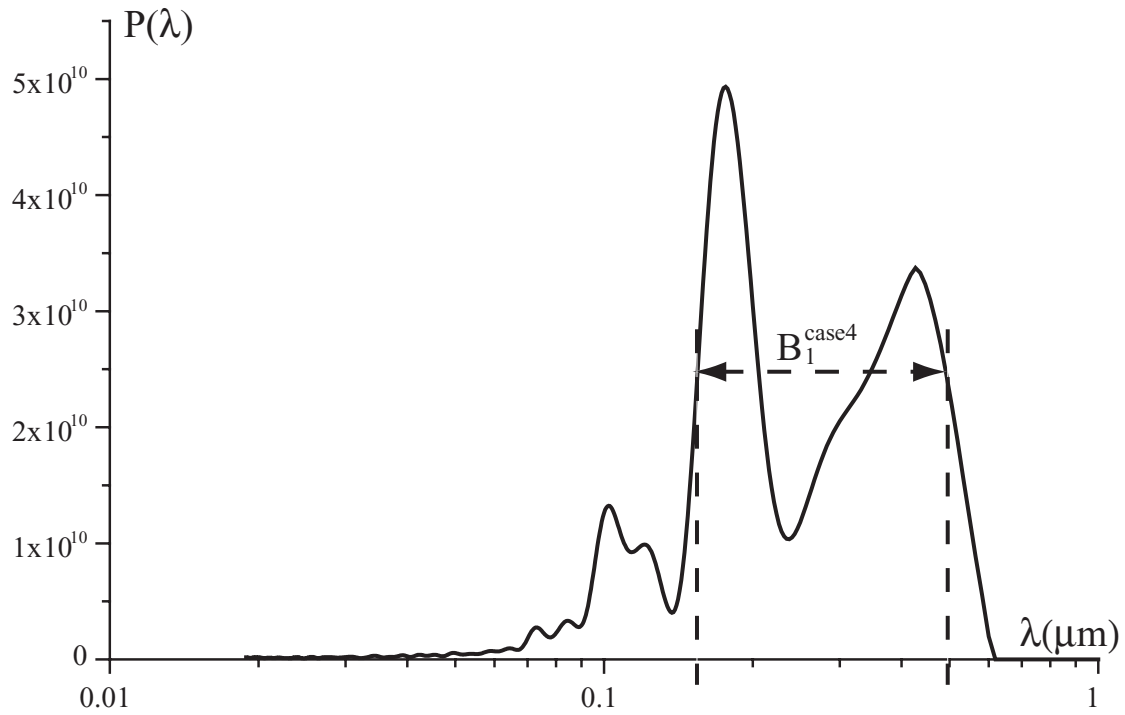


Fig. 3.23: Relationship between wave length λ and wave length evaluation function $P(\lambda)$ calculated from striation area in Fig.3.11 using FFT.

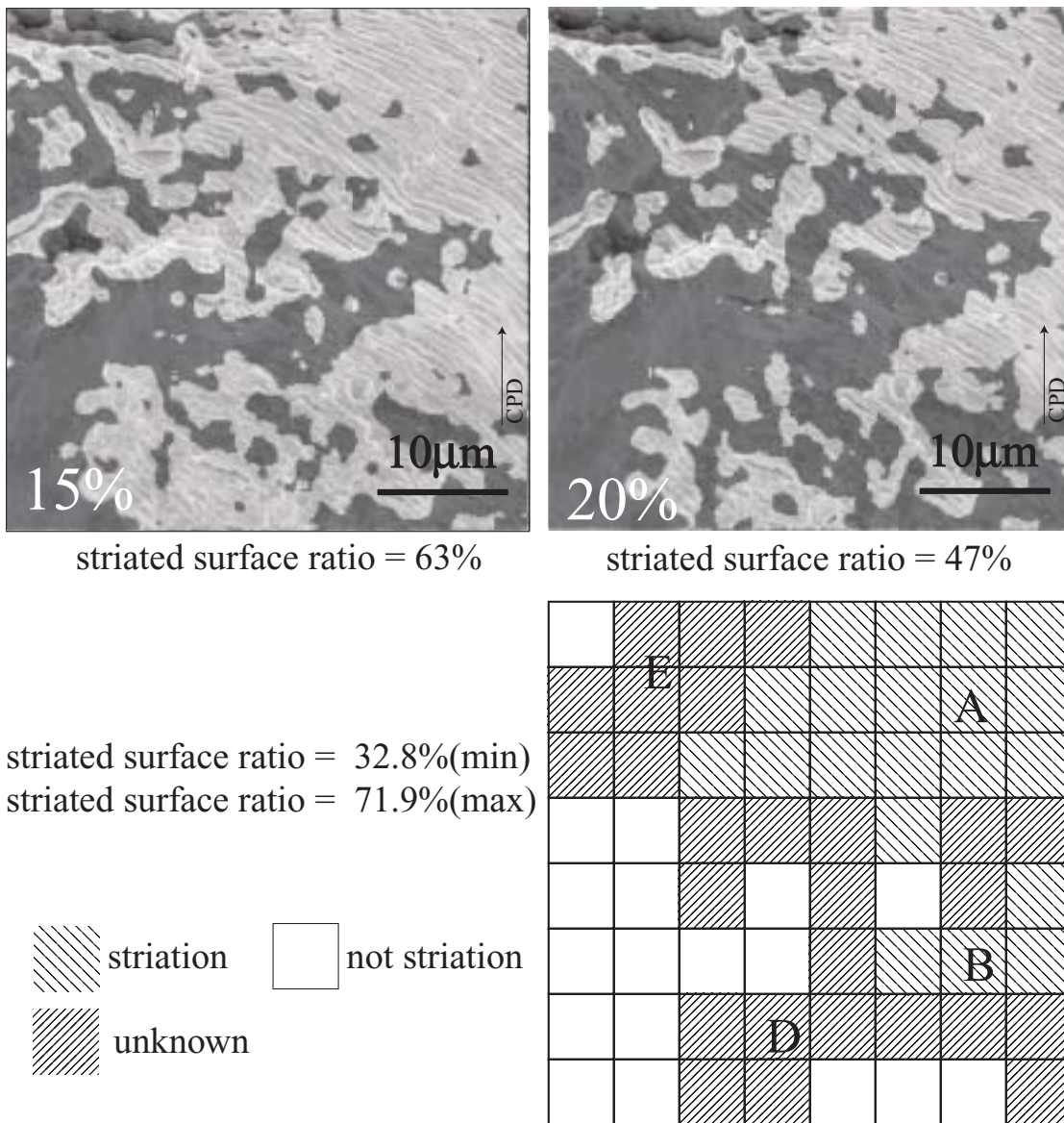
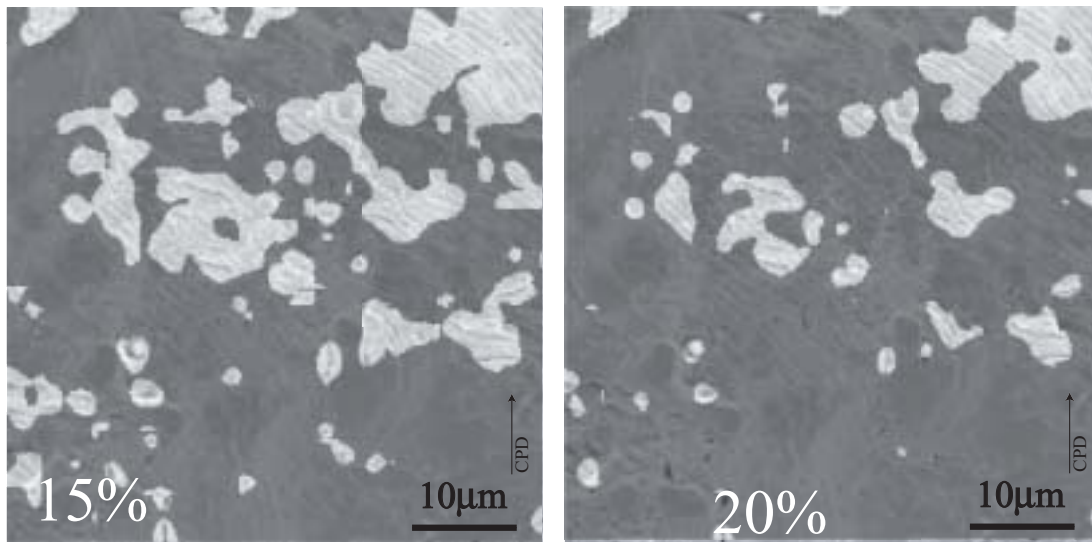


Fig. 3.24: The judgement result of the striated surface area in Fig.3.8 and the striated surface ratio. Top left: the threshold ratio is 15%. Top right: the threshold ratio is 20%. Bottom right: the striated area judged by the human observation.



striated surface ratio = 26%

striated surface ratio = 14%

striated surface ratio = 6.3% (min)
 striated surface ratio = 29.7%(max)

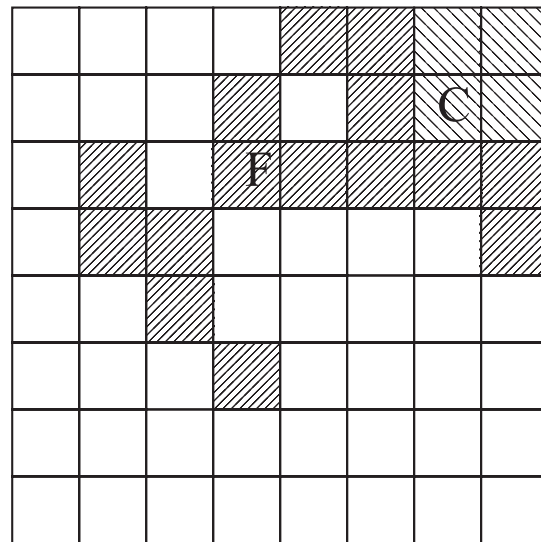
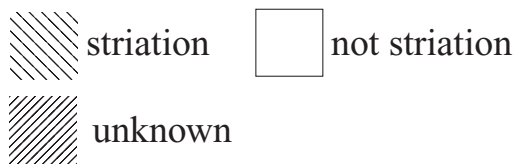


Fig. 3.25: The judgement result of the striated surface area in Fig.3.9 and the striated surface ratio. Top left: the threshold ratio is 15%. Top right: the threshold ratio is 20%. Bottom right: the striated area judged by the human observation.

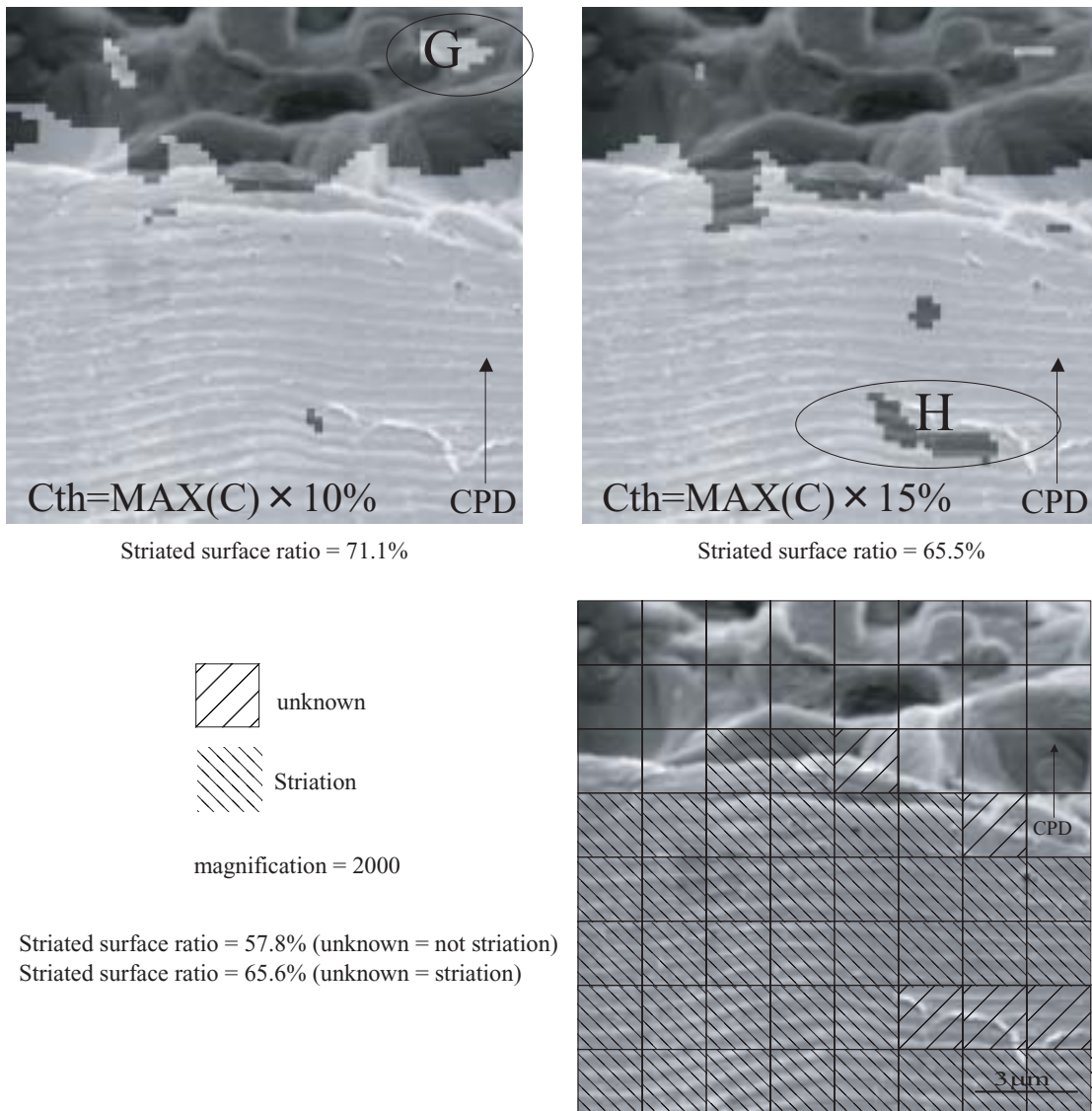


Fig. 3.26: The judgement result of the striated surface area in Fig.3.10 and the striated surface ratio. Top left: the threshold ratio is 10%. Top right: the threshold ratio is 15%. Bottom right: the striated area judged by the human observation.

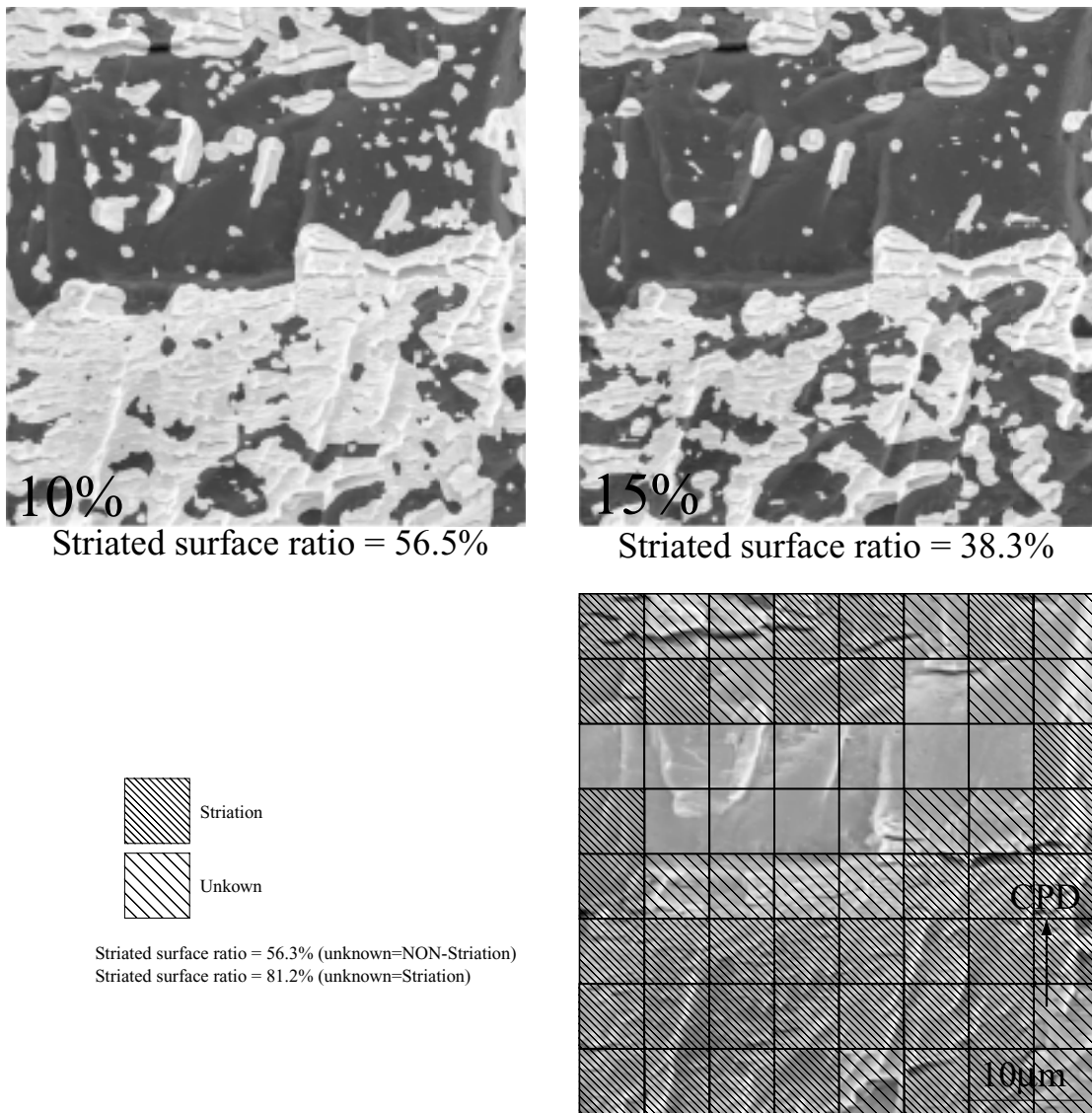


Fig. 3.27: The judgement result of the striated surface area in Fig.3.11 and the striated surface ratio. Top left: the threshold ratio is 10%. Top right: the threshold ratio is 15%. Bottom right: the striated area judged by the human observation.

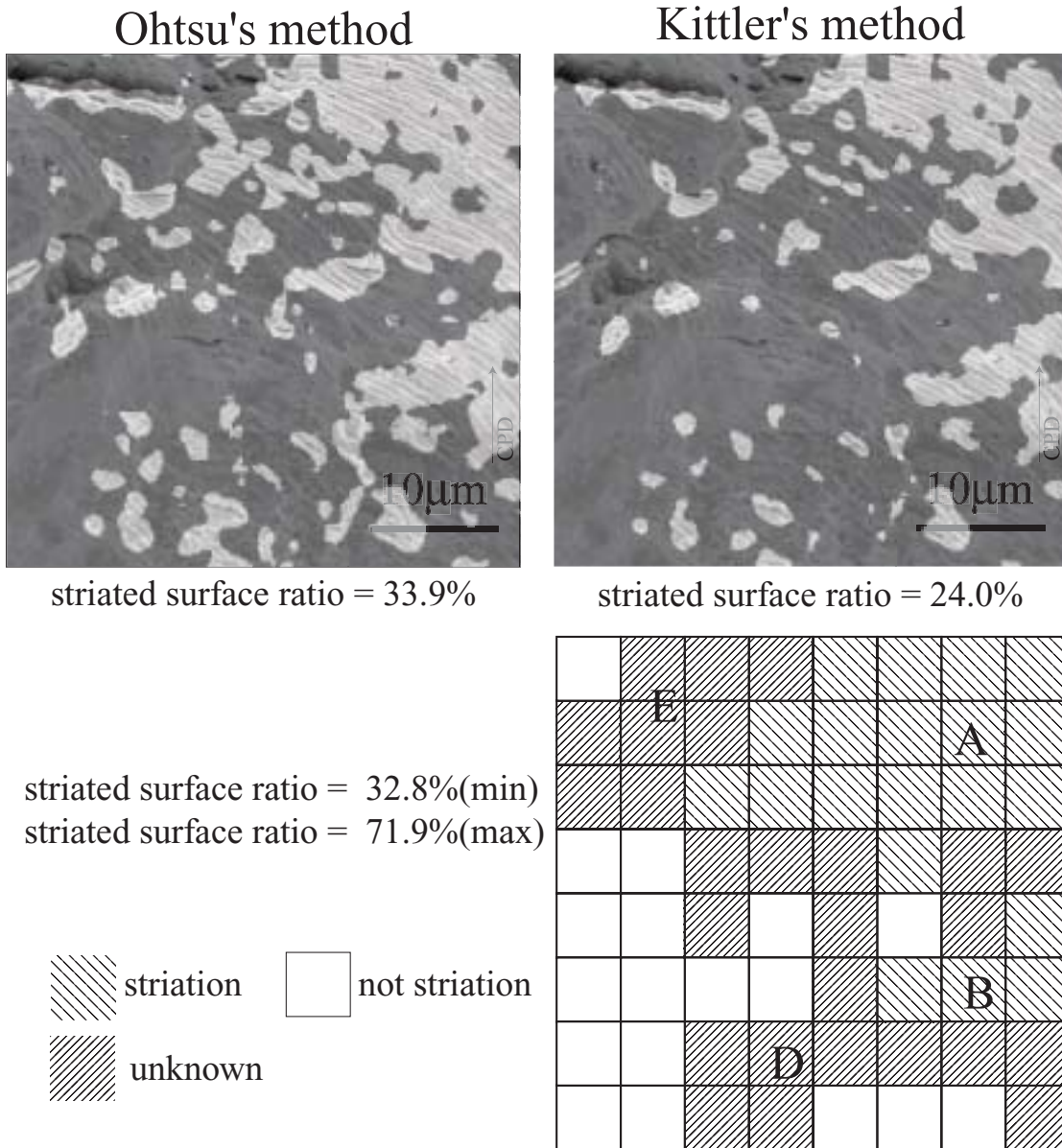
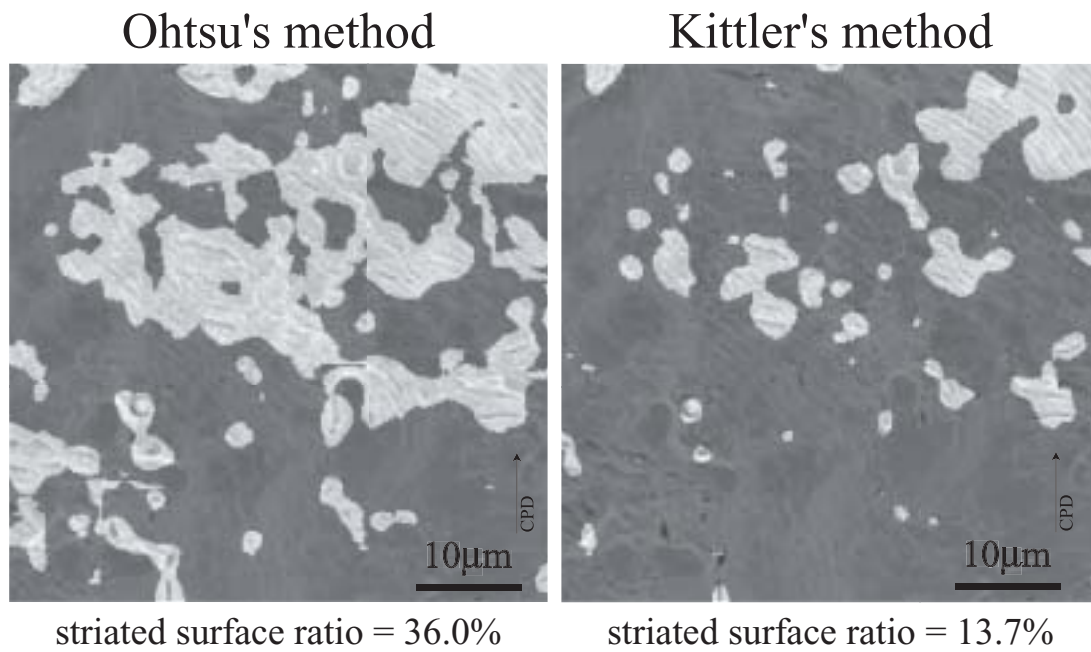


Fig. 3.28: The judgement result of the striated surface area in Fig.3.8 using Ohtsu's and Kittler's thresholding method.



striated surface ratio = 6.3% (min)
 striated surface ratio = 29.7%(max)

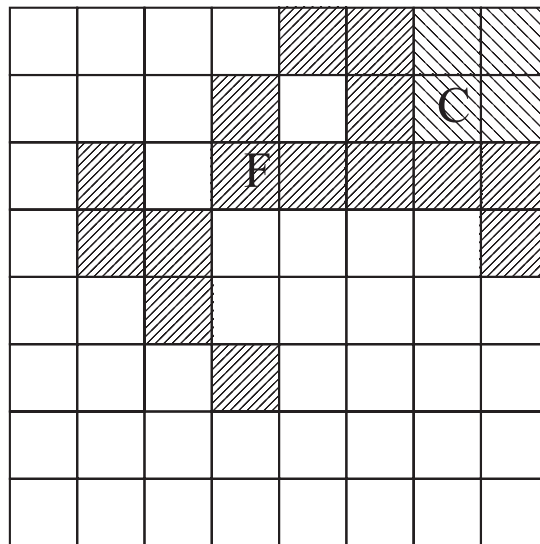
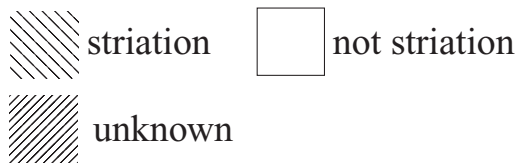


Fig. 3.29: The judgement result of the striated surface area in Fig.3.9 using Ohtsu's and Kittler's thresholding method.

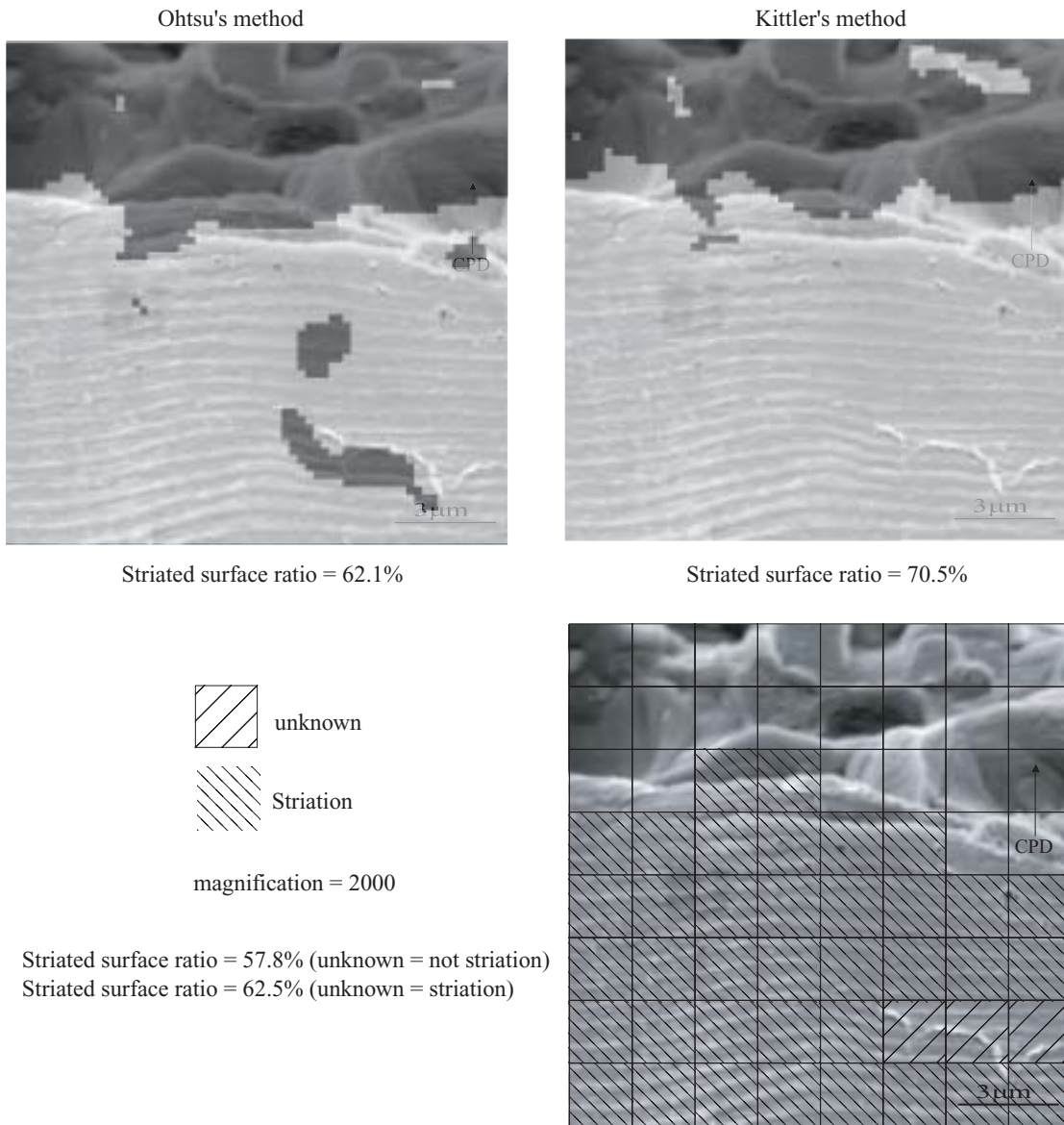


Fig. 3.30: The judgement result of the striated surface area in Fig.3.10 using Ohtsu's and Kittler's thresholding method.

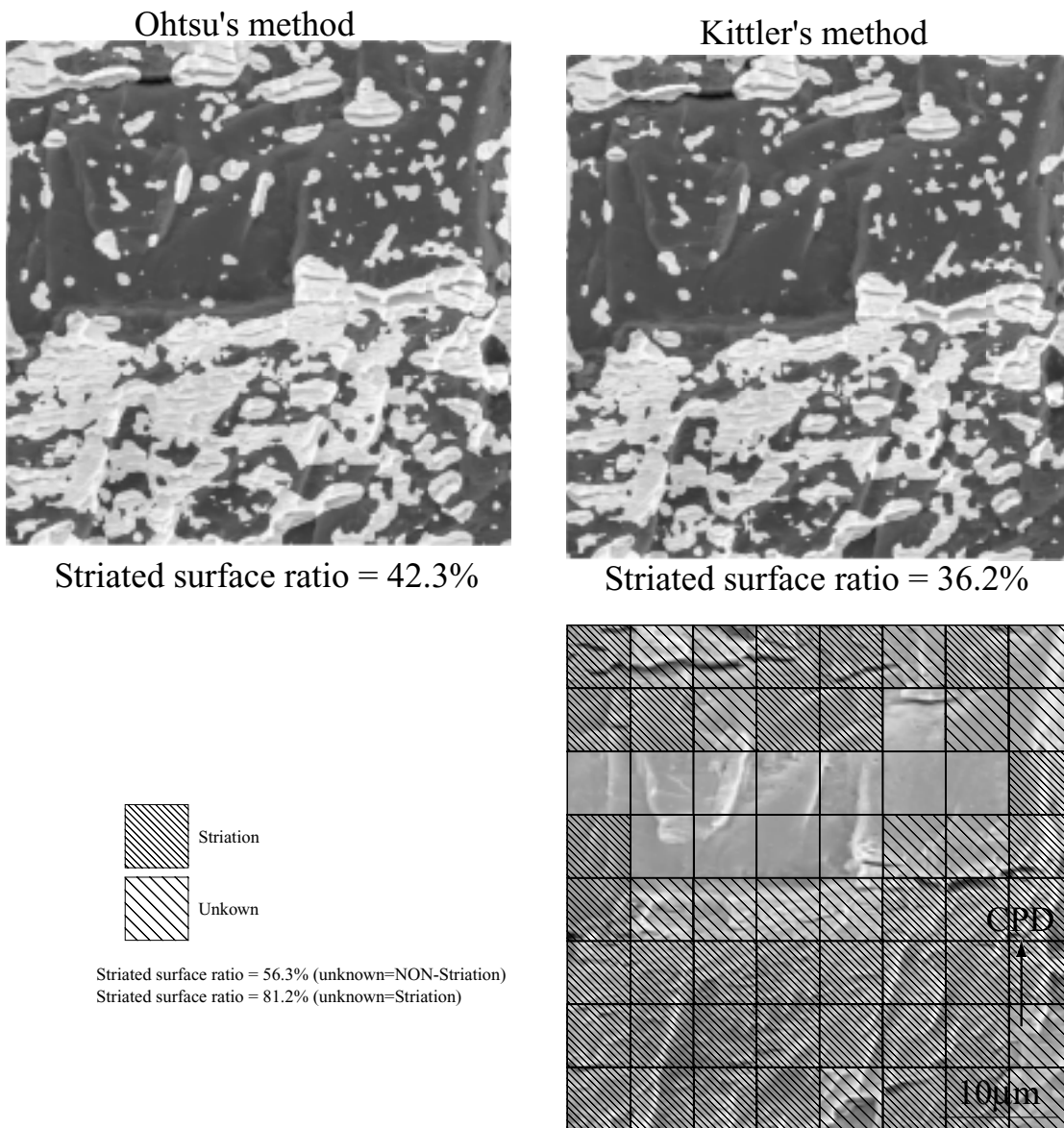


Fig. 3.31: The judgement result of the striated surface area in Fig.3.11 using Ohtsu's and Kittler's thresholding method.

3.5 考察

3.5.1 実破面の領域判定結果について

しきい値を対話的に決めた場合の判定結果

まず，目視による領域判定結果と，ストライエーション度を用いた領域判定結果を対応付けることにより，手法の妥当性の評価を行う．

最初に 2.25Cr-1Mo 鋼疲労破断面の解析結果について述べる．Fig.3.24 において，目視による結果で S 領域とされた領域 (A,B 部) は，ストライエーション度による評価においても S 領域であると判定されていることがわかる．同様に，Fig.3.25 においても，目視で S 領域と判断された箇所 (C 部) は，ストライエーション度による評価でも S 領域として判定されていることがわかる．

また，unknown とした領域に関しては，しきい値が大きくなるとストライエーション度の判定において，S 領域の判定領域 (Fig.3.24D,E 部，Fig.3.25F 部) が明瞭に小さくなっていることがわかる．これは，unknown 領域のストライエーション度が S 領域のストライエーション度よりも値が小さく計算されているからである．

次に，A2017-T4 アルミニウム合金疲労破断面の解析結果について述べる．

Fig.3.26 では，目視による判定結果では，図下部がストライエーション領域，上部が非ストライエーション領域と判定されている．ストライエーション領域の中で，右下部にストライエーションが不鮮明な領域があるため，ここは unknown の領域とした．これに対して，ストライエーション度を用いて決定した領域も明瞭に，下部がストライエーション領域と判定されており，また，H 部も C_{th} を大きくすると他の領域よりも先に非ストライエーション領域となることから，H 部に関してはストライエーション度が他よりも小さい値として計算されていると言える．また，G に関しても同様で，目視では非ストライエーションと判定された領域であることから，しきい値を大きくすることで非ストライエーション領域と判定されることから，この領域もストライエーション度が低い領域であることがわかる．

Fig.3.27 では，目視による判定結果では，図の下部と上部に分かれてストライエーション領域が判定されている．また，その中間の領域および，右下部が unknown と判定されている．これに対して，ストライエーション度を用いた判定結果では，同様にストライエーション領域と判定されている領域が上下に分かれている．また，右下下部に関しては，しきい値を大きくすることで，非ストライエーション領域に変化していることから，ストライエーション度が小さいことがわかり，目視による unknown という判定結果と対応していることがわかる．しかし，Fig.3.11 からわかるように，他の解析例と比較して，Fig.3.11 はストライエーションが整った縞模様として形成されていない．そのため，Fig.3.27 では，目視でストライエーションと判定された領域でも，ストライエーション度が大きく求まっていないことがわかる．

以上のことから，ストライエーションの不明瞭な領域に関してはストライエー

ション度が低く計算されており、目視による判断をストライエーション度が反映していると考えられる。つまり、しきい値を変化させることにより、ストライエーションが明瞭な領域、不明瞭な領域を明示することができ、解析者に対する支援をストライエーション度が可能にしていると言える。

目視による判断の場合、各小領域に観察者の主観が入ってしまうことから、特にストライエーションが明瞭でない領域の判断に関しては多くの曖昧さを持ってしまう。一方、本手法による領域判断では、しきい値を対話的に決めた場合には、観察者の主観が入るのはしきい値のみである。従って、目視で判断を行うよりも、観察者の主観が入りにくいといえる。さらに、大津・Kittlerのしきい値選定法を用いた場合には、観察者の主観は入らずにストライエーション領域の決定が可能である。しかし、先にも述べたように、これらの手法は画像処理的に決まっていることから、結果が必ずしも破壊力学的に的確な領域を指摘しているとは限らない。

大津・Kittlerのしきい値決定法を用いた場合の判定結果

Fig.3.28,3.29,3.30,3.31における大津・Kittlerのしきい値選定法を用いた場合のストライエーション領域の判定結果は、目視によるものとよく合致していると言える。例えば、Fig.3.28では前述のように右上がストライエーション領域であり、左下が非ストライエーション領域と判定されている。Fig.3.29では、右上部は両方の決定法共にストライエーション領域と判定されている。また、非ストライエーション領域についても同様である。ただ、大津のしきい値決定法のほうが、ストライエーション領域を大きく判定している。これは目視により unknown とされた領域を Kittler の判定結果と比較して大きくストライエーション領域と判定していることに起因している。なぜなら、Fig.3.9は、ストライエーション破面率が低い例であり、大津のしきい値決定法の「対象領域と背景領域の画素数に差が多い時に、どちらかに偏る傾向がある」という特徴が出ていると考えられる。従って、目視によりストライエーション領域が低いとわかっている場合において、しきい値決定法を用いるのであれば、Kittlerのしきい値決定法を用いたほうがよいと言える。

Fig.3.26, Fig.3.27では、大津のしきい値決定法のほうが目視との対応が良く決定されている。ここでは、目視の判定結果において、ストライエーションと非ストライエーションの領域の差があまり無い。従って、大津のしきい値決定法で十分に目視を満たす判定結果が導くことができていると考えられる。逆に Kittler のしきい値決定法は、前述のように対象領域と背景領域の画素がどちらも正規分布であるという仮定のもとに精度良く決まる手法である。ストライエーション度は、正規分布ではないことから、この場合では目視を満たす結果が導けないことがわかる。

これにより、大津・Kittlerのしきい値選定法は領域判定のために、有効な手法であることがわかる。ストライエーション領域が目視により低い、もしくは高い場合は Kittler のしきい値決定法のほうが、目視の判定結果を良く満たす結果を導くことが可能であると言える。また、ストライエーション領域と非ストライエーション領域が 50%づつと判断されるような画像については大津のしきい値決定法

のほうが有効であると考えられる。しかしながら、これらの手法の結果は画像処理的に導かれており、破壊機構の観点から判断された結果ではないことは注意しなければならない。

また、本手法はストライエーションを検出目的としている為、Gabor ウェーブレットをマザーウェーブレット ψ としてふさわしいと考えて使用した。従って、あくまでストライエーションのみの有効な手法である。しかしながら、式(3.1)に示したウェーブレット変換の基礎式から、他の破断面の特徴を持つマザーウェーブレットを作成することができるのであれば、他の破壊様相の評価も可能になると考えられる。

3.5.2 ストライエーション破面率について

対話的にしきい値を決定した場合のストライエーション破面率について述べる。

まず 2.25Cr-1Mo 鋼疲労破断面のストライエーション破面率について述べる。目視による結果ともっとも良く対応しているのはしきい値率が 20%の場合である。この場合、評価された破面率は Fig.3.24 では 47%、Fig.3.25 では 14%である。この値は、Fig.3.24 では、目視による判定の破面率の最大値 (71.9%) と最小値 (32.8%) の範囲内に含まれていることがわかる。Fig.3.25 についても、目視では、6.3%~29.7%の範囲であるのに対し、ストライエーション度からは 14%と求まる。従って、評価される破面率も目視による結果を満たすものであると言える。

A2017-T4 アルミニウム合金疲労破断面のストライエーション破面率について述べる。Fig.3.26 では、しきい値率が 15%の時、目視の判定結果とよく対応して、ストライエーション破面率は 65.5%である。これは、目視による判定結果で、unknown 領域をストライエーション領域としたときの値とほぼ一致している。また、Fig.3.27 では、しきい値率が 10%の時にストライエーション破面率が、目視による判定結果のストライエーション破面率の範囲内の値で求まっている。

従って、対話的にしきい値を決定した場合のストライエーション破面率は、目視判定により求まるストライエーション破面率を満たしていることがわかり、ストライエーション度の有効性が確認された。

3.5.3 しきい値に影響を与える条件についての検討

次に、目視と対話的に決定する際に、しきい値に影響する要素について検討する。検討する要素は、画像の明度、コントラストと、ストライエーションの明瞭さについて検討する。

明度とコントラストは SEM による画像作成の際に影響するパラメータである。また、ストライエーションの明瞭さは、 ΔK や材料の延性に影響するパラメータである。 ΔK が小さいとき、ストライエーションの形成は材料の結晶粒界等のミクロ構造に影響される為、明瞭な縞模様として構成されない。また、マルテンサイト鋼など高硬度材料でもストライエーションは生じにくく、アルミなどの延性

材料と比較してストライエーションは明瞭でない¹⁵。

画像の明度とコントラストについては，Adobe 社の Photo Shop7.0 を用いて Fig.3.3 を加工した画像を用いて解析を行った。また，ストライエーションの明瞭さについては，Fig.3.3 を構成する際の sin 波の振幅を小さくした画像を用いて解析を行った。

画像の明度とコントラストのしきい値に与える影響に関する検討

Fig.3.3 の明度とコントラストを変化させた際のしきい値の変化について検証する。ここで，明度とは，画像全体の画素値の平均値であり，コントラストとは標準偏差を示す。

明度を変化させた場合の，しきい値と明度の関係を Fig.3.32 に示す。またコントラストしきい値の関係を Fig.3.33 に示す。しきい値は，中央部がストライエーション領域であると判断される値を目視により決定した。また，明度とコントラストを変化させる範囲は，中央部の縞模様が観察される範囲とした。明度を最大 (255) にしたり，コントラストを 0 にする場合も考えられるが，この場合は中央部の縞模様が観察されないため，そのような極端な状況で撮影された SEM 画像は解析に使用しないからである。

明度，コントラスト共に，しきい値率が 50% の場合に，破面率が 6% となることがわかり，明度，コントラスト共にしきい値には影響を与えないことがわかった。

明度の変化は平均値の変化であることから，ある波形 $x(t)$ に対して，定数 x_0 を加えたものと考えて，フーリエ変換の結果に影響を及ぼさない。また，コントラストの変化も同様に，ある倍率 a について $x'(t) = a(x(t) - Average(x(t)) + Average(x(t)))$ のように線形変換で示されることから，フーリエ変換の結果において，乱数部のスペクトルの強度と，ストライエーション分のスペクトルの強度の比は変化しない。その為，しきい値率は，明度やコントラストの変化に影響されないと考えられる。

ストライエーションの明瞭さのしきい値に与える影響に関する検討

次に，ストライエーションの明瞭さがしきい値に与える影響について検討する。

Fig.3.34 はストライエーションの明瞭さとき裂進展速度 (da/dN) や応力比 R との関係を示した図である。き裂進展速度が遅い場合は，ストライエーションが明瞭でない。逆にき裂進展速度が速い場合は，ストライエーションが明瞭である。ここで述べるストライエーションの明瞭さというのは，縞模様の整然とした様子であり，不明瞭なストライエーションとは，縞の間隔が揃っていないか，縞自体が分岐したりしているストライエーションのことである。

ストライエーションが不明瞭である場合は，ストライエーション度は明瞭である場合と比較して小さい値である。従って，き裂進展速度が遅い場合，特にき裂進展曲線状で $2a$ 領域に相当する場所の破面であれば，しきい値は小さく取る

ほうが、目視による結果を満たすと考えられる。これに対して、2b や 2c 領域の破面である場合は、しきい値を大きく取ることにより、目視による領域判定結果をよく満たすと考えられる。例えば、本論文で解析した破面の例から考えると、Fig.3.10($\Delta K = 11.4MPa\sqrt{m}$) に示す明瞭なストライエーションを持つ破面画像に対してはしきい値率は 20%程度で目視による結果を満たす。これに対し、Fig.3.11($\Delta K = 5.9MPa\sqrt{m}$) の不明瞭なストライエーションを持つ破面の場合は 10%程度で、目視による結果を満足する。従って、ストライエーションが不明瞭である場合、これは ΔK が小さい場合や応力比 R が大きい場合⁵²に相当するが、この場合はしきい値は小さく取り、 ΔK が安定き裂進展領域の場合はしきい値は大きく取ること目視による結果を満たすストライエーション領域の決定が可能になるといえる。

以上のことから、しきい値は、画像のコントラストや明るさという SEM の観察による条件よりは、むしろストライエーションの明瞭さといった破面の構造に依存することがわかる。すなわち、しきい値は、 ΔK や材料の硬さに依存し、 ΔK が小さい場合や高硬度材料の場合は、ストライエーションが規則正しい縞模様とならないため、しきい値を小さく取る必要があると言える。

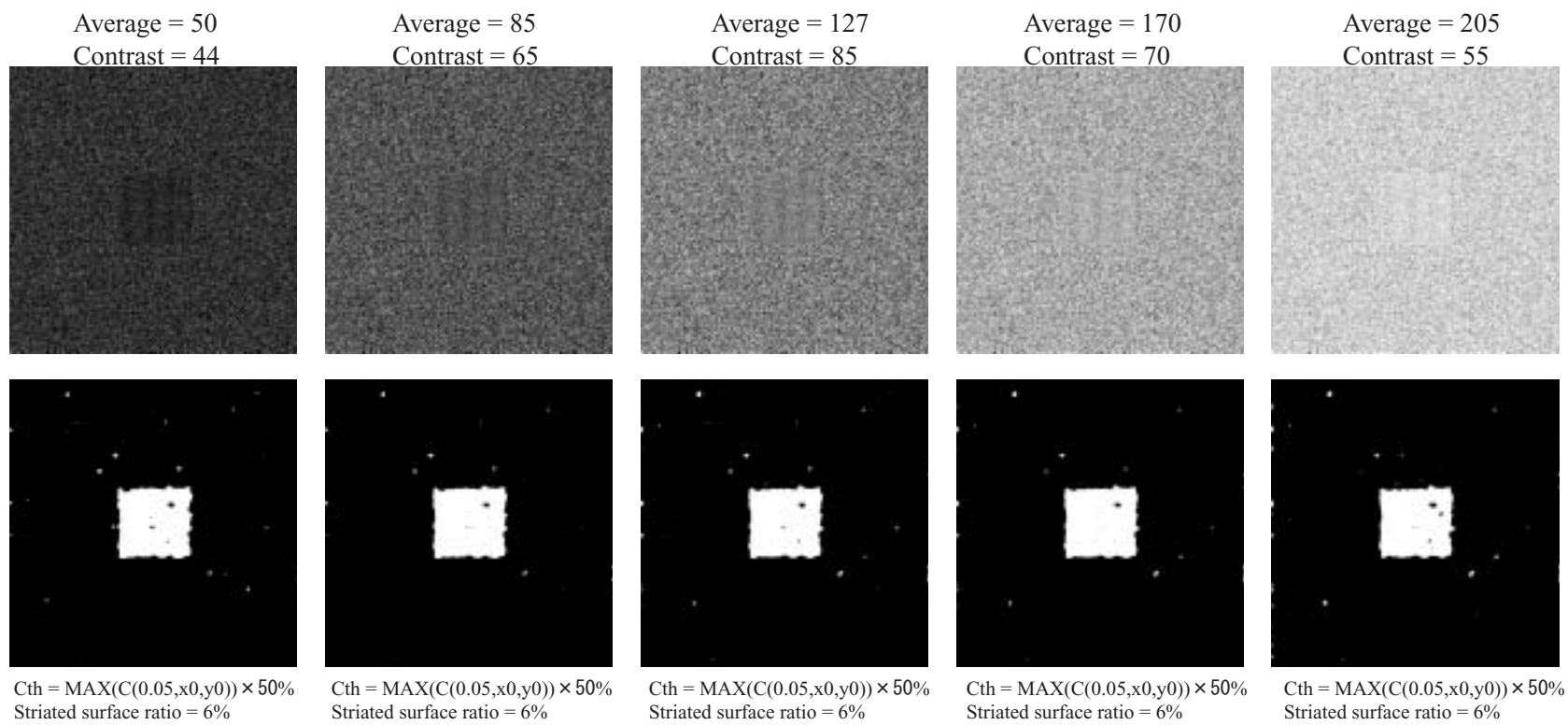


Fig. 3.32: 明度の変化としきい値の関係

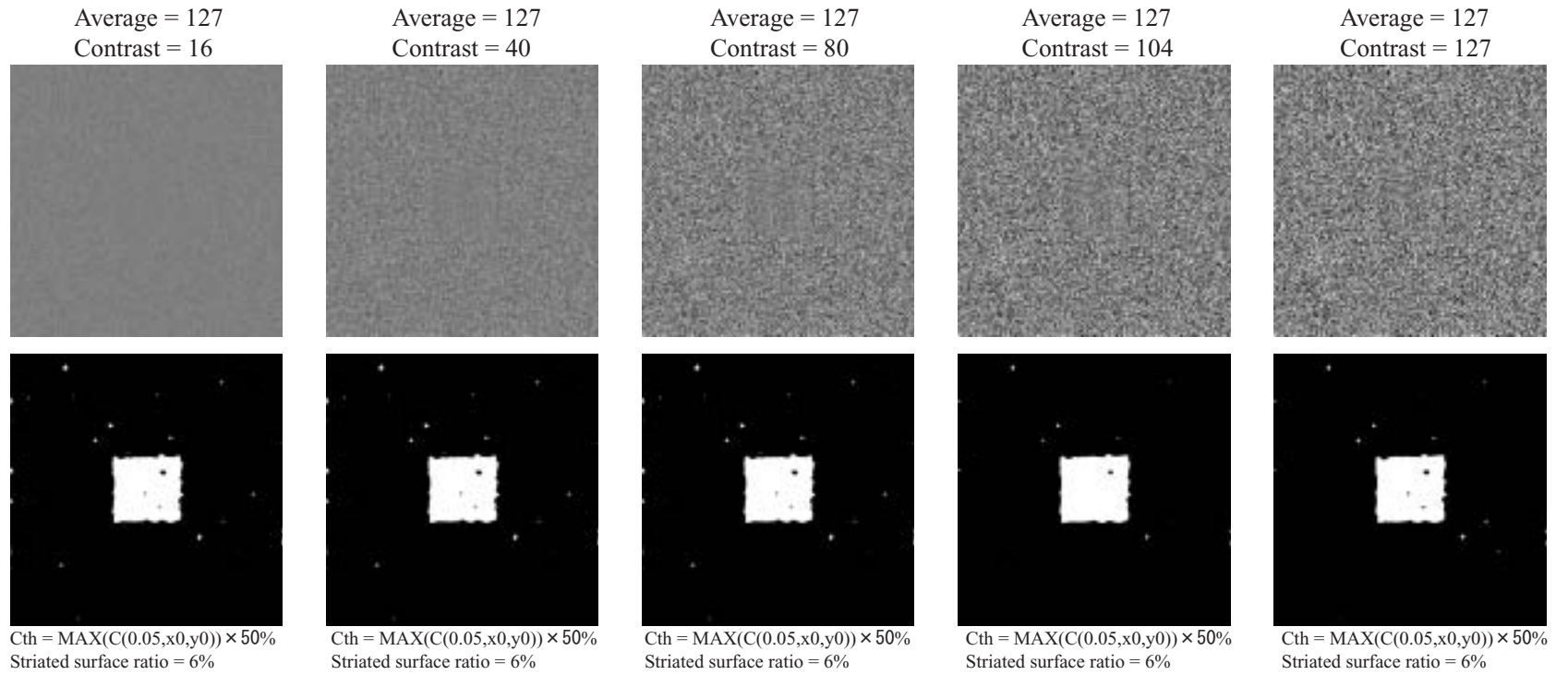
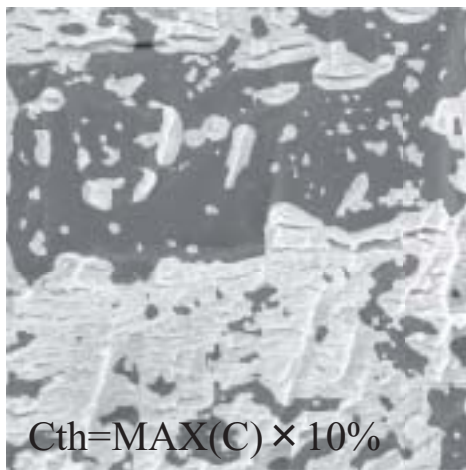
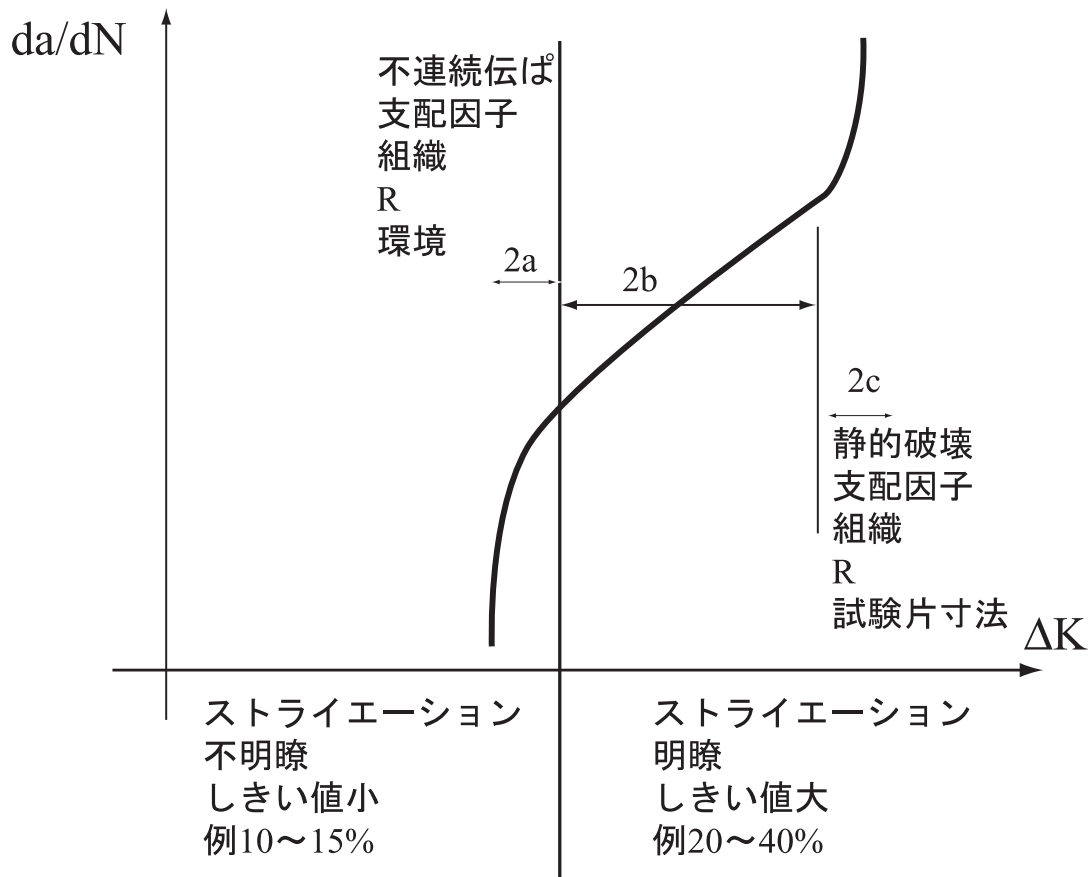
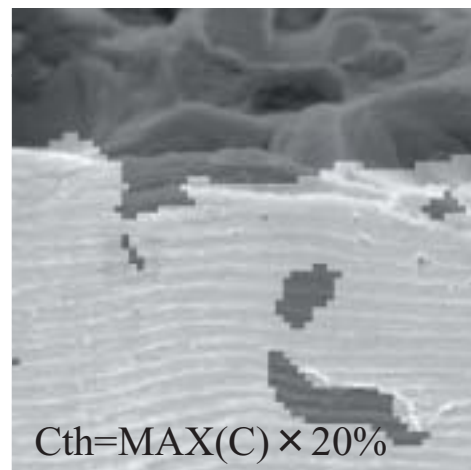


Fig. 3.33: コントラストの変化としきい値の関係



$\Delta K=5.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$



$\Delta K=11.4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 3.34: ストライエーションの明瞭さとしきい値の関係

以上に示したことから，提案した手法を用いて計算された特徴量 $C(f, x_0, y_0)$ の分布から，目視による結果と対応付けることで対話的にしきい値を決定した．これにより，画素単位でのストライエーション破面の領域評価が提案手法により可能になった．従って，定量性をもつ破面率評価を提案手法は可能にしたと言え，本論文で提案した手法がストライエーション領域の境界の同定に有効であることが示された．

3.6 結言

本章では，破断面の局所性を特性化する際に，特に周期性がある画像に関しての特性化手法について述べた．周期性がある場合は，疲労破面のストライエーションが観察されている可能性が高く，本章では，それを前提としてストライエーション破断面の局所性，すなわちストライエーション領域・非ストライエーション領域の分類手法について述べた．

手法はウェーブレット変換を用いた手法である．ウェーブレット変換を行う際に必要なマザーウェーブレットは，ストライエーションの特徴を特性化するために，Gabor ウェーブレットとした．また，ウェーブレット係数から計算されるストライエーション度を定義した．ストライエーション度とは，ストライエーションの周期 (波長) のみに依存した量である．

提案手法を仮想破断面で検証した後に，2.25Cr-1Mo 鋼と A2017-T4 アルミニウム合金の疲労試験破断面に適用し，破面内のストライエーションの領域と破面率を客観的に検出できることを示し，解析初心者に対して意思決定の支援が可能であることを示した．しきい値は対話的に決める方法と，大津・Kittler のしきい値選定法によって決め，領域判定を行った．判定された結果は，目視による判定結果と対応付けることで，結果の妥当性を確認した．その結果，ストライエーション度が疲労破断面の局所性を評価することに有効な指標であることがわかり，手法の妥当性が確認された．

第4章 局所Hurst数を用いたストレッチゾーン幅の定量評価手法

4.1 緒言

本章は、破断面画像が周期性を持たない画像である場合の解析方法を提案し、検証を行う。

一般的に破断面画像の周期性を解析した場合、観察倍率に依存するものの、通常観察で用いる数百倍のオーダーで観察を行った場合に破断面画像は特定の周期に明瞭な特徴は持たない。なぜなら、第5章でも検討したように、通常観察している倍率の破断面にはフラクタル性を持っている²⁷為である。従って、周波数(波長)とパワースペクトルの関係は、Fig.4.1に示すように、両対数グラフ上で直線関係にあり、特定の波長にパワースペクトルのピークは存在しない。

つまり、周期性の観点から局所性を評価する場合、第3章で示したような、特定の波長に着目した手法では困難であると考えられる。そこで、本章では、波長全体の特徴を持つ特徴量を使用することで局所性を評価する手法を提案する。

本章では、フラクタルの概念を拡張した局所Hurst数²⁹を用いた破断面遷移領域の同定手法を提案する。フラクタル解析に利用されるフラクタル次元は、第5章でも述べたように、スケールに依存しない破断面の複雑さを示す指標である。つまり、特定の波長に関しての特性を示す値ではなく、波長全体に関しての特性を示す値である。このことに着目して、フラクタル次元が、ストライエーション以外の特定の周波数に明瞭な特徴の無い破断面の特性化に有効な指標であると考え、

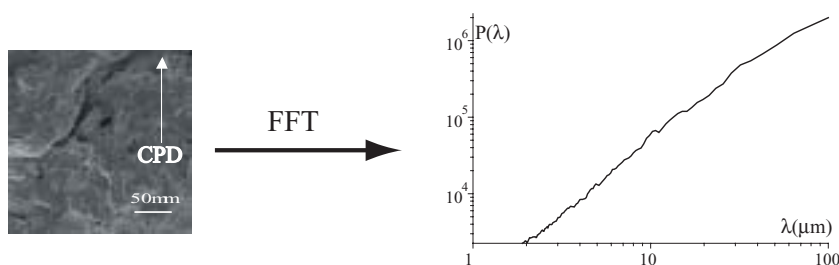


Fig. 4.1: フラクタル性の有る破断面の周期性 (ファセット)

破断面の遷移領域の同定のための手法を提案する．また，その手法の有効性を検証する．

提案した手法は，ストレッチゾーンを含む破断面に適用し，ストレッチゾーンの幅を計算することで，手法の検討を行った．ストレッチゾーンは，弾塑性破壊じん性試験破断面に観察される無特徴な領域であり，き裂進展方向の幅は J_{Ic} との相関が報告されており⁶³，構造物の破断時の作用応力推定に有効である．しかし，従来の研究では，ストレッチゾーンの幅が定性的に評価される場合が多いことから，定量的に評価することで，客観性を持たせる必要がある．

4.1.1 従来の破面解析における局所 Hurst 数の応用研究

Hurst 数は，破断面のように，異方的な相似性を示す（自己アフィンフラクタル）画像の複雑さの評価に有効であることが指摘されている^{29,75}．また，Hurst 数を局所的に求めた局所 Hurst 数は，破断面の遷移領域の同定に有効であることが示されている²⁹．しかし，これらの研究は破断面の中の 1 本の縦断面（プロファイル）において示された結果であり，プロファイルの形状を詳細にデジタル化するには膨大な作業が必要であった．なぜなら，TOPO-SEM によって得られる 3 次元形状は，破断面の複雑さを十分に反映したものとは言えず⁵²，平均化された形状が測定されてしまう欠点がある．

そのため，泉らは，側断面の膨大な画像を撮影し，プロファイル部分を抽出することで，破断面の形状をよく反映するプロファイルを抽出して解析した²⁹．しかし，この作業で得られるプロファイル数は 1 本であり，同様の作業を繰り返して破断面全体のプロファイルを得ることは困難である．

本章で提案する手法は，破断面のプロファイルでなく，画像から局所 Hurst 数を計算し，遷移領域を同定するための手法である．画像を用いる意義は，どの SEM でも画像を得ることができ，簡易に解析が行えるからである．

局所 Hurst 数を計算するために，画像の局所性を評価するために有効であるウェーブレット変換を用いた．泉ら²⁹は縦断面曲線を用いた 1 次元ウェーブレット変換により求まる局所 Hurst 数を利用した．破面の遷移領域を同定するために，詳細な縦断面プロファイルが得られる場合¹には，一次元局所 Hurst 数は有効である．しかし，破面画像の画素を用いた場合には，画素数が少ないことと，破面形状の情報が 256 階調の濃淡に量子化されてしまうところから，一次元局所 Hurst 数による遷移領域の同定は困難であると考えられる．従って，画像を用いて局所性を特性化する際に，より周辺領域の情報を増やす必要があり，二次元局所 Hurst 数の提案と検証が求められる．

Fig.4.2 は泉らの提案する局所 Hurst 数による破面解析例である．破断面は圧力配管用炭素鋼 STPG370 の弾塑性破壊じん性試験の破断面である．き裂進展方向は画像上方向，観察倍率は 400 倍である．目視により判断されたストレッチゾーン

¹例えば泉²⁹らは 16384 点ものデータを用いた．

の領域を白線で示す．

解析には画像左側から右に向かって数えて 260 本目を抽出したプロファイルを使用した．その上で局所 Hurst 数を計算した結果を Fig.4.2 に合わせて示す．ここで計算した局所 Hurst 数は，1 次元のプロファイルの複雑さを示す指標であり，プロファイルが複雑であるほど 0 に近く，平坦であれば 1 に近い値になる．局所 Hurst 数の具体的な計算方法については，第 2 節に示す．

Fig.4.2 の破面画像の解析したプロファイルとその左右の周辺領域を観察すると，ストレッチゾーンの部分が平坦になっている．そのため，抽出したプロファイルも，目視によりストレッチゾーンと判定した領域に関しては，他の領域と異なり平坦になっていることがわかる．このことから，局所 Hurst 数はストレッチゾーンの領域で大きくなると考えられる．また，解析対象のプロファイルと周辺領域をき裂進展方向に沿って観察した場合に，ストレッチゾーンの領域が目視のうえでは最も平坦であることから，局所 Hurst 数は最大になると考えられる．しかし，局所 Hurst 数のプロットから判断すると，ストレッチゾーンの周辺は局所 Hurst 数が大きくなるものの，他の領域と比較して明瞭に大きいわけではない．また，最大になる点は，むしろ画像上方向の位置に存在していることがわかる．従って，1 次元のプロファイルを用いて局所 Hurst 数を計算して破断面を評価した場合には，人間の観察結果との対応において，十分に特徴を評価できない場合があるといえる．

従って，画像を用いて遷移領域を同定するためには，特徴量に前後左右の画素の特徴を含んだ値（二次元局所 Hurst 数）を用いることが必要であると考えられる．

従来の研究では，局所 Hurst 数は破面の 3 次元プロファイルから求めてきた．一般的にフラクタル次元は，ボックスカウンティング法 (BC 法)⁷を用いて計算される．破面の 3 次元プロファイルは数百倍で観察した場合に，縦横が数百 μm であるのに対し，高さ方向は数 μm であるため，データは非常に平坦であり，フラクタル次元も小さい値しか算出されなかった．そこで，破面データに縦倍率を乗じて，高さ方向も数百 μm にした上でフラクタル次元の計算を行っていた³⁷．縦倍率を導入することで，フラクタル次元が大きくなり，評価が可能になるからである．しかし，縦倍率は観察者の主観に依存する値であり，導入された縦倍率は根拠に乏しかった．

これに対して，Hurst 数は縦倍率に依存しない値であることから，破面のフラクタル性を評価する上では有効な指標である．Hurst 数が縦倍率に依存しないことを示す．Hurst 数の計算において，詳細な計算過程は後述するが，

$$W[h(x, y)] = ca^{1+H} \quad (4.1)$$

という関係を元に求める． $h(x, y)$ は画像を示す関数である． H は， a と W の両対数グラフの傾きを計算することで求められる．ここで， $h(x, y)$ に対し，縦倍率 z を導入すると，

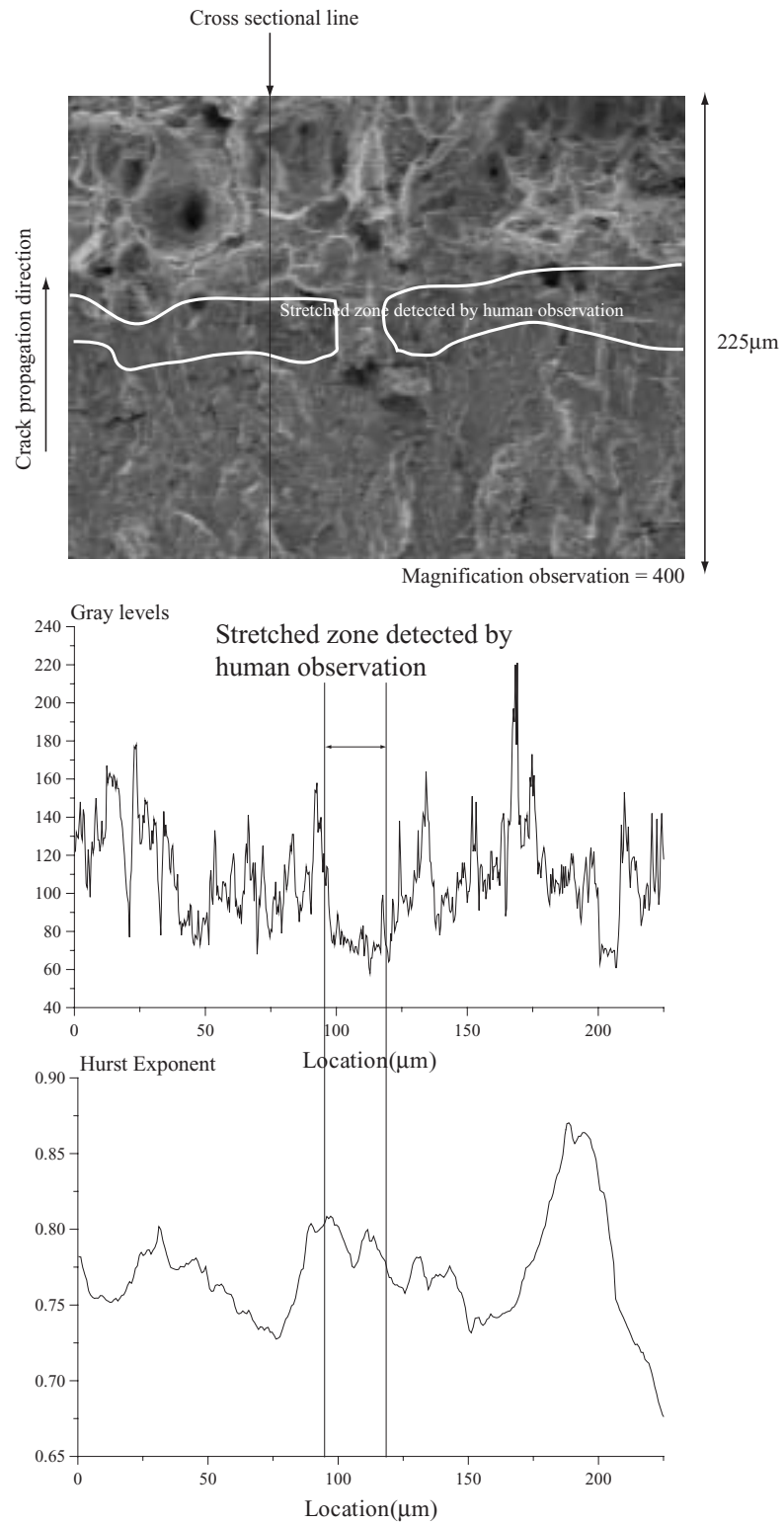


Fig. 4.2: 1次元局所 Hurst 数による解析例

$$W[zh(x, y)] = ca^{1+H}$$

となる．従って，ウェーブレット変換の基礎式から，

$$\begin{aligned} zW[h(x, y)] &= ca^{1+H} \\ \log z + \log(W[h(x, y)]) &= \log c + (1 + H)\log a \end{aligned} \quad (4.2)$$

となることから， H は変化しない．従って， H は縦倍率には依存しない値である．また，マザーウェーブレットのアドミッシブル条件⁶⁷から， $h(x, y)$ に対してオフセット h_0 を与え， $h(x, y) + h_0$ としても， H は変化しないことがわかる²．従って，画像の明度の変化 ($h \approx h + h_0$) とコントラストの変化 ($h \approx a(h - \text{average}(h)) + h_0$) に関する影響も，極端に明度が高い(低い)画像や，コントラストが高い(低い)画像を除けば，影響は少ないと考えられる．具体的に計算を行った例を Fig.4.3 に示す．Aは解析画像(濃淡 256 階調)で，Bは横軸が明度，縦軸が 2次元局所 Hurst 数の平均，Cは明度を変化させると濃淡画像であるためコントラストも変化するため，Aの明度とコントラストについての関係である．一般的に，Bの図から，破面画像の明度を変化させても，2次元局所 Hurst 数はほとんど変化しないことがわかる．一般的には，観察者が見やすい SEM 画像は，明度が 100～140，コントラストが 20～30 程度であることから，明度とコントラストの影響は少ないと言える．

本章では，2次元ウェーブレット変換により求まる局所 Hurst 数を利用した手法を提案する．つまり，面の複雑さを評価することでより詳細に解析を行う手法を提案する．マザーウェーブレットには，周期性を評価するために有効な Daubechies($N = 2$)のウェーブレットを用いた．

また，局所 Hurst 数の適用は，ストレッチゾーンの定量評価と，シャルピー衝撃試験片の脆性破面の決定について行った．本章ではストレッチゾーンの解析についてまとめる．シャルピー衝撃試験片の解析については，脆性・延性の境界領域は局所 Hurst 数により示せる可能性は見出したが，境界領域の破面様相と，局所 Hurst 数の変化の関係が明確でないため，解析結果のみを付録 E に示す．

4.1.2 従来の破面解析におけるストレッチゾーン幅の定量化についての研究

これまでに行われてきたストレッチゾーン幅の定量化の研究¹⁹では，ステレオマッチングによって得られた 3次元形状から縦断面プロファイルを抽出し，定量化を行っていた．しかし，利用しているのは縦断面プロファイルであるから，線の解析にとどまっている．また，情報量が少ないため，ストレッチゾーンと疲労

²定数のウェーブレット積分は 0 になるので，式 (4.1) は変化しない．

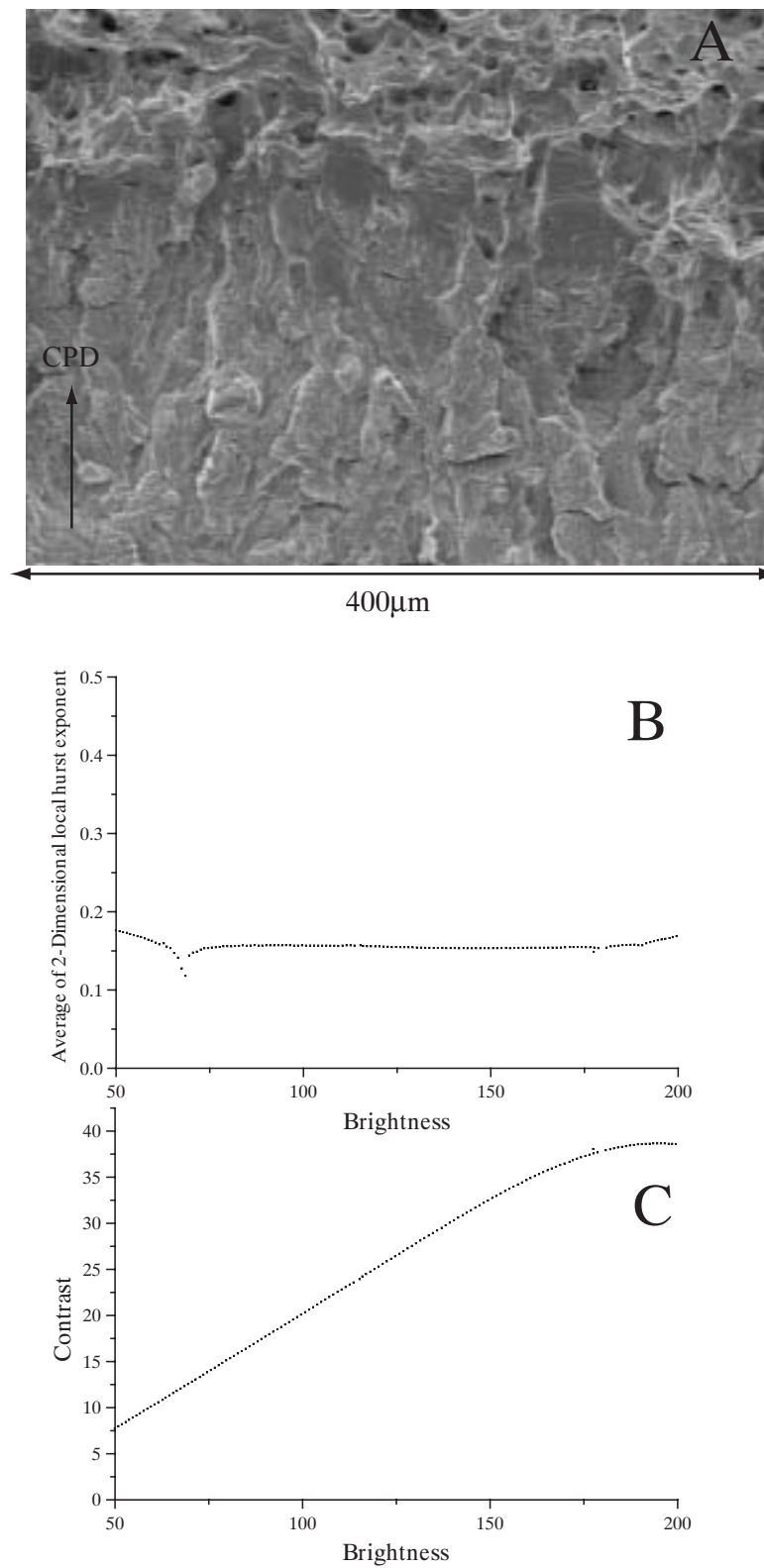


Fig. 4.3: 局所 Hurst 数と明度，コントラストの関係

破面の境界において，疲労破面側の凹凸とストレッチゾーンの高さの差が少ないとき，ストレッチゾーンの評価が上手くいかないと報告されている．従って，面の情報を用いた評価が必要である．また，この手法では，一旦3次元画像を構築しなければならないが，画像だけの解析手法が確立されれば，評価は容易になると考えられる．

4.2 局所 Hurst 数を用いた破断面遷移領域同定手法

本節では，局所 Hurst 数を用いた破断面の局所性評価手法について説明する．まず始めに，従来の1次元局所 Hurst 数に付いて述べ，次に2次元局所 Hurst 数について述べる．そして，最後に，局所 Hurst 数を用いた破断面の遷移領域を同定する手法について述べる．

4.2.1 局所 Hurst 数

遷移領域を同定するために必要な局所 Hurst 数の算出方法²⁹について述べる．

等方的に縮尺を変化させた時に自己相似になる図形は，自己相似フラクタル図形である．これに対して，異方的に縮尺を変化させた時に自己相似性を示す図形を自己アフィンフラクタルと言う⁷⁵．破断面の空間的な局所性に関しては，自己相似フラクタルとして評価することよりも，むしろ，異方性の自己アフィンフラクタルとして評価した方が，有効であることが示されている^{29, 35, 37}．

自己アフィンフラクタル図形は，式(4.3)に示すように，関数 $h(x)$ を x 方向に λ 倍した場合に， $h(x)$ が λ^{-H} 倍すると相似性を示す図形のことである．ここで， H を Hurst 数と呼ぶ． H は自己アフィンフラクタルである図形の複雑さを示すパラメータである．

$$h(x) \cong \lambda^{-H} h(\lambda x) \quad (4.3)$$

本研究では，破断面画像が局所的にも自己アフィンであることを仮定して，泉らの提案する手法²⁹を用いて局所 Hurst 数を計算した．ここで，その手法について簡単に述べる．

局所 Hurst 数の計算には，信号や画像の局所性を調べるためのウェーブレット変換を使用する．ウェーブレット変換の基本式は，

$$W[f(x)](b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx \quad (4.4)$$

である． ψ はマザーウェーブレットである．

ここで，プロファイル $h(x)$ 上の x_0 において自己アフィンフラクタルが成立するならば，

$$h_{x_0}(x) = h(x_0 + x) - h(x_0) \quad (4.5)$$

$$h_{x_0}(x) \cong \lambda^{-H} h_{x_0}(\lambda x) \quad (4.6)$$

が成立する．式 (4.6) を，式 (4.4) に代入して，

$$W[h(x)](b + x_0, a) = \lambda^{-H - \frac{1}{2}} W[h(x)](\lambda b + x_0, \lambda a) \quad (4.7)$$

が得られる．つまり，粗視化の度合いを変えることで，

$$W[h(x)](x_0, a) \propto a^{H + \frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

が成立する．これは，任意の位置 x_0 で，スケール a とウェーブレット係数 W を両対数グラフにプロットすると，傾きが $H + \frac{1}{2}$ になり，任意の位置で H の計算が可能である．

しかし，ウェーブレット係数 $W[h(x)]$ は，第 5 章で行ったボックスカウンティング法 (Fig.5.21) とは異なり，両対数グラフ上での直線への収束性は良くない．また，局所 Hurst 数はゆらぎが大きい．従って，収束性を良くし，ゆらぎを抑えるために Simonsen らの提案する AWC (Averaged Wavelet Coefficient) 法⁶¹を利用する．

AWC 法とは， x_0 に関するウェーブレット係数 $W[h(x)](x_0, a)$ を x_0 の幅 w の周辺領域に関して平均化することで，ウェーブレット係数 $\overline{W[h(x)](x_0, a)}$ を決定する手法である．つまり，

$$\overline{W[h(x)](x_0, a)} = \sum_{x=x_0 - \frac{1}{2}w}^{x=x_0 + \frac{1}{2}w} W[h(x)](x, a) \quad (4.9)$$

と計算することで， x_0 におけるウェーブレット係数を決定する手法である．本論文では，この手法を用いて局所 Hurst 数を算出した．

一般に m 変数関数で表現される自己アフィンフラクタル図形のフラクタル次元 F_d と Hurst H の関係は，

$$H = m - F_d \quad (4.10)$$

である．つまり，フラクタル次元は図形が複雑になるほど増加するのに対し，Hurst 数は複雑になるほど減少する傾向がある．ただし， H は異方性フラクタル図形の複雑さを表すものであり， F_d は自己相似 (等方) フラクタル図形の複雑さを表すものであることから，厳密に式 (4.10) が成立するわけではない．

4.2.2 2次元ウェーブレット変換における2次元局所Hurst数

次に, 2次元ウェーブレット変換における局所Hurst数の算出方法について述べる.

2次元ウェーブレット変換は,

$$W[h(x, y)](a, b_x, b_y) = \frac{1}{a} \int \int \psi\left(\frac{x - b_x}{a}, \frac{x - b_y}{a}\right) h(x, y) dx dy \quad (4.11)$$

である.

ここで, $h(x, y)$ が異方性フラクタル図形であるなら, 式(4.3)と同様に,

$$h(x, y) \cong \lambda^{-H} h(\lambda x, \lambda y) \quad (4.12)$$

の関係がある.

同様に, $h(x, y)$ が (x_0, y_0) 近傍においても異方性フラクタルであるならば,

$$h_{x_0, y_0}(x, y) = h(x + x_0, y + y_0) - h(x_0, y_0) \quad (4.13)$$

$$h_{x_0, y_0}(x, y) \cong \lambda^{-H} h_{x_0, y_0}(\lambda x, \lambda y) \quad (4.14)$$

が成立するとする.

従って,

$$W[h_{x_0, y_0}(x, y)](a, b_x, b_y) = \frac{1}{a} \int \int \psi\left(\frac{x - b_x}{a}, \frac{x - b_y}{a}\right) h_{x_0, y_0}(x, y) dx dy \quad (4.15)$$

$$\cong \frac{1}{a} \int \int \psi\left(\frac{x - b_x}{a}, \frac{x - b_y}{a}\right) \lambda^{-H} h_{x_0, y_0}(\lambda x, \lambda y) dx dy \quad (4.16)$$

$$= \frac{1}{a} \int \int \psi\left(\frac{x - \lambda b_x}{\lambda a}, \frac{x - \lambda b_y}{\lambda a}\right) \lambda^{-H} h_{x_0, y_0}(x, y) \lambda^{-2} dx dy \quad (4.17)$$

$$= \lambda^{-H-1} \frac{1}{\lambda a} \int \int \psi\left(\frac{x - \lambda b_x}{\lambda a}, \frac{x - \lambda b_y}{\lambda a}\right) h_{x_0, y_0}(x, y) dx dy \quad (4.18)$$

$$= \lambda^{-H-1} W[h_{x_0, y_0}(x, y)](\lambda a, \lambda b_x, \lambda b_y) \quad (4.19)$$

と変形される.

さらに, 式(4.14)とマザーウェーブレットのアドミッシブル条件⁶⁷条件³により,

$$\begin{aligned} & W[h_{x_0, y_0}(x, y)](\lambda a, \lambda b_x, \lambda b_y) \\ &= W[h(x + x_0, y + y_0) - h(x_0, y_0)](\lambda a, \lambda b_x, \lambda b_y) \\ &= W[h(x, y)](\lambda a, \lambda b_x + x_0, \lambda b_y + y_0) \end{aligned} \quad (4.20)$$

³ $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x, y) dx dy = 0$

となり，

$$\begin{aligned} W[h_{x_0, y_0}(x, y)](a, b_x, b_y) &= \\ &= \lambda^{-H-1} W[h(x, y)](\lambda a, \lambda b_x + x_0, \lambda b_y + y_0) \end{aligned} \quad (4.21)$$

と変形される．

従って，前述の1次元の局所 Hurst 数の計算方法と同様に (x_0, y_0) 近傍においてスケールのパラメータ a について，

$$W[h(x, y)](x_0, y_0, a) \propto a^{H+1} \quad (4.22)$$

のべき乗則が成立する．

つまり，スケール a とウェーブレット係数 $W[h(x, y)](a, x_0, y_0)$ を両対数グラフにプロットした際に，傾きから2次元の局所 Hurst 数を計算することが可能である．

また，AWC 法も同様に2次元へ拡張し，次式のように x, y 方向への平均化を行う．

$$\overline{W[h(x, y)](a, x_0, y_0)} = \frac{1}{w^2} \sum_{y=y_0-\frac{1}{2}w}^{y=y_0+\frac{1}{2}w} \sum_{x=x_0-\frac{1}{2}w}^{x=x_0+\frac{1}{2}w} W[h(x, y)](a, x, y) \quad (4.23)$$

$\overline{W[h(x, y)](a, x_0, y_0)}$ と a とのべき乗側から求まる，2次元局所 Hurst 数により，異方性フラクタル図形の面の複雑さを評価する． H は，式 (4.23) から画像内の (x_0, y_0) を中心とする縦 (x)，横 (y) 方向の大きさ w の周辺領域の特徴を含んだ量である．従って， H は， $H(x_0, y_0)$ と表記する．泉ら²⁹の用いた局所 Hurst 数はある縦断面曲線の線のあらさを評価していたのに対し， $H(x_0, y_0)$ は面のあらさを示す特徴量であり，これを破面全体にわたり評価している点が本研究の特徴である．

4.2.3 破断面遷移領域同定手法

次に，破断面遷移領域同定手法について述べる．本論文で適用するストレッチゾーンを含む破断面に関して，局所 Hurst 数から遷移領域を同定する手法について述べる．

ストレッチゾーンを含む破断面の画像を Fig.4.4 に示す．

ストレッチゾーンは，破壊じん性試験片の破断面に観察され，平面ひずみ状態の試験片の厚み方向の中央部に観察される領域である．き裂進展方向に沿って，疲労き裂と過荷重破壊領域の間にある無特徴な遷移領域である．ストレッチゾーン幅 (SZW) は，限界き裂先端開放変位 ($CTOD_c$) や， J_{Ic} と直接の対応関係がある⁶³．しかし，SZW は目視により定性的に測定されてきた．また，破断面内には，ストレッチゾーンの広い箇所，狭い箇所とあり一定ではない．従って，定量的に評価を行う必要がある．

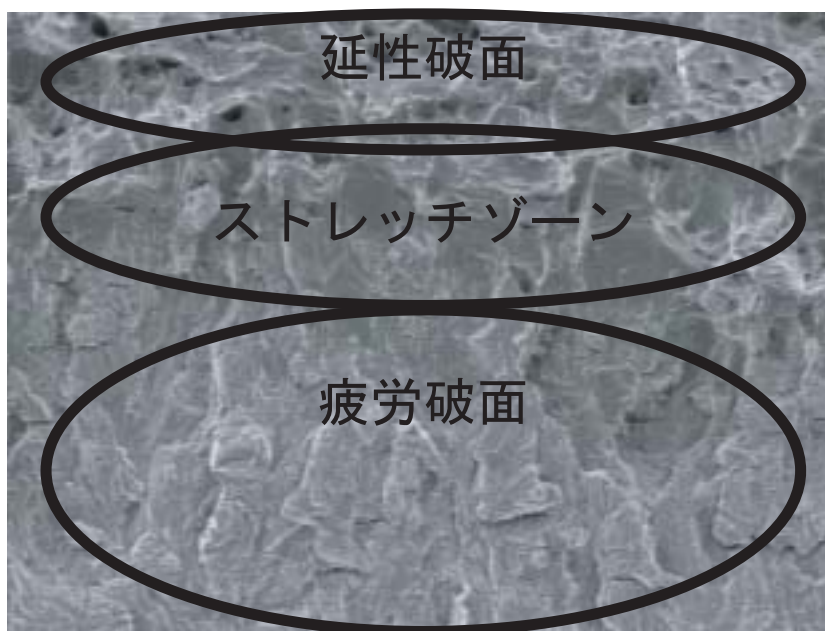


Fig. 4.4: ストレッチゾーンを含む破断面

ストレッチゾーンは Fig.4.4 からわかるように，非常に破断面は平坦で無特徴な領域である．それに対して，ストレッチゾーンの前後である疲労破断面の領域や延性破壊の領域はストレッチゾーンと比較して平坦な領域である．本手法は，この様相の違いに着目し，局所 Hurst 数で特徴付ける手法である．

Hurst 数は 0 ~ 1 の範囲で，複雑な図形ほど小さい値を取り，平坦な図形であれば大きな値を取る数値である^{29,61}．つまり，2次元局所 Hurst 数は，あらかの大きい疲労・延性破壊領域と比較して平坦なストレッチゾーンでは，増加すると考えられる．従って，Fig.4.5 に示すように，ある縦方向のプロファイルについて，縦軸にき裂進展方向の位置，横軸に局所 Hurst 数の分布をプロットした時に，局所 Hurst 数が増大する部分をストレッチゾーンとすることで，ストレッチゾーン幅を評価することができると考えられる．

ここで，破断面の様相は連続的に変化していることから，Hurst 数は 3 種類の領域の遷移領域において，連続的に変化する．従って，破面を 3 種類に分類する手法を導入する必要がある．

ストレッチゾーンである領域は，延性・疲労破面の領域と比較して，平坦な部分である．従って，Fig.4.5 に示すように 2次元局所 Hurst 数はストレッチゾーンの領域であるならば，最大値になると考えられる．一方，延性・疲労破面については，材料や破壊条件により形状は異なるため，2次元局所 Hurst 数の，大小の比較は困難である．しかしながら，2次元局所 Hurst 数が最大であればストレッチゾーンである可能性が高いことから，まず 2次元局所 Hurst 数の最大値を含む山の領域をストレッチゾーンに対応した領域であると決定する．そして，局所 Hurst 数が

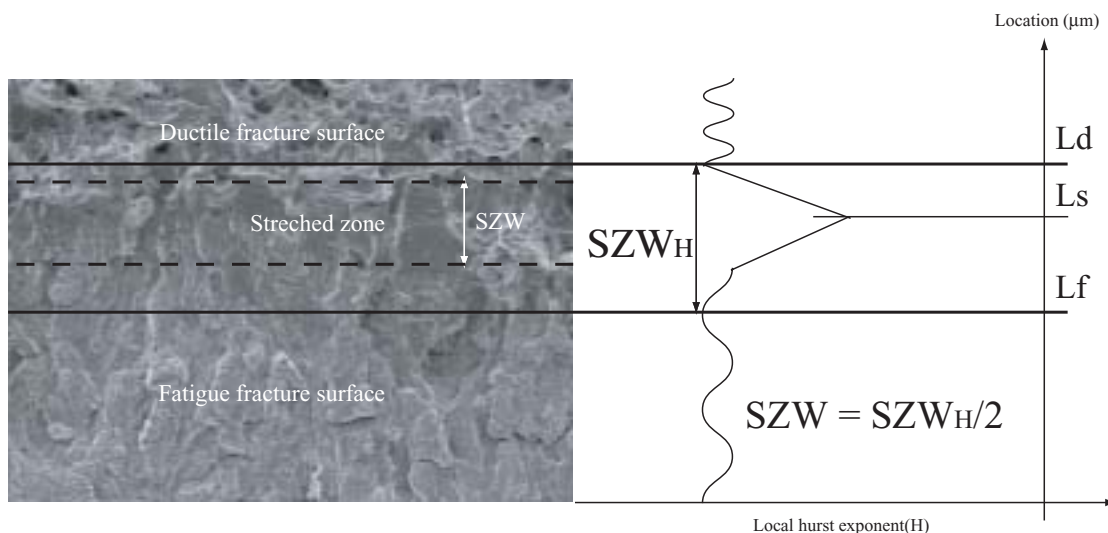


Fig. 4.5: ストレッチゾーン幅と局所 Hurst 数の関係

最大となる位置を L_s とする．その上で，最大値を含む山の前後がストレッチゾーン領域であると考え，前後の極小値を取る位置 L_f, L_d を求める．ここで， L_f は疲労破面からストレッチゾーンへ遷移し始める領域， L_d はストレッチゾーンから延性破面への遷移が終わった領域と考えられる．しかし，Fig.4.5 に示す L_f と L_d の差である SZW_H はストレッチゾーンだけでなく，前後の疲労・延性破面領域からの遷移領域も含まれている．そのため，本論文では SZW を SZW_H の半分の値とした．

また，本論文では， SZW は，破面内の個々の縦方向のプロファイルにおける幅よりは，むしろ破面全体における平均的な幅を求めることが大切であると考え，Fig.4.5 にしめす 2次元局所 Hurst 数のプロットには $H(x_0, y_0)$ を x_0 方向に平均化した値 $\overline{H(y_0)}$ をプロットして SZW の評価を行った．

4.3 実破面の解析結果

4.3.1 解析対象の試験片

ストレッチゾーン幅の評価に使用した供試材は，圧力配管用炭素鋼配管 STPG370 である．試験片形状は Chevron ノッチ付 CT 試験片とした．弾塑性破壊じん性試験は米国材料試験協会規格 (ASTM E1820)⁷⁶ に準じて，除荷コンプライアンス法により実施した⁸．試験温度は実機使用温度を想定し， $200^{\circ}C$ とした．試験片は 6 本破断させ，その内 J_{Ic} の判定条件を満たす 4 本について，個々の試験片から 3 箇所の破面画像を作成して解析を行った．

4.3.2 解析画像と解析結果

解析に用いた SEM 画像を，Fig.4.30～4.38 に示す．

破面観察には，高分解能走査型電子顕微鏡（エリオニクス製 ERA-4000）を用いた．き裂進展方向は画像上向きとした．観察倍率と画像の解像度は，400 倍かつ 800×600 画素である．観察倍率は顕微鏡 1 視野において，目視の判断で，疲労破面とストレッチゾーンと延性破面の面積比率がおおよそ 2:1:2 となり，ストレッチゾーンを挟む両破面の特徴が十分に現れている観察倍率を選定した．画像の分解能は 256 階調である．

2次元局所 Hurst 数の計算の条件として，AWC法を行う為の w には 0, 4, 18, $38\mu m$ を使用した．また，ウェーブレット変換は離散ウェーブレット変換を用い，マザーウェーブレットには Daubechies(N=2) のウェーブレット⁶⁵を使用した．Table.4.1 に， w と式 (4.22) に示すべき状態への収束の度合い（相関係数）の関係を示す．Table.4.1 から w を広くすると，べき乗側への収束性が良いことがわかる．従って，SEM 画像の濃淡は破面の高さ情報では無いが，局所 Hurst 数を求めることに問題は無いと考えられる．本研究では， $w = 38$ の場合，目視において求めたストレッチゾーンの幅とほとんど近い値になってしまい，ストレッチゾーン領域の検出の感度が悪くなると考えられることから， $w = 18$ を主に使用した．計算時間は $w = 18\mu m$ の場合，CPU が Intel Pentium Xeon 2.2GHz，OS は Linux の計算機にて 90 分程度である．

これらの条件を元に，2次元局所 Hurst 数の分布を求めた結果を Fig.4.18～4.29 に示す．図は，分布に対してしきい値 (H_{th}) を設定し， H_{th} より大きい場合は白，小さい場合は黒で示した．またしきい値を変化させ，2次元局所 Hurst 数の分布の変化を示した． H_{th} を大きくしても白く残る領域は他の領域と比較して，平坦であることを示している．

- 試験片 1 Case1 の結果 (Fig.4.18)

H_{th} を大きくした時に，中央の領域が平坦な領域として判断されている．この領域は，目視でストレッチゾーンと判断された部分に対応していると考えられる．

また， $H_{th} = 0.25, 0.275$ の場合，画像下側の部分が，上側の部分と比較して，より白い部分が多い．これは，疲労破面が延性破面と比較して平坦であることを示していると考えられる．

- 試験片 1 Case2 の結果 (Fig.4.19)

$H_{th} = 0.25$ の時，画像右中央部に見られる帯状の領域は，目視でストレッチゾーンと判断された領域と対応していると考えられる．また，その上側にも同様に帯状の領域が存在しているが，これは破面画像から判断すると大きく形成されたディンプルの底に対応していると考えられる．

しかしながら， $H_{th} = 0.3$ の場合から，ディンプルの場合は，横方向に平均的に H が大きくは無い．これはディンプルの形状が楕円状（伸張ディンプル）であることに関係していると考えられる．また，ストレッチゾーンに対応した部分は， $H_{th} = 0.275$ からわかるように，横方向に平均的に H が大きい領域である．

- 試験片 1 Case3 の結果 (Fig.4.20)

$H_{th} = 0.3$ の時，目視によりストレッチゾーンと判断された領域が，平坦な領域として判断されている．これは，ストレッチゾーンの平坦な性質に対応したものであると考えられる．また， $H_{th} = 0.3$ で，左上にある白い領域はディンプルに対応したものであると考えられる．

また， $H_{th} = 0.325, 0.35$ の場合，中央下部が白い領域となっている．これは疲労破面が平坦である特徴と対応している．ストレッチゾーンが判断しにくい場合，疲労破面側のほうが，ストレッチゾーンよりも平坦である場合があることがわかる．しかし，横方向に平均的に見た場合，ストレッチゾーンの領域のほうが，白く残っている部分が多いことから ($H_{th} = 0.3$)，横方向に平均化した場合には，ストレッチゾーンが明瞭で無い場合においても，領域の判断は可能であると考えられる．

- 試験片 2 Case1 の結果 (Fig.4.21)

$H_{th} = 0.325, 0.35$ の時，左上の部分が平坦な領域である．これは破面画像からディンプルに対応していることがわかる．

$H_{th} = 0.275, 0.3$ の時，中央部横方向に帯状の領域があるが，これはストレッチゾーンに対応している．しかし，目視でも判断しにくかったが，ストレッチゾーンが明瞭で無い場合，しきい値を変化させても明瞭にストレッチゾーンが平坦な領域として判断されない場合もある．

- 試験片 2 Case2 の結果 (Fig.4.22)

$H_{th} = 0.25$ の時，中央～左にかけて存在する平坦な領域はストレッチゾーンと明瞭に対応している．また， $H_{th} = 0.3$ の時，左上にある平坦な領域は破面画像の左上にある大きな伸張ディンプルに対応していることがわかる．

しかし，延性破面側で平坦と判断される領域は，ディンプルに対応していることから，横方向に平均的に平坦では無い．それに対してストレッチゾーンの領域は，横方向に平均的に平坦であることがわかる．

- 試験片 2 Case3 の結果 (Fig.4.23)

破面画像を見ると，延性破面側は複雑な形状をしているため， H の分布に関しても，同様の結果が得られている． $H_{th} = 0.35$ の時，延性破面側はほとんどが黒領域となっている．

それと比較して、疲労破面側は平坦であることから、白い領域であり、 H により平坦な領域として判断されている。

ストレッチゾーンの領域は目視により判断した場合、入り組んだ領域として判断されている。特に疲労破面とストレッチゾーンの境界部分において、 H の分布からストレッチゾーンの領域を判断することは困難である。これは、疲労破面もストレッチゾーン同様、比較的平坦な領域であることが原因であると考えられる。

- 試験片 3 Case1 の結果 (Fig.4.24)

$H_{th} = 0.3$ の時、ストレッチゾーンに対応して、横方向に帯状の領域が存在している。また、 $H_{th} = 0.325$ の時、中央上部に見られる平坦な領域は、ディンプルに対応している。

ディンプルに対応している白い領域を除けば、延性破面側が疲労破面側と比較して、複雑な領域であることが判断できる。また、 $H_{th} = 0.3$ の場合からわかるように、延性破面とストレッチゾーンの境界は明瞭に判断されるが、疲労破面とストレッチゾーンの境界に関しては判断が明瞭でない。これは、疲労破面がストレッチゾーン同様に平坦な領域であることが原因であると考えられる。

- 試験片 3 Case2 の結果 (Fig.4.25)

$H_{th} = 0.275$ の時、画像横方向に関して左側から中央部にかけてストレッチゾーンの領域がはんだんできる。しかし、破面画像からもわかるように、ストレッチゾーンが明瞭に存在していないことから、 H の分布からも判断が困難である。

この画像に関しても、同様に、延性破面側とストレッチゾーンの境界は明瞭に判断されるが、疲労破面側とストレッチゾーンの境界の判断は難しい。しかし、横方向に平均化すれば、ストレッチゾーンの性質から、 H により判断が可能になると考えられる。

- 試験片 3 Case3 の結果 (Fig.4.26)

$H_{th} = 0.275$ の時、ストレッチゾーンと対応していると考えられる領域が左側に見れるが、判断が困難な場合である。これは、疲労破面側が非常に平坦であることと、ストレッチゾーンが明瞭でないことが原因であると考えられる。

また、延性破面側で平坦な領域と判断された部分については、ディンプルに対応していることがわかる。

- 試験片 4 Case1 の結果 (Fig.4.27)

$H_{th} = 0.275, 0.3$ の時，ストレッチゾーンに対応して，平坦な帯状の領域が存在している．また， $H_{th} = 0.275$ の時，中央上部に存在する縦長の領域は伸張ディンプルに対応していると考えられる．

この場合からもわかるように，ディンプルに対応している白い領域を除けば，延性破面側が疲労破面側と比較して，複雑な領域であることが判断できる．また， $H_{th} = 0.25$ の場合からわかるように，延性破面とストレッチゾーンの境界は明瞭に判断されるが，疲労破面とストレッチゾーンの境界に関しては判断が明瞭でない．これは，疲労破面がストレッチゾーン同様に平坦な領域であることが原因であると考えられる．

- 試験片 4 Case2 の結果 (Fig.4.28)

ストレッチゾーンが不明瞭で，判断が困難なケースである．しかし， $H_{th} = 0.325$ の場合から，ストレッチゾーンに対応した部分は H が大きく平坦な領域として判断されていることがわかる．

一方，延性破面側に大きなディンプルは観察されていないため，延性破面側の領域に平坦な領域は見られない．

- 試験片 4 Case3 の結果 (Fig.4.29)

これも，ストレッチゾーンが不明瞭で，判断が困難なケースである．しかし， $H_{th} = 0.275$ の場合から，ストレッチゾーンに対応した部分は H が大きく平坦な領域として判断されていることがわかる．

また， $H_{th} = 0.3, 0.325$ の場合からもわかるように，延性破面とストレッチゾーンの境界は明瞭に判断されるが，疲労破面とストレッチゾーンの境界に関しては判断が明瞭でない．これは，疲労破面がストレッチゾーン同様に平坦な領域であることが原因であると考えられる．

次に，2次元局所 Hurst 数の分布から計算される $\overline{H(y_0)}$ を使用して，SZW を決定した．Fig.4.30～4.38 は $w = 18\mu m$ についての結果である．評価されたストレッチゾーンの領域を，破線部にて示す．実線により示してある領域は目視によりストレッチゾーンと判定された領域である．目視による評価は，提案手法により評価されたストレッチゾーン領域の妥当性を評価するために行った．また，各試験片において，提案手法を用いて求めた3箇所のSZWの平均値と標準偏差 (σ) と， J_{Ic} を Table.4.2 に示す．また，比較のため，1次元の局所 Hurst 数から計算したSZWと，高梨らの提案するあらさをを用いた計測法によるSZWの結果も合わせて示す．1次元局所 Hurst 数とあらさは，画像からき裂進展方向である縦方向のプロファイルを抽出して計算した．両者は1次元のあらさを示す指標である． \times は L_d, L_s, L_f のいずれかが求まらずに計測できなかった場合である．なお，試験片1のみ J 値が大きいのは，試験片1の試験片のみ配管から採取する際の方向が異なるためである．

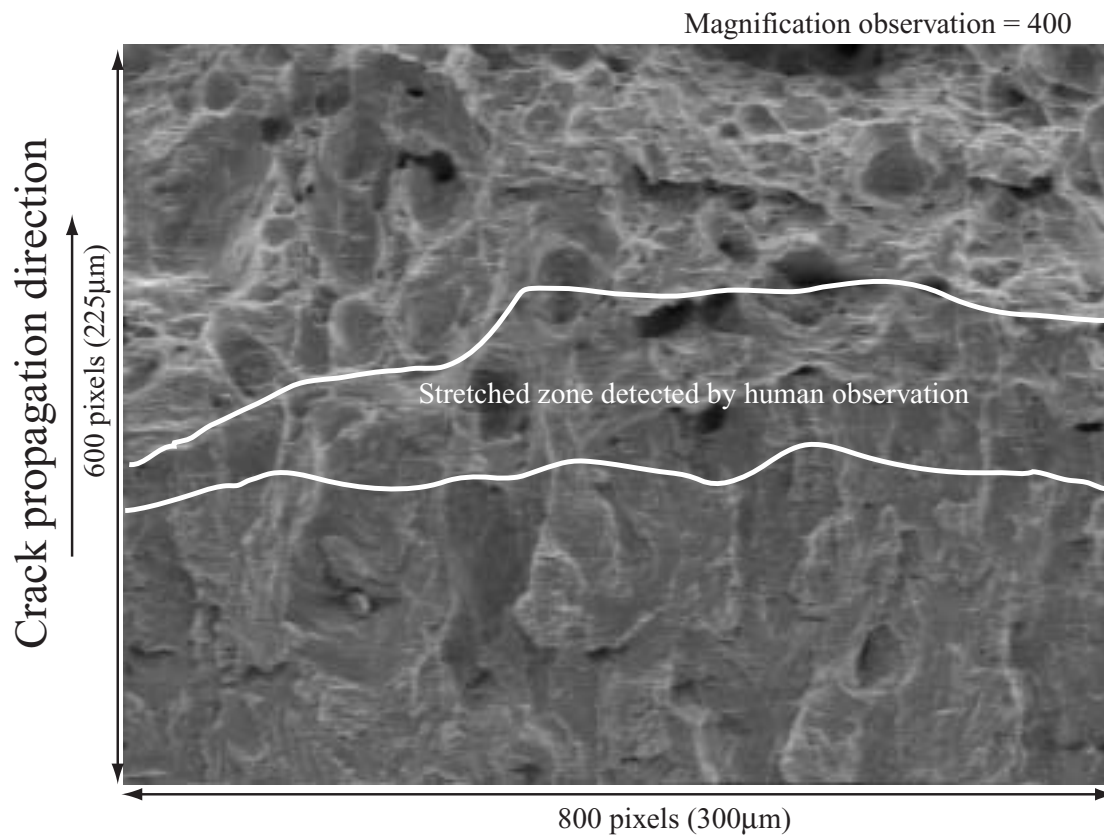


Fig. 4.6: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 1 case 1). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

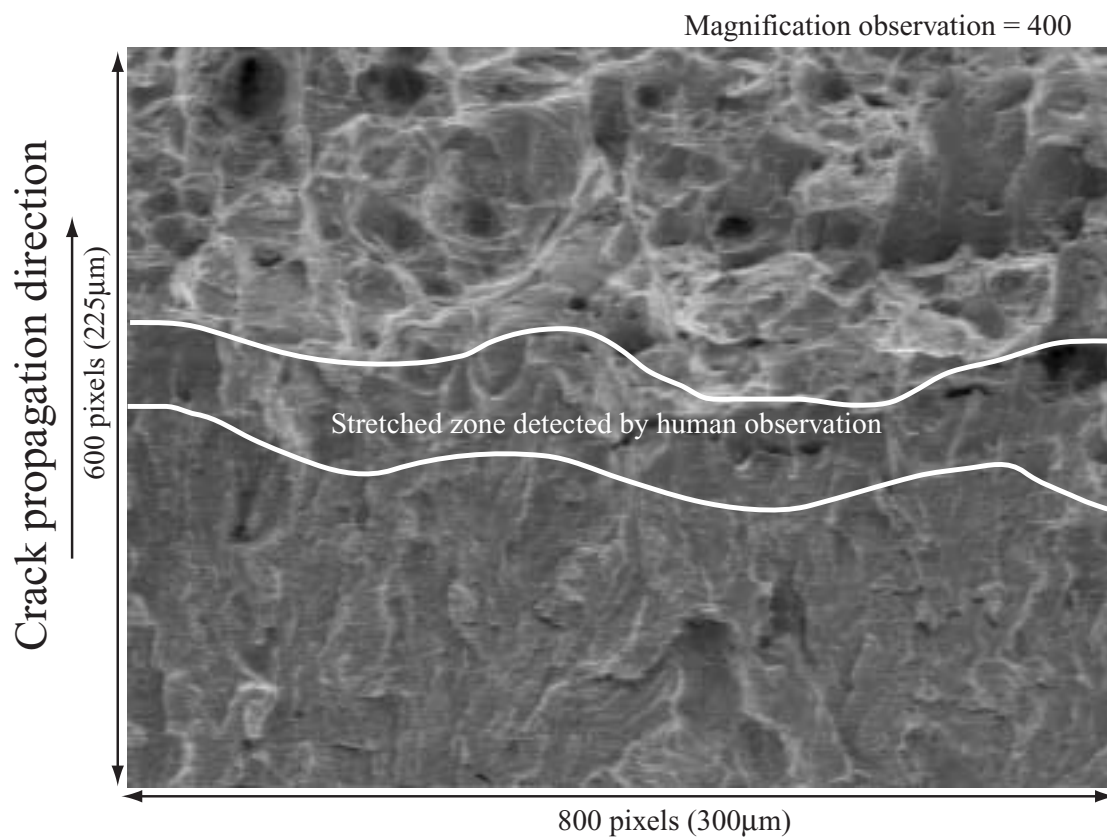


Fig. 4.7: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 1 case 2). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

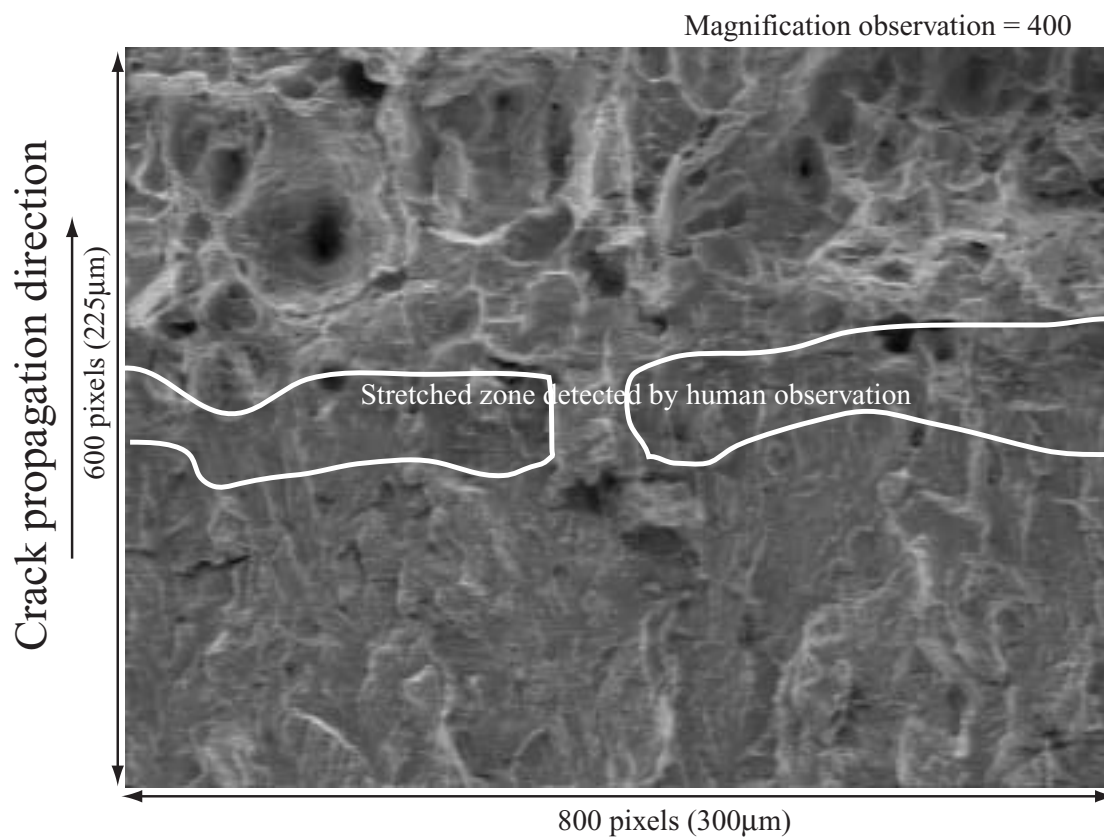


Fig. 4.8: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 1 case 3). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

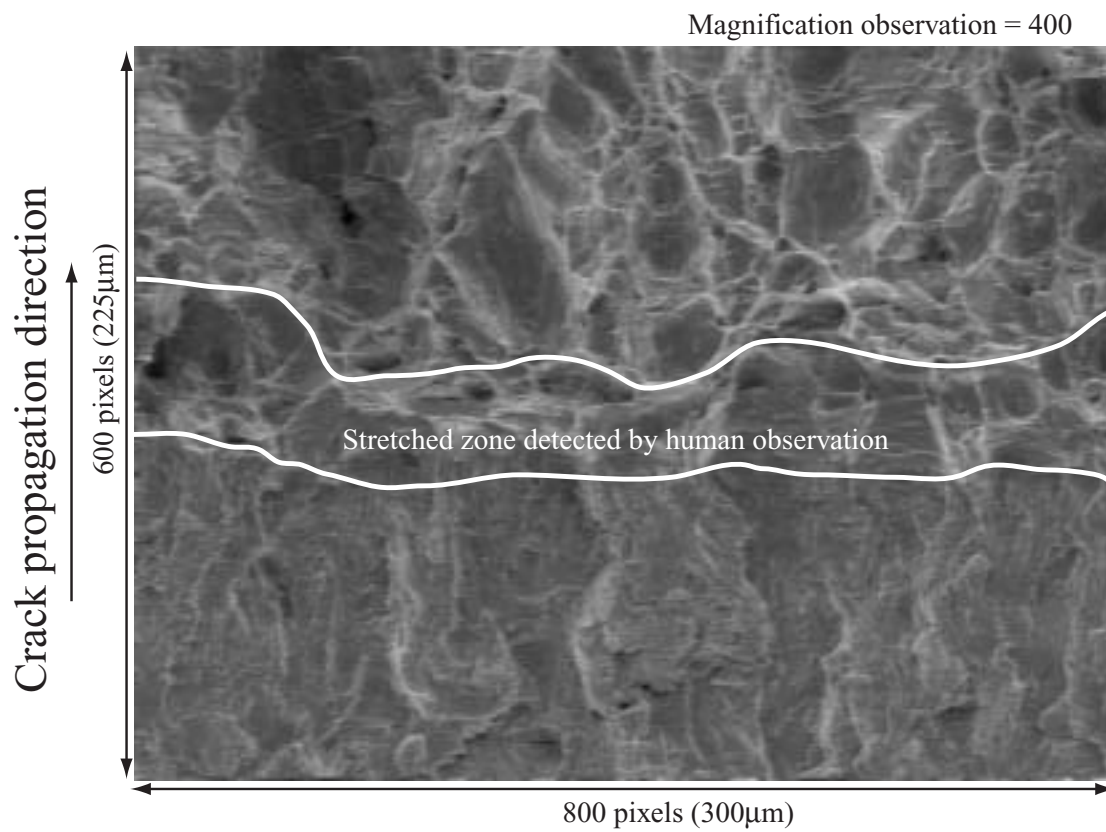


Fig. 4.9: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 2 case 1). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

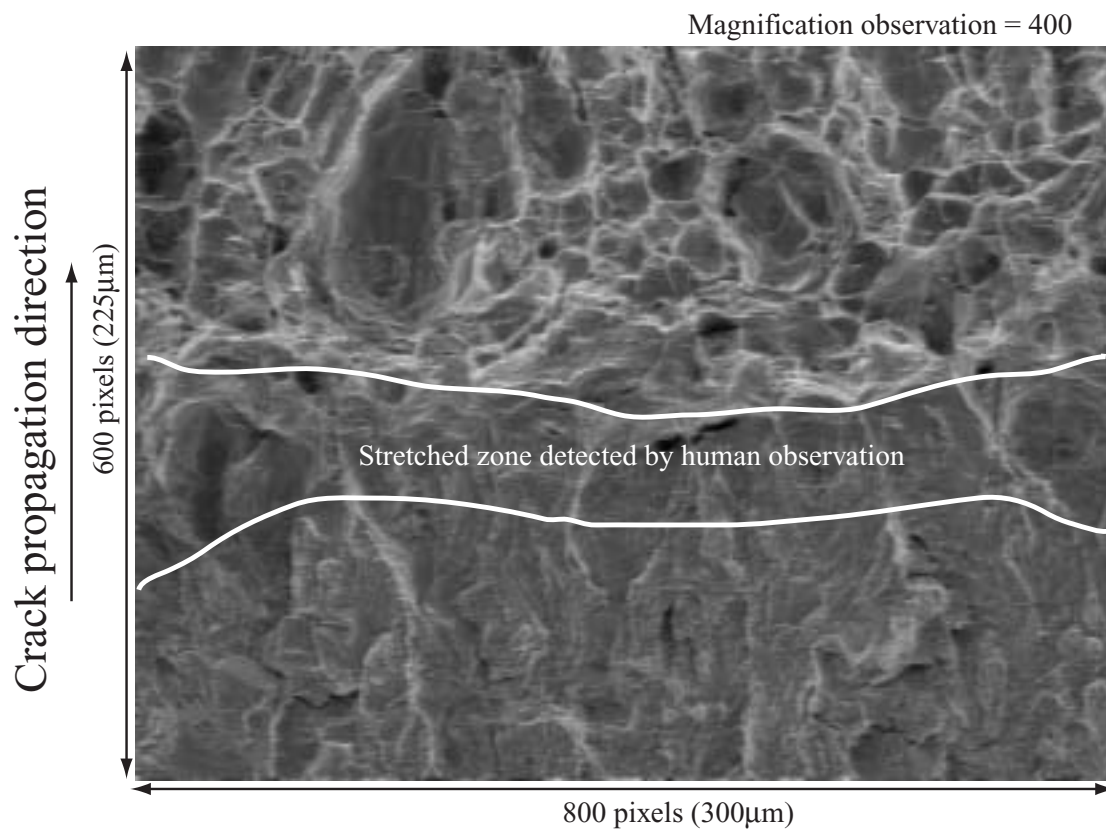


Fig. 4.10: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 2 case 2). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

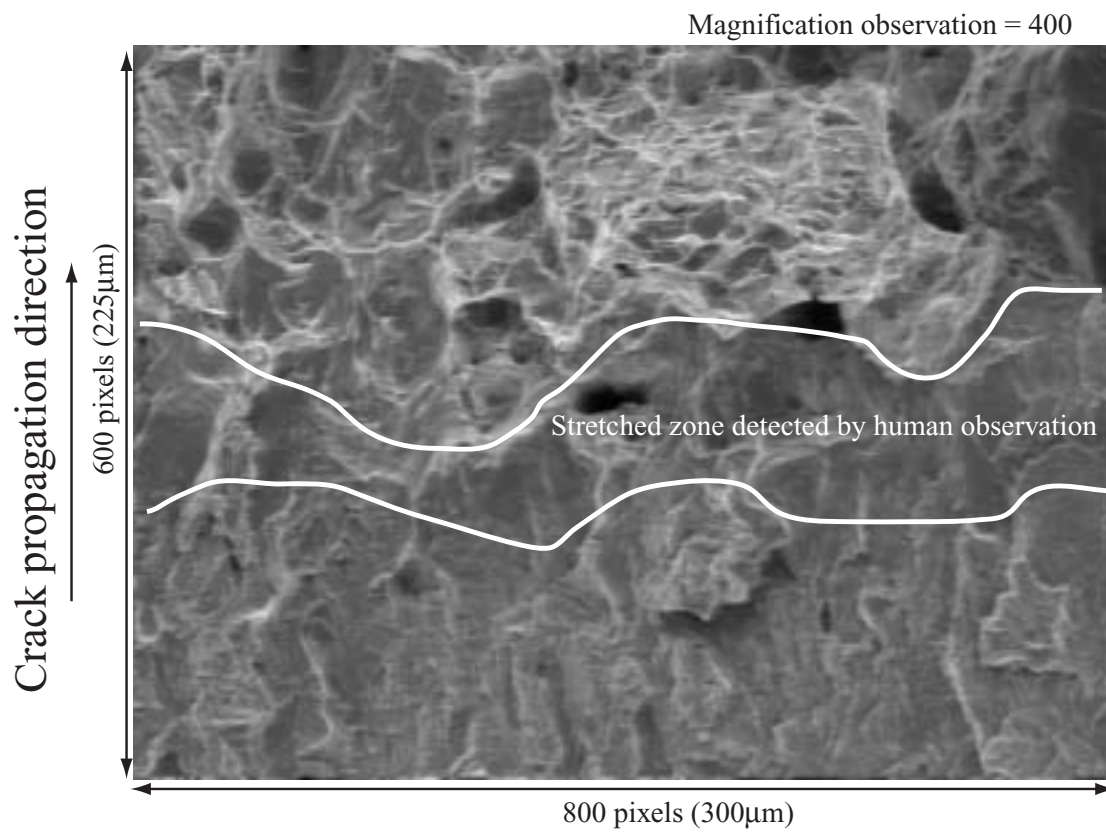


Fig. 4.11: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 2 case 3). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

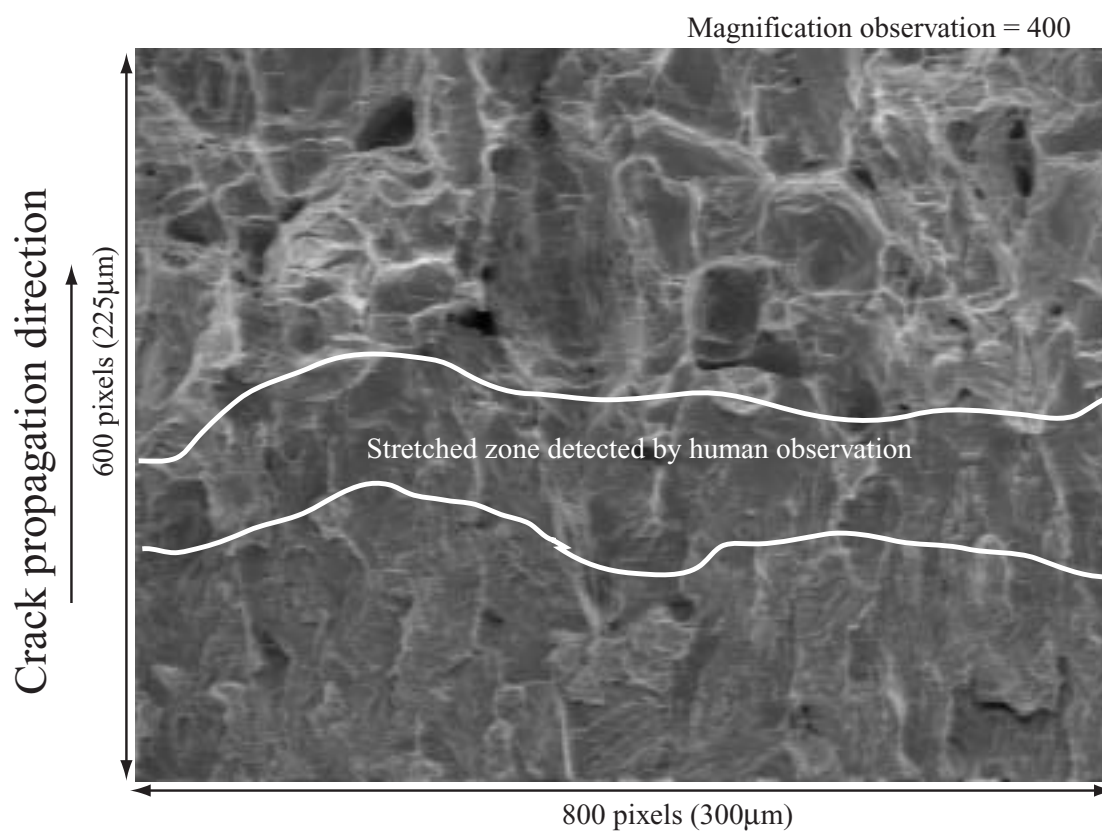


Fig. 4.12: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 3 case 1). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

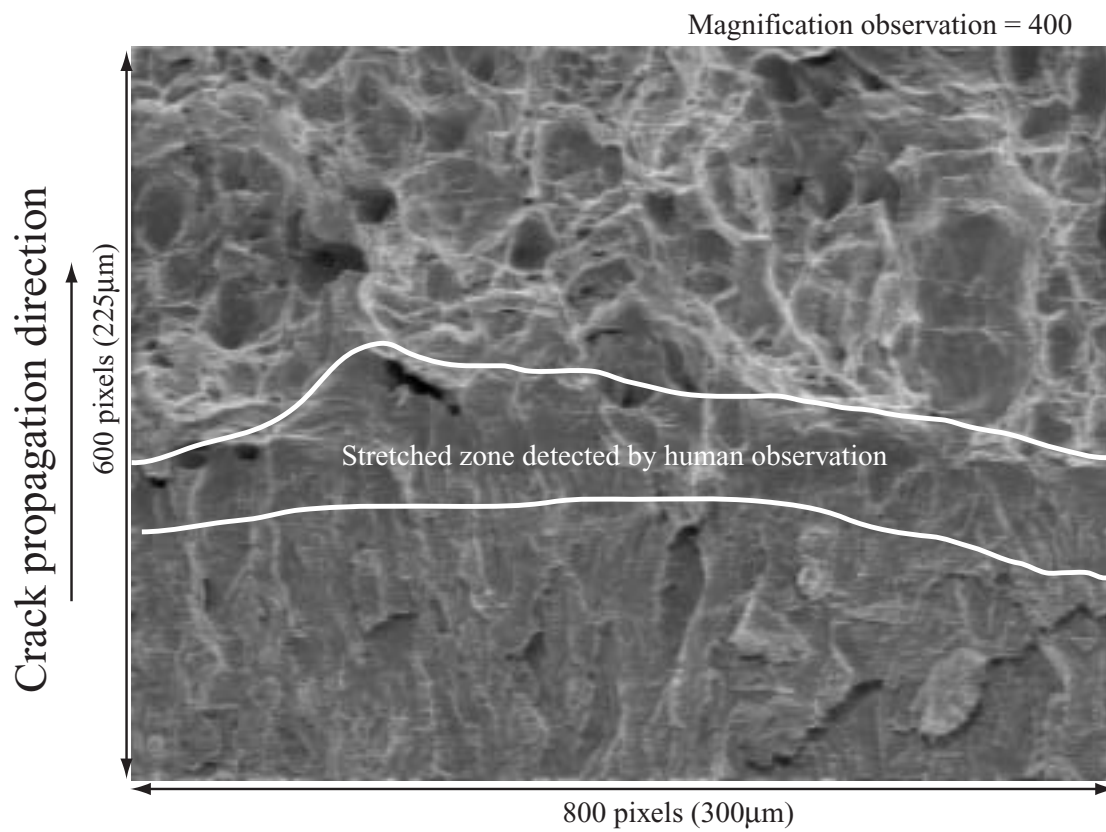


Fig. 4.13: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 3 case 2). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

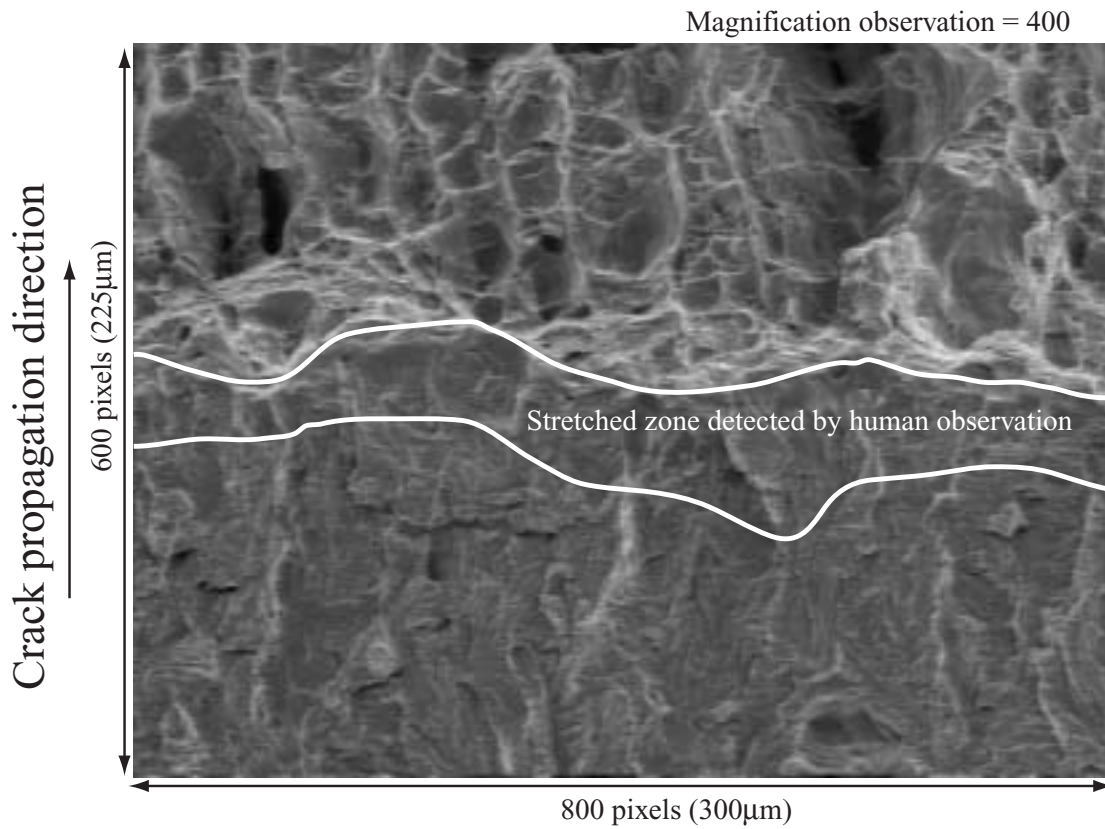


Fig. 4.14: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 3 case 3). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

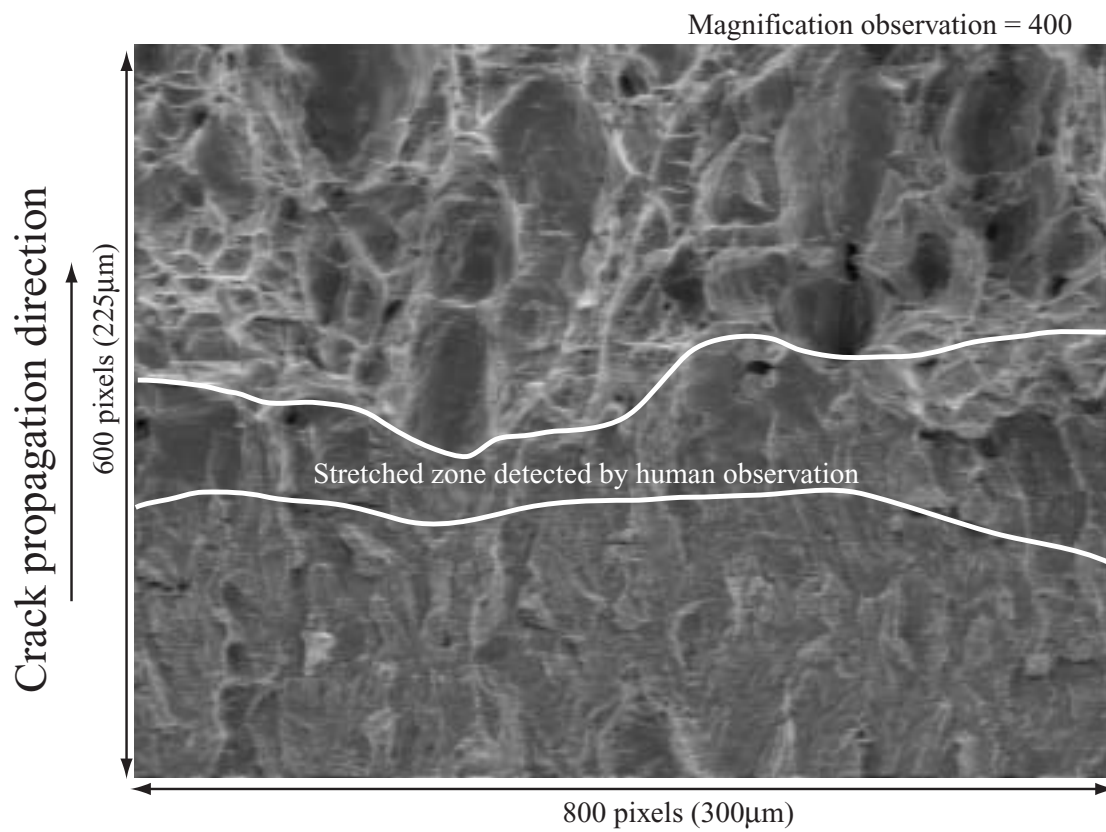


Fig. 4.15: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 4 case 1). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

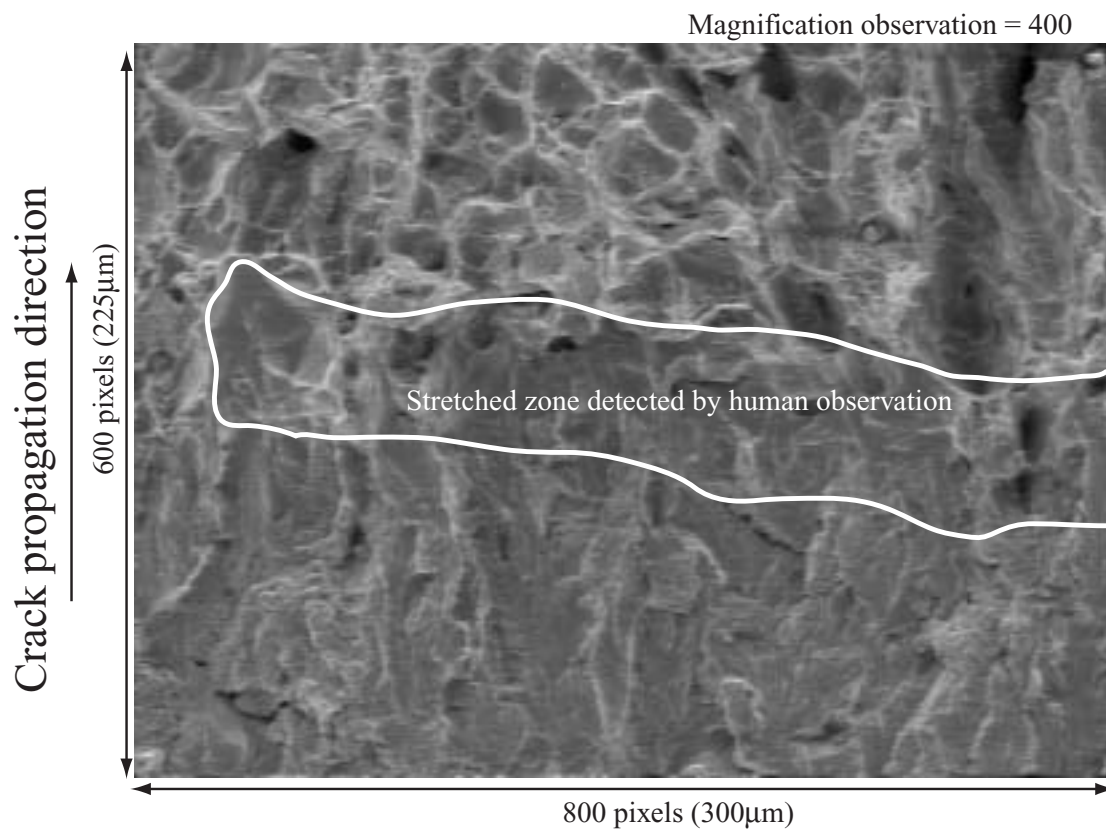


Fig. 4.16: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 4 case 2). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

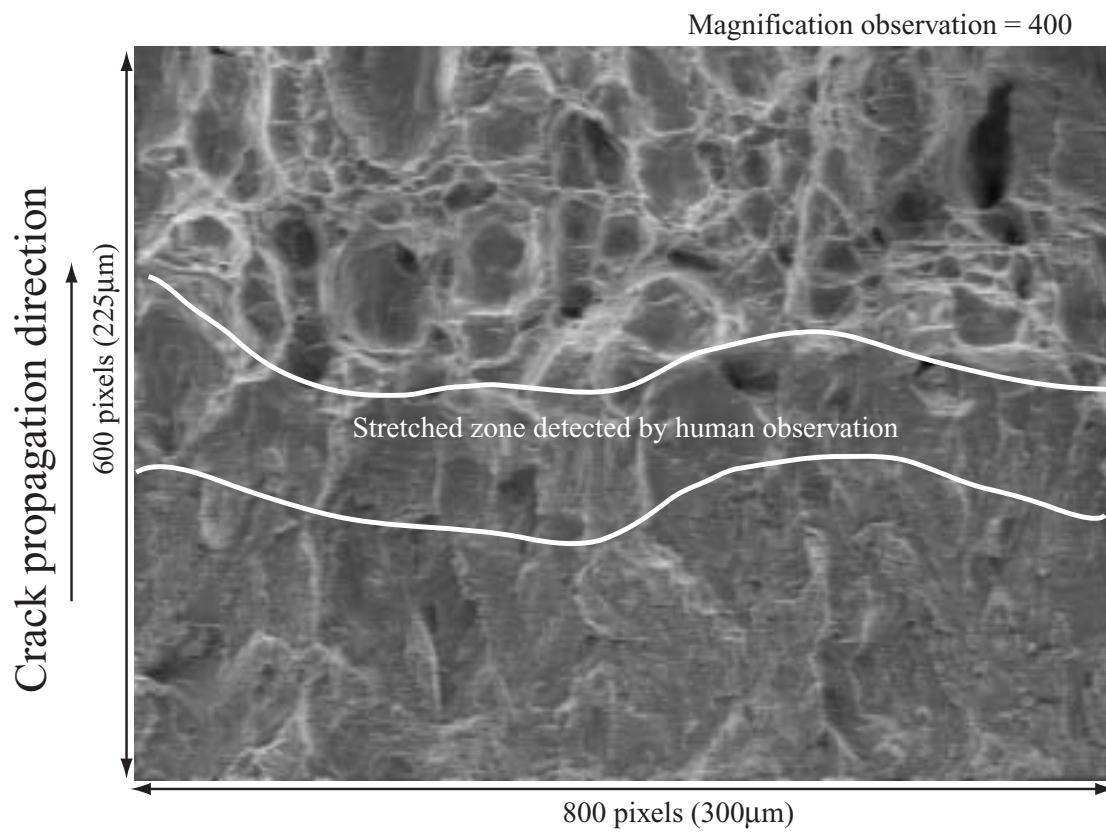


Fig. 4.17: Image of fracture surface with stretched zone (試験片 4 case 3). White lines indicate stretched zone detected by human observation.

		$w=0\mu m$	$w=4\mu m$	$w=18\mu m$	$w=38\mu m$
試験片 1	case 1	0.933	0.949	0.965	0.974
	case 2	0.927	0.942	0.958	0.968
	case 3	0.926	0.938	0.954	0.964
試験片 2	case 1	0.937	0.953	0.972	0.98
	case 2	0.919	0.933	0.953	0.966
	case 3	0.936	0.952	0.968	0.977
試験片 3	case 1	0.919	0.934	0.954	0.966
	case 2	0.934	0.951	0.968	0.976
	case 3	0.903	0.92	0.947	0.964
試験片 4	case 1	0.921	0.935	0.953	0.962
	case 2	0.915	0.929	0.953	0.968
	case 3	0.925	0.94	0.961	0.973

Table. 4.1: w とべき乗則の収束の関係

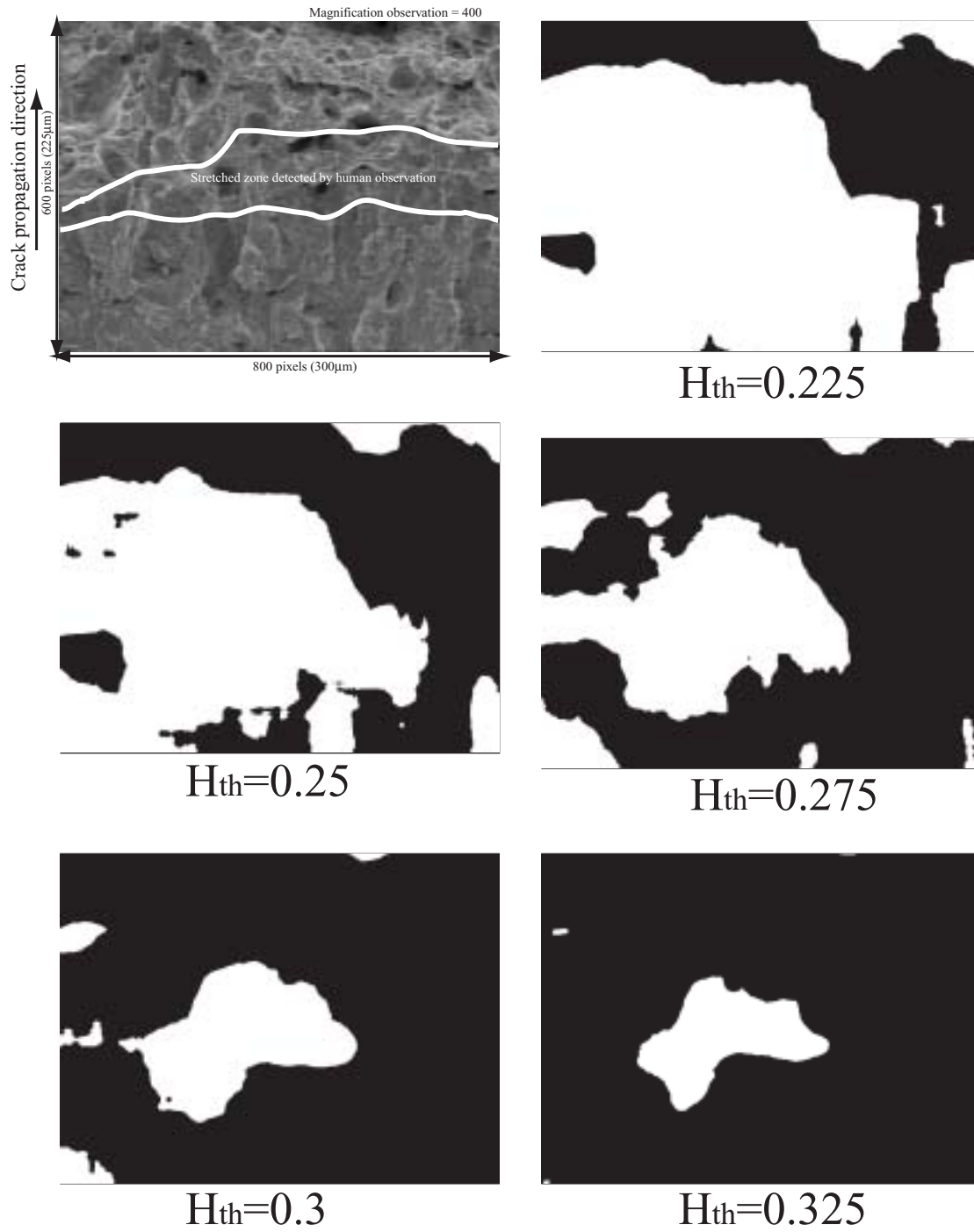


Fig. 4.18: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.6(試験片 1 case 1).

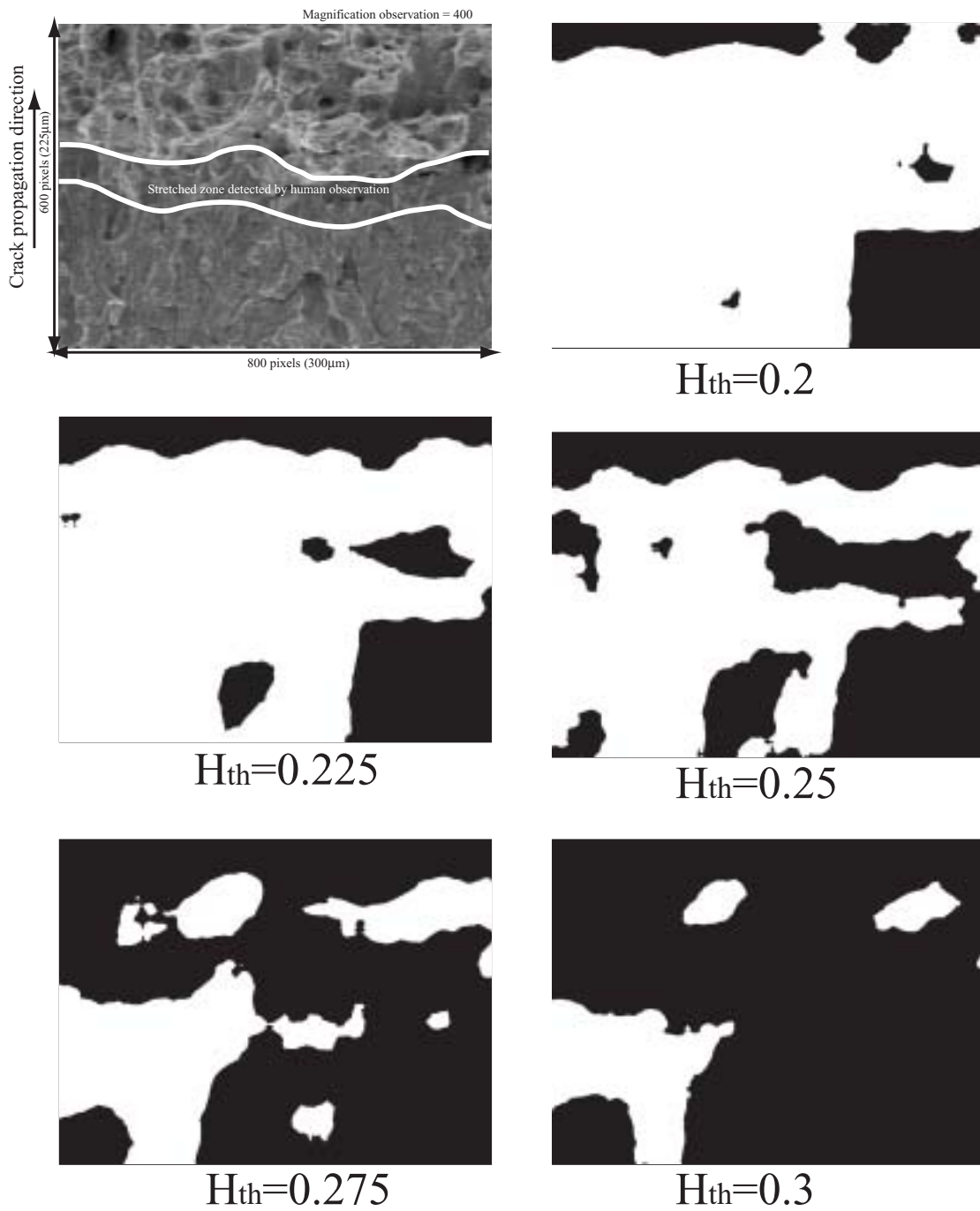


Fig. 4.19: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.7(試験片 1 case 2).

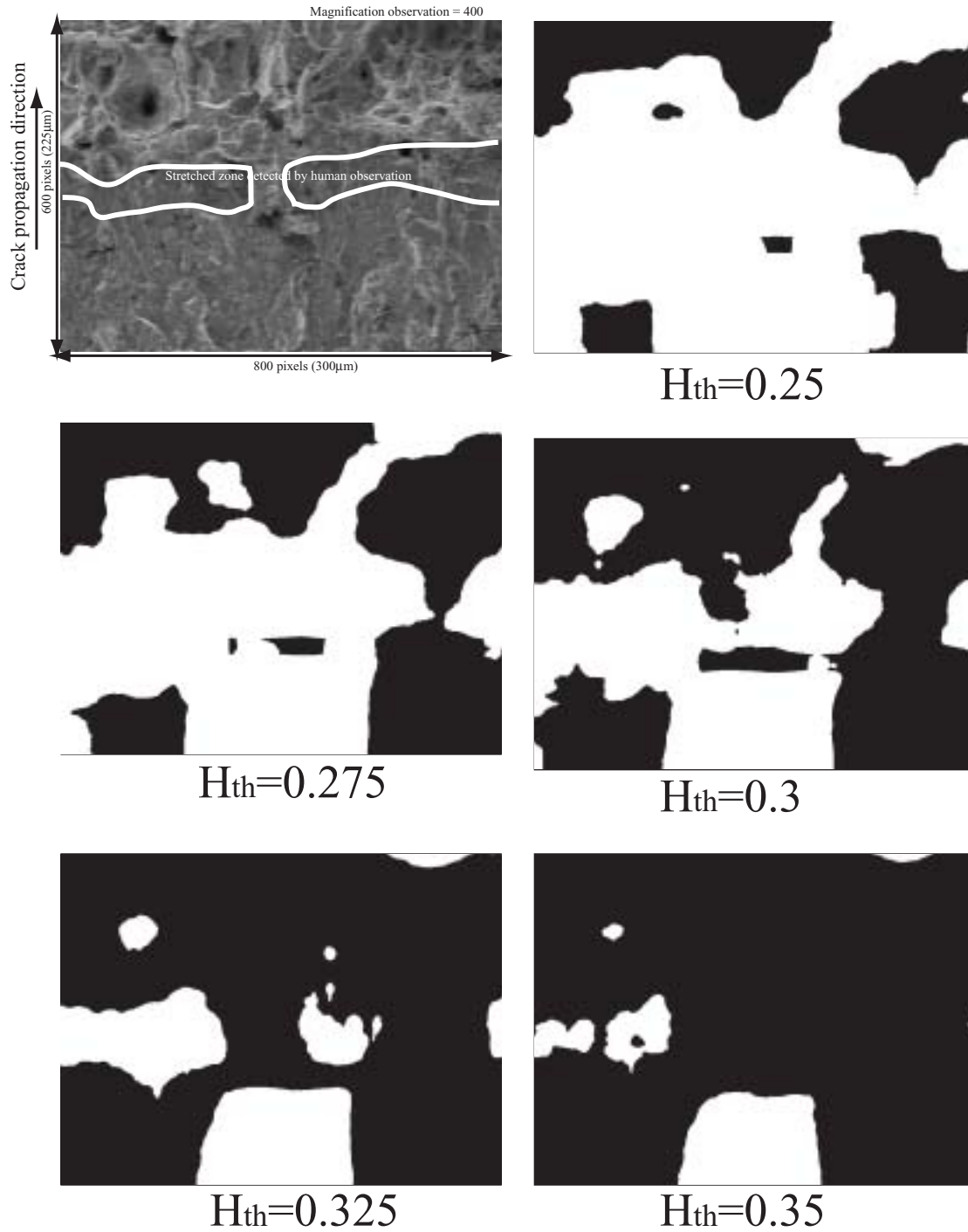


Fig. 4.20: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.8(試験片 1 case 3).

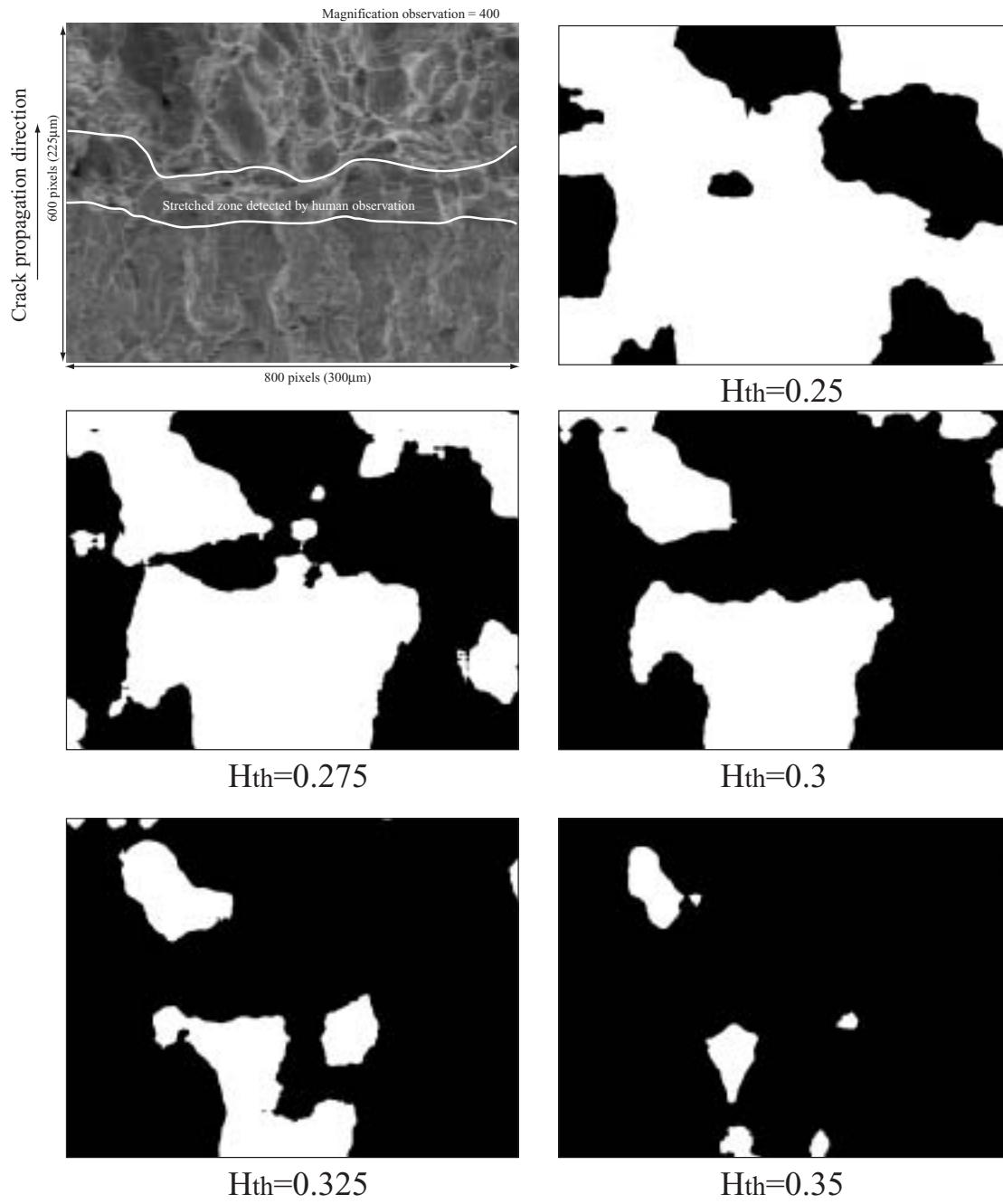


Fig. 4.21: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.9(試験片 2 case 1).

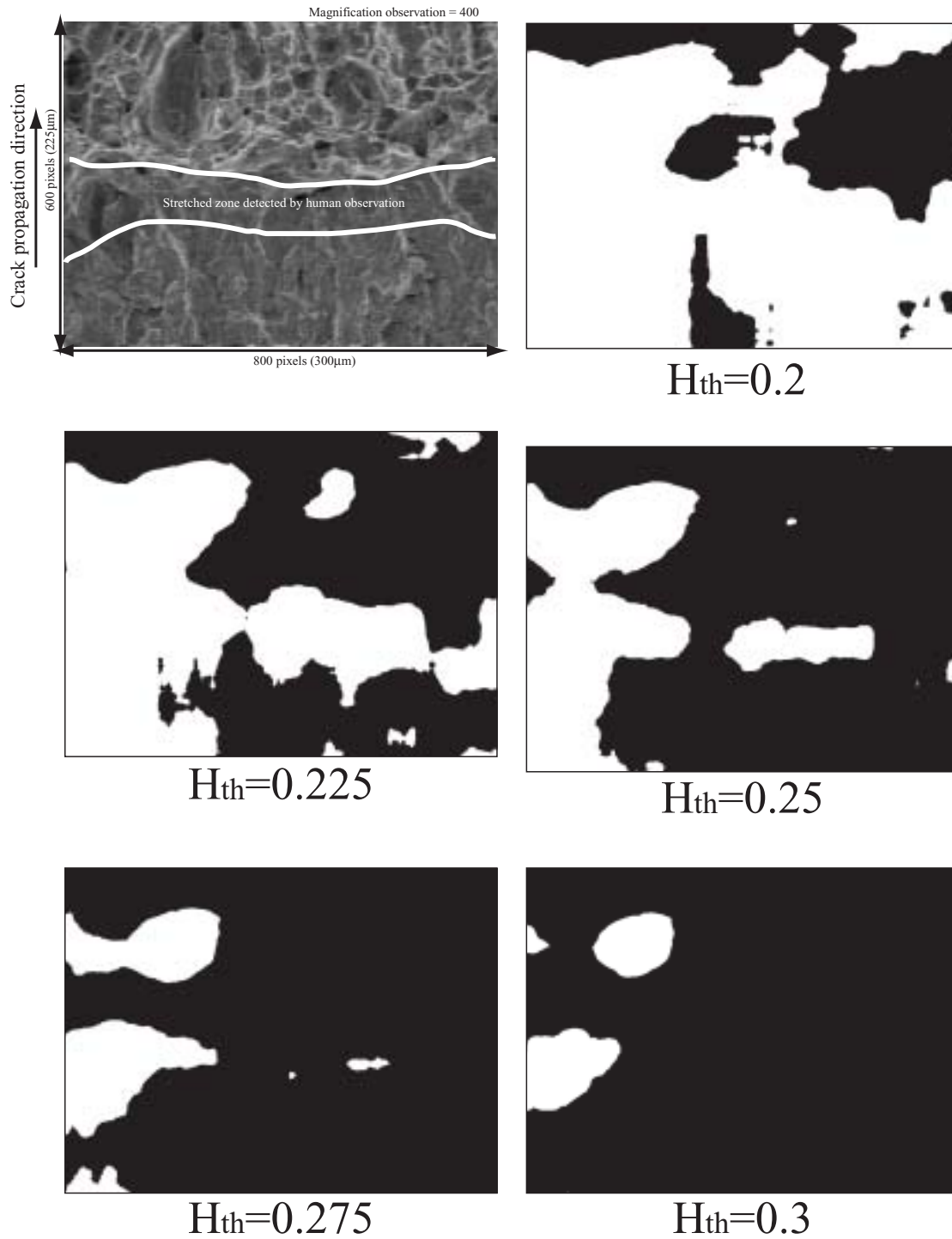


Fig. 4.22: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.10(試験片 2 case 2).

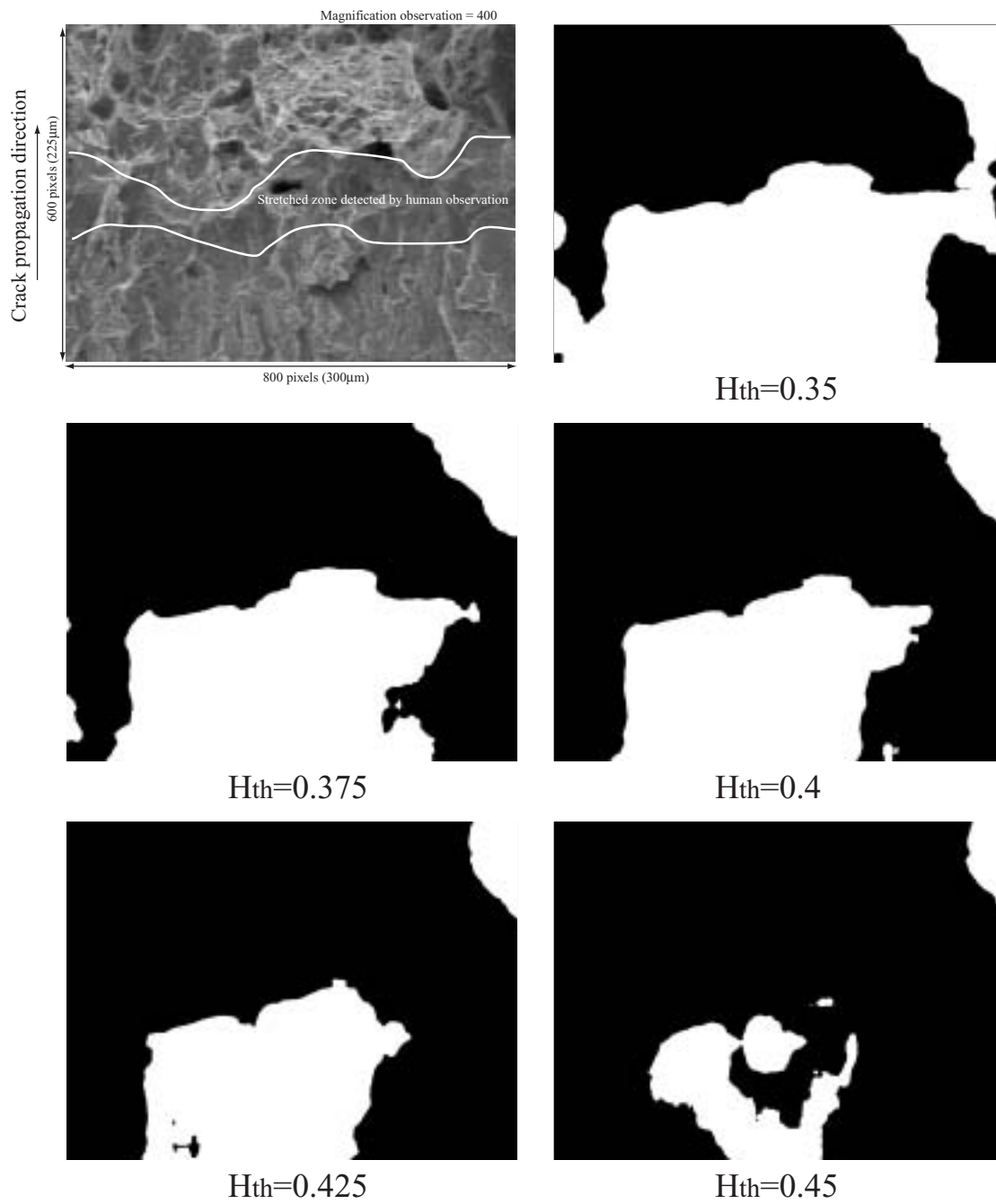


Fig. 4.23: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.11(試験片 2 case 3).

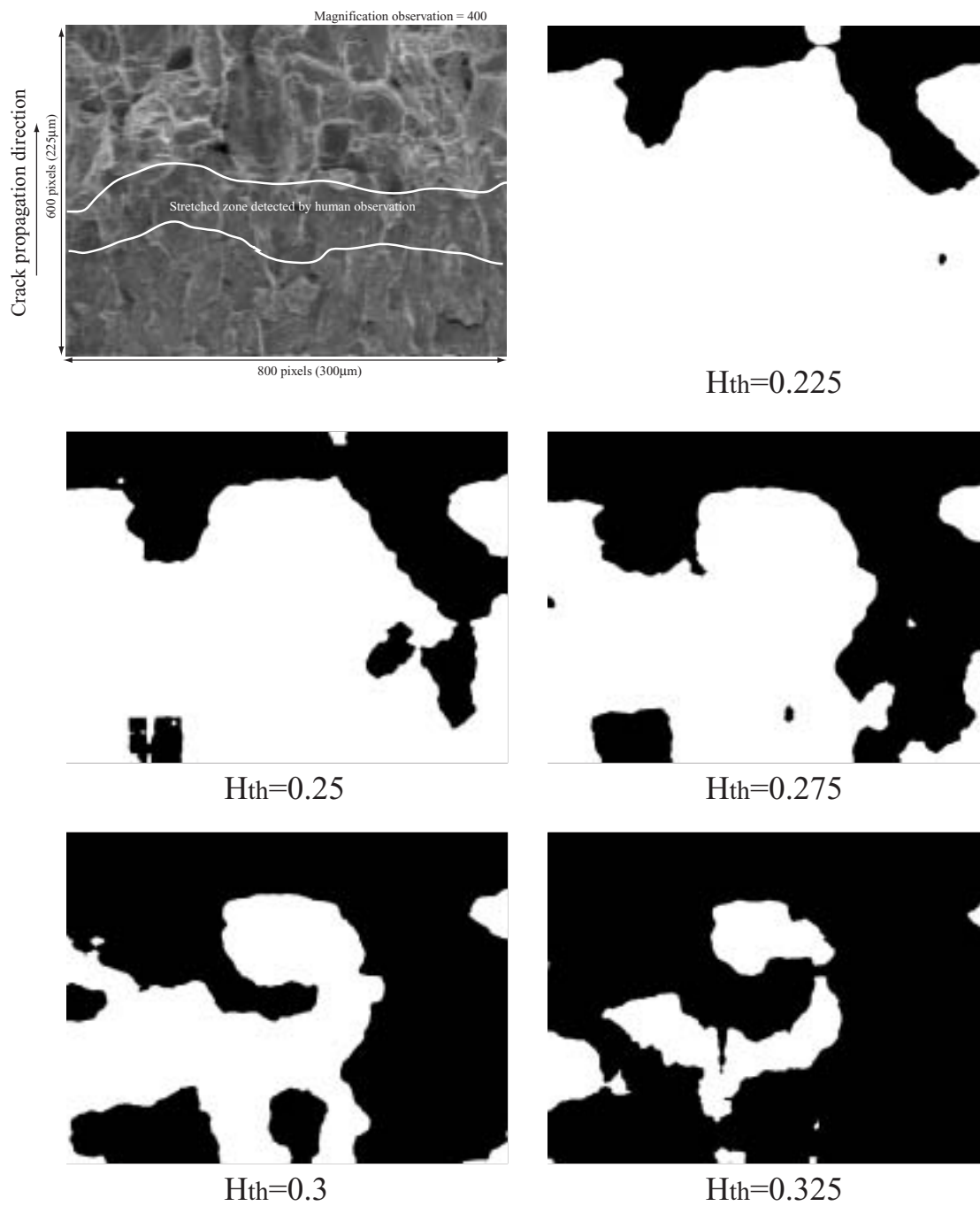


Fig. 4.24: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.12(試験片 3 case 1).

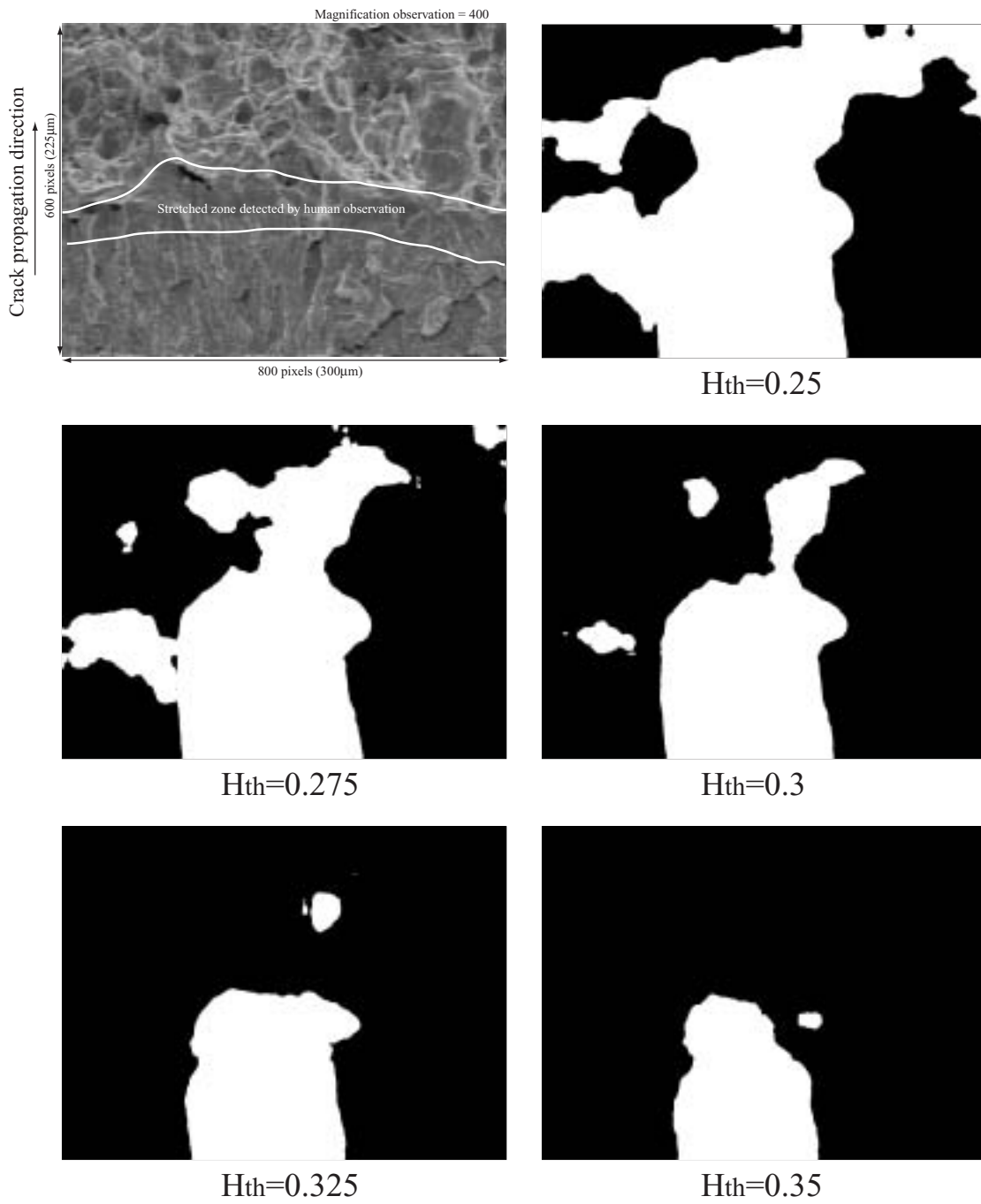


Fig. 4.25: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.13(試験片 3 case 2).

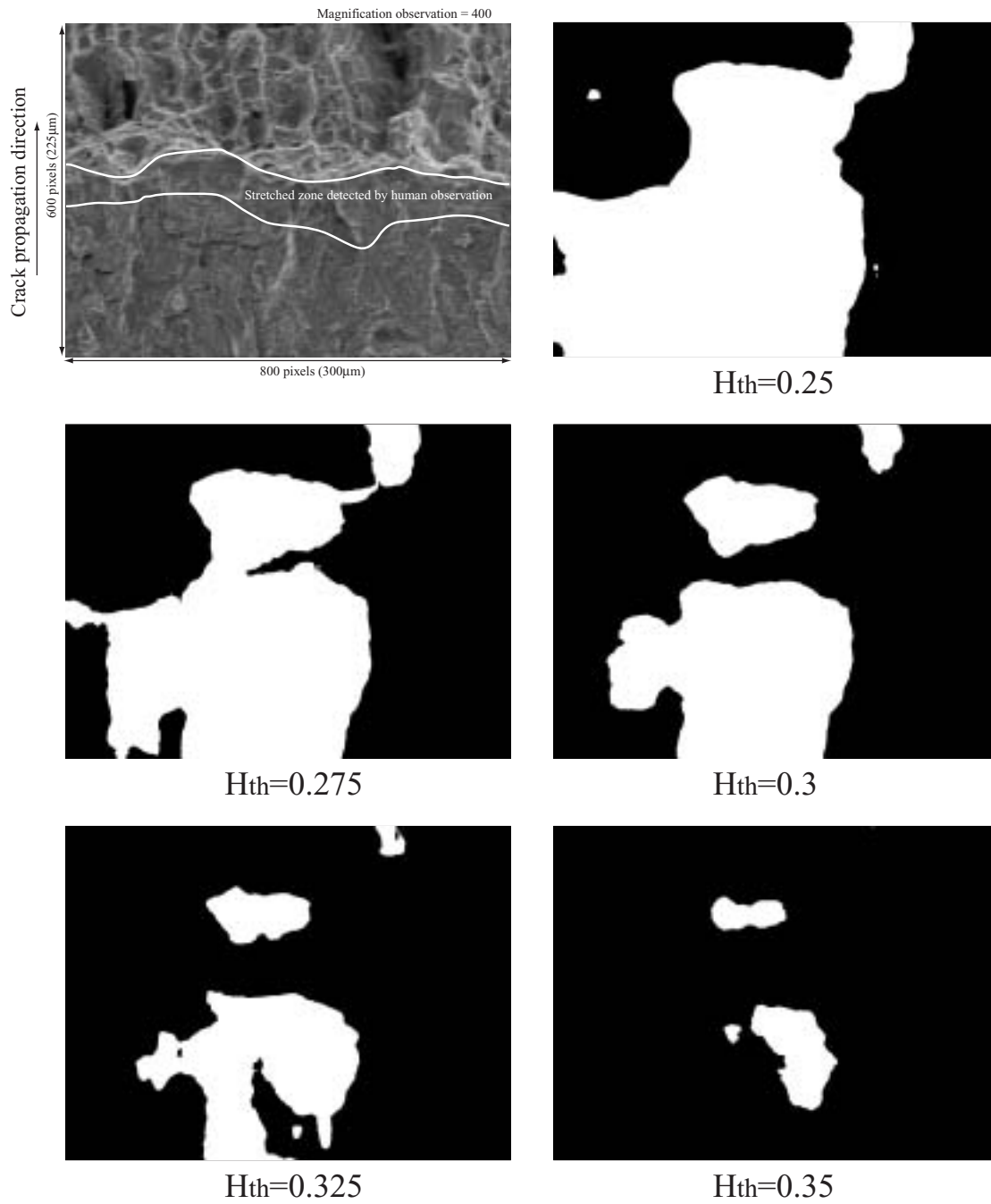


Fig. 4.26: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.14(試験片 3 case 3).

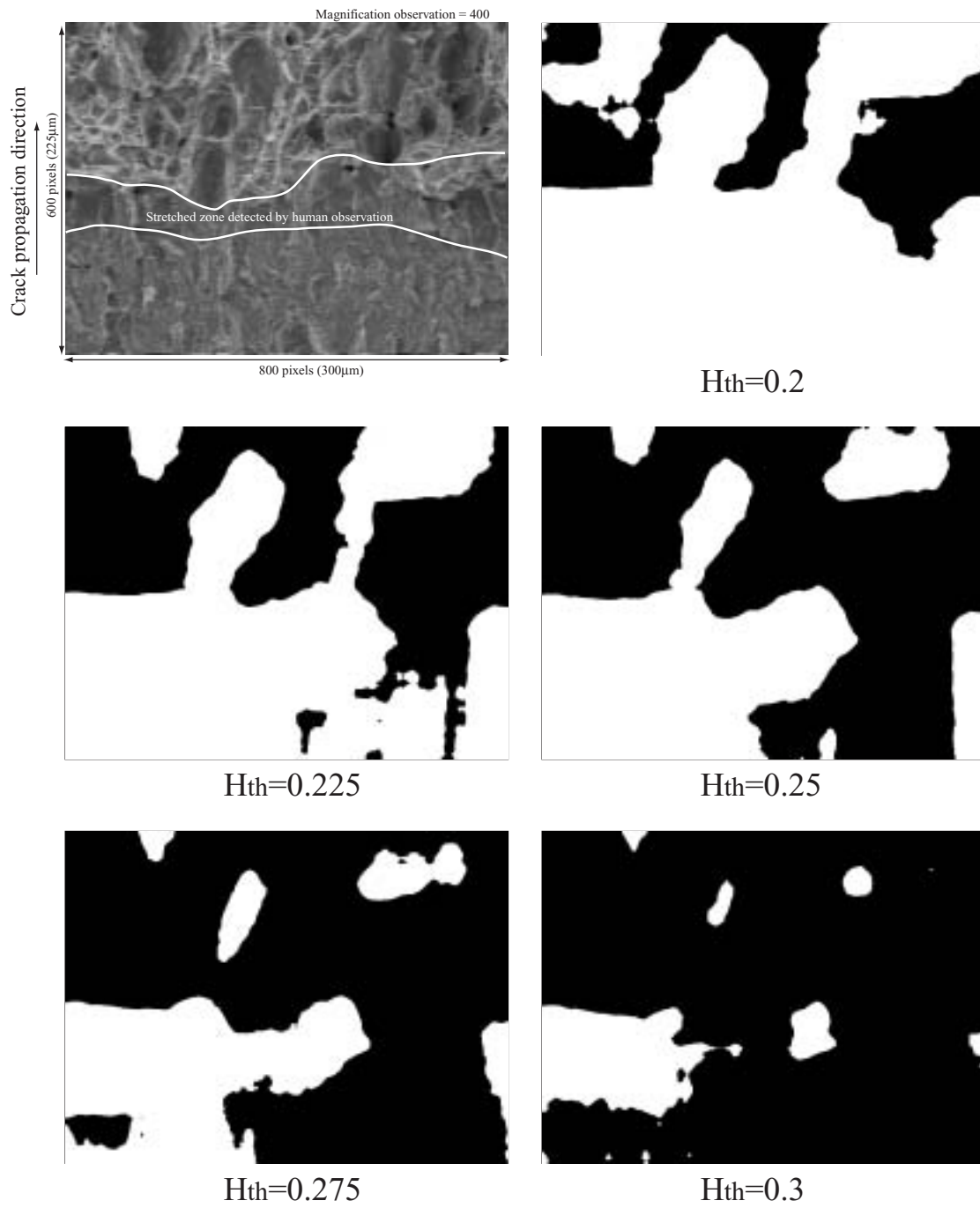


Fig. 4.27: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.15(試験片 4 case 1).

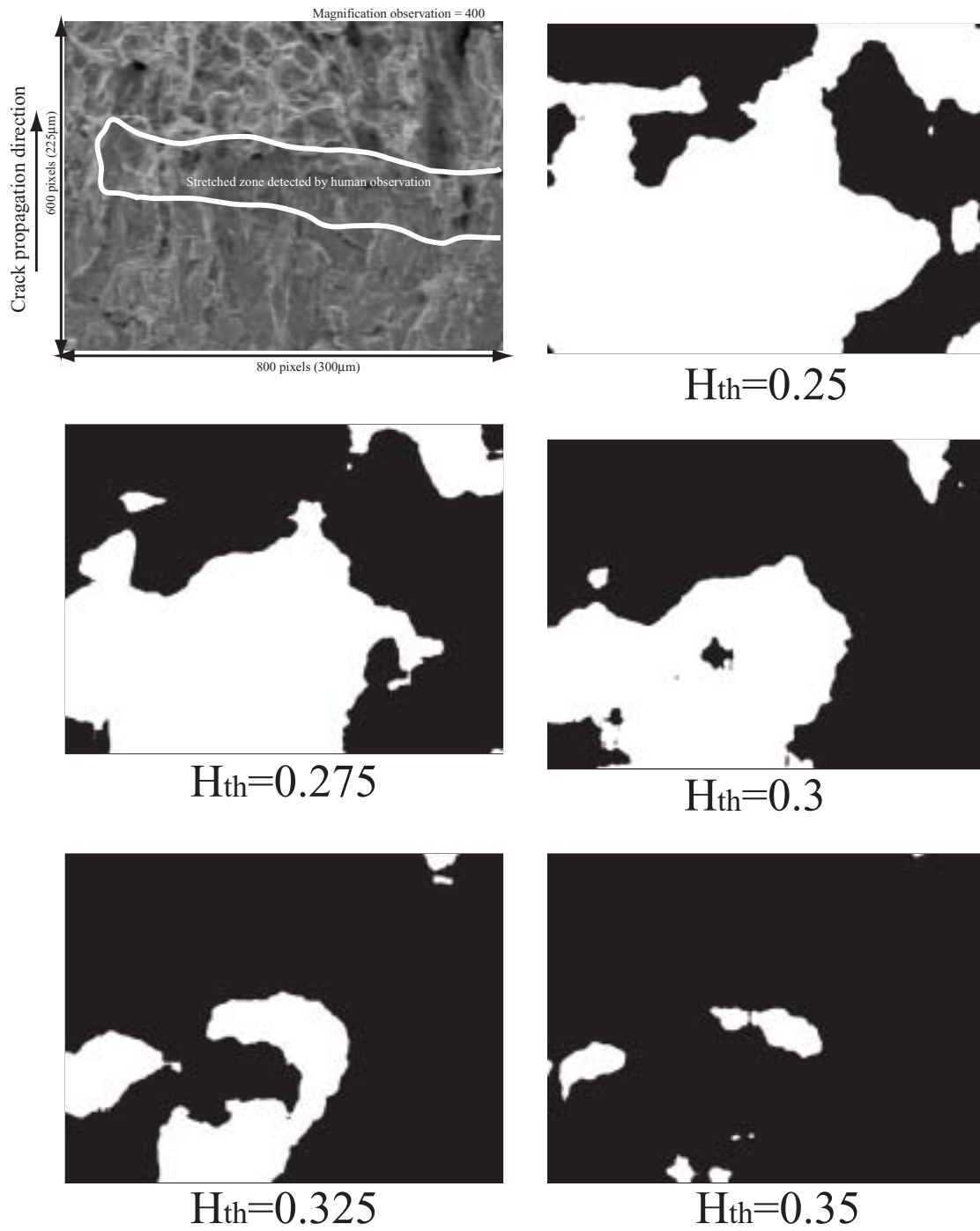


Fig. 4.28: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.16(試験片 4 case 2).

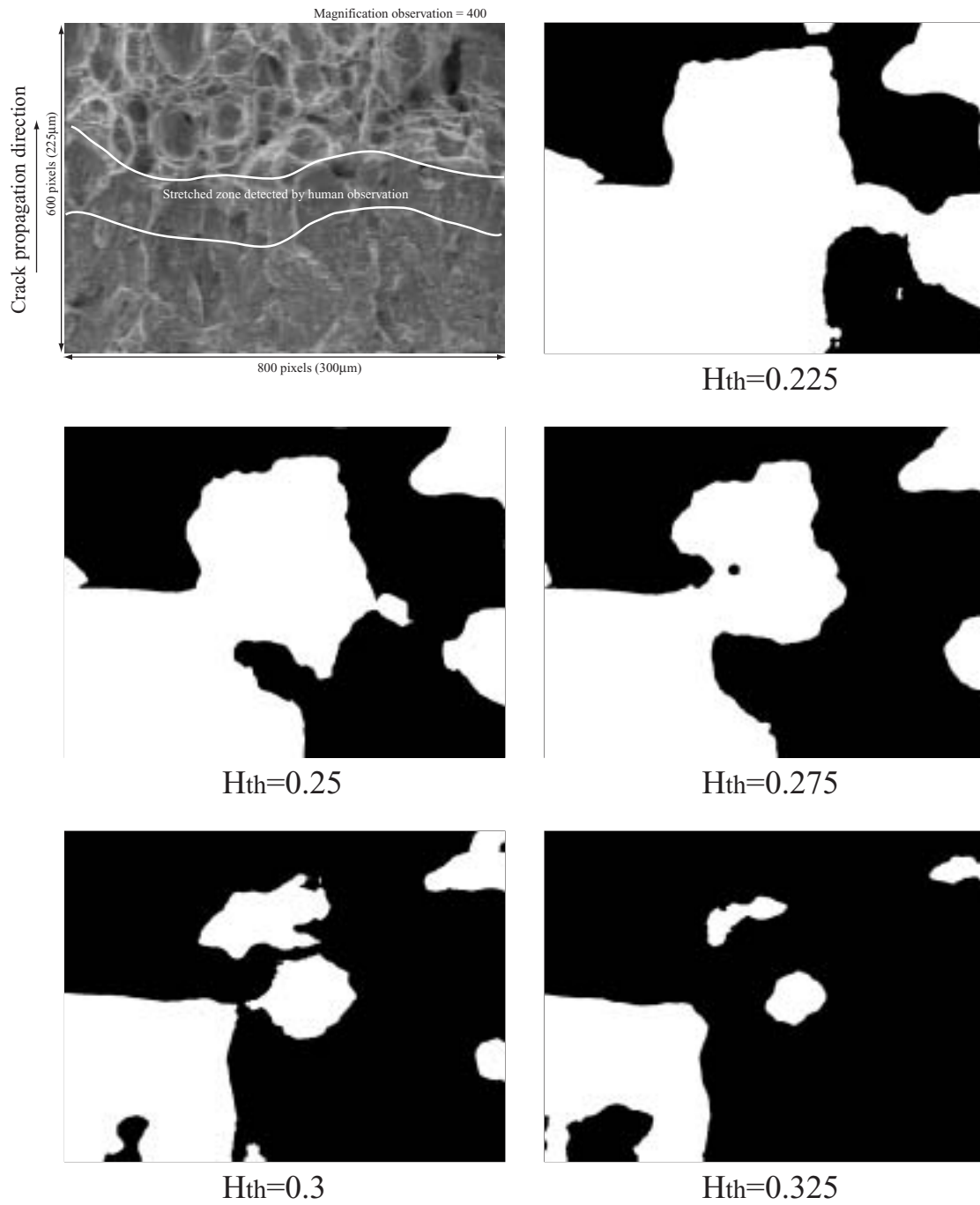


Fig. 4.29: Distribution of 2-dimensional local hurst exponent of Fig.4.17(試験片 4 case 3).

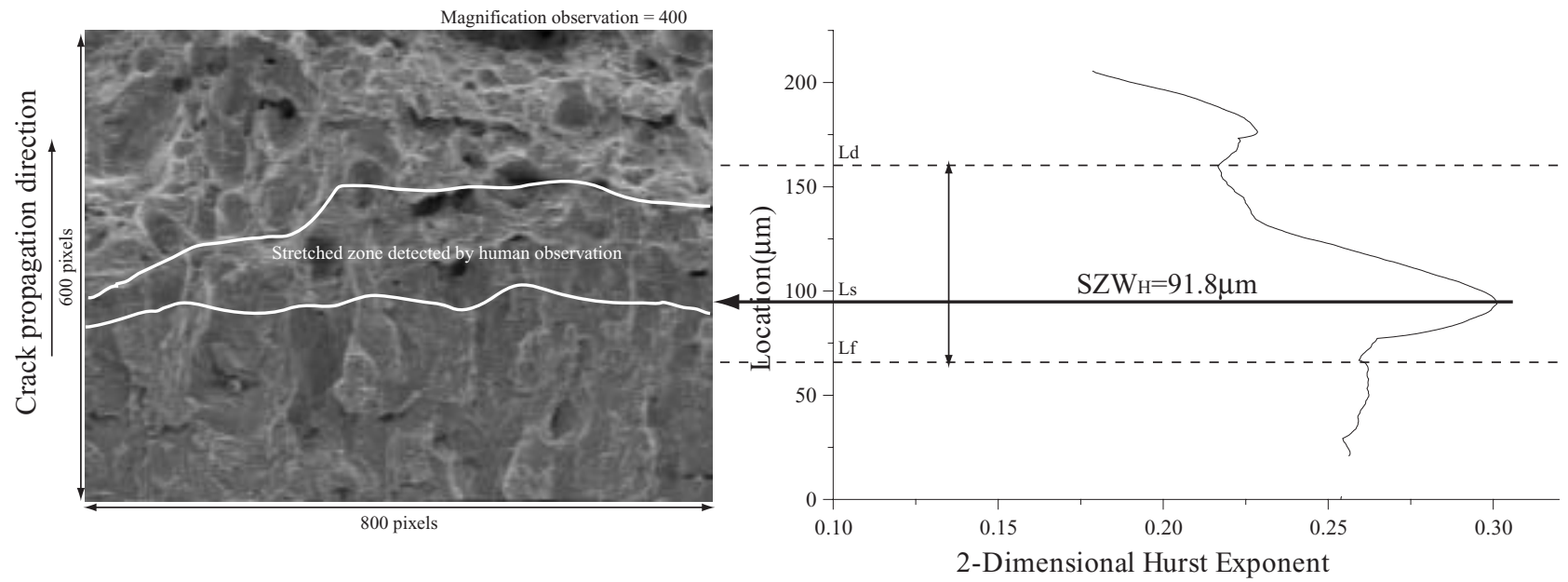


Fig. 4.30: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 1 case 1 $w=18\mu\text{m}$)

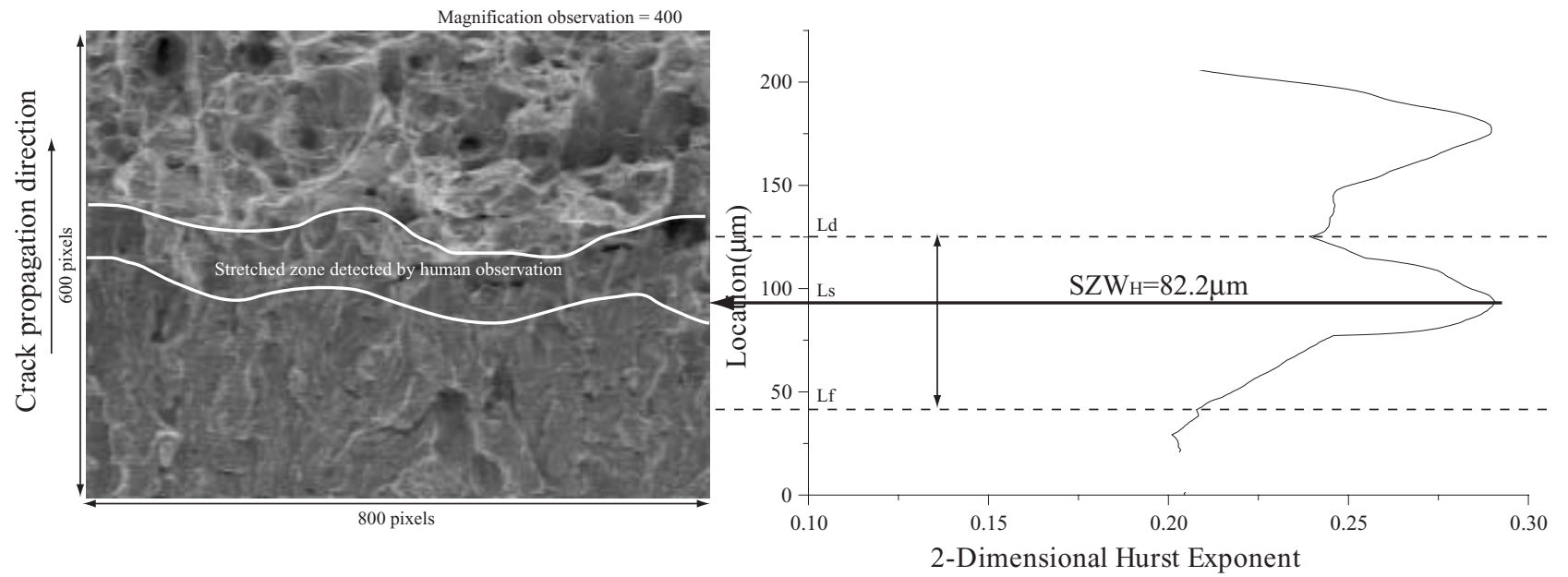


Fig. 4.31: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 1 case 2 $w=18\mu\text{m}$)

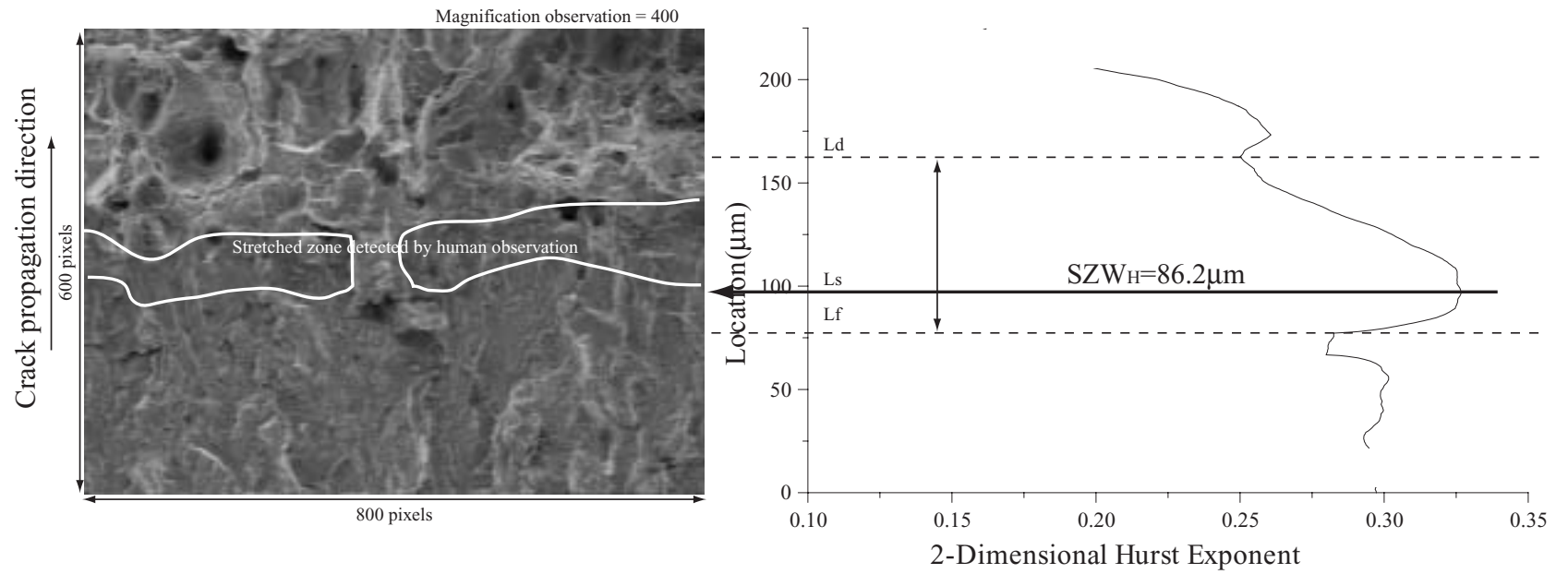


Fig. 4.32: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 1 case 3 $w=18\mu\text{m}$)

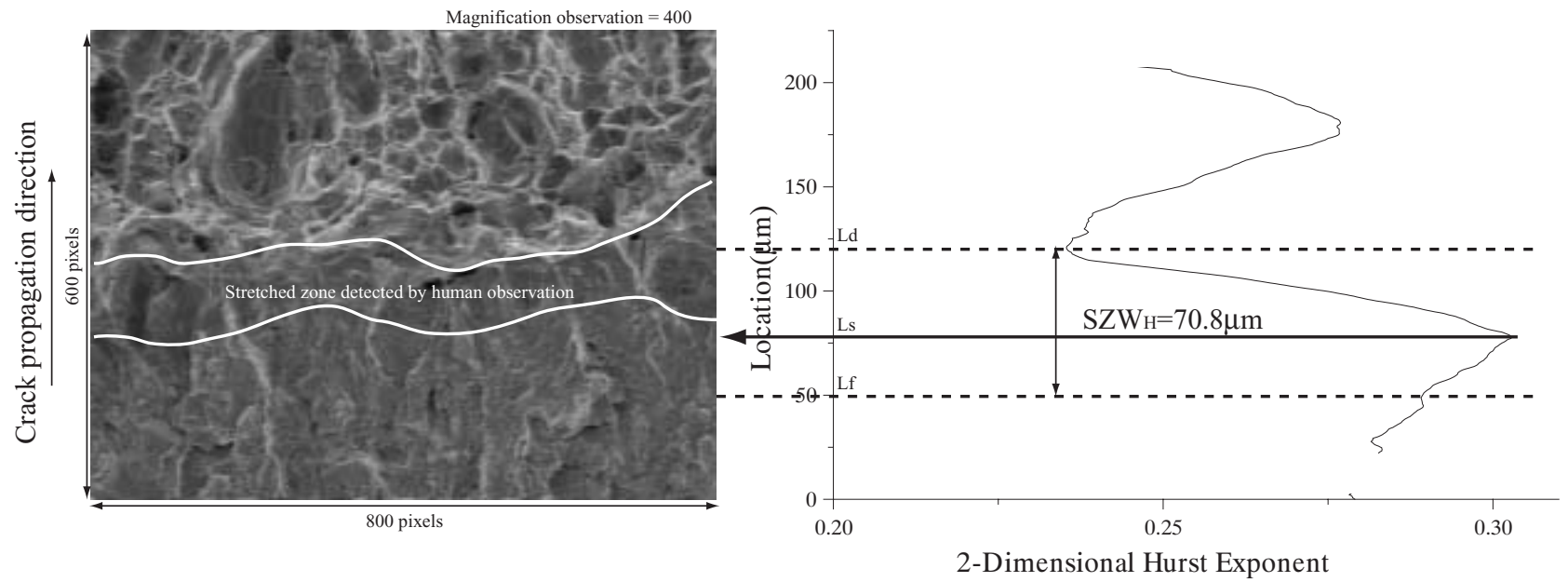


Fig. 4.33: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 2 case 1 $w=18\mu\text{m}$)

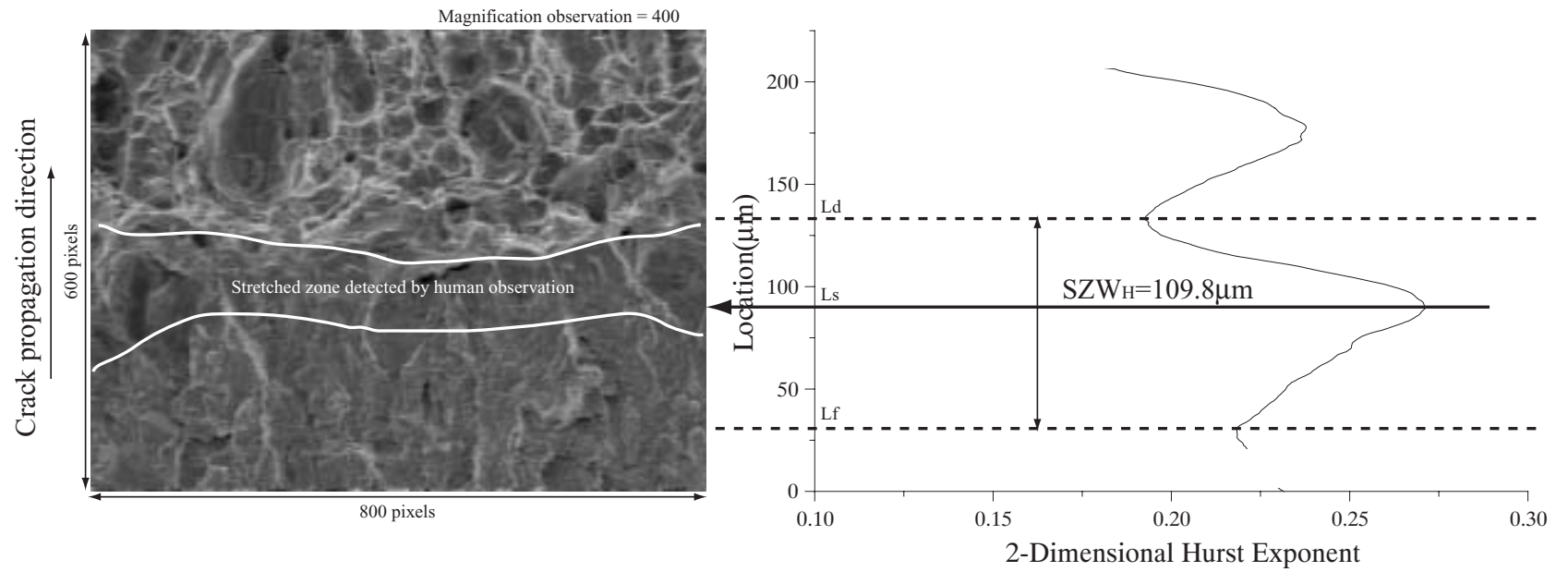


Fig. 4.34: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 2 case 2 $w=18\mu\text{m}$)

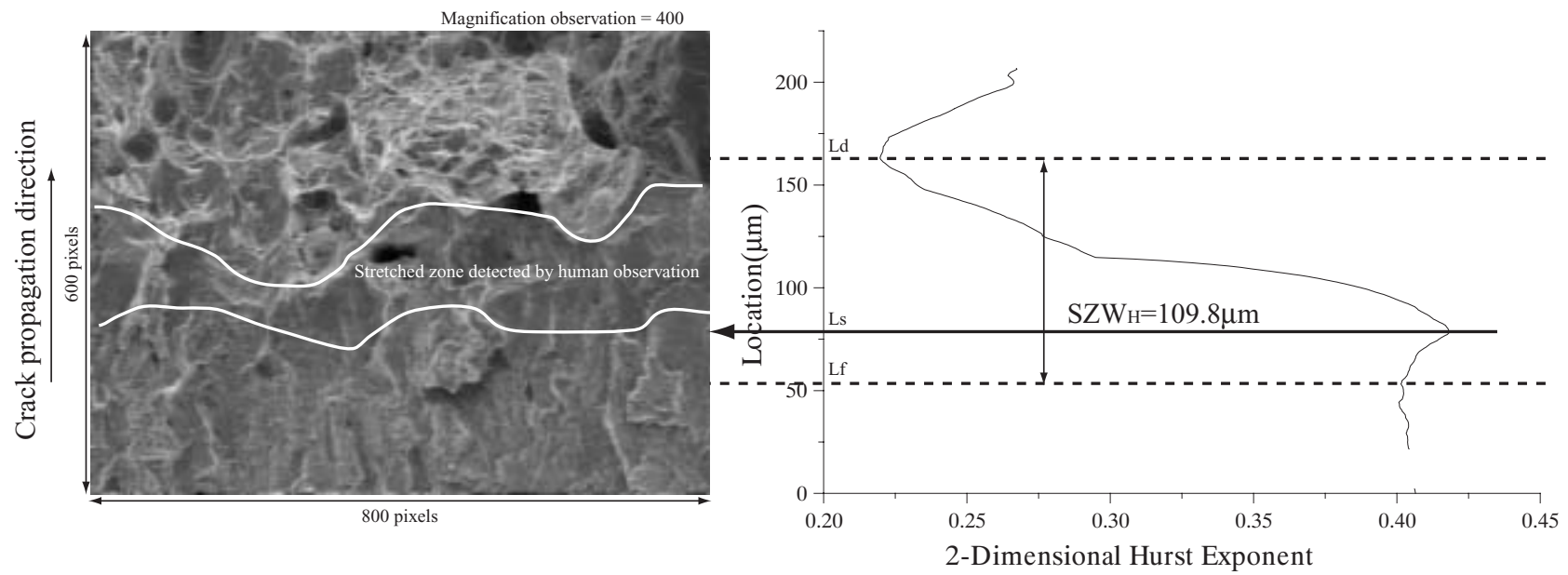


Fig. 4.35: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 2 case 3 $w=18\mu\text{m}$)

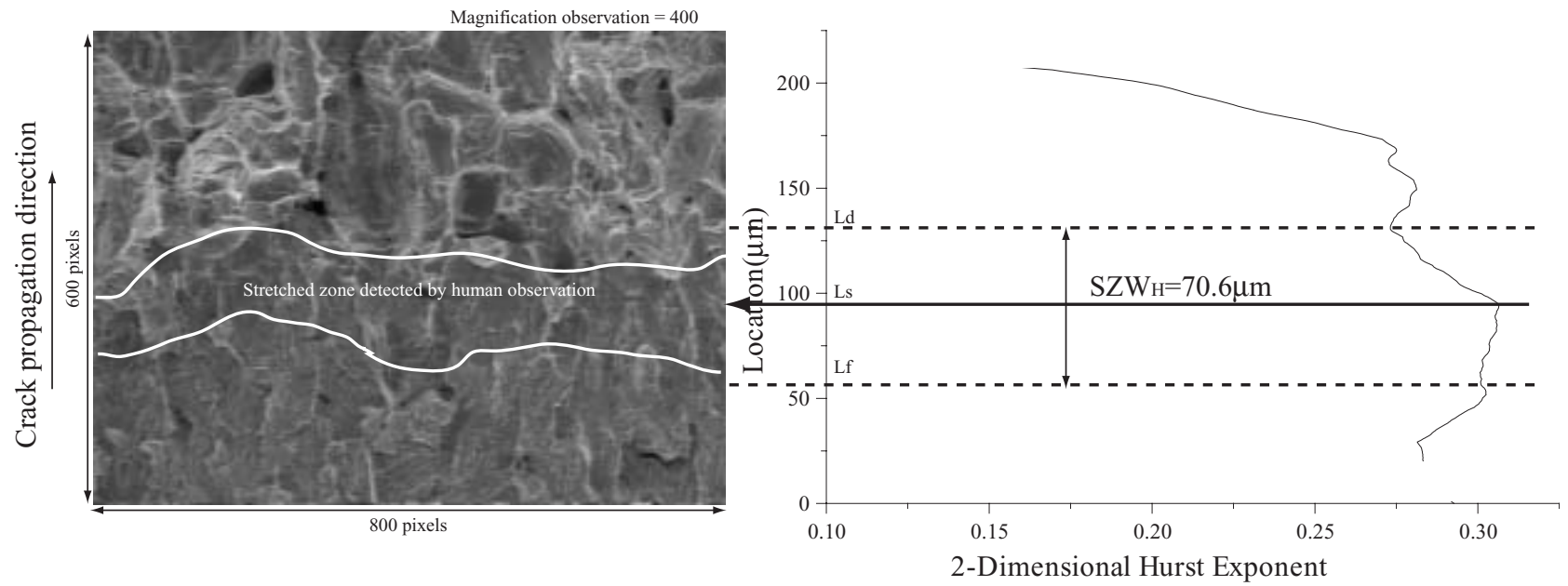


Fig. 4.36: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 3 case 1 $w=18\mu\text{m}$)

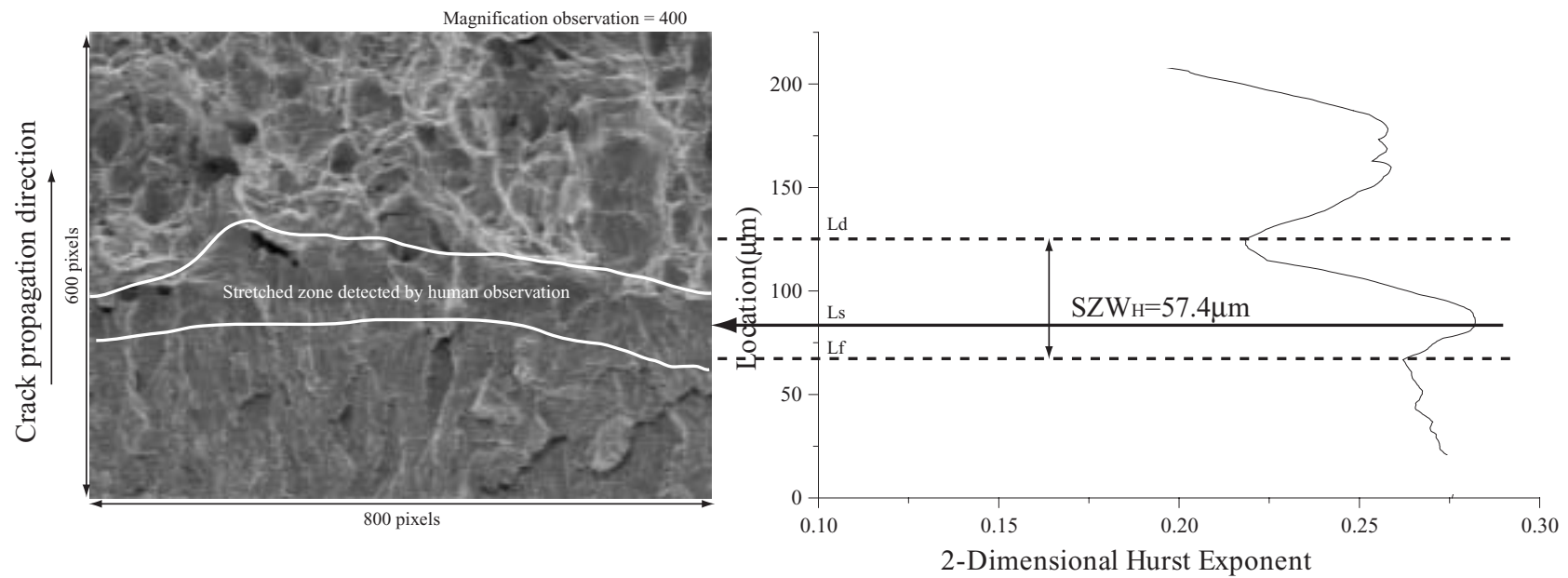


Fig. 4.37: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 3 case 2 $w=18\mu\text{m}$)

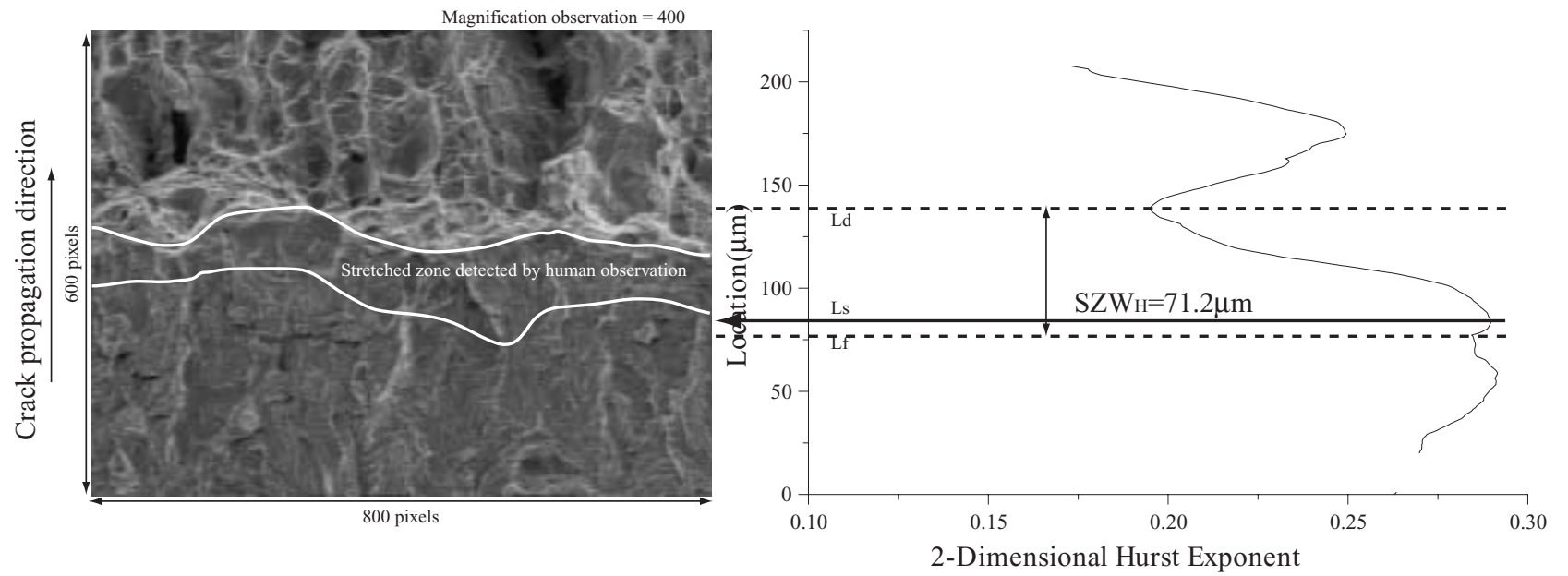


Fig. 4.38: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 3 case 3 $w=18\mu\text{m}$)

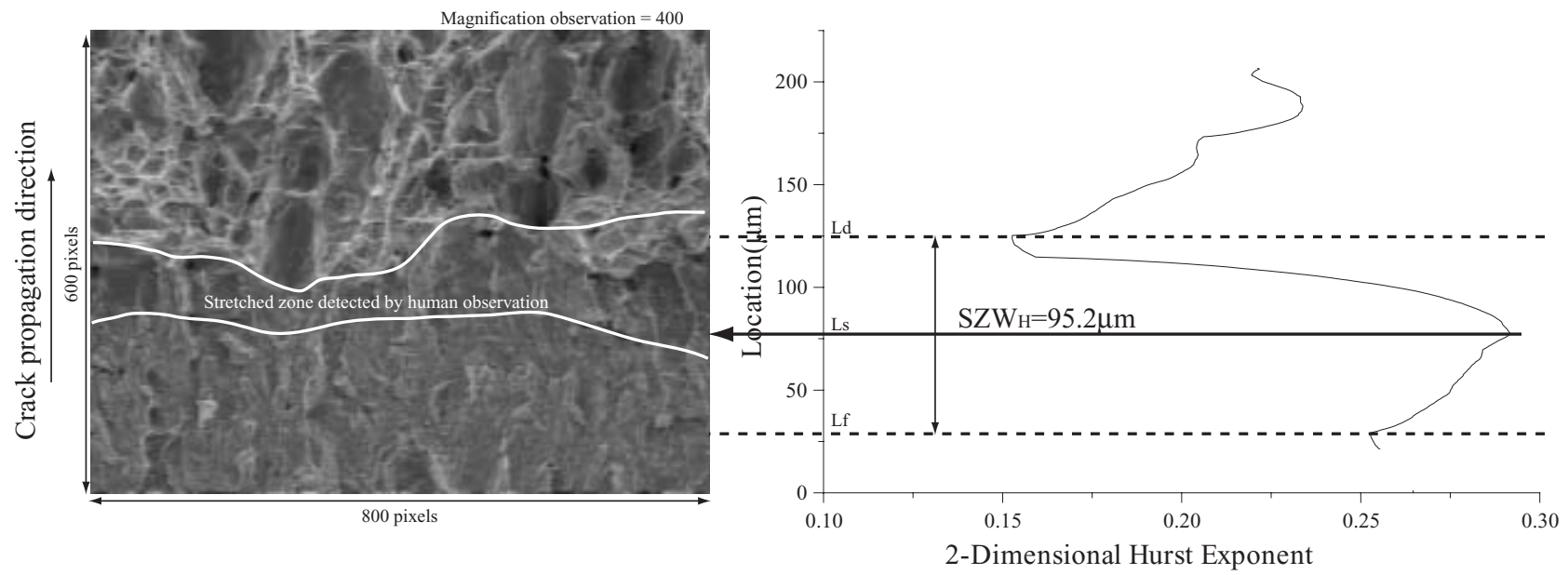


Fig. 4.39: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 4 case 1 $w=18\mu\text{m}$)

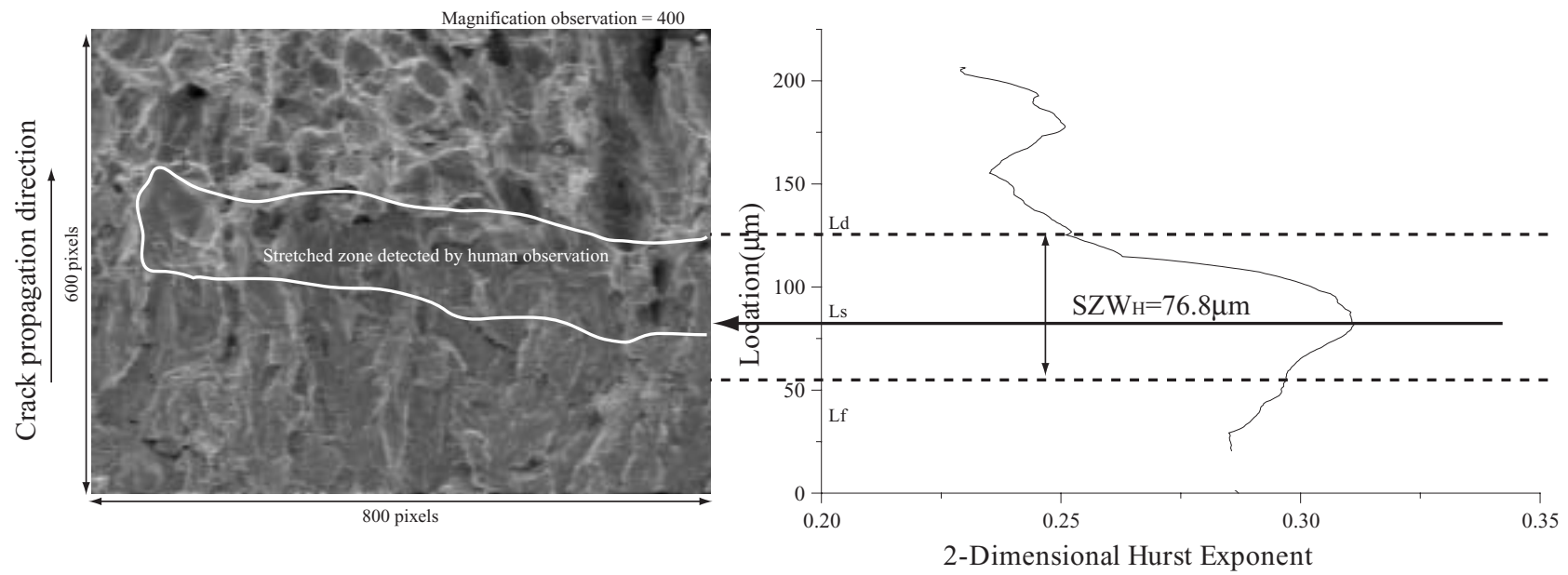


Fig. 4.40: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 4 case 2 $w=18\mu\text{m}$)

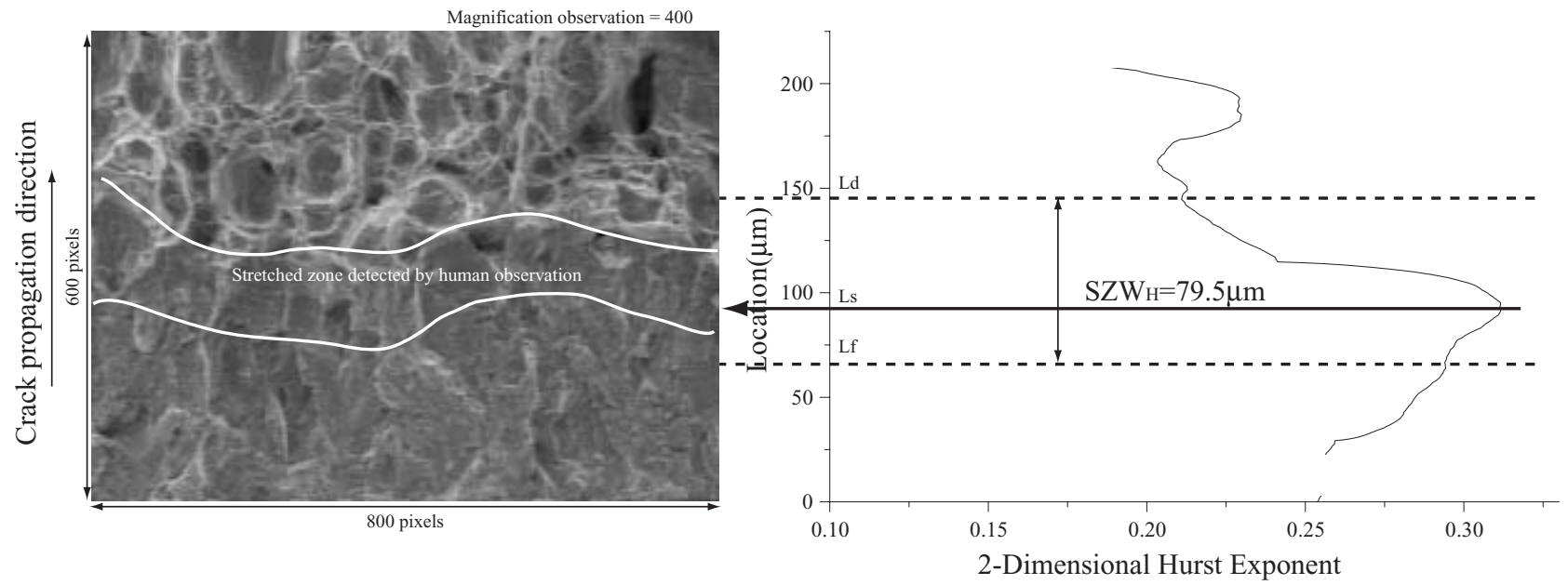


Fig. 4.41: Result of detection of stretched zone by proposed method (broken line) and human observation (white line). (試験片 4 case 3 $w=18\mu\text{m}$)

4.4 考察

提案手法により評価されたストレッチゾーンの領域の画像内における位置とSZWに関して考察を行う．領域の位置に関しては目視により計測されたストレッチゾーンの領域の位置と比較対応することで妥当性を評価する．また，SZWに関しては，J値との相関により妥当性の評価を行う．

4.4.1 2次元局所 Hurst 数の分布に関する考察

Fig.4.18～4.29の延性破面側と疲労破面側の2次元局所 Hurst 数を比較すると，疲労破面側の2次元局所 Hurst 数が大きいことがわかる．これは一般に疲労破面は延性破面と比較して平坦である¹⁹ことから，延性破面と比較して疲労破面が平坦であることを2次元局所 Hurst 数が反映していることを示している．疲労破面の領域では，特に Fig.4.25に観察されるように，疲労破面右側は大きな割れとストライエーションの混在する領域で形状が複雑であるため，2次元局所 Hurst 数が小さい値である．これに対して，中央部は大きなわれが無く，ストライエーションのみ観察され平坦な領域であり，2次元局所 Hurst 数は大きい値である．従って，2次元局所 Hurst 数が延性破面・疲労破面の比較の上では，平坦な疲労破面側の特徴を表すことができ，また，疲労破面領域内においても，われ等の構造があり複雑な形状と，ストライエーションのみの平坦な形状の領域の特徴を示していると考えられる．

また，延性破面領域で2次元局所 Hurst 数が大きい領域は，ディンプルの底に対応していることがわかる．特に，Fig.4.19,4.20,4.21,4.22,4.27,4.29に観察される．これはディンプルの底は深く，2次元電子が出てこないことから，SEM像では平坦な像として映るからである．また，特にディンプルのサイズが大きいものについて，2次元局所 Hurst 数は大きくなる．Fig.4.21の左上部に残る白い領域は，破面画像に観察される大きいディンプルに対応している．つまり大きいディンプルに関しては2次元局所 Hurst 数が大きく，小さいディンプルに関しては小さい値である．そして，破面観察上，小さいディンプルの集合は複雑な形状をしていて，大きなディンプルは平坦な形状をしていることから，2次元局所 Hurst 数が破面の複雑さと，位置を評価することに有効であるといえる．

次に，目視によりストレッチゾーンと判定された領域の2次元局所 Hurst 数について述べる．Fig.4.20の $H_{th} = 0.325$ ，Fig.4.22の $H_{th} = 0.25$ ，Fig.4.25の $H_{th} = 0.275$ においては，目視により判断されたストレッチゾーン領域と対応する領域の2次元局所 Hurst 数が大きいことがわかる．それ以外の破面に関しても，ストレッチゾーン周辺において，横方向に平均的に白い領域が観察されることから，ストレッチゾーンの周辺においては2次元局所 Hurst 数が大きい領域が存在していることがわかる．一方，延性・疲労破面領域に関しては，横方向に平均的に2次元局所 Hurst 数が大きい領域が存在しているわけではなく，縦横方向に平坦な領域においてのみ2次元局所 Hurst 数が大きい領域が存在している．また，これはストレッチ

ゾーンが平坦であり、横方向に帯状の領域であることを2次元局所 Hurst 数が反映していると言える。つまり、2次元局所 Hurst 数を用いてストレッチゾーンの幅を評価する為には、横方向へ平均化を行い、ストレッチゾーンの特徴を強調した上で評価する必要がある。平均化することにより、目視のように、ストレッチゾーンの幅を詳細に調べることはできないが、ストレッチゾーンの幅は詳細な幅の分布よりは、 J 値との対応においては、むしろ平均的な幅に意味があることから、本手法は平均的な幅が客観的に求まるという点で、有効であると考えられる。

4.4.2 目視により求めたストレッチゾーンと、2次元局所 Hurst 数により求めたストレッチゾーンの比較

次に、目視により求めたストレッチゾーンの領域と2次元局所 Hurst 数により求めたストレッチゾーンの比較について述べる。

Fig.4.30~4.38 ことから、提案手法にて判定されたストレッチゾーンの領域は、目視で判定されたストレッチゾーンの領域とよく重なっていることがわかる。 L_s は目視により判断したストレッチゾーンの中に含まれている。これは、Fig.4.30~4.38 の右側のグラフに示すように、ストレッチゾーンの領域での2次元局所 Hurst 数が他の領域と比較して大きくなっているからである。従って、Fig.4.5 にしめす解析モデルの妥当性を示すことができた。

次に、判定されたストレッチゾーンの境界の妥当性について述べる。 L_f, L_d の位置は、ストレッチゾーンに延性・疲労破面から遷移していく領域の境界と考えられることから、目視により決まった領域と一致はしないが、近い範囲で一致している必要がある。

目視判断のストレッチゾーンの領域と特に試験片 1 case2(Fig.4.31), 試験片 2 case1(Fig.4.33), 試験片 2 case2(Fig.4.34), 試験片 4 case1(Fig.4.39), 試験片 4 case2(Fig.4.40) では、ストレッチゾーンと延性破面の境界の決定結果によい一致が見られている。しかしながら、全体の傾向として、ストレッチゾーンと疲労破面の境界においてよい一致が見られなかった。つまり、延性破面とストレッチゾーンの境界は目視とよく対応するが、疲労破面とストレッチゾーンの境界は対応しにくい場合があると言える。

実際、目視によりストレッチゾーンの境界を決定する際に、ストレッチゾーンと延性破面側の境界は比較的決定が容易であった。これに対して、ストレッチゾーンと疲労破面側は境界が明瞭でなく、決定が困難であった。つまり、目視による計測においても、ストレッチゾーンと疲労破面の境界には任意性が入りやすいといえる。その原因について述べる。

ディンプルの深さを計測した駒井らの研究¹⁹⁾によると、ディンプルの深さは数 μm である。また、画像から判別できるようにディンプルの大きさは数十 μm である。これに対し、ストライエーションの高さを計測した古川らの研究⁵⁵⁾によると数百 nm であり、ストライエーションの間隔は実験段階で疲労予き裂を $\Delta K = 10 MPa\sqrt{m}$ と小さい値で導入していることから数十 nm である。つまり、疲労破面は、延性破

面と比較して非常に小さい構造で形成されている。従って、疲労破面側の境界のほうが延性破面側の境界と比較して精度が良く検出できなかったと考えられる。

また、目視により求めた SZW と、2次元局所 Hurst 数により求めた SZW の比較について述べる。Table.4.2によると、試験片 4 に関しては平均の差が $1.1\mu\text{m}$ で、良く求まっていると言える。その他の試験片に関しても、平均の差が $5\mu\text{m}$ 程度で求まっていることから、提案手法により評価された SZW は目視により求めた SZW を満たすものであると考えられる。

以上のことから、Fig.4.5 に示す解析モデルがストレッチゾーンの領域決定において有効であることが示せた。特にストレッチゾーンと延性破面の境界により一致が見られる。また、疲労破面とストレッチゾーンの境界に関しては、疲労破面側が平坦である時とストレッチゾーンが明瞭で無い場合において、決定された領域が目視の領域とは異なる場合がある。しかし、目視により判定されたストレッチゾーン領域と提案手法により判定された領域により相関があることから、提案手法により判定された領域を明示することで、解析初心者に対する支援の観点からは十分に有効であると考えられる。

4.4.3 SZW の評価

次に評価された SZW の妥当性について考察する。

SZW と J_{Ic} の相関については、次式が報告されている⁶³。

$$SZW = \frac{CJ}{E} \quad (4.24)$$

ここで、 C は定数であり、平均値は 89 である。また、90%信頼限界に対する偏差は $54.7 \leq C \leq 143$ である。 E はヤング率 (GPa) で、 J の単位は kJ/m^2 である。STPG のヤング率は 191.0GPa ⁷⁷ を用いた。

本論文で提案した手法により評価された SZW と、実験により得られた J_{Ic} の関係と、式 (4.24) を用いて SZW の妥当性について考察を行う。また、比較のため 1次元局所 Hurst 数を用いて求めた SZW と、高梨らの提案する⁸ あらさを使って求めた SZW の値について Table.4.3 にまとめる。

Fig.4.42 は、Table.4.2,4.3 と式 (4.24) をプロットしたものである。横軸と縦軸はそれぞれ、 $J(\text{kJ}/\text{m}^2)$ と $SZW(\mu\text{m})$ である。図中の \square は提案手法により求めた平均値、 \circ は目視により求めた SZW の平均値、 \triangle はあらさにより求めた SZW の平均値を示す。また、エラーバーによりばらつきの範囲を示す。破線は 90%信頼限界を示す。

提案手法により求めた SZW に関して、2次元局所 Hurst 数を用いた場合は、平均値とばらつきはいずれも 90%信頼限界の範囲内に収まっている。従って、本手法で決定された SZW は精度よく計測できていると結論できる。

一方、Table.4.2 からわかるように、1次元局所 Hurst 数とあらさを用いた場合、SZW が求まらない場合もあった。また、1次元局所 Hurst 数においては、90%信頼

		2-Dimensional Hurst Exponent		Human observation	
		SZW	Average	SZW	Average
SPECIMEN 1 $J=134.5(kJ/m^3)$	Case 1	45.9	43.4 ± 2.0	42.4	38.4 ± 3.0
	Case 2	41.1		37.5	
	Case 3	43.1		35.3	
SPECIMEN 2 $J=92.0(kJ/m^3)$	Case 1	35.4	47.3 ± 8.5	40.9	43.4 ± 1.8
	Case 2	51.6		45	
	Case 3	54.9		44.3	
SPECIMEN 3 $J=81.2(kJ/m^3)$	Case 1	35.3	33.2 ± 3.2	48.8	39.3 ± 7.7
	Case 2	28.7		39	
	Case 3	35.6		30	
SPECIMEN 4 $J=79.1(kJ/m^3)$	Case 1	47.6	42.0 ± 4.0	42.4	40.9 ± 1.9
	Case 2	38.4		42	
	Case 3	39.8		38.3	

Table. 4.2: Result of quantitative evaluation of SZW(μm) by 2-dimensional hurst exponent and human observation.

		1-Dimensional Hurst Exponent		Roughness ⁸	
		SZW	Average	SZW	Average
SPECIMEN 1	Case 1	×	95.7 ± 1.1	×	×
	Case 2	94.6		×	
	Case 3	96.7		×	
SPECIMEN 2	Case 1	94.6	99.9 ± 5.3	61.5	51.3 ± 9.7
	Case 2	×		38.3	
	Case 3	105.1		54.0	
SPECIMEN 3	Case 1	×	×	45.0	49.3 ± 3.4
	Case 2	×		53.3	
	Case 3	×		49.5	
SPECIMEN 4	Case 1	95.7	75.7 ± 20.0	40.5	39.5 ± 0.9
	Case 2	×		39.8	
	Case 3	55.7		38.3	

Table. 4.3: Result of quantitative evaluation of SZW(μm) by 1-dimensional hurst exponent and roughness.⁸

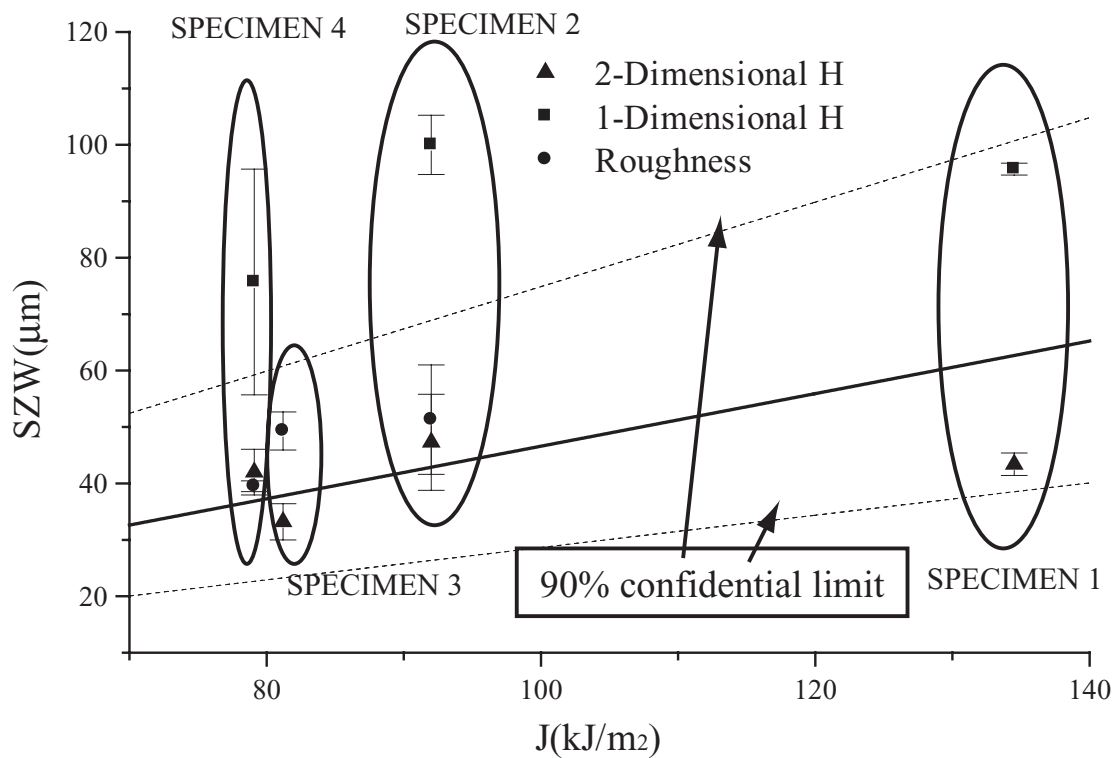


Fig. 4.42: Relationship between J-integral and stretched zone width. \triangle , \square and \bullet indicate SZW evaluated by proposed method, 1-dimensional hurst exponent, and roughness respectively.

限界の範囲内に SZW の平均が入らない (試験片 2,4) 場合もあり, SZW が精度良く求まらない. 従って局所 Hurst 数を用いてストレッチゾーンを決めるためには, 1次元プロファイルでは不十分であり, 2次元局所 Hurst 数を用いる必要があることがわかった. また, あらさを用いた場合, SZW は 90%信頼限界の範囲に入っているものの, 試験片 2,3 においては 2次元局所 Hurst 数のほうが太線に近いことから精度良く求まることがわかる. 試験片 1 においては SZW が求まらなかった. 以上のことから, 2次元局所 Hurst 数のほうが 1次元局所 Hurst 数やあらさと比較して精度良く SZW を検出できることがわかり, 2次元局所 Hurst 数の有効性が確認された.

このことから, 本手法を用いることにより, ストレッチゾーンが観察される破面においては, SZW を定量的に計測することが可能になり, 破断荷重の定量的な推定が可能になったと考えられる.

4.5 結言

本章では，破断面画像の局所性を周期性の観点から特性化する場合において，特に周期性が無い場合の局所性の特性化手法について提案した．その手法は，局所 Hurst 数を用いる手法である．特に本章では，従来の 1 次元局所 Hurst 数とは異なり，2 次元局所 Hurst 数を用いることで，面としての複雑さを評価することで，遷移領域の特性化を行う手法を提案した．提案した手法は，ストレッチゾーンの幅 (SZW) の評価に適用することで，手法の妥当性を検証した．

ストレッチゾーンの解析では，ストレッチゾーンが平坦であることに着目し，局所 Hurst 数が大きくなる領域を決定することで，ストレッチゾーンの幅を解析した．その結果，目視により求まるストレッチゾーン幅とよい一致を見ることができ，手法が有効であることが示せた．

また，破面の遷移領域を求める解析で有名なものにシャルピー衝撃試験片の脆性破面率の解析¹⁴がある．2 次元局所 Hurst 数は，シャルピー衝撃試験片の脆性延性遷移領域を同定することも可能であると考えられる．解析を行った例を，付録 E にまとめる．

第5章 フラクタル次元と観察倍率による破壊に支配的な大きさの評価手法

5.1 緒言

破面の電子顕微鏡像の数値化を行い定量的に解析する手法に、フラクタル解析がある。フラクタル幾何学の概念を破面の形状に適用することにより破断面の特性化を行う手法である。金属破断面は、幾何学的に厳密にはフラクタル図形では無いが、観察する範囲を限定することによりフラクタル図形に近い形をしていることが、1984年 Mandelbrot により指摘されており²⁷、破断面特性化の指標としてのフラクタル解析の有効性が指摘されている。

それ以降種々の研究が行われ、多くの試みがなされてきた^{7,30,40,48-50}。フラクタル解析はフラクタル次元を用いて破断面の複雑さを定量化する手法である。フラクタル次元は、本来形状が自己相似性を持つ場合に、形状の複雑さを一般的に表現するために意味のある量である。しかし、金属破断面の場合には、全ての観察倍率に渡って形状が自己相似性を持つわけではない。従って、フラクタル次元のみに着目した場合の破壊機構の特性化は困難とされてきた⁵⁰。しかし、フラクタル次元を算出する際に必要とする倍率・解析範囲等の条件を限定することにより、破面の形状がフラクタルと類似の性質を示し、また算出されたフラクタル次元に統計的解析を用いる事により、破壊機構の特性化を行うことが可能であることは多くの事例で示されている^{31,78,79}。

本章では、破面のフラクタル次元の統計的性質を調べることや破面の観察倍率とフラクタル次元の関係を調べることにより、破面の特性化を行う可能性を検討する。その中で、フラクタル解析が有効となる新たな解析法を提案する。高温域での破壊機構の解明が重要である TiAl 合金に対して提案法を適用し、その有効性を検証する。

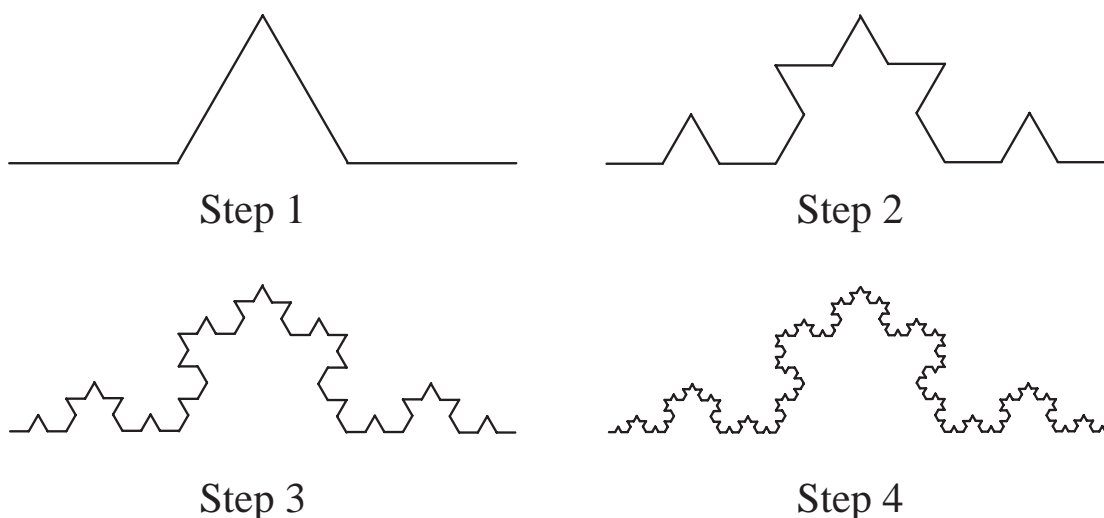


Fig. 5.1: Koch curve

5.2 フラクタル解析

5.2.1 フラクタルの定義

自然界に存在する物の形状は，おおまかに分類すると2種類に分類する事が可能である．それは，特徴的な長さを持つ形状と特徴的な長さを持たない形状という分類方法である．特徴的長さと言うのは，対象とする物の形状を語る上でその物が持つ大きさの中で代表的な長さの事である．例えば，球であれば直径や半径が特徴的な長さである．特徴的な長さを持つ形状と言うのは，一般的に幾何学的に単純な形状を用いて近似する事により，その形状を構成する事が可能な形状である．一方，特徴的な長さを持たない形状と呼ばれる物は，幾何学的に単純な形状を用いることにより近似することが非常に困難な形状の物である．具体的には雲や，海岸線等が挙げられる．フラクタルとは，特徴的な長さを持たない形状や構造・現象の総称である．フラクタルという言葉自体は，Mandelbrotがラテン語の fractus(こわれた) という言葉から造った造語である．また，特徴長を持たない図形は，自己相似性を持つ．自己相似性とは，対象としている図形の一部が，全体と同じような形になっている図形の事である．さらに，自己相似性を持つ形状の特徴としては，縮尺に関わらず，同様の図形が観察されること，連続であるにも関わらず，あらゆる位置で微分不可能の曲線であることが挙げられる．

5.2.2 フラクタルの例

幾何学におけるフラクタルの具体的な例を挙げる．

Fig5.1はコッホ曲線と呼ばれる曲線である．フラクタル図形の代表例である．各ステップ毎を見てみると， i 番目のステップは $i - 1$ 番目のステップを4箇所含ん

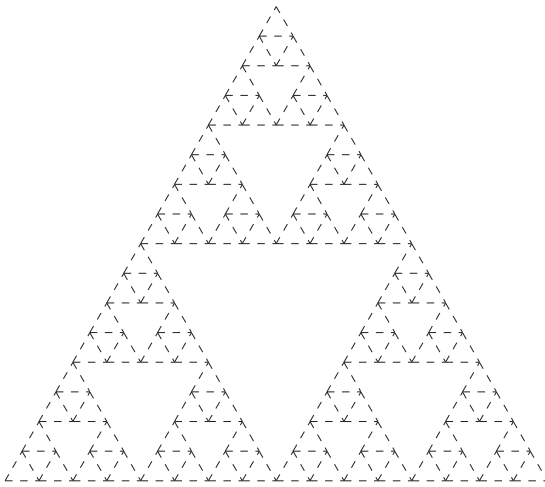


Fig. 5.2: Sierpinski gasket

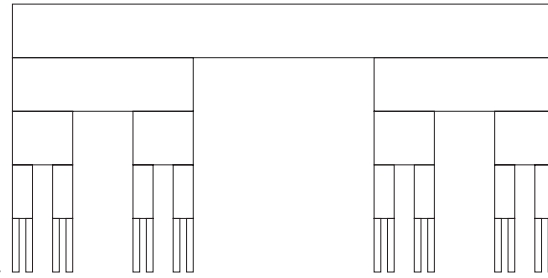


Fig. 5.3: Cantor curtains

でいる事がわかる．これを繰り返す事により生成される図形は，任意の場所において切り取られた図形は全体と相似形にあることがわかる．さらに，このステップを無限に繰り返すことにより，連続かつ微分不可能な曲線を作成する事が可能になる事がわかる．その他，フラクタルを表す代表的な図形を Fig.5.2,5.3 に示す．

5.2.3 金属破断面のフラクタル解析方法

フラクタル解析では，2.2 で述べたフラクタル次元を用いて図形の複雑さを定量的に評価する．金属破断面のフラクタル次元の計算方法には主に 3 種類ある．

1. スリットアイランド法
2. 垂直断面を解析して求める方法
3. プロファイルのフーリエ解析から求める方法

それぞれについて簡単に説明する．

スリットアイランド法⁷

破面を平行な平面でカットし表れる島の形状の周囲の長さ P とその島の面積 S を両対数グラフにプロットしていく．このプロットした点を最小 2 乗近似して求めた傾きからフラクタル次元を求めることができる．

フラクタル次元 F_d は

$$F_d = \text{slope} + 1 \quad (5.1)$$

の関係式が成り立ち，この式からフラクタル次元を求めることができる．一般にこの解析はベークライトなどで型どりしたものを，小さな島が出てくるまで削り，その部分を写真などにとってイメージ処理して解析する．

垂直断面を解析して求める方法²⁷

破面の垂直断面に現れる高さ曲線のことをプロフィールと言う。この方法は、プロフィールの長さ L と測定するスケールの関係を求めるものである。プロフィールの長さ L と測定スケールの ϵ の関係はフラクタルパワー則に従う²⁷。

$$L(\epsilon) = C_0 \epsilon^{-(F_d-1)} \quad (5.2)$$

プロフィールの長さではなく粗さの指標である $R_L(\epsilon) = \frac{L(\epsilon)}{L'}$ を用いて表すことがある。ここで、 L' はプロフィールを破面に平行な面に投影した長さである。

この粗さの指標を用いると

$$R_L(\epsilon) = C \epsilon^{-(F_d-1)} \quad (5.3)$$

という関係がある。この $F_d - 1$ の値は $\log L$ と $\log \epsilon$ あるいは $\log R_L$ と $\log \epsilon$ をプロットしてその傾きを求めることで得られる。

また、このプロフィールの粗さの指標 R_L と、表面粗さ R_s の関係は次式のようになる。

$$R_s = \frac{4}{\pi}(R_L - 1) + 1 \quad (5.4)$$

ここで、表面粗さの指標 R_s は、測定した表面積の投影した面積に対する割合である。

プロフィールのフーリエ解析から求める方法⁷

プロフィールについてフーリエ解析しそのスペクトル S と周波数 f の関係が 5.5 で表されることがある。

$$S(f) \propto f^{-\beta} \quad (5.5)$$

スペクトルがこのようにべきの形をしている時に、べきの指数 β とフラクタル次元 d_f の間には以下の関係がある。

$$\beta = 5 - 2F_d \quad (5.6)$$

従って、スペクトルの傾きから、上式を使ってフラクタル次元を求めることができる。

以上の3種類が破断面のフラクタル次元の計算に用いられてきた手法である。これらの手法に共通なことは、観測量(例えば $L(\epsilon)$ と、基準長さ(ϵ)の関係がべき乗則であるとき、観測対象がフラクタル性を持つということである。従って、べき

乗則が成立しない場合は、フラクタル性が無く、この結果 F_d は計算されても、信頼性は低いと考えられる。また、従来の研究では、 ϵ に関して厳密な取り扱いが無く、狭い範囲での計算が主であった。つまり、フラクタル性の変化に着目はしていなかった。従って、破断面のスケールにおける局所性を評価するためには、 ϵ と観測量、もしくはフラクタル次元の関係を求める必要がある。金属破断面を解析する場合においては、 ϵ には、観察倍率等が考えられる。観測量には、破断面の面積やプロファイルの長さが考えられる。

5.3 観察スケールとフラクタル次元を用いた解析手法の提案

5.3.1 破面のフラクタル性

破面の形状は巨視的に観察した場合には、観察倍率に関わらず複雑かつ似た形状が観察される為、フラクタル性を持つ図形であるといえることができる。しかし、電子顕微鏡等を用いて破面を微視的に観察をした場合には、破壊機構や材料の組成に依存して、ある観察倍率を境として、Fig.5.4 に示すように、単純な形状のみで構成された形状が現れてくる。従って、ナノメートルからミリメートルにわたる広範囲のスケールにおいて、フラクタル図形的前提条件である観察倍率に依存しない自己相似性が成立するとは考えにくい。従って、フラクタル次元を破面解析に適用する際には観察倍率をファクターとして取り入れた上での検討が必要であると考えられる。

5.3.2 従来のフラクタル解析の問題点

従来のフラクタル解析は、電子顕微鏡等を使用し破面の凹凸形状を測定したデータを用いて解析を行うが、電子顕微鏡等の観察倍率については必ずしも厳密な取扱が行われていない^{6,7,33}。しかし、破面のフラクタル性を議論する時、特定の観察倍率の情報のみから議論することには以下の理由から疑問が残る。

フラクタル次元は一般的に、対象とする形状に対し粗視化の割合を変化させて計測することにより算出される⁷。これまでのフラクタル解析の中で、フラクタル次元の算出に用いる粗視化の範囲は、計測された形状データの離散データ間隔を d として、 $d \leq \eta \leq 10 \times d$ の範囲が、用いられてきた。そして、この範囲が非常に狭すぎて、自己相似性を持たないような図形(例えば円)とかに適用した場合においても、自己相似性が成立してしまう場合もあることは第2章の中で示した。一方で、電子顕微鏡は、 $\mu m \sim mm$ のオーダで観測することが可能である。つまり、特定の倍率の破面の形状測定を用いた場合、算出に利用される範囲は電子顕微鏡の持つ観察範囲の能力のごく限られた範囲でしか使われていないことになる。

破面をフラクタル性の観点から特性化するためには、幅広い範囲の η を用いて解析する必要がある。しかし、解像度の問題から、 d に対して、 $d/1000$ 程度の小さい η を適用して、フラクタル次元を計算することも、妥当ではない。なぜなら

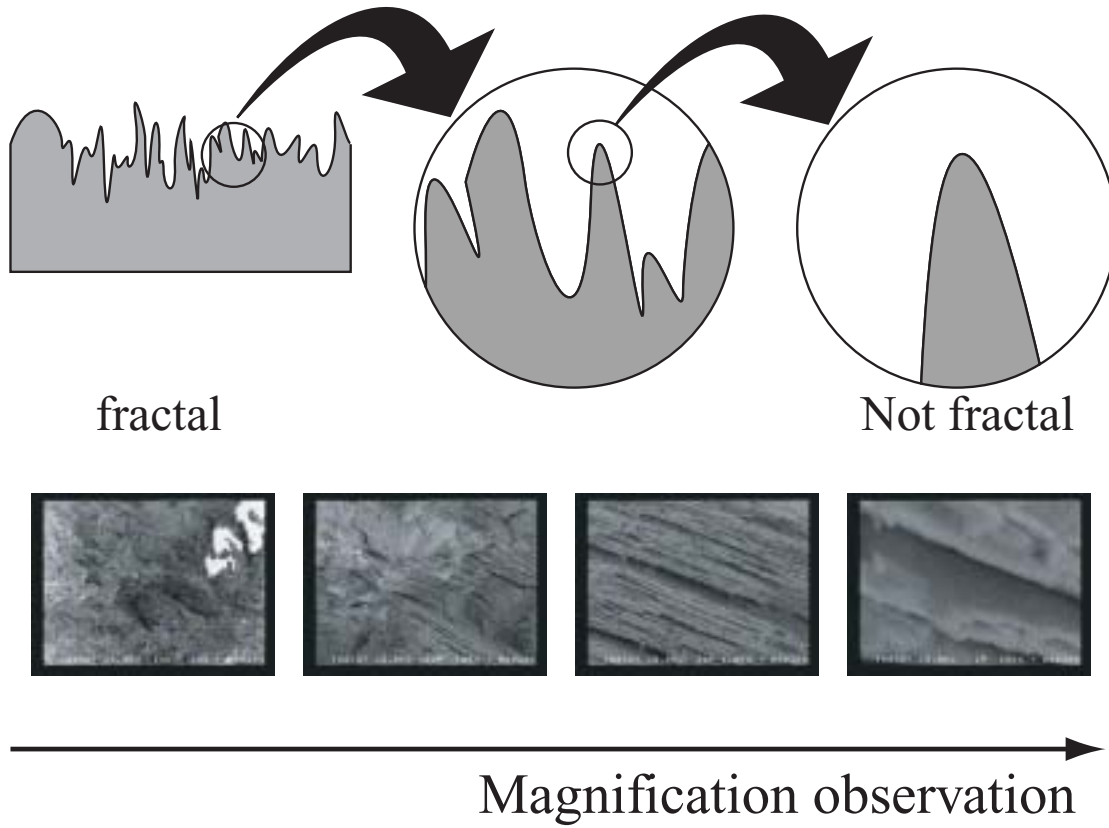


Fig. 5.4: Illustration of the fracture surface morphology at variout scales

ば、 d の間に含まれるさらにミクロな構造は離散化されたデータには反映されていないからである。従って、観察倍率を変化させ観察倍率とフラクタル次元の関係を求めることが、幅広い η を用いた解析を実現することになり、破面のフラクタル性を考える上では重要なことであると考え。また、本研究において、電子顕微鏡の各観察倍率における測定データの横幅の長さを破面を特性化する特徴量として考え、個々の観察倍率を代表するスケールとした。以下、各観察倍率での測定データの横幅を観察スケールと呼ぶ。

5.3.3 破断面のスケールに関する局所性を評価する手法

観察スケールとフラクタル次元の関係を Fig.5.5 に模式的に示す。観察スケールが巨視的である時は観察される形状が似通った形状であるため、フラクタル次元は破面の特徴量に対応する固有の値に収束することが予想される (AB 間)。また、観察スケールを微視領域に遷移させるにつれ、Fig.5.4 に示すように形状が単純になるため、フラクタル次元は観察スケールが大きい場合のフラクタル次元よりも小さくなることが予想される (BC 間)。フラクタル次元が一定値であるところから小さく遷移する観察スケール (B) は、破面の特徴的な形状をとらえた観察スケールであると考えた。B 点の観察スケールを破面の特徴量として考えることにより、異なる形状を持つ破面の特徴を抽出することが本手法の特徴である。

本研究では、フラクタル次元の計算に、破断面の 3 次元形状を使用した。破断面の 3 次元形状測定には、ステレオマッチングを利用した方法^{15, 28, 41, 44, 52}や 2 次電子積分法^{15, 16, 52}がある。3 次元形状測定には SEM の 2 次電子積分法を用いた。2 次電子積分法については、付録 B に詳細を述べる。ステレオマッチングによる方法では、3 次元像が詳細にかつリアルに構築できるが、その反面、画像を 2 枚用意しなければならないことと mismatching に関する問題が指摘されている⁵²。2 次電子積分法では、簡易に 3 次元形状が測定できる反面、2 電子像を積分することから、形状が平滑化されてしまうことと、傾斜角が 70° を超えた場合において、誤差が生じることが指摘されている。本研究では、観察倍率を変更して破断面の 3 次元形状を測定する都合上、大量の回数の測定が必要であることから、簡易的に形状の求まる 2 次電子積分法を用いた。

具体的な計算方法のフローチャートを Fig.5.6 に示す。

まず、SEM を使い、低倍率の元で破断面の観察を行う。次に、SEM の 3 次元形状測定機能を使って、3 次元形状を取得する。次に、3 次元形状をパーソナルコンピュータ上に表示して、SEM のモニター上との対応を確認する。これには、3 次元形状が正確に測定できているか否かを目視程度ではあるが確認の意味がある。そして、正確に測定できていたならば、3 次元形状から計算機を用いてフラクタル次元を計算する。また、観察倍率を変更し、同様の処理を行う。これを繰り返すことで、観察倍率 (観察スケール) と、フラクタル次元の関係が求まり、破面に特徴的な長さを求めることが可能になると考えられる。

このように、従来のように特定の倍率のみからフラクタル次元を定量化するの

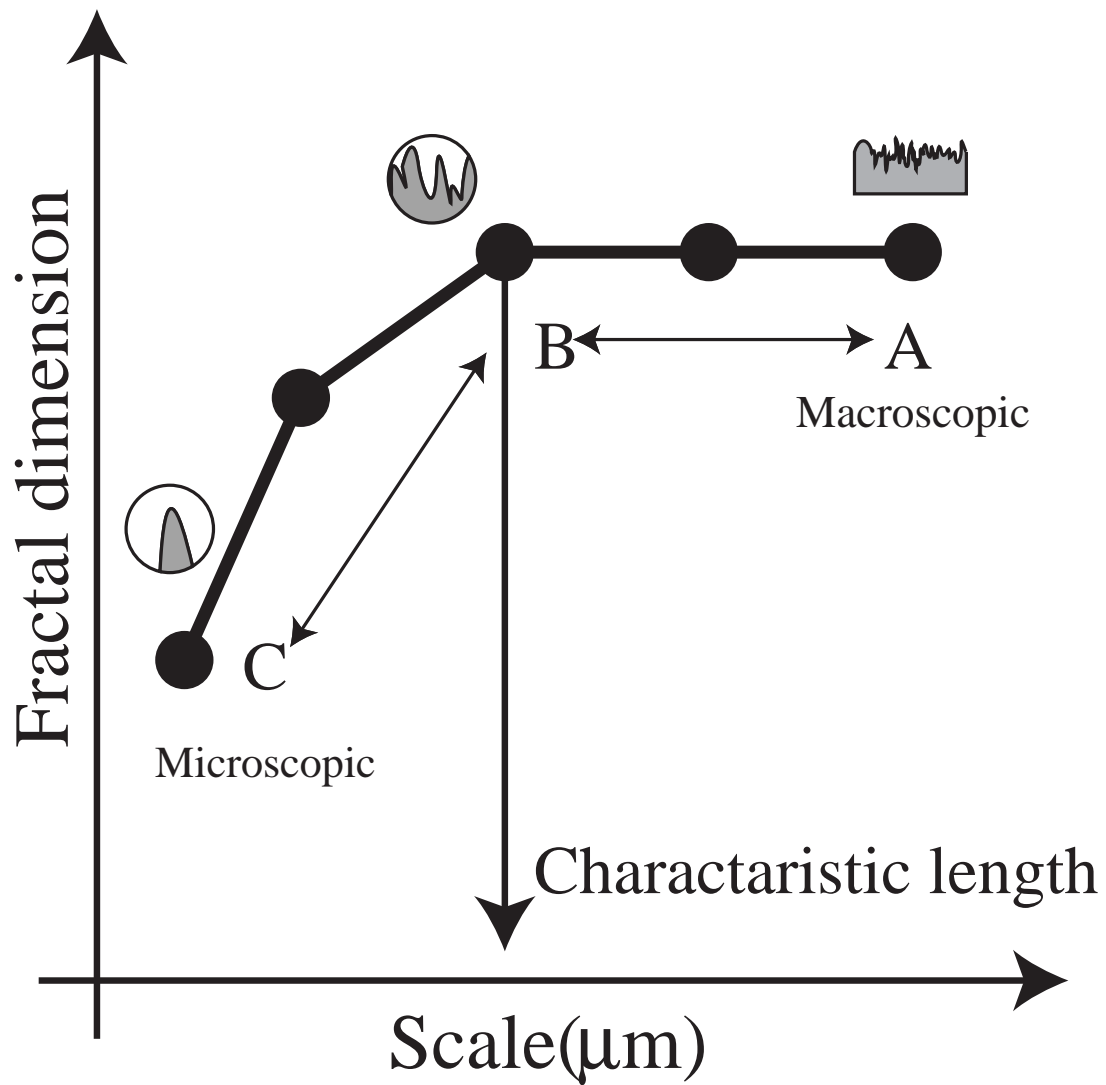


Fig. 5.5: The relationship between fractal dimension and observation scale

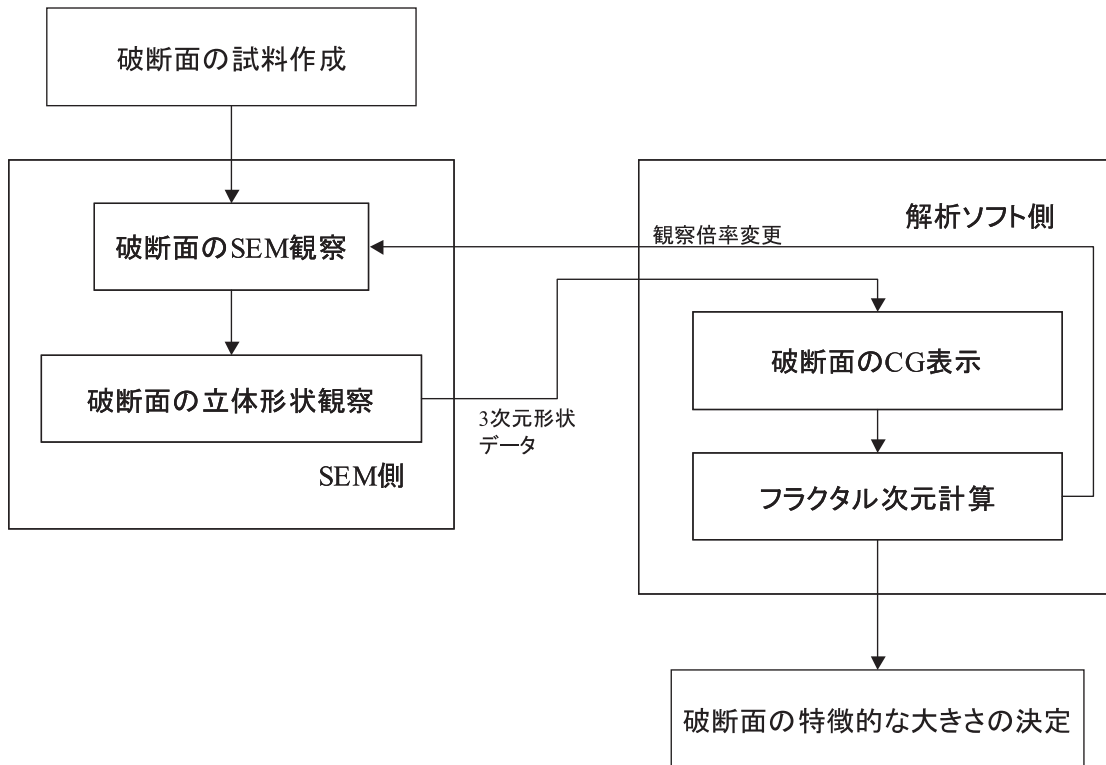


Fig. 5.6: 観察倍率とフラクタル次元の関係を求めるフローチャート

でなく，フラクタル次元と観察倍率の関係を詳細に調べていくことで破面のスケールにおける局所的な性質を検討する．またフラクタル次元と観察倍率の関係から破面形状の特徴的な形状を求めるというフラクタル解析の一手法を提案する．最後に，実破面に適用することにより，手法の妥当性を検討する．

5.4 試験片・装置

本研究に用いた破面・破面観察に用いる実験装置について述べる．

5.4.1 三次元解析機能付き走査型電子顕微鏡

本研究に用いた走査型電子顕微鏡 (SEM) は，エリオニクス社製 ERA-4000 である．SEM の概観を Fig.5.7 に示す．

ERA-4000 の仕様に関しては付録 C に述べる．電子顕微鏡は，通常の 2 次電子像の観察機能に加えて，表面形状解析のための機能を有している．破断面の形状測定は，ERA-4000 を用いて行った．



Fig. 5.7: The photography of Elionix SEM device

Table. 5.1: Chemical composition(wt%)

Al	Ti	C	Si	Mn	V
33.4	Bal.	0.008	0.01	0.01	<0.01
Fe	Ni	Cu	Nb	Cr	[O]
0.04	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.029
[N]	[H]				
0.002	0.0006				

Table. 5.2: クリープ・クリープ疲労試験条件

Test piece	DEN		CT	
	Creep	Creep fatigue	Creep	Creep
Temp(°C)	850	850	800	850
Stress(Mpa)	87.75	87.75	87.75	87.75
Frequency	-	0.05	-	-
Wave form	-	∧	-	-

5.4.2 TiAl 金属間化合物破面

本研究の破面解析には近年，高温域における破壊機構の解明が求められている TiAl 金属間化合物を用いた．TiAl は，粒径 $10 \sim 40 \mu\text{m}$ の等軸粒から構成される複相組織と，板状要素から構成され粒径は $0.3 \sim 1.5 \text{mm}$ 程度の大きさであるラメラ組織を持つ種類に大別される．本論文ではラメラ組織を有するものを用いた．TiAl 試験片の化学成分を Table5.1 に示す。

試験片の形状を Fig5.8,5.9 に示す。本研究に使用した破面を作成する破壊試験では、平板 DEN 試験片と CT 試験片を用いている。DEN 試験片は、温度 850°C 、応力 87.75MPa 、繰返し速度 0.05Hz の疲労試験および同温、同応力でクリープ試験を行なっている。試験後の試験片の写真を Fig5.10,5.11 に示す。CT 試験片は、温度 800°C 、荷重 17.0kN の力でクリープ試験および温度 850°C 、同応力でクリープ試験を行っている。試験後の試験片の写真を Fig5.12,5.13 に示す。破壊試験の条件をまとめたものを Table5.2 に示す⁸⁰。なおこの破壊試験は、東北大学工学部横堀研究室において行われた。

DEN 試験片の破面全体の様子を Fig5.14,5.15 に示す。CT 試験片の破面全体の様子を Fig5.16,5.17 に示す。

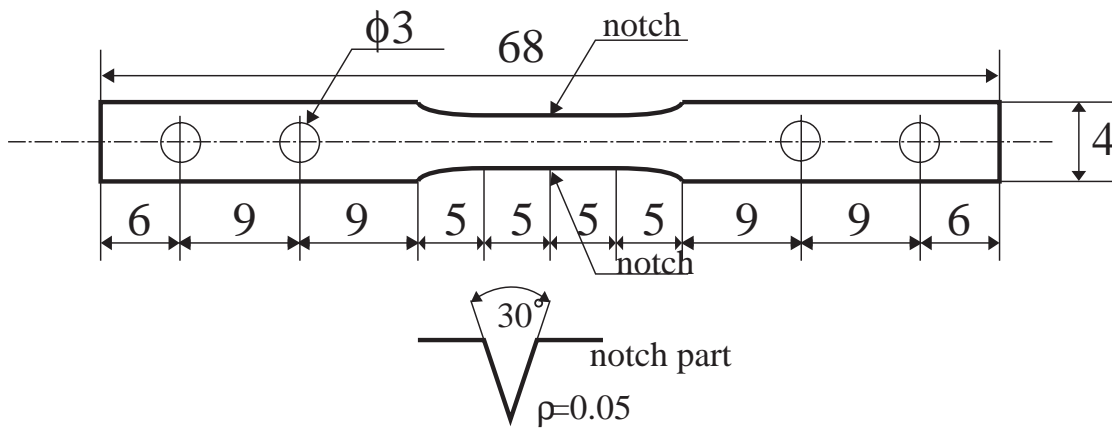


Fig. 5.8: Test piece of DEN

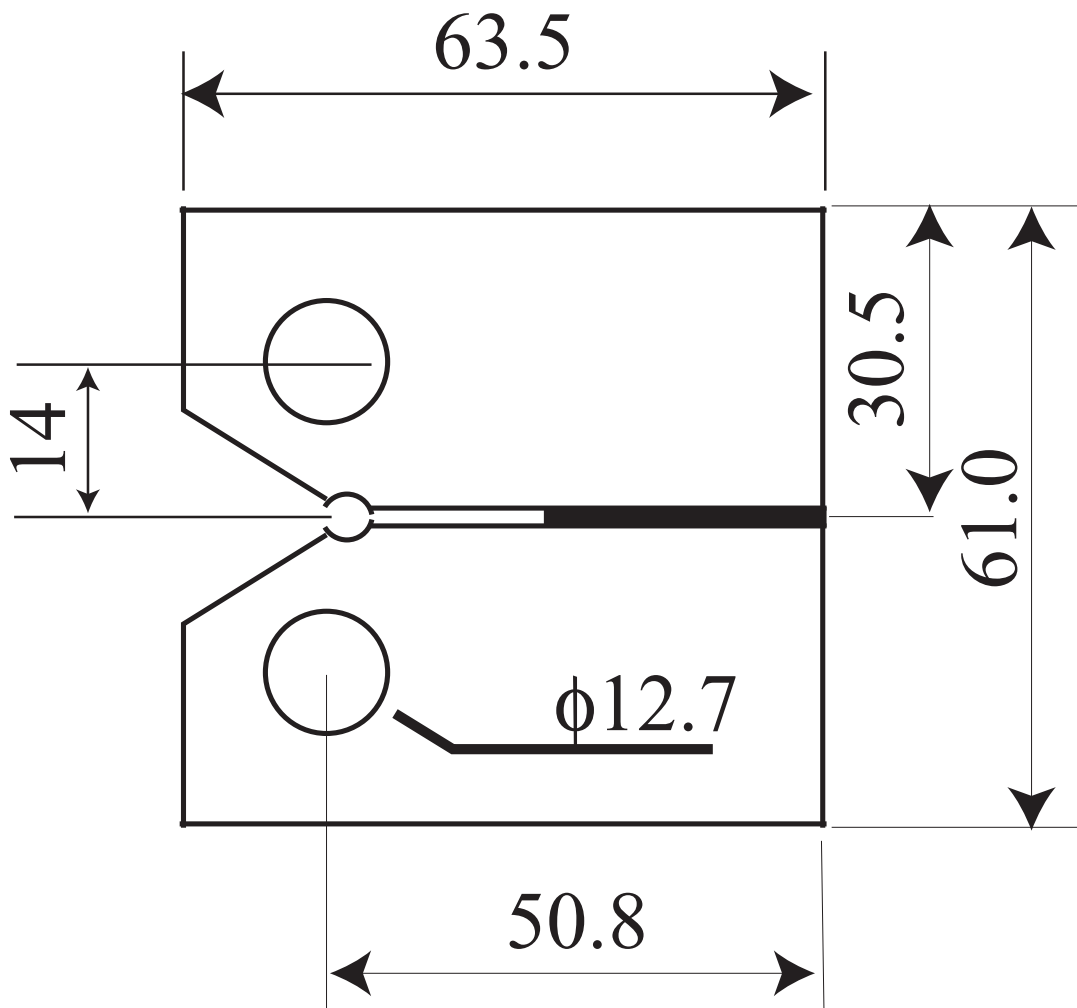


Fig. 5.9: Test piece of CT



Fig. 5.10: Appearance of test piece of DEN (Creep)



Fig. 5.11: Appearance of test piece of DEN (Creep fatigue)

破壊試験の結果，観察により 3 種類の特徴的な破面の形状があることがわかっている⁸⁰．3 種類の破面形状の破壊モデルと観察倍率 1000 倍の時の破面の写真を Fig.5.18～Fig.5.20 に示す．

3 種類の破面形状と破壊機構について述べる⁸⁰．

1. クリープ破面における粒界破壊 (Fig.5.18)：ラメラ粒の粒界に沿って破壊が進展している．クリープ破面の破壊初期の部分に見られる破壊形態である．破面形状の特徴的な長さは，ラメラ粒のサイズである $300\mu\text{m}$ が考えられる．
2. クリープ破面における粒内破壊 (Fig.5.19)：ラメラ粒の粒界やラメラ粒内部の層状組織に依存せず破壊が進展している．クリープ破面の破壊後期の部分に見られる破壊形態である．破面形状の特徴的な長さは，ラメラ粒のサイズである $300\mu\text{m}$ と層状組織の厚みである $5\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ が考えられる．



Fig. 5.12: Appearance of test piece of CT (800°C)



Fig. 5.13: Appearance of test piece of CT (850°C)

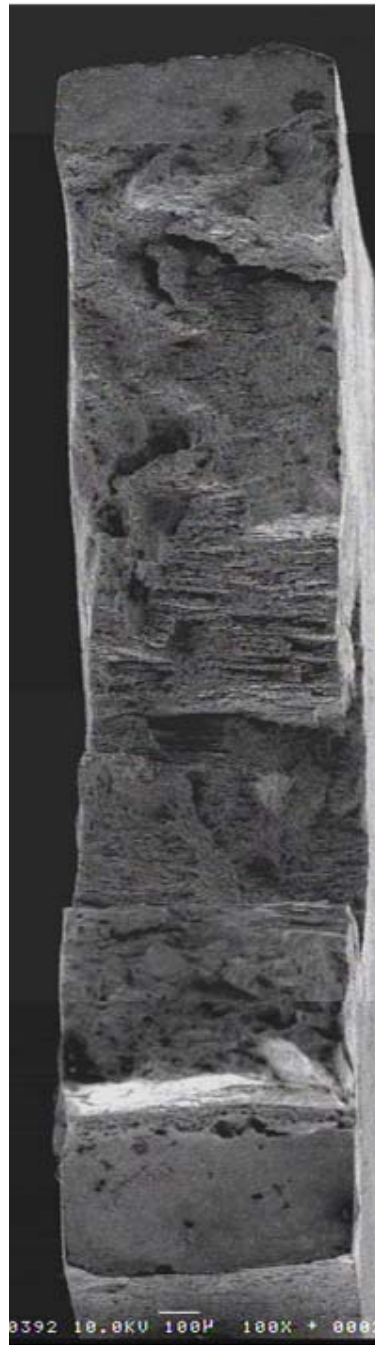


Fig. 5.14: Creep fracture surface of test piece of DEN



Fig. 5.15: Creep fatigue fracture surface of test piece of DEN

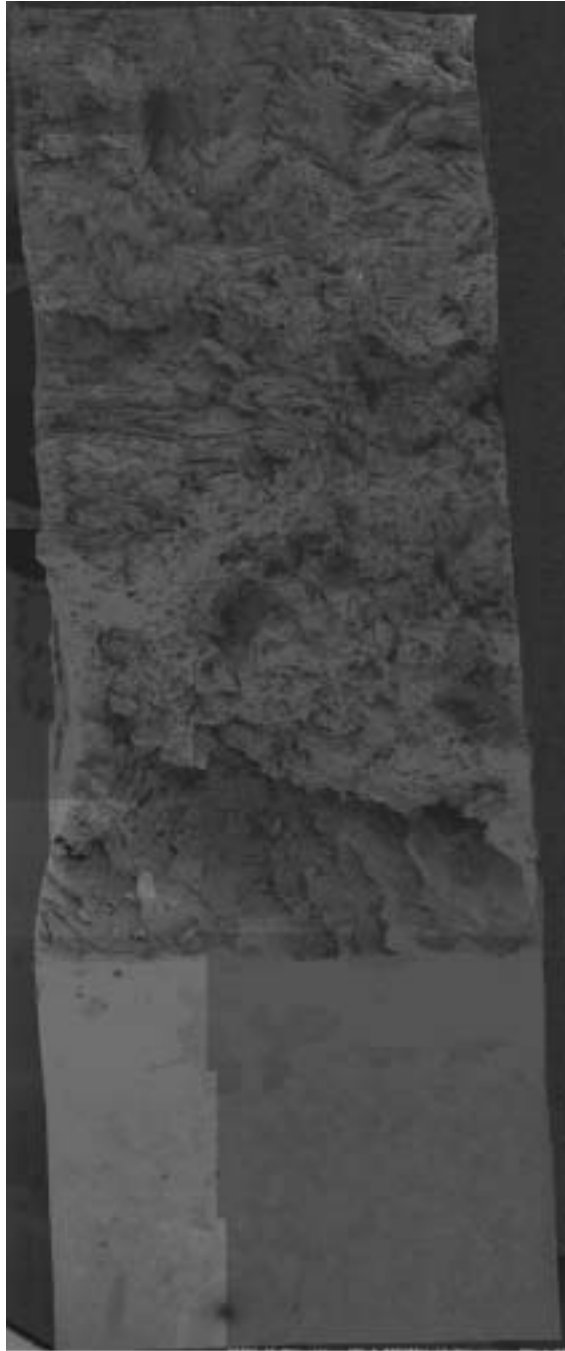


Fig. 5.16: Creep fracture surface of test piece of CT (800°C)



Fig. 5.17: Creep fatigue fracture surface of test piece of CT (850°C)

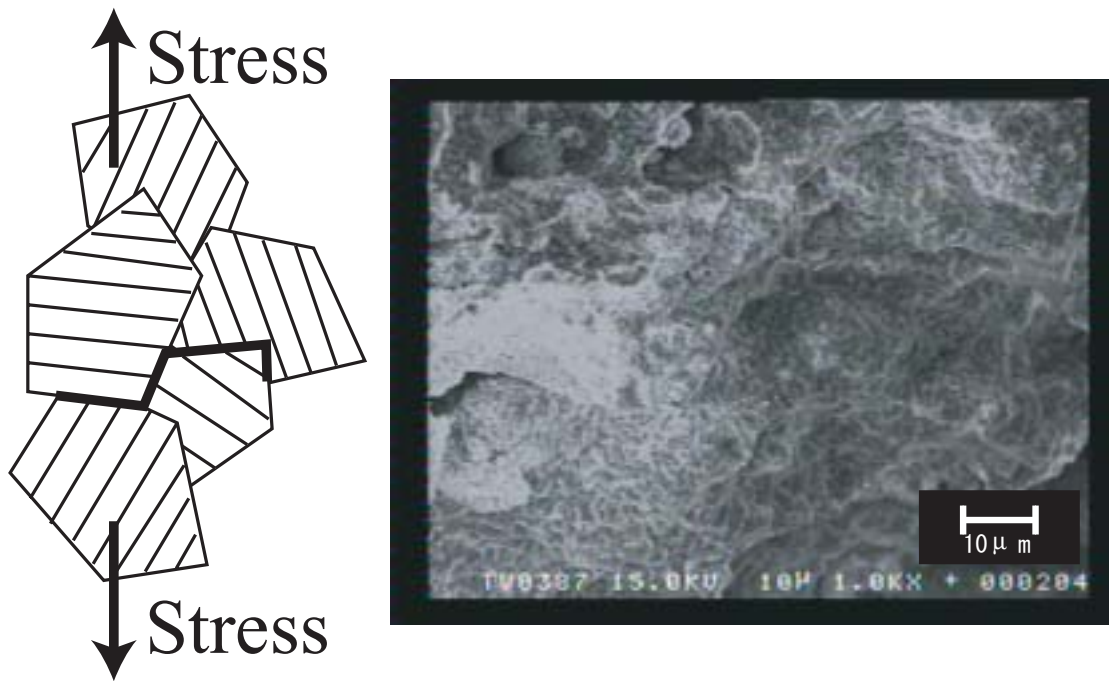


Fig. 5.18: Illustration of the fracture model of TiAl intergranular fracture.(left) The photograph of the fracture surface of TiAl intergranular fracture. ($\times 1000$) (right)

3. クリープ疲労破面における粒内破壊 (Fig.5.20)：ラメラ粒の中の層状組織の表面に沿って破壊が進展している．クリープ疲労破面の全体に見られる破壊形態である．破面形状の特徴的な長さは，ラメラ粒のサイズである $300\mu\text{m}$ が考えられる．

本研究は，3種類の破面形状に対して，1と2については観察倍率25倍～10000倍まで観察を行い，測定した．3については，クリープ疲労破面は試験片の形状が薄く観察倍率300倍より大きな倍率では十分な数の破面の形状が測定できなかった為，観察倍率300倍～10000倍までの観察を行った．各倍率ごとに6破面の形状を測定した．

5.4.3 フラクタル次元算出法

フラクタル解析は破面のトポロジー情報からフラクタル次元を算出することにより破面の特性化を行う解析手法であり，破面のフラクタル次元の算出にはボックスカウンティング法と呼ばれる方法が一般的に用いられてきた²⁷．

ボックスカウンティング法の原理図を，Fig.5.21に示す．ボックスカウンティング法とは，実線で示す破面の形状に対して，大きさ η の正方形のボックスを作成し，破面の形状が通過するボックスの数を数える方法である⁷．ボックスの数を $N(\eta)$ とおき，式(5.7)が成立するとき， D がフラクタル次元として算出される．図式的

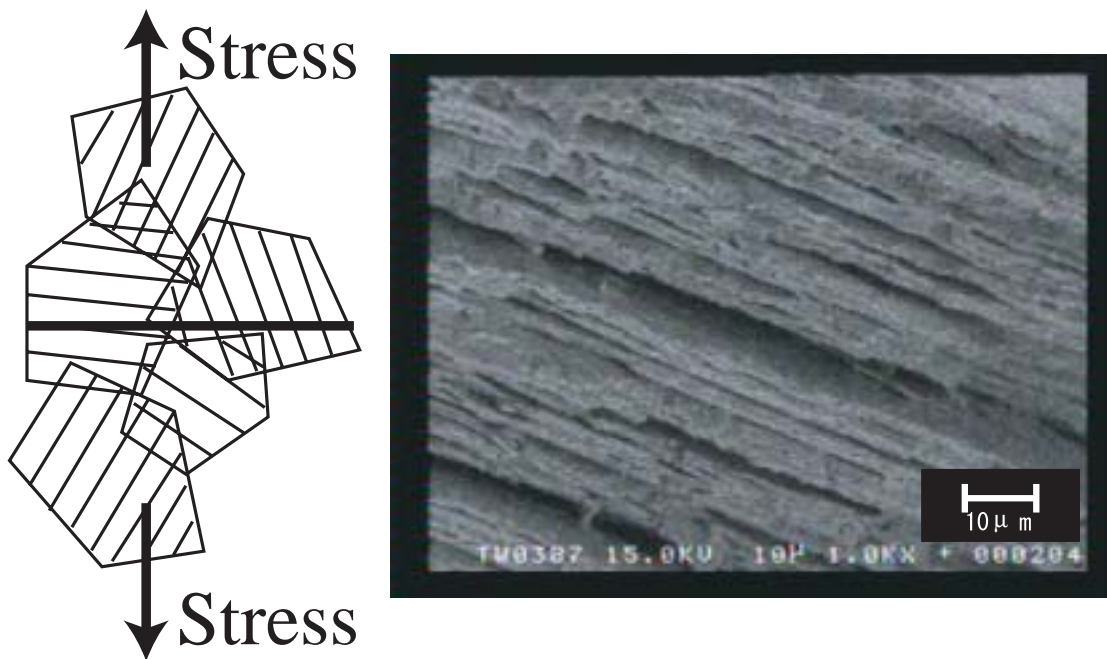


Fig. 5.19: Illustration of the fracture model of TiAl transgranular fracture.(left) The photography of the fracture surface of TiAl transgranular fracture ($\times 1000$). (right)

にはフラクタル次元は、横軸に η 、縦軸に $N(\eta)$ を取る両対数グラフ上にボックスカウンティング法の結果をプロットした点の最小二乗近似直線の傾きとして算出される。また、プロットされた点が直線に非常に近く並ぶ事は Richardson 効果と呼ばれ、フラクタル次元の算出には、Richardson 効果が確認できる η の範囲で行う。また、フラクタル次元の算出はボックスカウンティング法の概念を 3 次元に拡張して行った。従って、フラクタル次元 (F_d) は、曲面の複雑さを表す値であり、算出される F_d は平面と立体の間である $2 \leq F_d < 3$ の値である。

$$N(\eta) = C\eta^{-D} \quad (5.7)$$

5.5 解析結果と考察

5.5.1 ボックスカウンティング法実行結果

Fig.5.22 は、クリープ破面における粒界破壊と推測される箇所の複数の倍率における凹凸形状データにボックスカウンティング法を適用した時の、ボックスサイズ (η) とボックス数 ($N(\eta)$) の変化を示している。横軸が η であり、縦軸が $N(\eta)$ である。両軸共に対数尺を用いている。 η の範囲は破面形状データのサンプリング間隔

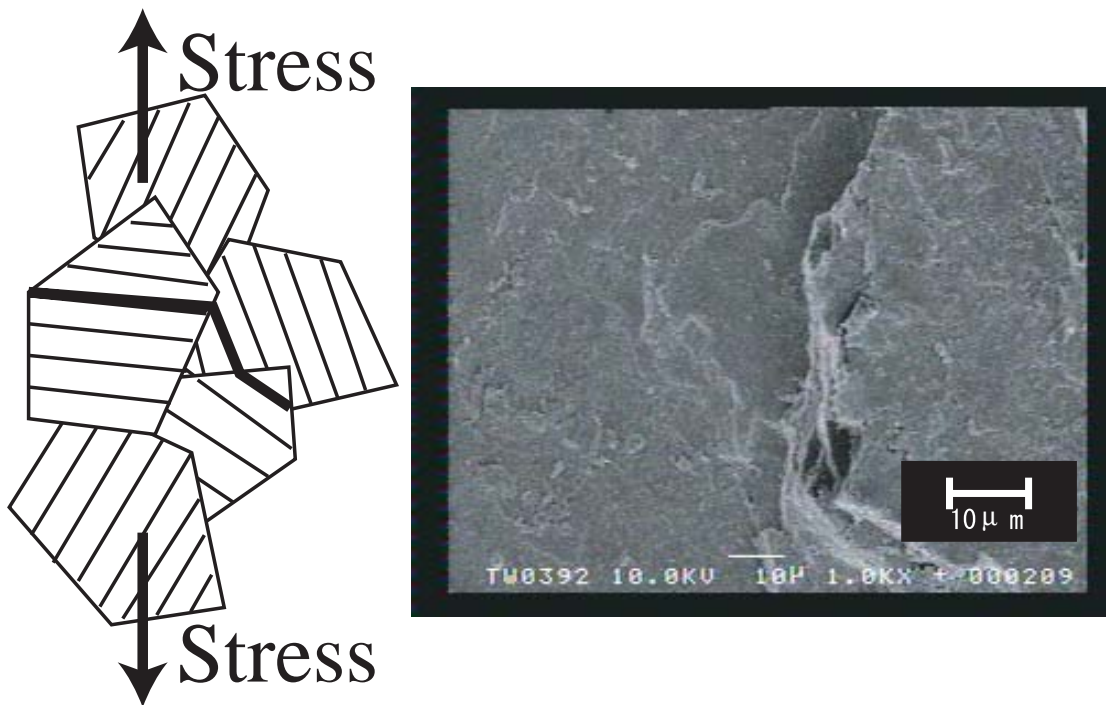


Fig. 5.20: Illustration of the fracture model of TiAl transgranular fracture.(left) The photography of the fracture surface of TiAl intergranular fracture. ($\times 1000$) (right)

の1倍から10倍である． η と N の関係は直線に近い形状であり最小二乗近似を用いることでフラクタル次元を算出することが可能である．Fig.5.22の観察倍率25倍の直線の傾きは2.956と算出される．また，この解析で，横軸は $0.1\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ までを用いていることから，スケールに関して広範囲にフラクタル性が計算できていることがわかる．

5.5.2 観察スケールとフラクタル次元の関係

観察倍率25～10000倍までの破面観察と3次元形状データ収集を行い，フラクタル解析を行った結果をFig.5.23,5.24,5.25に示す．各観察倍率毎に6破面のデータ収集を行った．Fig.5.23,5.24,5.25の縦軸は各観察倍率におけるフラクタル次元の平均値であり，横軸は各観察倍率における測定データの横幅の長さを μm で表示したグラフである．グラフには4.2で示したTiAlの3種類の破面のフラクタル次元と観察スケールを示している．Fig.5.23は，クリープ破面の破壊初期の部分に見られる粒界破壊の破面のフラクタル次元と観察スケール()を示している．Fig.5.24は，クリープ破面の破壊後期の部分に見られる粒界破壊の破面のフラクタル次元と観察スケール()を示している．Fig.5.25は，クリープ疲労破面の全体に見られる粒内破壊の破面のフラクタル次元と観察スケールの

関係 () を示している。Fig.5.26 の縦軸はフラクタル次元の変動係数であり、横軸は Fig.5.23 と同じである。

またフラクタル次元の測定に用いた式 5.7 における η の範囲は、破面観察倍率を変化させて形状を測定している為、 $0.02\mu m \leq \eta \leq 80\mu m$ という幅広い範囲で解析を行っている。

5.5.3 考察

3章において、観察スケールとフラクタル次元の関係は、巨視的なスケールで観察を行っている時は、破面のフラクタル性が反映されているためフラクタル次元はほぼ一定値を示し、観察スケールが微視的なスケールで算出されたフラクタル次元は減少するという関係が予想されることを述べた。Fig.5.23,5.24,5.25 において、予想されたフラクタル次元と観察スケールの関係が確認できる。グラフ内に引いた点直線と、実線円と点線円はフラクタル次元がほぼ一定値であるスケールと減少するスケールの違いを説明する為に引いた線である。

次に、3種類の破壊形態に対してフラクタル次元と観察スケールの関係について述べる。

クリーブ破面における粒界破壊

クリーブ破面内の粒界破壊部のフラクタル次元は観察スケールが大きいところでは、フラクタル次元が 2.9 を上回る値で一定である。しかし、実線円で示した観察スケールが $200\mu m$ 辺りからフラクタル次元が減少していることがわかる。これは TiAl の点線円で示すラメラ粒の大きさ ($300\mu m$) とほぼ対応していることがわかり、破面を特徴付ける観察スケールでフラクタル次元が変化していることがわかる。従って、フラクタル次元の変化する観察スケールはラメラ粒の大きさに対応していると考えられる。

クリーブ破面における粒内破壊

クリーブ破面内の粒内破壊部のフラクタル次元は観察スケールが大きいところでは、フラクタル次元が 2.9 を上回る値で一定である。しかし、粒界破壊同様観察スケールが実線円で示す $200\mu m$ 辺りからフラクタル次元が減少していることがわかる。これは点線円で示す TiAl のラメラ粒の大きさ ($300\mu m$) とほぼ対応していることがわかり、破面を特徴付ける観察スケールでフラクタル次元に影響していると考えられる。また、観察スケールが $60\mu m$ 近辺で再びフラクタル次元が増加し、再度減少するのはラメラ粒を構成する層状組織の形状が表面に出ているからであり、層状組織の形状が再びはっきりと認識される観察スケールで再度フラクタル次元が減少していくことがわかる。従って、フラクタル次元の変化する観察スケールは、ラメラ粒のサイズと層状組織の形状に対応していると考えられる。

クリープ疲労破面における粒内破壊

クリープ疲労破面内の粒内破壊部のフラクタル次元は、試験片の形状の関係で観察倍率が 300 倍未満では形状測定ができなかったため、観察倍率が 300 倍以上で形状測定を行っている。これは観察スケールに直すと $400\mu\text{m}$ 以下で測定を行っている。観察スケールが $200\mu\text{m}$ より小さな観察スケールではフラクタル次元が減少していることから、 $200\mu\text{m}$ 以下の観察スケールには破壊に特徴的な長さが存在していないことがわかる。

変動係数と観察スケールについての関係

Fig.5.26 は、各観察倍率におけるフラクタル次元の変動係数と観察スケールの関係である。観察倍率が大きくなる、すなわち観察スケールが小さくなると変動係数が大きくなる傾向が Fig.5.26 からわかる。これは巨視的に観察した破面の形状には複数の破壊形態が混在していることが影響していると考えられる。従って、フラクタル次元は大きくなるものの平均化の効果により変動係数は小さくなると考えられる。また、微視的に観察した破面形状には、単一の破壊形態のみが観察されるため、フラクタル次元は小さくなるものの、変動係数が大きくなる傾向があると考えられる。

5.6 結言

本章は、まず従来のフラクタル解析が、破面のフラクタル次元を求める際に、観察倍率を考察しない場合、フラクタル性が成立していない破面に対してもフラクタル次元を求めている可能性があることを指摘した。そして、観察倍率の考察が欠けていることと、観察倍率の必要性に関して説明をした。また、従来のフラクタル解析は破面解析に用いるスケールの中で非常に狭い範囲しか用いていないことを指摘し、広範囲に及ぶフラクタル性を考察する必要性について述べた。

そして、観察倍率とフラクタル次元の関係を示すために、局所パラメータとして観察倍率毎のフラクタル次元を提案した。この局所パラメータを用いることにより、広範囲な空間スケールを用いてフラクタル性を議論することが可能になった。

次に、提案した手法を TiAl 金属間化合物に適用することで、以下のことを確認した。

1. 観察スケールが巨視的な範囲では、フラクタル次元がほぼ一定値を示すが、観察スケールが微視的なサイズに遷移するとフラクタル次元が減少することを確認した
2. 提案した手法を TiAl の粒界・粒内破壊に適用し、フラクタル次元が減少する観察スケールは破壊に特徴的な長さに対応していることがわかった。

従って、観察倍率毎のフラクタル次元を用いることで、破面にある特徴的な大

きさを同定することが可能であることを示した。しかし，求めた大きさと破壊時の条件（応力，環境等）の関係は，別の破面の特徴量と併用することで調べる必要がある。

この研究で用いた破面は，粒界破壊や粒内破壊といった，ある特定の特徴長さをもつ破面である。また，クリーブ破壊における粒内破壊に関しては，TiAlが層状組織であることから，結晶粒サイズと，層状の厚みという2種類の特徴長さをもつ破面である。つまり，明瞭に特徴長さがある破面に対しては適用することで，特徴長さが判断できる。

これに対し，微細粒鋼材⁸¹のように，粒径が数 $10\mu\text{m}$ ~ $0.5\mu\text{m}$ まで混在する材料の粒界破面に適用した場合，観察する領域毎に特徴的な大きさが変化すると考えられる。なぜなら，観察倍率を上げていくと，ある倍率において，結晶粒の大きさが特徴的になるが，その大きさが領域毎に異なるからである。従って，粒径が広範囲にわたって分布するような材料の場合は，領域の依存性が高く，観察倍率の低い場合からフラクタル次元の変動が大きくなると考えられ，破面の特徴的な大きさを決めることが困難であると考えられる。従って，破面の特徴的な大きさが分布しないような破面に対して，観察倍率毎のフラクタル次元は有効であると言える。

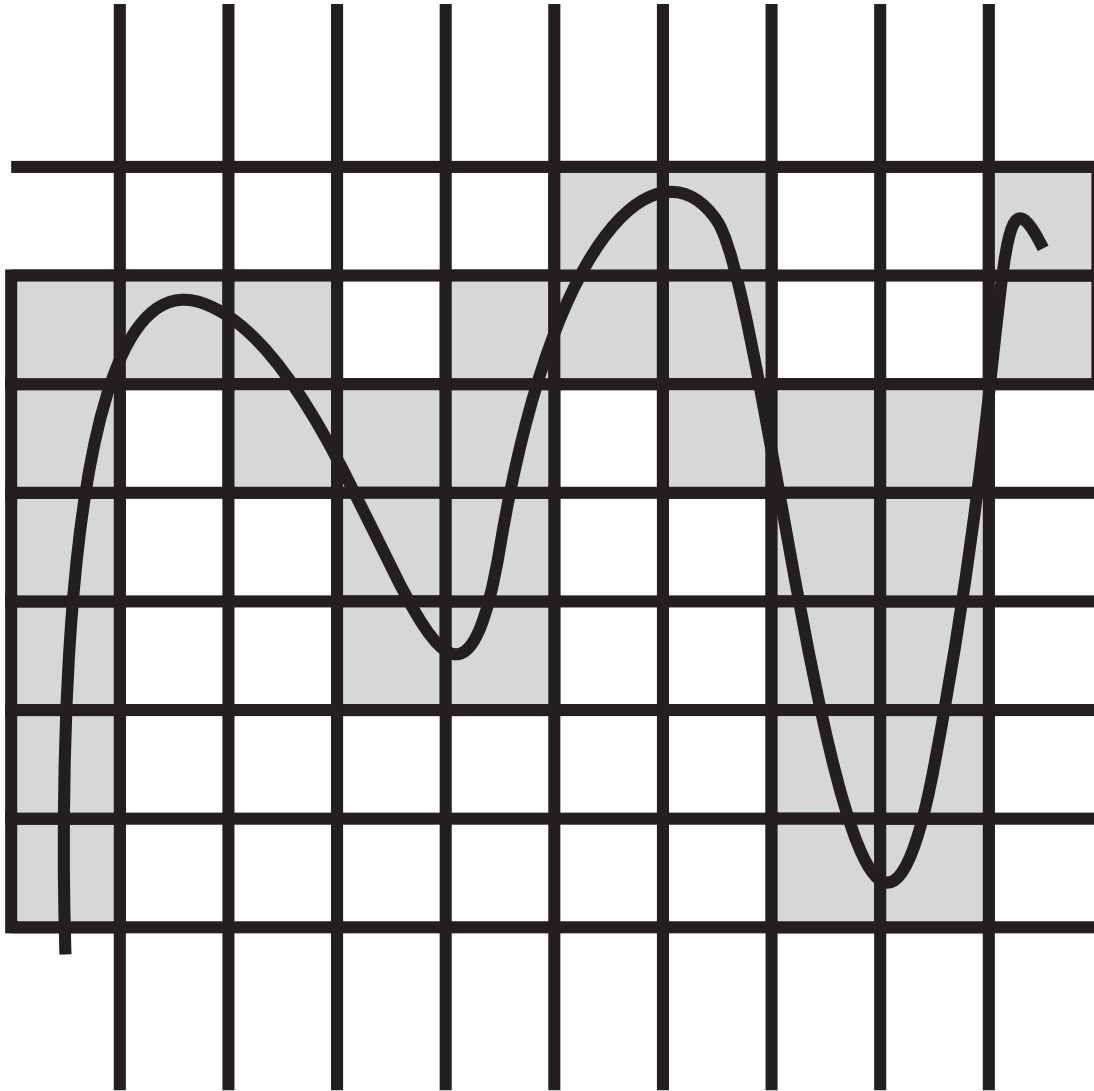


Fig. 5.21: Illustration of the box counting method (The shaded boxes are counted)

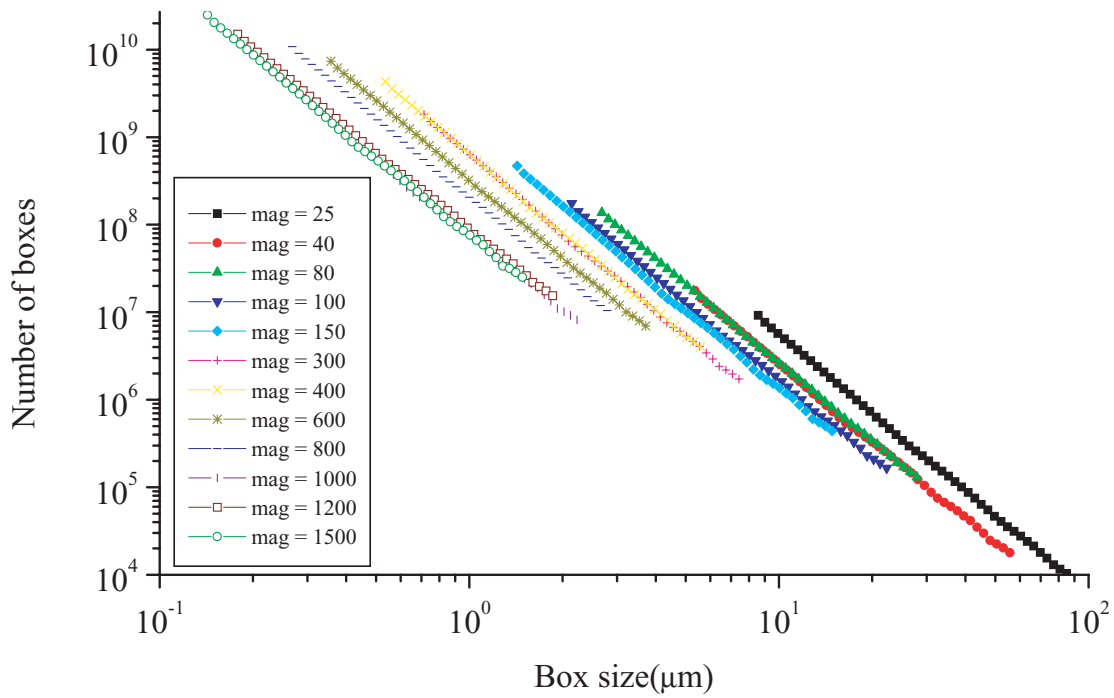


Fig. 5.22: Result of box counting method

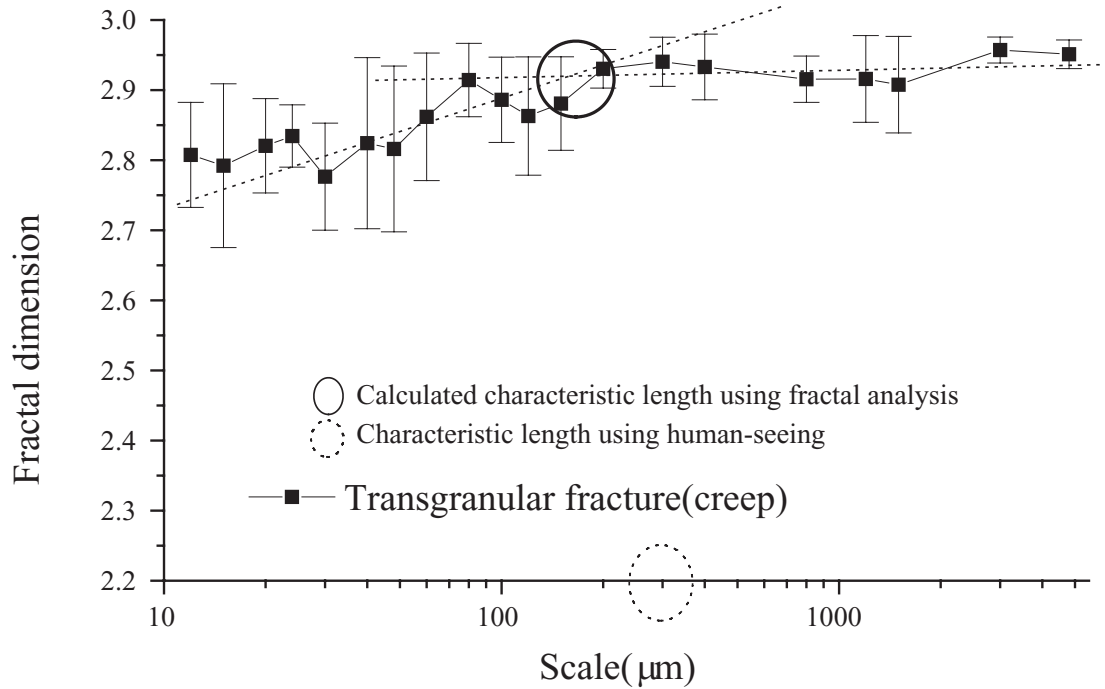


Fig. 5.23: Variations of fractal dimension of TiAl transgranular fracture surface(creep) with magnification of observation

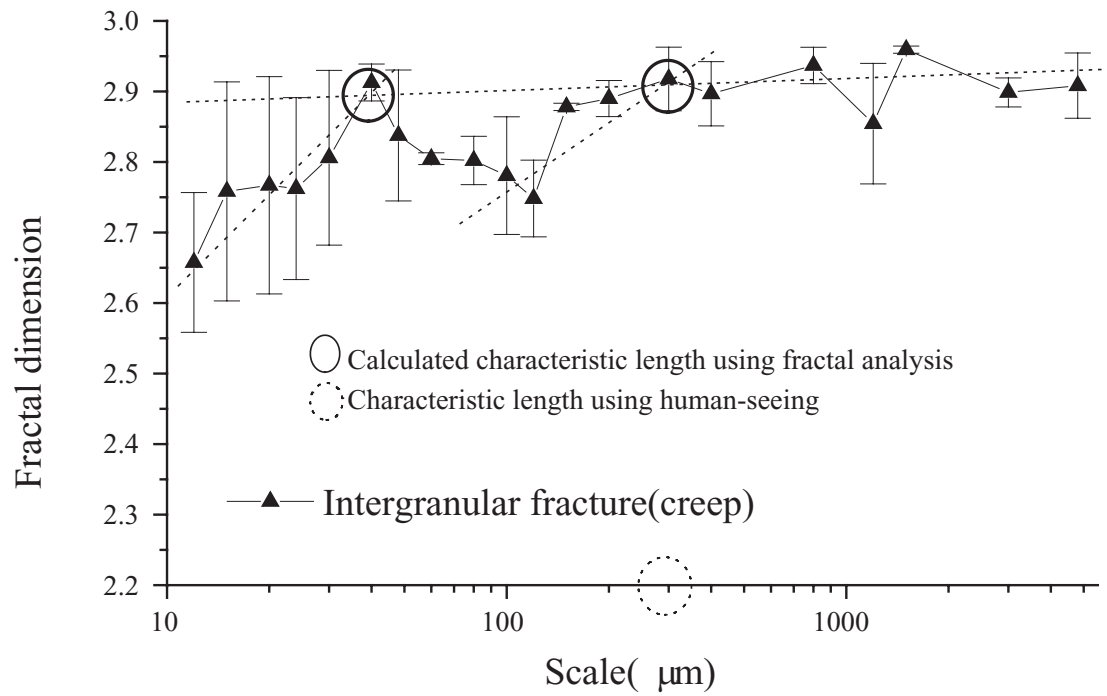


Fig. 5.24: Variations of fractal dimension of TiAl intergranular fracture surface(creep) with magnification of observation

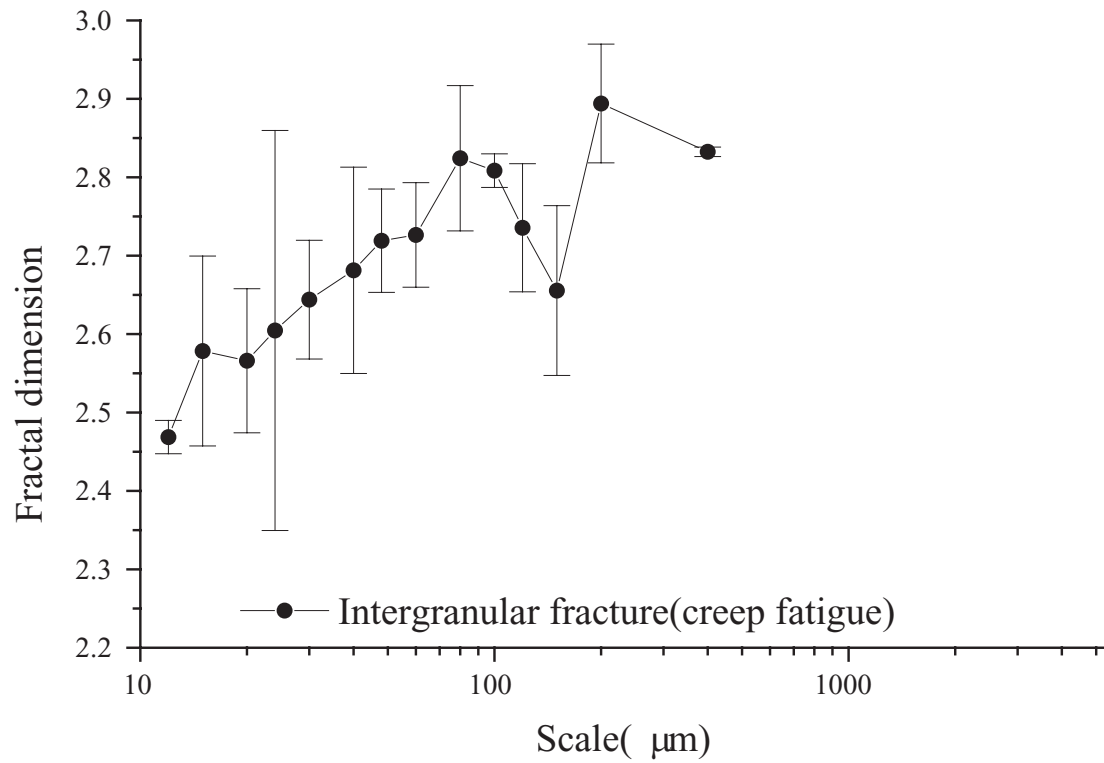


Fig. 5.25: Variations of fractal dimension of TiAl intergranular fracture surface(creep fatigue) with magnification of observation

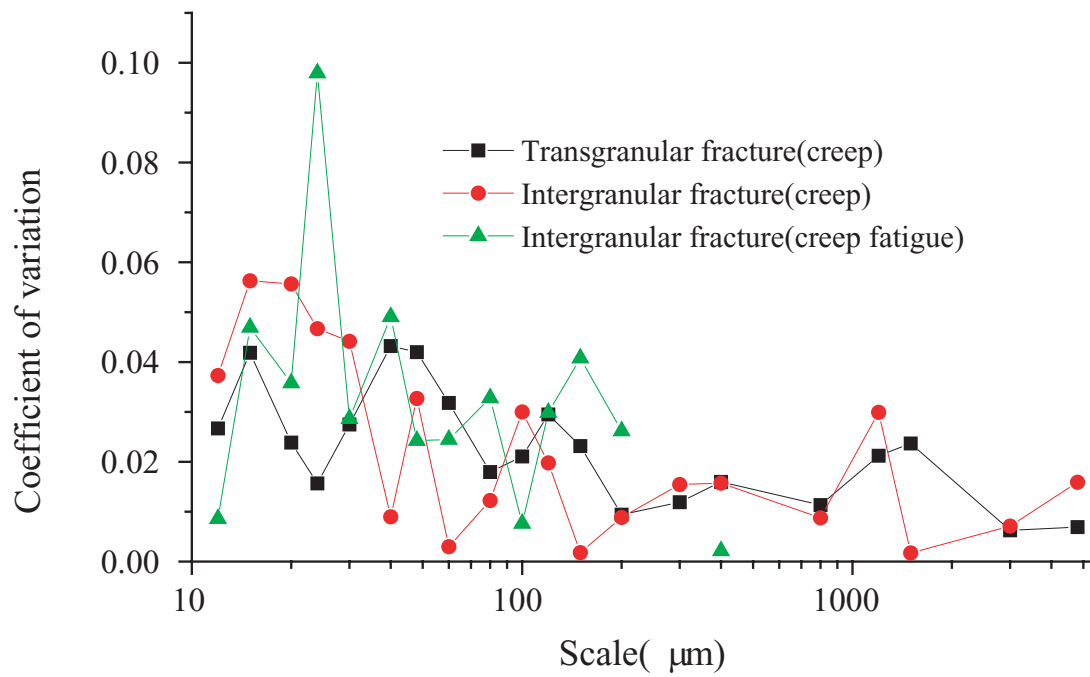


Fig. 5.26: Variations of coefficient of variation with magnification scale

第6章 結言

6.1 本研究の総括

本章では、本研究で得られた成果を総括する。

本研究は、数値破断面解析の分野において、局所パラメータを用いて、破断面を特性化する手法を提案した。局所パラメータは、「位置」と「空間スケール」に焦点をあてた解析を行うためのパラメータである。位置の局所的評価とは、破断面の画像の位置における様相の違いを評価（領域の評価）することである。また、空間スケールの局所的な評価とは、破断面の観察倍率における様相の違いを評価することである。

局所パラメータの導入により、破面の領域の評価に関しては、画素単位の評価が可能になった。つまり、従来の小領域分割から判断する手法に対して、小領域サイズを決定する際に入る観察者の主観を無くした点で、局所パラメータは有効である。また、画素単位で評価を行うことで、破面の遷移領域が入り組んだ形状の場合でも、詳細な解析を行うことが可能となった。

また、本研究では、高解像度SEMを用いたため、従来の破面解析よりも広領域な評価が可能となった。つまり、局所パラメータの導入により、詳細かつ広領域な数値破面解析が可能になったと言える。

また、観察倍率の評価に関しては、従来は観察者が選択した倍率で得られた画像から求めていたフラクタル次元に対し、局所パラメータとして、観察倍率毎のフラクタル次元を評価することで、観察者の主観を取り除いたフラクタル解析を実現した。この局所パラメータの導入により、破面がフラクタル性を持つ観察倍率でのフラクタル次元が客観的に評価できるようになった。

次に、提案された個々の局所パラメータについてまとめる。

位置の局所性評価のために、

- ストライエーション度
- 2次元局所 Hurst 数

が提案され、その有効性が検証された。

ストライエーション度の導入により、疲労破面は画素単位で、ストライエーションの領域が判定可能となった。そして、画素単位の評価のため、入り組んだスト

ライエーションの領域に関しても詳細に評価することが可能になった。また、従来は目視によって判断していたため、各小領域毎に観察者の主観が入った解析が行われてきたが、ストライエーション度としきい値の組み合わせにより、領域の決定はしきい値のみに依存することとなった。従って、ストライエーション度の有効性が確かめられたことにより、従来は目視で判断していたストライエーションの領域を、より客観的に求めることが可能になった。

そして、破面全体の画像を構築することで、ストライエーションから応力比、 ΔK の推定を、従来より客観的に行うことが可能になると考えられる。

また、2次元局所 Hurst 数の導入により、周期性を持たない破断面について、複雑さを画素単位に評価することが可能になった。Hurst 数はあらさとは異なり、代表長さに依存しない複雑さを評価する点で、客観的な破面の複雑さの評価に有効なパラメータである。2次元局所 Hurst を画素単位に求めることで、破面の入り組んだ領域を詳細に評価することが可能になった。

また、本研究では、主にストレッチゾーン幅の評価に2次元局所 Hurst 数を導入した。その結果、従来はストレッチゾーンを含む破面画像から数箇所を選択してストレッチゾーン幅を評価していたが、2次元局所 Hurst 数を導入することで、画像全体で幅を評価することが可能になった。また、従来は解析位置の選択に関して、観察者の主観が入っていたが、2次元局所 Hurst 数を導入することで、観察者の主観が入らずにストレッチゾーン幅を評価することが可能になった。

また、観察倍率の評価に関しては、局所パラメータとして、観察倍率毎のフラクタル次元が提案された。

観察倍率毎のフラクタル次元を導入することで、破面がフラクタル性を満たす観察倍率の範囲が存在することが見出せた。また、その範囲において、観察者の主観に依存しないフラクタル次元を算出することが可能になり、客観的にフラクタル次元を求めることができた。そして、フラクタル性を満たす倍率の上限は、破面の特徴長さとの関係があることがわかった。特徴長さとの破壊機構の関係については、今後の課題である。

以上が、本研究で提案された手法と、適用破断面について総括したものである。

6.2 研究の展望

本研究の今後の展望について述べる。

6.2.1 ストライエーション破面率の評価

本研究では、ストライエーションの境界を調べることに主眼を置き、その結果としてストライエーション破面率の計算が可能になった。しかし、本研究で検証した破面は広大な破面の極一部である。従って、破面全体にわたりストライエーションの領域を決めるためには、破断面の一部の画像を多く撮影し、本手法を繰返し使用することで、破面全体のストライエーションの領域を決定することが可

能である。また、その際に、破面の中に存在するストライエーションの波長の分布も調べることが可能になる。

その上で、ストライエーション破面率・ストライエーションの波長と応力比・ ΔK との関係を調べ、疲労破壊における作用応力の推定技術を確立することが、本手法の展望である。

6.2.2 2次元局所 Hurst 数を用いた破面性状の分類

本研究では、ストレッチゾーンを解析対象とした。解析対象とした理由は、ストレッチゾーンが平坦であり、評価すべき対象が平坦な領域と複雑な領域であり、評価が容易であると考えたからである。そして、ストレッチゾーン幅の評価が有効であることを示した。破面性状の分類には、他にもシャルピー衝撃試験片の破面や、応力腐食割れ破面の粒界粒内割れの分類などあるが、これらはストレッチゾーンと異なり、複雑な領域同士の評価である。その際には、2次元局所 Hurst 数のみで評価を行うのは困難であり、その他の要因を導入する必要があると考えられる。例えば、第5章で述べたフラクタル解析から算出する破壊単位の違いを局所的に求め、2次元局所 Hurst 数と併用することで、評価が可能になると考えられる。

6.2.3 フラクタル解析を用いた破壊に支配的な大きさの評価

本研究では、フラクタル解析を使用することで、破面形状から破壊に支配的な大きさを評価することが可能であることを示した。しかし、本研究で示した手法はあくまで1破面画像から1つの大きさの評価である。今後の展望としては、この手法を拡張し、局所的に破壊に支配的な大きさを求める手法を確立することで、先述の破面性状の分類に役立つものとする。

6.2.4 ウェーブレット解析による破面の特性化

本研究は、主にウェーブレット解析を用いることで、破面の局所的な性質の違いを求めてきた。ウェーブレット解析は、一般には画像圧縮の分野で用いられており、画像の空間における局所的な特徴やスケールにおける局所的な特徴を効率よく圧縮できる手法として用いられている。

破面の解析において、この手法は非常に有効である。なぜなら、本論文で述べてきたように、破面から破壊応力を推定するためには、空間・スケール両者での局所的な特徴が必要だからである。また、破面を数値解析するためには膨大な破面データが必要となる。このデータを効率的に、かつ特徴を維持したまま圧縮できるウェーブレット解析は、今後の破面解析に非常に効果を期待できる手法である。

破面解析の熟練者が減少している現在、破面解析技術を残すために必要なのは破面のデータである。ウェーブレット解析により、効率的に破面の特徴を残したデータをデータベース化することで、破面の情報を半永久的に蓄積し、かつ客観的な解析が可能になる。また、本研究では主に金属材料を取り扱ったが、近年の

材料研究では，複合材料や生体材料等の研究も盛んであり，それらの材料の破壊に対する知見も探求していく必要がある．金属材料，複合材料等，多くの材料破面データベースの構築により，破断面解析技術の伝承に貢献できる技術に発展していく必要があると考えられる．

付録 A 軸応力疲労破壊試験

A.1 実験の主旨

第3章で提案したストライエーション領域を同定する手法において，手法の妥当性を確認するために，軸応力疲労破壊試験を行った．本章では，破壊試験についてまとめたものである．ストライエーションの破面率と応力比・き裂進展速度の関係を求めることから，応力比一定の軸応力疲労破壊試験とした．

A.2 試験方法

A.2.1 供試材

試験に用いた材料はアルミニウム合金 A2017-T4 である．一般にはジュラルミンと呼ばれる金属である．アルミニウム合金を選んだ理由は，アルミニウムは炭素鋼やクロムモリブデン鋼と比較して延性に富み，ストライエーションが明瞭に形成しやすいからである．Table.A.1 に A2017-T4 の成分を示す．Table.A.2 に A2017-T4 の機械的性質，Table.A.3 に物理的性質を示す．

A.2.2 試験片

使用した試験片の形状・寸法を Fig.A.1 に示す．ノッチの先端は，放電加工により，0.5mm のノッチを作成した．

試験片形状は，試験機のチャックや，過去に使用された試験片⁵²の形状の関係から，幅 60mm，板厚 24mm とした．

Al	Cu	Mg	Mn	Si
Bal.	3.70 %	0.60 %	0.40 %	0.40 %

Table. A.1: A2017-T4 アルミニウム合金 成分表

Table. A.2: Mechanical properties of A2017-T4 alloy

$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	Ψ
270	435	23.8

Table. A.3: Physical properties of A2017-T4 alloy

Young's module(GPa)	Poisson ratio
71.5	0.33

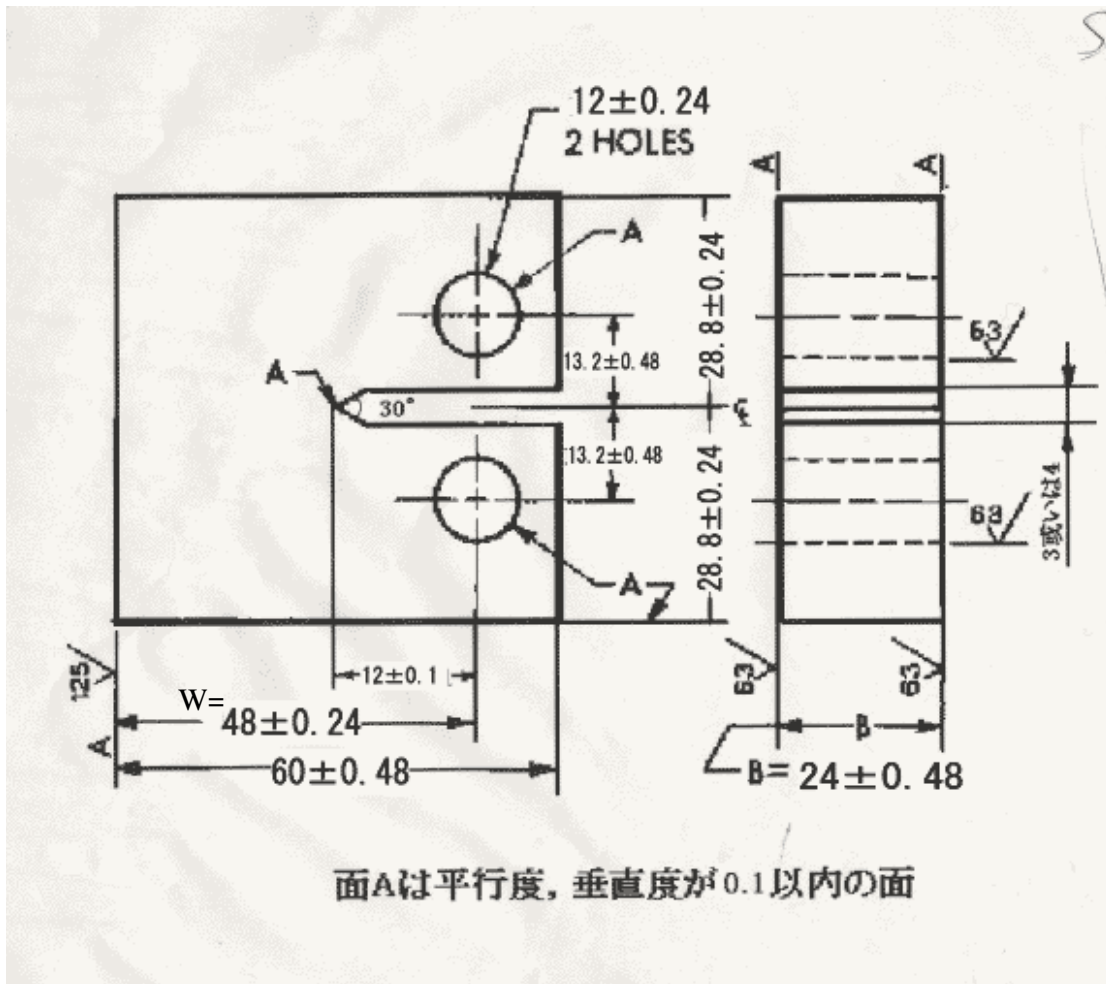


Fig. A.1: 試験片の形状・寸法



Fig. A.2: 試験装置の写真

A.2.3 試験装置

試験装置の概観を Fig.A.2 に示す．また，試験装置の概略を Fig.A.3 に示す．

本研究で用いた試験機は，電気油圧サーボ式引張圧縮試験機である．この試験機は，通常の電気油圧サーボによる閉ループ試験システムである．これに加え，試験機制御装置，ひずみアンプ，変位や試験片のひずみをサンプリングするためのデータロガーと，ロガーからデータを受け取り保存するためのパーソナルコンピュータを使用した．また，DA ボードはロガーに対して，定期的にサンプリングを開始，停止する為のトリガー電圧を発生させるための装置である．トリガー電圧を発生させる仕組みは，PC 側の時計と，トリガー発生用のアプリケーションを作成することで構築した．

次に試験機の詳細について述べる．疲労試験の制御は荷重制御で行う．また，き裂長さの計測には，コンプライアンス法の一つである，背面ひずみ法を用いた⁸²．試験片の背面のひずみから，ひずみとき裂長さとの関係を示す校正曲線を用いて，き裂長さを決定した．試験機の制御は島津サーボパルサー（ここに型番）を用いて行う．ひずみは試験片背面に貼ったひずみゲージから計測し，荷重はロードセル

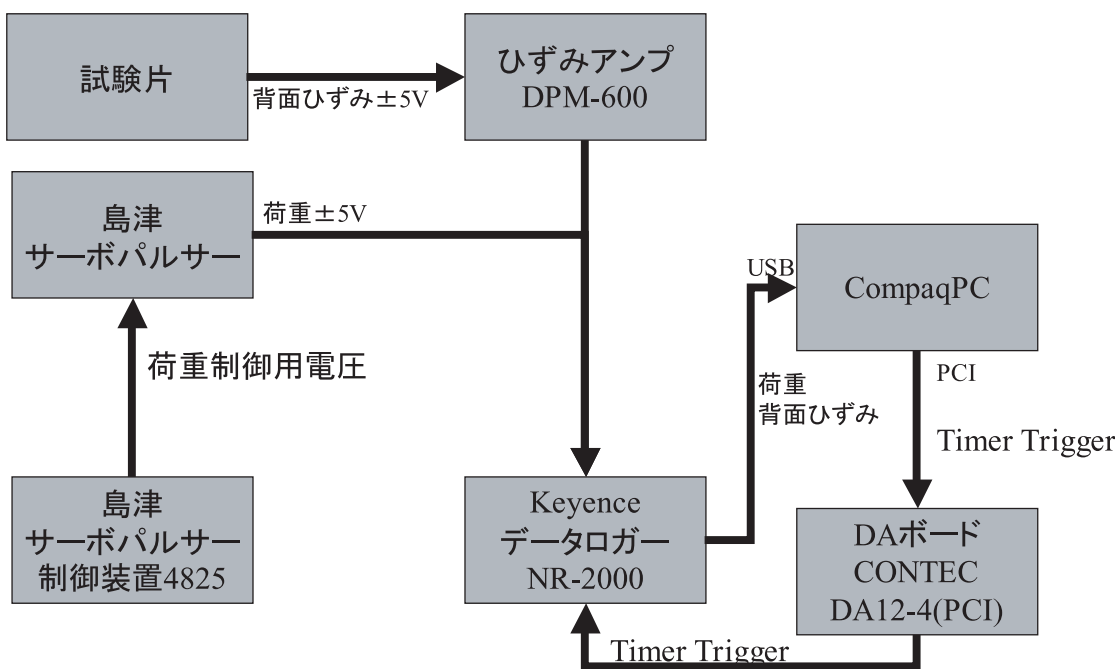


Fig. A.3: 試験装置の概略

から計測した。計測値はキーエンス製データロガー (NR2000) を通してサンプリングした。サンプリングの間隔は、試験時の周波数 (10Hz) に対して、20 倍の速さ (200Hz) で行った。これは、ひずみや荷重のピークを正確に捉えるためである。計測されたデータは、パーソナルコンピュータに保存した。

A.2.4 試験条件

本実験に使用した試験条件について述べる。

Table.A.4 に、破壊試験の条件を示す。応力比は 0.1,0.2,0.5 の 3 種類を設定した。また、 ΔK は、試験時間を 2~3 日に設定する為に、 $\Delta K = 5$ 近辺から始めるよう

試験条件	1	2	3
応力比	0.1	0.2	0.5
最大荷重 (Kgf)	500	600	900
最小荷重 (Kgf)	50	120	450
試験開始 $\Delta K (MPa\sqrt{m})$	4.87	5.19	4.87
周波数 (Hz)	10	10	10
波形	~	~	~

Table. A.4: 疲労破壊試験条件

にした．それに伴い，荷重を設定した．

A.3 試験結果

A.3.1 較正曲線の計算

まず，背面ひずみとき裂長さの関係を示す較正曲線を求めた．較正曲線は，式 (A.1) に示す式を用いた．また， F の関数系は様々なものが提案されている⁸²が，式 (A.2) に示す ASTM-E813-81 に採用されている式を用いた．

$$\frac{a}{W} = c_0 + c_1 F + c_2 F^2 + c_3 F^3 + c_4 F^4 + c_5 F^5 \quad (\text{A.1})$$

但し，

$$F = \frac{1}{(BE'\lambda')^{\frac{1}{2}} + 1}, E' = \frac{E}{1 - \nu^2}, BE'\lambda' = \frac{\epsilon B W E'}{P} \quad (\text{A.2})$$

ここで， $c_1 \sim c_5$ は回帰係数である．本実験では， $c_1 \sim c_5$ を FEM を用いて求めた．

FEM には，ANSYS6.0 を用いた．CT 試験片の FEM モデルを Fig.A.4 に示す．拘束条件は x 軸上の対称軸を y 方向固定，治具取り付け穴を x 方向固定した．その上で，Fig.A.4 内 A 点部のひずみを求めた．A 部はひずみゲージを貼り，ひずみを測定する部分である．また，き裂の進展は， x 軸上の接点拘束をはずすことで模擬した．

コンプライアンス回帰係数					
c0	c1	c2	c3	c4	c5
4.7813	-87.576	791.21	-3694.4	8567	-7847.4

Table. A.5: コンプライアンス回帰係数

Fig.A.5 から計算された回帰係数 (式 (A.1) $c_0 \sim c_5$) を Table.A.5 に示す．

A.3.2 き裂進展曲線

Fig.A.6,A.7,A.8,A.9,A.10,A.11 に，実験から得られた a/W - N 線図とき裂進展曲線を示す．

Fig.A.6,A.7 は， $R=0.1$ についての結果である．Fig.A.8,A.9 は， $R=0.2$ についての結果である．Fig.A.10,A.11 は， $R=0.5$ についての結果である．

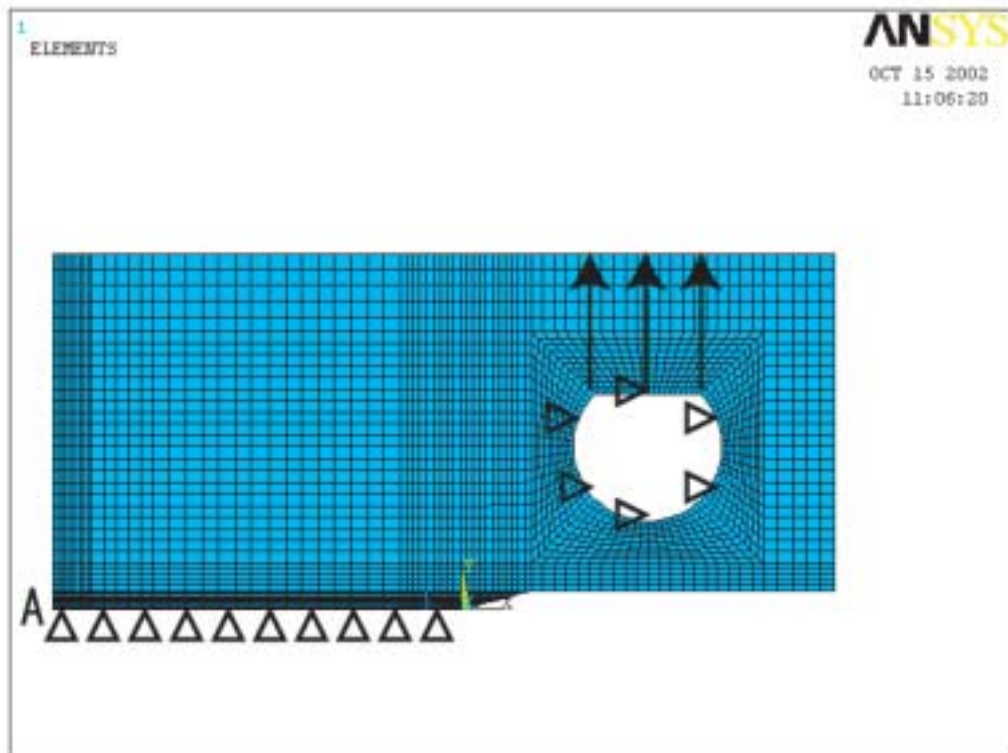


Fig. A.4: FEM model of CT test piece

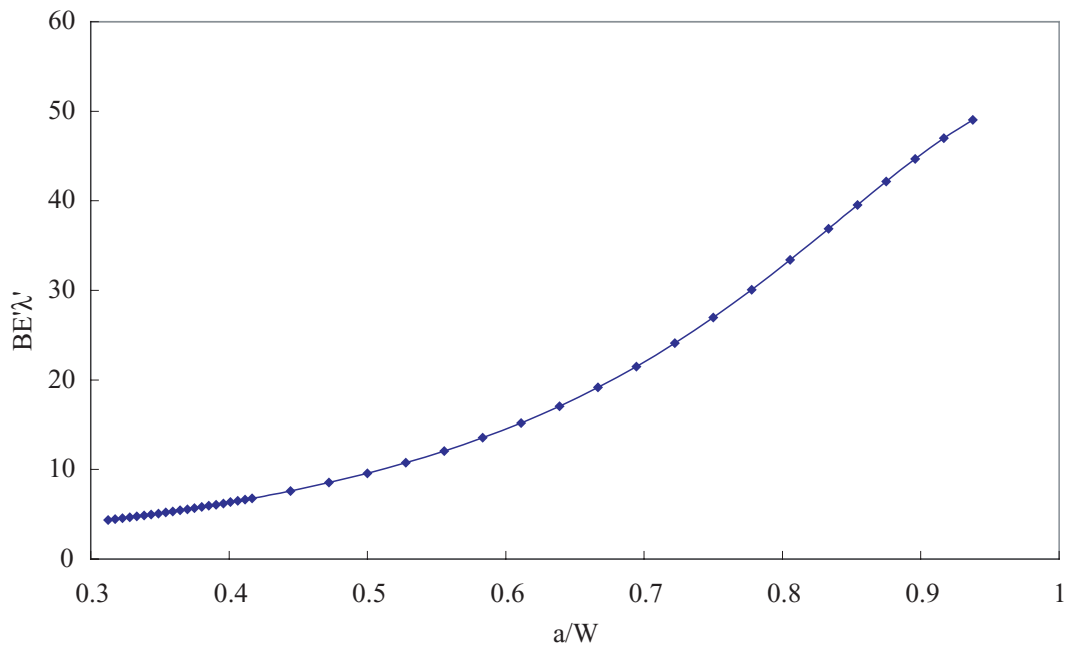


Fig. A.5: 較正曲線

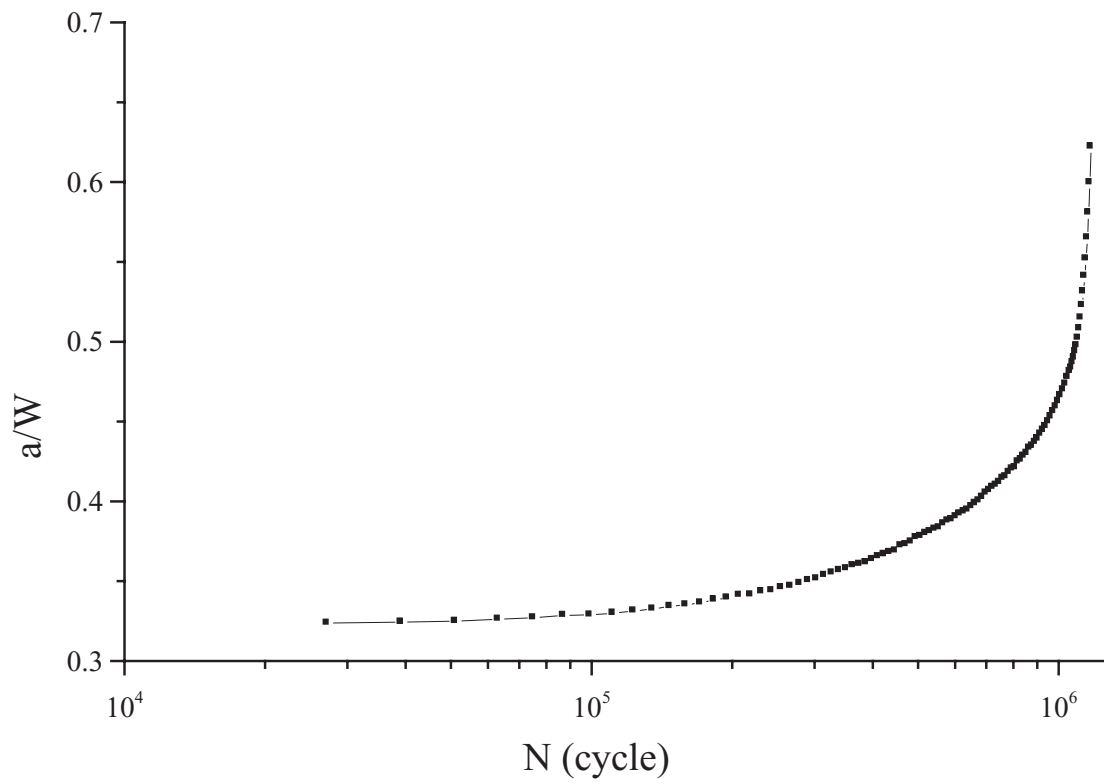


Fig. A.6: a/W - N 線図 ($R=0.1$)

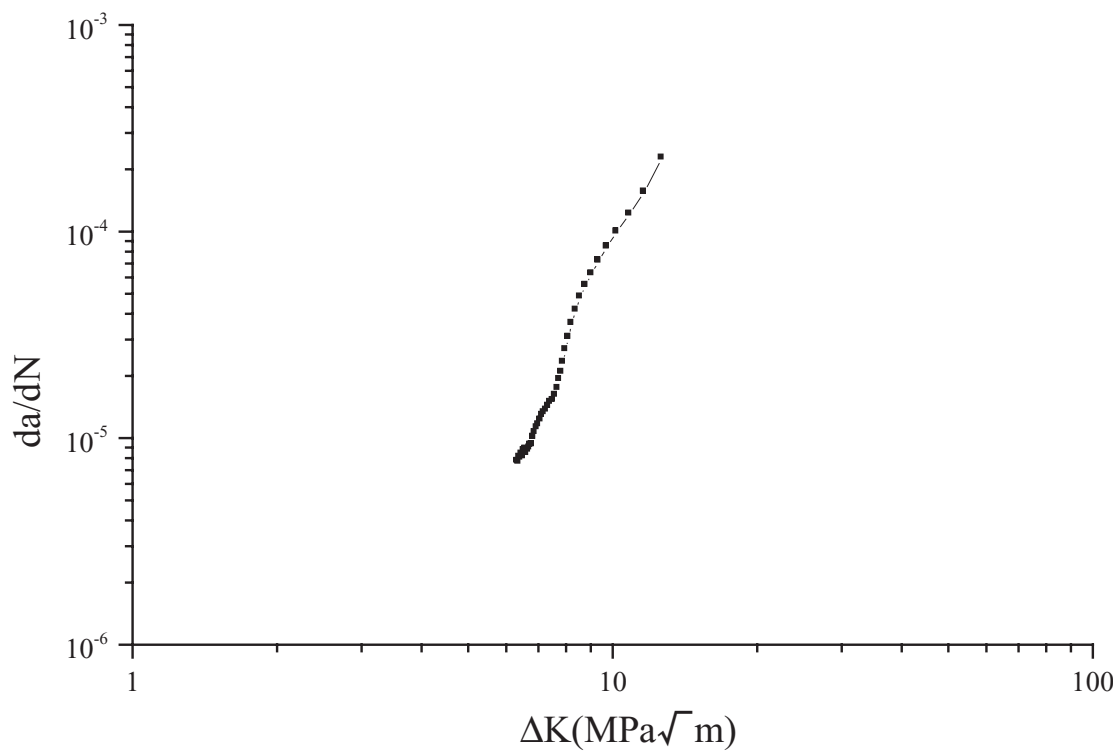


Fig. A.7: き裂進展曲線 (R=0.1)

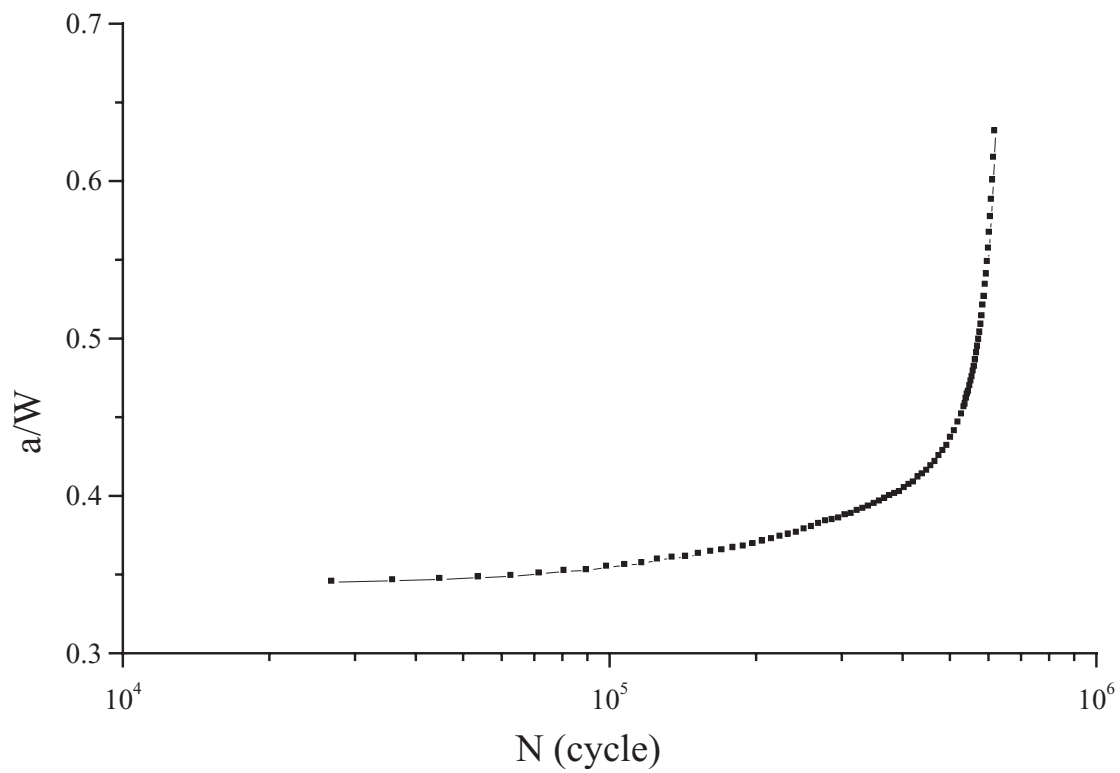


Fig. A.8: a/W - N 線図 ($R=0.2$)

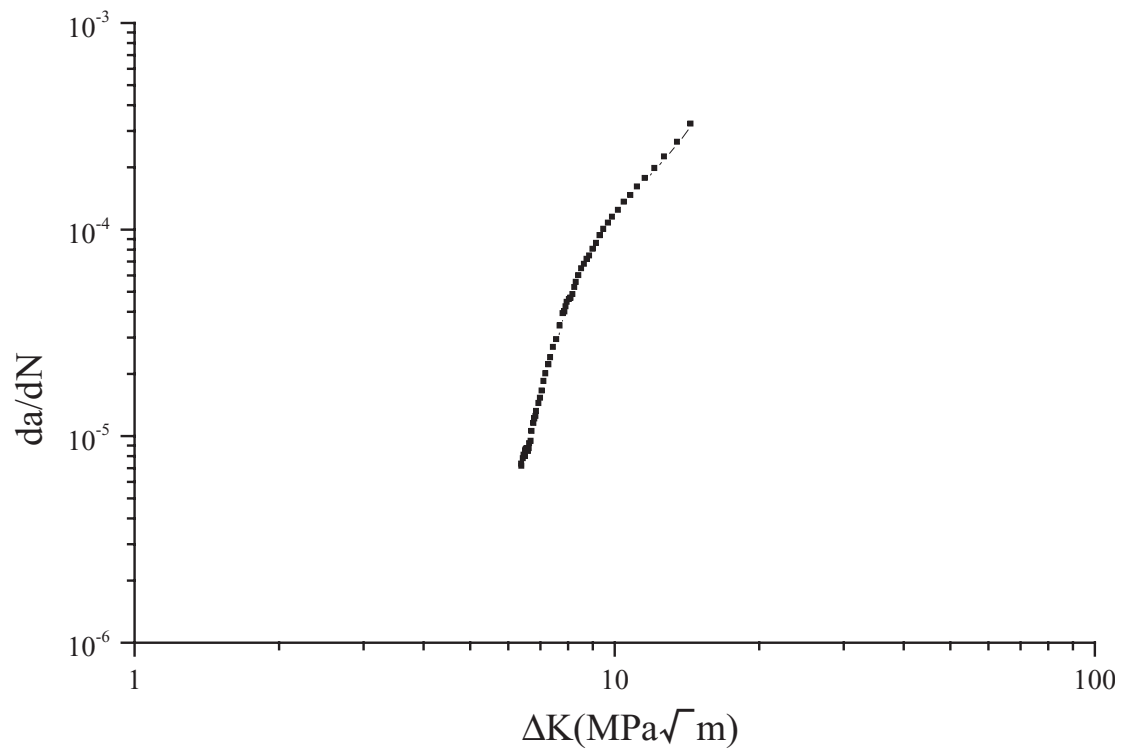


Fig. A.9: き裂進展曲線 (R=0.2)

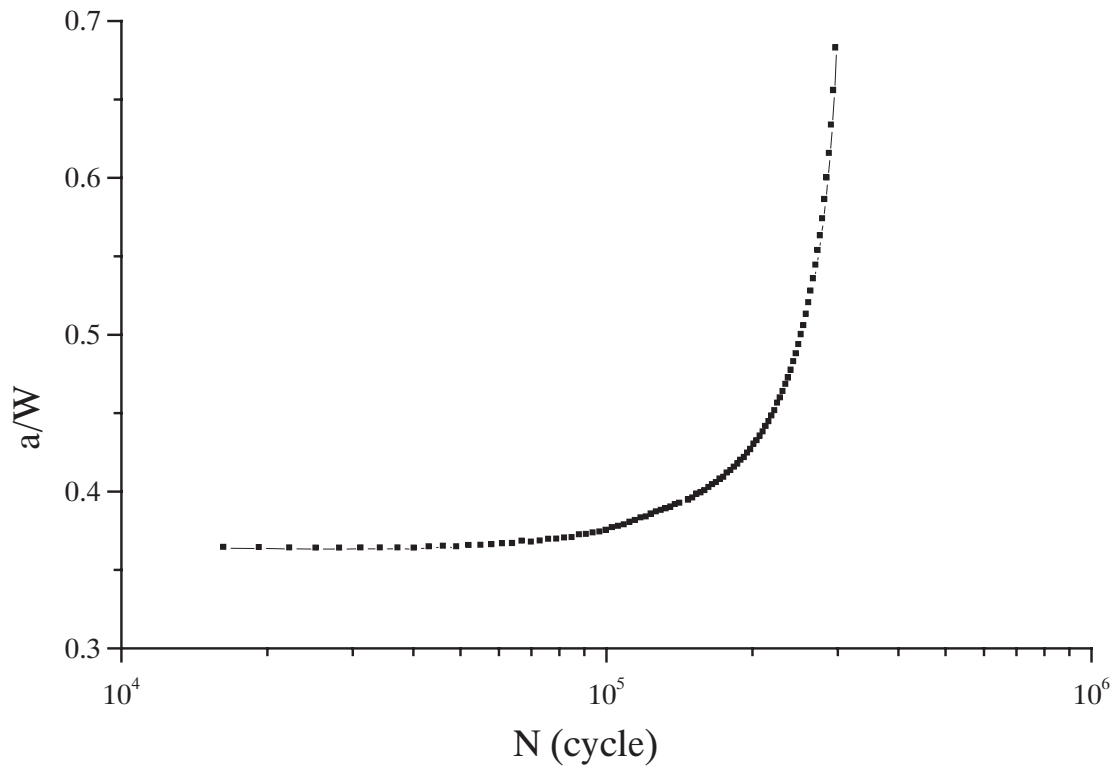


Fig. A.10: a/W - N 線図 ($R=0.5$)

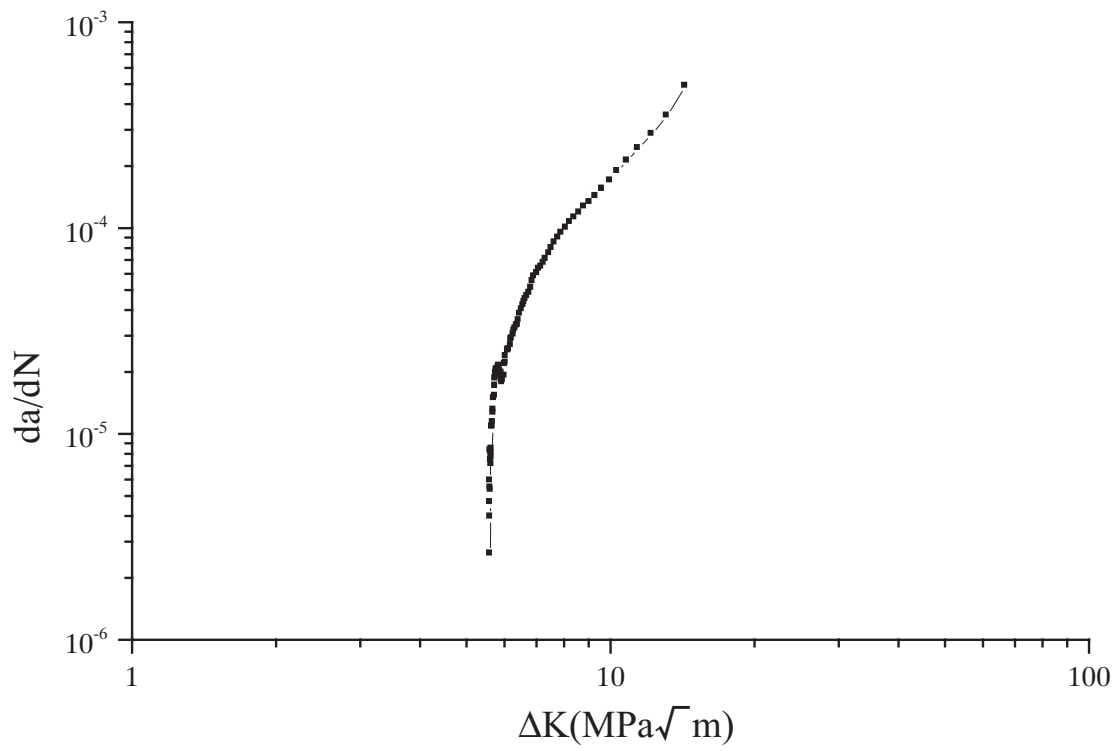


Fig. A.11: き裂進展曲線 (R=0.5)

付録B SEMの3次元像測定原理

B.1 走査型電子顕微鏡 (SEM ERA-4000) について

B.1.1 動作原理

SEMは、試料表面の形状をブラウン管(以下CRTと記す)上に拡大して表示する装置である。試料表面を縦・横 880×1152 の方眼に分割し、 $880 \times 1152 = 1,000,000$ 個の画素に分ける。

この画素を1画素ずつ電子線で照射し、試料表面から発生する二次電子量をブラウン管上の対応する画面に画素の明るさと位置を表示させる。

このようにして得られる像がSEMの二次電子像になる。

B.1.2 分解能

SEMの分解能は試料を照射する電子線の太さで決まる。仮に、5000倍の拡大像をCRT画面上の 100mm 四方に表示しているとする。

観察下にある試料表面の大きさは $100 \times 1/5000 = 20\mu\text{m}$ 四方となる。これを縦、横 880×1152 本に分割すると、1画素の大きさは $20\mu\text{m} \times 1/1152 = 20\text{nm}$ となる。すなわち、5000倍の鮮明な像を得るためには、試料表面からの二次電子発生領域の大きさは約 20nm 四方でなければならない。この事は試料を照射する電子線の太さを 20nm 程度にすることにより達成される。

高倍率で高解像度の像を得るためには試料を照射する電子線を十分に細く絞ることが必要となる。CRT画面上で、 100mm 四方を縦、横 880×1152 本に分割するとCRT画面の1画素の大きさは $100 \times 1/1152 = 0.1\text{mm}$ 四方となる。

人間の目の分解能は $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ であるので、CRT画面上の像は連続的な像として感じられ、モザイク画のようには見えなくなり、不自然さはなくなる。

B.1.3 二次電子像と反射電子像

二次電子とは入射電子により試料表面付近から出た低エネルギーの電子である。これを正の高電圧(約 10KV)を有する検出器で集束させ、シンチレータ(電子線のエネルギーを光に変換する素子)を発光させる。この光を光電子増倍管で増幅し電

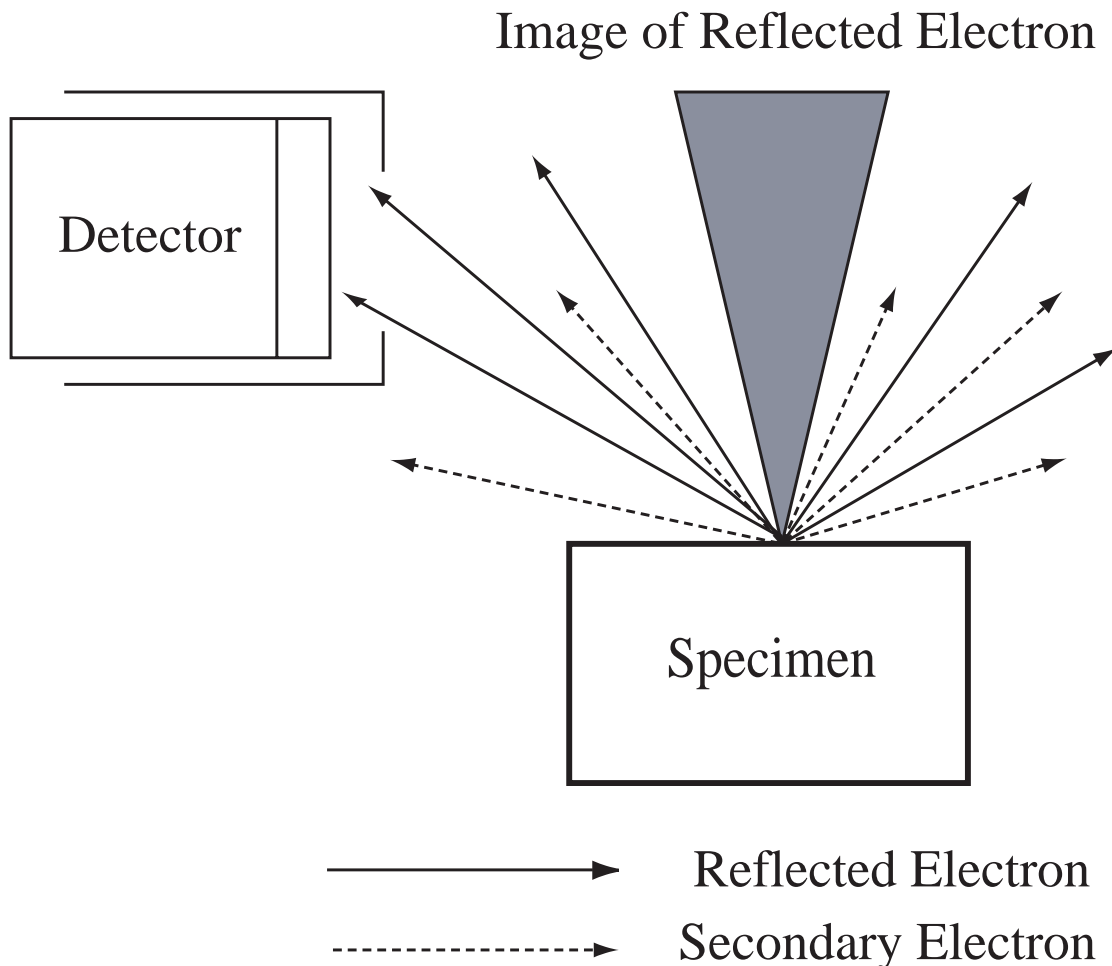


Fig. B.1: Effect of reflected electron

気信号とする。この電気信号を CRT の制御電極に印加して CRT 画面上の輝度変化として、二次電子量と対応させ像を得ている。

試料から放射される反射電子は照射エネルギーと同エネルギーを持つため、照射点から放射状に直進する。従って、検出器から見て試料の凹凸の陰にあたる部分で放射される電子は検出されないため、ちょうど検出器から証明された試料を電子プローブ方向から眺めたようなコントラストの像になる (Fig.B.1)。

これに対して二次電子像では試料を眺める方向は変わらないが、コントラストのつき具合は変わってくる。二次電子はエネルギーが低く、そのまま検出器に入っても検出器に感じないので二次電子を集め、これを加速するための電位が与えられている。そこでプローブの照射点からあらゆる方向に放射される二次電子は一様に検出器に集まり、反射電子の時に見られたような照明効果はなく、単に放射量の変化に基づくコントラストのみを得る像となる (Fig.B.2)。

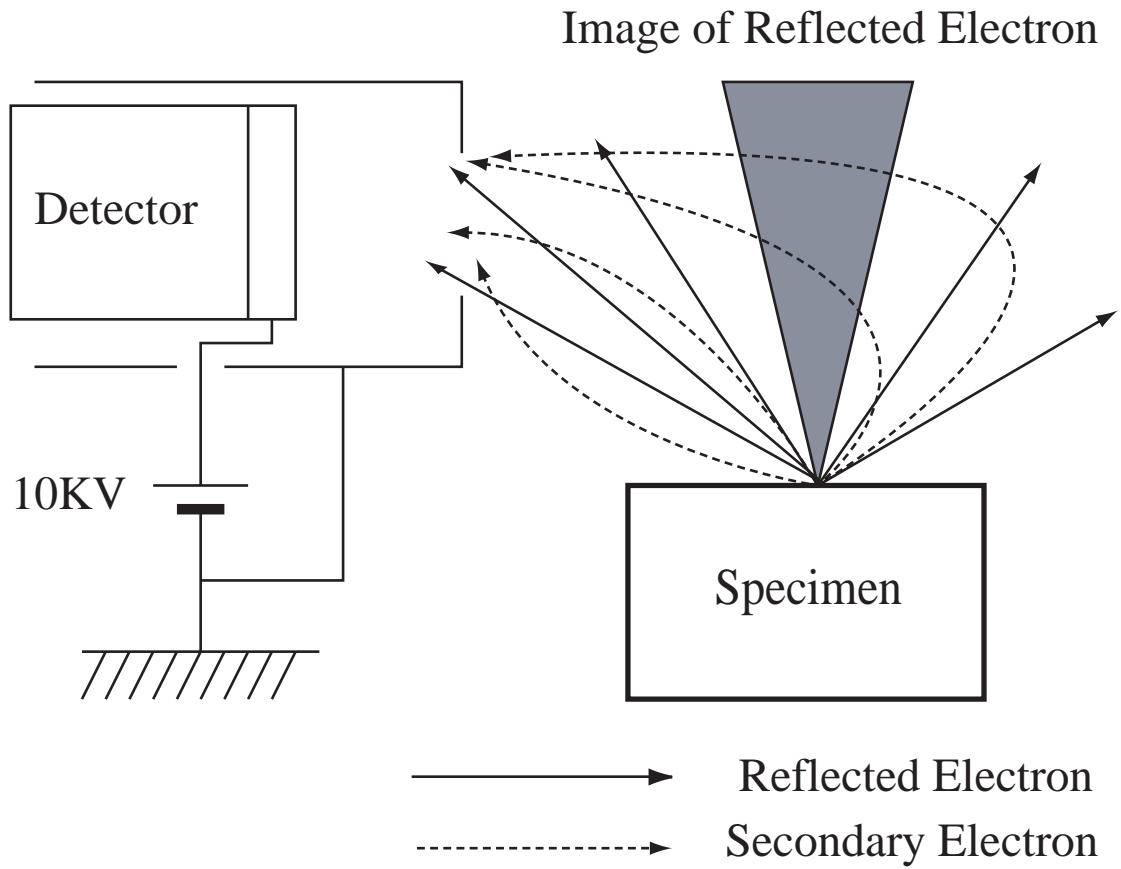


Fig. B.2: Effect of secondary electron

B.2 凹凸測定装置の動作原理

B.2.1 動作原理 1

試料面を電子線で照射した場合に発生する二次電子放出強度は、入射角の増大とともに、単調に増大する。また、その放出強度の角度分布も入射角度とともに変化し、その表面形状計測を行うために差分信号が必要となるため A、B、一對の二次電子検出器を備えている。入射角 θ における A、B 両検出器からの出力信号強度を a 、 b 、垂直入射における出力信号強度をそれぞれ a_n 、 b_n 、 K は定数とすると B.1 で θ が 75 度以上の時に良い近似を示す。

$$\tan \theta = K \times \frac{a^2 - b^2}{(a_n + b_n)^2} \quad (\text{B.1})$$

B.1 は SEM の通常の動作条件 (加速電圧 1 ~ 25KV) において、一般的に成り立つ。

B.2.2 動作原理 2

初期条件設定操作によって、なるべく等しい値に設定された a_n 、 b_n をあらかじめ電算機に取り込み、測定点における両検出器からの出力信号 a 、 b に対して演算を施せば、 $x - z$ 平面内における入射角 θ が算出される。

このようにして求められた試料の傾斜を積分していくことにより、 x 軸方向の表面形状を計測することができる。この測定原理を図 B.3 に模式図的に示す。

B.3 装置の構成

表面形態観察機能 (凹凸測定機能) 部の装置構成を図 B.4 に示す。

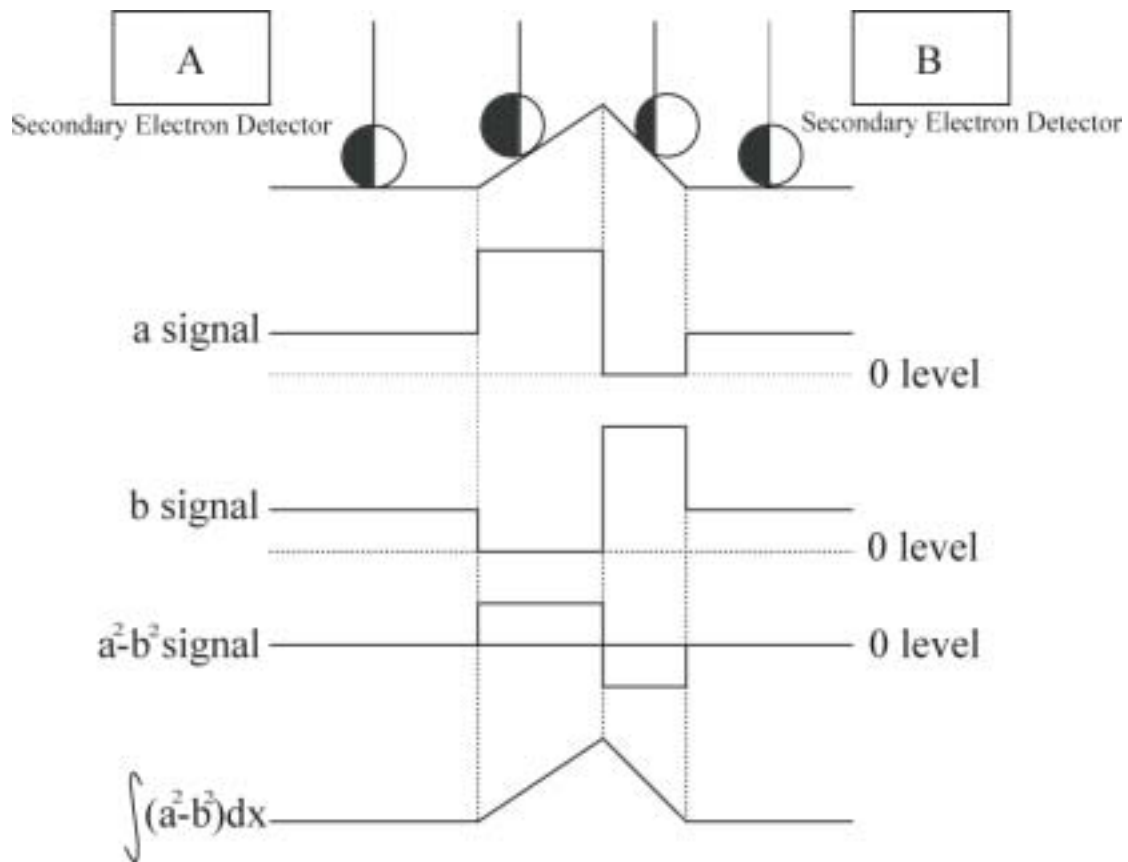


Fig. B.3: Principle of measure

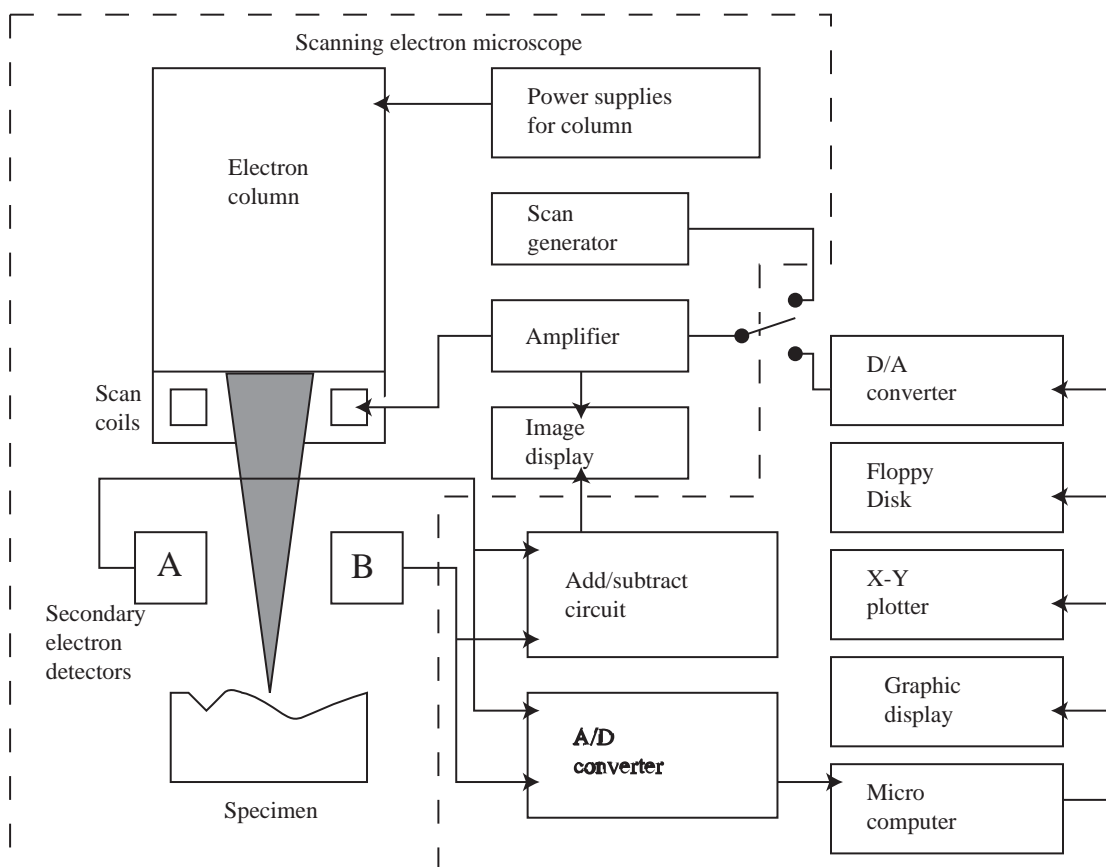


Fig. B.4: Device construction

付録C SEM(ERA-4000)の詳細¹

C.1 SEM(ERA-4000)の概観



Fig. C.1: Appearance of ERA-4000 SEM device

C.2 SEM(ERA-4000) の仕様

C.2.1 主性能

- 1) Z 方向分解能 (凹凸測定時) $1nm$
- 2) XY 方向分解能 (SEM 観察時) $4.5nm$

C.2.2 主機能

- 1) 2 次電子線像機能 イメージプロセッサによるモード切替
 - (1) 差信号による凹凸 2 次電子像
 - (2) 和信号による組成 2 次電子像
 - (3) 通常の 2 次電子像
- 2) 3 次元表面解析機能
 - (1) X - Z, Y - Z 断面形状測定
 - (2) 3D 断面形状測定
 - (3) X - Z, Y - Z 表面粗さ解析
 - (4) 3D 表面粗さ解析

C.2.3 仕様性能

A. 電子光学系

1. 電子銃 タングステンヘヤピン
2. 加速電圧 $0.5 \sim 30kV(0.1kV \text{ ステップアップ})$
3. 二次電子像分解能 $4.5nm$
4. レンズ 3 段磁界レンズ
5. ワーキングディスタンス $8 \sim 40mm$
6. 倍率 $\times 10 \sim \times 300,000$
7. 視野移動 $\pm 30\mu m$
8. 焦点非点合わせ オートフォーカス&スティグ及び手動

B. 画像

1. 走査モード FRAME, REDUCED FRAME, SPOT, LINE X, LINE Y, CB-MONITOR
2. 走査速度 TV, 0.2, 5, 20, 40, 80, 160 秒/フレーム
3. 走査方向 360° 回転可能
4. 画像種類 A, B, A+B, A-B, EXT
5. 画像記憶 SEM 像
 $576 \times 440 \cdots 2$ フレーム
6. 画像寸法 観察用 $\cdots 165 \times 125mm$
撮影用 $\cdots 120 \times 90mm$
7. 画像記録 (オプション) イメージプリンタ $100 \times 75mm$
ポラロイドフィルム $118 \times 89mm$

8. スーパーインポーズ ブローニフィルム $60 \times 70mm$
 a. ミクロンマーカー, フィルムナンバー
 (オートカウント), タイマー (年月日)
 b. 電源電圧値
 c. コメント
 d. 試料位置
 e. +字線
9. 積分画像 (オプション) 積分回数 1 ~ 255 回
 積分スキャンスピード Rapid(0.2 秒)

C. 試料ステージ

1. 試料寸法 最大径 $\phi 125 \times H10mm$
 最大厚 $\phi 50 \times H30mm$
 小試料 $\phi 10 \times H10mm$
2. X - Y 移動 $30 \times 68mm$ モーター駆動
3. Z 移動 8 ~ 40mm
4. 回転 360 °エンドレス モーター駆動
5. 傾斜 0 ~ 60 °(但し、試料大きさ、Z-位置
 により制限あり。)
6. 試料交換 大気解放
7. ステージ送り 最少ピッチ $5\mu m$
8. 位置表示 X, Y 位置 4 桁、回転 1 °単位
9. 送り速度 倍率連動

D. 排気系

1. 操作 完全自動排気
2. 試料交換時間 4 分以内
3. 到達真空度 $2.6mmPa$
4. 真空ポンプ 油拡散ポンプ
 油回転ポンプ (直結型)

E. その他

1. 架台 密封式エアーマウント
2. 保護機能 対停電、対断水、対真空劣化

F. 三次元表面解析機能

1) プロファイル測定

- | | |
|----------------|--|
| (1) ビーム走査 | デジタル走査 |
| (2) 測定方向 | 二次電子画像の X 方向、Y 方向切換 |
| (3) 測定位置表示 | CRT 上+字マークによる。 |
| (4) 測定の長さ | X 方向 $2.4\mu m \sim 60\mu m$
Y 方向 $1.8\mu m \sim 45\mu m$ が適切である。
(測定長は画像倍率で設定する。) |
| (5) 測定点設定 | 最大 4096 点/1 ライン (1 ライン測定)
最大 4096 点/1 ライン (エアロビュー)
* 但し、ライン × 測定点は 250,000 以下 |
| (6) 測定ライン数設定 | 2 ~ 4096 ライン (エアロビューの時設定) |
| (7) Z/X, Z/Y 比 | 0.1 ~ 1000 倍 |
| (8) 傾斜補正 | 1 ライン測定時 オート・マニュアル
エアロビュー オート |
| (9) 測定データ及び記録 | |
| 1. 凹凸プロファイル | カラー CRT ディスプレイ |
| 2. ズーム機能 | 1 ライン測定の一部を拡大して
カラー CRT ディスプレイ |
| 3. エアロビュー | カラー CRT ディスプレイ |
| 4. 二点間測定 | カーソルにより 1 ライン上の相互の 2 点を
指定し、2 点の距離、高さの差、角度を
測定できる。 |
| 5. 記憶 | フロッピーディスク及びハードディスク |
| 6. CRT 表示記録 | カラーハードコピー (オプション) による。 |

2) 三次元粗さ解析

- | | |
|------------|---|
| (1) 測定方向 | X 方向及び Y 方向 |
| (2) 入力データ数 | 最大 4096 点/ライン
最大 4096 点/ライン/フレーム
(ライン × 測定点 = 250,000 以内) |
| (3) 記憶 | ハードディスク (100MB 以上) 及び
フロッピーディスク |
| (4) メモリー | 1.6MB + 8MB |
| (5) 解析機能 | 解析結果はカラー CRT にディスプレイすると
共に、カラーハードコピーが可能である。 |

解析機能

1. 等高線表示

指定されたスレッシュホールド値とステップ数により、同じ高さの場所を地図のように結ぶ。スレッシュホールド値を順次変えながらその時の切口の形状を表示することにより画像化する。

2. 切断面の面積率

指定した切断面の総面積の全測定面積に対する比率を算出、表示する。また、スレッシュホールド値と切断面積との関係をヒストグラムで示すことが出来る。

3. 指定面積あたりの山数

指定した切断面の切口の数 (山の数) を算出、表示する。(但し、切口形状が単純形状の場合に限る。) また、スレッシュホールド値と切口の数 (山の数) との関係をヒストグラムで示すことが出来る。

4. 粒度

切断面の総面積を切口の数 (山の数) で割ったもの、つまり切断面の平均面積を算出、表示する。また、スレッシュホールド値における粒度をヒストグラムで表示する。

5. 各切断面の最大高さ

各切断面の切口の最大高さ (山の高さのばらつき) を算出する。

6. 表面粗さの三次元パラメータ

表面粗さの三次元パラメータ R_a, R_z, R_{max} を算出する。

- R_a …… 中心線平均粗さ
- R_z …… 10点平均粗さ
- R_{max} …… 最大高さ

R_a, R_z については、平均値、最大値、最小値を算出する。また、グラフにすることも出来る。

7. 表面積代替値

測定された形状データから表面積を計算する。また、二次元平面 (測定面) の面積との比をとることも出来る。(表面積率)

8. データのフィルタリング機能

測定された形状データに対し指定した周波数による高域、低域、中域フィルタリングをかけることが出来、結果のデータは1~8の解析にかけることが出来る。

9. 鳥瞰図表示

鳥瞰図表示を行なうことが出来る。 Z 方向倍率、視野(角度)は入力により設定することができる。

10. BATCH 処理

解析を1個ずつ実行するのではなくて、処理順序を決めたFILEを作成し、そのFILEに従って順次解析を連続的に行なっていく機能である。無人で長時間の処理をいくつか行なう時に便利である。(ただし、解析データは全てハードディスク上にFILEされている必要がある。)

処理順序はユーザーが自由に作成、変更、削除することができる。

C.2.4 装置寸法

1. 本体	$W540 \times D750 \times H1350mm$	265kg
2. 操作	$W1000 \times D750 \times H1200mm$	90kg
3. 油回転ポンプ	$W500 \times D260 \times H410mm$	30kg

付録D SEM(ERA-8800FE)の詳細²

SEM 観察系	
分解能	1.5mm(30kV) , 5mm1kV)
倍率	×20 ~ ×600,000
電子銃	ZrO/W 熱電界放射型 0.3 ~ 30kV
加遠電圧	0.3 ~ 3.0kV:10V ステップ 3.0 ~ 10.0kV:100V ステップ 10 ~ 30kV:1kV ステップ
非点収差補正	8 極電磁方式
プランキング	静電型プランキング方式
2 次電子検出器	4 本 φ152× 5m(最大径)
試料サイズ	φ50xH30 (最大厚) φ10×H10 (小型)
試料移動範囲	X:0 ~ 40mm Y:0 ~ 80mm Z:4 ~ 36mm 傾斜:±7 度 7 ~ 45 度 (φ10 試料時) 回転:360 度 (連続)
試料駆動	5 軸モーター駆動 X,Y,Z,T:ステップモータ R:DC モータ
位置メモリー	位置記憶及びリコール機能
位置表示	X,Y:5 桁 (小数点以下 3 桁) 皿表示 Z:2 桁 mm 表示 R:4 桁 (小数点以下 1 桁) 度表示 T:2 桁度表示
画像観察	差信号凹凸 2 次電子像 (A-B)

	和信号 2 次電子像 (A+B)
	通常の 2 次電子像
画像分割	4 画面同時表示及び重ね合せ
画像表示	静止画像 (ビデオクフフック静止画像)
	高分解能フレームメモリ
	表示 1200×900(スロースキャン)
	600×450(他)
	高速表示 (TV スキャン対応)
	プリンター出力 1200×900
モニター CRT	19 インチ局分解能 CRT
	S 画像表示部 260×195mm 程度
走査モード	PICTURE, SPOT, LINEX, WAVE FORM, PHOTO
走査速度	TV, Rapid, Medim, Slow1 ~ 4, Photo1 ~ 4/Frame
オート機能	フォーカス、スティグマ、 コントラスト & ブライトネス
データ表示	μ マーカ、フィルムナンバー
	加速電圧、日付、倍率
	キーボード入力スーパーインポーズ
電氣的視野移動	X-Y: ± 30 μ 皿シフト
	回転: 360 度
画像及び観察条件の記録媒体	HD
	M0(オプション)
	超高分解能写真撮影装置 (オプション)
画像及び観察条件の出力	デジタルプリンター (オプション)
	インスタント写真 (オプション)
	ロールフィルム (オプション)
制御用パソコン	PC-AT 互換機
	OS: MS-WINDOWS NT
排気方式	連続運転 (レンズ排気系)
	完全自動排気 (試料室排気系)
試料交換時間	10 分以内 (大気開放時)、 5 分以内 (予備排気室使用時)
到達真空度	2.6×10 ⁻⁴ Pa (2×10 ⁻⁶ Torr)
真空ポンプ	4 インチ油拡散ポンプ: 排気速度 280l/sec
	ターボ分子ポンプ (オプション)
	直結型油回転ポンプ: 排気速度 160l/min
	排気速度 20l/皿 in

	イオンポンプ:排気速度 20l/sec x 2 台
架台防振装置	エアサスペンション
安全装置	停電、断水、空圧劣化、真空劣化に 対して保護機能付き
診断機能	装置作動状態を CRT 上に表示

三次元測定系	
Z 方向分解能	1nm
ビーム走査	デジタル走査
測定方向	X 方向、Y 方向切換え
測定データ数	最大 4,096 点/LINE X
	最大 4,096 本/LINE Y
	但し、最大データ数 250,000 点
データ表示	19 インチ CRT(制御系と共通)
傾斜補正	オート及びマニュアル
ズーム機能	データの部分拡大
DISTANCE 機能	X,Y 方向の距離
	Z 方向の距離
	傾斜角度
データ記憶	HD
	FD
メモリー	256MB 以上
表示記録	デジタルカラープリンター (オプション)
	カラーハードコピー (オプション)
解析機能	等局線、面積率、山数、粒度、表面積、烏鰵図、 Ra,Rz、Rmax 等新 JIS 規格粗さパラメータ

構成	
標準構成	本体架台 1 式 操作電源部 1 式 モニター CRT1 式 パワーボックス 1 式 パソコン 1 式 ロータリーポンプ 2 式 試料ホルダ 3 種 標準補用品 1 式 取扱説明書 (普通紙)1 式 検査成績書 (普通紙)1 式
オプション	エネルギー分散型 X 線分析装置 カラーハードコピー X-Yプロッタ 試料コーティング装置 各種写真撮影装置 各種試料ホルダ 冷却水循環装置 圧搾空気用コンプレッサ 電顕試料エッチング装置 画像ファイリングシステム 画像プロセッサ イオンポンプパックアップ電源 カーボンコータ 反射電子検出器 試料室 N2 リークバルブ

設置条件	
電源	単相 100V ± 10 % 3kVA 50/60Hz1 系統
	単相 100V ± 10 % 2kVA 50/60Hz1 系統
設置端子	100 以下
	3 芯ケーブル中の 2 芯は電源用、1 芯は接地用。電源端子と接地端子とは 30cm 以内の距離に有ることが望ましい。
室温	20 ± 5
湿度	60 % 以下
床振動	0.3ga1 変位 2 μ 皿 P/P 以下
浮遊磁場	0.2 μ T 以下 (2mG 以下)
冷却水	圧力 1 /cm ² 以上 水量 2~4 l/min
	PT 1/4(メネジ)
	排水口 1
リーク用窒素ガス	4~6kg/ 2
	PT 1/4(メネジ)
圧搾空気	5~10 /cm ²
	PT 1/4(メネジ)
ロータリーポンプ排気ダクト	NW25
工事	弊社装置への電気配線、配管、及びその接続工事は、原則的にご用意願います。

寸法、重量	
	幅奥行高さ重量
本体系	750×925×1,650mm 350kg
操作系	1,200×800×750mm 100
油回転ポンプ	260×570×410mm 130kg
パワーボックス	360×700×460mm 40 { UPS(オプション) 装着時 }

付録E シャルピー衝撃試験破断面の解析結果

2次元局所 Hurst 数を用いて、シャルピー衝撃試験片破断面の解析を行い、脆性破面率を求めた結果について示す。

E.1 シャルピー衝撃試験片破断面・脆性破壊領域の同定手法

シャルピー衝撃試験は、

- 試験温度を変えて衝撃試験を行い、延性 - 脆性遷移温度を決定する
- 指定温度における材料の吸収エネルギーが設計規格・材料規格の要求を満たすか否かの判定

が目的である。その破断面のマクロ様相の模式図を Fig.E.1 に示す。

特に、延性 - 脆性遷移温度の特定のために、シャルピー衝撃試験破断面のフラクトグラフィが行われる。その中で、Fig.E.1 のような破断面から、延性破面領域と脆性破面領域の面積を比較することで、脆性 (もしくは延性) 破面率を求ることが行われる。破面率 50% のところが遷移温度である。従来の研究では、この破面率を目視による評価で行ってきた。ここでは、この破面率を定量的に評価する手法について述べる。

Fig.E.2 にシャルピー衝撃試験破断面における脆性・延性遷移領域を示す。また、目視により引いた脆性破面・延性破面の境界線を合わせて示す。上部には擬へき開が観察されるため、脆性破面である。また、下部はディンプルが観察されることから、延性破面である。

延性 (脆性) 破面から脆性 (延性) 破面へと遷移する際の局所 Hurst 数と破面内の位置の関係を Fig.E.3 に示す。ストレッチゾーンの場合とは異なり、どちらも複雑な様相であることから、脆性領域における局所 Hurst 数と延性領域における局所 Hurst 数の大小関係では遷移領域の判断は困難であると考えられる。従って、局所 Hurst 数がシャルピー衝撃試験片の脆性破面率算出に相応しい局所パラメータとは限らない。本章では適用した際の局所 Hurst 数の変化の調査を行った結果についてまとめる。

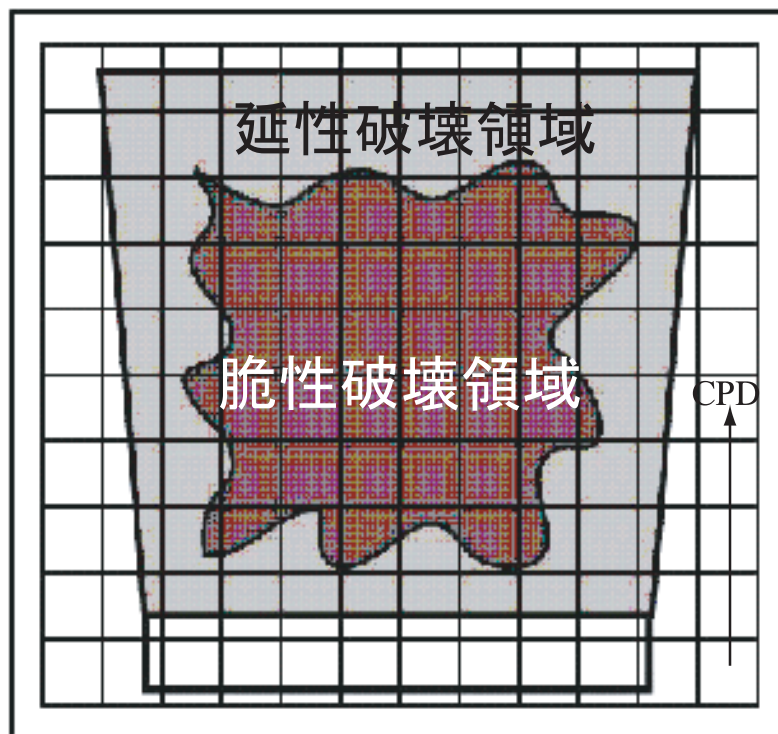


Fig. E.1: シャルピー衝撃破断面における破面のマクロ様相 (模式図)

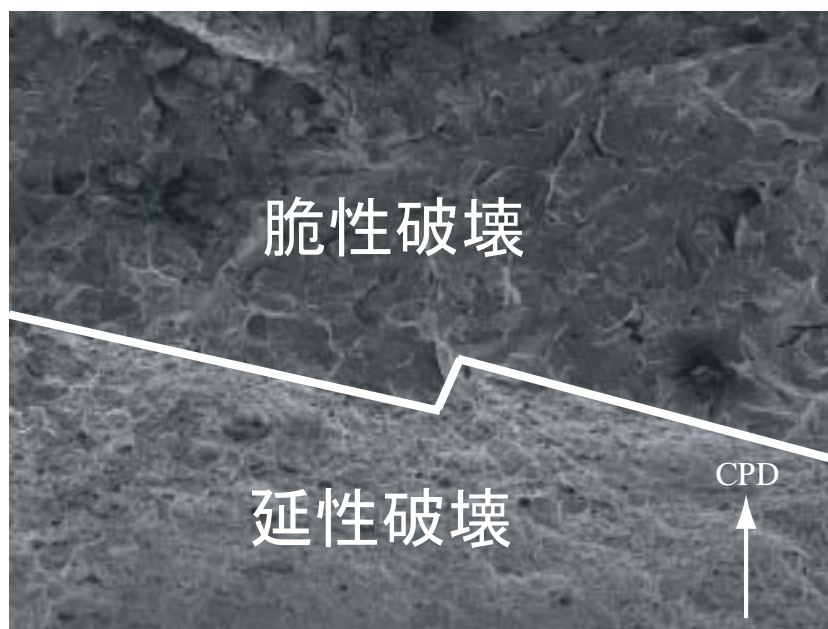


Fig. E.2: シャルピー衝撃破断面における，脆性・延性遷移領域 (観察倍率 $\times 400$)
CPD:き裂進展方向

局所 Hurst 数 ($\bar{H}(x_0, y_0)$) は，点 (x_0, y_0) に割り当てられる特徴量である．その値は，点 (x_0, y_0) の画素のみから計算される量ではなく，周辺の領域の特徴を含み，代表点として点 (n, i) に割り当てられている特徴量である．すなわち，脆性領域における局所 Hurst 数は脆性破面の様相のみを含んだ特徴量であり，延性領域における局所 Hurst 数も同様であるが，遷移領域における局所 Hurst 数は，両者の特徴を含んでいる特徴量である．従って，両者の Hurst 数よりも小さい (複雑) 値が遷移領域では計算されると考えられる．

従って，シャルピー衝撃試験における，脆性・延性・遷移領域部の局所 Hurst 数の推移は Fig.E.3 のようになると考えられる．脆性 (もしくは延性) の領域から遷移領域に移るにつれ，局所 Hurst 数は小さくなり，遷移領域を過ぎたら再び増加する傾向をもつと考えられる．本論文では，局所 Hurst 数が最小となる場合の位置を遷移点として決定した．

E.2 解析結果

シャルピー衝撃試験片の解析に用いた画像を Fig.E.4 に示す．観察倍率は 100 倍である．材料は SM490B で，溶接構造用圧延鋼材である．SM490B の化学成分と機械的性質をそれぞれ Table.E.1, E.2 に示す．観察に使用した SEM はエリオニクス製 ERA-8800FE である．Fig.E.4 は，100 倍で観察した画像を横方向に 12 枚，縦方向に 10 枚を張り合わせた画像である．解像度は 8192×8192 画素である．解析

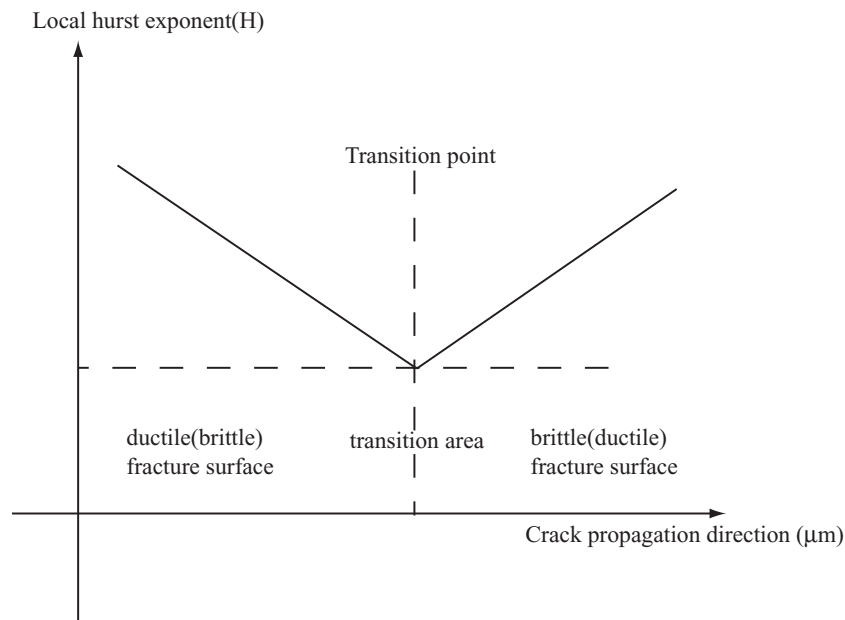


Fig. E.3: シャルピー衝撃破断面における脆性・延性遷移領域と局所 Hurst 数の関係

Fe	C	Si	Mn	P	S
Bal.	0.18	0.55	1.6	0.035	0.035

Table. E.1: SM490B・化学成分 (mass%)

は、遷移部画像の解析と、遷移部と周辺領域をつなぎ合わせた画像の解析を行った。つなぎ合わせた画像により、脆性領域と延性領域における局所 Hurst 数の飽和状態を調べる。

E.2.1 遷移部の解析

目視により遷移部と判断された画像の、解析結果を Fig.E.6 ~ Fig.E.29 に示す。2次元局所 Hurst 数を用いた解析結果と目視による解析結果を並べて示す。また、各画像の破断面内における位置を Fig.E.5 に示す。

耐力 (Mpa)	引張り強さ (Mpa)	伸び率%
325	490-610	17

Table. E.2: SM490B・機械的性質

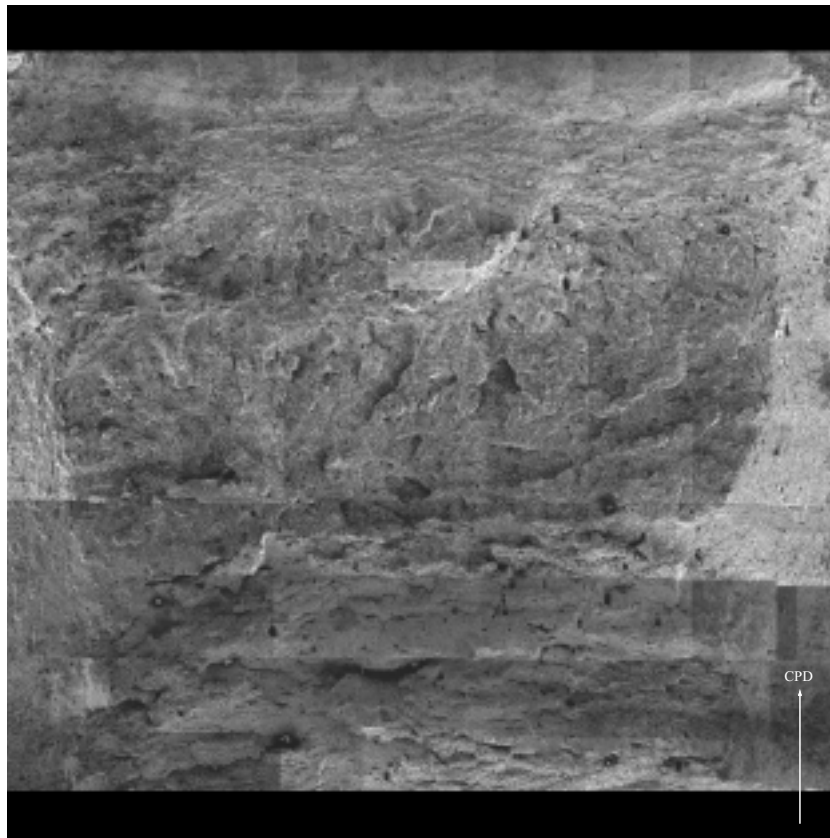


Fig. E.4: シャルピー衝撃試験片解析画像

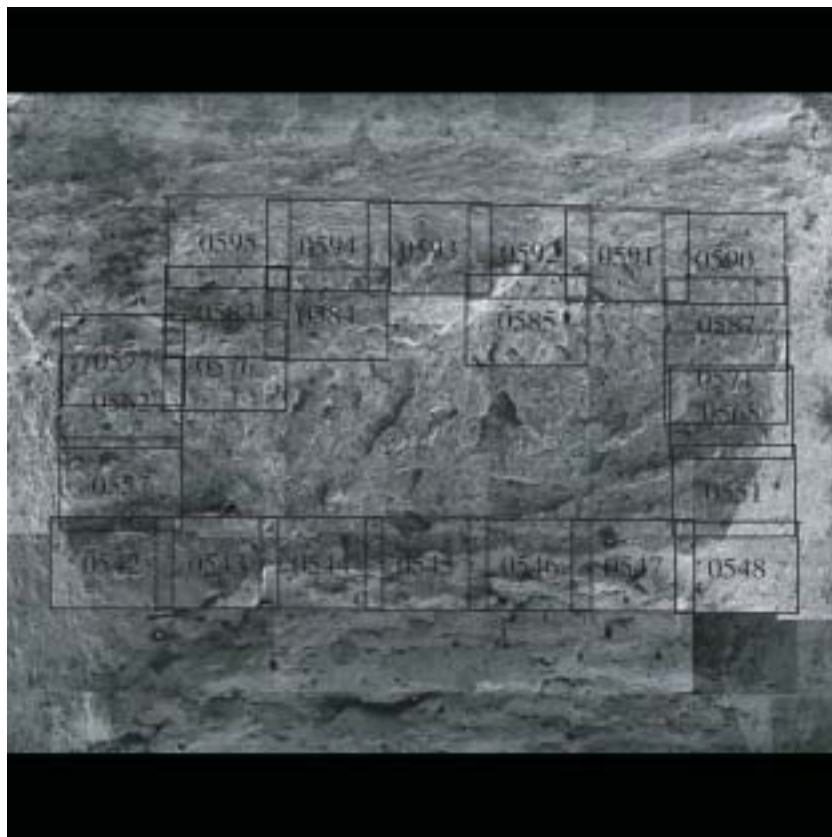


Fig. E.5: 破面番号と全体図の対応

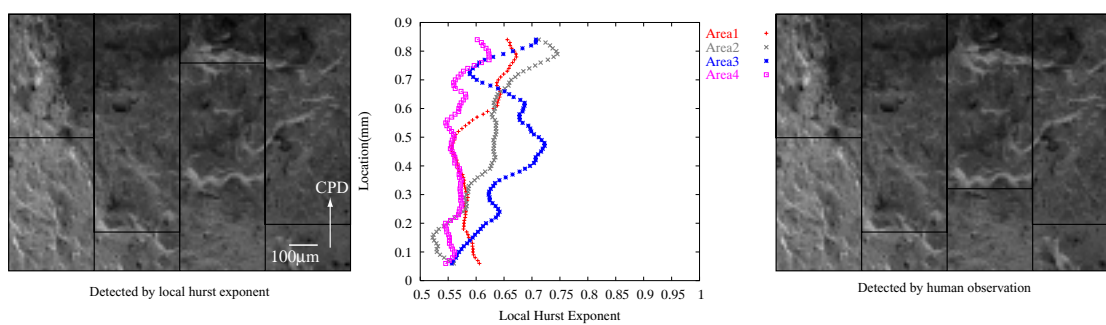


Fig. E.6: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0542)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

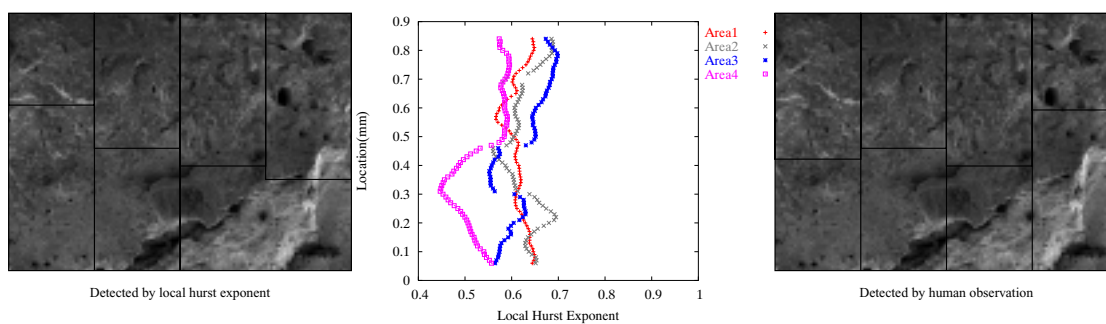


Fig. E.7: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0543)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

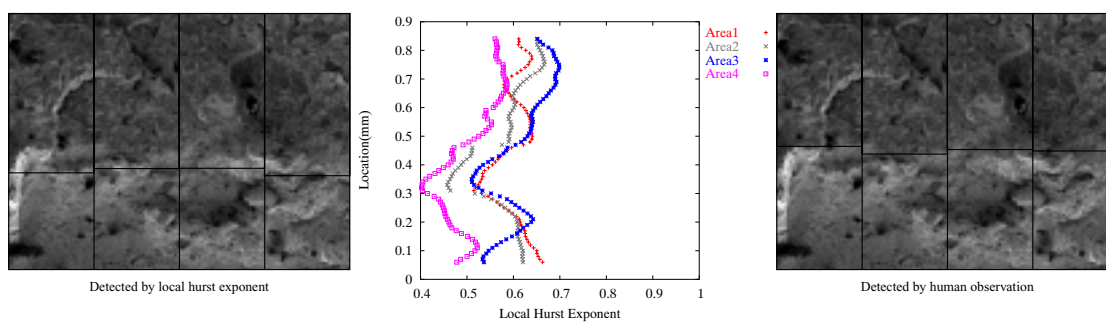


Fig. E.8: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0544)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

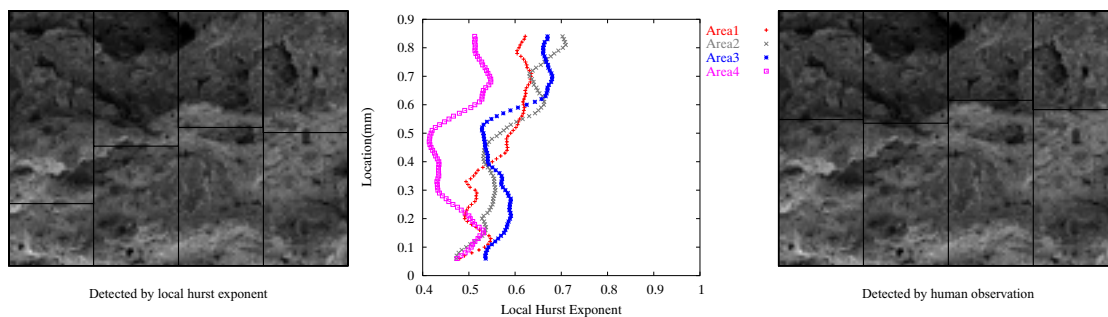


Fig. E.9: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0545)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

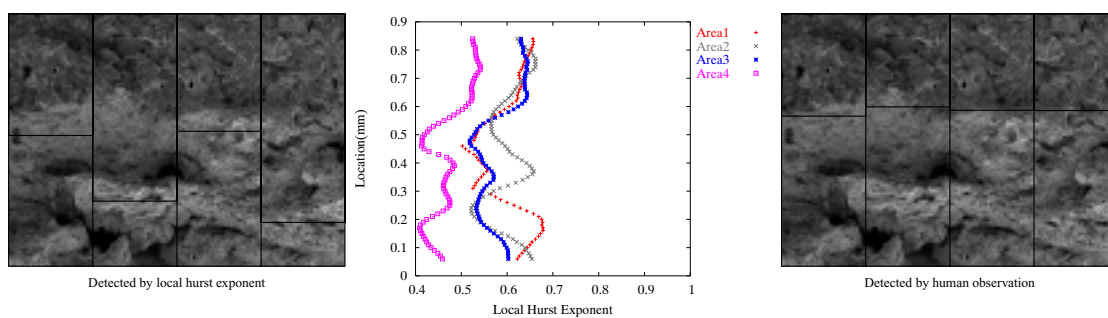


Fig. E.10: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0546)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

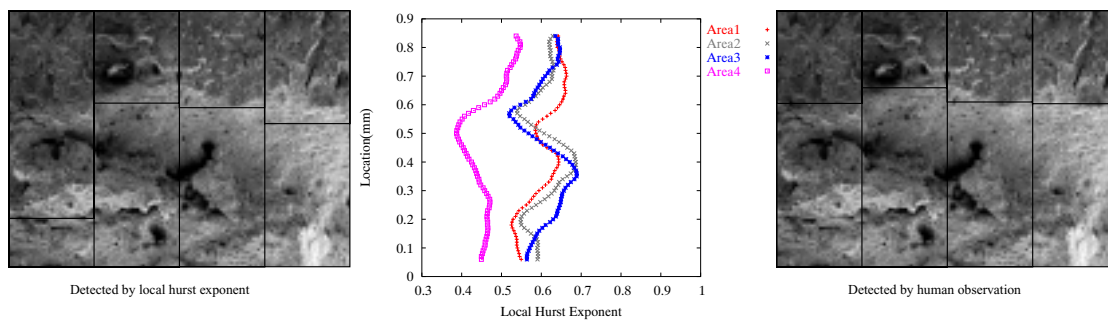


Fig. E.11: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0547)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

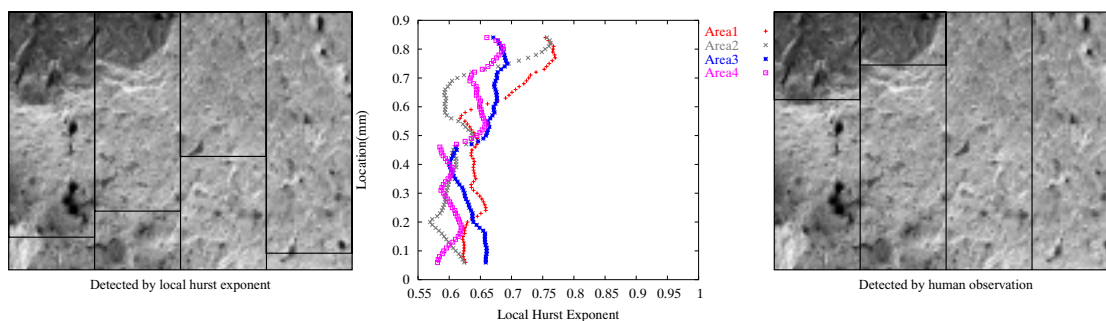


Fig. E.12: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0548)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

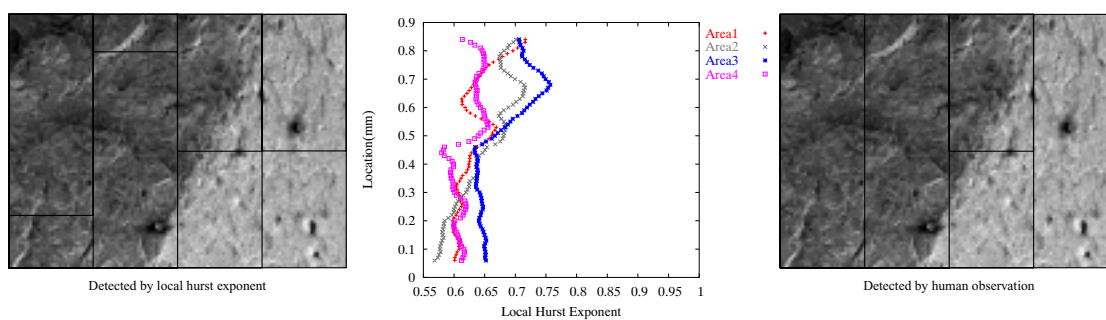


Fig. E.13: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0551)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

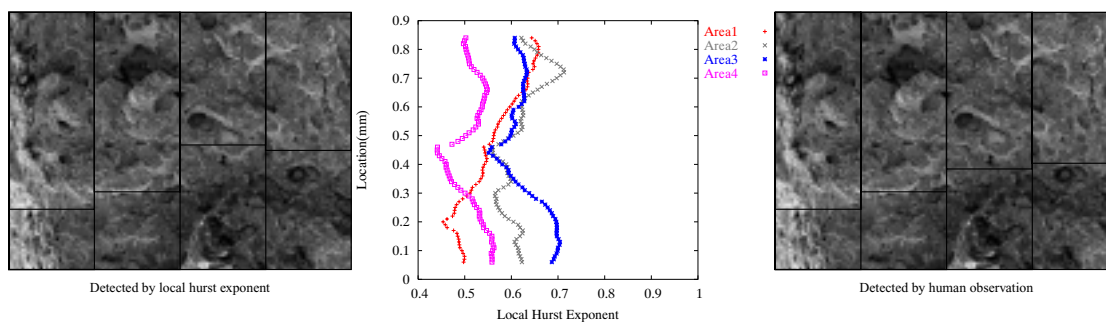


Fig. E.14: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0557)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

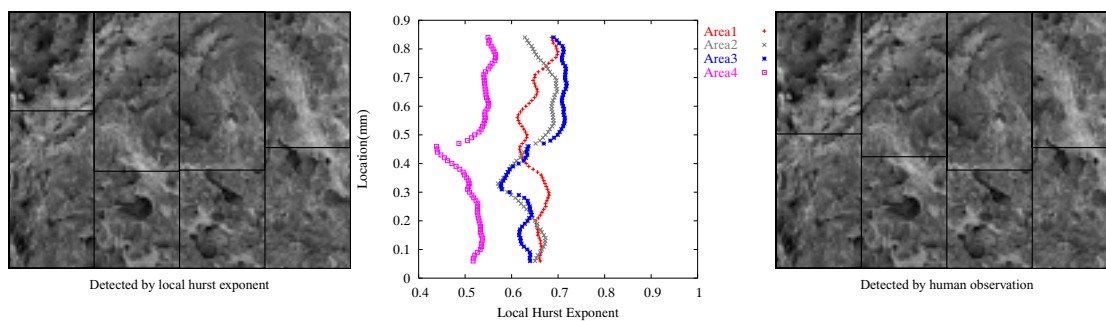


Fig. E.15: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0562)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

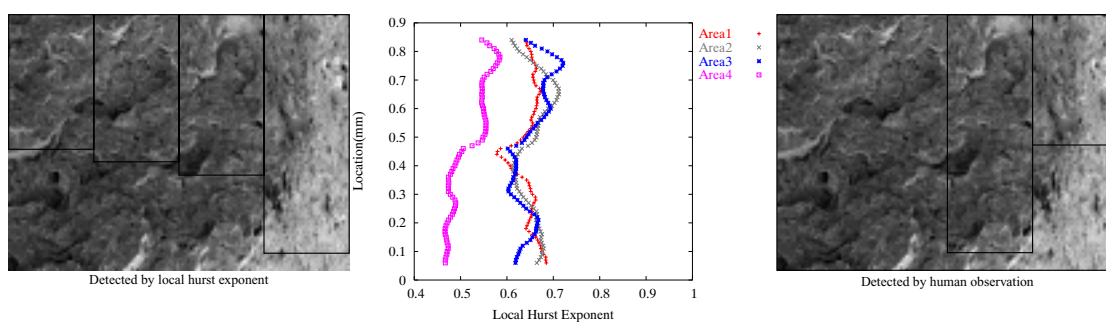


Fig. E.16: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0568)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

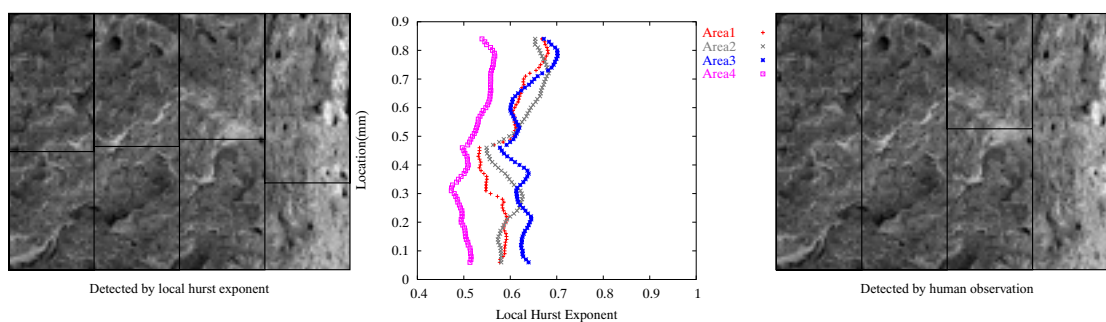


Fig. E.17: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0571)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

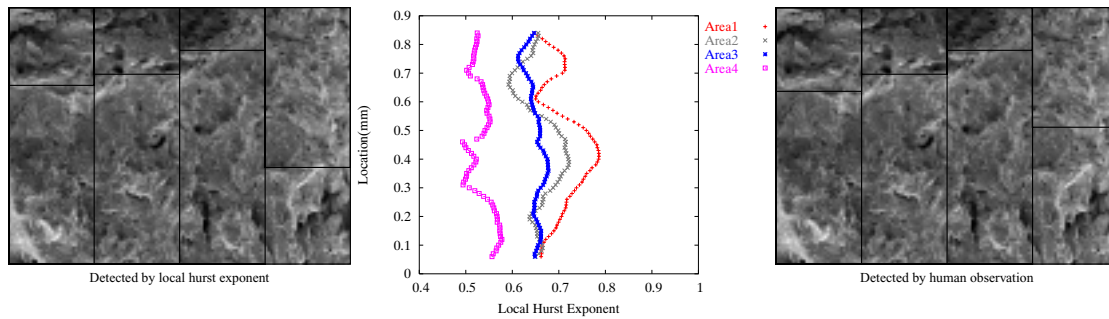


Fig. E.18: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0576)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

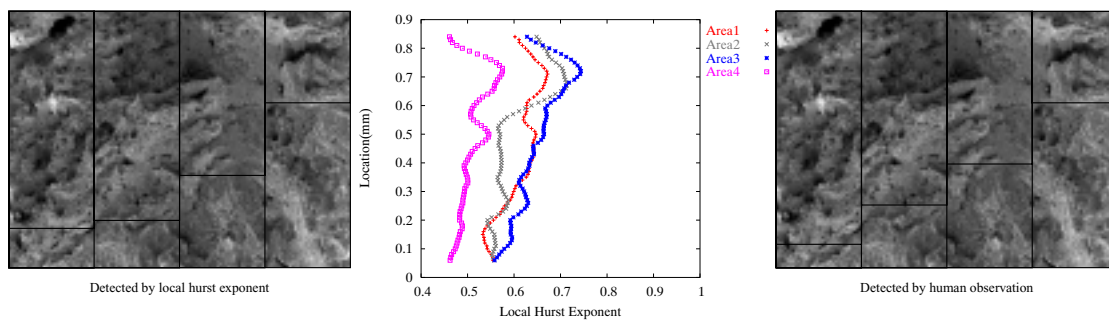


Fig. E.19: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0577)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

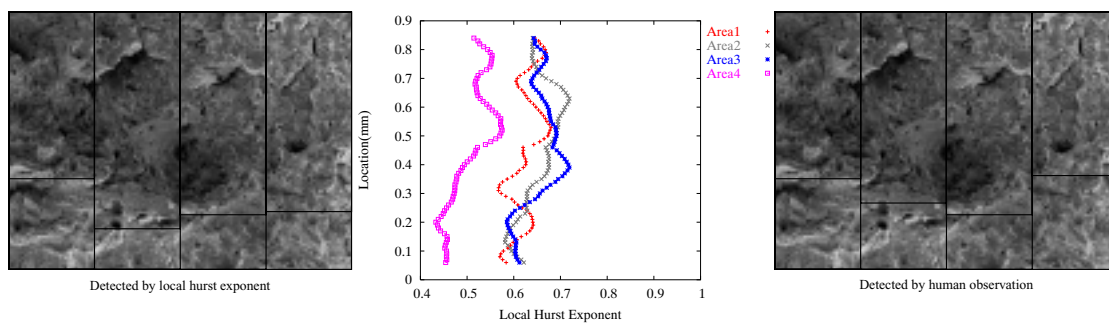


Fig. E.20: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0583)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

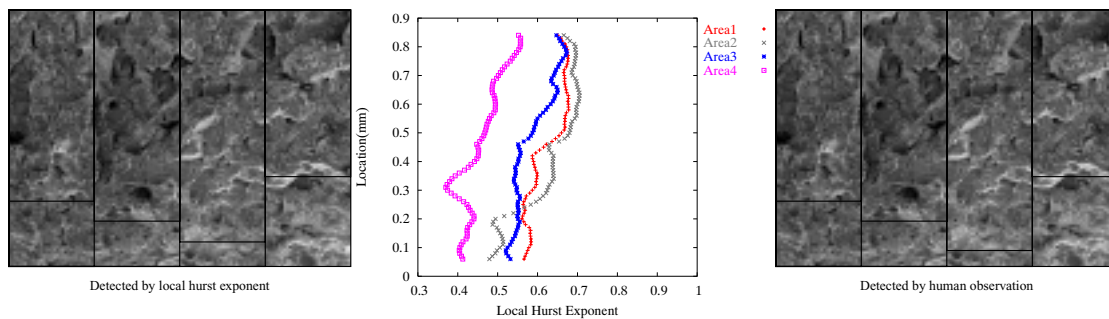


Fig. E.21: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0584)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

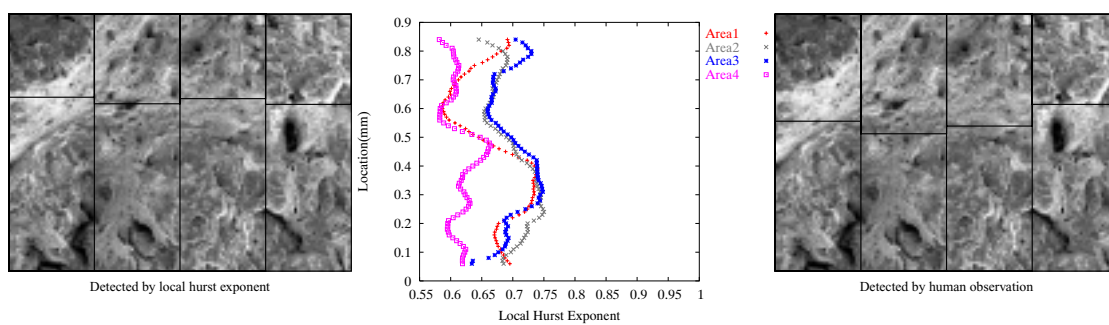


Fig. E.22: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0585)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

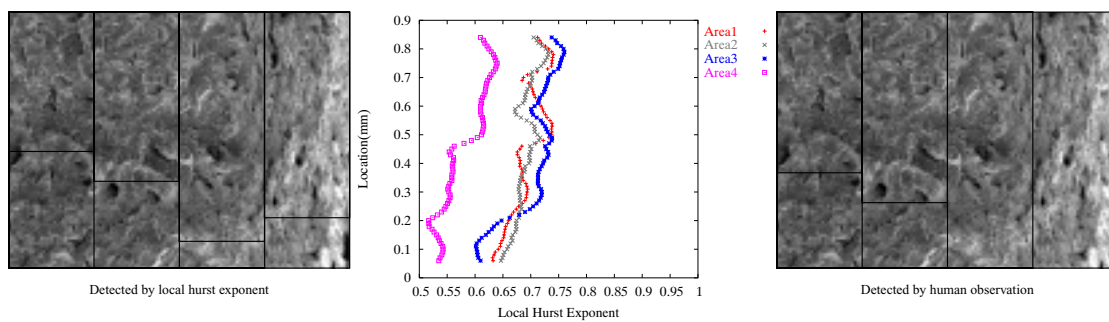


Fig. E.23: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0587)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

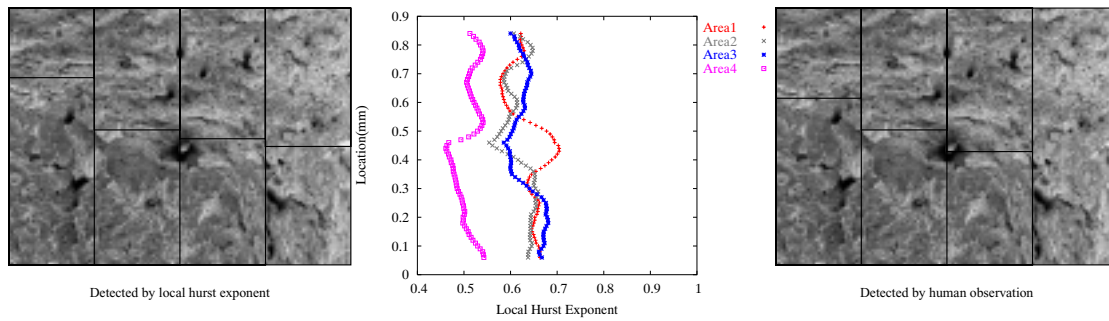


Fig. E.24: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0590)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

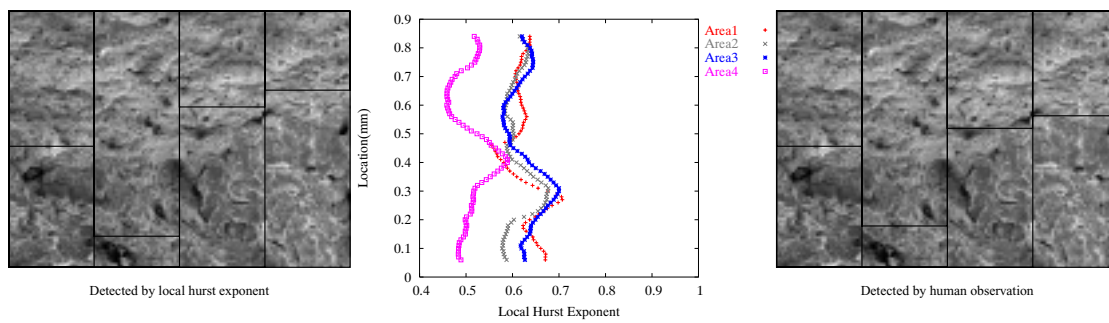


Fig. E.25: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0591)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

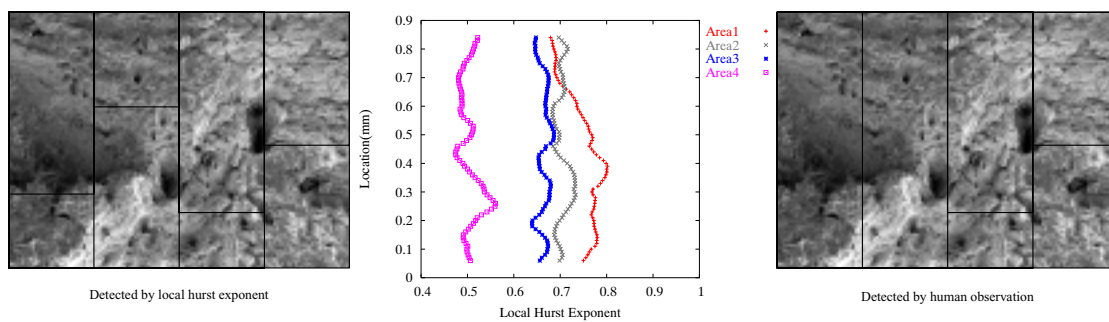


Fig. E.26: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0592)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

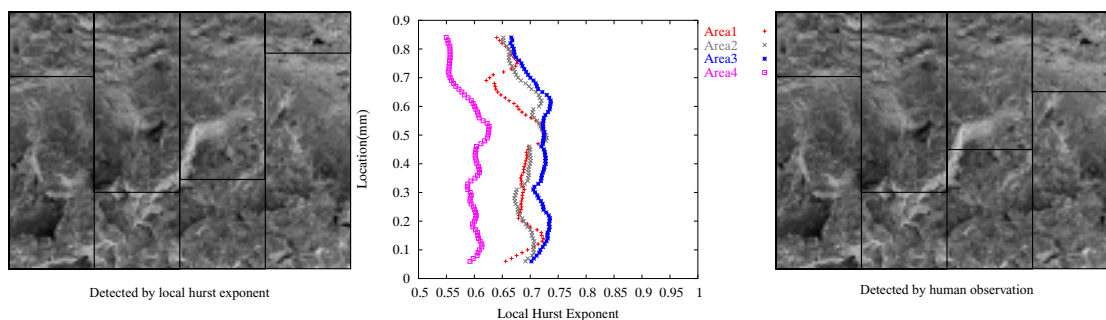


Fig. E.27: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0593)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

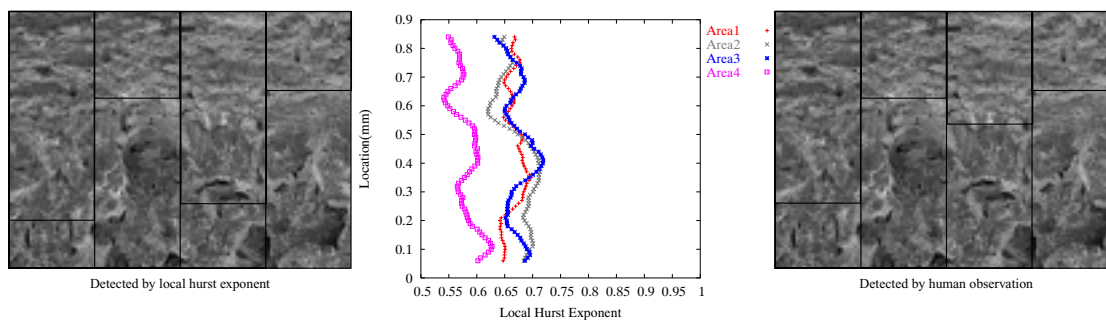


Fig. E.28: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0594)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)

目視による脆性破壊の領域の判定結果を Fig.E.30 に示す．破断面を縦横方向に 8×8 分割した上で，個々の小領域が脆性破面か延性破面かの判別を行った．判別結果から求まる脆性破面率は，26.7%である．

Fig.E.31 に脆性破壊領域の判定結果を示す．Fig.E.31 は，Fig.E.6 ~ Fig.E.29 の結果を重ね合わせたものである．個々の構成画像の解析の際に用いたパラメータはそれぞれ， $w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$ である．中央部が脆性破壊領域と判定され，脆性破面率は 32%である．

E.2.2 遷移部前後の画像を含んだ解析

次に，脆性領域と延性領域における局所 Hurst 数の飽和状態を調べる．つなぎ合わせた画像を作成し，局所 Hurst 数の計算を行った．解析結果を Fig.E.32 に示す．a) は解析画像であり，白線は目視により引いた脆性延性境界である．b) は横軸が局所 Hurst 数，縦軸がき裂進展方向位置である．局所 Hurst 数は画像横方向に平均化した値をプロットした．

脆性延性境界部において，局所 Hurst 数が極小値を取ることがわかる．また，そ

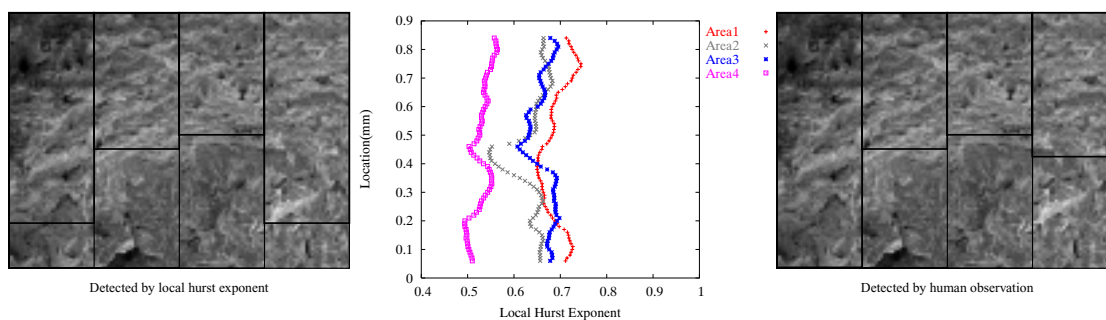
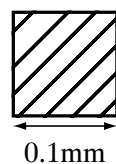
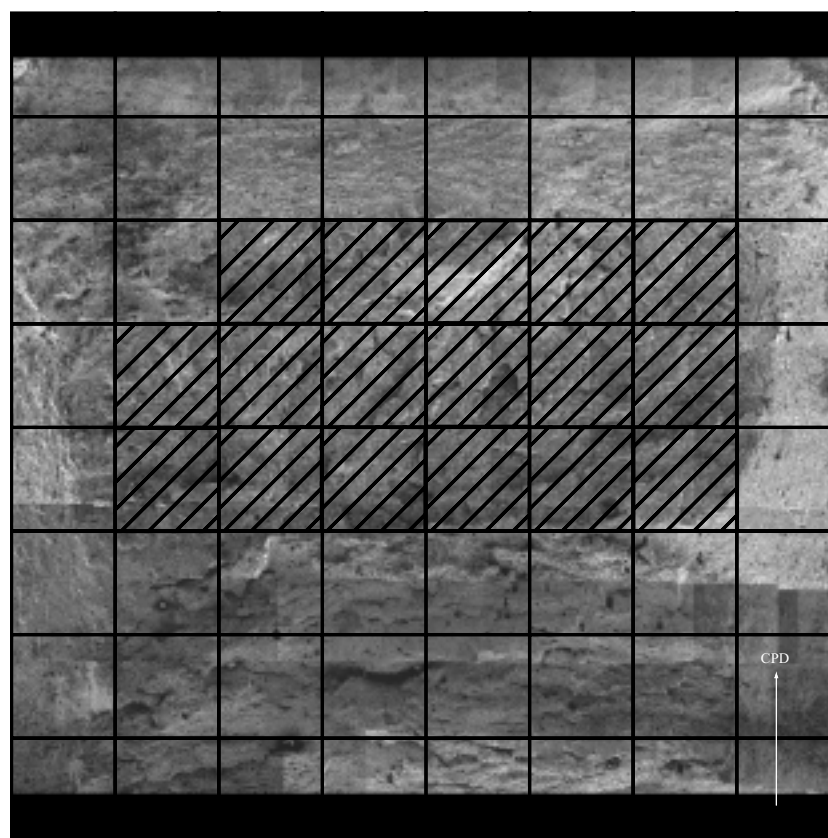


Fig. E.29: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (破面番号 0595)($w = 50\mu m, w_t = 300\mu m$)



Brittle fracture surface

Brittle fracture surface ratio = 26.7%

Fig. E.30: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 (目視)

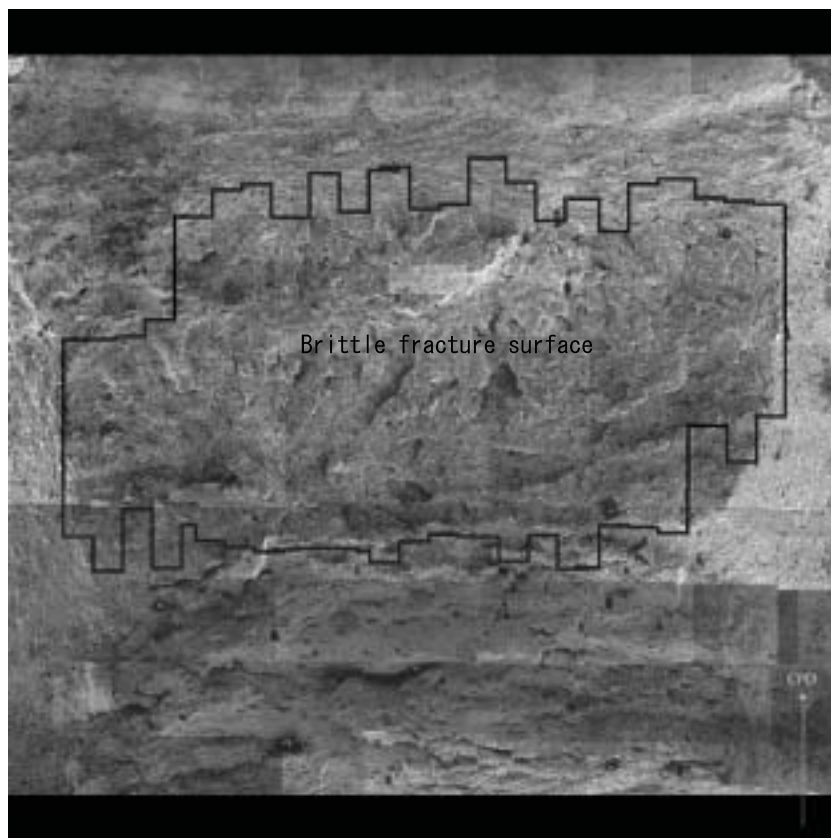


Fig. E.31: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 ($w = 50\mu m$, $w_t = 300\mu m$) 脆性破面率=32%

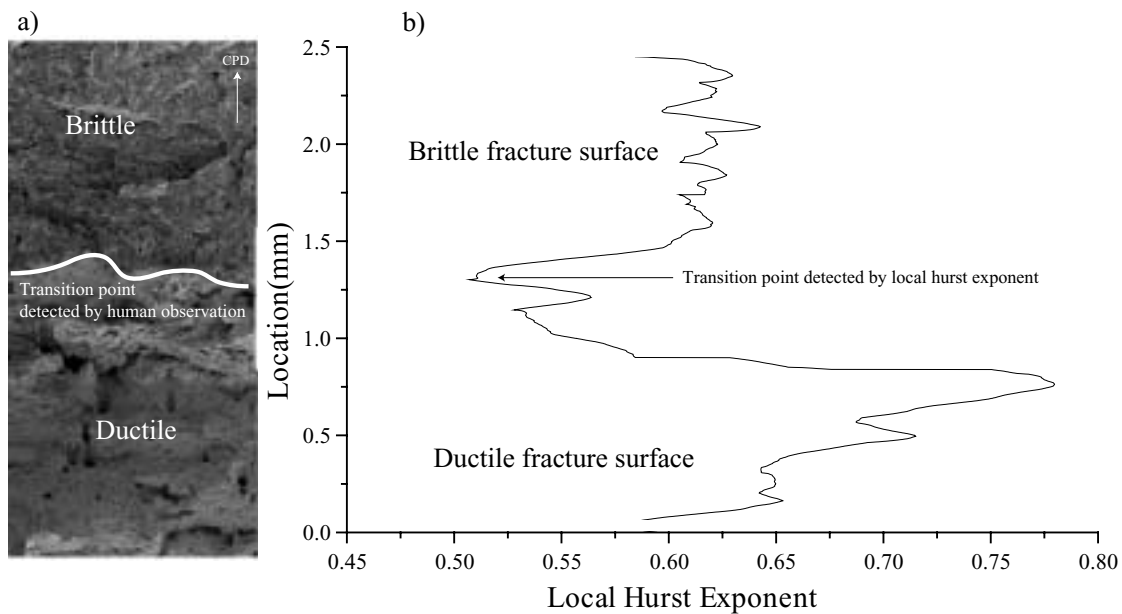


Fig. E.32: シャルピー衝撃試験片・脆性領域判定結果 ($w = 50\mu\text{m}$)

の領域が目視により判定した境界の位置とよく一致していることがわかる．従って，Fig.E.3に示すモデルにより脆性延性境界部の推定が可能であることがわかる．

延性破面部は局所 Hurst 数が大きなゆらぎを持って変化している．逆に脆性破面部は，ゆらぎが小さく 0.6~0.65 の範囲に収まっている．

延性破面部は，破面観察から大きな凹凸の中にディンプルが形成されていることがわかる．一方，脆性破面部は平坦な構造の中にファセットが形成されている．従って，延性破面の局所 Hurst 数は大きな凹凸の影響とディンプルの両者の特徴を持つため，脆性破面部と比較して局所 Hurst 数のゆらぎが大きくなる (収束しにくい) と考えられる．

研究業績

査読論文

1. 山際謙太・酒井信介・横堀壽光，フラクタル解析を用いた TiAl 高温域破壊機構の特性化，日本材料強度学会誌，Vol.35，No.3，Sep. 2001．
2. Kenta YAMAGIWA, Satoshi IZUMI, Shinsuke SAKAI, Estimate of Fatigue on using Wavelet Transform, MESOMECHANICS OF COMPUTATION AND DESIGN OF USE-SPECIFIC MATERIALS, pp 306-314.
3. 山際謙太・泉 聡志・酒井信介，ウェーブレット変換を用いた疲労破断面のストライエーション領域同定手法，材料（掲載可）
4. A.Toshimitsu Yokobori, Jr., Shinsuke Sakai, Kenta Yamagiwa and Nobori Yoshida, Quantitative characterization of fracture surface of full lamellar TiAl under high temperature creep and fatigue conditions on the basis of fractal concept, STRENGTH, FRACTURE AND COMPLEXITY, Vol.1, No.1, pp19-30, 2003.

講演論文

1. 光石 衛・山際 謙太・飯塚 恭弘，テレ・マイクロ・サ - ジェリ・システム用シミュレ - タの試み，ロボティクス・メカトロニクス講演会'98(日本機械学会)，仙台，1998．
2. 酒井信介・池田政隆・山際謙太，TiAl 高温域破壊機構の破面画像処理，超強度・高信頼性のナノ・巨視融合技術シンポジウム(日本学術振興会第 129 委員会)，東京，May.1999．
3. 酒井信介・池田政隆・山際謙太，TiAl 高温域破壊機構の破面画像処理，第 44 回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集(日本材料強度学会)，東京，Sep.1999．
4. 酒井信介・山際謙太，フラクタル解析と統計処理の併用による TiAl の高温域破壊機構の特性化，第 17 回材料・構造信頼性シンポジウム講演論文集(日本材料学会)，東京，Nov.1999．
5. 酒井信介・山際謙太・橘鷹伴之，フラクタル解析を用いた TiAl 高温域破壊機構の特性化，第 45 回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集(日本材料強度学会)，東京，May.2000．

6. 横堀壽光・酒井信介・山際謙太・吉田騰，フラクタル解析による完全層状 TiAl 金属間化合物のクリープ疲労破面定量評価，第 46 回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集 (日本材料強度学会)，東京，May.2001 .
7. 酒井信介・横堀壽光・山際謙太，フラクタル解析を用いた 9Cr 鋼及び 12Cr 鋼高温域破壊機構の特性化，第 46 回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集 (日本材料強度学会)，東京，May.2001 .
8. 橘鷹伴幸・泉 聡志・山際謙太・原 祥太郎・酒井信介，局所自己アフィンフラクタルによる破壊遷移部の同定，日本機械学会 2001 年度 年次大会，福井，Aug.2001
9. 横堀壽光・酒井信介・山際謙太・吉田 騰，マルチフラクタルの概念に基づく高温クリープ・疲労条件下での TiAl 金属間化合物破面の定量的解析，第 45 回日本学術会議材料研究連合講演会 (日本機械学会・日本材料学会)，東京，Sep.2001.
10. 酒井 信介・泉 聡志・姜 軍・山際 謙太，高精度破断面観察手法の開発と特性化への応用，第 47 回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集 (日本材料強度学会)，東京，Mar.2002.
11. 山際謙太・泉 聡志・酒井信介，ウェーブレット変換を用いた疲労破面画像処理，第 51 期日本材料学会学術講演会，高松，May.2002
12. 山際謙太・泉 聡志・酒井信介，ウェーブレット変換を用いた破面画像の特性化，日本機械学会 2002 年度年次大会，東京，Sep.2002
13. 山際謙太・泉 聡志・酒井信介，ウェーブレット解析を用いた A2017-T4 疲労破面画像特性化，第 48 回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集 (日本材料強度学会)，東京，Mar.2003.
14. 山際謙太・泉 聡志・酒井信介，ウェーブレット変換を用いたストライエーション破面率の定量評価手法，日本材料学会 2003 年度年次大会，東京，May.2003.
15. 岡島智史・山際謙太・泉 聡志・酒井信介，CABIN の VR を用いた破面三次元観察技術，日本機械学会関東学生会第 42 回学生員卒業研究発表講演会，横浜，May.2003.
16. 山際謙太・泉 聡志・酒井信介，ウェーブレット変換を用いた疲労破面特性化手法，日本機械学会 M&M2003 材料力学部門講演会，富山，Sep.2003

受賞

1. 平成 14 年度日本材料強度学会論文賞受賞

参考文献

- [1] 株式会社エリオニクス. ERA-4000 電子線三次元粗さ解析装置取扱説明書. 株式会社 エリオニクス.
- [2] 株式会社エリオニクス. ERA-8800FE 電子線三次元粗さ解析装置取扱説明書. 株式会社 エリオニクス.
- [3] 箕島弘二, 長崎達夫, 駒井謙治郎. コンピュータ画像処理技術を用いた破面性状の自動判別. 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 56, No. 525, pp. 298–303, 1990.
- [4] 箕島弘二, 尾嶋正樹, 駒井謙治郎. 高強度鋼の SCC き裂進展に及ぼす応力繰返し速度・波形効果と粒界・粒内破面の自動判別. 日本機械学会論文集 (A), Vol. 54, No. 500, pp. 670–678, 4 1988.
- [5] 駒井謙治郎, 箕島弘二. 画像処理フラクトグラフィの現状と将来 (1). 機械の研究, Vol. 40, No. 5, pp. 553–560, 1988.
- [6] 駒井謙治郎. 構造材料の環境強度設計. 養賢堂, 1993.
- [7] 高安秀樹. “フラクタル”. 朝倉書店, 1986.
- [8] 高梨正祐 泉聡志 酒井信介三浦直樹. 表面あらさの相違を利用したストレッチゾーン幅の定量解析. 第 11 回破壊力学シンポジウム講演論文集, pp. 199–204, 2003.
- [9] R.E.Peterson. *Handbook of Experimental Stress Analysis*, p. 593. Wiley, 1950.
- [10] Derek Hull. *Fractography*. Cambridge University Press, 1999.
- [11] C. A. Zappfe and M. C. Clogg. Fractography - a new tool for metallurgical research. *Trans. ASM*, No. 34, pp. 71–107, 1945.
- [12] C. A. Zappfe and G. A. Moore. A microfractographic study of the cleavage of hydrogenized ferrite. *Trans. AIME*, Vol. 145, p. 335, 1943.
- [13] Bernard M. Strauss and Suil K. Putatunda. *Quantitative Methods in Fractography, STP 1085*. ASTM, 1990.

-
- [14] 小寺沢良一. “フラクトグラフィとその応用”. 日刊工業新聞社, 1981.
- [15] 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会編. “フラクトグラフィ”. 丸善株式会社, 2000.
- [16] 日本電子顕微鏡学会関東支部編. 走査電子顕微鏡の基礎と応用. 共立出版, 1983.
- [17] H. Saka and S. Abe. Fib/hvem observation of the configuration of cracks and the defect structure near the cracks in si. *J. Electron Microsc.*, Vol. 1, pp. 45–57, 1997.
- [18] 酒井信介, 森田英明, 岡村弘之, 高野太刀雄. 走査型電子顕微鏡による微視破面の三次元解析. 日本機械学会論文集 (A), Vol. 54, No. 507, pp. 2061–2068, 11 1988.
- [19] 駒井謙治郎, 箕島弘二, 森田宏光. ディンプルとストレッチゾーンの3次元定量解析. 材料, Vol. 39, No. 444, pp. 1311–1316, 1989.
- [20] 駒井謙治郎, 菊地純. 疲労破面の3次元画像解析. 材料, Vol. 34, No. 381, pp. 648–652, 1984.
- [21] 駒井謙治郎, 箕島弘二, 菊池純, 野口昌利, 金貴植. SEM 画像の三次元画像構築技術. 日本機械学会論文集 (A), Vol. 53, No. 494, pp. 1961–1965, 10 1987.
- [22] 駒井謙治郎, 野口昌利. 腐食疲労破面の3次元画像解析. 鉄と鋼, Vol. 72, No. 15, pp. 2126–2132, 1986.
- [23] 駒井謙治郎, 箕島弘二. 画像処理フラクトグラフィの現状と将来 (2). 機械の研究, Vol. 40, No. 6, pp. 660–664, 1988.
- [24] Kohji Minoshima, Tatsuya Suezaki, and Kenjiro Komai. Genetic algorithms for high-precision reconstructions of three dimensional topographies using stereo fractographs. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 23, No. 5, pp. 435–444, 2000.
- [25] Tadao Suginuma. Measurement of surface topography using sem with two secondary electron detectors. *J. Electron Microsc.*, Vol. 34, No. 4, pp. 328–337, 1985.
- [26] 駒井謙治郎, 箕島弘二. 画像処理フラクトグラフィの現状と将来 (1). 機械の研究, Vol. 40, No. 5, pp. 553–560, 1988.
- [27] Benoit B. Mandelbrot. Fractal character of fracture surfaces of metals. *NATURE*, Vol. 308, pp. 721–722, April 1984.

- [28] 住吉英志, 高野太刀雄, 増田千利. ヘキ開ファセット破面領域の3次元解析アルゴリズムの開発とその鉄鋼材料のぜい性破面解析への応用. 鉄と鋼, No. 2, pp. 298–305, 1991.
- [29] 泉聡志・橘鷹伴幸・原祥太郎・酒井信介. 局所自己アフィンフラクタルによる破壊遷移部の同定. 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 66, No. 667, pp. 456–463, 2002.
- [30] Alexander S. Balankin. The effect of fracture surface morphology on the crack mechanics in a brittle material. *International Journal of Fracture*, Vol. 76, pp. R63–R70, 6 1995.
- [31] 酒井信介 池田政隆山際謙太. TiAl 高温域破壊機構の破面画像処理. 先端材料強度のナノ・巨視融合技術シンポジウム講演論文集, 3 1999.
- [32] 古川勝明, 村上敬宜, 西田新一. ストライエーションから実働荷重を推定する方法について. 材料, Vol. 54, No. 3, pp. 340–345, 1996.
- [33] 酒井 達雄・酒井 孝・上野明. 金属材料の引張破面性状不規則性の定量評価におけるフラクタル解析の適用. 第 48 期学術講演会講演論文集, pp. 265–266. 社団法人 日本材料学会, 5 1999.
- [34] 数値的破面解析法に関する研究分科会. ディンプル・リバーパターン破面のフラクタル性とカオス性, 11 1998.
- [35] 池庄司 敏孝・塩谷義. ”脆性-延性遷移と破断面のフラクタル次元の変化”. 日本機械学会第 4 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, pp. 49–50, 東京, 1996.
- [36] 鈴木秀人・沼田真一・片平和俊・菊池紀彦. ”複合組織型 TiAl 合金に発生する分布疲労き裂のフラクタルモデルと余寿命評価”. 日本機械学会第 75 期通常総会講演会講演論文集 (II), pp. 646–647, 1998.
- [37] 池庄司敏孝. “材料の破壊における延性脆性遷移と破面のフラクタル性の関係についての研究”. PhD thesis, 東京大学大学院, 1998.
- [38] Alberto Carpinteri and Francesco Mainardi. ”*FRACTALS AND FRACTIONAL CALCULUS IN CONTINUUM MECHANICS*”. SpringerWien-NewYork, 1997.
- [39] 瀬口靖幸. 材料強度研究のための画像処理技術とその応用. 材料, Vol. 35, No. 389, pp. 95–105, 1986.

- [40] 松岡三郎, 住吉英志, 石川圭介. 走査型トンネル顕微鏡によるクロム脆性破面の観察とフラクタル特性. 日本機械学会論文集 (A), Vol. 56, No. 530, pp. 2091–2097, 1990.
- [41] 箕島弘二, 長崎達夫, 駒井謙治郎. 画像処理技術を用いたシャルピ衝撃破面のファセット破面単位の定量解析. 日本機械学会論文集 (A), Vol. 54, No. 504, pp. 1559–1565, 8 1988.
- [42] Lech Czarnecki, Andrzej Garbacz, and Joanna Kurach. On the characterization of polymer concrete fracture surface. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 23, pp. 399–409, 2001.
- [43] L.T. Dougan, P.S. Addison, and W.M.C. McKenzie. Fractal analysis of fracture. *Mechanical Research Communications*, Vol. 27, No. 4, pp. 383–392, 2000.
- [44] 酒井信介, 荻原聡, 岡村弘之, 高野太刀雄. マイコン援用による SEM 像の立体構造解析. 圧力技術, Vol. 21, No. 6, pp. 2–5, 1983.
- [45] T. Kobayashi and D. Shockey. Frasta: A new way to analyze fracture surfaces. *Adv. Materials and Processes*, Vol. 140, No. 5, pp. 28–34, 1991.
- [46] T. Kobayashi and D. Shockey. Fracture analysis via frasta. *Adv. Materials and Processes*, Vol. 140, No. 6, pp. 28–34, 1991.
- [47] T. Kobayashi and D. Shockey. A fractographic investigation of thermal embrittlement in cast duplex stainless steel. *Metallurgical Transactions*, No. 18A, pp. 1941–1949, November 1987.
- [48] 住吉英志, 松岡三郎, 石川圭介, 二瓶正俊. STM によるモリブデン脆性破面の観察とフラクタル特性. 日本機械学会論文集 (A), Vol. 57, No. 541, pp. 2237–2243, 1991.
- [49] F. M. BORODICH. Some fractal models of fracture. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 45, No. 2, pp. 239–259, 1997.
- [50] R.H.DAUSKARDT, F.HAUBENSAK, and R.O.RITCHIE. On the interpretation of the fractal character of fracture surfaces. *Acta metall mater*, Vol. 38, No. 2, pp. 143–159, 1990.
- [51] 大塚昭夫, 森要, 川村貴保. 軟鋼における疲労き裂進展速度, 進展様式および ΔK との関係. 日本機械学会論文集, A 編, No. 45, pp. 1312–1322, 1979.

-
- [52] 姜軍. SEMによる金属破断面の三次元解析の高精度化と破断面特性化への応用. PhD thesis, 東京大学, 2002.
- [53] 岡島智史・山際謙太・泉聡志・酒井信介. CABINのVRを用いた破面三次元観察技術. 日本機械学会関東学生会第42回学生員卒業研究発表講演会, 横浜, May 2003.
- [54] 日野幹雄. スペクトル解析. 朝倉書店, 1977.
- [55] 古川勝明, 村上敬宜, 西田新一. ストライエーションから実労荷重を推定する方法について. 材料, Vol. 45, No. 3, pp. 340–345, 1996.
- [56] 尾崎弘・谷口慶治・小川秀夫. 画像処理 その基礎から応用まで. 共立出版株式会社, 11 1983.
- [57] 高木幹雄・下田陽久. 画像解析ハンドブック. 東京大学出版会, 1 1991.
- [58] 長尾真. “画像認識論”. コロナ社, 1983.
- [59] Petr Hausild, Ivan Nedbal, Clotilde Berdin, and Claude Prioul. The influence of ductile tearing on fracture energy in the ductile-to-brittle transition temperature range. *Materials Science and Engineering*, Vol. A355, pp. 164–174, 2002.
- [60] 山際謙太. “フラクタル解析を用いた金属破断面の特性化と金属破壊機構解明への応用”. Master’s thesis, 東京大学大学院, 2000.
- [61] O.Nes I.Simonsen, H.Hansen. *Phys. Rev. B*, No. 58, pp. 2779–2787, 1998.
- [62] R.M. Haralick, Shanmugam. K., and I. Dinstein. Textural features for image classification. *IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, No. SMC-3(6), pp. 610–621, 1973.
- [63] 小林英男. フラクトグラフィと破壊力学「破壊じん性」. 材料, Vol. 29, pp. 198–203, 4 1980.
- [64] 小林英男. “破壊力学”. 共立出版, 1993.
- [65] 榊原進. ウェーブレットビギナーズガイド. 東京電機大学出版局, 1995.
- [66] 中野宏毅・山本鎮男・吉田靖夫. ウェーブレットによる信号処理と画像処理. 共立出版株式会社, 1999.
- [67] Charles K. Chui. “*An introduction to wavelets*”. Academic Press, 1992.

-
- [68] Bruno Josso, David R. Burton, and Michael J. Lalor. Wavelet strategy for surface roughness analysis and characterization. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 191, pp. 829–842, 2001.
- [69] Jiebo Luo and Andreas E. Savakis. Self-supervised texture segmentation using complementary types of features. *Pattern Recognition*, Vol. 34, pp. 2071–2082, 2001.
- [70] Franci Lahajnar and Stanislav Kovacic. Rotation-invariant texture classification. *Pattern Recognition Letters*, Vol. Article in press, , 2003.
- [71] Rutuparna Panda and B.N. Chatterji. Unsupervised texture segmentation using tuned filters in gaborian space. *Pattern Recognition Letters*, Vol. 18, pp. 445–453, 1997.
- [72] N.Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Sys., Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-9, No. 1, pp. 62–66, 1979.
- [73] 大津. 判別および最小 2 乗基準に基づく自動しきい値選定法. 電気通信学会論文誌, Vol. J63-D, No. 4, pp. 349–356, 1980.
- [74] J.Kittler and J.Illingworth. Minimum error thresholding. *Pattern Recognition*, Vol. 19, No. 1, pp. 41–47, 1986.
- [75] マンフッド・シュレーダー著, 竹迫一雄訳. フラクタル・カオス・パワー則. 森林出版, 1997.
- [76] ASTM International. *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. Designation:E1820-01, 2001.
- [77] 三浦直樹, 長谷川邦夫, 久恒眞一, 鹿島光一, 宮崎克雅. 電力中央研究所研究報告書 t01010. Technical report, 2002.
- [78] 池田政隆. “金属破断面トポロジーの解析手法の開発および金属破断面の特性化への応用”. Master’s thesis, 東京大学大学院, 1998.
- [79] 大中康馨・松浦充宏. 地震発生の物理学. 東京大学出版会, 2002.
- [80] 横堀壽光・柴田真之. In Situ 観察による TiAl 金属間化合物の高温クリープおよび疲労破壊機構. 日本材料強度学会学術講演会講演論文集, p. 5, 1997.
- [81] 鳥塚史郎, 井上忠信, 長井寿. 塑性と加工, Vol. 42-483, pp. 287–292, 2001.
- [82] 國尾 武・中沢 一・林 郁彦・岡村弘之. “破壊力学実験法”. 朝倉書店, 1986.

謝辞

本論文は、東京大学酒井信介教授の大変に親切なご指導の下、著者が修士課程(1998年)から博士課程(2003年)において行った研究をまとめ、総括したものです。酒井先生には、研究を始めるにあたっての基本的な事柄に始まり、特に論文をまとめる事等、研究活動全般にわたり広く多大なご指導を承りました。また、泉聡志講師、岩崎助手を含め、元来、怠惰である私を厳しく指導していただき、両先生から研究者としてあるべき姿勢に学ぶべきことは非常に多いものがありました。この場を借りて、心より感謝申し上げます。

また、浅川助手・高野助手を始めとする酒井・泉研のスタッフの方々には、実験方法や破断面の観察の仕方等、具体的な作業について大変お世話になりました。この場を借りて、心より感謝申し上げます。特に工学部2号館の取り壊し寸前に、強行日程にて行った疲労破壊試験(付録参照)は、非常によい経験になったと思っております。

東北大学の横堀壽光先生におかれましては、特に第5章のTiAlクリープ、クリープ疲労破面やその他9Cr,12Cr鋼の破断面を提供していただきました。この場を借りて、心より感謝申し上げます。

酒井・泉研究室で5年の歳月を過ごしたわけですが、その間、多くの先輩・同期・後輩達に囲まれ、またと無い有意義な日々が送れたことを感謝いたします。

2003年7月より、私は研究の場を独立行政法人・産業安全研究所に移し、研究員として勤務することとなりました。労働災害防止の為の研究を主な研究フィールドとして活動していく予定であります。今後は研究者として、独り立ちをしていくこととなります。より質のよい研究を行うために、日々邁進することを、ここに改めて誓うものであります。

最後になりましたが、長きにわたる研究活動に理解と支援を行っていただいた両親や、誘惑多き友人達に深く感謝の意を捧げます。

完

2004年2月
山際謙太