

# 昭和62年度新型転換炉技術確証試験 (VI) 安全性確証試験

—入口管中小破断事故の確証試験による評価手法確立—  
(1. 緒言, 2. 入口管き裂進展試験及び解析)

1991年8月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

# 昭和62年度新型転換炉技術確証試験 (VI) 安全性確証試験

—入口管中小破断事故の確証試験による評価手法確立—  
(1. 緒言, 2. 入口管き裂進展試験及び解析)

浅田 隆\*

## 要 旨

入口管の実環境下におけるき裂進展挙動を評価するために実証炉入口管と同一の配管を用い、実環境を模擬した高温高圧水中にて疲労試験を行った。

その結果、以下が明らかとなった。

- (イ) 高温水中におけるき裂進展速度は、応力拡大係数範囲が $10\sim 50\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の間で、大気中のに比較して約10倍加速される。
- (ロ) 大気中、高温水中のいずれも、配管によるき裂進展速度は従来得られている試験片データとほぼ一致する。
- (ハ) き裂進展速度は、母材、溶接熱影響部、溶着金属部で顕著な差はなかった。

---

\* 動力炉建設運転本部 (ATR部門)

現在、フロンティア 技術開発室

## 目 次

要 旨 .....	i
表リスト .....	vii
図リスト .....	x ii
1. 緒 言 .....	1 - 1
2. 入口管き裂進展試験及び解析 .....	2 - 1
2.1 入口管き裂進展試験 .....	2 - 1
2.1.1 概 要 .....	2 - 1
2.1.2 試験装置 .....	2 - 1
2.1.3 試験配管 .....	2 - 2
2.1.4 試験条件 .....	2 - 3
2.1.5 試験結果及び考案 .....	2 - 7
2.1.6 まとめ .....	2 - 10
2.2 破壊靱性試験 .....	2 - 61
2.2.1 概 要 .....	2 - 61
2.2.2 試験方法 .....	2 - 61
2.2.3 試験装置 .....	2 - 62
2.2.4 試験条件及び結果 .....	2 - 62
2.2.5 まとめ .....	2 - 63
2.3 静荷重き裂進展試験 .....	2 - 102
2.3.1 概 要 .....	2 - 102
2.3.2 試験方法 .....	2 - 102
2.3.3 試験装置及び測定方法 .....	2 - 102
2.3.4 試験配管 .....	2 - 102
2.3.5 試験条件 .....	2 - 103
2.3.6 試験結果 .....	2 - 103
2.3.7 まとめ .....	2 - 104



2.4	応力拡大係数解析 .....	2-144
2.4.1	概 要 .....	2-144
2.4.2	解析対象及び解析条件 .....	2-144
2.4.3	解析結果 .....	2-151
2.4.4	まとめ .....	2-152
2.5	結 言 .....	2-182
2.6	参考文献 .....	2-184
	添付資料2 .....	添2
	添付資料2.1 Raju-Newmanの式との比較解析例 .....	添2.1-1
	添付資料2.2 実証炉入口管き裂進展試験体製作試験検査成績書 .....	添2.2
	添付資料2.3 実証炉入口管き裂進展試験体・試験片の写真 .....	添2.3

## 表 リ ス ト

表 2 - 1	疲労き裂進展試験に用いた試験装置仕様	2 - 46
表 2 - 2	疲労き裂進展試験におけるポテンシャル法測定条件一覧	2 - 46
表 2 - 3	疲労き裂進展試験に用いた溶接施行法	2 - 47
表 2 - 4	疲労き裂進展試験に用いた溶接施行要領	2 - 47
表 2 - 5	疲労き裂進展試験に用いた材料の化学組成	2 - 47
表 2 - 6	疲労き裂進展試験に用いた材料の機械的性質	2 - 48
表 2 - 7	疲労き裂進展試験における試験条件マトリックス	2 - 49
表 2 - 8	疲労き裂進展試験における試験の環境条件	2 - 50
表 2 - 9	疲労き裂進展試験における試験条件及び主要結果	2 - 51
表 2 - 10	疲労き裂進展試験におけるき裂進展量の定義	2 - 52
表 2 - 11	疲労き裂進展試験における き裂進展データまとめ (TP-13) (大き裂)	2 - 53
表 2 - 12	疲労き裂進展試験における き裂進展データまとめ (TP-13) (小き裂)	2 - 55
表 2 - 13	疲労き裂進展試験における き裂進展データまとめ (TP-14) (大き裂)	2 - 57
表 2 - 14	疲労き裂進展試験における き裂進展データまとめ (TP-14) (小き裂)	2 - 58
表 2 - 15	疲労き裂進展試験におけるき裂進展最適曲線式	2 - 59
表 2 - 16	疲労き裂進展試験におけるき裂進展曲線決定に用いた値	2 - 60
表 2 - 17	SUS316NG破壊靱性試験条件マトリックス	2 - 99
表 2 - 18	SUS316NGの破壊靱性試験結果	2 - 100
表 2 - 19	SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験片の寸法測定結果	2 - 101
表 2 - 20	SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験結果 (母材, 試験温度: 20℃)	2 - 101
表 2 - 21	四点曲げ試験の測定項目	2 - 138

表 2 - 22	四点曲げ試験の A C, D C ポテンシャル測定条件	2 - 138
表 2 - 23	材料の化学組成	2 - 139
表 2 - 24	材料の機械的性質	2 - 139
表 2 - 25	四点曲げ試験の測定結果 ( T P - 1 )	2 - 140
表 2 - 26	四点曲げ試験の測定結果 ( T P - 1 )	2 - 141
表 2 - 27	四点曲げ試験の測定結果 ( T P - 2 )	2 - 142
表 2 - 28	四点曲げ試験の測定結果 ( T P - 2 )	2 - 143
表 2 - 29	応力拡大係数解析の解析ケース	2 - 153

## 図 リ ス ト

図 2 - 1	き裂進展試験装置及び試験条件測定系	2 - 12
図 2 - 2	疲労き裂進展試験に用いた試験装置写真	2 - 13
図 2 - 3	疲労き裂進展試験におけるポテンシャル測定系統図	2 - 14
図 2 - 4	疲労き裂進展試験におけるポテンシャル測定シーケンス	2 - 14
図 2 - 5	疲労き裂進展試験におけるポテンシャル法 プローブ位置 (TP-13)	2 - 15
図 2 - 6	疲労き裂進展試験におけるポテンシャル法 プローブ位置 (TP-14)	2 - 16
図 2 - 7	疲労き裂進展試験に用いた試験配管形状寸法 (直管引張)	2 - 17
図 2 - 8	疲労き裂進展試験に用いた初期き裂位置	2 - 18
図 2 - 9	疲労き裂進展試験に用いた直管引張供試体 (TP-13) 寸法	2 - 19
図 2 - 10	疲労き裂進展試験に用いた直管引張供試体 (TP-14) 寸法	2 - 20
図 2 - 11	疲労き裂進展試験に用いた試験配管写真	2 - 21
図 2 - 12	疲労き裂進展試験における試験状況写真 (TP-13)	2 - 22
図 2 - 13	疲労き裂進展試験に用いた試験環境実測例	2 - 23
図 2 - 14	疲労き裂進展試験に用いた荷重, 変位実測 (TP-13)	2 - 24
図 2 - 15	疲労き裂進展試験に用いた荷重, 変位実測 (TP-14)	2 - 25
図 2 - 16	疲労き裂進展試験における配管内面き裂の応力拡大係数の評価	2 - 26
図 2 - 17	応力拡大係数 $K_1$ の評価に用いる膜応力, 曲げ応力	2 - 27
図 2 - 18	疲労き裂進展試験における破面写真 (TP-13, 14)	2 - 28
図 2 - 19	疲労き裂進展試験における破面写真 (TP-13)	2 - 29
図 2 - 20	疲労き裂進展試験における破面写真 (TP-14)	2 - 30
図 2 - 21	疲労き裂進展試験におけるき裂進展形状 (TP-13)	2 - 31
図 2 - 22	疲労き裂進展試験におけるき裂進展形状 (TP-14)	2 - 32
図 2 - 23	室温大気中における疲労き裂進展試験結果 (TP-14) (SUS316NG 熱影響部, 本年度実施分)	2 - 33

図 2-24	室温大気中における疲労き裂進展試験結果 (SUS316NG 熱影響部, 3年度分) .....	2-34
図 2-25	高温水中における疲労き裂進展試験結果 (TP-13) (SUS316NG 母材, 本年度実施分) .....	2-35
図 2-26	高温水中における疲労き裂進展試験結果 (SUS316NG) .....	2-36
図 2-27	室温大気中における疲労き裂進展試験結果 .....	2-37
図 2-28	高温水中における疲労き裂進展試験結果 .....	2-38
図 2-29	高温大気中における疲労き裂進展試験結果 .....	2-39
図 2-30	高温水中における疲労き裂進展試験結果 .....	2-40
図 2-31	室温大気中・高温水中における疲労き裂進展試験結果 .....	2-41
図 2-32	疲労き裂進展試験における電位差比の繰返し数変化 (TP-13) ....	2-42
図 2-33	疲労き裂進展試験における電位差比の繰返し数変化 (TP-14) ....	2-43
図 2-34	疲労き裂進展試験における電位差比の分布 (TP-13) .....	2-44
図 2-35	疲労き裂進展試験における電位差比の分布 (TP-14) .....	2-45
図 2-36	SUS316NG・50ASch80管からのコンパクトテンション 試験片採取要領 .....	2-64
図 2-37	SUS316NG・50ASch80管のコンパクトテンション試験片の形状寸法 ....	2-65
図 2-38	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重- 荷重線変位曲線 (TP-1, 試験温度 : 20℃) .....	2-66
図 2-39	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重- 荷重線変位曲線 (TP-2, 試験温度 : 20℃) .....	2-67
図 2-40	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重- 荷重線変位曲線 (TP-3, 試験温度 : 20℃) .....	2-68
図 2-41	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重- 荷重線変位曲線 (TP-4, 試験温度 : 20℃) .....	2-69
図 2-42	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重- 荷重線変位曲線 (TP-5, 試験温度 : 20℃) .....	2-70

図 2 - 43	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 6, 試験温度 : 20℃)	2 - 71
図 2 - 44	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 7, 試験温度 : 300℃)	2 - 72
図 2 - 45	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 8, 試験温度 : 300℃)	2 - 73
図 2 - 46	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 9, 試験温度 : 300℃)	2 - 74
図 2 - 47	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 10, 試験温度 : 300℃)	2 - 75
図 2 - 48	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 11, 試験温度 : 300℃)	2 - 76
図 2 - 49	SUS316NG母材の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 12, 試験温度 : 300℃)	2 - 77
図 2 - 50	SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - W1, 試験温度 : 20℃)	2 - 78
図 2 - 51	SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - W2, 試験温度 : 20℃)	2 - 79
図 2 - 52	SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - W3, 試験温度 : 20℃)	2 - 80
図 2 - 53	SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - W4, 試験温度 : 20℃)	2 - 81
図 2 - 54	SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - W5, 試験温度 : 20℃)	2 - 82
図 2 - 55	SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - W6, 試験温度 : 20℃)	2 - 83
図 2 - 56	SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - W7, 試験温度 : 20℃)	2 - 84

図 2 - 57	SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-W8, 試験温度 : 20℃) .....	2 - 85
図 2 - 58	試験温度20℃でのSUS316NG母材の破壊靱性試験後の破面外観写真 .....	2 - 86
図 2 - 59	試験温度300℃でのSUS316NG母材の破壊靱性試験後の破面外観写真 .....	2 - 87
図 2 - 60	試験温度20℃でのSUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験後の 破面外観写真 .....	2 - 88
図 2 - 61	SUS316NG母材の J 積分値とき裂進展量 $\Delta a$ との関係 .....	2 - 89
図 2 - 62	SUS316NG母材及び溶着金属の J 積分値とき裂進展量 $\Delta a$ との関係 .....	2 - 90
図 2 - 63	SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-13, 試験温度 : 20℃) .....	2 - 91
図 2 - 64	SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-14, 試験温度 : 20℃) .....	2 - 92
図 2 - 65	SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-15, 試験温度 : 20℃) .....	2 - 93
図 2 - 66	SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-16, 試験温度 : 20℃) .....	2 - 94
図 2 - 67	SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-17, 試験温度 : 300℃) .....	2 - 95
図 2 - 68	SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-18, 試験温度 : 300℃) .....	2 - 96
図 2 - 69	SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の破面外観写真 .....	2 - 97
図 2 - 70	SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験で得られた 負荷の大きさと破壊繰返し数の関係 .....	2 - 98
図 2 - 71	四点曲げ試験体系図 .....	2 - 106
図 2 - 72	四点曲げ試験の測定系の系統図 .....	2 - 107
図 2 - 73(1)	四点曲げ試験の測定位置図 (TP-1) .....	2 - 108
図 2 - 73(2)	四点曲げ試験の測定位置図 (TP-2) .....	2 - 109
図 2 - 74	四点曲げ試験のクリップゲージ取り付け図 .....	2 - 110

図 2 - 75	四点曲げ試験の供試体寸法	2 - 111
図 2 - 76	四点曲げ試験の供試体について	2 - 112
図 2 - 77	四点曲げ試験の試験状況写真 (試験前)	2 - 113
図 2 - 78	四点曲げ試験の破面写真 (TP - 1)	2 - 114
図 2 - 79	四点曲げ試験の破面写真 (TP - 2)	2 - 115
図 2 - 80	四点曲げ試験の荷重と荷重点変位との関係 (TP - 1)	2 - 116
図 2 - 81	四点曲げ試験の荷重と荷重点変位との関係 (TP - 2)	2 - 117
図 2 - 82	四点曲げ試験のモーメント, 荷重と荷重点変位量との関係	2 - 118
図 2 - 83	四点曲げ試験のモーメント, 荷重と供試体変位量との関係	2 - 119
図 2 - 84	四点曲げ試験のモーメント, 荷重と開口変位量との関係	2 - 120
図 2 - 85	四点曲げ試験のモーメント, 荷重とひずみの関係図	2 - 121
図 2 - 86	四点曲げ試験のモーメント, 荷重と A 面と C 面のトータルき裂進展量との関係	2 - 122
図 2 - 87	四点曲げ試験の開口変位量と DC ポテンシャル出力との関係	2 - 123
図 2 - 88	四点曲げ試験の開口変位量と DC ポテンシャル出力比との関係	2 - 124
図 2 - 89	四点曲げ試験の開口変位量と DC ポテンシャル出力 (B 点) との関係	2 - 125
図 2 - 90	四点曲げ試験の開口変位量と DC ポテンシャル出力比 (B 点) との関係	2 - 126
図 2 - 91	四点曲げ試験の開口変位量と AC ポテンシャル出力 (B 点) との関係	2 - 127
図 2 - 92	四点曲げ試験の開口変位量と AC ポテンシャル出力 (A 点) との関係	2 - 128
図 2 - 93	四点曲げ試験の A 面と C 面のトータルき裂進展量と DC ポテンシャル出力 (B 点) との関係	2 - 129
図 2 - 94	四点曲げ試験の A 面と C 面のトータルき裂進展量と AC ポテンシャル出力 (B 点) の関係	2 - 130



図 2 - 95	四点曲げ試験の鈍化後の A 面, C 面のトータルき裂進展量と DC ポテンシャル出力 (B 点) の関係	2 - 131
図 2 - 96	四点曲げ試験の鈍化後の A 面, C 面のトータルき裂進展量と AC ポテンシャル出力 (B 点) の関係	2 - 132
図 2 - 97	四点曲げ試験の試験状況写真 (TP - 1)	2 - 133
図 2 - 98	四点曲げ試験の試験状況写真 (TP - 1)	2 - 134
図 2 - 99	四点曲げ試験の試験状況写真 (TP - 1)	2 - 135
図 2 - 100	四点曲げ試験の試験状況写真 (TP - 1)	2 - 136
図 2 - 101	四点曲げ試験の DC ポテンシャル出力と開口変位, き裂長さとの関係	2 - 137
図 2 - 102	応力拡大係数解析の解析対象形状・寸法	2 - 154
図 2 - 103	周方向の展開 ( $0^{\circ} \sim 67.5^{\circ}$ )	
図 2 - 104	周方向の展開 ( $67.5^{\circ} \sim 90^{\circ}$ )	
図 2 - 105	板厚方向	
図 2 - 106	平板モデルへの展開結果	2 - 155
図 2 - 107	配管モデル要素分割図 (要素数: 469, 節点数: 2591)	2 - 156
図 2 - 108	平板モデル要素分割図 (要素数: 469, 節点数: 2591)	2 - 157
図 2 - 109	き裂形状 (配管モデル, 表面き裂) (要素数: 469, 節点数: 2591)	2 - 158
図 2 - 110	き裂形状 (平板モデル, 表面き裂) (要素数: 469, 節点数: 2591)	2 - 159
図 2 - 111	き裂形状 (配管モデル, 貫通き裂) (要素数: 469, 節点数: 2591)	2 - 160
図 2 - 112	き裂形状 (平板モデル, 貫通き裂) (要素数: 469, 節点数: 2591)	2 - 161
図 2 - 113	配管モデル要素分割図 (要素数: 614, 節点数: 3190)	2 - 162
図 2 - 114	平板モデル要素分割図 (要素数: 614, 節点数: 3190)	2 - 163

図 2 - 115	き裂形状 (配管モデル, 表面き裂)	
	(要素数 : 614, 節点数 : 3190) .....	2 - 164
図 2 - 116	き裂形状 (平板モデル, 表面き裂)	
	(要素数 : 614, 節点数 : 3190) .....	2 - 165
図 2 - 117	き裂形状 (配管モデル, 貫通き裂)	
	(要素数 : 614, 節点数 : 3190) .....	2 - 166
図 2 - 118	き裂形状 (平板モデル, 貫通き裂)	
	(要素数 : 614, 節点数 : 3190) .....	2 - 167
図 2 - 119	境界条件 (配管モデル, 引張荷重) .....	2 - 168
図 2 - 120	境界条件 (平板モデル, 曲げ荷重) .....	2 - 169
図 2 - 121	20節点ソリッド要素 .....	2 - 170
図 2 - 122	き裂先端の積分経路 .....	
図 2 - 123	積分経路 (配管モデル, き裂寸法 4 mm × 17.609mm) .....	2 - 171
図 2 - 124	仮想き裂進展量 .....	2 - 172
図 2 - 125	き裂最深点の仮想き裂進展面積 .....	
図 2 - 126	き裂表面点の仮想き裂進展面積 .....	
図 2 - 127	応力拡大係数分布	
	(表面き裂 : アスペクト比 = 0.26, $\sigma_m = 1 \text{ kgf/mm}^2$ ) .....	2 - 173
図 2 - 128	応力拡大係数分布	
	(表面き裂 : アスペクト比 = 0.5, $\sigma_m = 1 \text{ kgf/mm}^2$ ) .....	2 - 174
図 2 - 129	応力拡大係数分布 (貫通き裂, $\sigma_m = 1 \text{ kgf/mm}^2$ ) .....	2 - 175
図 2 - 130	応力拡大係数分布 (貫通き裂, $\sigma_m = 1 \text{ kgf/mm}^2$ ) .....	2 - 176
図 2 - 131	応力拡大係数分布 (表面き裂 :	
	アスペクト比 = 0.26, $\sigma_b = 3.68 \text{ kgf/mm}^2$ ) .....	2 - 177
図 2 - 132	応力拡大係数分布 (表面き裂 :	
	アスペクト比 = 0.5, $\sigma_b = 3.68 \text{ kgf/mm}^2$ ) .....	2 - 178
図 2 - 133	応力拡大係数分布 (解析モデル :	
	平板, き裂寸法 : 18.395mm × 20.781mm) .....	2 - 179

図 2 - 134 応力拡大係数分布 (解析モデル :

平板, き裂寸法 : 18.928mm × 23.797mm) ..... 2 - 180

図 2 - 135 半楕円形表面クラックの  $K_I$  分布 ( $a/T < 1$ ) ..... 2 - 181

## 1. 緒 言

入口管中小破断想定事故時の入口管の破断特性及び燃料冷却性について評価するための試験及び解析を行った。

入口管の破断特性としては、入口管のLBB特性を評価するために、入口管と同等の配管を用いたき裂進展試験及び不安定延性破壊試験を行った。また入口管にき裂が生じ、進展した場合にも、き裂からの漏洩量は、燃料の冷却上問題となるような量（流量停滞事象）にならないことを実証するため、実証炉入口管の配管系を模擬した実規模開口試験及び解析を行った。

更に、入口管、出口管にギロチン破断を想定した場合の配管の振れ回り挙動と、振れ回りによる流路閉塞を評価するため、1インチ管を用いたパイプホイップ試験を実施した。

入口管に中小破断を想定した場合の炉心冷却性能については、解析モデルの妥当性（保守性）の評価を目的として、実規模大模擬燃料集合体を用いた入口管中小破断試験（動燃で実施済）に対する解析を行った。

参考のために、契約仕様書に記述された試験内容を次ページに示す。

## 昭和62年度新型転換炉技術確証試験 (VI) 試験内容

試験項目	3. 安全性確証試験のうち	3.1 入口管中小破断事故の確証試験による評価手法の確立
試験実施範囲	試験内容	
① き裂進展試験 ② き裂進展・破断試験 ① 疲労き裂進展試験 ② 静荷重き裂進展試験 ③ 破壊靱性試験 ④ 応力拡大係数解析  ② 不安定延性破壊試験 ③ コンプライアンス量の影響評価試験 ④ 試験解析  ③ 実規模開口試験 ④ 入口管部開口特性評価試験 ⑤ 解析  ④ 入口管中小破断解析手法の検証  ⑤ ポンプホィップ試験 ⑥ パイプホィップ試験 ⑦ 試験解析	<p>入口管のき裂進展挙動を求めめるため、溶接部を含む入口管に初期き裂を付け、繰返し荷重によりき裂を進展させ、き裂進展形状及び破断条件を求めます。</p> <p>① 試験体に初期欠陥を付け、オートクレーブ付疲労試験機を使用して引張り荷重を加え、き裂の進展形状及び速度を測定します。            ② 疲労でき裂が進展した後の破断条件を調べるため、疲労き裂を付けた試験体に静的四点曲げ試験機を用いて曲げ荷重を加え、荷重とき裂進展量の関係を測定します。            ③ 地震時の破断特性を検討するため、破壊靱性試験用疲労試験機を用いて繰返し荷重が加わったときの破断特性をCT試験片による試験で求めます。            ④ 入口管の応力拡大係数は直径が小さいため曲率の影響が大きいと考えられます。この影響を評価するため、3次元ソリッド要素を用いた応力拡大係数の解析を行い、平板による評価式と比較して曲率の補正法を検討評価します。</p> <p>⑤ 未貫通あるいは貫通き裂が存在する入口管の不安定破壊条件に及ぼす配管系のコンプライアンスの影響を評価するために、コンプライアンス量をパラメータとして、高温条件下でき裂付配管(試験体)に弊社の4点曲げ試験機で荷重を付加しながら試験体の破壊荷重、変形挙動を測定します。            ⑥ き裂を有する入口管の不安定破壊条件並びに貫通き裂からの漏洩量を評価する手法を確立するため、FEM解析コード"FINAS"コードを用い、62年度に実施する試験結果に基づいて、配管に加わる荷重、歪、き裂開口量等について解析を行い、構造解析コードを検証するとともに、不安定破壊に対する評価を行います。</p> <p>⑦ 入口管部の開口特性に及ぼす影響を評価するために、ATR実証炉入口管を模擬した試験装置を使用し、き裂位置をパラメータとしたき裂からの漏洩量測定試験を行います。            ⑧ 原子炉運転中の入口管に任意の周方向貫通き裂を想定した場合の、き裂開口面積を評価するため、SAP-6コードを用いて解析を行い、実機の見通し解析を行います。</p> <p>⑨ 実規模大模擬燃料集合体を用いた入口管中小破断試験の解析を実施し、予測値が実験値に対し保守性を有することを検証することにより、下記のモデルが適切な保守性を有していることを確認します。</p> <p>⑩ ATR実証炉の代表的な配管ルート・破断位置を選定し、これを25Aの配管で模擬し、弊社のパイプホィップ試験装置を用いて常温高圧及び高温高圧の水を噴出させ、圧力、温度、流量、最終変形状、流路閉塞率を測定します。            ⑪ 試験配管の振れ廻り挙動を構造解析コードFINASを用いて試験結果に基づいた解析を行い、ホィップレストレートを考慮した条件で、26%以上の流路面積を確保できることの見通しについて評価します。</p>	

## 2. 入口管き裂進展試験及び解析

### 2.1 入口管き裂進展試験

#### 2.1.1 概要

入口管の実環境下におけるき裂進展挙動を評価するために実証炉入口管と同一の配管を用い、実環境を模擬した高温高圧水中にて疲労試験を行う。実環境下におけるき裂進展の加速効果を検討するため、室温大気中における配管の疲労試験も合わせて実施する。

配管内面に加工した人工欠陥から進展する疲労き裂の寸法及び形状は、応力振幅を変化させることにより破面上にビーチマークを形成させ、試験後き裂部断面を破断させて測定する。また、電気ポテンシャル法によりき裂深さをオンラインでモニターする。

き裂進展データは、き裂進展速度をき裂先端における応力拡大係数との関係で整理し、各試験条件における疲労き裂進展について検討する。

#### 2.1.2 試験装置

本試験に用いた装置は、最大荷重25tonfの油圧サーボ式疲労試験機であり、オートクレーブ及び純水ループを取り付けることにより、実証炉入口管の実際の環境における試験が可能である。試験装置の主な仕様を、疲労試験機、オートクレーブ、水循環装置に分けて表2-1に示す。

試験装置の系統図を図2-1に示す。図中、太線は循環水の流れを示し、また記号○は主な試験環境及び試験条件の測定位置を示す。調整タンクを出た水は予熱器にて加熱され、オートクレーブに入り、熱交換器を通り循環する。循環水の溶存酸素、電気伝導度及びpHは予熱器に入る前にモニターする。一方、圧力と温度はオートクレーブ内にて測定する。試験配管には電気ポテンシャルを計測するために端子を取付け、給電線及び測定リード線をコナックスシールを介してオートクレーブから外部に引出して電位差を計測する。図2-2は試験装置写真を示す。(a)は試験機本体を、(b)は高温高圧水循環装置を、また(c)は電気ポテンシャル測定装置をそれぞれ示す。

本試験においては、配管内面に設けた初期き裂からの疲労き裂成長を測定する。内

面き裂であるため、き裂進展を目視することは困難であり、特に高温高圧水中では不可能である。そのため、配管外面に給電端子及び測定端子を設け、電気ポテンシャル法により実時間にてき裂深さをモニターする。

ポテンシャル法によるき裂進展計測法は60年度報告書<sup>1)</sup>で述べたのでここでは詳細を省略する。表2-2は本年度試験分2体についてのポテンシャル法則定条件を示し、図2-3は測定系統図、図2-4はリバースト法の測定シーケンスを示す。図2-5、6は各試験体のポテンシャル測定用プローブ位置を示す。

電気ポテンシャル法は、き裂近傍に一様電場を形成させ、き裂形状の変化による僅かな電場の変化を検出する方法である。給電端子は被測定断面に一様電場が形成されるように周方向90°おきに、また測定端子はき裂近傍に配置した。本試験においては、き裂の最深寸法のモニタリング、特に、板厚貫通時の測定に主眼をおいて計測を行った。

### 2.1.3 試験配管

本試験では、実証炉入口管と材料組成、口径・肉厚が同一仕様であり、同一溶接法により製作した配管を用いた。

#### (1) 配管形状、外形寸法

本試験に用いた直管試験体の形状及び外形寸法を、図2-7に示す。

#### (2) 溶接条件

本試験の供試体の溶接法を表2-3、4に示す。

#### (3) 材料の化学組成

供試体に用いたSUS316NG母材及び溶着金属の化学組成を表2-5に示す。

#### (4) 機械的性質

供試体に用いたSUS316NG母材及び溶着金属の機械的性質を表2-6に示す。

#### (5) 放電加工

各供試体とも、放電加工により配管の内側に初期欠陥を入れた。初期欠陥位置と寸法（試験終了後、破面より測定）を、図2-8に示す。欠陥寸法は、深さ3mm×長さ15mmと、深さ2.75mm（0.5t）×長さ11mm（2t）の2種類である。また、各供試体の詳細寸法を図2-9、10に示す。放電加工幅は0.2mmである。

## (6) 予き裂導入法

放電加工による初期欠陥から、疲労き裂が進展するまでには時間がかかるため本試験では、室温大気中で疲労試験を行い、人工欠陥から予き裂を発生させた後、高温高圧水中で試験を行った。予き裂は、人工欠陥から0.1mm～0.3mm程度進展させることをめどに、TP-13は $4 \times 10^4$ 回、TP-14は $3 \times 10^4$ 回行った。き裂進展量の推定はポテンシャル法にて行った。

## (7) 試験配管写真

試験前の試験配管写真を図2-11に示す。

## 2.1.4 試験条件

## (1) 試験数

試験数及び試験条件を、これまでに動燃で実施した分<sup>1)</sup>と併せて表2-7にまとめて示す。今年度(62年度)分は、いずれも直管引張であり、室温大気中、高温水中、各1体である。

図2-12は、試験中の試験体写真(TP-13)を示す。

## (2) 高温高圧水環境

温度、圧力は実機環境下と同一条件、それぞれ276℃、77kgf/cm<sup>2</sup>を設定値とした。水質は、酸素濃度8ppm、電導度1μS/cm以下、pH～8.5、塩素イオン濃度0.2ppm以下を目標値として設定した。塩素イオン濃度を除くこれらの環境は、図2-13に実測例を示すように、常時モニターし記録した。塩素イオン濃度のみはオフラインにて分析した。表2-8は、今回行った2体の試験条件の実測値をまとめて示す。

## (3) 荷重条件

負荷波形はすべて三角波、繰返し周波数は高温高圧水中1.2cpm、室温大気中1Hz(60cpm)とした。荷重と変位の実測を図2-14及び図2-15に示す。図2-14は高温高圧水中、図2-15は室温大気中の実測を示す。

## (4) 応力拡大係数の評価

## (i) 応力拡大係数の評価式

き裂進展データは、き裂進展速度とき裂先端の応力拡大係数範囲との関係によって整理する。応力拡大係数の評価については、前報<sup>1)</sup>にて述べた通りであるが、



ここで要点を述べる。本研究では図 2-16(a)に示すように、パイプ内側の表面き裂の板厚方向への伝播と板厚貫通後の円周方向への伝播の両方を扱っている。表面き裂（貫通前）と貫通き裂とでは、応力拡大係数の評価が異なるので2つに分けて以下に述べる。

(a) 表面き裂

平板に対するRaju-Newman<sup>2)</sup>による次式を用いる（図 2-16(b)）

$$K_I = \left\{ \sigma_m F_m \left[ \frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \phi \right] + \sigma_b F_b \left[ \frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \phi \right] \right\} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \dots\dots (2-1)$$

ここに、

$K_I$  : 応力拡大係数

$\sigma_m$  : 板に作用する一様引張の公称応力

$\sigma_b$  : 板に作用する一様曲げの公称応力

$F_m$  : 膜成分に対する、有限板厚及び自由縁による補正係数

$F_b$  : 曲げ成分に対する、有限板厚及び自由縁による補正係数

$a$  : き裂深さ

$2c$  : き裂長さ

$t$  : 板厚

$\phi$  : 評価点の角度

$$Q = \begin{cases} 1 + 1.464 (a/c)^{1.65} & \text{for } a/c \leq 1 \\ 1 + 1.464 (c/a)^{1.65} & \text{for } a/c > 1 \end{cases} \dots\dots (2-2)$$

式(2-1)は、Green-Sneddonによる、無限体中の楕円き裂に対する解に、有限板厚及び自由縁の効果を解析あるいはFEM数値解により補正係数Fを定め、この補正係数Fを乗ずることにより、得られるものである。本研究では、図 2-16(b)に示したき裂最深点A及び表面端点Bでのみ評価を行う。また、同図に示したように、板厚貫通前は板の曲率の影響は少ないと考えて、平板として扱っている。

また、塑性域の補正は行っていない。

(b) 貫通き裂

板厚貫通後は, Zahoor<sup>3)</sup>による次式を用いる (図 2-16(c))。

$$K_t = \left\{ \sigma_m' G_m \left[ \frac{r}{t}, \frac{\theta}{\pi} \right] + \sigma_b' G_b \left[ \frac{r}{t}, \frac{\theta}{\pi} \right] \right\} \sqrt{\pi c} \dots\dots (2-3)$$

ここに,

$2\theta$  : き裂角度

$r$  : 配管の平均半径

$\sigma_m'$  : 配管に作用する一様引張の公称膜応力。引張力  $P$  に対して

$$\sigma_m' = \frac{P}{2\pi r t}$$

$\sigma_b'$  : 配管に作用する曲げ応力。曲げモーメント  $M$  に対して

$$\sigma_b' = \frac{P}{\pi r^2 t}$$

$G_m$  : 膜成分に対する補正係数

$$G_m = 1 + A \{ 5.303 (\theta / \pi)^{1.5} + 18.773 (\theta / \pi)^{4.23} \} \dots\dots (2-4)$$

$G_b$  : 曲げ成分に対する補正係数

$$G_b = 1 + A \{ 4.5967 (\theta / \pi)^{1.5} + 2.6422 (\theta / \pi)^{4.24} \} \dots\dots (2-5)$$

$$A = \left\{ \begin{array}{l} \{ 0.125 (r/t) - 0.25 \}^{0.25} \text{ for } 5 \leq r/t \leq 10 \\ \{ 0.4 (r/t) - 3.0 \}^{0.25} \text{ for } 10 < r/t \leq 20 \end{array} \right\} \dots\dots (2-6)$$

式 (2-3) は Sanders<sup>4)</sup> による, 薄板シェル中のき裂に対する解析解を, 取り扱いに便利ないように書き直したものである。式から明かなように, き裂によるリガメント減少の効果, 及び配管曲率の効果が考慮されている。

式 (2-3) は表面き裂の場合とは異なり, 薄板理論に基づくものであって, 3次元体の解析によるものではない。そのため, 配管外側と内側とにおける応力拡大係数の相違は評価できず, 外側と内側との平均的な評価となる。即ち,

図 2-16(c)に示したように、半径  $r$  上のき裂端、点 B における評価となる。そのため、後述のき裂進展データの整理においても、外側と内側とのき裂長さの平均値をき裂長さとして応力拡大係数を評価した。なお、式 (2-1) と式 (2-3) に示した応力拡大係数においては、公称膜応力及び公称曲げ応力の意味が、式 (2-1) と式 (2-3) とでは次項に述べるように異っていることに注意する必要がある。

また、実際に応力拡大係数を評価する配管断面において式 (2-6) の曲率補正において  $r/t$  が 5 よりやや小さい試験体もあったが、その場合は  $r/t = 5$  として式 (2-6) の処理を行った。

## (ii) 試験結果の評価に用いる応力

本試験において応力拡大係数の計算に用いる膜及び曲げの公称応力  $\sigma_m$ 、 $\sigma_b$  の算出法について説明する (図 2-17)。応力拡大係数計算式において用いる応力は、式 (2-1) の Raju-Newman 式においてはき裂部遠方の、板に作用する一様な引張及び曲げ応力であり、式 (2-3) の Zahoor-Sanders 式においては、配管のき裂部遠方の一様引張及び曲げ応力である。

一般の実物配管においては評価部位によって応力が変化するため、式 (2-1)、(2-3) の応力拡大係数の評価に用いる一様応力場が形成されていない。そのため、評価に用いる公称応力をどのように定めるべきかという問題が生じる。しかし、本試験においては直管の引張荷重のみを対象としており、公称応力評価上の複雑な問題は生じず、負荷荷重を、公称断面積で除した値をそのまま用いればよい。

また、式 (2-1) と式 (2-3) による評価においても、直管の引張荷重の場合は膜成分  $\sigma_m = \sigma_m'$  のみであり、曲げ成分は存在しない。 $(\sigma_b = \sigma_b' = 0)$ 。

なお、本試験においては図 2-5、6 に示したように、同一断面に大小 2 個のき裂を、互に干渉がないように  $0^\circ$  と  $180^\circ$  とに配して実験を行った。公称応力の評価に用いる断面積として、大きき裂の応力拡大係数の評価にはき裂のない、原断面積を用いた。また、小さき裂の応力拡大係数の評価には、大きき裂の貫通前は原

断面積を、大きき裂の貫通後は原断面積からその時点での大きき裂の断面積を除いた面積を、それぞれ用いた。即ち、大きき裂貫通後の、小さき裂の応力拡大係数の評価においてのみ、リガメント断面積変化による補正を行った。

## 2.1.5 試験結果及び考察

### (1) き裂進展速度

全試験 2 体の試験条件及び主な結果をまとめて表 2-9 に示す。

#### (i) 疲労破面及びビーチマーク測定

破面の全体写真を図 2-18 に、拡大写真を図 2-19, 20 に示す。ビーチマークによるき裂進展形状及び測定結果を図 2-21, 22 に示す。

#### (ii) き裂進展速度

表 2-10 にき裂進展量の定義を示す。

板厚貫通前は、き裂深さ  $a^n$  及び長さ  $2c_2^n$  は  $n$  回目のビーチマーク外側寸法であり、 $a^{n+1}$ 、 $2c_2^{n+1}$  は  $n+1$  回目のビーチマーク内側寸法である。 $\Delta a$ 、 $\Delta c$  はそれぞれ  $a$  と  $c$  との差から、 $a_{ave}$ 、 $2c_{ave}$  はそれらの平均値として求める。

板厚貫通後は、配管外面と内面とに関してき裂長さ  $2c_1$ 、 $2c_2$  を同様に測定し、 $n$  回目ビーチマーク外側寸法と  $n+1$  回目ビーチマーク内側寸法の値を得る。外面における  $n+1$  回と  $n$  回との差から  $\Delta c_1$  を、内面における  $n+1$  回と  $n$  回との差から、 $\Delta c_2$  を求める。また  $2c_{ave}$  は、 $2c_1^n$  と  $2c_2^n$  の平均値  $2c^n$  の平均値  $2c^n$  と、 $2c_2^{n+1}$  と  $2c_2^{n+1}$  との平均、すなわち  $2c_{ave} = (2c^n + 2c^{n+1}) / 2$  として求めた。

以下、上記の方法にしたがって計算したき裂進展量と応力拡大係数を、表 2-11~14 に示す。なお、本試験においてはビーチマーキング中の進展データはき裂進展データの整理からは除外した。本試験ではビーチマークを正規の試験より下側荷重を上昇させて繰返すことにより入れているため、正規試験中の下側荷重の履歴がピークマークでの進展特性に影響を与えていることが懸念されたためである。

## (iii) 応力拡大係数とき裂進展速度との関係

試験で得られた、き裂進展速度  $da/dN$  及び  $dc/dN$  と応力拡大係数全範囲  $\Delta K$  の関係を図 2-23~30 に示す。本試験においては、最大応力に対する最小応力の比  $R$  の値は、表 2-9 に示したように 0.1 であり、 $R$  値を変化させた試験は行っていない。そのためここでは、有効応力拡大係数  $K_{eff}$  ではなく、応力拡大係数全範囲  $\Delta K$  により整理した。

## (a) 室温大気中試験

図 2-23, 24 は室温大気中における SUS316NG 母材の試験結果を示す。図 2-23 には本年度実施分 TP-13 のみのプロットを、図 2-24 にはこれまでに動燃で実施した分を合わせたプロットを示す。破線は試験結果のほぼ上限と下限とを示し、これまでに定めたものと同一である。ただし、き裂進展速度が  $10^{-5}$  mm/cycle より低い範囲では直線関係からはずれる傾向にあり、これらのき裂進展速度が低い領域のデータは除外して上下限界線を定めた。実線は SUS304 平板による文献データ<sup>5)</sup>を示す。本試験は SUS304 母材の試験であり、文献 5 のデータとは異なっているが、文献 6、その他のデータによれば SUS316 と SUS304 とは室温ではほとんど疲労き裂進展特性に差異はない。したがって、本実験結果を文献 5 のデータと比較してもよいと考えられる。

図から、板厚方向及び周方向へのき裂進展速度  $da/dN$  及び  $dc/dN$  は変わらないと考えてよいことがわかる。また貫通前と貫通後の進展速度もほぼ直線関係に従うことがわかる。さらに、母材と熱影響部との差異はないと考えてよいことがわかる。

以上、室温大気中の SUS316NG 母材試験に関しては、これまでに得られたデータとの整合性が良く、上下限界線は前年度迄に定めたものと同一である。

## (b) 高温水中試験

図 2-25 は、高温水中における母材の試験結果を示す。図 2-26 は、3 年度分を合わせた高温水中試験の結果を示す。破線はこれまでに得られた試験結果の上限と下限とを示し、実線は SUS316 母材の文献データ（繰返し速度 0.12 cpm）<sup>7)</sup>を示す。上下限界線はこれまでの試験データの上下限界線<sup>1)</sup>と同一であ

る。

室温大気中の場合と同様に、板厚方向及び周方向へのき裂進展速度  $d a / d N$ 、 $d c / d N$  はバラツキの範囲内で変わらないと考えてよいことがわかる。また、貫通前と貫通後の進展速度も同一の直線則に従うと考えてよい。

また、母材、熱影響部、溶着金属の差異は、バラツキの範囲内であった。

(c) 試験結果のまとめ

① 試験片形状の影響

図 2-27 は室温大気中の結果を示し、図 2-28 は高温水中の結果を示す。

両図から次の結論を導くことができる。

- 1) 直管とエルボとに差はない。
- 2) き裂の深さ方向及び周方向への伝播速度、即ち  $d a / d N$  と  $d c / d N$  とは同一直線上にあると考えてよい。
- 3) 周方向の伝播に関し、板厚貫通前と後とに差はない。

② 材質の影響

図 2-29 は欠陥部の材質毎にまとめた室温大気中の結果、図 2-30 は高温水中の結果を示す。両図から、次の結論を導くことができる。

- 1) 母材、溶接熱影響部、溶着金属の結果を比較すると材質の相違の影響は大きくはない。熱影響部、溶着金属は、溶接による残留応力があるということと金属組織の点で母材とは異なっている。しかし、3 種の結果がほぼ同一であるということは、残留応力と組織の相違を合わせた効果がそれほど大きなものではないことを示している。
- 2) 最も支配的な因子は、室温大気中と高温水中との環境の効果であり、これに比較すると、他の因子の影響は小さいと考えられる。

(d) き裂進展最適曲線

以上の結果をまとめてき裂進展最適曲線を定める。図 2-31 はこれまでに得られたものを含め、実施分のすべての実験点とき裂進展上下限界線及び最適曲線を示す。最適曲線は、図に示す両対数表示において、上下限界線のほぼ中央値として定めた。 $\Delta K$  が大きい領域 ( $\Delta K \geq 100 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ ) では、1 サイクル

当たりの進展量が大きくなるため、き裂進展に対する環境の影響は、相対的に低下すると考え、この領域では室温大気中と同一のき裂進展速度式を用いる。

表 2-15は、図 2-31より定めたき裂進展最適曲線式、定数  $C$ 、 $m$  の値を示し、表 2-16にはこれらの定数  $C$ 、 $m$  を定めるのに用いたき裂進展曲線図上の点を示す。

## (2) ポテンシャル法によるき裂進展計測

図 2-32~35にポテンシャル法による電位差比の測定結果を示す。図 2-32、33は電位差比の繰返し数変化を示す。

縦軸の電位差比  $V/V_0$  は、各端子間の電位差  $V$  をレファレンス電位差  $V_0$  にて除した値である。図には破面ビーチマーク番号を合わせ示した。

前年度迄の試験において、電位差比  $V/V_0$  が約 2.0 に至るとき裂が板厚貫通することが明らかになっているが、今回の試験においてもこれに照合している。即ち、TP-13 (図 2-32) においては、板厚貫通はビーチマーク 1 と 2 との間で生じており、(図 2-21参照)、TP-14 (図 2-33) においては、ビーチマーク 3 と 4 との間で生じている (図 2-22参照)。

現状ではこのポテンシャル法は、内面き裂進展モニタリングの唯一の方法であり、本試験においてもき裂最深点のモニタリング及び板厚貫通時の判定に有力な方法であることがわかった。特に、オートクレーブ中の試験においては、き裂の板厚貫通の目視も困難であり、試験の継続・終了の判断、及び、ビーチマーク時期の判断はポテンシャル法のデータに頼っており、実験技術上極めて有効な方法である。

図 2-34、35は電位差比空間分布の繰返し数変化を示す。電位差比  $V/V_0$  は板厚貫通後、全体的に著しく上昇することがわかる。

## 2.1.6 まとめ

入口管の実環境下におけるき裂進展挙動を評価するために、実証炉入口管と同一の、SUS316NG・50ASch80の直管、エルボ管を用い、実環境を模擬した高温高圧水中、及び室温大気中にて疲労試験を実施した。得られた主な結果は次の通りである。

### (1) き裂進展速度

試験結果は、き裂進展速度と応力拡大係数範囲との関係で整理した。応力拡大係

数の評価は、配管板厚貫通前はRaju-Newmanの式、板厚貫通後はZahoor-Sandersの式を用いて算出した。き裂進展速度について、次の3点が明らかになった。

- (a) 直管とエルボとに差はない。
- (b) き裂の深さ方向及び周方向への進展速度は応力拡大係数で整理すると同一線上にある。
- (c) 周方向の進展に関し、板厚貫通前と後とも応力拡大係数で整理すると同一線上にある。

以上の点から、本研究で用いた配管に対する応力拡大係数の評価方法は概ね妥当であること、また、データのバラツキの範囲内で従来得られている試験片の進展速度に一致することが明らかになった。

また、母材、熱影響部、溶着金属の、欠陥部の材質の相違に着目した試験結果の整理から、次の2点が明らかになった。

- (d) 母材、溶接熱影響部、溶着金属の材質の相違の影響は小さい。従って、き裂進展速度に対する、溶接残留応力と金属組織の相違とを合わせた効果は小さい、と考えられる。
- (e) 最も支配的な因子は、室温大気中と高温水中との、環境の効果であり、これに比較すると、他の因子の影響は小さい。

以上の結果をまとめ、本試験から得られたき裂進展速度を、室温大気中と高温水中とに分け、各々に対して最適曲線を決定した。

## (2) ポテンシャル法によるき裂進展計測

今回試みた、電気ポテンシャル法による、配管内面き裂のモニタリングは、き裂最深点の進展モニタリング、及び板厚貫通時の判定に有力な方法である。特に、き裂の板厚貫通の目視も困難な、オートクレーブ中の試験においては、現状では、内面き裂進展モニタリングの唯一の実用的な方法である。



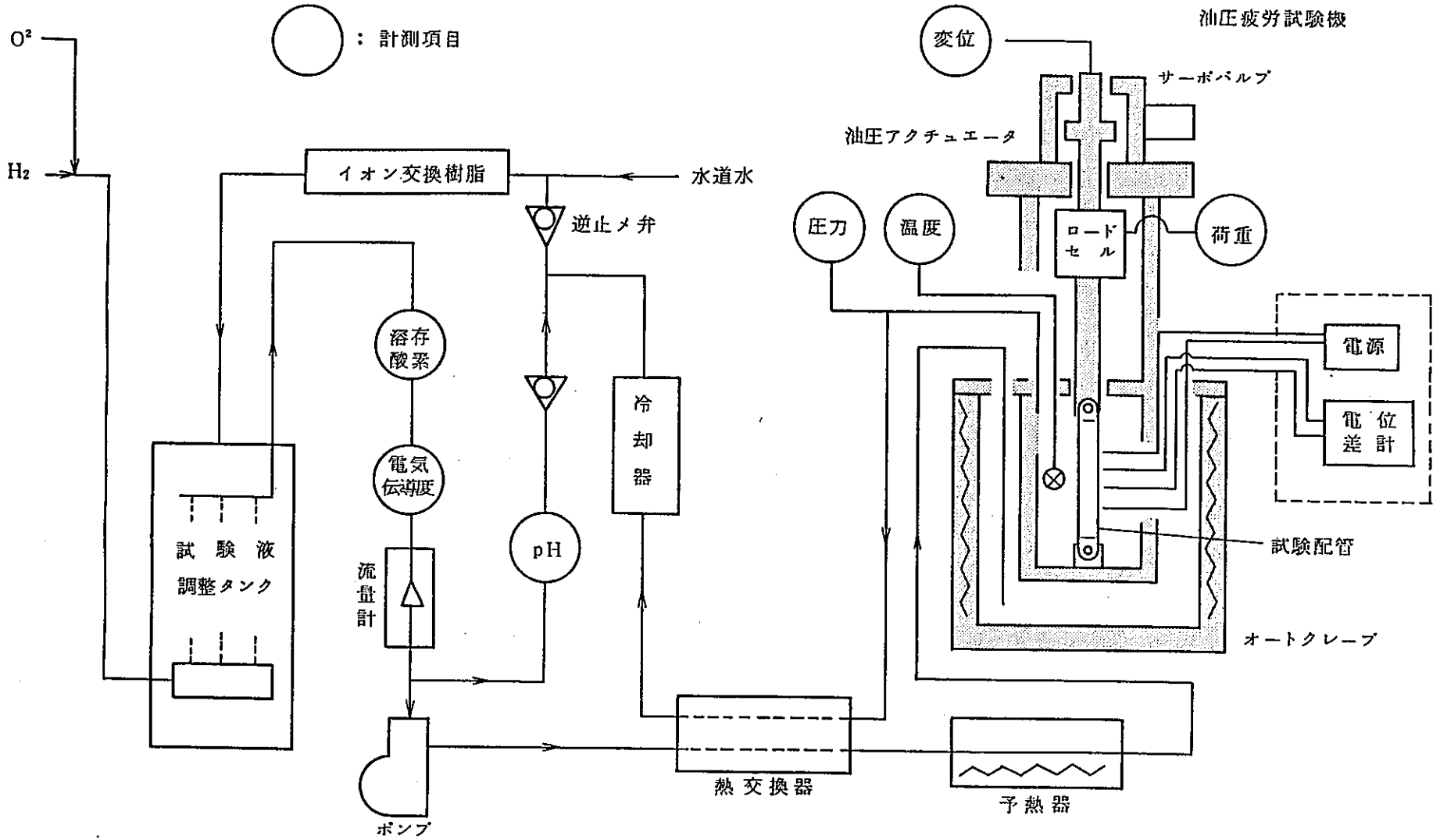
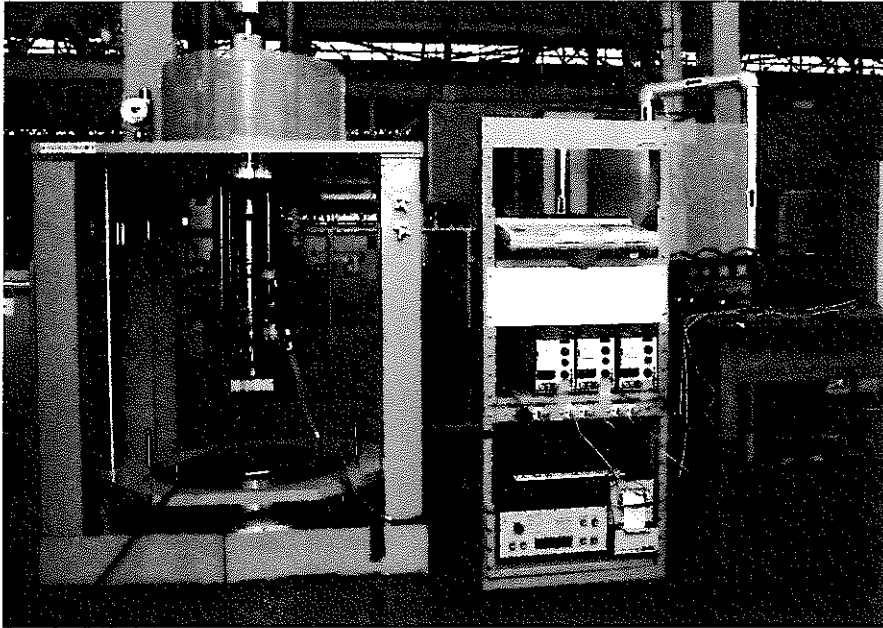
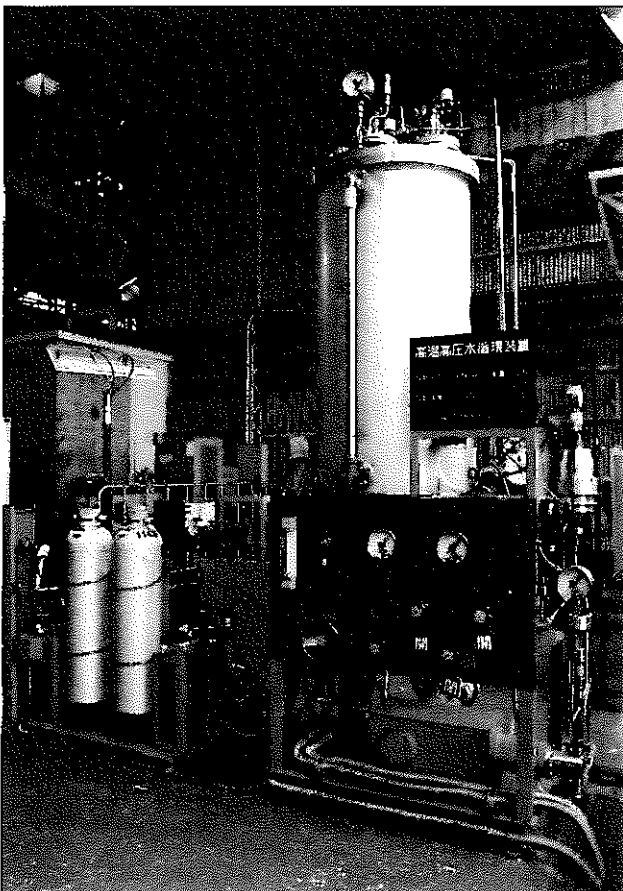


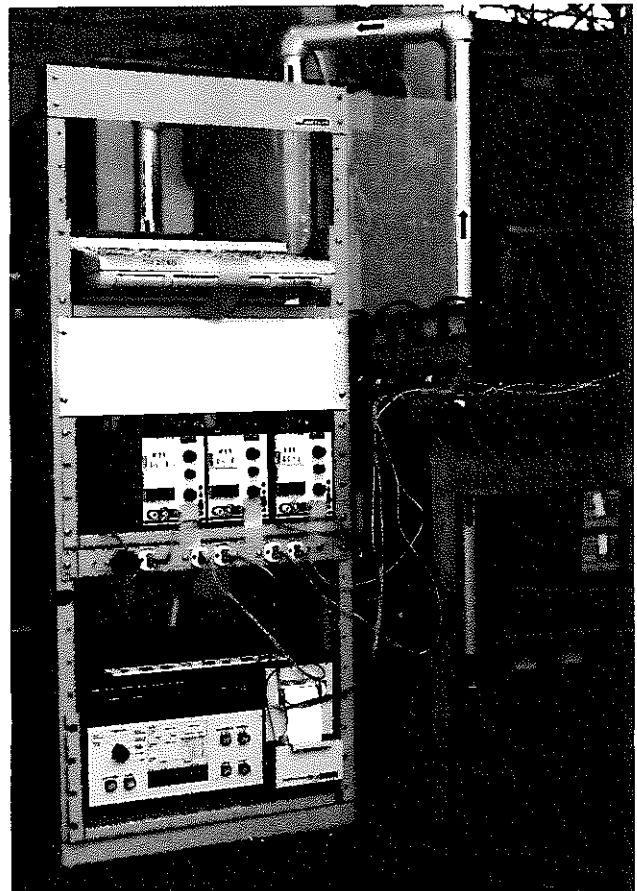
図 2 - 1 き裂進展試験装置及び試験条件測定系



(a) 試験機



(b) 高温高圧水循環装置



(c) ポテンシャル法装置

図 2 - 2 疲労き裂進展試験に用いた試験装置写真

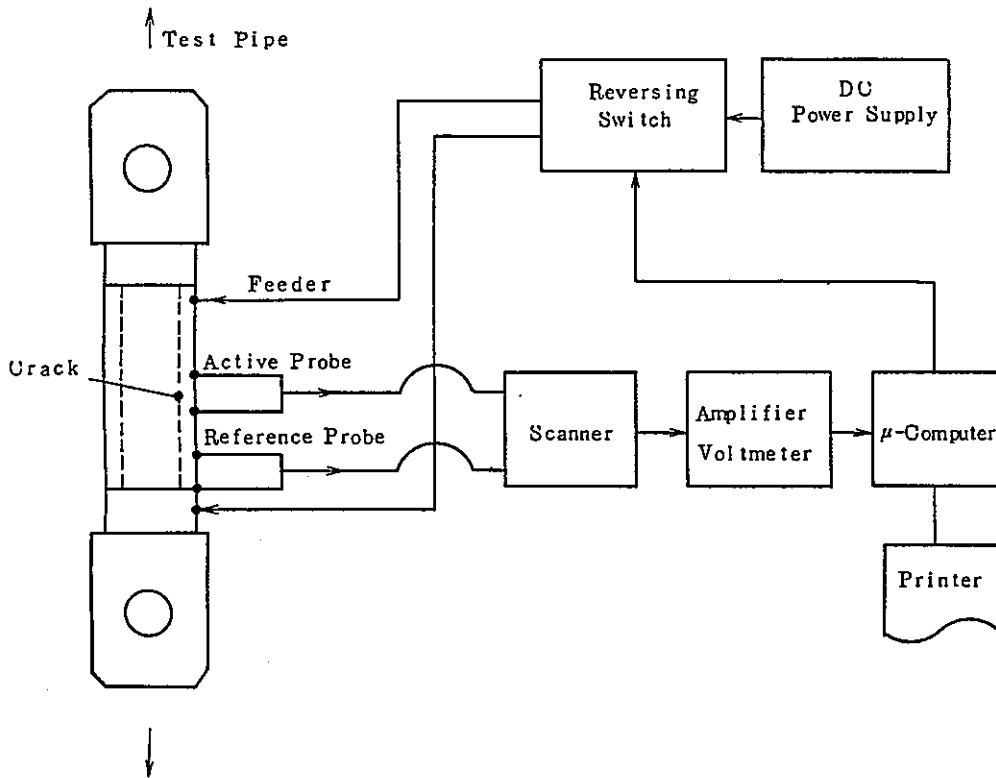


図 2 - 3 疲労き裂進展試験におけるポテンシャル測定系統図

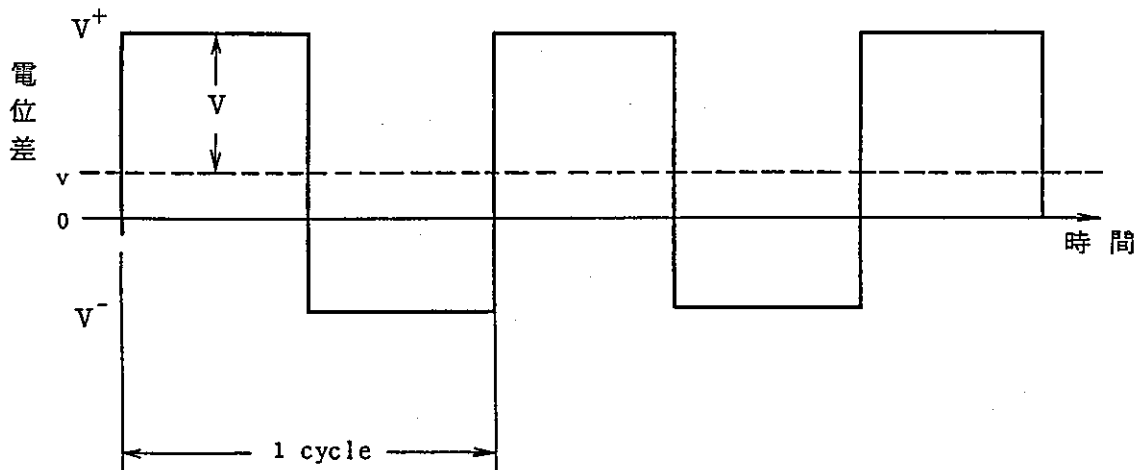


図 2 - 4 疲労き裂進展試験におけるポテンシャル測定シーケンス

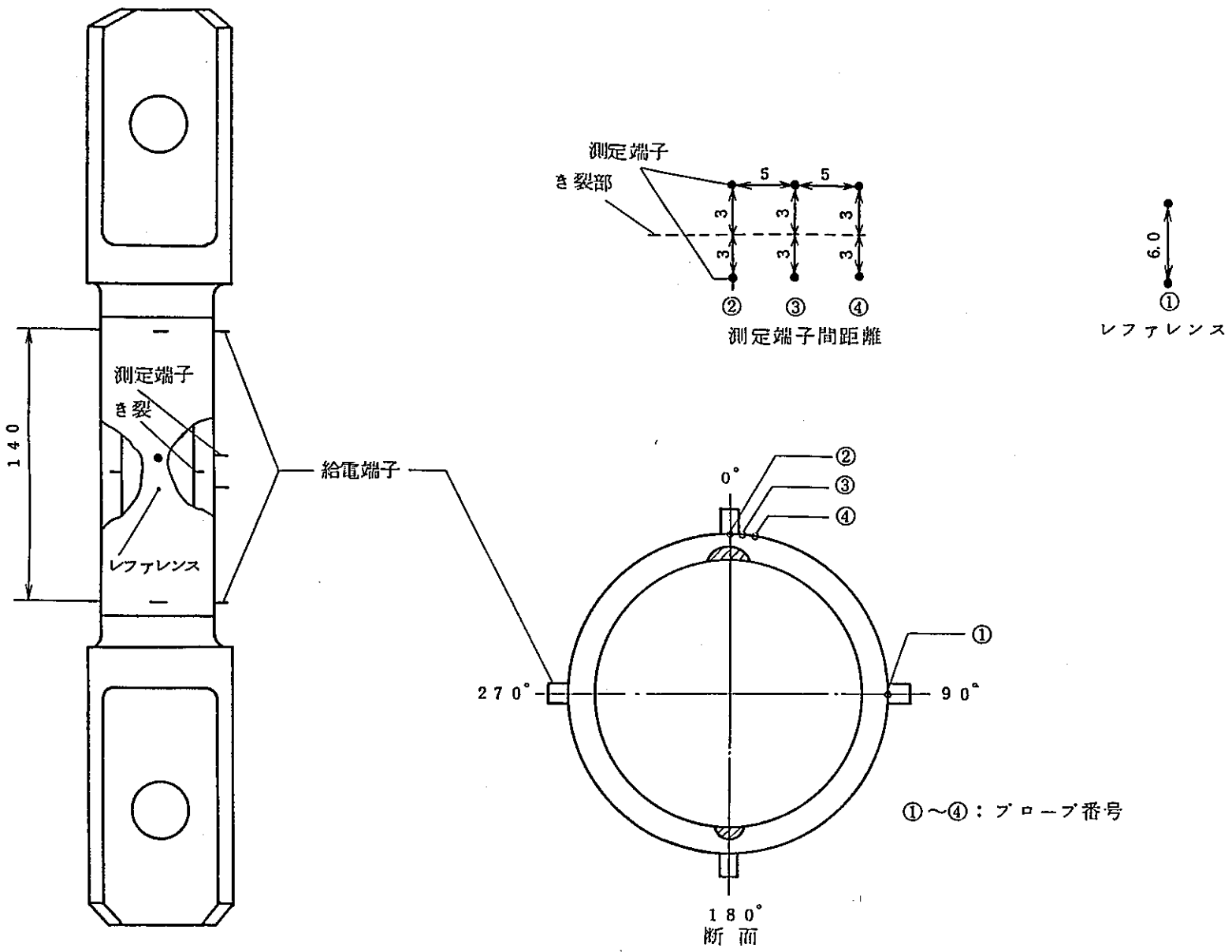


図 2 - 5 疲労き裂進展試験におけるポテンシャル法プローブ位置 (TP-13)

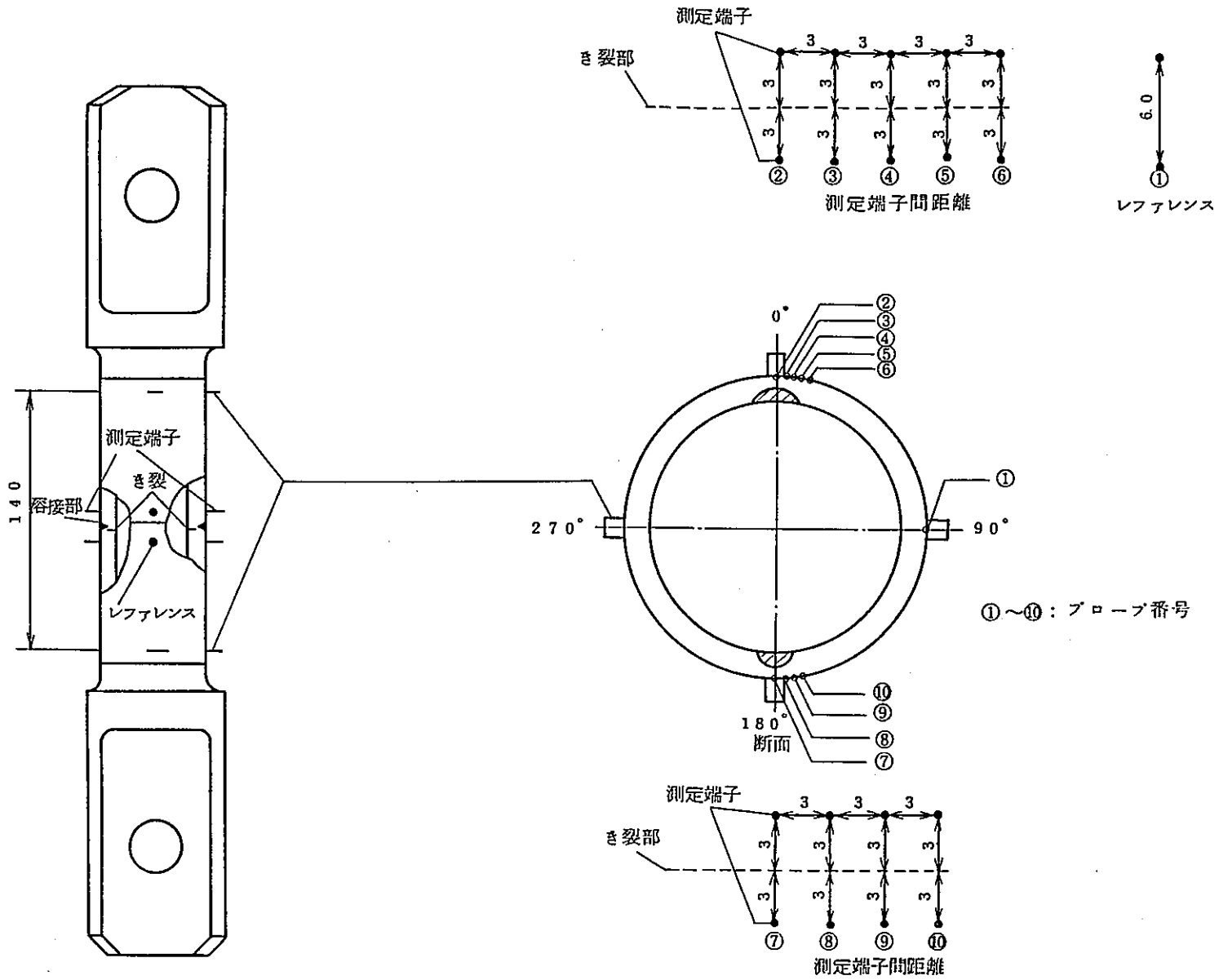
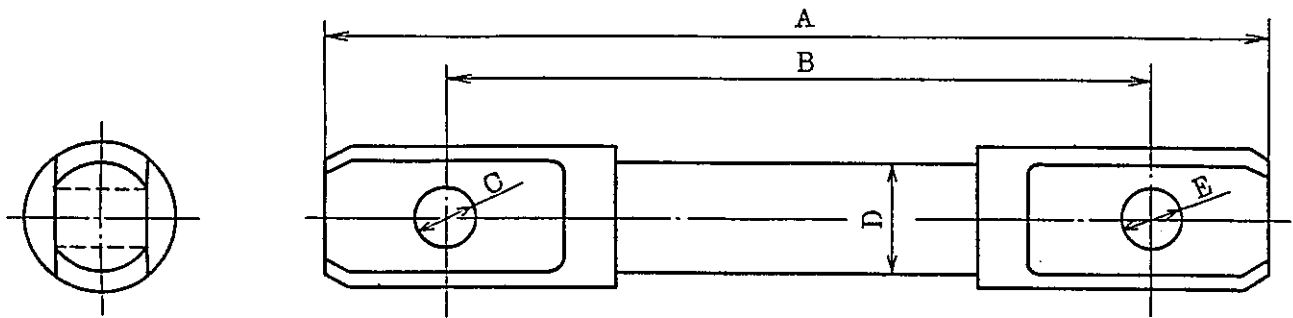


図 2 - 6 疲労き裂進展試験におけるポテンシャル法プローブ位置 (TP-14)



単位(mm)

測定箇所 図示寸法	A	B	C	D	E
TP No	475.3±4	355.3±3	$\phi 32.2 \begin{matrix} +0.3 \\ 0 \end{matrix}$	$\phi 60.5 \pm 1$	$\phi 32.2 \begin{matrix} +0.3 \\ 0 \end{matrix}$
TP-13	475.3	356.2	32.3	60.6	32.3
TP-14	475.5	355.5	32.3	60.6	32.3

図2-7 疲労き裂進展試験に用いた試験配管形状寸法(直管引張)

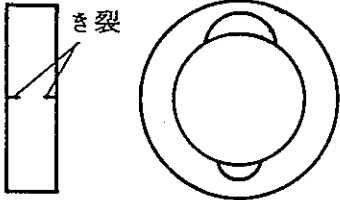
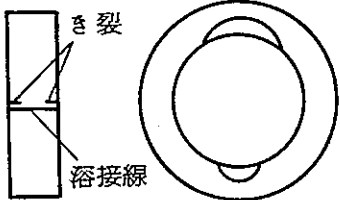
TP #	試験種別	初期き裂形状	深さ a (mm) 長さ 2c (mm)
TP-13	直管 高温水中		大 ( a = 3.04 2c = 14.90 )  小 ( a = 2.81 2c = 10.9 )
TP-14	直管 室温大気中		大 ( a = 3.04 2c = 14.92 )  小 ( a = 2.80 2c = 10.96 )

図 2 - 8 疲労き裂進展試験に用いた初期き裂位置

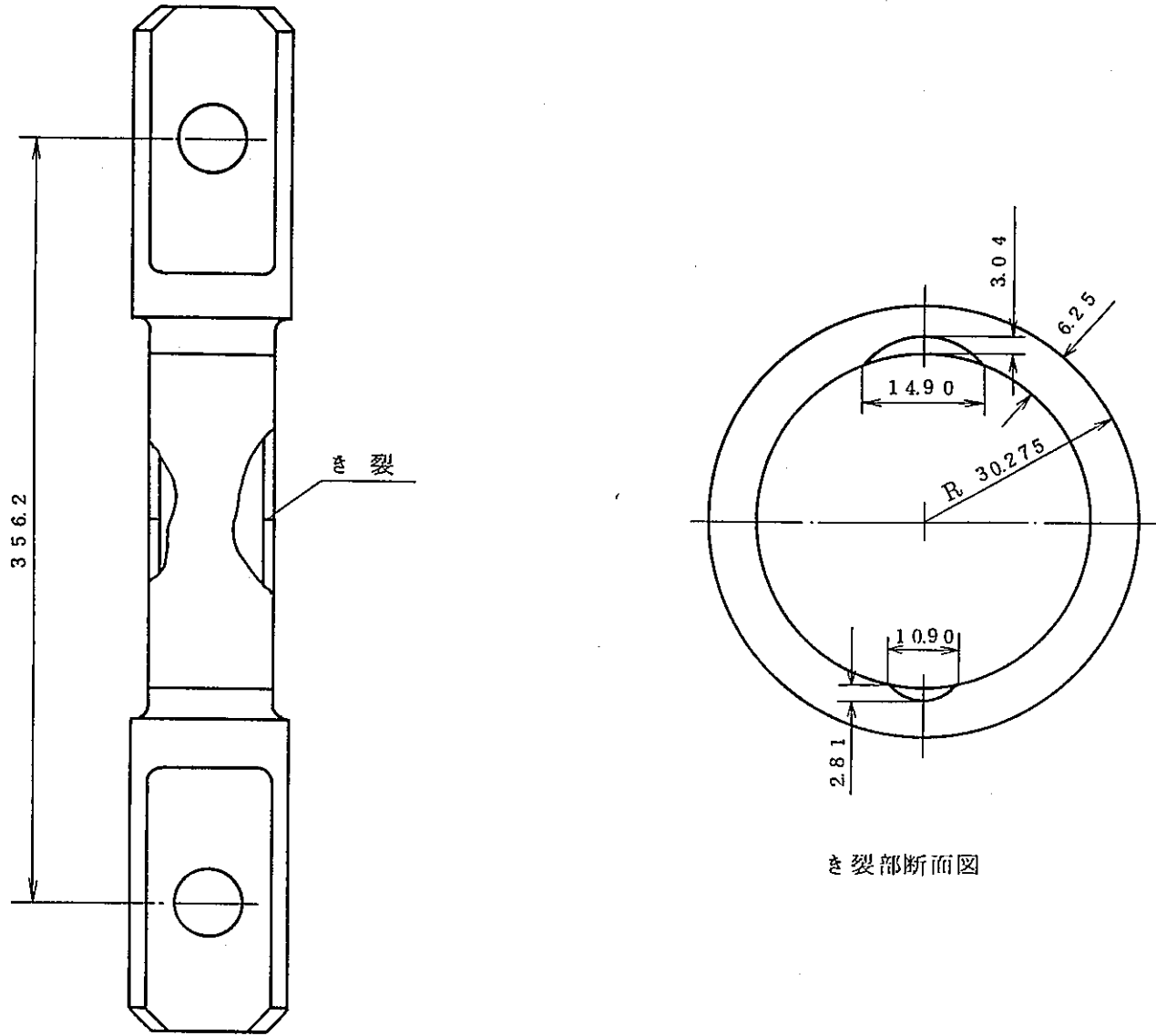


図 2 - 9 疲労き裂進展試験に用いた直管引張供試体 (TP-13) 寸法



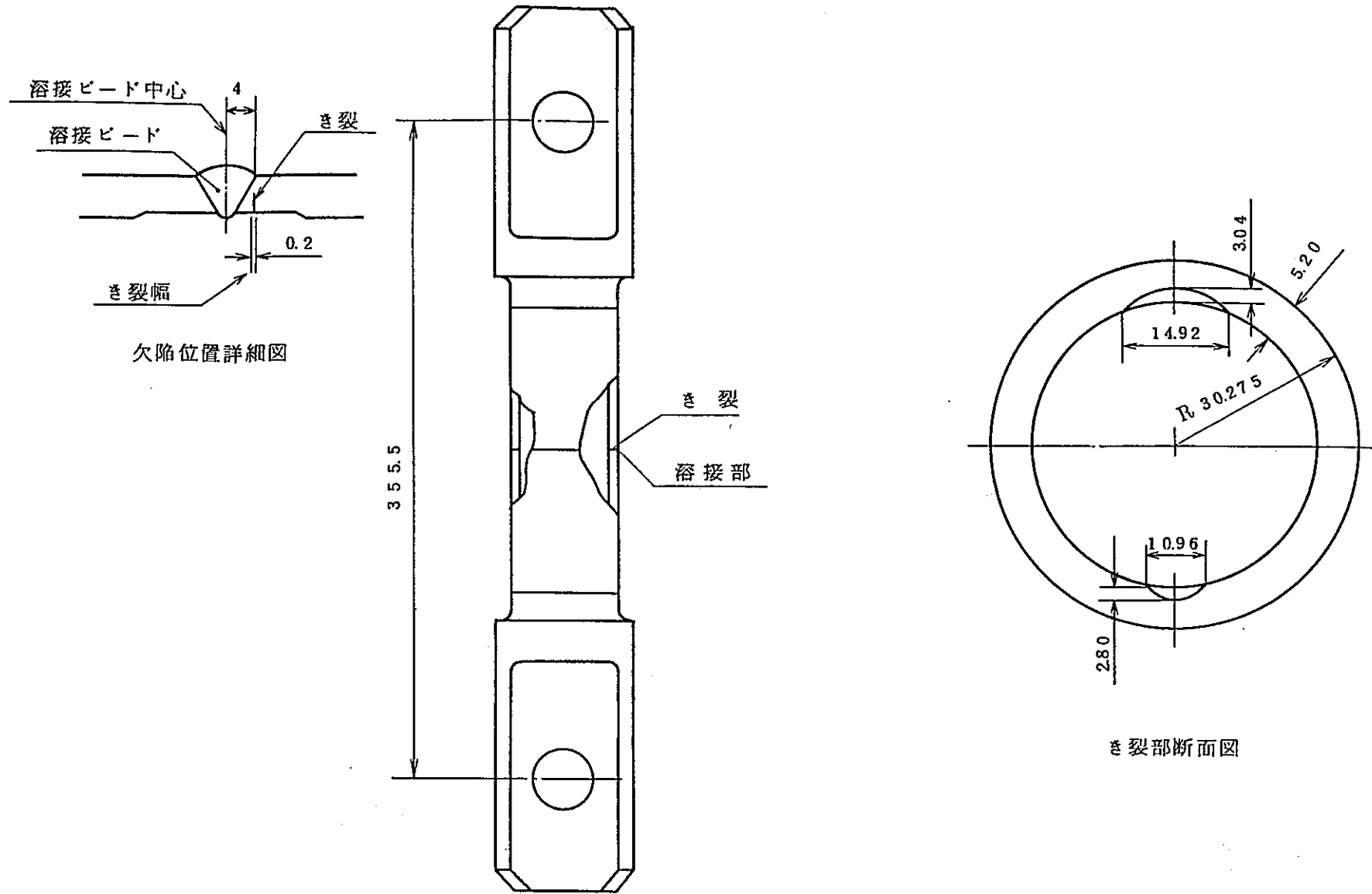
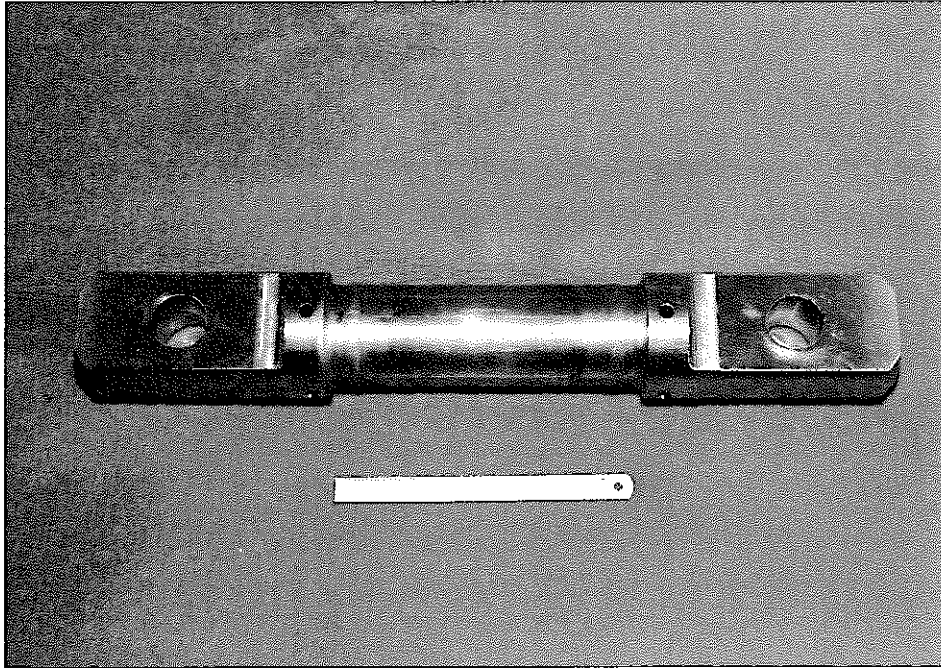
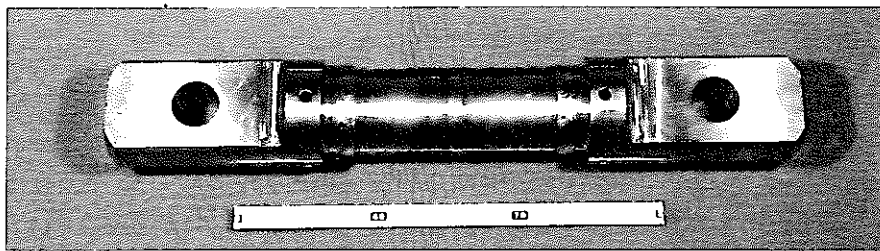


図 2-10 疲労き裂進展試験に用いた直管引張供試体 (TP-14) 寸法

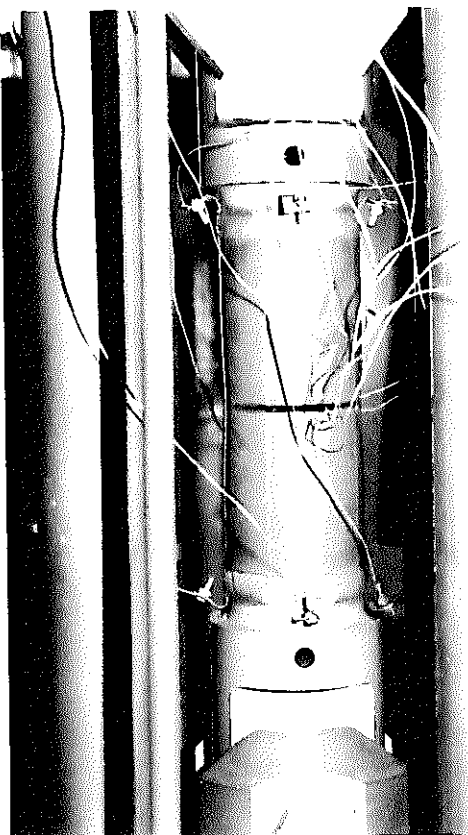


TP-13

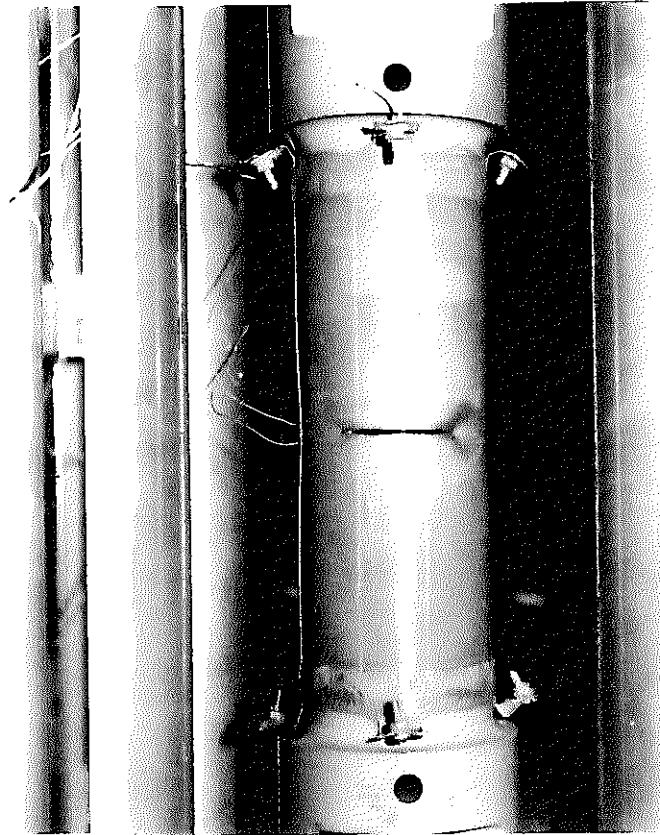


TP-14

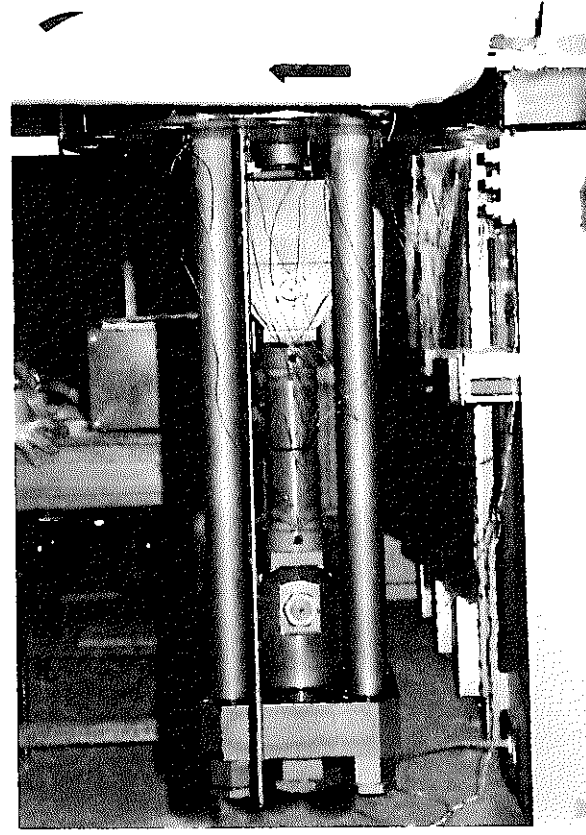
図 2-11 疲労き裂進展試験に用いた試験配管写真



(大き裂)



(小き裂)



(全体写真)

図 2 - 12 疲労き裂進展試験における試験状況写真 (TP - 13)

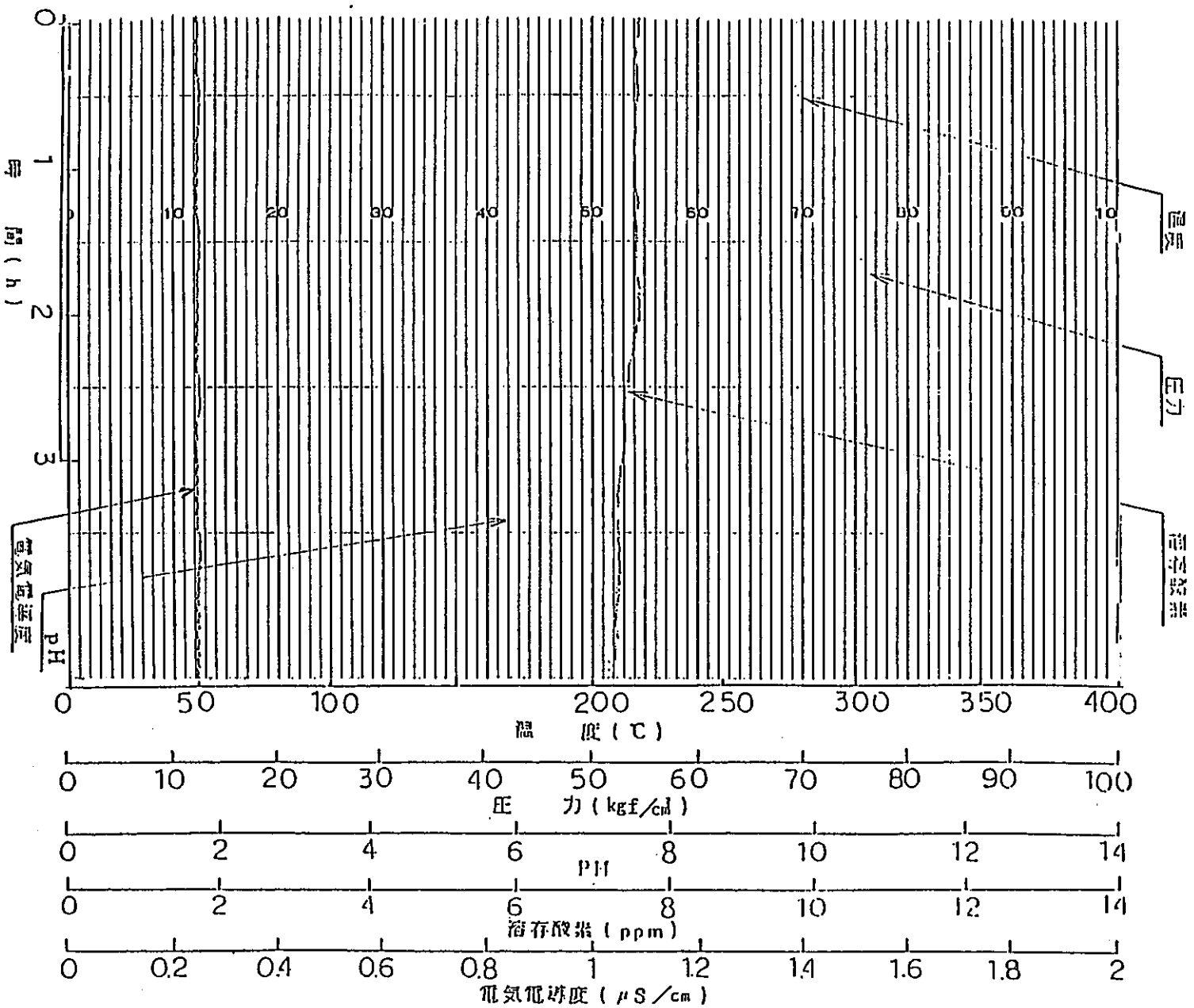


図 2-13 疲労き裂進展試験に用いた試験環境実測例

TP-13 (高温水中試験時)

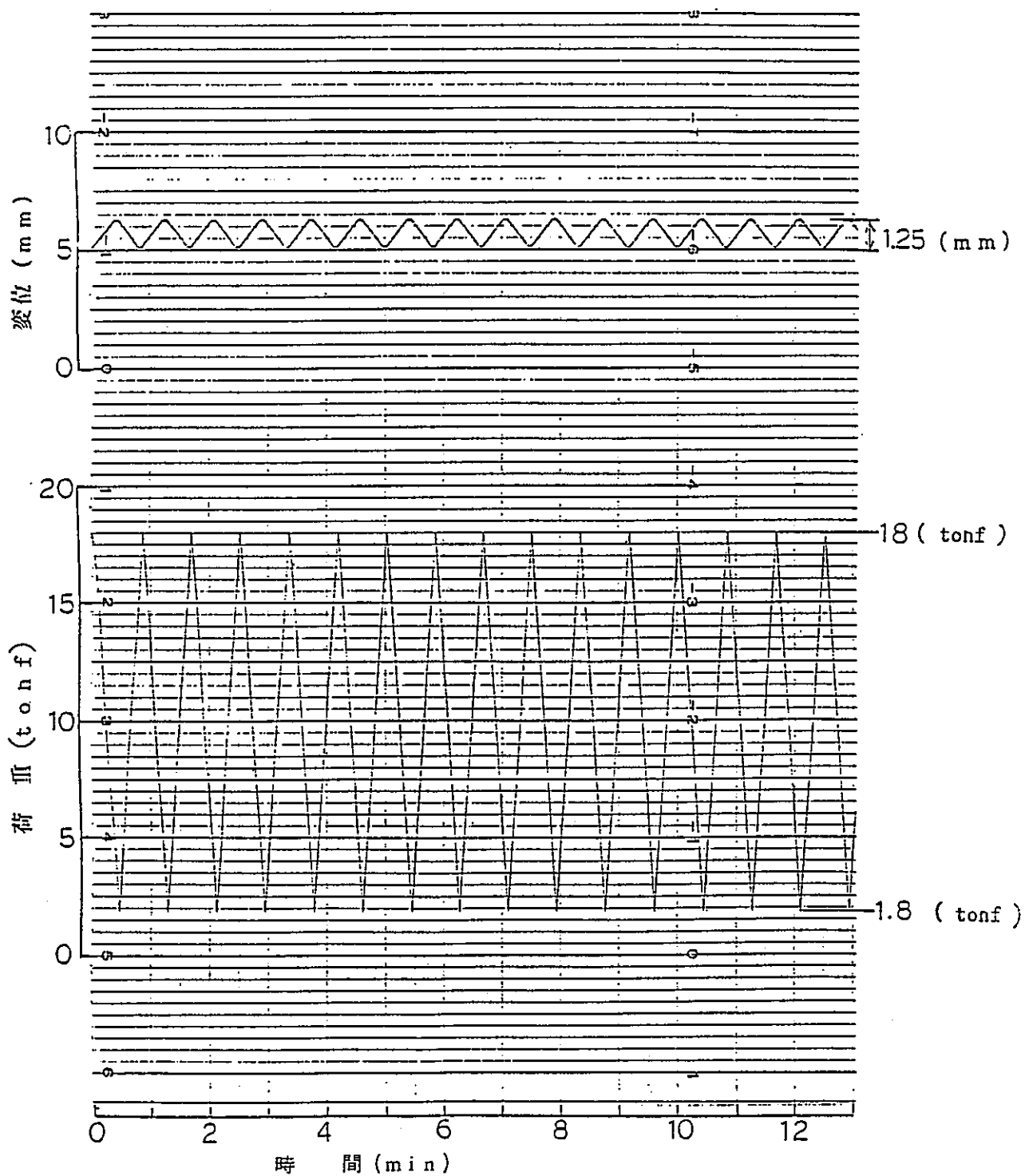


図 2-14 疲労き裂進展試験に用いた荷重, 変位実測 (TP-13)

TP-14 (室温大気中試験時)

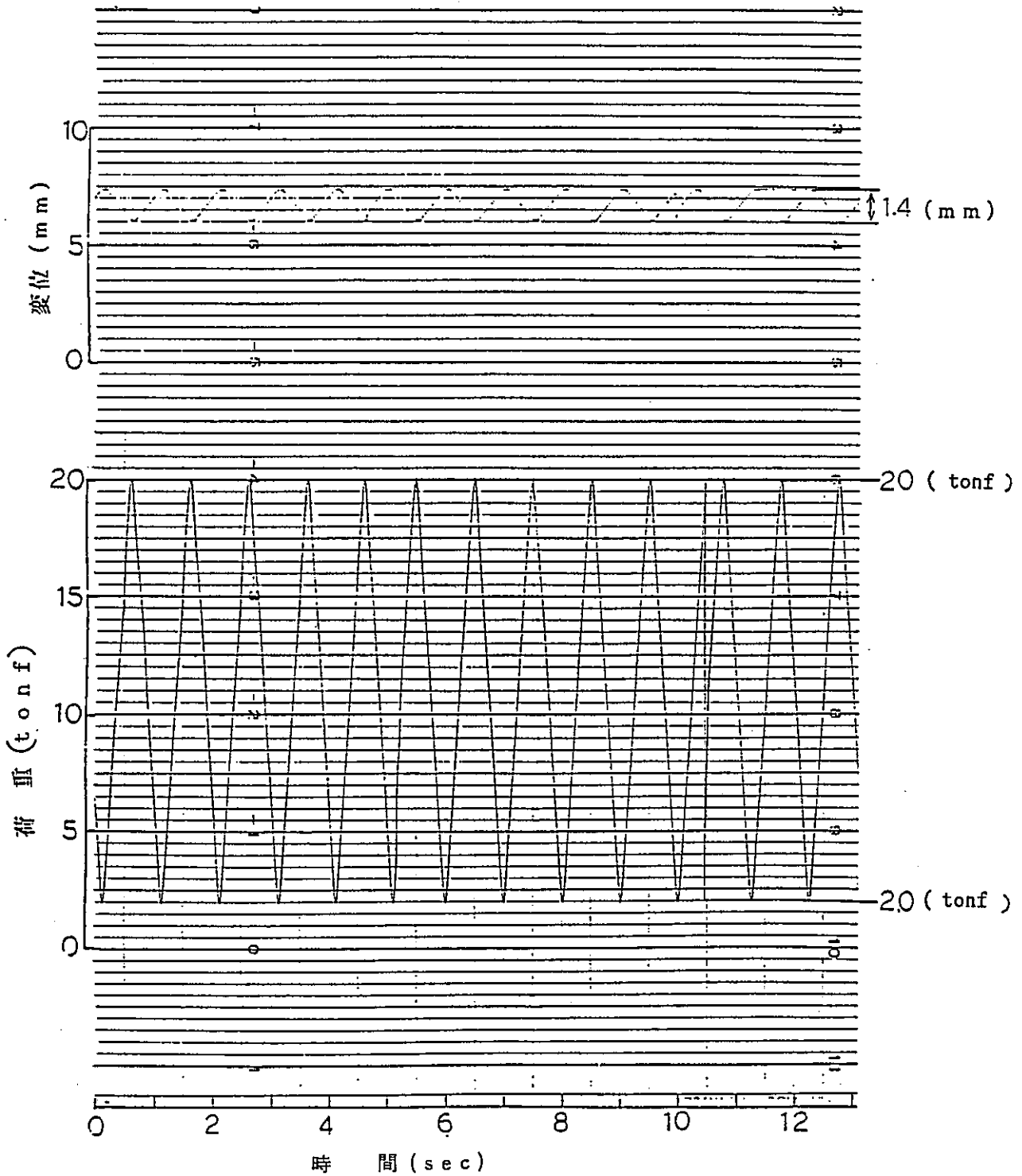
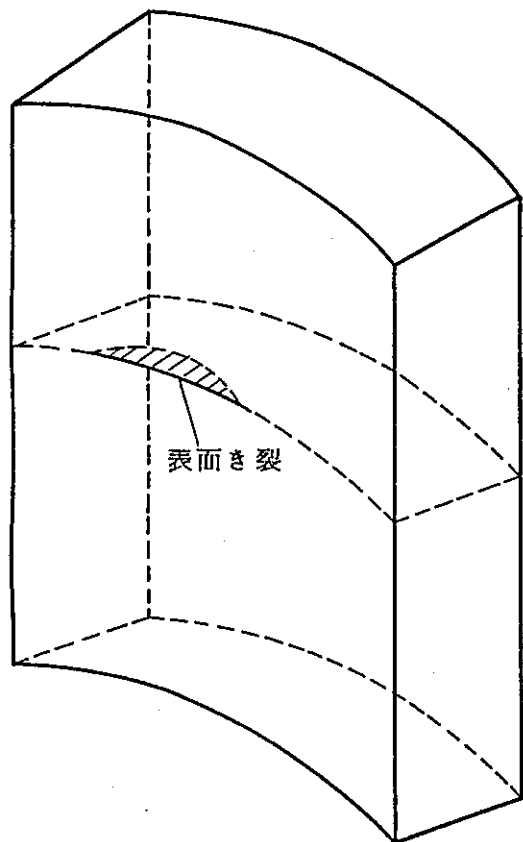
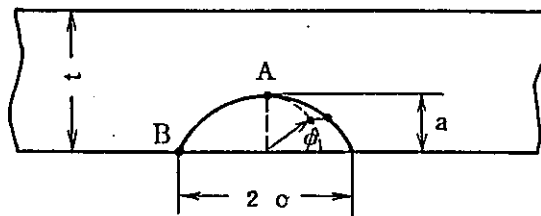


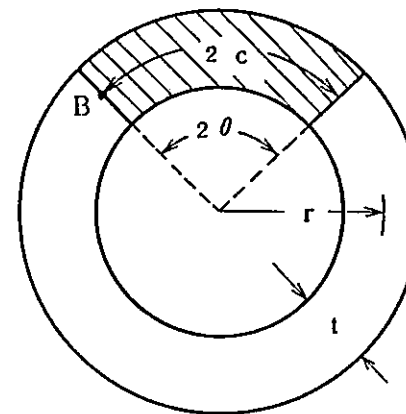
図2-15 疲労き裂進展試験に用いた荷重，変位実測 (TP-14)



(a) 配管内面き裂



(b) 有限板の表面き裂



(c) 配管貫通き裂

図 2-16 疲労き裂進展試験における配管内面き裂の応力拡大係数の評価

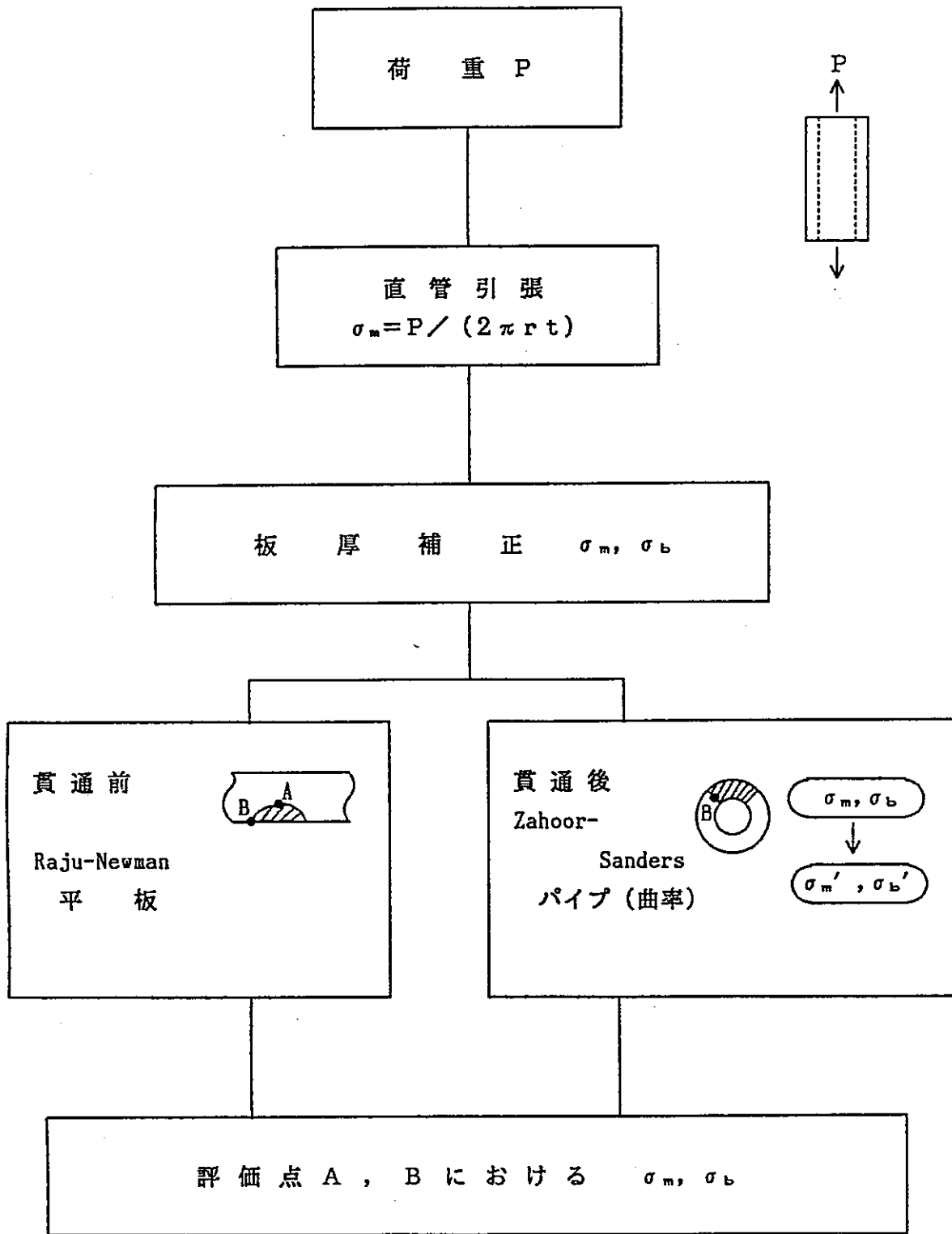
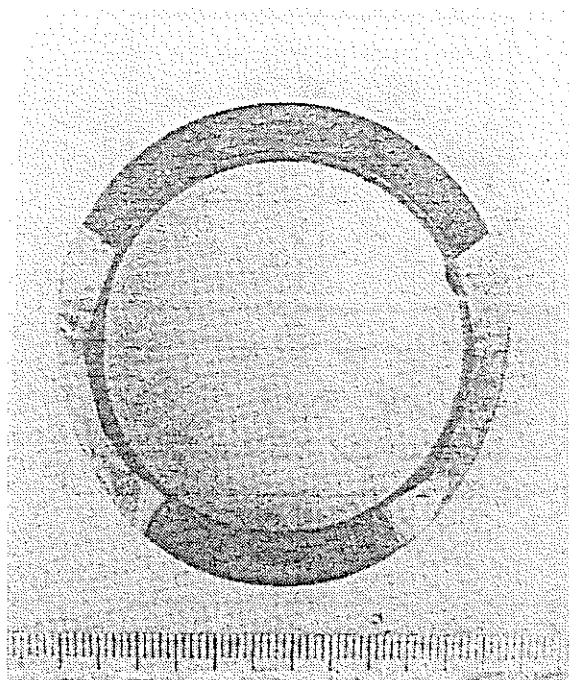
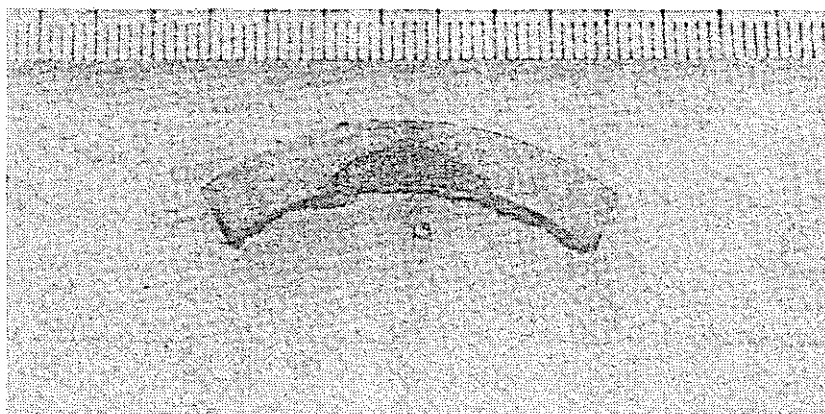


図 2-17 応力拡大係数  $K_1$  の評価に用いる膜応力, 曲げ応力





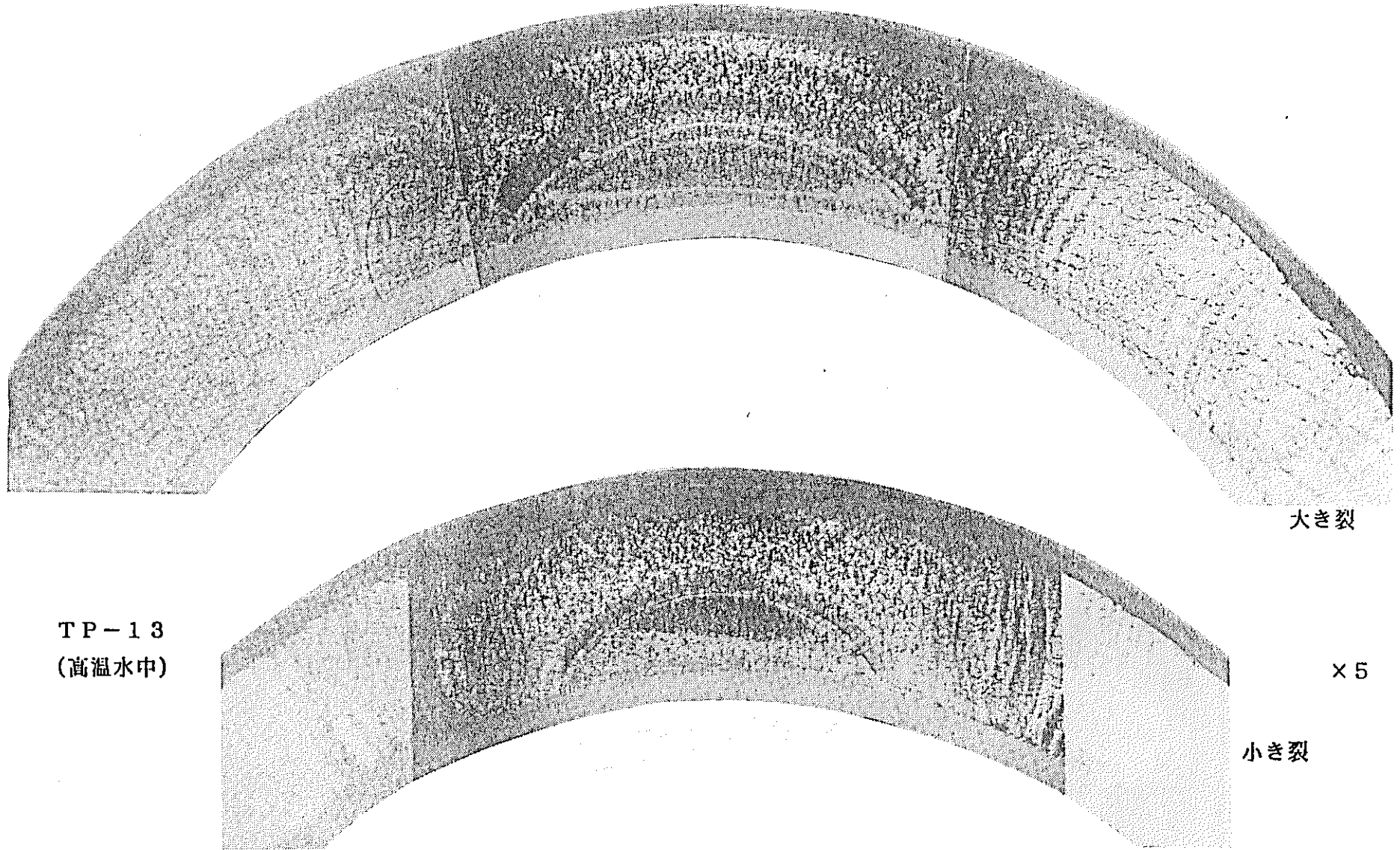
TP-13 (高温水中)



TP-14 (室温大気中)

図2-18 疲労き裂進展試験における破面写真 (TP-13, 14)

-2-29-



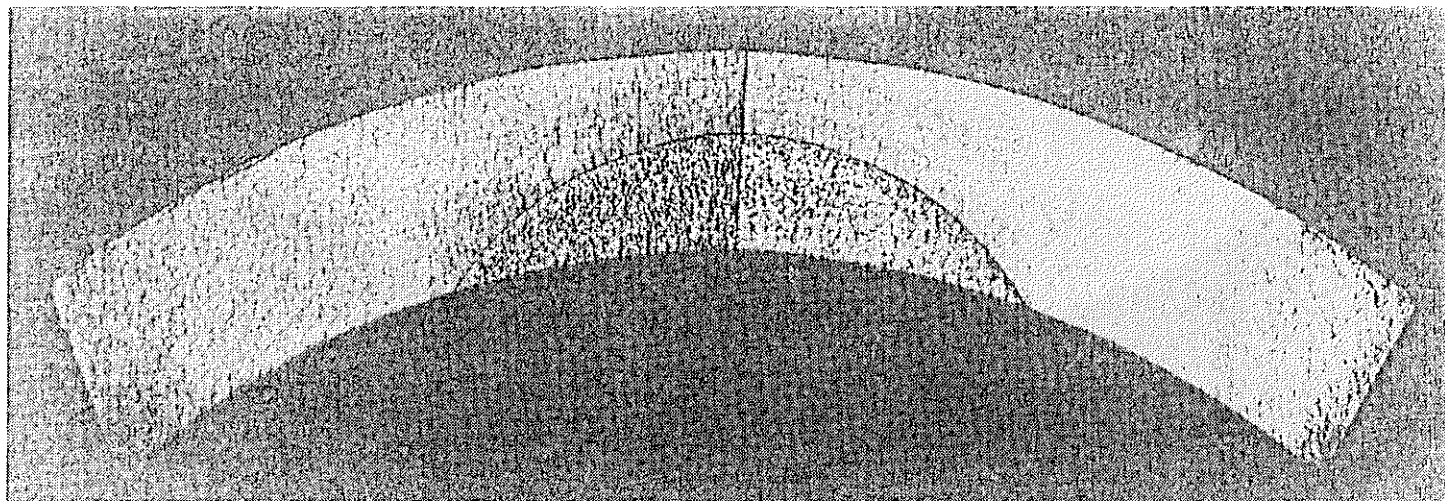
TP-13  
(高温水中)

大き裂

$\times 5$

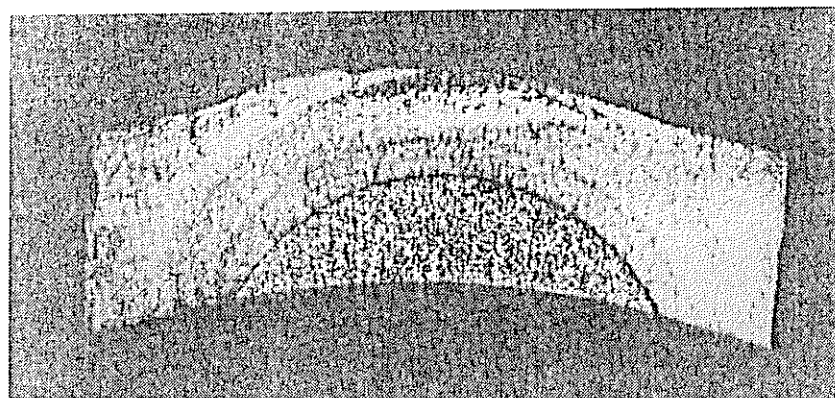
小さ裂

図 2-19 疲労き裂進展試験における破面写真 (TP-13)



大き裂

TP-14 (室温大気中)



小き裂

X5

図2-20 疲労き裂進展試験における破面写真 (TP-14)

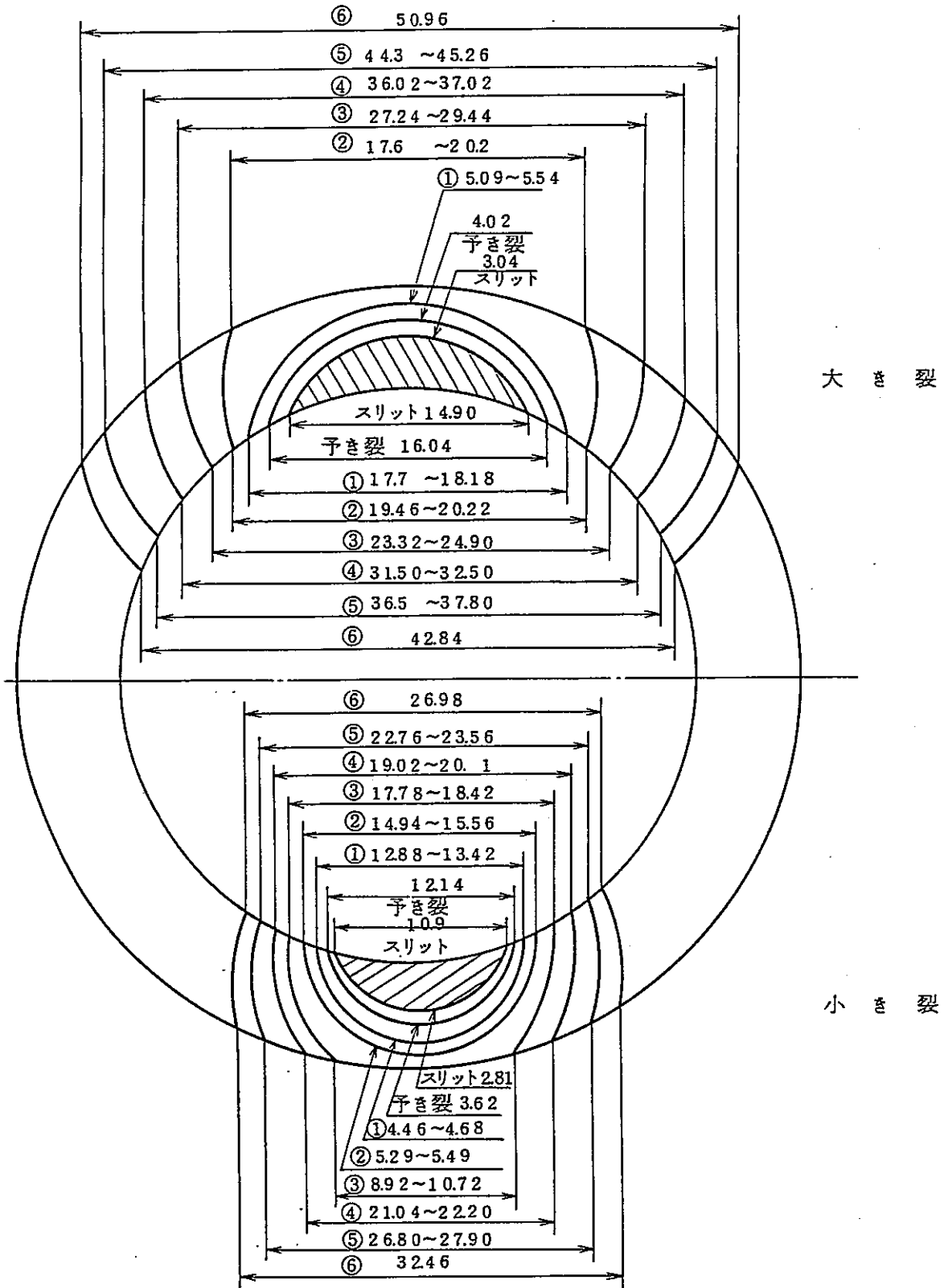


図 2-21 疲労き裂進展試験におけるき裂進展形状 (TP-13)

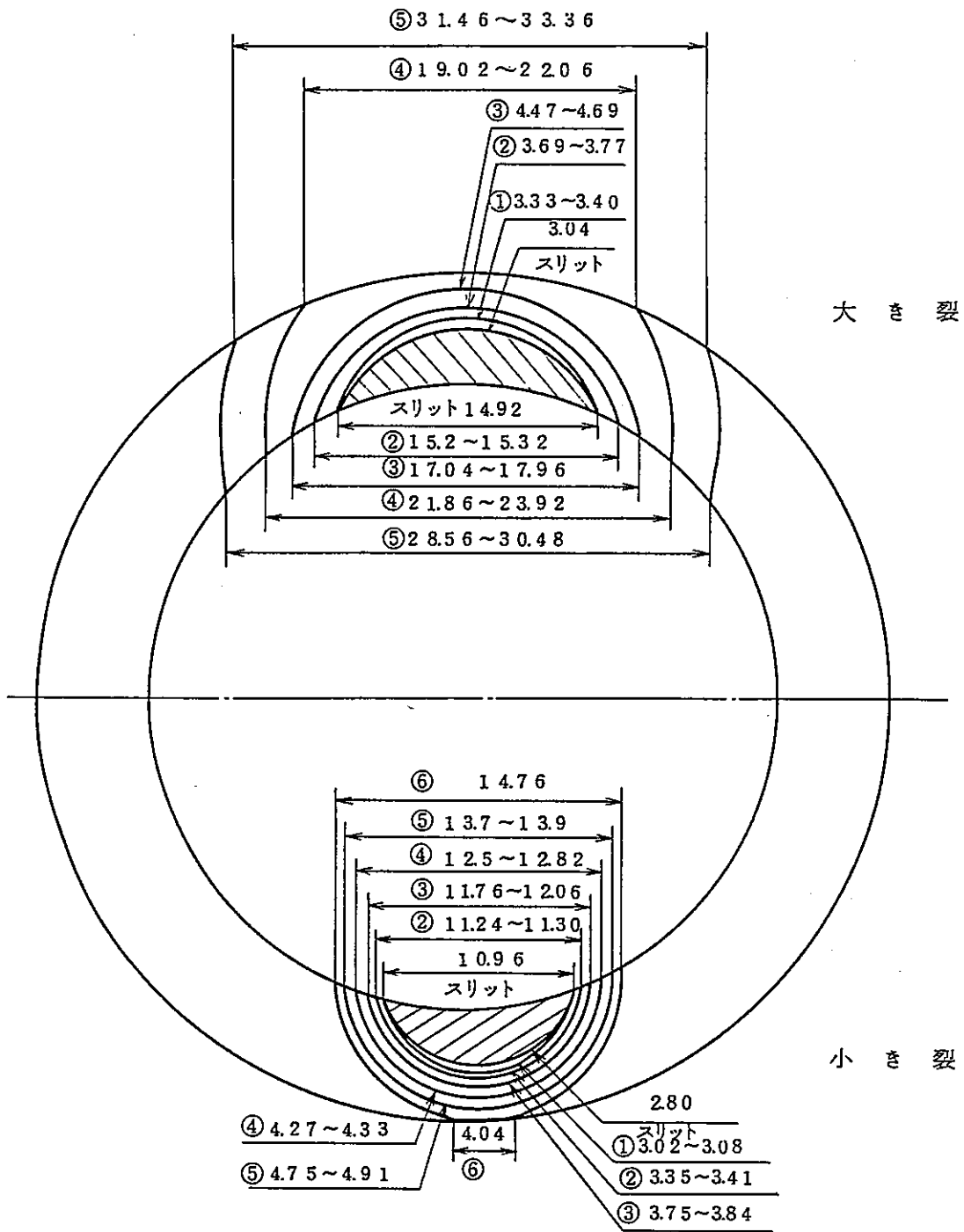


図2-22 疲労き裂進展試験におけるき裂進展形状 (TP-14)

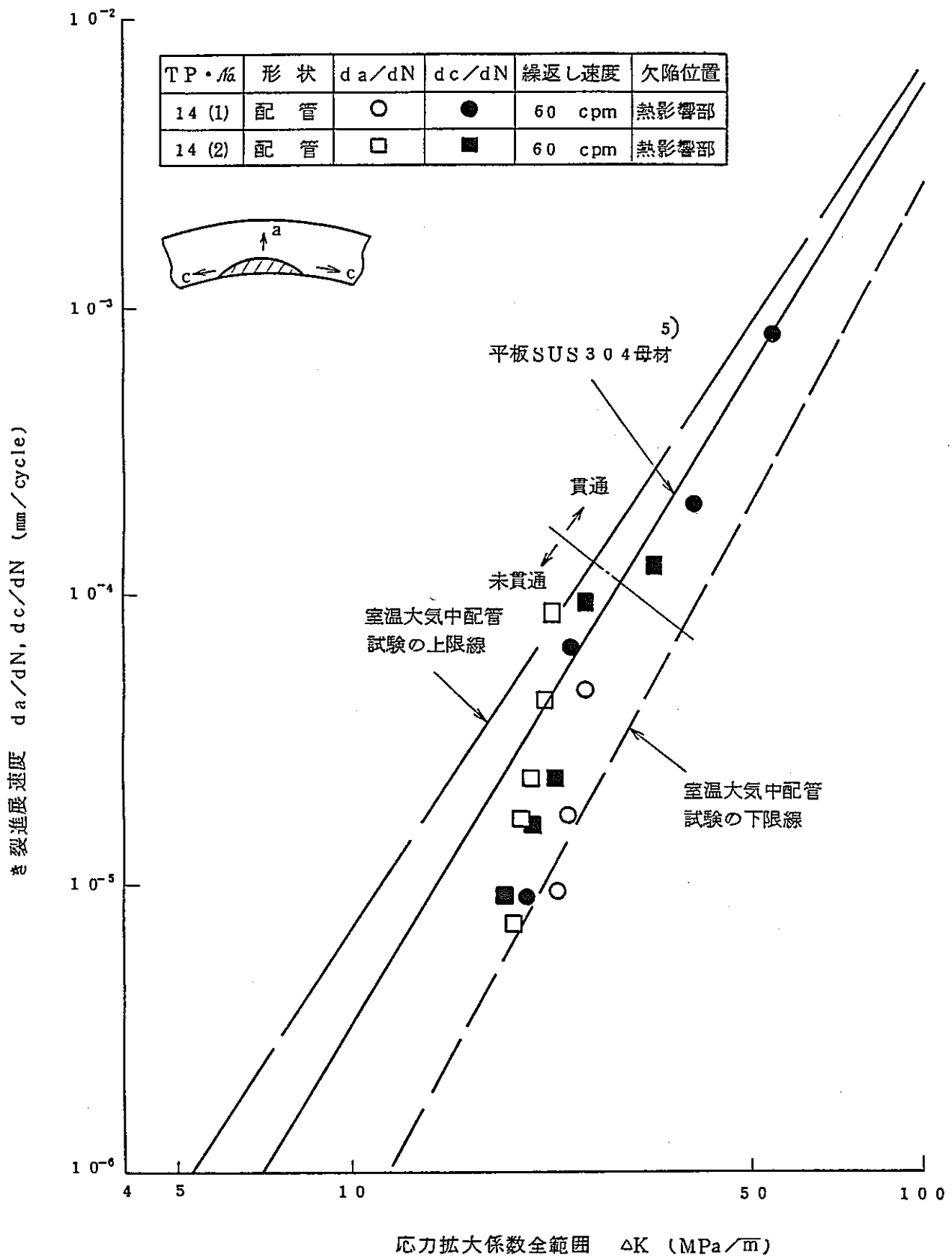


図 2-23 室温大気中における疲労き裂進展結果 (TP-14)  
(SUS316NG 熱影響部, 本年度実施分)

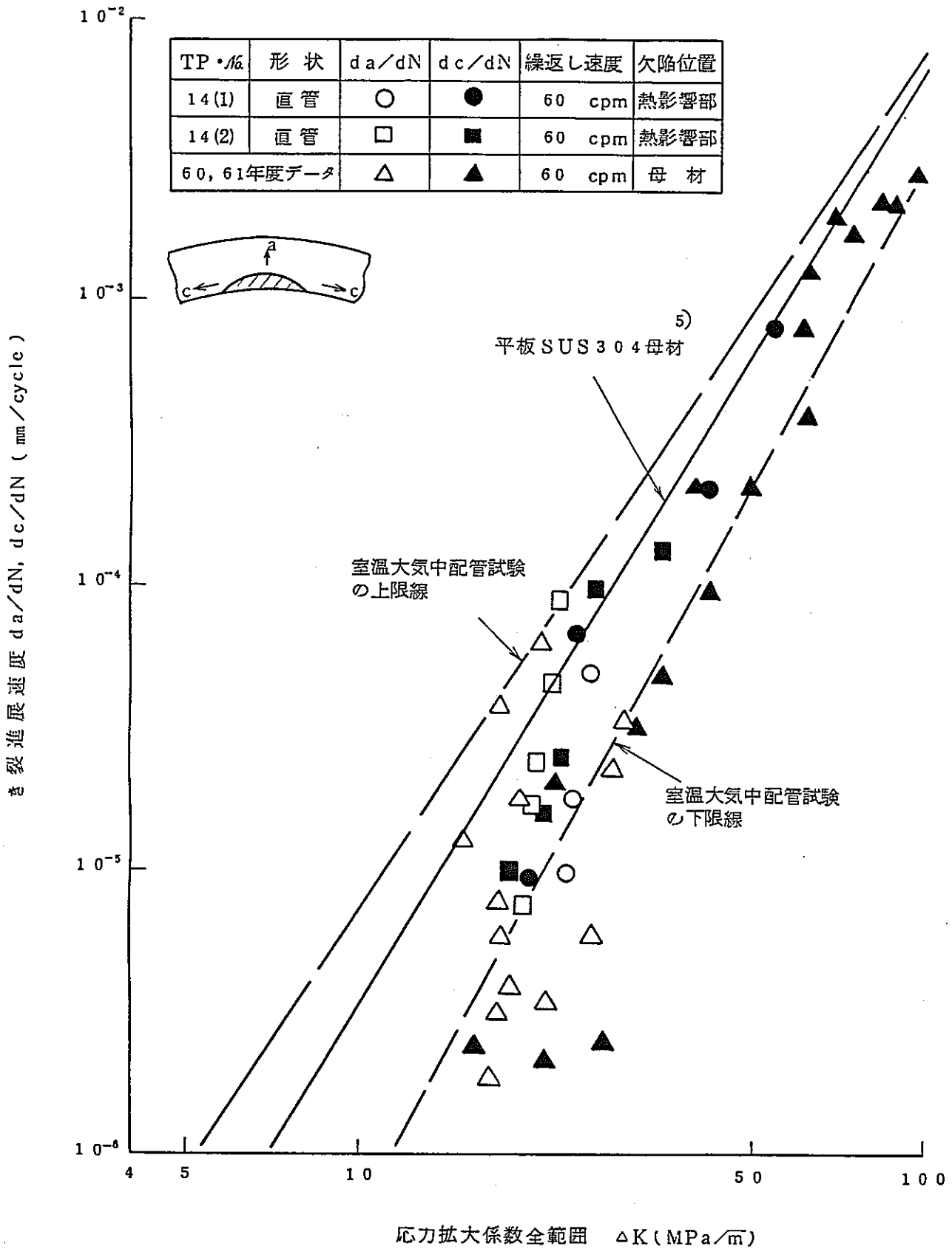


図 2-24 室温大気中における疲労き裂進展結果  
(SUS316NG 熱影響部, 3年度分)

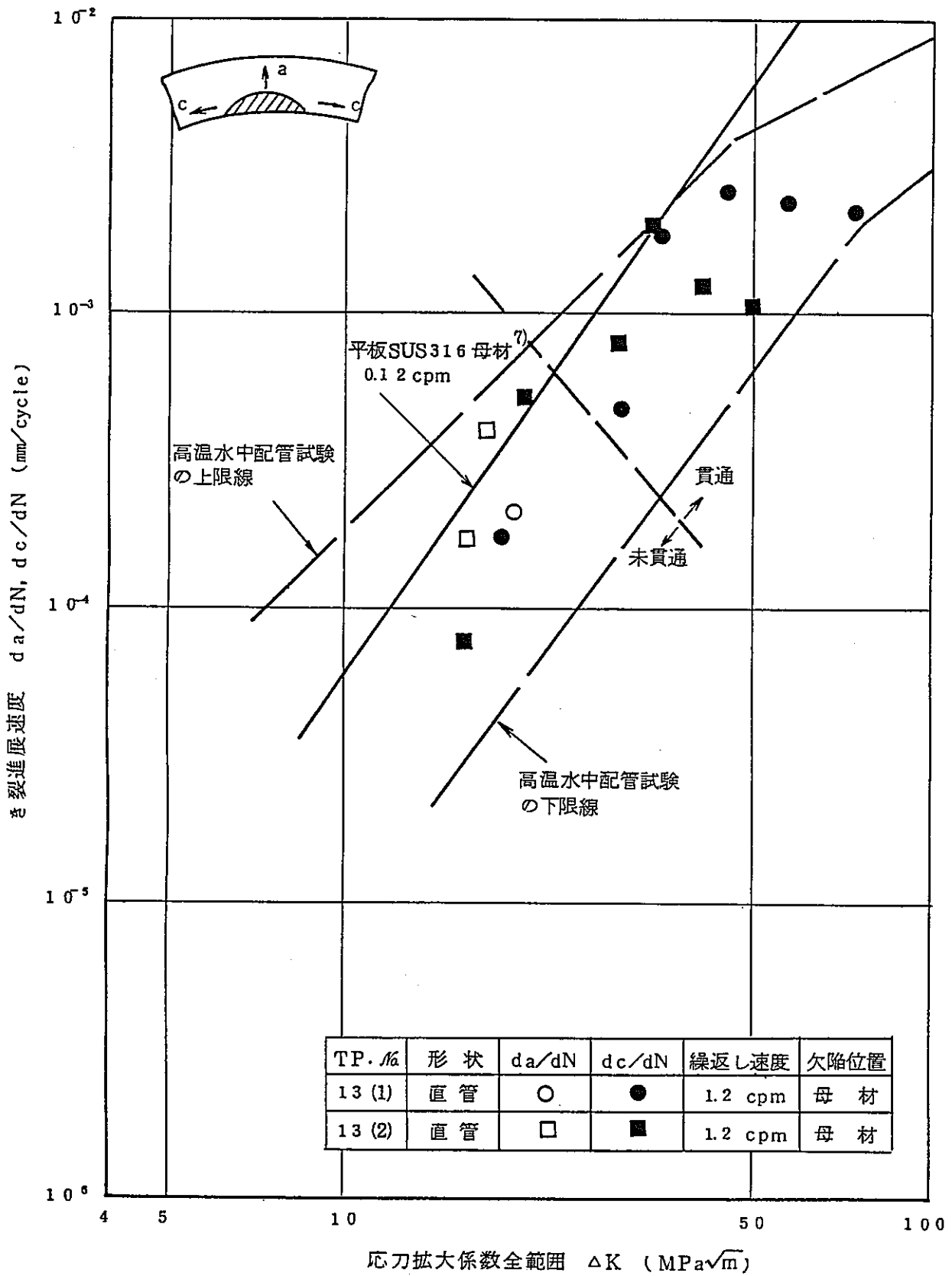


図 2 - 25 高温水中における疲労き裂進展結果 (TP - 13)  
(SUS316NG 母材, 本年度実施分)



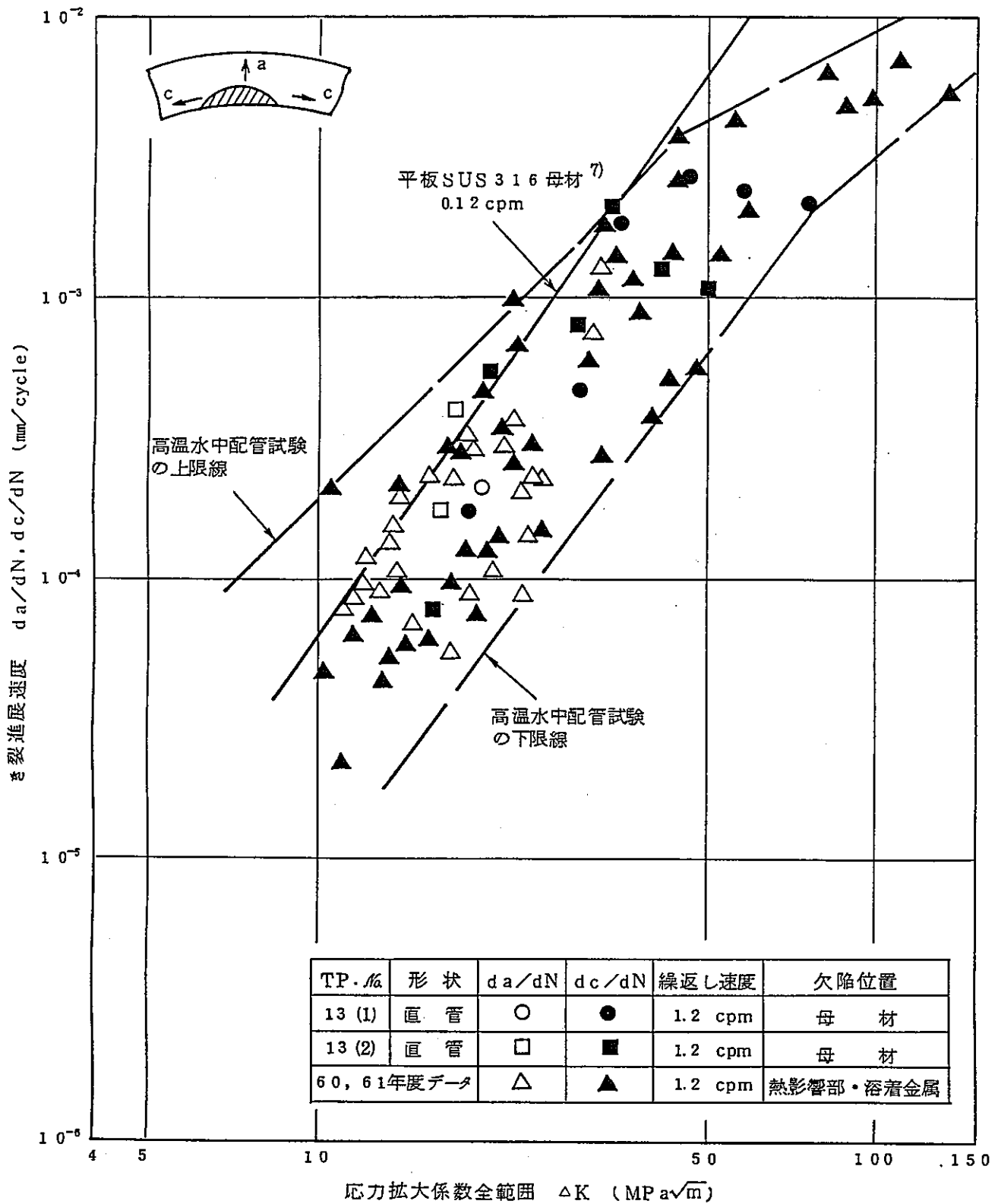


図2-26 高温水中における疲労き裂進展結果<sup>(1)</sup>  
(SUS316NG)

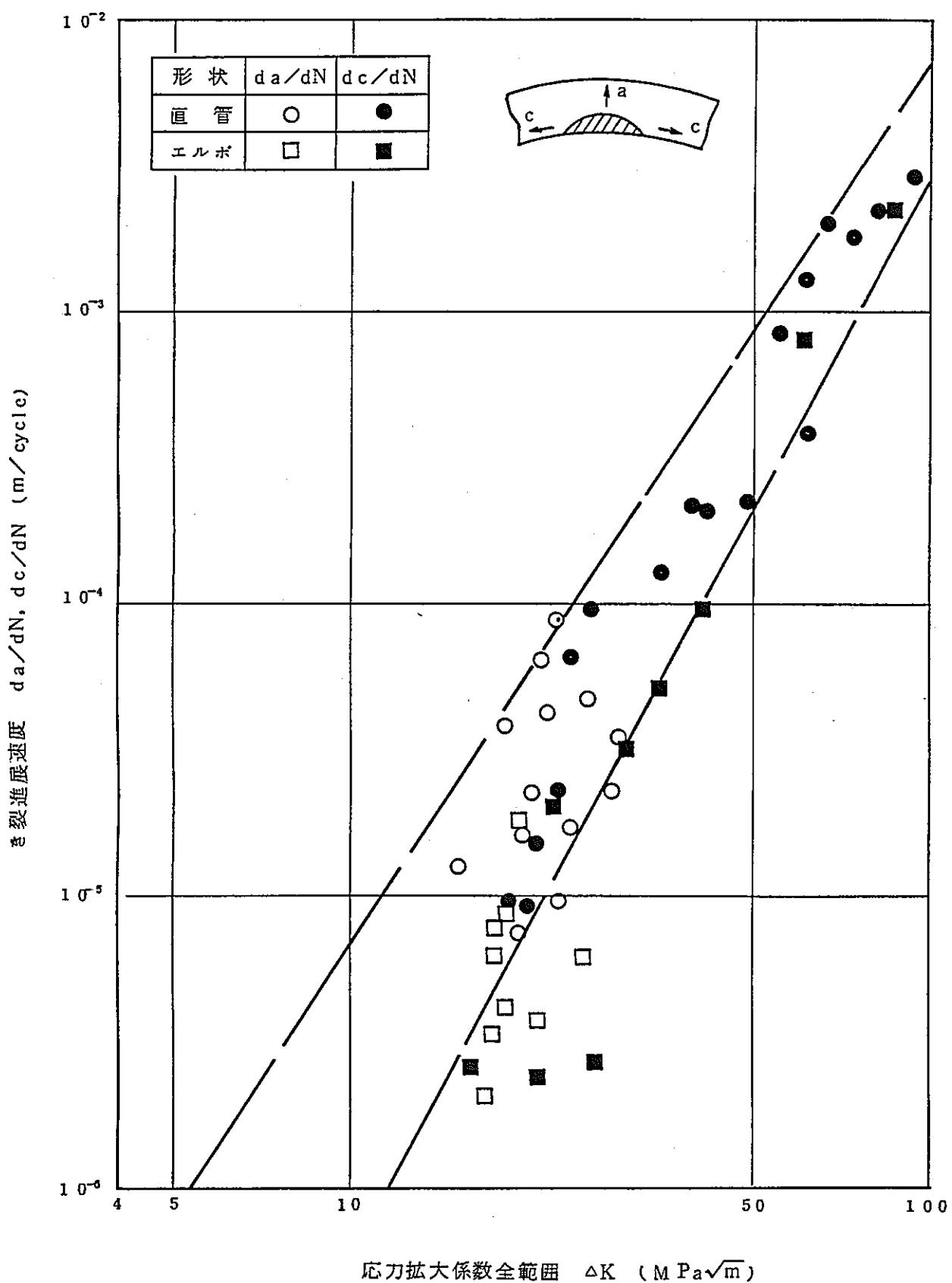


図 2-27 室温大気中における疲労き裂進展試験結果<sup>(1)</sup>

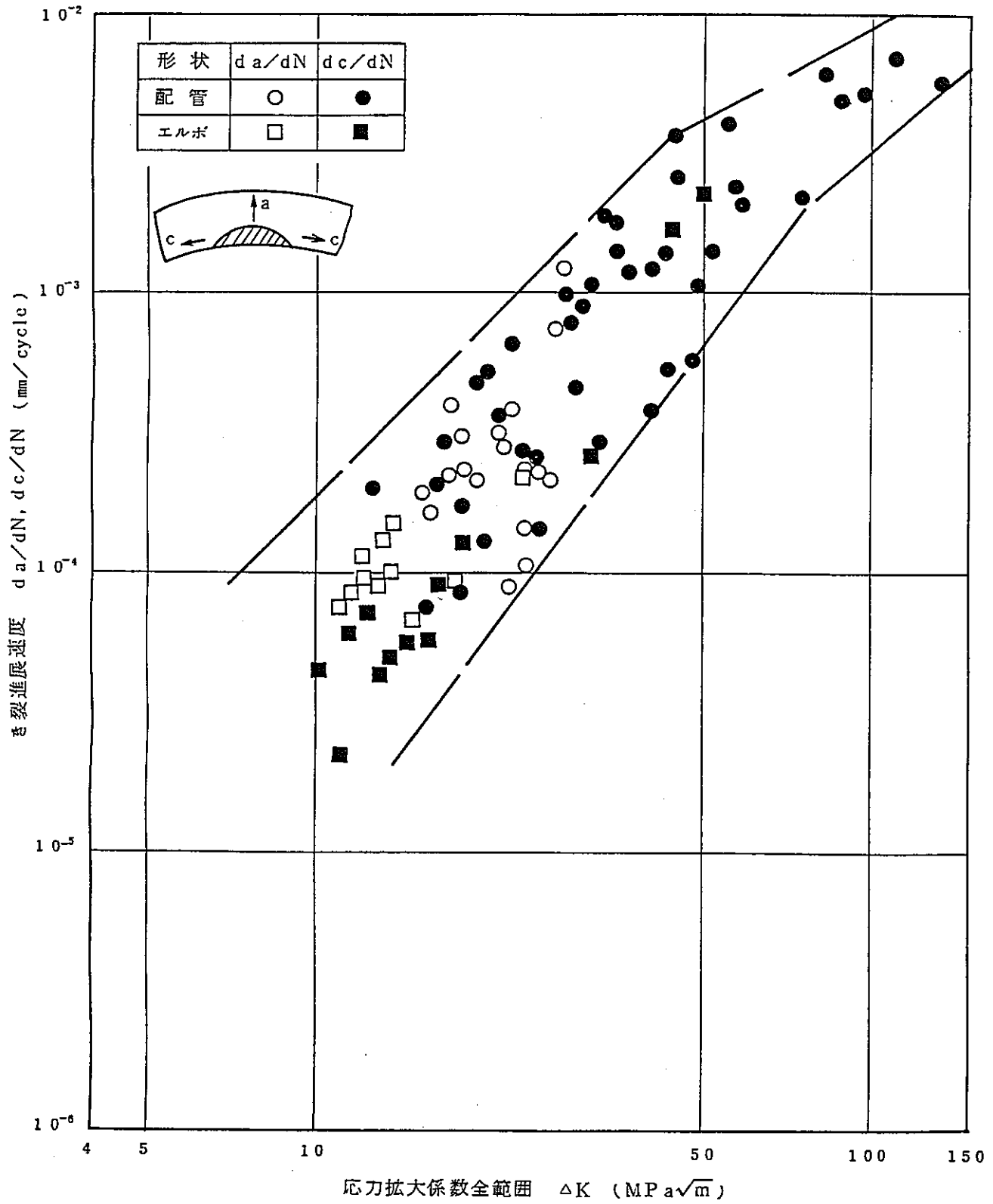


図 2-28 高温水中における疲労き裂進展試験結果<sup>(1)</sup>

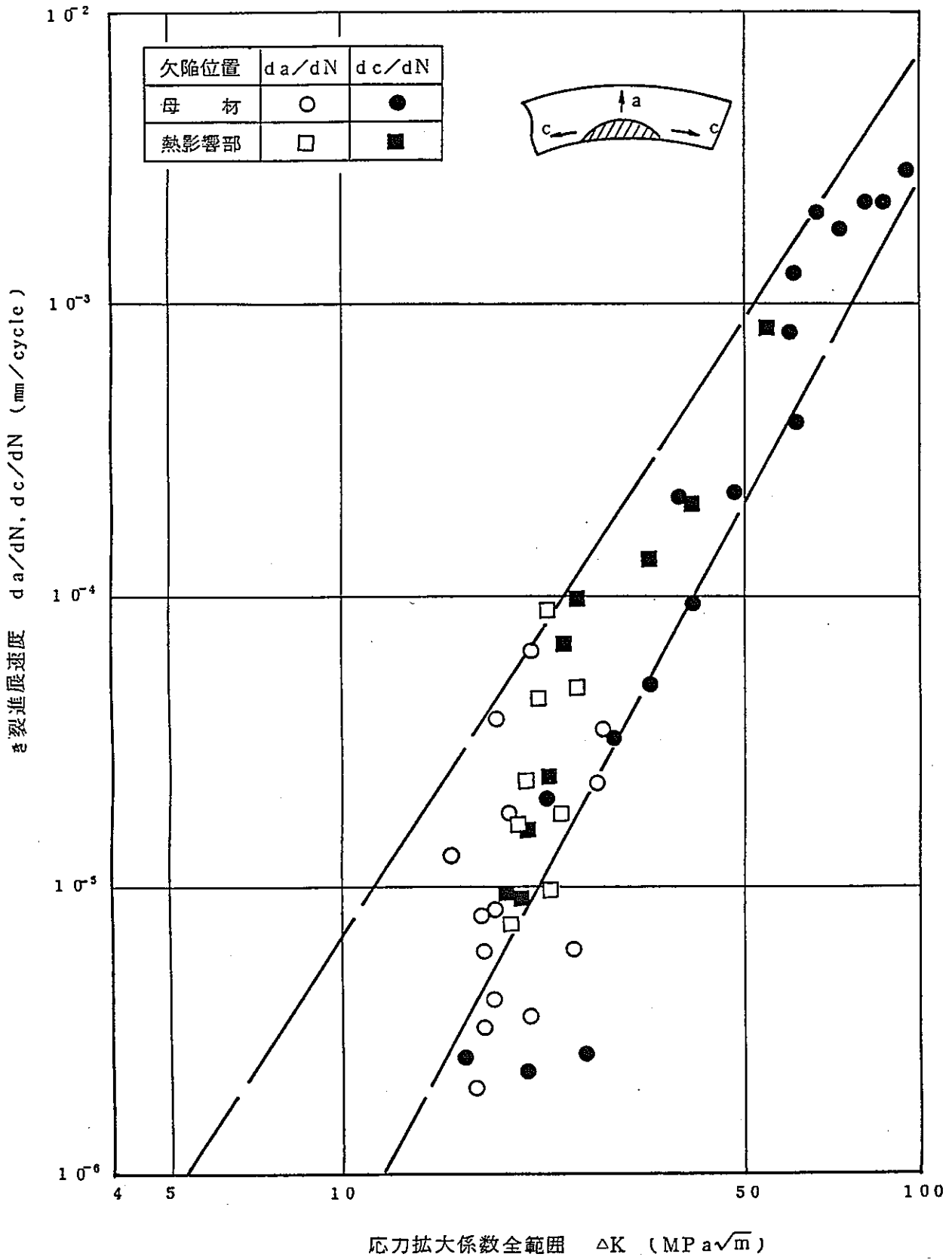


図 2-29 室温大気中における疲労き裂進展試験結果<sup>(1)</sup>

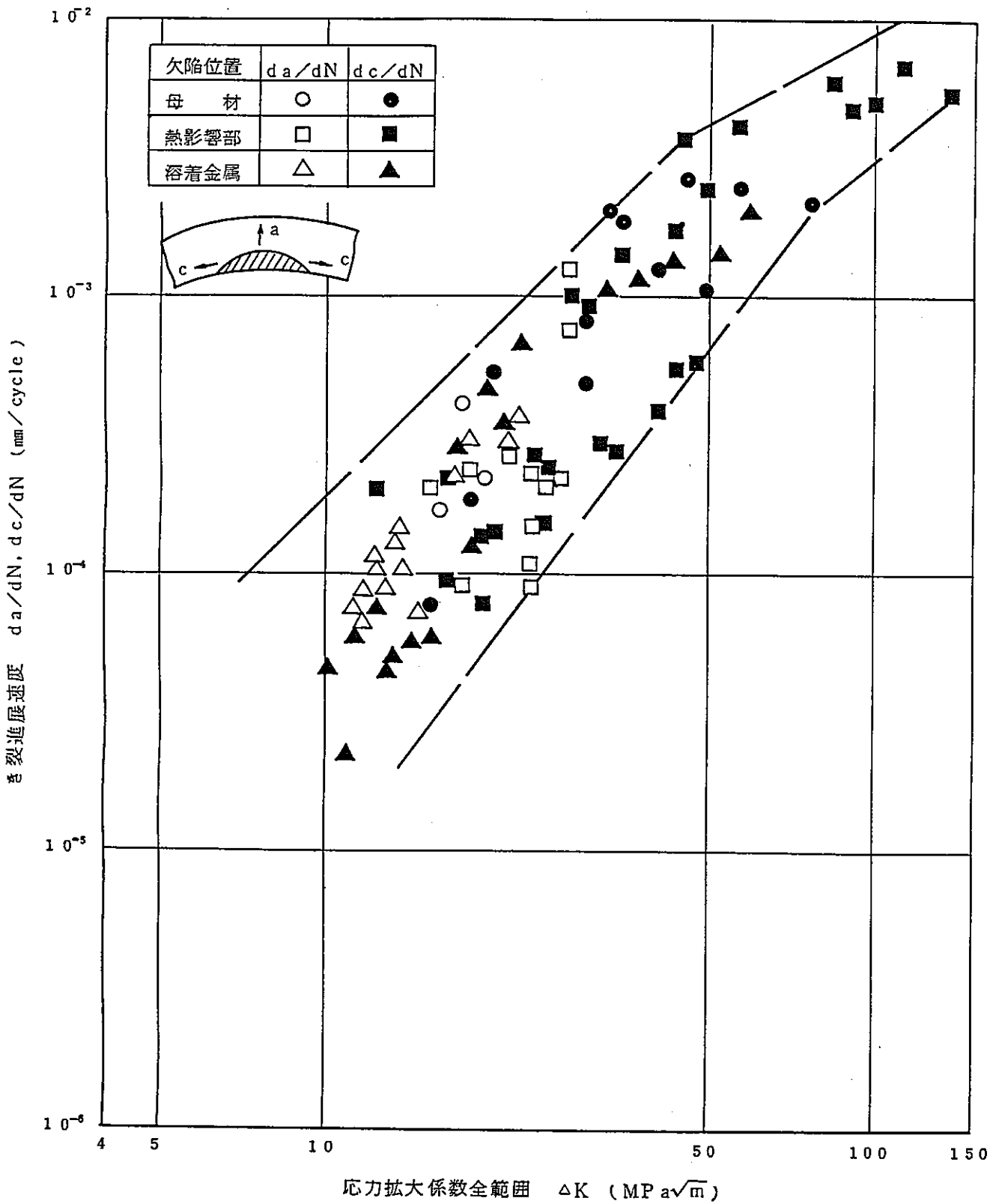


図 2-30 高温水中における疲労き裂進展試験結果<sup>(1)</sup>

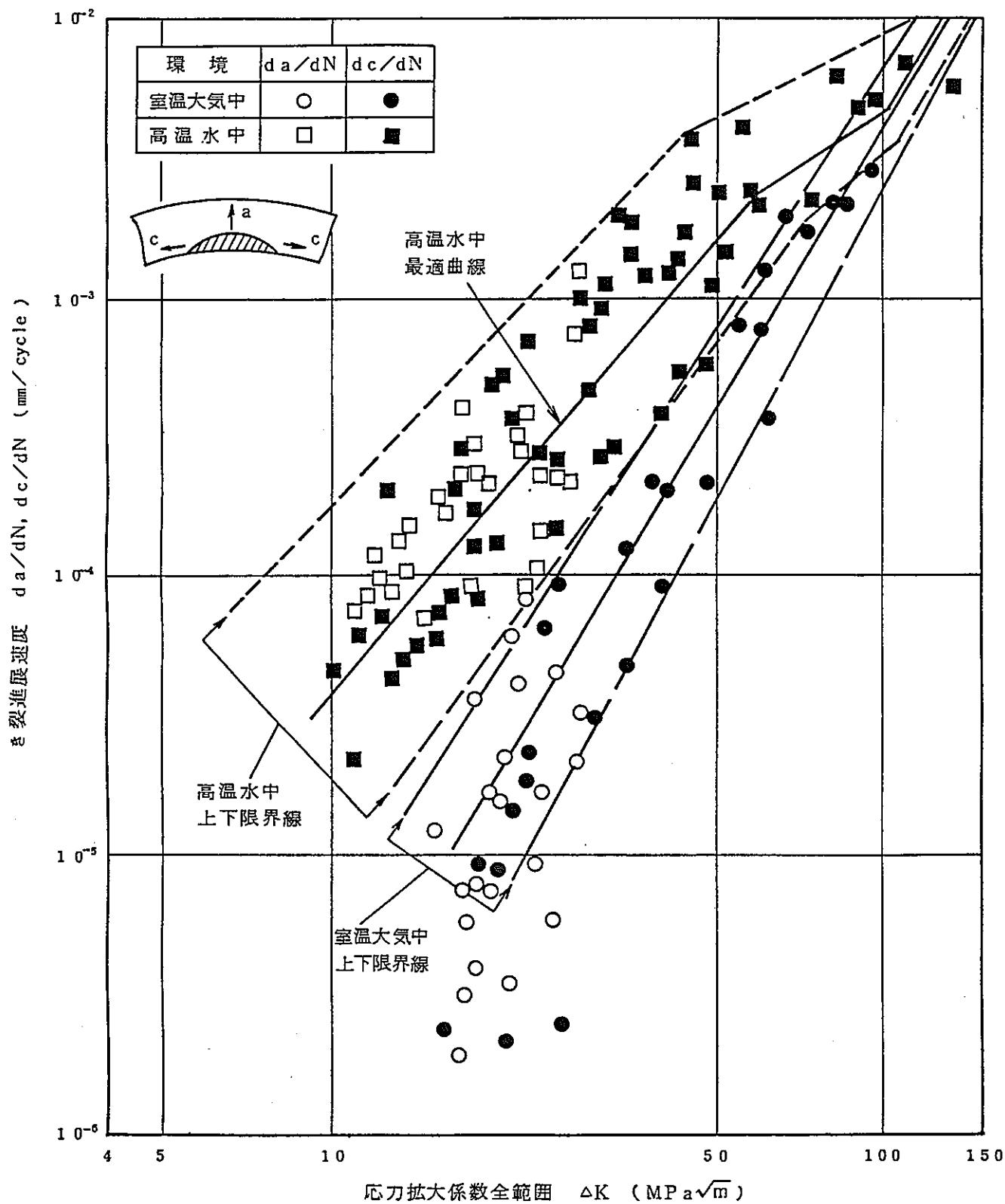


図 2-31 室温大気中・高温水中における疲労き裂進展試験結果<sup>(1)</sup>

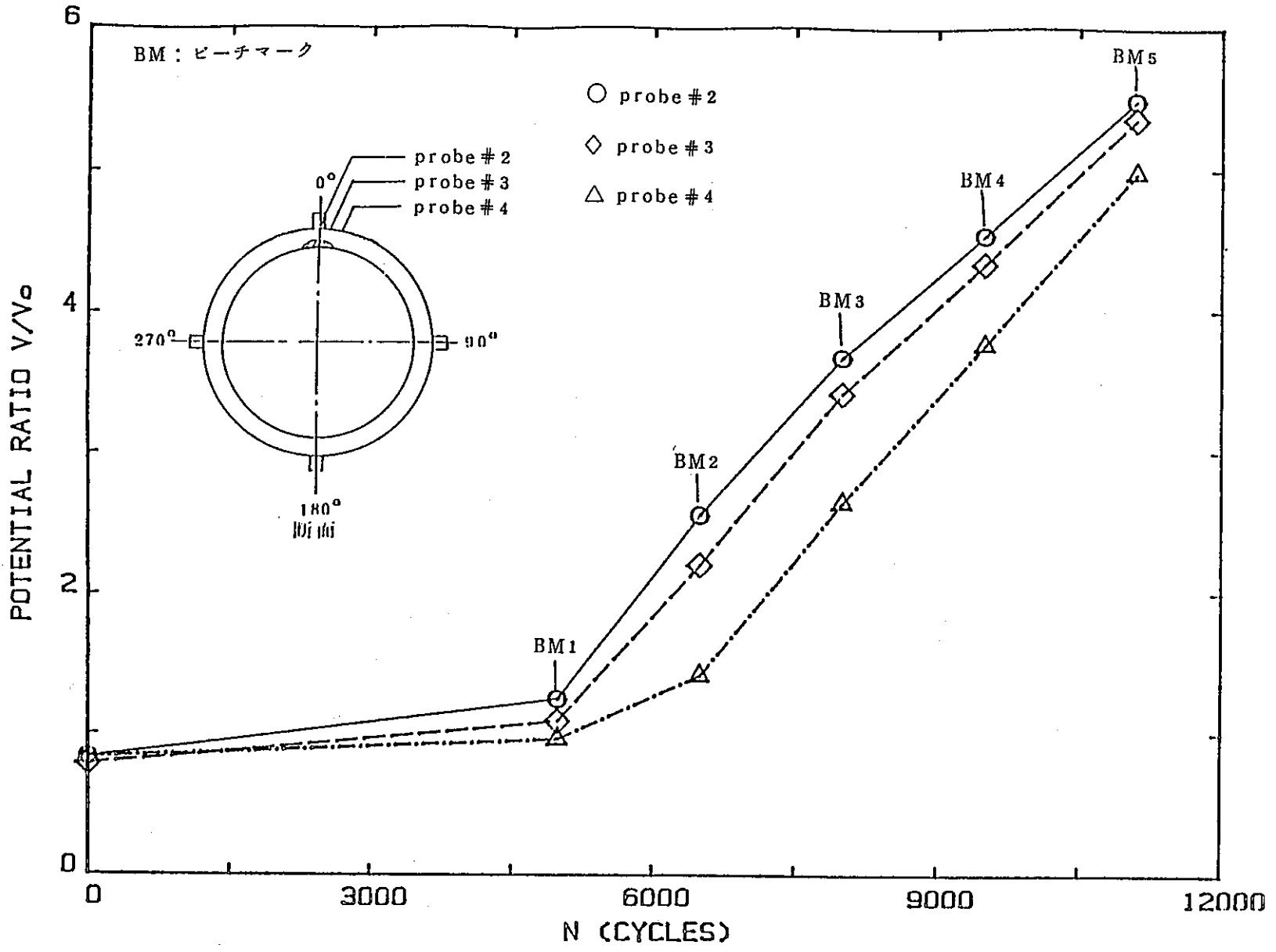


図 2-32 疲労き裂進展試験における電位差比の繰返し数変化 (TP-13)

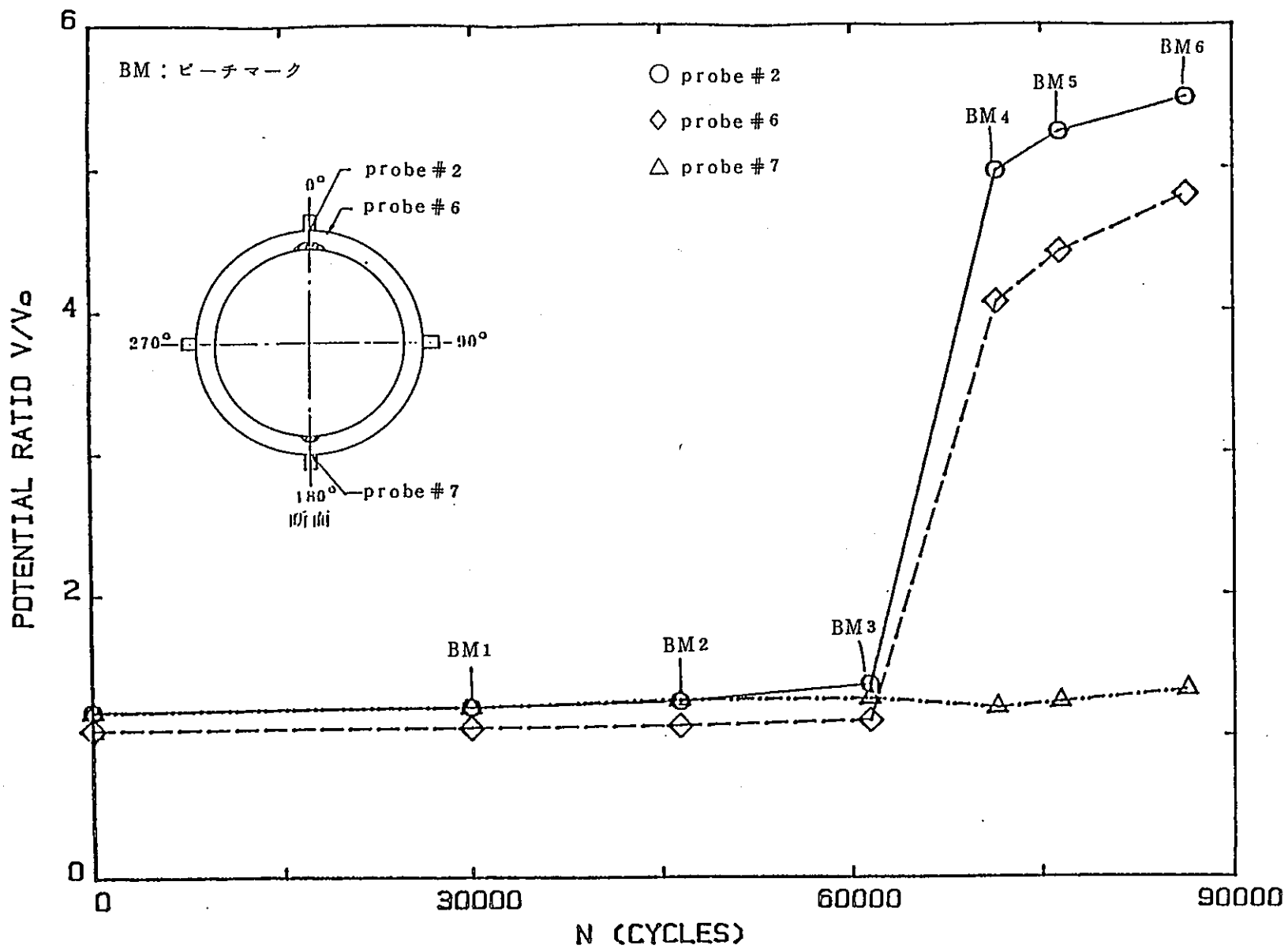


図 2-33 疲労き裂進展試験における電位差比の繰返し数変化 (TP-14)



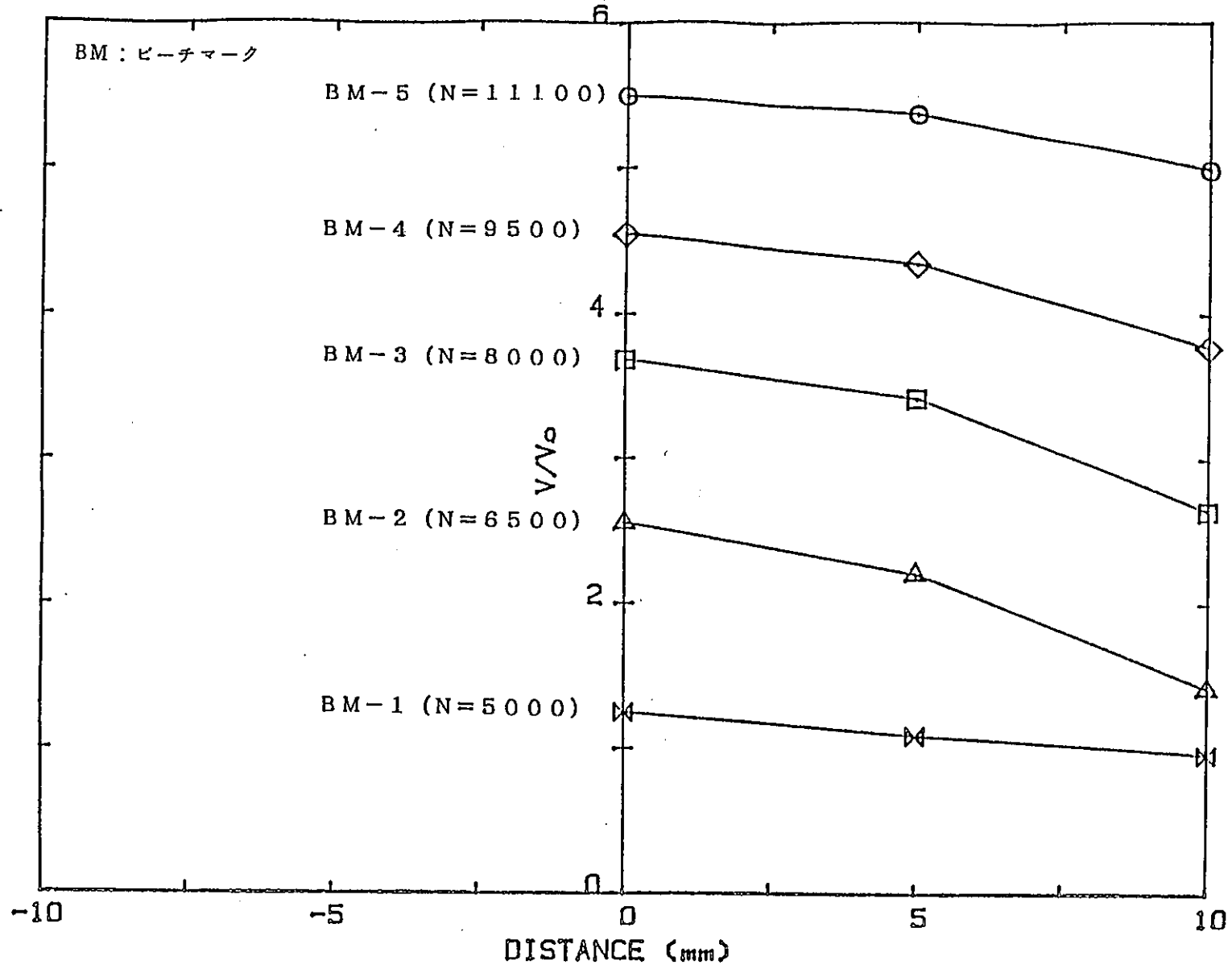


図 2-34 疲労き裂進展試験における電位差比の分布 (TP-13)

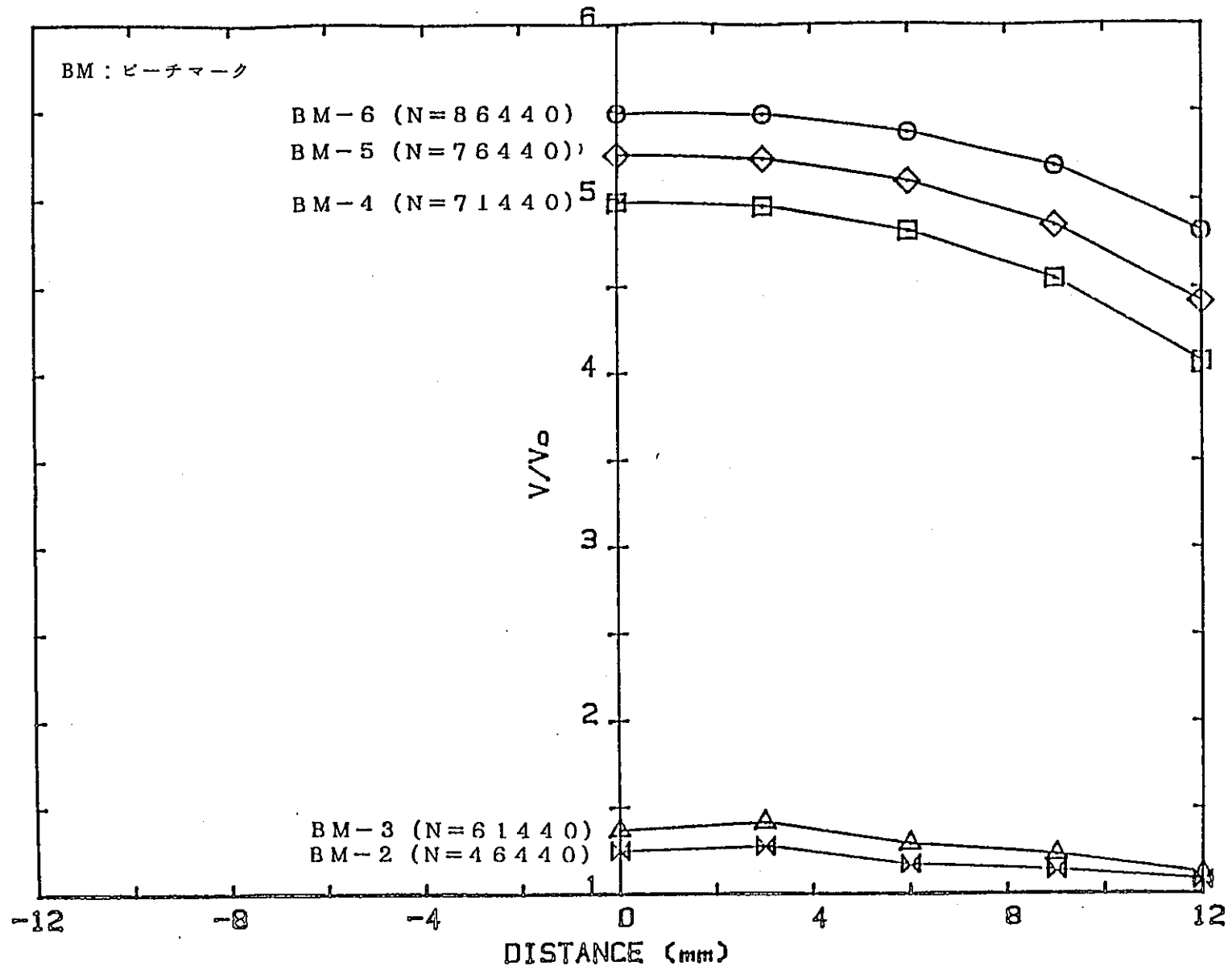


図 2-35 疲労き裂進展試験における電位差比の分布 (TP-14)

表 2-1 疲労き裂進展試験に用いた試験装置仕様

## 1. 疲労試験機

項目	仕様
最大荷重	±25tonf (静荷重)
最大ストローク	±25mm
繰返し速度	0.00001~990Hz (試験機単体) 0.001~5Hz (オートクレーブ含)
プログラム波形	台形波, 三角波, 正弦波, 矩形波, ランプ波

## 2. オートクレーブ

項目	仕様
最高使用圧力	100kgf/cm <sup>2</sup>
最高使用温度	300℃
容量	72ℓ
材質	SUSF316L
加熱装置	タテ筒型管状式, 300℃, 42kW

## 3. 循環装置

項目	仕様
試験液調整タンク	容量300ℓ, 材質SUS316
高压定量ポンプ	吐出圧100kgf/cm <sup>2</sup> , 吐出量20ℓ/h
予熱器	コイル管外加熱方式, 300℃ (水温), 10kW
計測装置	溶存酸素測定器 0~2, 0~10, 0~20ppm 液電導度計 0~2, 0~20, 0~200μS/cm pH測定器 0~14

表 2-2 疲労き裂進展試験におけるポテンシャル法測定条件一覧

TP #	試験条件	給電端子数	電流 [A/端子]	測定点数	レファレンス数
TP-13	直管引張 高温水中	4	2	3	1
TP-14	直管引張 室温大気中	4	2	9	1

表 2-3 疲労き裂進展試験に用いた溶接施行法

確認項目	確認事項
溶接方法	TIG
母材	SUS316NG+SUS316NG
予熱	層間温度：180℃以下
シールドガス	Arガス
裏面からのガス保護	あり
溶接材 (RNo.又は銘柄)	銘柄：TG 316LC

表 2-4 疲労き裂進展試験に用いた溶接施行要領

溶接方法	TIG
パス数	1~C
極性	DCSP
電流 (A)	80~160
電圧 (V)	10~12
溶接速度 (mm/min)	60~100
シールドガス流量 (ℓ/min)	8~15
パーズガス流量 (ℓ/min)	5~10
電極 (棒) 径	2.4
溶加材・心線径	1.6, 2.4

表 2-5 (a) 疲労き裂進展試験に用いた材料の化学組成 (母材)

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
%	0.008	0.61	1.61	0.023	0.001	12.49	16.21	2.57

表 2-5 (b) 疲労き裂進展試験に用いた材料の化学組成 (溶着金属)

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
%	0.014	0.42	1.74	0.026	0.01	11.76	19.33	2.11

表 2 - 6 (a) 疲労き裂進展試験に用いた材料の機械的性質 (母材)

	0.2%耐力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸 び ( % )
室 温	29	61	48
高 温 (300℃)	17.2	49.1	40.9

表 2 - 6 (b) 疲労き裂進展試験に用いた材料の機械的性質 (溶着金属)

	0.2%耐力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸 び ( % )
室 温	51	61.5	43.4
高 温 (300℃)	33.5	47.4	21.2

注記)

溶着金属の引張試験

試験板の寸法, 形状は, J I S Z 3 1 1 1 に準拠する。

試験片の形状は下図に示すとおりであり, 試験は J I S Z 2 2 4 1 に従って実施する。

引張試験片形状

(単位: mm)

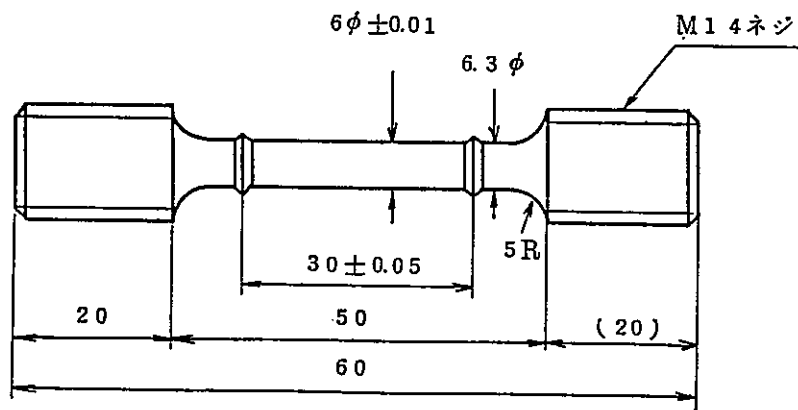
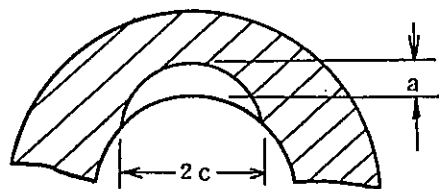


表 2-7 疲労き裂進展試験における試験条件マトリックス

管種 欠陥部位 欠陥寸法(mm) 環境	直 管			エ ル ボ 管		
	母 材	熱影響部	溶着金属	母 材	熱影響部	溶着金属
	a 2c	a 2c	a 2c	a 2c	a 2c	a 2c
室 温 大 気 中	TP-2 1.38 33.0 引張	* TP-14 3.0 15.0 引張 2.75 11.0		* TP-4 3.0 15.0 1.38 8.25		
	TP-9 3.0 15.0 曲げ			TP-5 3.0 15.0 軸き裂		
高 温 水 中	* TP-13 3.0 15.0 引張 2.75 11.0	* TP-6 3.0 15.0 引張 1.38 8.25	* TP-11 3.0 15.0 引張 2.75 11.0		* TP-3 3.0 15.0 1.38 8.25	* TP-12 3.0 15.0 2.75 11.0
		TP-10 3.0 15.0 曲げ				



60年度実施

\* 初期欠陥 2個

61年度実施

62年度実施

表 2-8 疲労き裂進展試験における試験の環境条件

試験片 No.		TP-13(直管)	TP-14(直管)
繰返し速度 (c p m)		1.2	60
水	溶存酸素 (ppm)	入口	7.2~8.2
		出口	3.5~4.2
	電気伝導度 ( $\mu S/cm$ )	入口	0.32~0.36
		出口	0.66~0.80
質	水素イオン濃度 (pH)	6.4	
	塩素イオン濃度 (ppm)	<0.01	
温度 ( $^{\circ}C$ )		276~278	室温
圧力 ( $kgf/cm^2$ )		77~78.5	
流量 ( $l/h$ )		15	

表 2-9 疲労き裂進展試験における試験条件及び主要結果

TP番号 試験条件	配管寸法 (き裂部)		初期き裂 (mm) a × 2 c	き裂進展試験条件					ビーチマーク条件			試験回数
	外径 (mm)	板厚 (mm)		R <sub>max</sub> (tf)	周波数 (cpm)	σ <sub>max</sub> (MPa)	R 比	波形	周波数 (cpm)	σ <sub>max</sub> (MPa)	R 比	
TP-13 直管引張 高温水中	60.55	6.25	3.04×14.90	18.0	1.2	198	0.1	三角	1.20	198	0.5	1.3254×10 <sup>4</sup>
			2.81×10.90									
TP-14 直管引張 室温大気中	60.55	5.20	3.04×14.92	20.0	60.0	226	0.1	三角	60.0	226	0.5	8.644×10 <sup>4</sup>
			2.80×10.96									



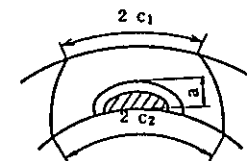
表 2-10 疲労き裂進展試験におけるき裂進展量の定義

	き裂形状	き裂進展量	き裂の平均寸法	応力拡大係数
板厚貫通前		$\Delta a = a^{n+1} - a^n$ $\Delta c = c_2^{n+1} - c_2^n$	$a_{ave} = \frac{1}{2}(a^n + a^{n+1})$ $c_{ave} = \frac{1}{2}(c_2^n + c_2^{n+1})$	$a_{ave}, c_{ave} \rightarrow K_A, K_B$
板厚貫通後		$\Delta c_1 = c_1^{n+1} - c_1^n$ $\Delta c_2 = c_2^{n+1} - c_2^n$	$c^n = \frac{1}{2}(c_1^n + c_2^n)$ $c_{ave} = \frac{1}{2}(c^{n+1} + c^n)$	$c_{ave} \rightarrow K_B$

表 2-11(1) 疲労き裂進展試験におけるき裂進展データまとめ (TP-13) (大き裂)

TP-13

TYPE: 直管引張 (高温水中) 大き裂

 $D_0 = 60.55$  (mm) $t = 6.25$  (mm)

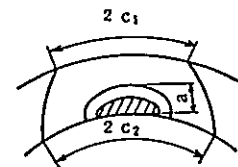
B.M No.	N cycle	$\Delta N$ cycle	$\Delta n$ (B.M) cycle	P max (tf)	$S_m$ (MPa)	$S_t$ (MPa)	a (mm)	$\Delta a$ (mm)	$c_1$ (mm)	$c_2$ (mm)	c (mm)	$\Delta c_1$ (mm)	$\Delta c_2$ (mm)	$\Delta c$ (mm)	$\frac{\Delta a}{\Delta N}$ mm/cycle	$\frac{\Delta c}{\Delta N}$ mm/cycle	a/t	a ave (mm)	c ave (mm)	a ave		$\Delta K_A$ MPa $\sqrt{m}$	$\Delta K_B$ MPa $\sqrt{m}$
																				c ave	c ave		
スリット							3.04			7.57							0.49						
予き裂	$4.0 \times 10^4$			18.0	165.45		4.02	0.98		8.18			0.61		$2.45 \times 10^{-5}$	$1.53 \times 10^{-5}$	0.64	3.53	7.88	0.45	17.53	14.22	
	$5.0 \times 10^3$	$5.0 \times 10^3$		"	"		5.09	1.07		9.06			0.88		$2.14 \times 10^{-4}$	$1.76 \times 10^{-4}$	0.81	4.56	8.62	0.53	19.60	18.34	
①			$5.0 \times 10^3$	"	"		5.54	0.45		9.32			0.26		$9.0 \times 10^{-5}$	$5.2 \times 10^{-5}$	0.89	5.32	9.19	0.58			
	$6.5 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$		"	"		貫通		8.93	10.02	9.48		0.7			$4.67 \times 10^{-4}$			9.40			29.29	
②			$2.0 \times 10^3$	"	"				10.30	10.44	10.37	1.37	0.42	0.89		$4.45 \times 10^{-4}$							
	$8.0 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$		"	"				14.13	12.17	13.15	3.83	1.73	2.78		$1.85 \times 10^{-3}$			11.76			34.46	
③			$1.5 \times 10^3$	"	"				15.37	13.09	14.23	1.24	0.92	1.08		$7.2 \times 10^{-4}$							
	$9.5 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$		"	"				19.29	17.18	18.24	3.92	4.09	4.01		$2.67 \times 10^{-3}$			16.24			45.0	
④			$1.5 \times 10^3$	"	"				19.92	17.85	18.89	0.63	0.67	0.65		$4.33 \times 10^{-4}$							
	$1.11 \times 10^4$	$1.6 \times 10^3$		"	"				24.85	20.73	22.79	4.93	2.88	3.9		$2.44 \times 10^{-3}$			20.84			57.48	



表 2-12(1) 疲労き裂進展試験におけるき裂進展データまとめ (TP-13) (小き裂)

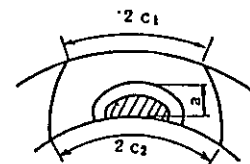
TP-13

TYPE: 直管引張 (高温水中) 小き裂

 $D_0 = 60.55 \text{ (mm)}$  $t = 6.25 \text{ (mm)}$ 

B.M. No.	N cycle	$\Delta N$ cycle	$\Delta n$ (B.M) cycle	$P_{max}$ (tf)	$S_m$ (MPa)	$S_b$ (MPa)	a (mm)	$\Delta a$ (mm)	$c_1$ (mm)	$c_2$ (mm)	c (mm)	$\Delta c_1$ (mm)	$\Delta c_2$ (mm)	$\Delta c$ (mm)	$\frac{\Delta a}{\Delta N}$ mm/cycle	$\frac{\Delta c}{\Delta N}$ mm/cycle	a/t	a ave (mm)	c ave (mm)	$\frac{a \text{ ave}}{c \text{ ave}}$	$\Delta K_A$ MPa $\sqrt{m}$	$\Delta K_B$ MPa $\sqrt{m}$
スリット							2.81			5.50							0.45					
予き裂	$4.0 \times 10^4$			18.0	165.45		3.62	0.81		6.14			0.64		$2.03 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-4}$	0.58	3.22	5.82	0.55	14.78	13.11
	$5.0 \times 10^3$	$5.0 \times 10^3$		"	"		4.46	0.84		6.52			0.38		$1.68 \times 10^{-4}$	$7.6 \times 10^{-5}$	0.71	4.04	6.33	0.64	16.03	15.96
①			$5.0 \times 10^3$	"	"		4.68	0.22		6.80			0.28		$4.4 \times 10^{-5}$	$5.6 \times 10^{-5}$	0.75	4.57				
	$6.5 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$		"	175.19		5.29	0.61		7.60			0.8		$4.07 \times 10^{-4}$	$5.33 \times 10^{-4}$	0.85	4.99	7.20	0.693	17.56	20.48
②			$2.0 \times 10^3$	"	"		5.49	0.2		7.92			0.32		$1.0 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-4}$	0.88	5.39				
	$8.0 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$		"	179.27		貫通		4.48	9.11	6.80		1.19			$7.83 \times 10^{-4}$			8.52			29.69
③			$1.5 \times 10^3$	"	"				5.39	9.45	7.42	0.91	0.34	0.62		$4.13 \times 10^{-4}$						
	$9.5 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$		"	185.26				10.74	9.78	10.26	5.35	0.33	2.84		$1.89 \times 10^{-3}$			9.86			33.91
④			$1.5 \times 10^3$	"	"				11.37	10.37	10.87	0.63	0.59	0.61		$4.07 \times 10^{-4}$						
	$1.11 \times 10^4$	$1.6 \times 10^3$		"	190.96				13.88	11.86	12.87	2.51	1.49	2.0		$1.25 \times 10^{-3}$			11.87			40.05

表 2-12(2) 疲労き裂進展試験におけるき裂進展データまとめ (TP-13) (小き裂)



TP-13

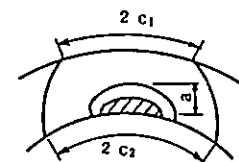
TYPE:直管引張 (高温水中) 小き裂

$D_0 = 60.55$  (mm)

$t = 6.25$  (mm)

B.M No.	N cycle	$\Delta N$ cycle	$\Delta n$ (B.M) cycle	P max (t f)	$S_m$ (MPa)	$S_b$ (MPa)	a (mm)	$\Delta a$ (mm)	$c_1$ (mm)	$c_2$ (mm)	c (mm)	$\Delta c_1$ (mm)	$\Delta c_2$ (mm)	$\Delta c$ (mm)	$\frac{\Delta a}{\Delta N}$ mm/cycle	$\frac{\Delta c}{\Delta N}$ mm/cycle	a/t	a ave (mm)	c ave (mm)	ave		$\Delta K_A$ MPa $\sqrt{m}$	$\Delta K_B$ MPa $\sqrt{m}$		
																				a ave	c ave				
⑤			$2.0 \times 10^3$	18.0					14.50	12.31	13.41	0.62	0.45	0.54		$2.7 \times 10^{-4}$									
	$1.3254 \times 10^4$	$2.154 \times 10^3$		"	198.45				17.13	14.32	15.73	2.63	2.01	2.32		$1.08 \times 10^{-3}$			14.57					49.09	

表 2-13 疲労き裂進展試験におけるき裂進展データまとめ (TP-14) (大き裂)



TP-14

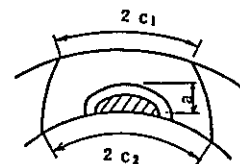
TYPE:直管引張 (大気中) 大き裂

$D_0 = 60.55 \text{ (mm)}$

$t = 5.20 \text{ (mm)}$

B.M No.	N cycle	$\Delta N$ cycle	$\Delta n$ (B.M) cycle	P max (tf)	$S_m$ (MPa)	$S_b$ (MPa)	a (mm)	$\Delta a$ (mm)	$c_1$ (mm)	$c_2$ (mm)	c (mm)	$\Delta c_1$ (mm)	$\Delta c_2$ (mm)	$\Delta c$ (mm)	$\frac{\Delta a}{\Delta N}$ mm/cycle	$\frac{\Delta c}{\Delta N}$ mm/cycle	a/t	a ave (mm)	c ave (mm)	ave		$\Delta K_A$ MPa $\sqrt{m}$	$\Delta K_B$ MPa $\sqrt{m}$	
																				a ave	c ave			
スリット							3.04			7.57				0			0.58							
	$3.0 \times 10^4$	$3.0 \times 10^4$		20.0	216.76		3.33	0.29		7.57				0	$9.67 \times 10^{-5}$		0.64	3.19	7.57	0.42	23.02	18.41		
①			$2.5 \times 10^4$	"	"		3.40	0.07		7.57				0	$2.8 \times 10^{-5}$		0.65							
	$4.644 \times 10^4$	$1.644 \times 10^4$		"	"		3.69	0.29		7.72				0.15	$1.76 \times 10^{-5}$	$9.12 \times 10^{-5}$	0.71	3.55	7.65	0.46	23.91	20.57		
②			$2.0 \times 10^4$	"	"		3.77	0.08		7.78				0.06	$4.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	0.73							
	$6.144 \times 10^4$	$1.5 \times 10^4$		"	"		4.47	0.7		8.77				0.99	$4.67 \times 10^{-5}$	$6.6 \times 10^{-5}$	0.86	4.12	8.28	0.50	25.82	24.04		
③			$1.5 \times 10^4$	"	"		4.69	0.22		9.18				0.41	$1.47 \times 10^{-5}$	$2.73 \times 10^{-5}$	0.90							
	$7.144 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$		"	"		貫通			9.67	11.31	10.49		2.13		$2.13 \times 10^{-4}$			8.84				39.94	
④			$8.0 \times 10^4$	"	"					11.29	12.47	11.88	1.62	1.16	1.39	$1.74 \times 10^{-4}$								
	$7.644 \times 10^4$	$5.0 \times 10^3$		"	"					16.54	15.19	15.87	5.25	2.72	3.99	$7.98 \times 10^{-4}$			13.88				52.11	
⑤			$5.0 \times 10^3$	"	"					17.67	16.38	17.03	1.13	1.19	1.16	$2.32 \times 10^{-4}$								

表 2-14 疲労き裂進展試験におけるき裂進展データまとめ (TP-14) (小き裂)



TP-14 TYPE: 直管引張 (大気中) 小き裂

$D_o = 60.55$  (mm)

$t = 5.20$  (mm)

B.M No.	N cycle	$\Delta N$ cycle	$\Delta n$ (B.M) cycle	P max (tf)	$S_m$ (MPa)	$S_b$ (MPa)	a (mm)	$\Delta a$ (mm)	$c_1$ (mm)	$c_2$ (mm)	c (mm)	$\Delta c_1$ (mm)	$\Delta c_2$ (mm)	$\Delta c$ (mm)	$\frac{\Delta a}{\Delta N}$ mm/cycle	$\frac{\Delta c}{\Delta N}$ mm/cycle	a/t	a ave (mm)	c ave (mm)	$\frac{a \text{ ave}}{c \text{ ave}}$	$\Delta K_A$ MPa $\sqrt{m}$	$\Delta K_B$ MPa $\sqrt{m}$
スリット							2.80			5.52							0.54					
	$3 \times 10^4$	$3 \times 10^4$		20.0	216.76		3.02	0.22		5.52			0		$7.33 \times 10^{-5}$	0	0.58	2.91	5.52	0.53	19.20	16.86
①			$2.5 \times 10^4$	"	"		3.08	0.06		5.52			0		$2.4 \times 10^{-5}$	0	0.59					
	$4.644 \times 10^4$	$1.644 \times 10^4$		"	"		3.35	0.27		5.67			0.15		$1.64 \times 10^{-5}$	$9.12 \times 10^{-5}$	0.64	3.22	5.60	0.58	19.73	18.47
②			$2.0 \times 10^4$	"	"		3.41	0.06		5.70			0.03		$3.0 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$	0.66					
	$6.144 \times 10^4$	$1.5 \times 10^4$		"	"		3.75	0.34		5.94			0.24		$2.27 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-5}$	0.72	3.58	5.82	0.62	20.47	20.32
③			$1.5 \times 10^4$	"	"		3.84	0.09		6.09			0.15		$6.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	0.74					
	$7.144 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$		"	"		4.27	0.43		6.32			0.23		$4.3 \times 10^{-5}$	$2.3 \times 10^{-5}$	0.82	4.06	6.21	0.65	21.49	22.82
④			$8.0 \times 10^3$	"	"		4.33	0.06		6.48			0.16		$7.5 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-5}$	0.83					
	$7.644 \times 10^4$	$5.0 \times 10^3$		"	"		4.75	0.42		6.94			0.46		$8.4 \times 10^{-5}$	$8.2 \times 10^{-5}$	0.91	4.54	6.71	0.68	22.57	25.37
⑤			$5.0 \times 10^3$	"	"		4.91	0.16	0	7.04			0.1		$3.2 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-5}$	0.94					
	$8.644 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$		"	226.22		貫通		2.02	7.49	4.76	2.02	0.45	1.24		$1.24 \times 10^{-4}$			7.27			33.97

表 2-15 疲労き裂進展試験におけるき裂進展最適曲線式

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$$

環境	定数 m, C				
室温 大気中	m		3.19		
	C	$\Delta K:$ MPa $\sqrt{m}$	$1.49 \times 10^{-9}$		
		$\Delta K:$ kgf $\cdot$ mm $^{-\frac{3}{2}}$	$3.55 \times 10^{-11}$		
高温 範囲	$\Delta K$ の 範囲	$\Delta K:$ MPa $\sqrt{m}$	$\Delta K \leq 60$	$60 < \Delta K \leq 100$	$100 < \Delta K$
		$\Delta K:$ kgf $\cdot$ mm $^{-\frac{3}{2}}$	$\Delta K \leq 194$	$194 < \Delta K \leq 323$	$323 < \Delta K$
水中	m		2.34	1.36	3.19
	C	$\Delta K:$ MPa $\sqrt{m}$	$1.75 \times 10^{-7}$	$9.66 \times 10^{-6}$	$1.49 \times 10^{-9}$
		$\Delta K:$ kgf $\cdot$ mm $^{-\frac{3}{2}}$	$1.14 \times 10^{-9}$	$1.97 \times 10^{-6}$	$3.55 \times 10^{-11}$



表 2-16 疲労き裂進展試験におけるき裂進展曲線決定に用いた値

環境	き裂進展曲線決定に用いた $\Delta K$ 及び $\frac{da}{dN}$ の値			
室温 大気 中	ベキ乗則決定に 用いた2点 $\Delta K: \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	$\Delta K \frac{da}{dN}$		
	$\frac{da}{dN}: \text{mm}/\text{cycle}$	100 10	$3.6 \times 10^{-3}$ $2.3 \times 10^{-6}$	
高温 水中	$\Delta K: \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の範囲	$\Delta K \leq 60$	$60 \leq \Delta K \leq 100$	$100 < \Delta K$
	ベキ乗則決定に 用いた2点 $\Delta K: \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	$\Delta K \frac{da}{dN}$	$\Delta K \frac{da}{dN}$	$\Delta K \frac{da}{dN}$
	$\frac{da}{dN}: \text{mm}/\text{cycle}$	60 $2.5 \times 10^{-3}$ 10 $3.8 \times 10^{-5}$	100 $5.0 \times 10^{-3}$ 60 $2.5 \times 10^{-3}$	100 $3.6 \times 10^{-3}$ 10 $2.3 \times 10^{-6}$

## 2.2 破壊靱性試験

### 2.2.1 概要

入口管の健全性評価のためには、前節で取扱った荷重の繰返しによる疲労き裂進展挙動を解明すると共に、静荷重による延性き裂の発生限界値及び延性き裂の成長挙動を明らかにしておく必要がある。また、地震荷重を想定した極低サイクル荷重（数回～百数十回の繰返し負荷）における破壊条件についても調べておく必要がある。

そこで、実尺の入口管材料から採取したコンパクトテンション試験片を用いて、静的な単調荷重の延性き裂抵抗曲線（J-R曲線）を求め、さらに、極低サイクル荷重下の破壊条件について検討を行った。

### 2.2.2 試験方法

供試材は、SUS316NG・50ASch80管であり、図2-36に示すように突合わせ溶接したものである。溶接施行条件は前節の表2-3及び表2-4に示すとおりである。また、母材及び溶着金属の化学成分と機械的性質は、前節の表2-5と表2-6に示してある。図2-37に示すようなコンパクトテンション試験片を供試管の母材部及び溶着金属部より採取した。試験片は0.4CTで板幅 $W=20\text{mm}$ 、板厚 $B=3\text{mm}$ である。試験片の切欠き方向は供試管の周方向と一致させた。機械加工後、試験片には疲労試験機を用い疲労予き裂を付与し、最終的に $a_0/W \approx 0.6$ （ $a_0$ ：初期き裂長さ、 $W$ ：試験片幅）になるようにした。

弾塑性破壊靱性試験は、JSM E基準<sup>8)</sup>に準じた複数試験片法で実施した。極低サイクル荷重下の繰返し試験は試験片が数回から百回程度の繰返し数で破壊するような一定振幅荷重を選んで行った。

J値の算出は、次式<sup>8)</sup>を用いて行った。

$$J = \frac{1 + \beta}{1 + \beta^2} \cdot \frac{2 \cdot A}{B \cdot b_0}$$

$$\beta = \left\{ \left( \frac{2 a_0}{b_0} \right)^2 + 2 \left( \frac{2 a_0}{b_0} \right) + 2 \right\}^{1/2} - \left( \frac{2 a_0}{b_0} + 1 \right)$$

..... (2-7)

ここで A : 荷重-荷重線変位曲線下のエネルギー (kg f・mm) ,

B : 試験片厚さ (mm) ,

a。： 初期き裂長さ (mm)，

b。： 初期リガメント長さ (mm)，

高温試験時では、試験片の両表面の疲労き裂の先端近傍に点溶接した熱電対により温度をモニターした。すべての試験片は、試験終了後、加熱着色してから破断させた。破面のき裂長さ、疲労き裂長さ及び延性き裂進展量を精度1/100mmのマイクロメータ付き読み取り顕微鏡（倍率：40倍）で測定した。

### 2.2.3 試験装置

試験に使用した試験機は、電気炉付きのインストロン型の電子式万能試験機（米倉製作所製、容量10tonf）である。試験片の荷重線変位は、クリップゲージ（東京測器研究所製、容量20mm）を用いた測定した。

### 2.2.4 試験条件及び結果

試験数及び試験条件を表2-17にまとめて示す。疲労予き裂付与条件は、すべて最終き裂時の応力拡大係数が30MPa以下になるようにした。疲労予き裂長さは約4mmとした。すなわち、初期欠陥寸法（=切欠き+疲労予き裂）は約12mmと一定にした。なお、疲労予き裂付与時の荷重繰返し速度は50Hzであり、第1ステップは10 ↔ 150kgfで約2mm、第2ステップは10 ↔ 100kgfで約1mm、最終ステップ（第3ステップ）は10 ↔ 80kgfで約1mmでそれぞれ疲労き裂を進展させたものである。負荷方法は、破壊靱性試験及び極低サイクル荷重試験の両者とも、試験機のクロスヘッド送り速度が、0.5mm/minの一定で実施した。

母材及び溶着金属部について複雑試験片法で破壊靱性試験を実施したときの各試験片の荷重-荷重線変位曲線を図2-38~57に示す。試験片の破面外観写真を図2-58~60に示す。表2-18は破壊靱性試験結果をまとめたものである。母材の室温及び300℃におけるJ-Δa関係を図2-61に示す。鈍化直線とR曲線の交点でのJ値すなわちJ<sub>i,n</sub>値は、室温での値に比べて約2/3である。

図2-62は、室温における溶着金属部のJ-Δa関係を母材で得られた結果と合せて示す。溶着金属のJ<sub>i,n</sub>値は32kgf/mmであり、母材に比べてかなり小さい。

次に、母材より採取した0.4CT試験片を用いて極低サイクル荷重繰返し試験結果について述べる。この試験に用いた試験片の寸法測定結果を表2-19に示す。荷重繰

返し時の荷重－荷重線変位曲線を図2-63～68に示す。図2-69は、試験後の破面写真である。表2-20は極低サイクル荷重繰返し試験結果をまとめたものである。いずれの試験片とも、数回～数十回の繰返しで一定荷重振幅に耐えずに最終破壊に至っている。なお、本試験では所定の荷重繰返しに耐えなくなった時点で、荷重を除荷させたものである。それぞれの試験データについて、第1回目の負荷時の最大荷重点までの荷重－荷重変位曲線の面積より得られるJ積分値 $J_i$ を求め、その $J_i$ を弾塑性破壊靱性値 $J_{in}$ で無次元化した値も求めてみた。それらの値についても表2-20に示した。図2-70は、試験で得られた $J_i/J_{in}$ と破壊繰返し $N_f$ の関係を示す。試験温度に依らず、 $J_i/J_{in}$ と $N_f$ の関係は応力比 $R$ に依存するが両対数表示で直線関係にあることがわかる。この図より、繰返し数100回で破壊する負荷の大きさは、 $R=0.1$ ならば $J_i/J_{in}=0.67$ に相当する繰返し荷重であるが、 $R=-1$ のときは $J_i/J_{in}=0.11$ 程度のかかなり低い繰返し荷重である。すなわち、完全両振り（ $R=-1$ ）荷重で寿命100回までに破損しないようにするためには、 $J_{in}$ 値に対して10倍程度の安全係数を考慮する必要があることを示す。なお、試験で得られた $J_{in}$ 値は、弾塑性破壊靱性値としての有効性の判定式

$$a_o, B, b_o \geq 25 \left( \frac{J_{in}}{\sigma_{rs}} \right) \dots\dots\dots (2-8)$$

を満足しないが、薄肉・延性材料である入口管のき裂進展、破壊を評価するための目安となり、また母材と溶着金属あるいは、静荷重と繰返し荷重との相对比较をする上で有効である。

### 2.2.5 まとめ

入口管材料（SUS316NG・50ASch80管）の延性破壊特性を検討するために、管材料より採取したコンパクトテンション試験片を用いて、弾塑性破壊靱性値 $J_{in}$ を求めると共に、極低サイクル繰返し疲労試験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 母材の $J_{in}$ 値は、20℃で113kgf/mm、300℃で73kgf/mmであった。
- (2) 溶着金属の $J_{in}$ 値は、20℃で32kgf/mmであり、母材に比べてかなり低い。
- (3) 完全両振り負荷において、寿命100回で破壊する負荷は、 $J_{in}$ 値の約1/10レベルである。

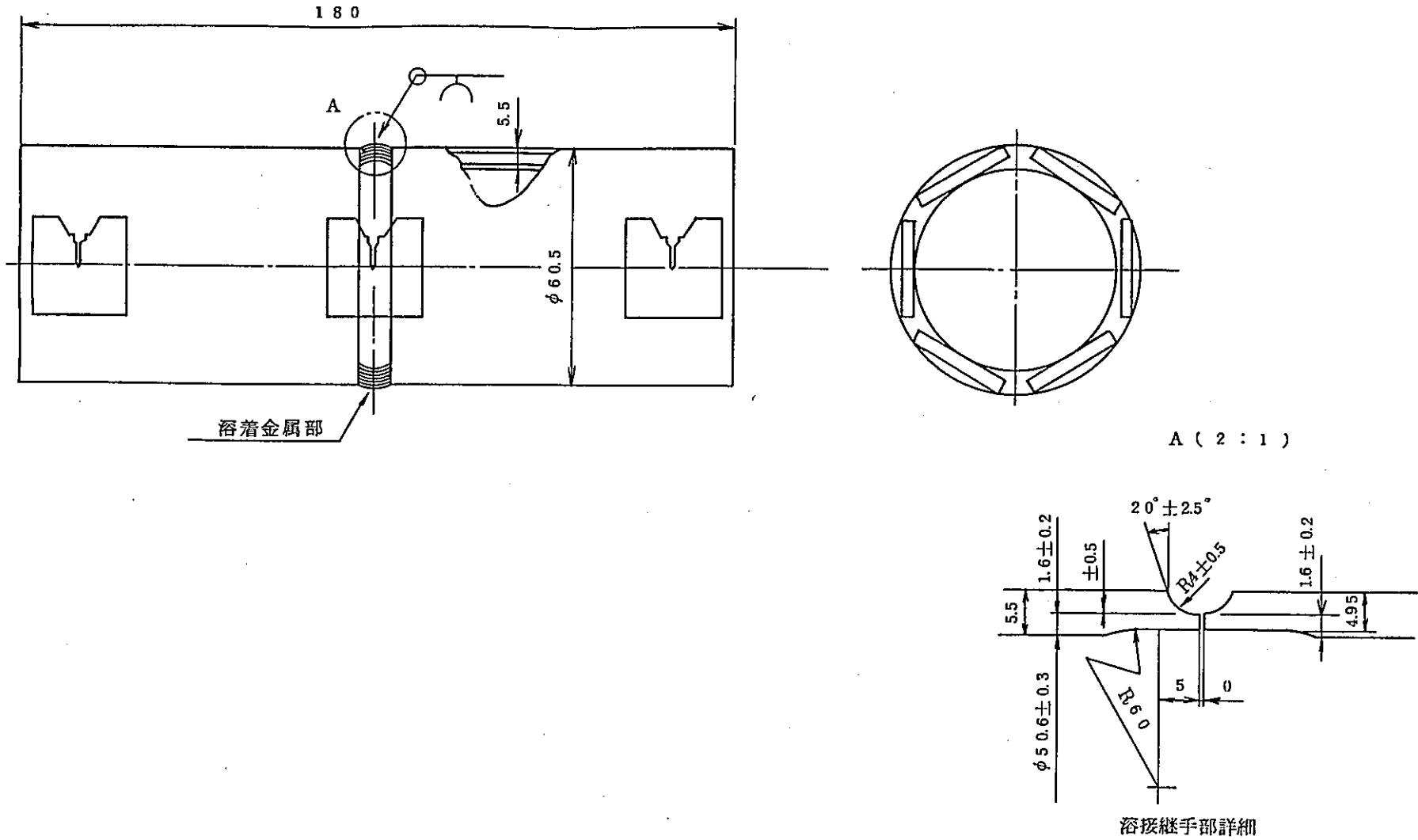
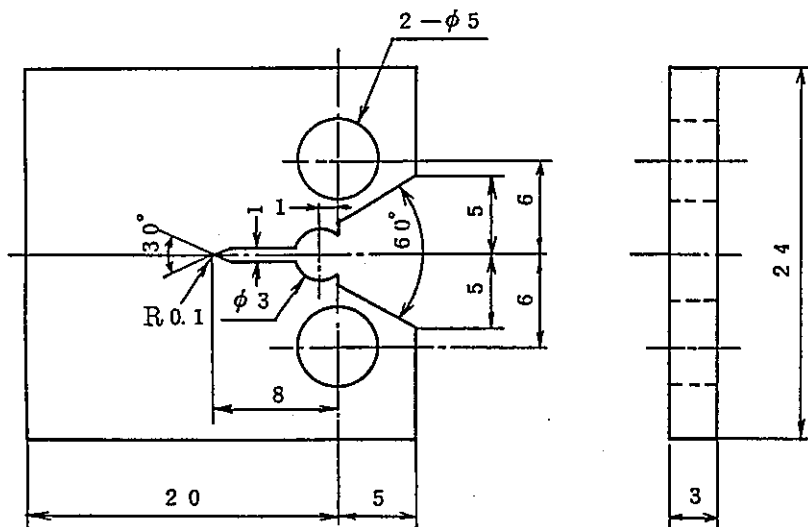


図 2-36 SUS316NG · 50ASch80 管からのコンパクトテンション試験片採取要領



0.4 CT 試験片

図 2-37 SUS316NG・50ASch80管のコンパクトテンション試験片の形状寸法

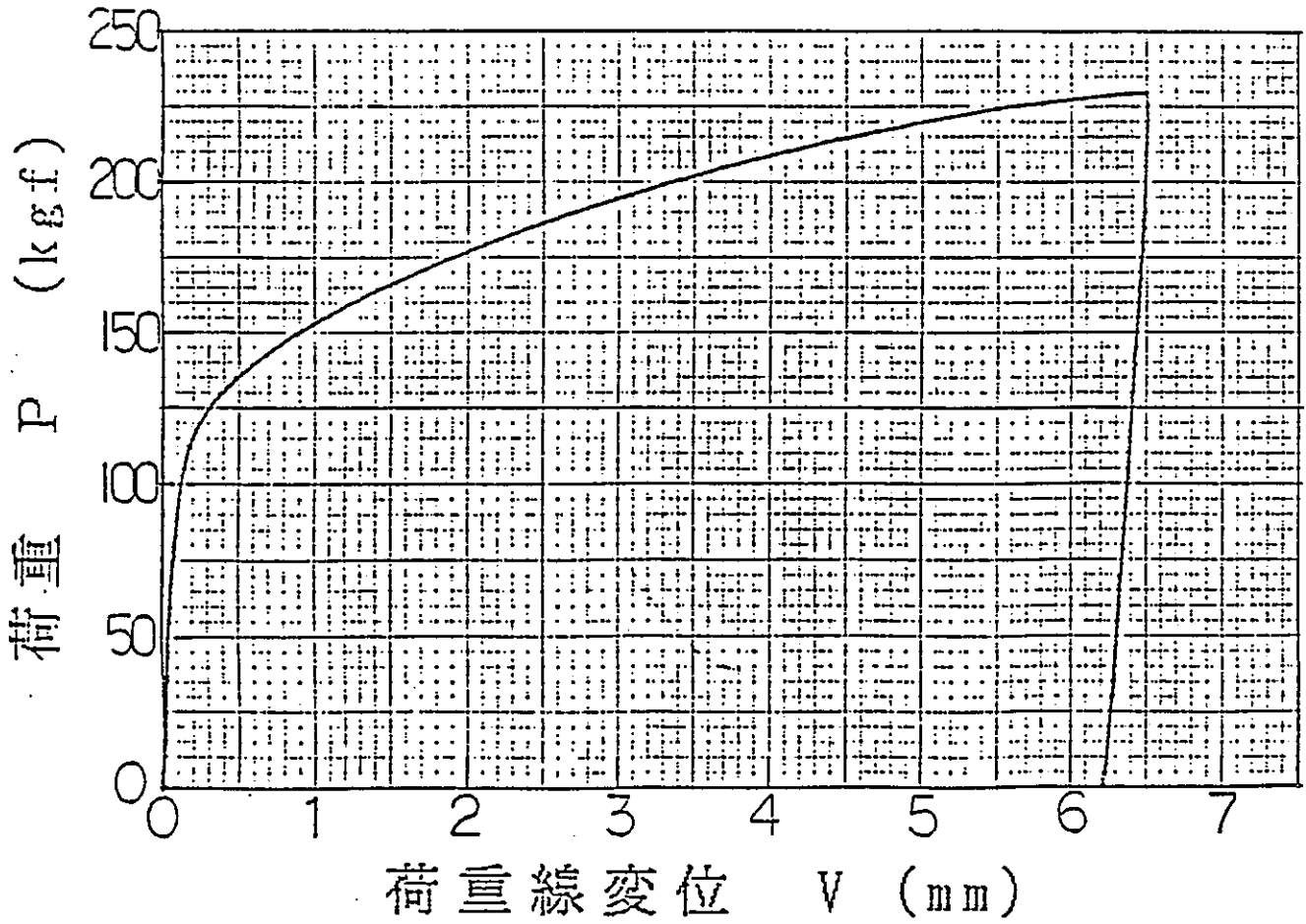


図 2 - 38 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 1, 試験温度: 20℃)

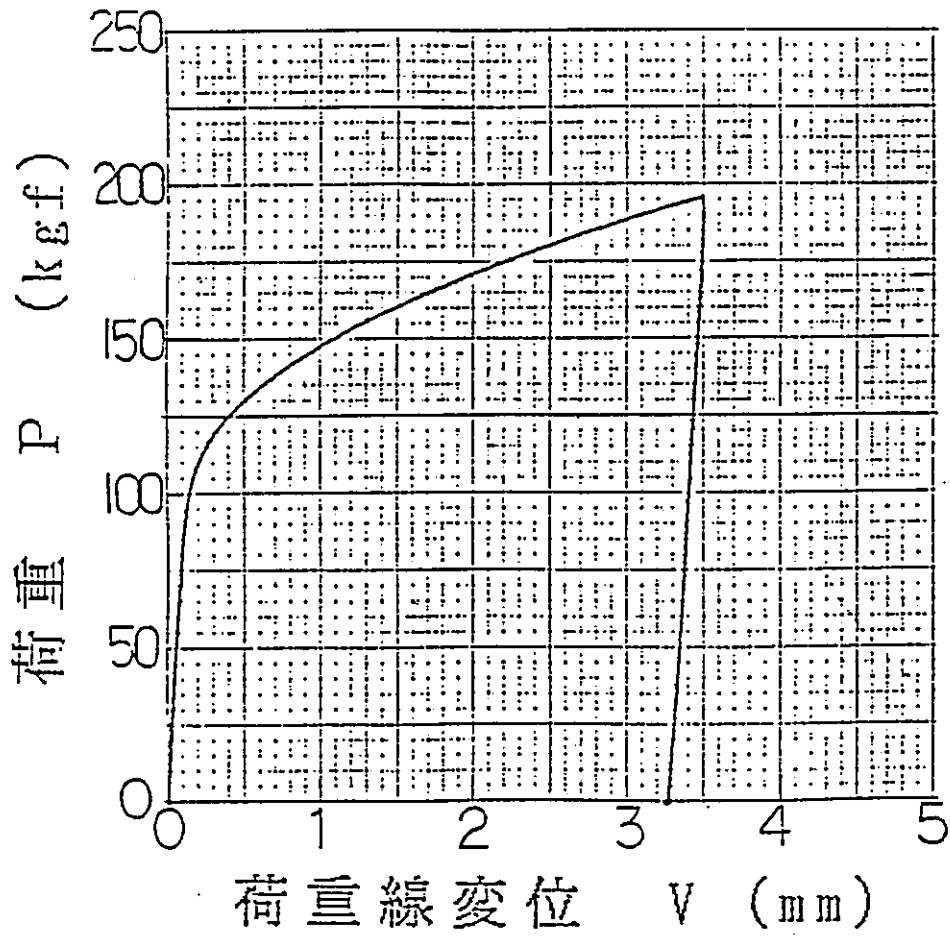


図 2 - 39 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 2, 試験温度: 20℃)



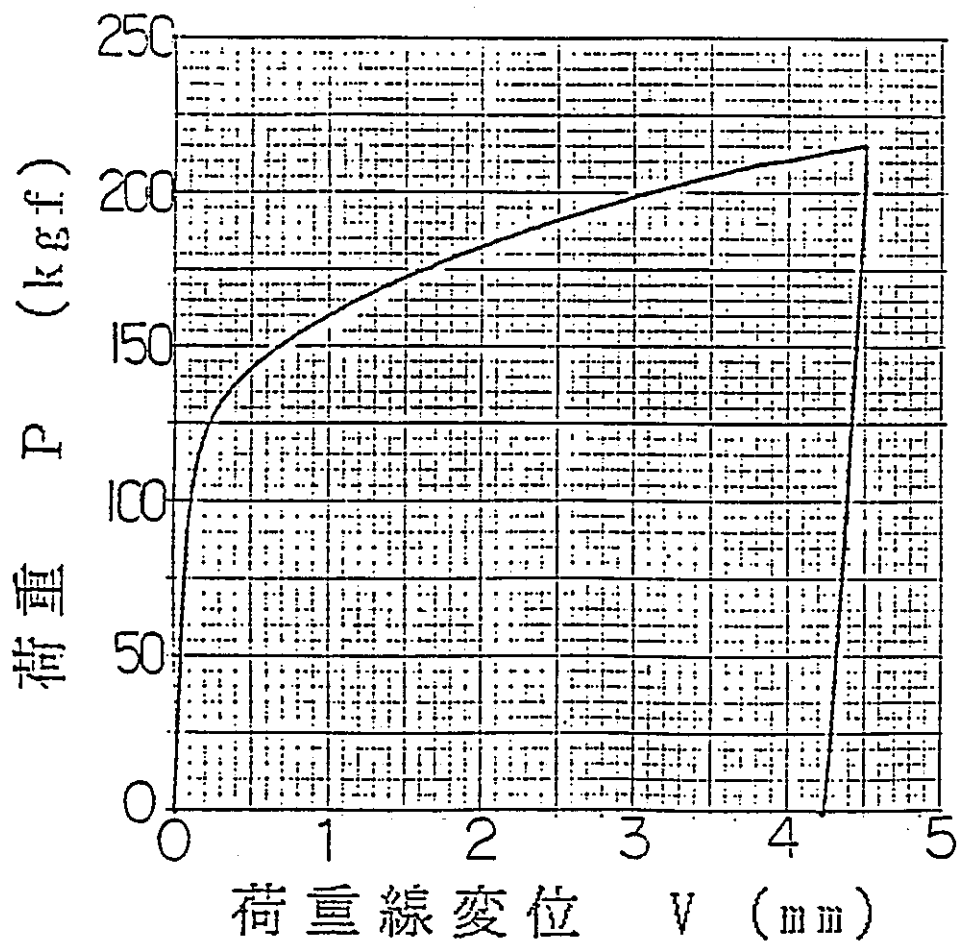


図 2 - 40 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 3, 試験温度: 20℃)

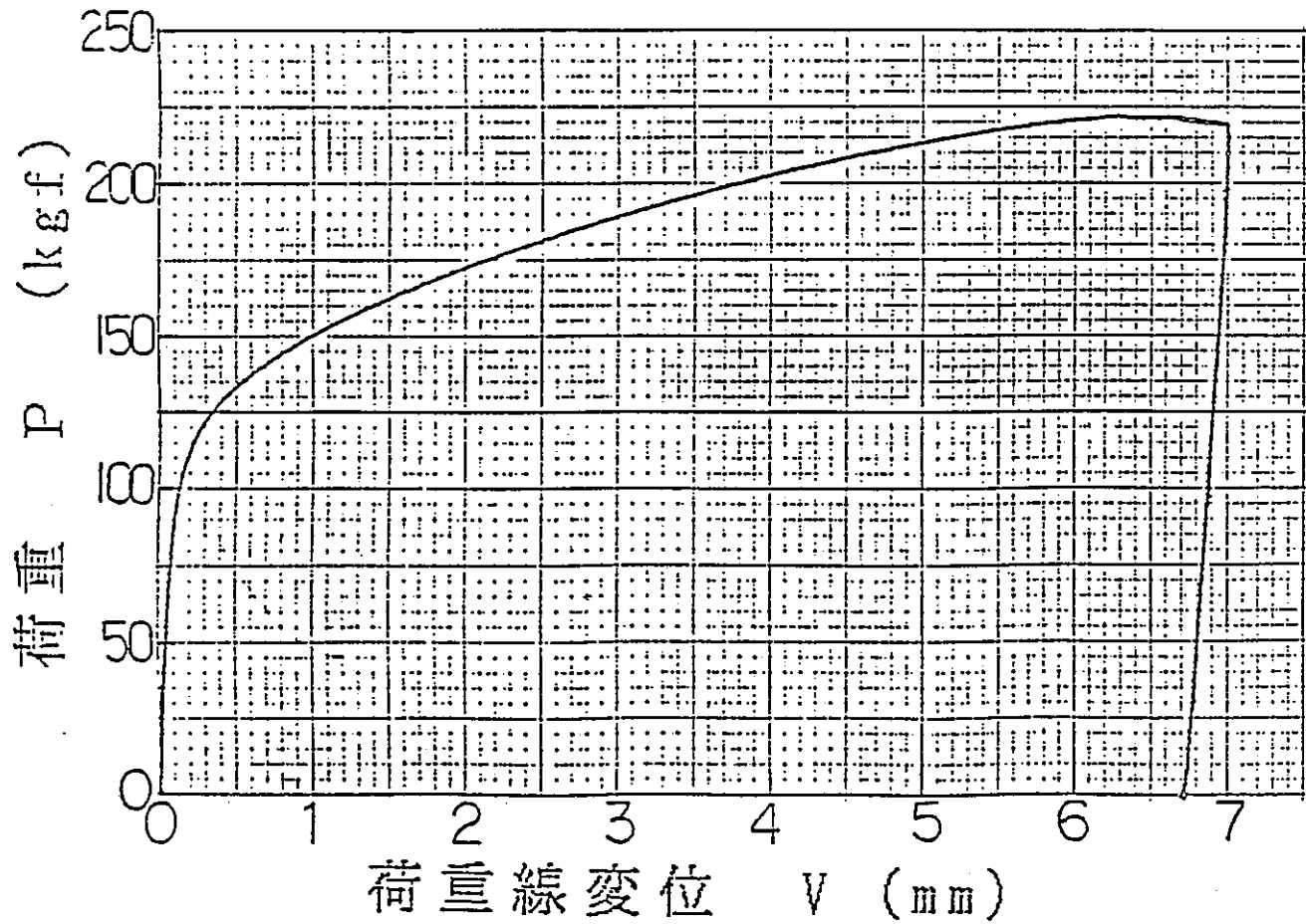


図 2 - 41 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 4, 試験温度: 20℃)

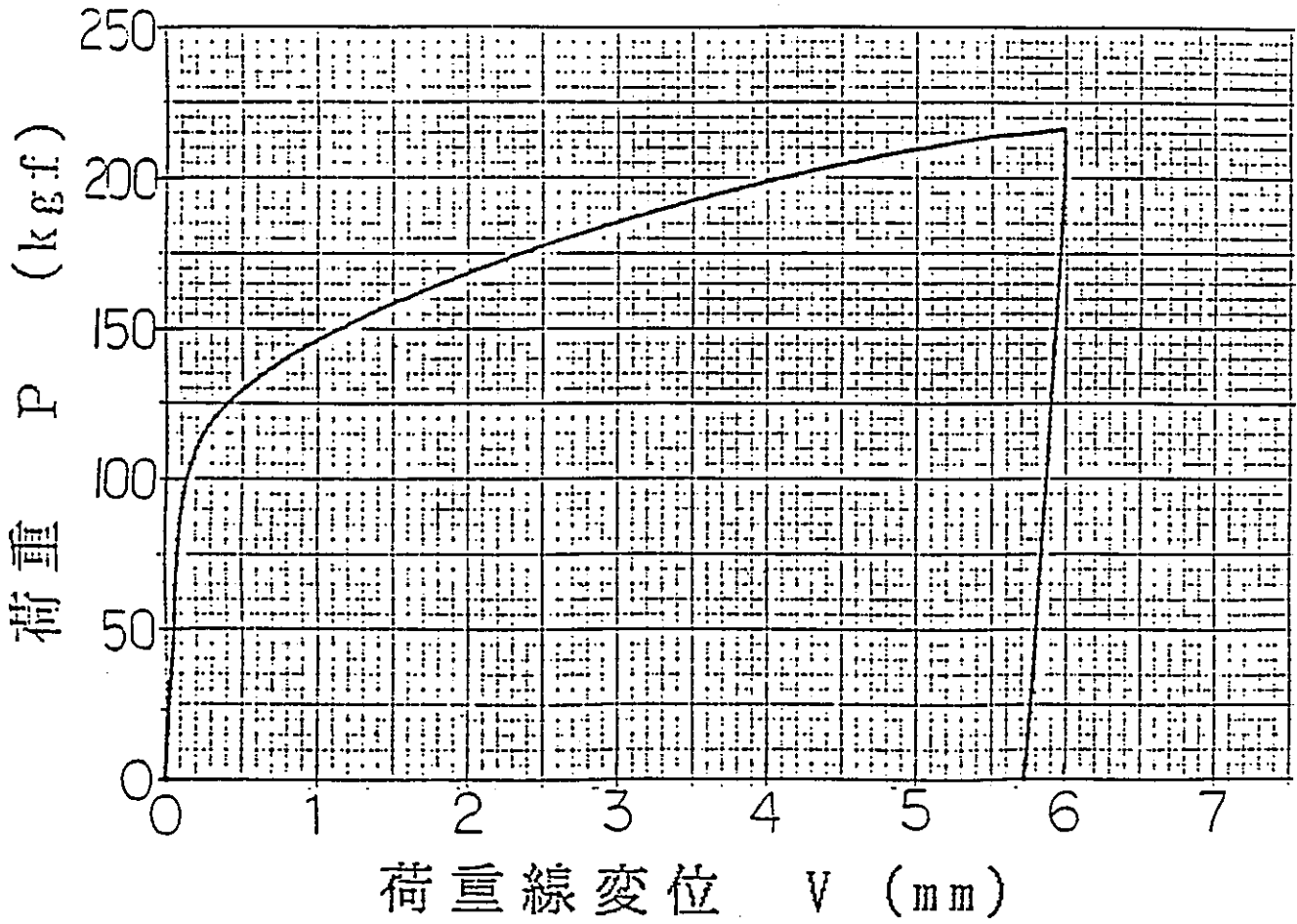


図 2 - 42 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 5, 試験温度: 20℃)

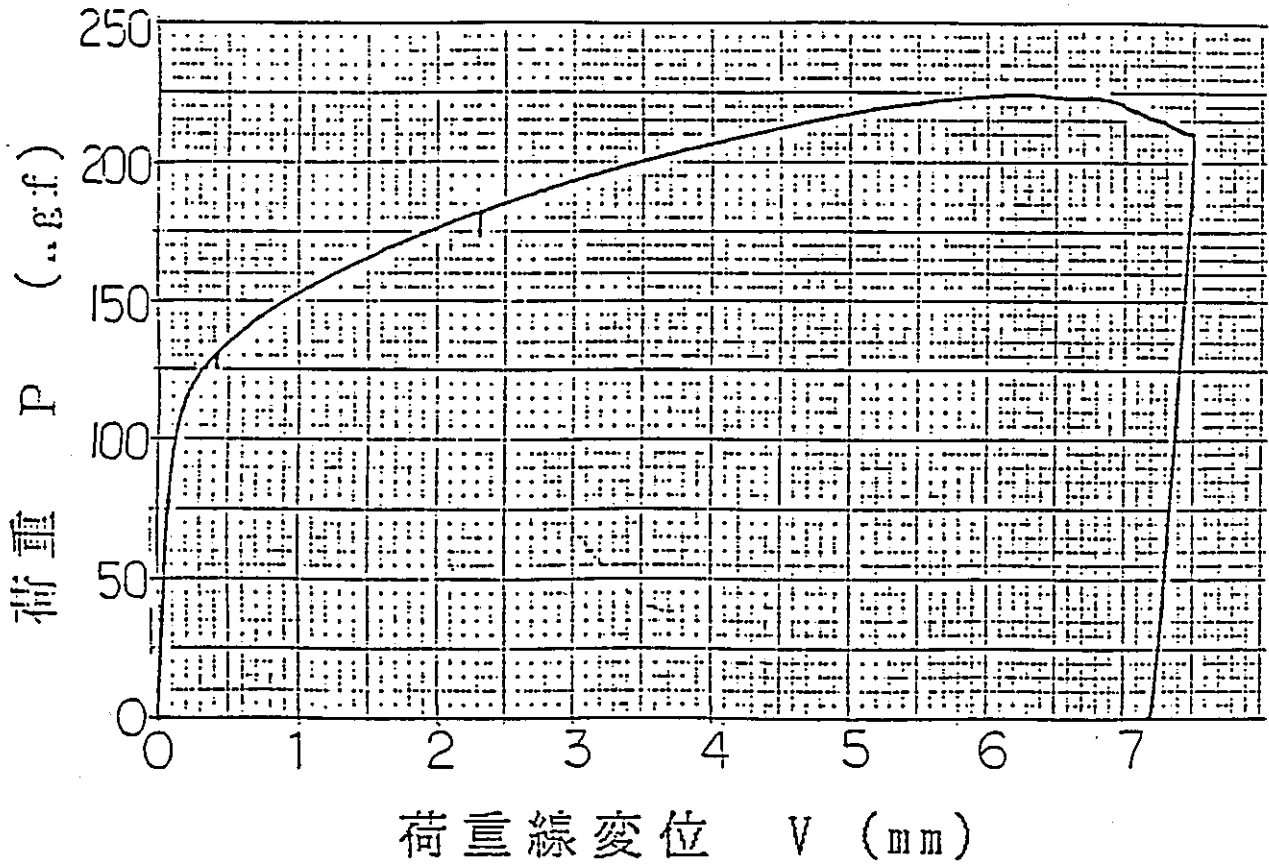


図 2 - 43 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-6, 試験温度: 20℃)

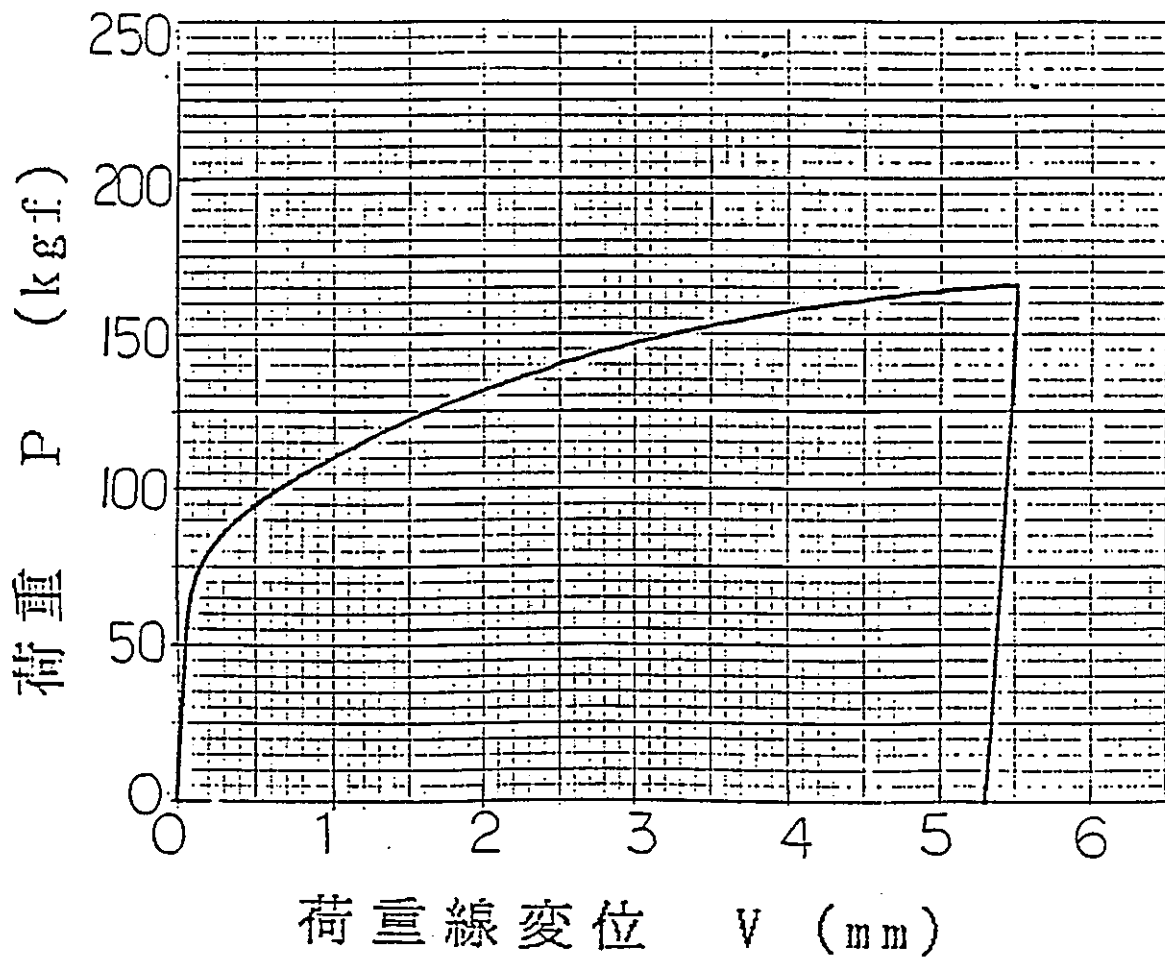


図 2 - 44 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 7, 試験温度: 300℃)

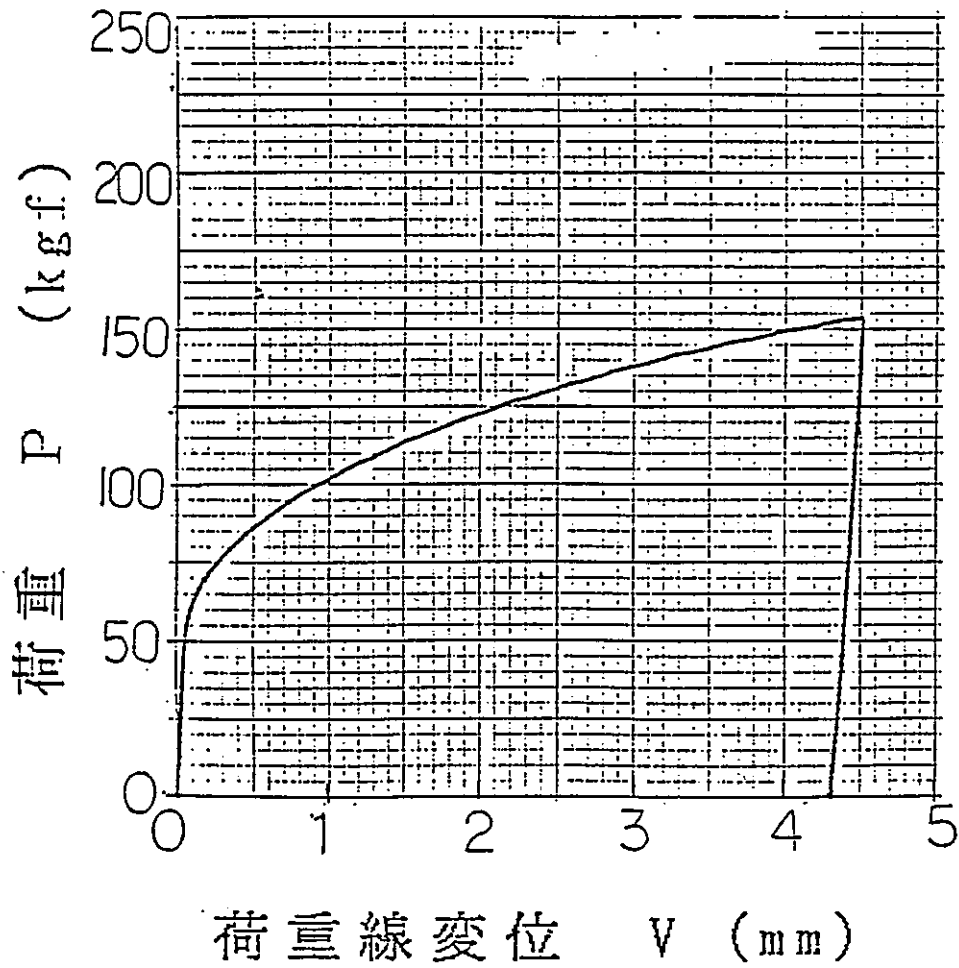


図 2 - 45 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 8, 試験温度: 300℃)

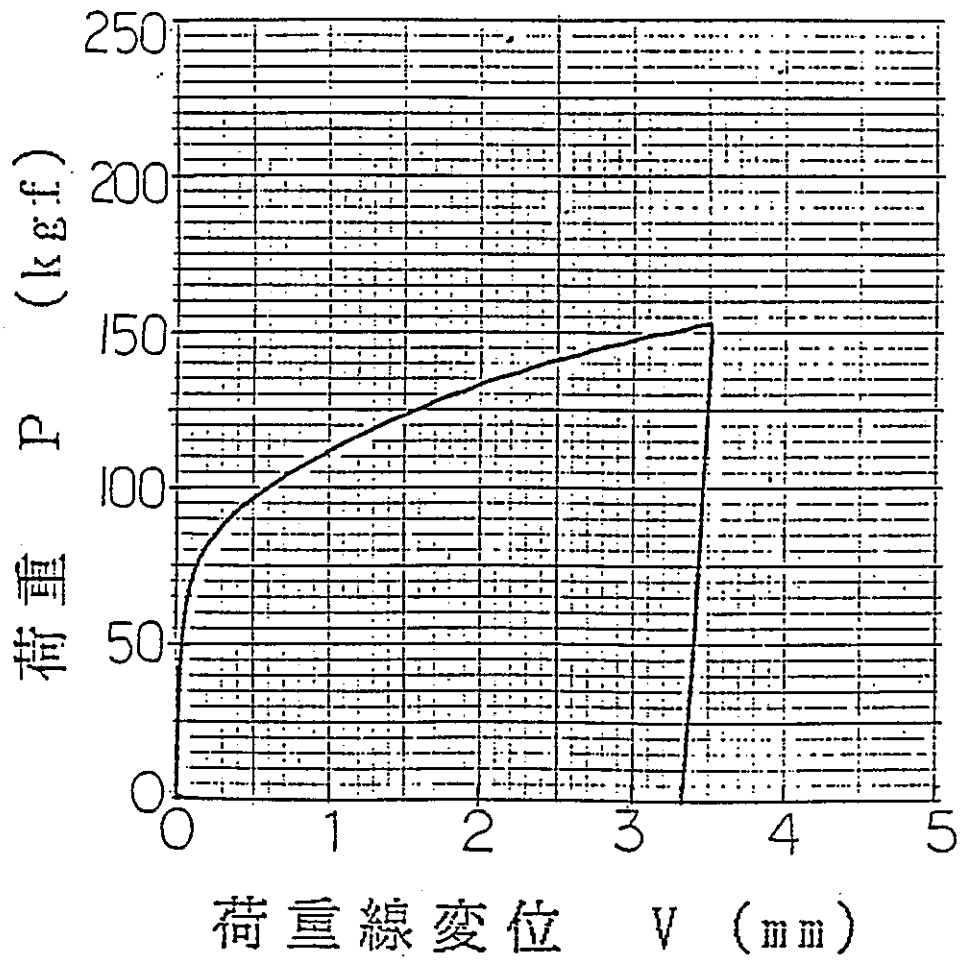


図 2 - 46 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP - 9, 試験温度: 300℃)

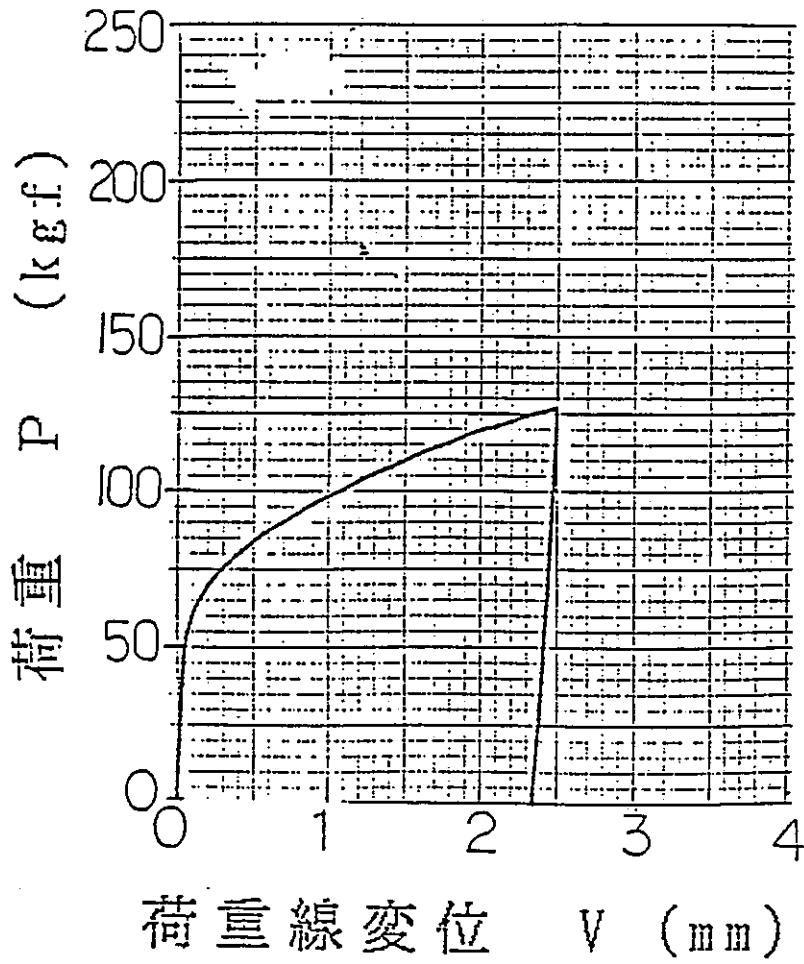


図 2 - 47 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-10, 試験温度: 300℃)



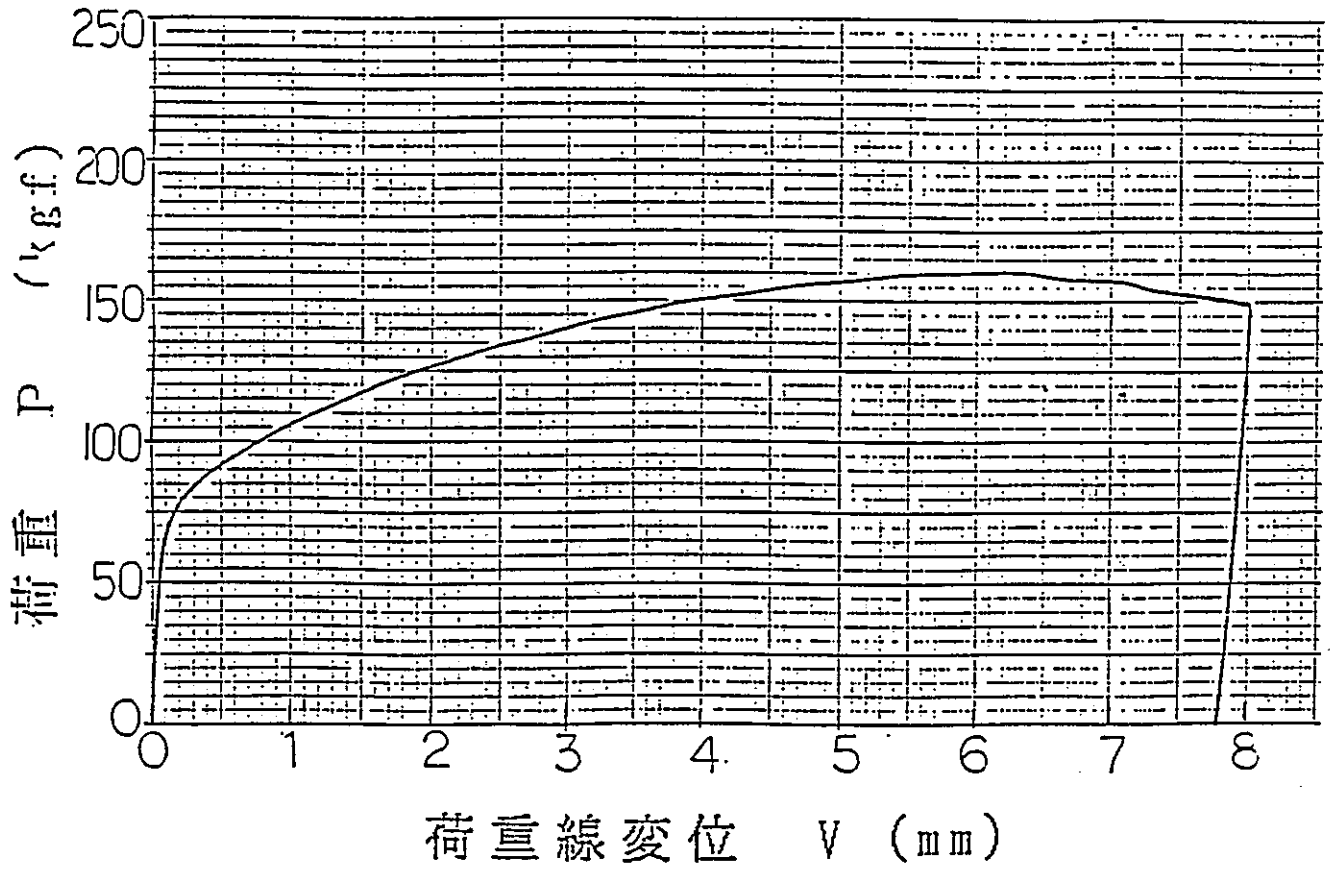


図 2 - 48 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-11, 試験温度: 300℃)

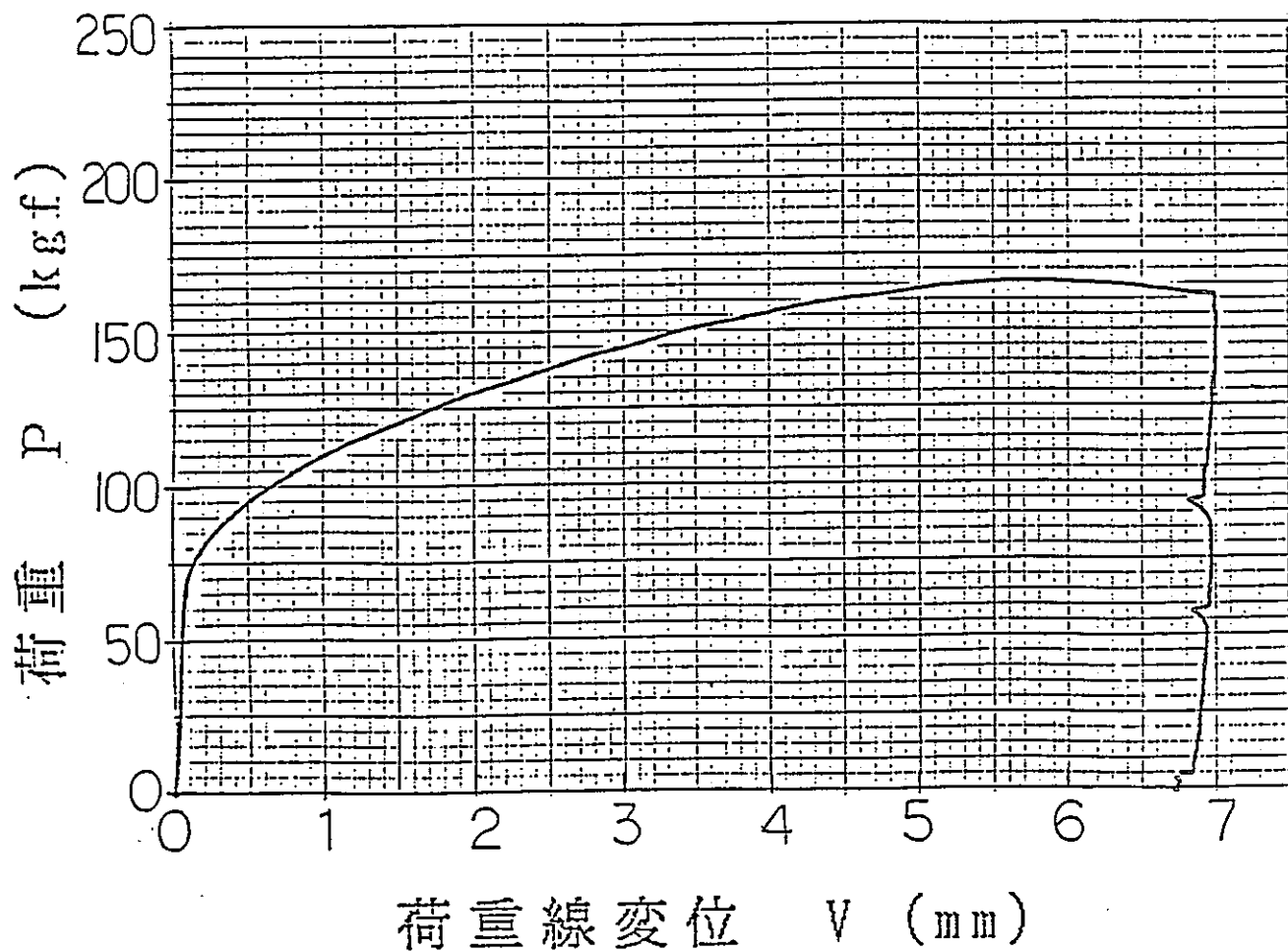


図 2 - 49 SUS316NG母材の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-12, 試験温度: 300℃)

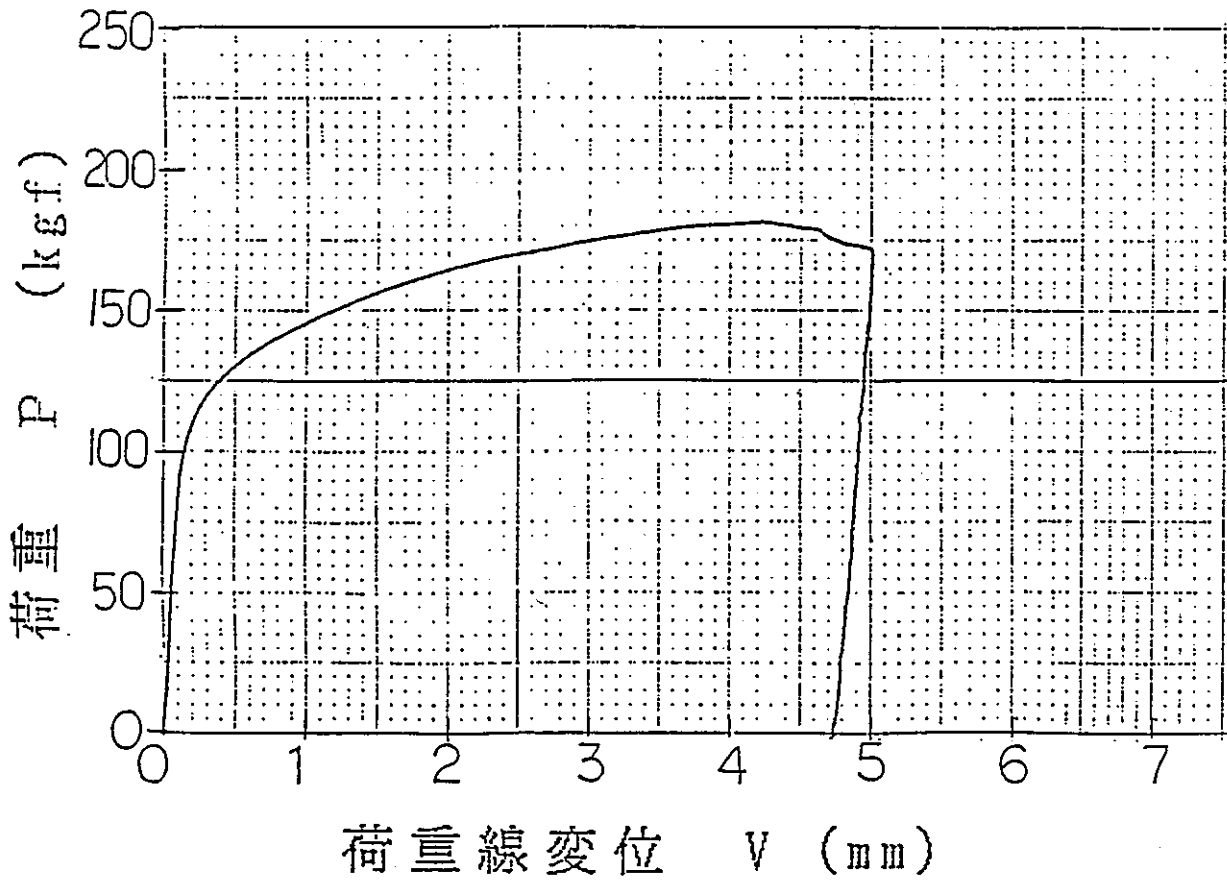


図 2 - 50 SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-W1, 試験温度: 20℃)

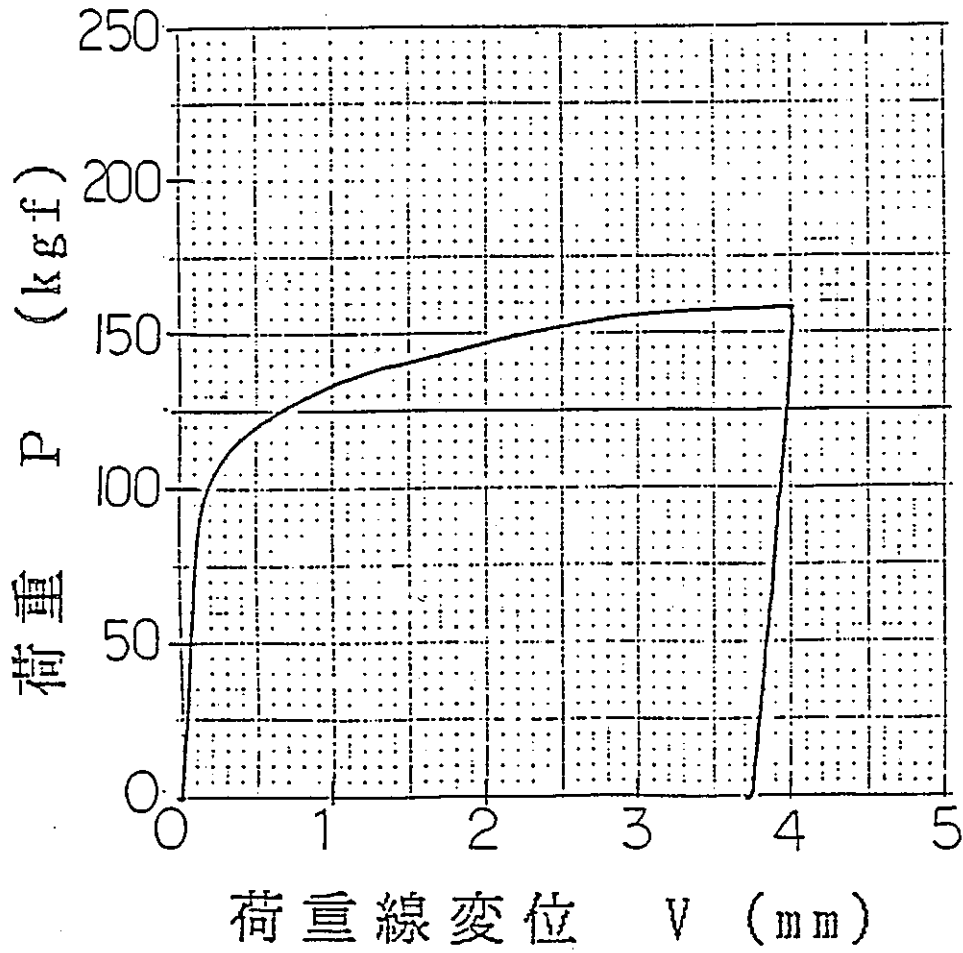


図 2 - 51 SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-W2, 試験温度: 20℃)

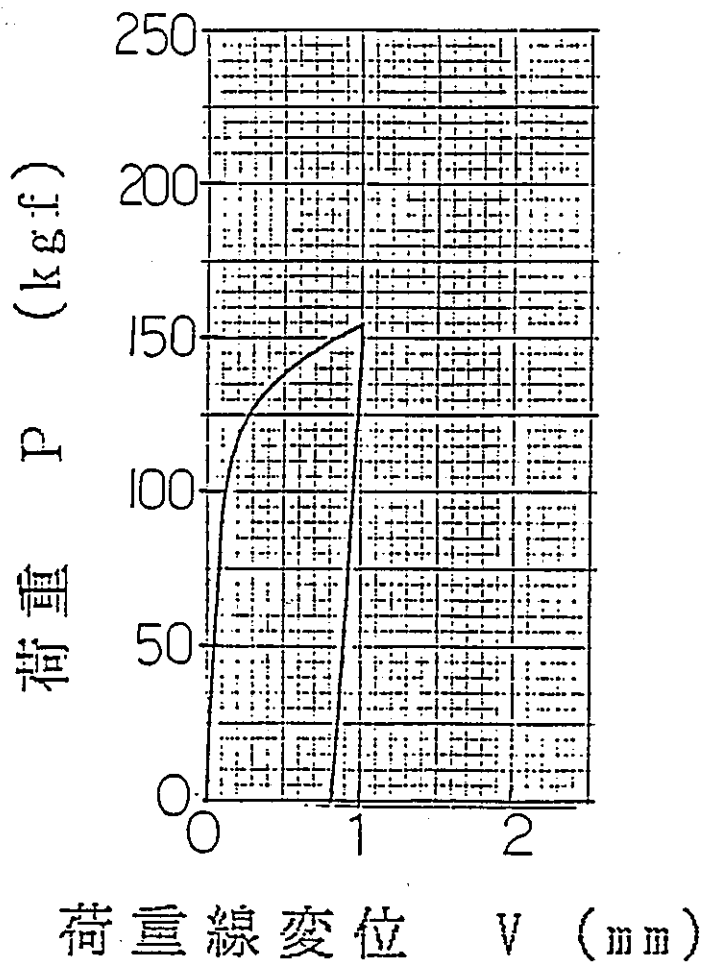


図 2 - 52 SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-W3, 試験温度: 20℃)

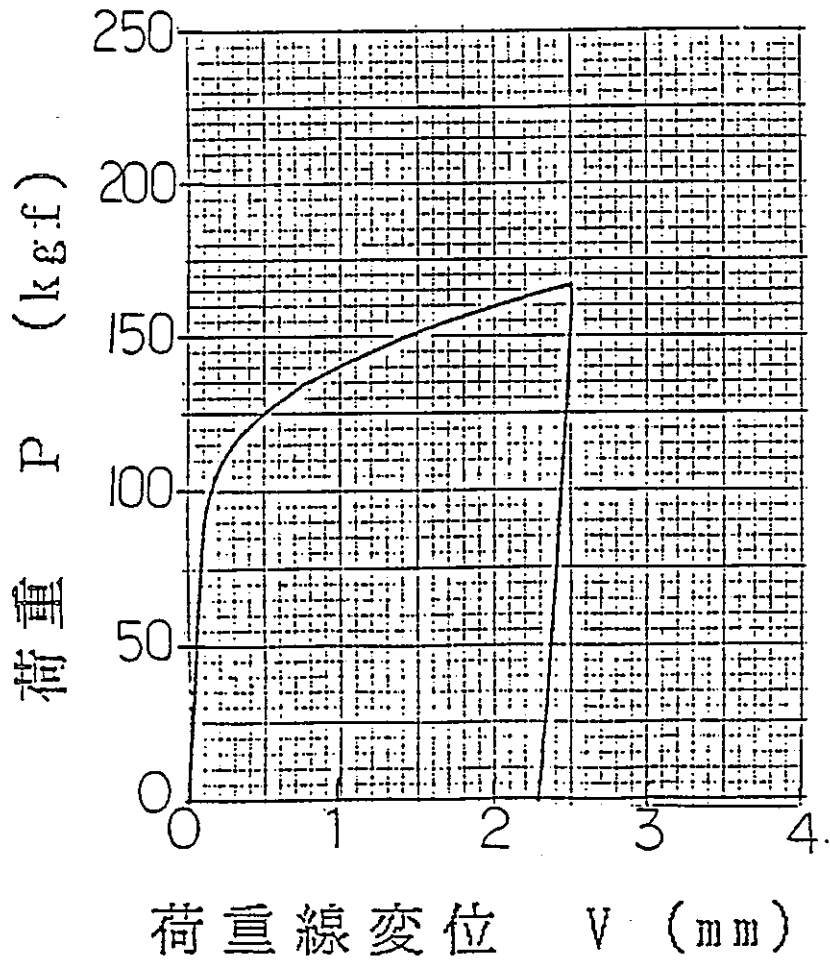


図 2 - 53 SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-W4, 試験温度: 20℃)

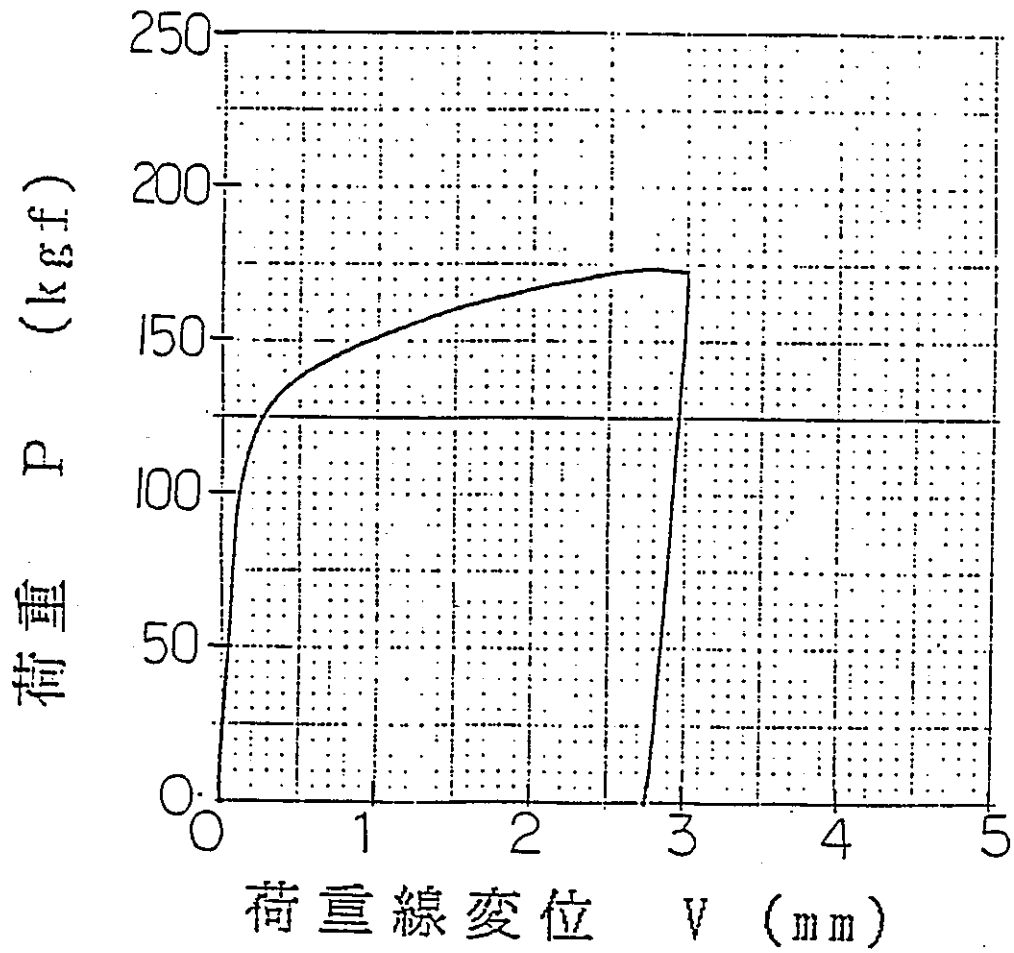


図2-54 SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-W5, 試験温度: 20℃)

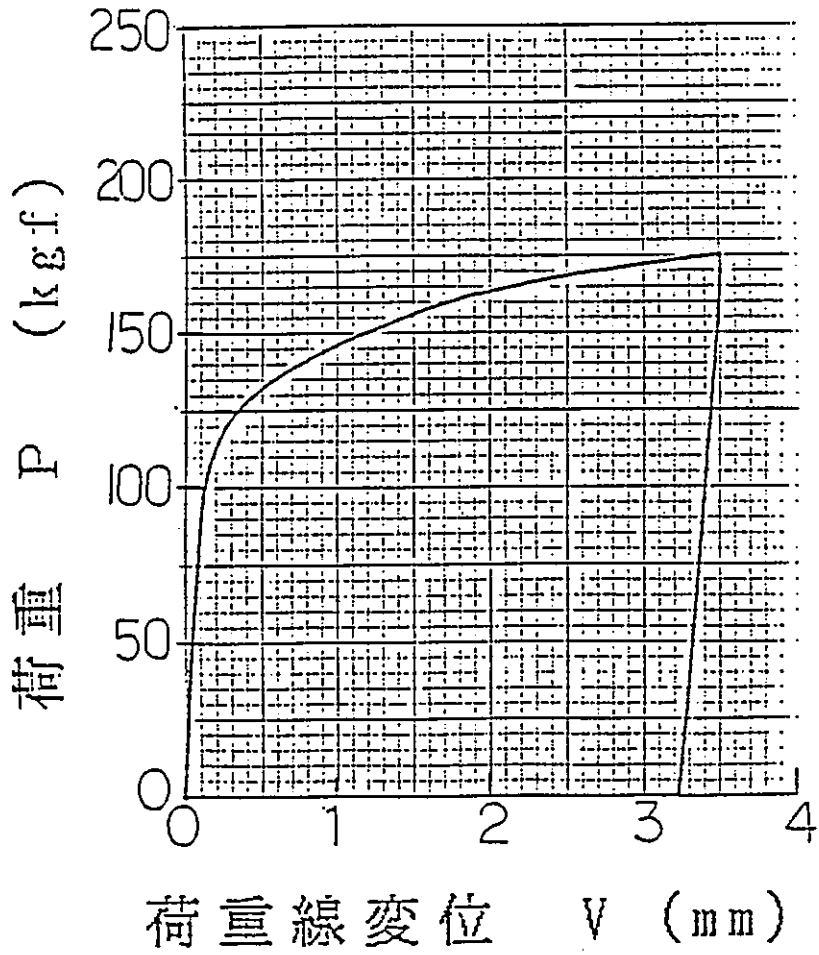


図 2 - 55 SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における  
荷重 - 荷重線変位曲線 (TP-W6, 試験温度: 20℃)



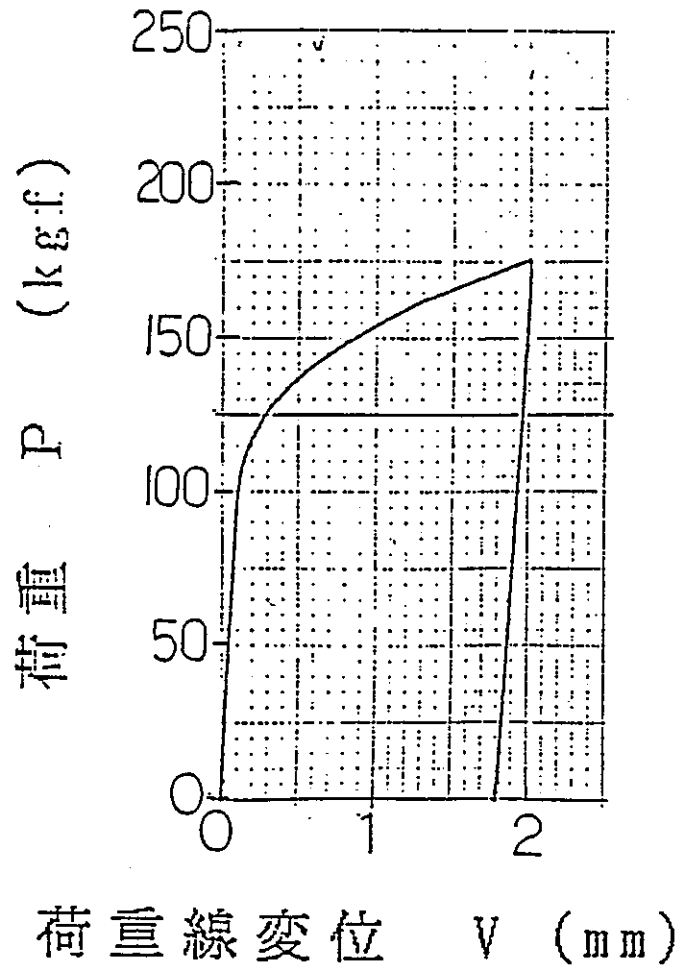


図2-56 SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-W7, 試験温度: 20℃)

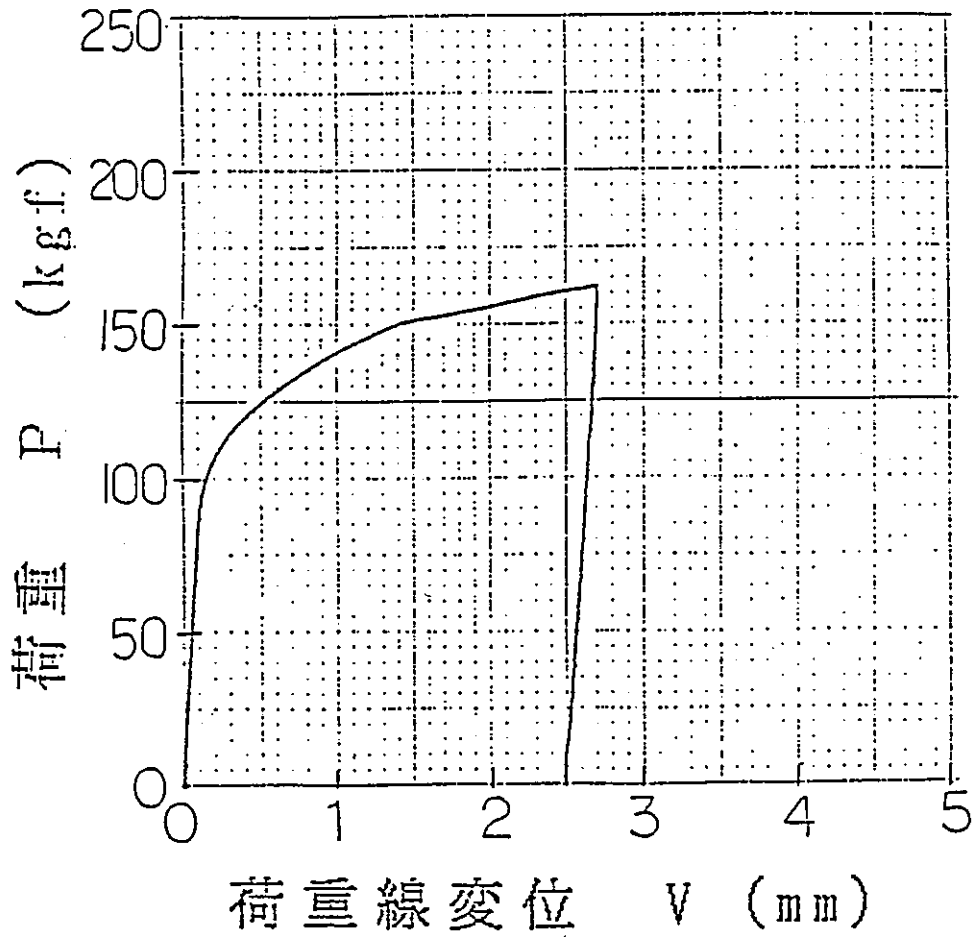


図2-57 SUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験における  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-W8, 試験温度: 20℃)

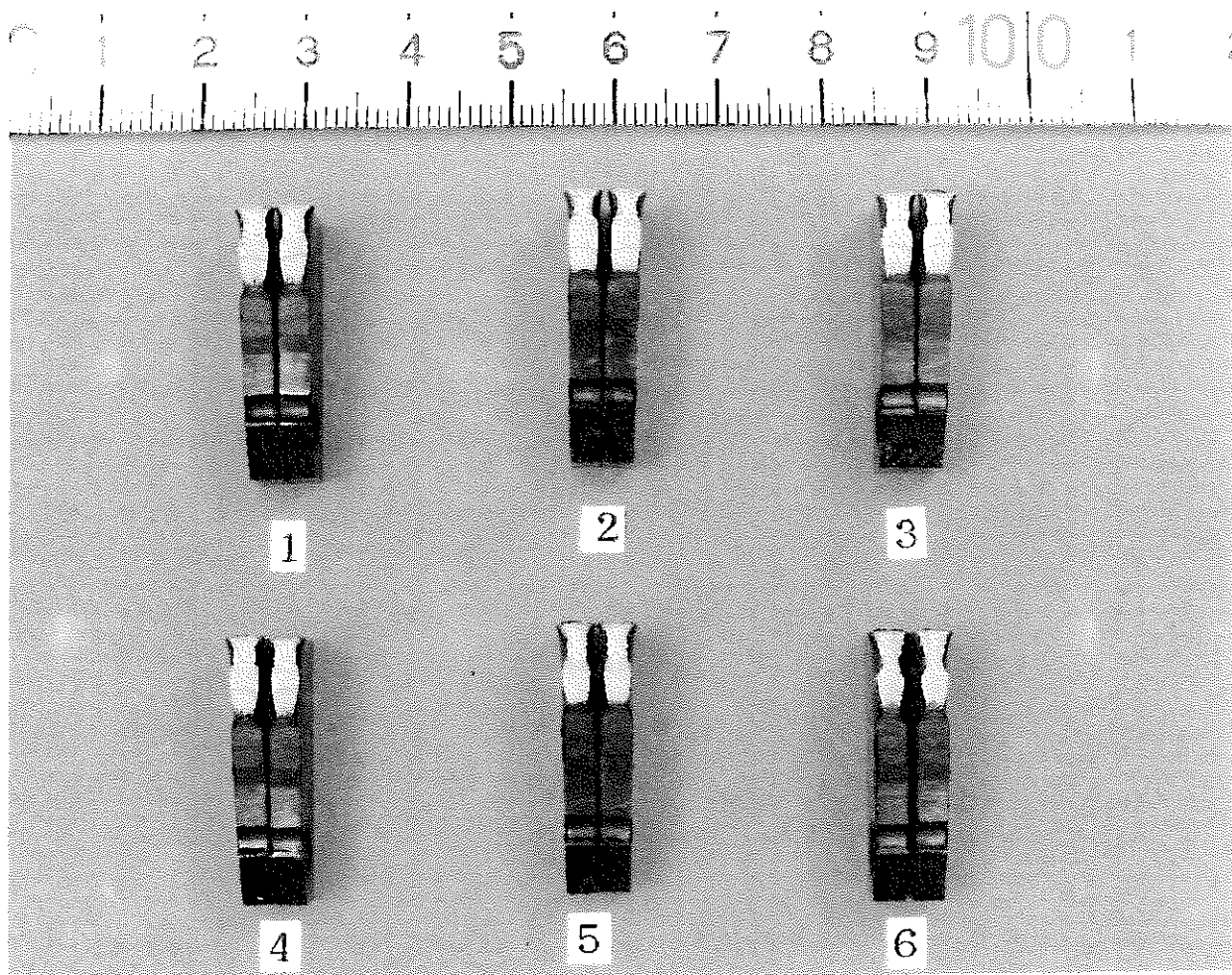


図 2 - 58 試験温度20℃でのSUS316NG母材の破壊靱性試験後の破面外観写真

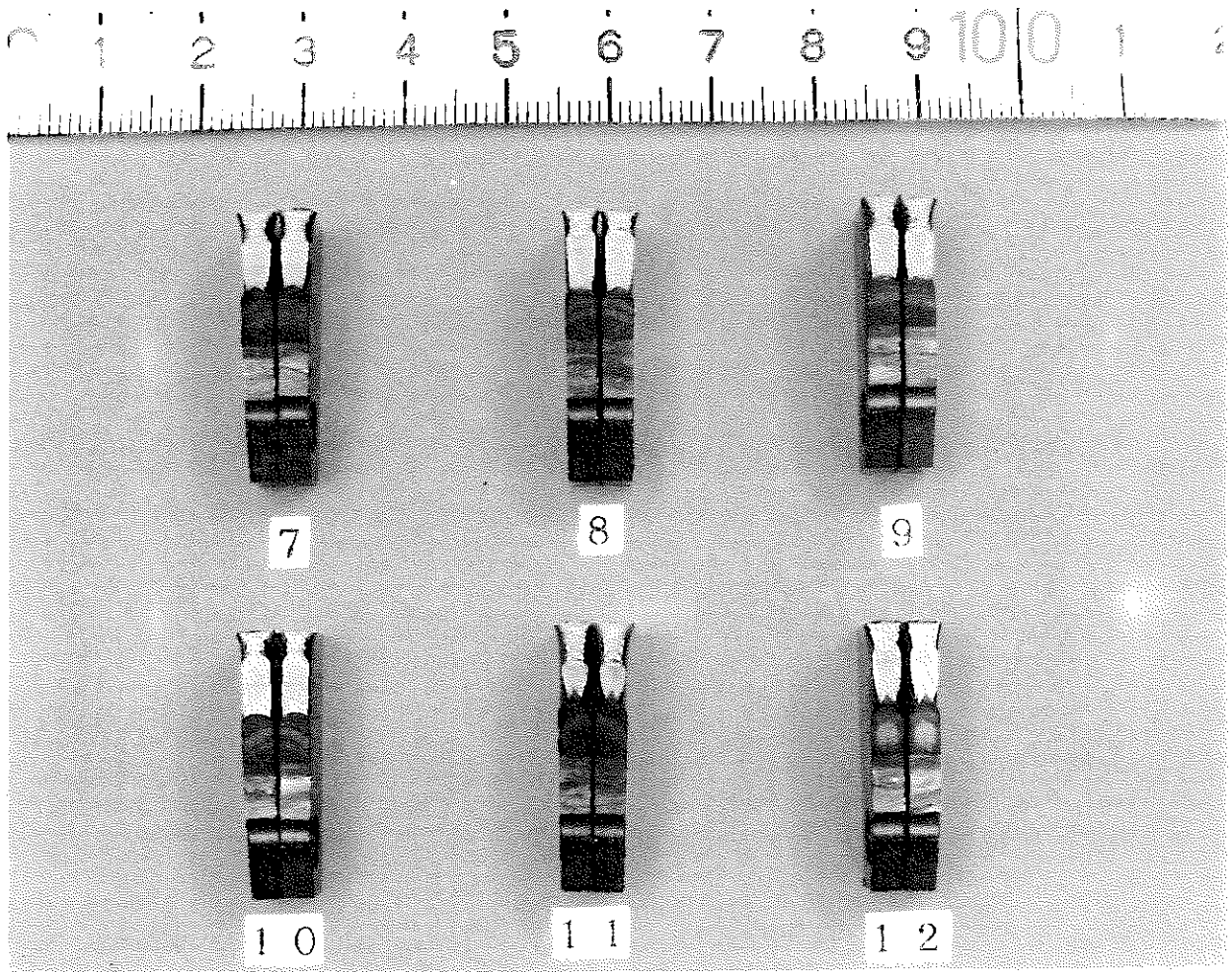


図 2 - 59 試験温度300℃でのSUS316NG母材の破壊靱性試験後の破面外観写真

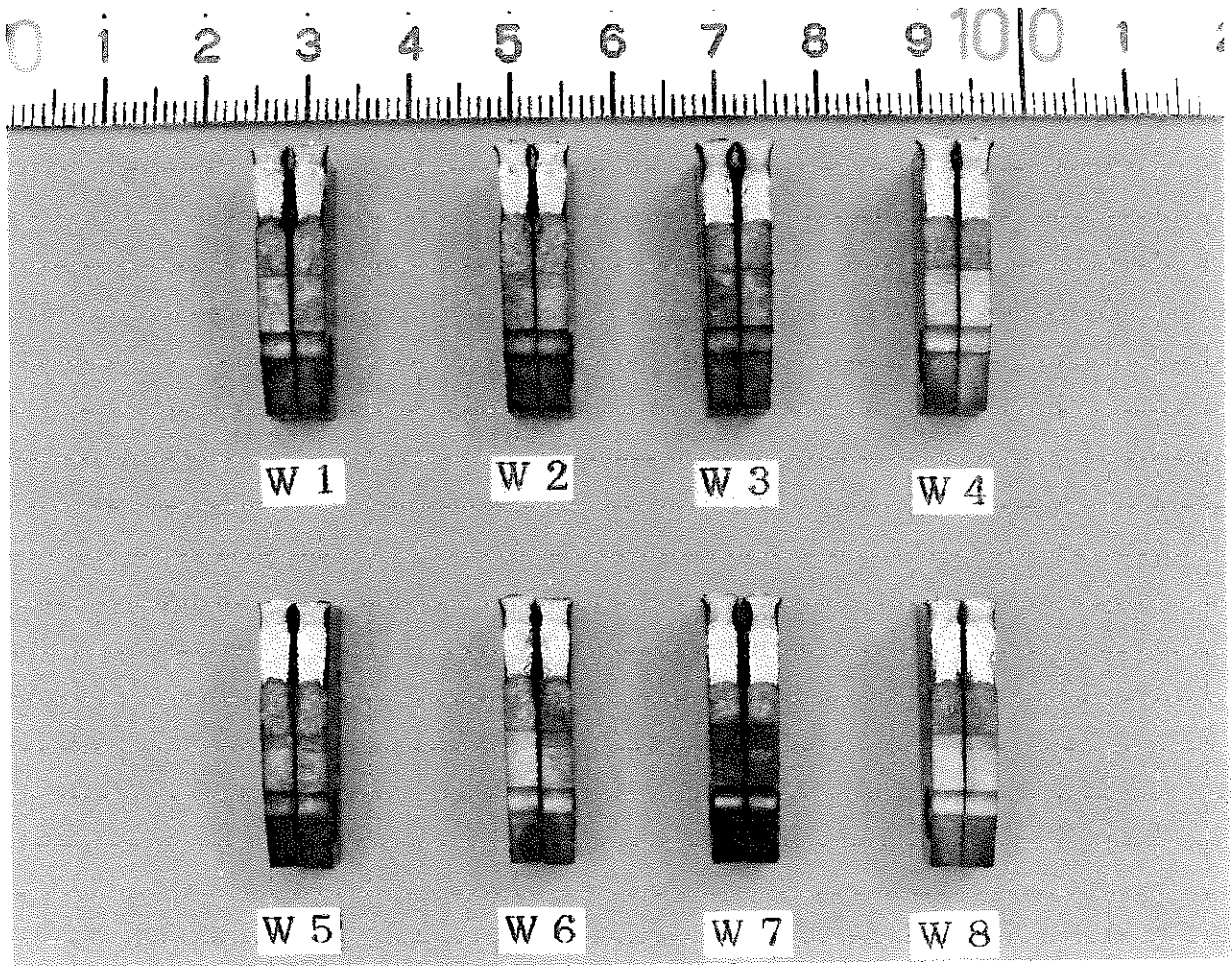


図 2 - 60 試験温度20℃でのSUS316NG溶着金属部の破壊靱性試験後の破面外観写真

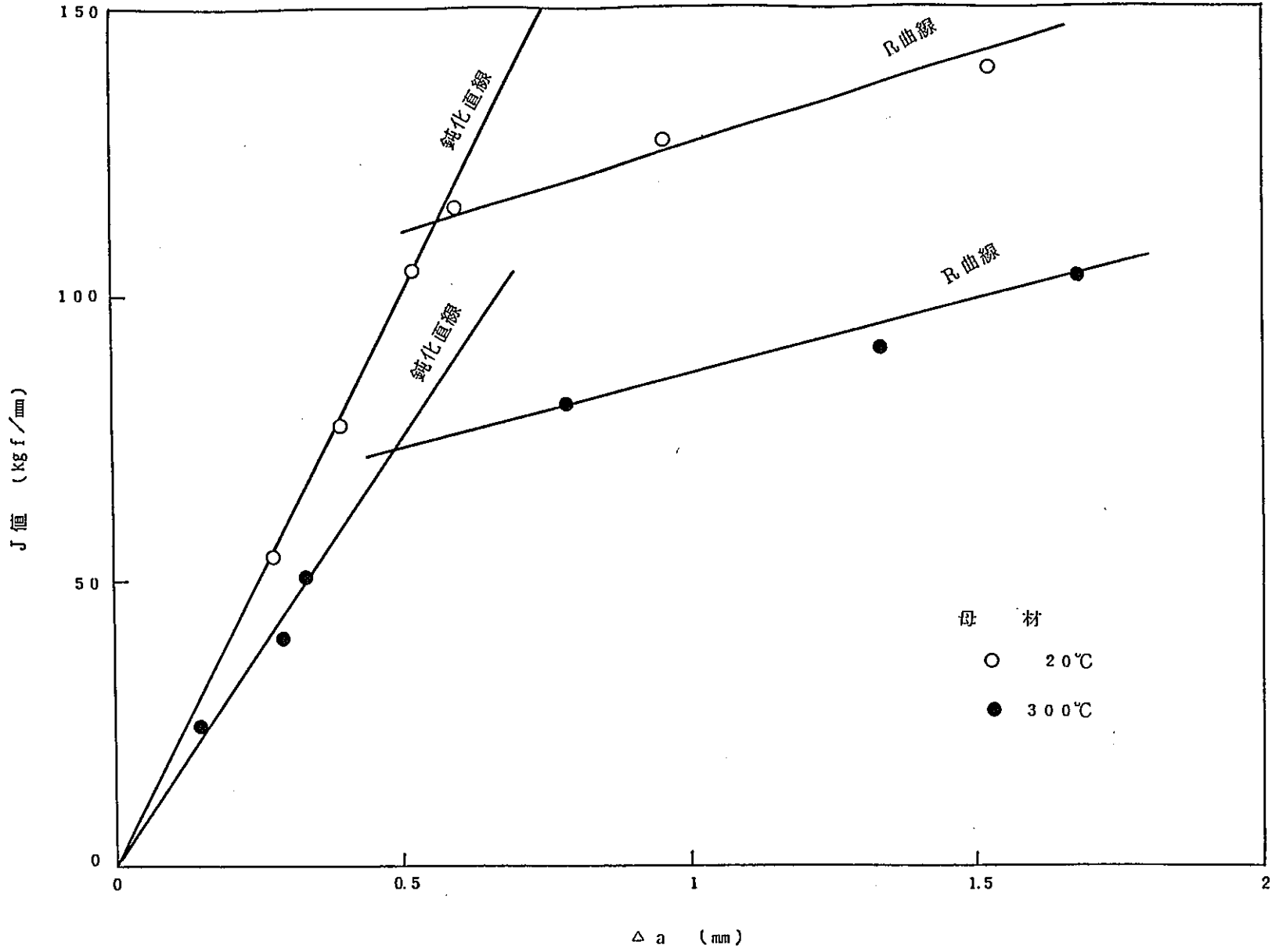


図2-61 SUS316NG母材のJ積分値とき裂進展量Δaとの関係

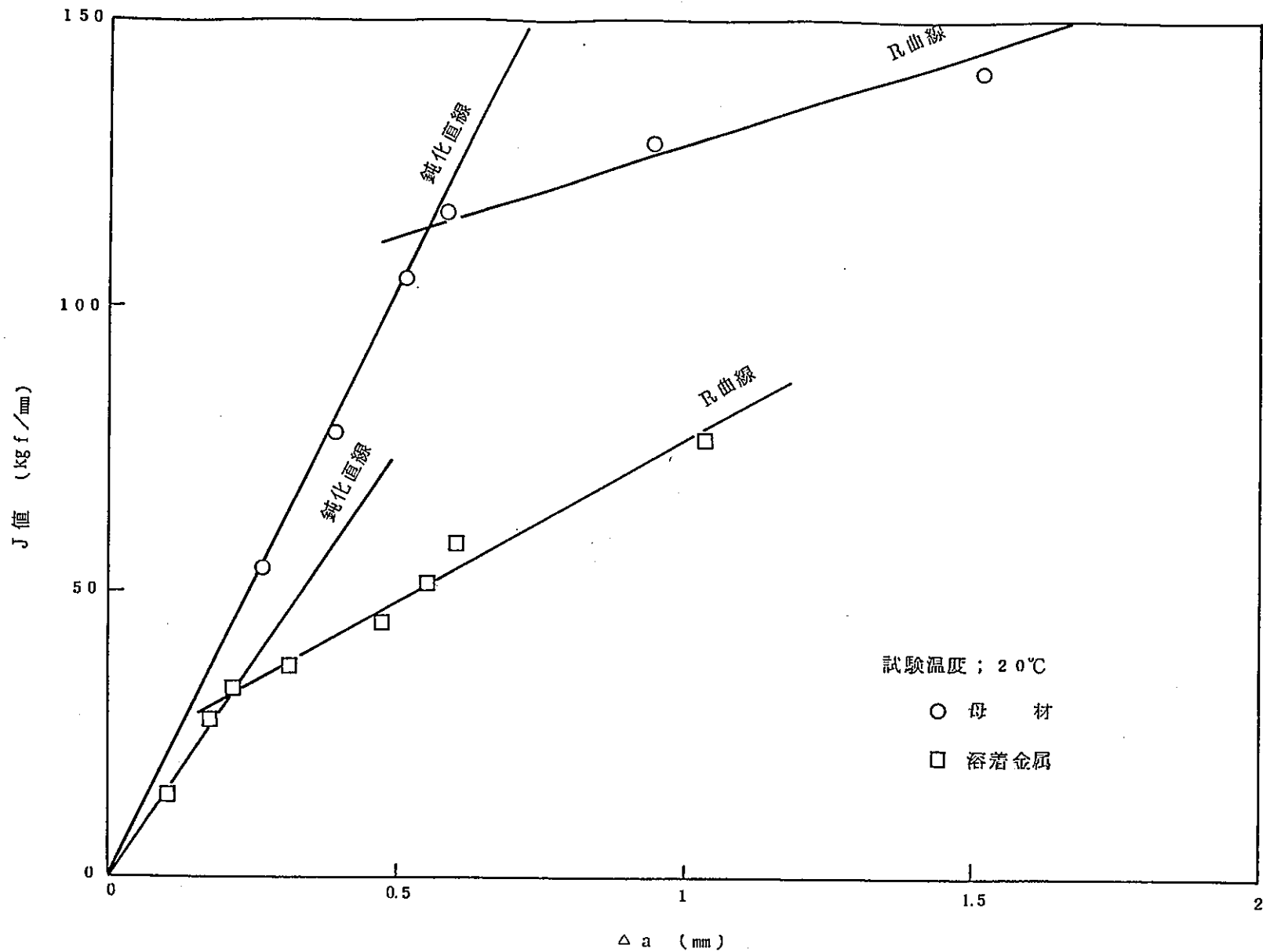


図2-62 SUS316NG母材及び溶着金属のJ積分値とき裂進展量 $\Delta a$ との関係

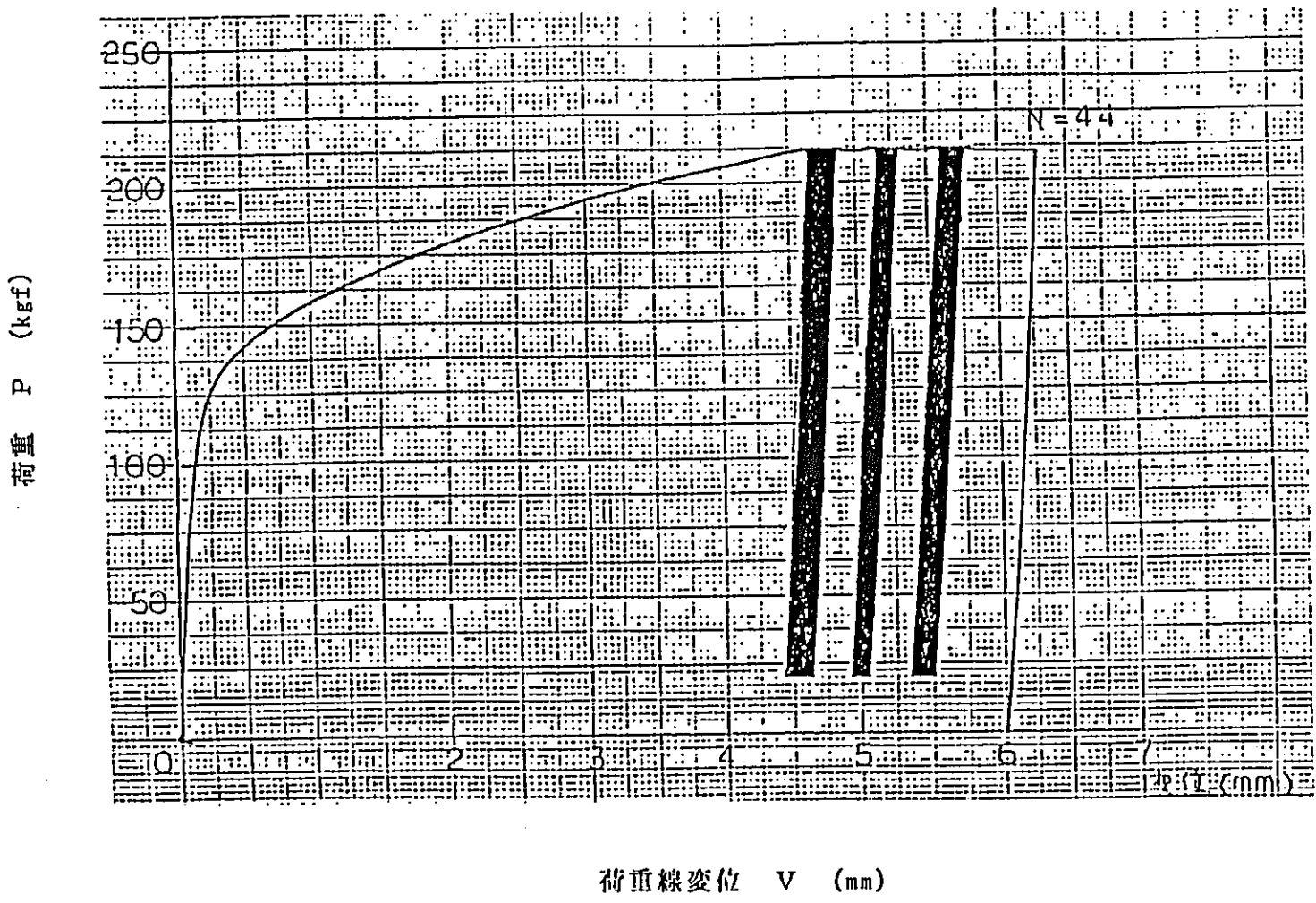


図 2-63 SUS316NG 母材の極低サイクル荷重試験時の  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-13, 試験温度: 20℃)



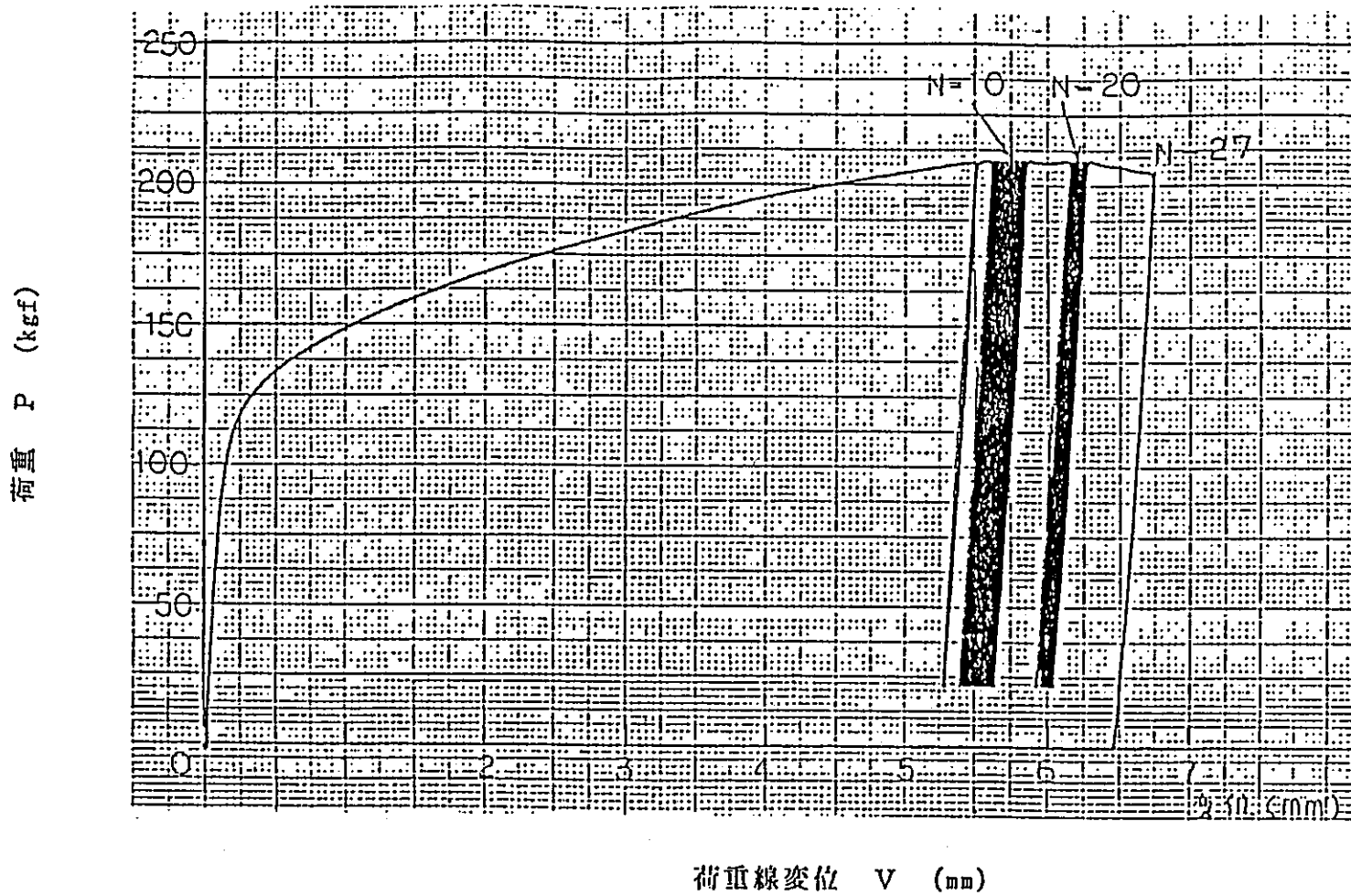
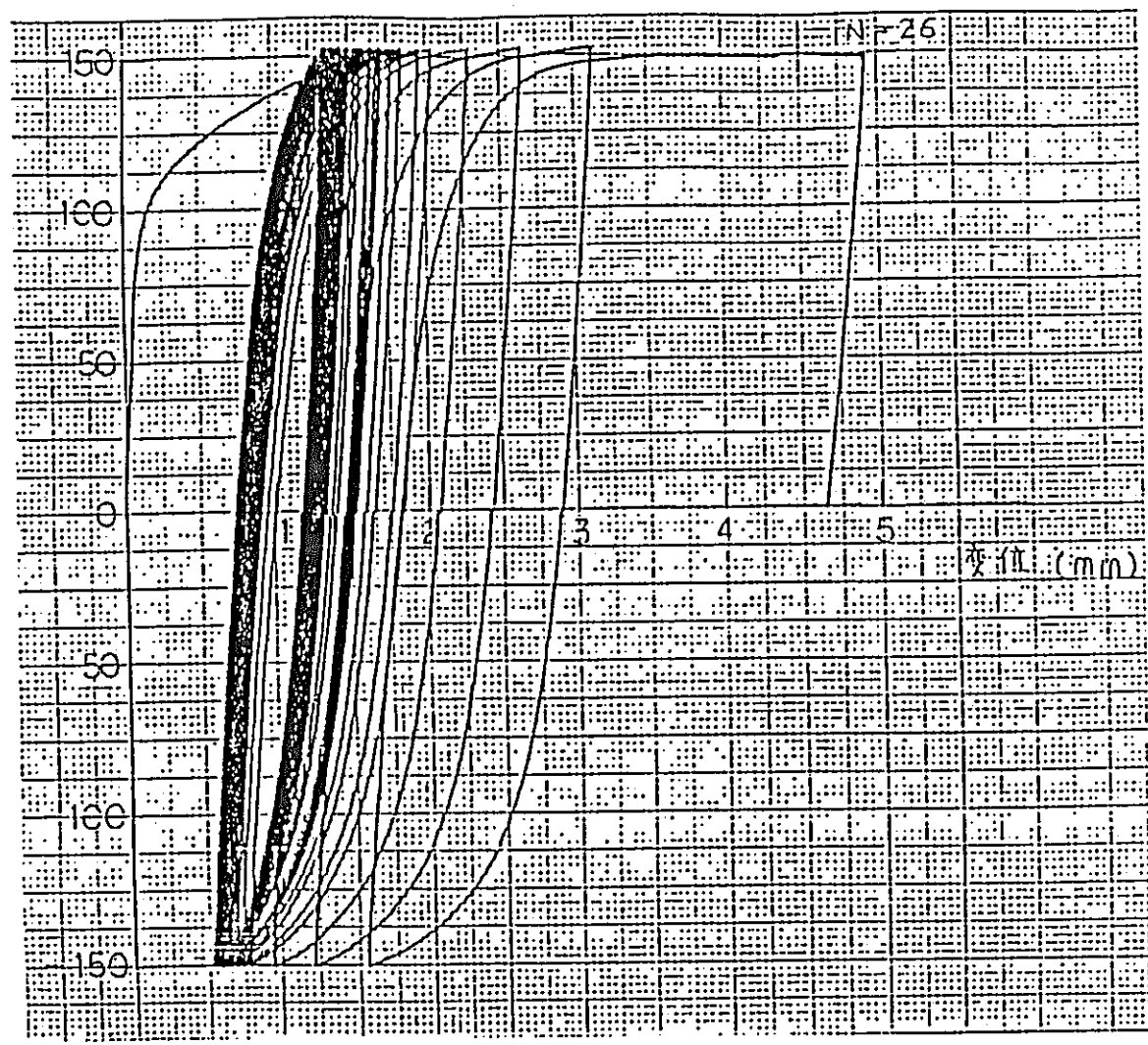


図 2-64 SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-14, 試験温度: 20℃)

荷重 P (kef)



荷重線変位 V (mm)

図2-65 SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-15, 試験温度: 20℃)

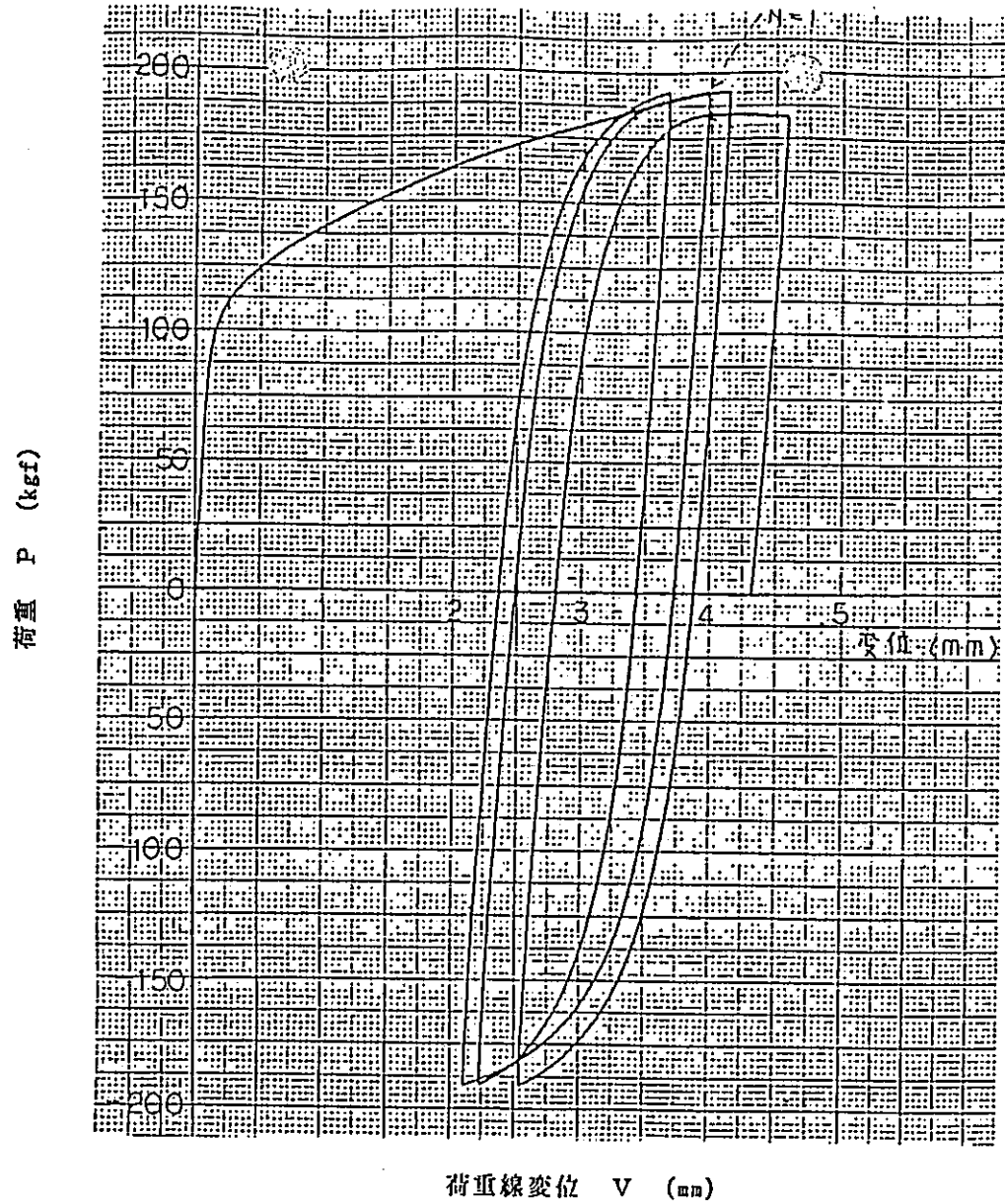
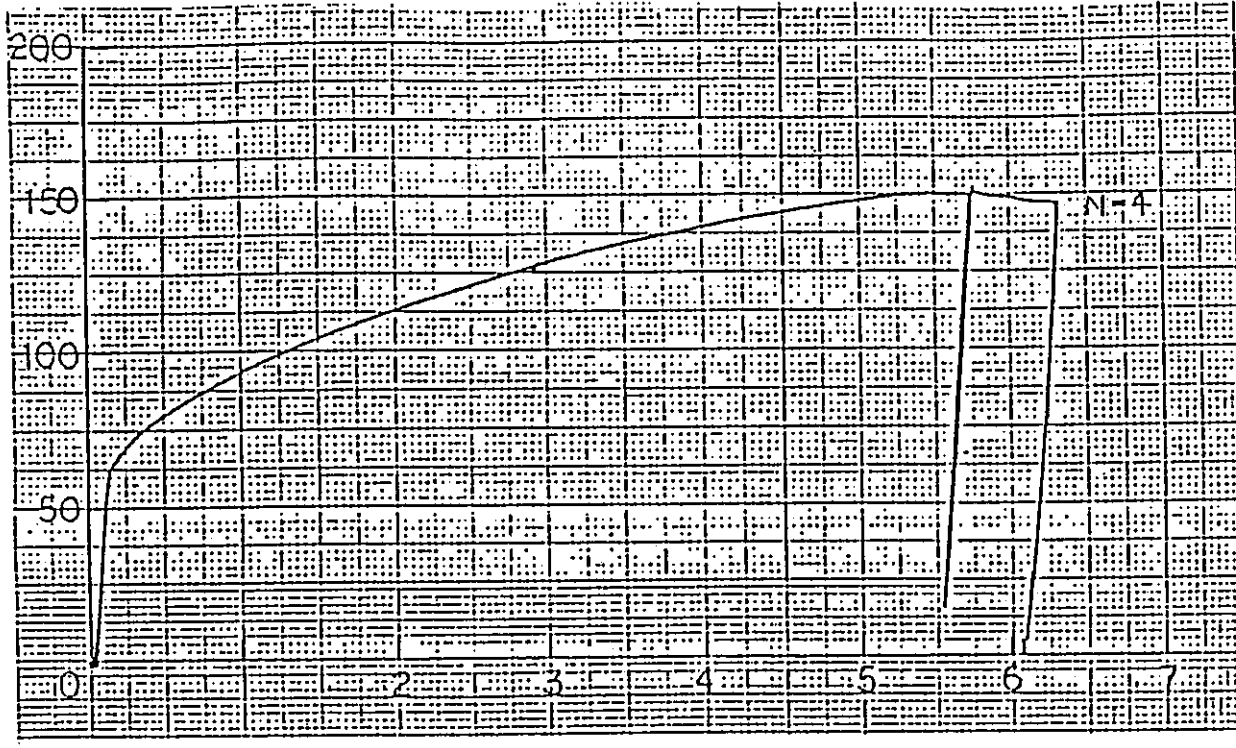


図 2-66 SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-16, 試験温度: 20℃)



荷重 P (kgf)

荷重線変位 V (mm)

図 2-67 SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-17, 試験温度: 300℃)

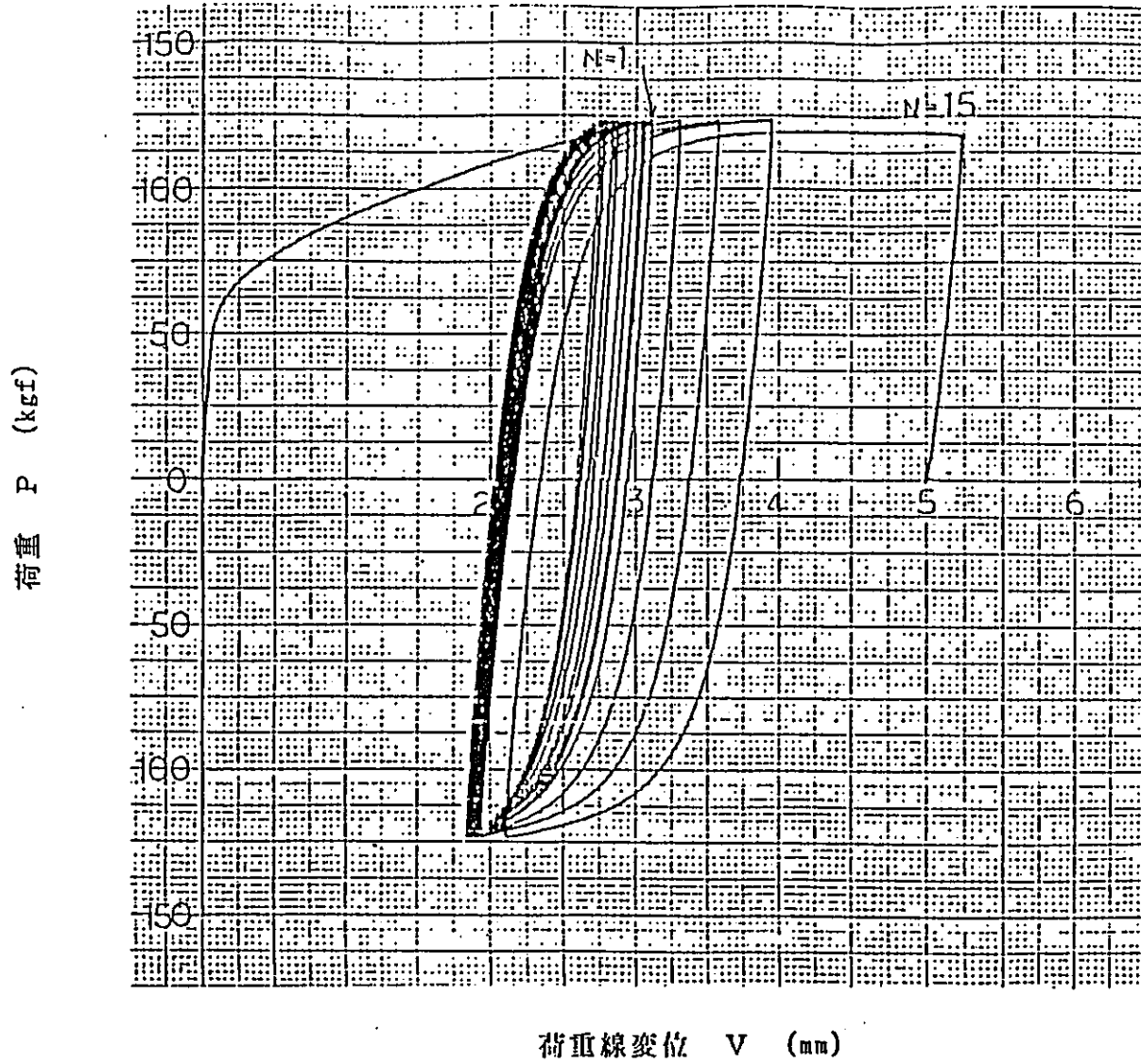


図 2 - 68 SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の  
荷重-荷重線変位曲線 (TP-18, 試験温度: 300℃)

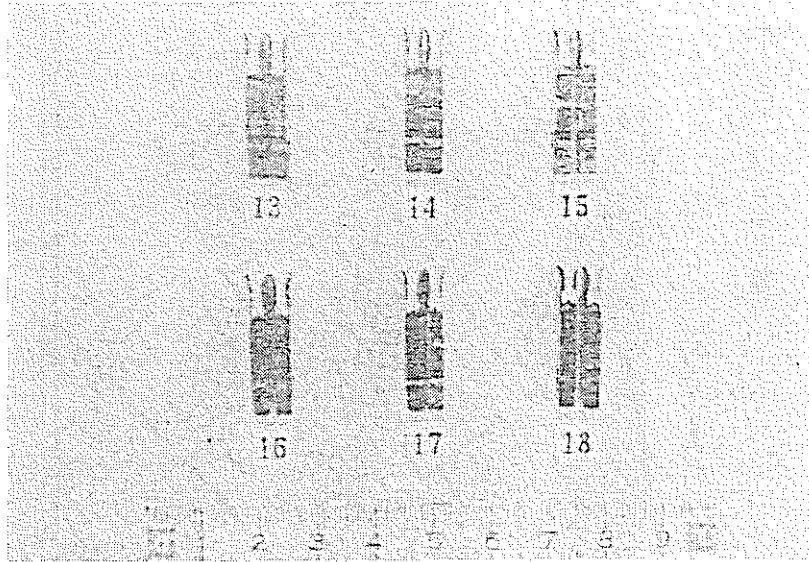


図 2 - 69 SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験時の破面外観写真

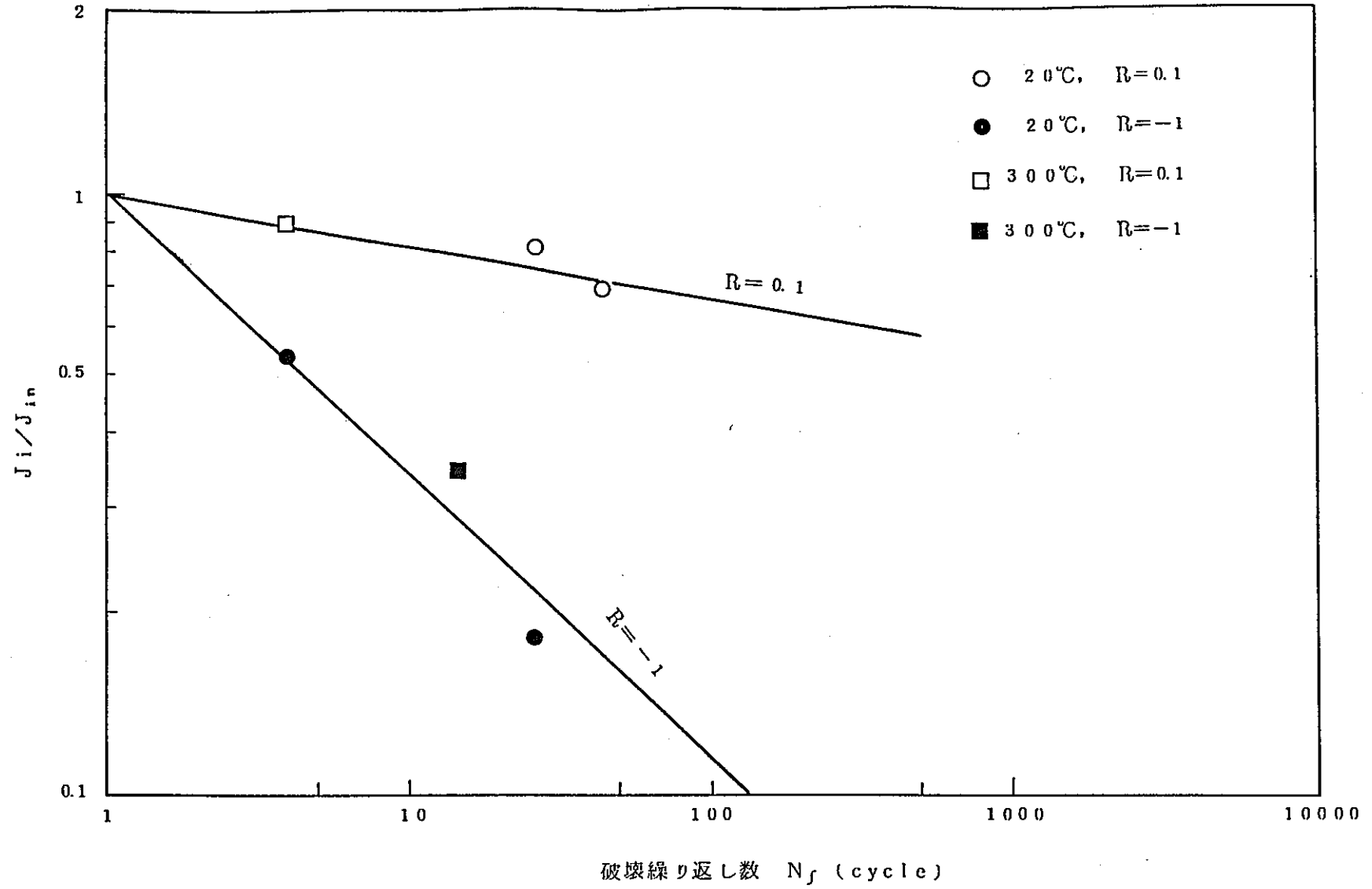


図 2-70 SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験で得られた負荷の大きさと破壊繰返し数の関係

表 2-17 SUS316NG破壊靱性試験条件マトリックス

材 料	環 境	破壊靱性試験	極低サイクル荷重試験		試験数合計
			応力比：R		
			0.1	- 1	
母 材	室温大気中	6	2	2	10
	高温大気中 (300℃)	6	1	1	8
溶着金属	室温大気中	8	-	-	8



表 2-18 SUS316NGの破壊靱性試験結果

No	試験温度 T (°C)	試験片厚さ B (mm)	試験片幅 W (mm)	初期き裂長さ $a_0$ (mm)	リガメント幅 $b_0 = W - a_0$ (mm)	き裂進展量 $\Delta a_{max}$ (mm)	P-V曲線下の面積 A (kgf・mm)	J 積分値 J (kgf/mm)	備 考
1	20	3.01	20.02	12.166	7.854	0.592	1233.5	115.2	・母材より試験片を採取
2		3.01	20.01	12.388	7.622	0.271	558.0	53.6	
3		3.00	20.00	12.324	7.676	0.395	807.0	77.2	
4		2.99	20.02	12.441	7.579	0.954	1310.0	127.2	
5		2.99	20.01	12.482	7.528	0.515	1067.5	104.3	
6		3.00	20.02	12.424	7.596	1.521	1441.5	139.2	
7	300	2.97	19.98	11.853	8.127	0.782	886.5	81.2	・母材より試験片を採取
8		3.00	20.01	12.030	7.980	0.327	551.0	51.0	
9		2.99	19.99	11.916	8.074	0.292	431.0	39.5	
10		2.98	20.00	12.015	7.985	0.144	252.5	23.5	
11		2.99	19.98	12.069	7.911	1.678	1111.0	103.6	
12		2.99	19.99	11.900	8.090	1.504	989.0	90.7	
W1	20	3.00	19.96	12.111	7.849	1.047	803.0	75.3	・溶接部より試験片を採取 ・初期き裂は溶着金属部に付与
W2		3.01	19.99	12.924	7.066	0.609	560.0	57.6	
W3		2.97	19.98	11.946	8.034	0.106	129.0	13.6	
W4		3.00	20.01	12.112	7.898	0.216	349.5	32.6	
W5		2.99	19.98	12.172	7.808	0.482	460.5	43.6	
W6		2.99	19.91	12.142	7.768	0.561	535.5	50.9	
W7		2.99	19.92	11.683	8.237	0.181	298.5	26.9	
W8		2.97	19.99	12.114	7.876	0.322	379.0	36.2	

表 2-19 SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験片の寸法測定結果

材 料	No	試験片厚さ B (mm)	試験片幅 W (mm)	初期き裂長さ $a_0$ (mm)	リガメント幅 $b_0 = W - a_0$ (mm)
・ 50A 管材 (母材) ・ 試験採取方 位: L-C	13	3.02	20.03	12.259	7.771
	14	3.01	20.07	12.489	7.581
	15	2.99	20.05	12.360	7.690
	16	3.02	20.07	12.352	7.718
	17	3.01	20.02	12.308	7.712
	18	3.03	20.08	12.057	8.023

表 2-20 SUS316NG母材の極低サイクル荷重試験結果  
(母材, 試験温度: 20℃)

No	試験温度 T (℃)	応力比 R	繰返し荷重 P (kgf)	破壊回数 $N_f$ (cycle)	初期J積分値* $J_i$ (kgf/mm)	** $J_i / J_{in}$
13	20	0.1	20↔212	44	77.5	0.686
14			21↔209	27	91.7	0.812
15		-1	-150↔153	26	20.3	0.180
16			-191↔193	4	60.7	0.537
17	300	0.1	16↔150	4	65.4	0.896
18		-1	-124↔124	15	25.1	0.344

\* 初期J積分値  $J_i$  は、第1回目の荷重負荷時の最大荷重点までの荷重-荷重線変位曲線の面積より求めたJ積分値である。

\*\*  $J_{in}$  値は、20℃で113kgf/mm, 300℃で73kgf/mmを使用した。

## 2.3 静荷重き裂進展試験

### 2.3.1 概 要

入口管に静荷重が作用した時のき裂進展挙動（き裂発生，き裂進展等）を調べる目的で，90°貫通き裂を有するSUS316NG・50ASch80配管を供試体とした四点曲げ試験を実施し，き裂進展量，荷重，変位量等を測定した。同時に，き裂進展量とポテンシャル出力との関係を求めるため，DC及びACポテンシャル法により，各点におけるポテンシャル電位を測定した。

### 2.3.2 試験方法

試験は，図2-71に示す体系により，供試体に曲げを加え，中央スリット端部より，周方向にき裂を進展させた。また，2体の供試体のうち，1体については，き裂進展量のデータを採取することを目的とし，残り1体については，き裂進展開始時の確認を主体とした。

### 2.3.3 試験装置及び測定方法

試験に使用した試験機は，インストロン型の電子式万能試験機（米倉製作所製，容量10tonf）である。測定項目，ポテンシャル測定条件をそれぞれ，表2-21，22に，測定系の系統図，測定位置をそれぞれ図2-72，73(1)，(2)に示す。

また，開口変位を測定するクリップゲージの取り付け状況を図2-74に示す。

同図中，電気絶縁体とあるのは，クリップゲージ本体を通して，ポテンシャル電流がブリッジしないように，供試体，クリップゲージ間を電気絶縁したものである。

### 2.3.4 試験配管

本試験では，実証炉入口管と同一仕様の材料組成，口径・肉厚で製作した配管を用いた。

#### (1) 配管形状

本試験に用いた供試体の形状・寸法を図2-75に示す。

#### (2) 材料の化学組成

供試体に用いたSUS316NG材の化学組成を表2-23に示す。

#### (3) 機械的性質

供試体に用いたSUS316NG材の機械的性質を表2-24に示す。

#### (4) 放電加工及び予き裂導入

各供試体とも、放電加工により配管の周方向に貫通切欠きを設けた。放電加工による切欠き寸法・形状を図2-75に示す。

また、予き裂導入条件等を図2-76に示す。

#### 2.3.5 試験条件

試験は、室温（18℃）下で、また、2体共に同一の支持スパン条件で実施した。この支持スパン体系を図2-71に示す。

また、試験状況（試験前）を図2-77に示す。

#### 2.3.6 試験結果

室温（18℃）下での四点曲げ試験供試体TP-1, 2の測定結果を表2-25~28に示す。また、各供試体の試験後の破面観察結果を図2-78, 79に示す。両供試体共、き裂両端（A面, C面）の破面は全く同じ形態を示していることがわかる。TP-2は外面より観察し、き裂の進展が開始したと思われる点で試験を終了させたが、それに至るまでのTP-1とTP-2の試験経過の差は、特に認められなかった。

荷重に対する荷重点変位の関係を図2-80, 81, 供試体の各変位量の関係を図2-82~84に、また、ひずみとの関係を図2-85に示す。

両供試体のそれぞれの関係はよく一致しており、TP-1, TP-2の試験はほぼ同一の条件で、実施されたものと判断できる。

供試体TP-2は、TP-1の結果を参考にしながら、外面観察上でのき裂発生点にて試験を終らさせ、き裂発生部の破面を観察した。その破面観察結果、図2-79に示すように、A面, C面共にき裂の発生は認められなかった。ただし、マクロ写真（×10倍）において、外表面での疲労予き裂部と進展部との境界に絞られた部分が観察でき、この部分を見て、き裂が入った（進展した）と判断していたことがわかる。

供試体TP-1における試験後のき裂破面図2-78より、き裂は疲労予き裂先端部よりしぼられながら進展し、ある程度以上進展すればその絞りは一定となって進展しているのがうかがえる。また、内部でのき裂形態は円弧状に広がって進展している。

荷重とき裂進展量（A面, C面の合計）の関係を図2-86に示す。荷重とき裂進展量との関係は全体的に見ると直線関係にはないが、最大荷重点におけるき裂進展量の

2倍のところからは、直線関係にあることがうかがえる。

開口変位量とポテンシャル出力との関係をDC法に対し図2-87~90に、AC法に対し図2-91, 92に示す。AC法, DC法共に、開口度が増すにつれ、ポテンシャル出力は比例的に増加するが開口変位が5.2~5.3mmから、その直線性が失われてくる。さらに、最大荷重点を越えて開口度が増してくると、まだ直線関係となることが分る。

AC法, DC法におけるき裂進展量とポテンシャル出力の関係を図2-93~96に示す。全体的に見ると、両者の関係は良い直線関係で表現されている。特に、いずれの測定点においても、最大荷重点を越える領域から非常に良い直線関係を示す。

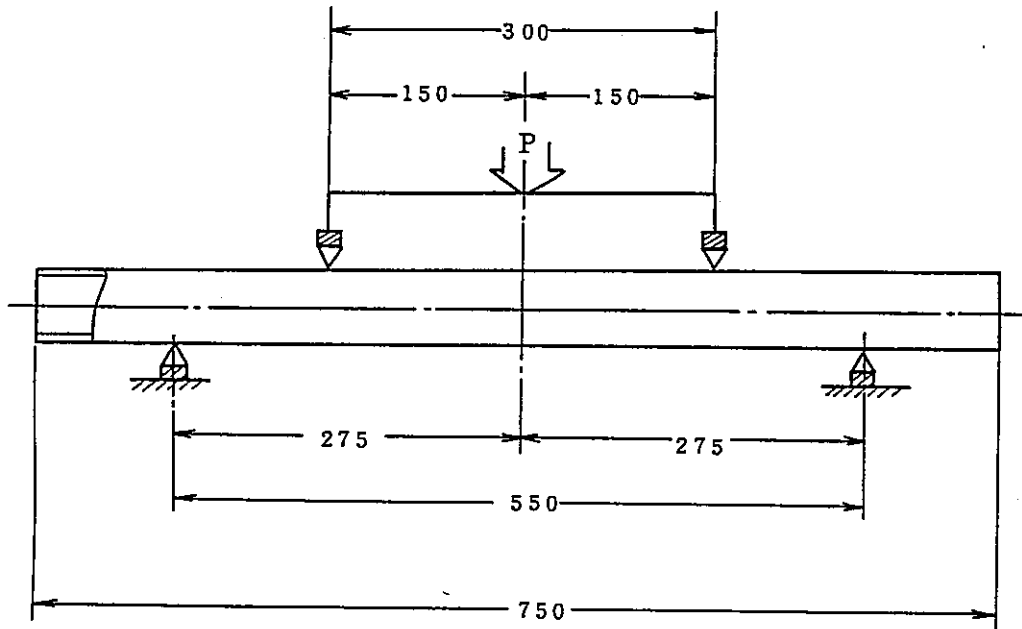
また、試験途中での供試体切欠き先端の状況を図2-97~100に示す。

### 2.3.7 まとめ

- (1) 外面からの顕微鏡等によるき裂面の観察では、鈍化とき裂発生点との区別はつかない。
- (2) 外面観察上でのき裂発生点は、き裂先端の鈍化領域である。真のき裂発生点はそれ以上の荷重点に存在する。
- (3) き裂進展する際、その先端部は絞られる。この絞り量が一定になる点より以降、荷重-き裂進展量の関係は直線性が認められる。
- (4) ポテンシャル出力は、き裂情報を良く表し、き裂進展量に対し、比例的に出力される。また、AC法, DC法共にほぼ同等の特性を示す。
- (5) DCポテンシャル出力と開口変位の関係は、図2-101に示すように直線域を示す領域が2箇所存在する。直線域1は無負荷時から始まり、外面観察上でのき裂発生点(鈍化領域である)を経てポテンシャル特性の変極点まで、直線域2は、き裂進展する際の絞り量が一定になる点より始まる。また、2直線を延長した交点は、最大荷重点付近に存在する。なお、ACポテンシャル法では、直線域2の開始点が最大荷重点側に近づく特性となるが、その他の特性上の差は認められない。
- (6) (5)において直線域1は、無負荷時より開始し、また外面観察上でのき裂発生点(鈍化領域を示す)はこの直線上にある。この直線を鈍化曲線と考えれば、ポテンシャル特性の変極点が、き裂発生点であると考えられる。
- (7) (5)における直線域では内部き裂が円弧状に広がり、安定した状態でき裂進展する

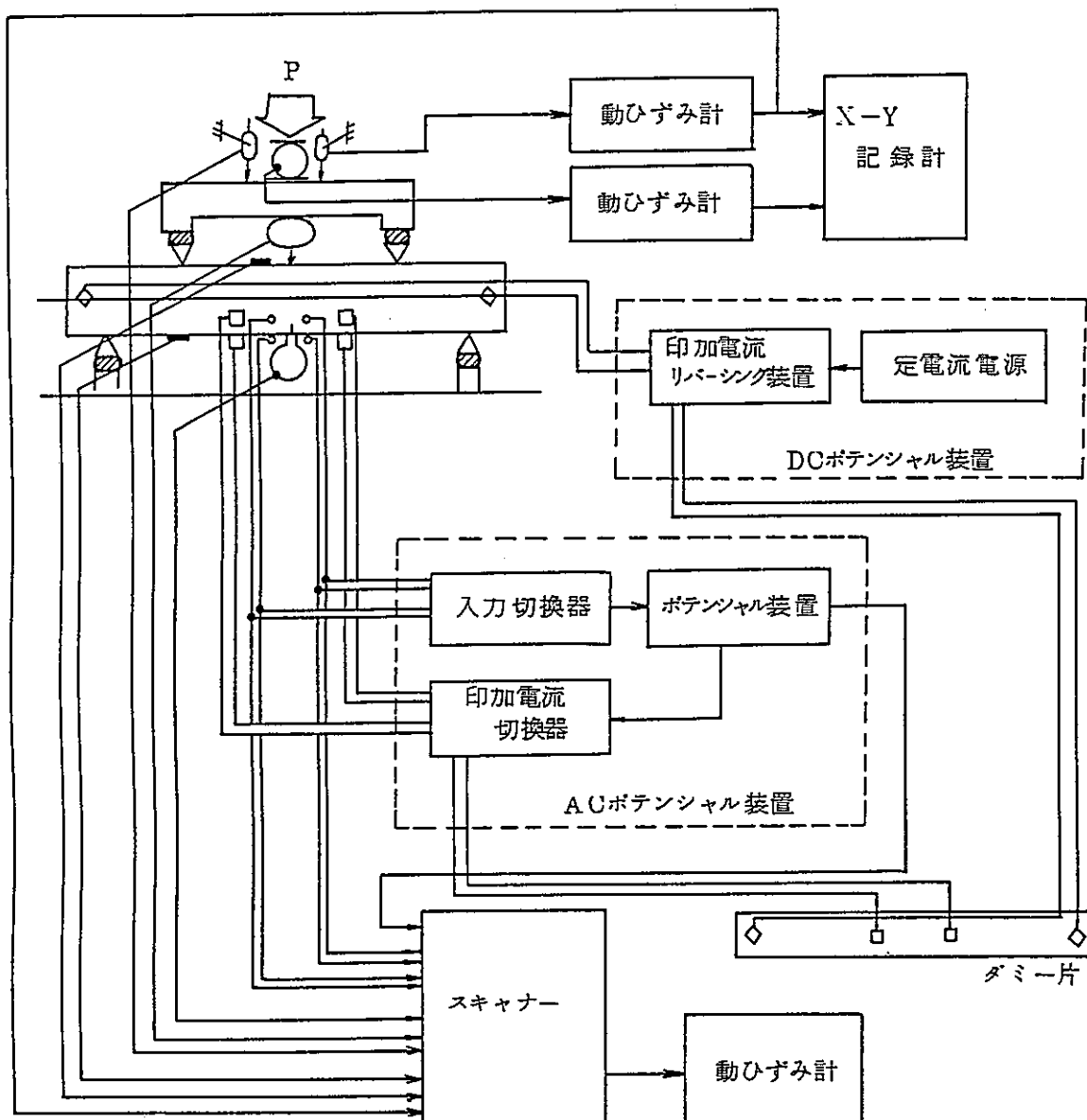
ものと考えられる。

- (8) き裂進展部は、図2-78に示すように絞られている。弾塑性解析によってもここまでの変形をフォローするのは困難と考えられるため、J積分値解析結果の評価に際しては、断面変形に留意する必要がある。



▨: 電気絶縁材 (ベークライト板  $10^4$ )

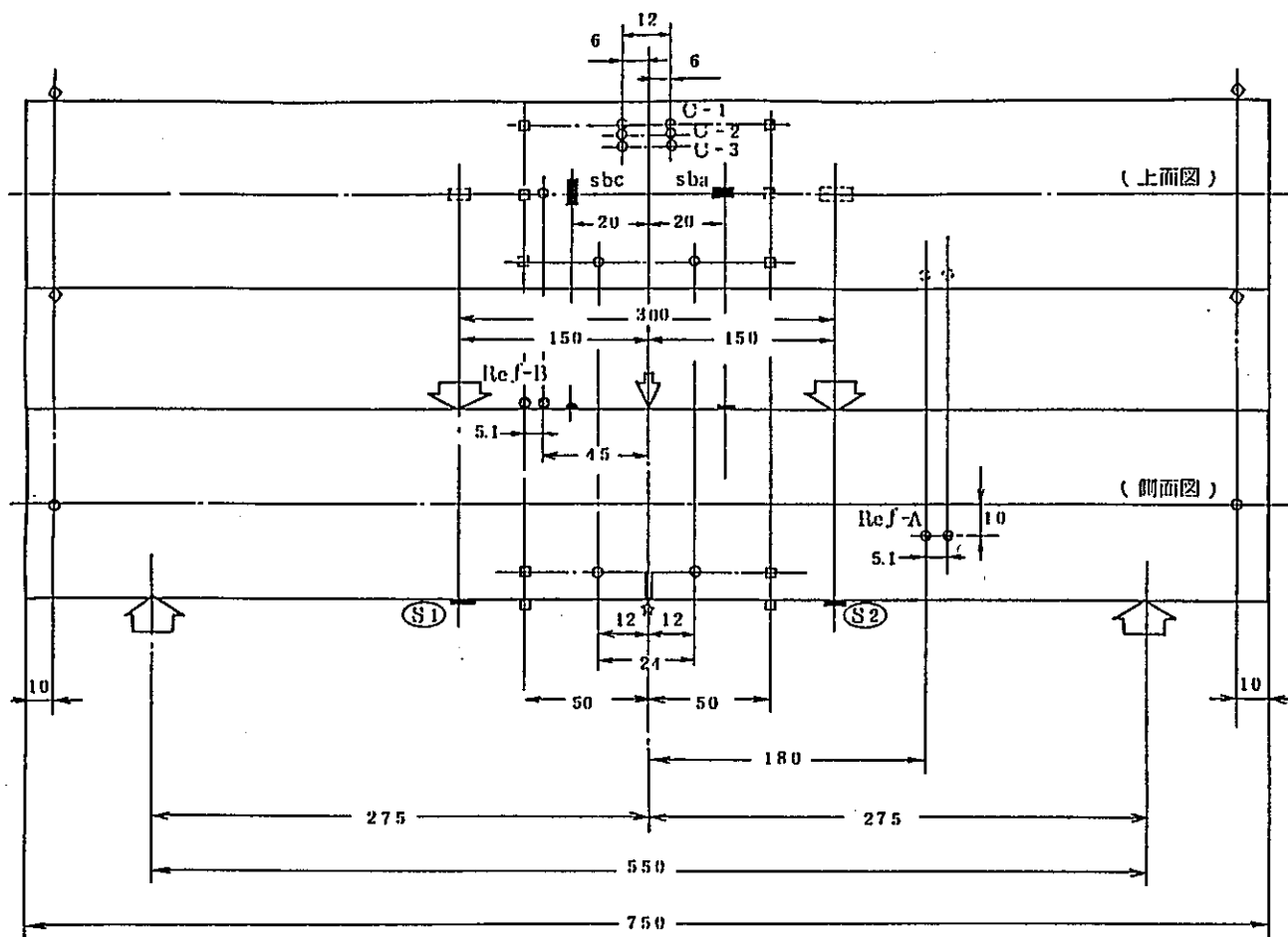
図 2 - 71 四点曲げ試験体系図



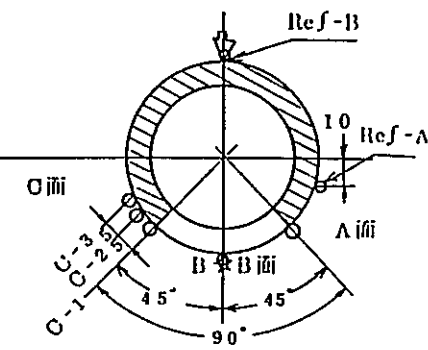
- : ロードセル (荷重計)
- : 棒状変位計 (荷重点変位)
- : 変位計 (中央部変位)
- = : クリップゲージ (開口変位)
- : ひずみゲージ
- : ポテンシャル センシング リード位置
- : ACポテンシャル給電位置
- ◇ : DCポテンシャル給電位置
- ∞ : 電気絶縁体

図 2 - 72. 四点曲げ試験測定系の系統図





記号	名称
◇	DCポテンシャル法給電位置
□	AC " "
○	AC/DCポテンシャル法センシング位置
●	DCポテンシャル法 Ref-センシング位置
■	歪ゲージ貼付位置
▽	変位計(中央部変位)位置
☆	クリップ開口変位位置

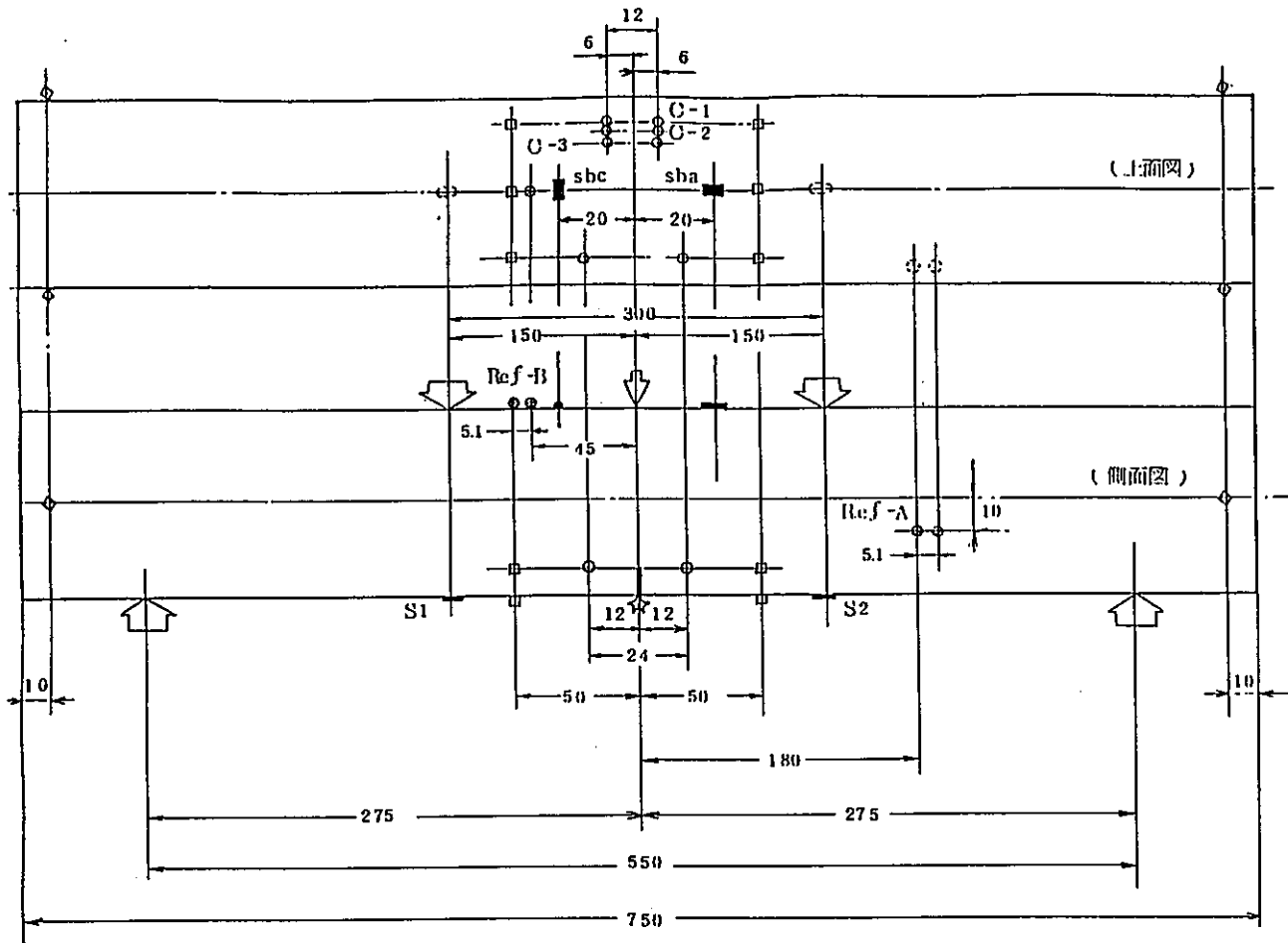


ポテンシャル リードワイヤ間隔(測定値), 測定対象

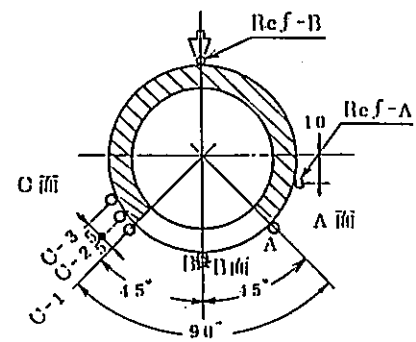
位置	測定間隔 (mm)	DC法	AC法
A	23.9	○	○
B	24.0	○	○
C-1	12.0	○	○
C-2	11.8	○	-
C-3	12.2	○	-
Ref-A	5.2	○	-
Ref-B	5.1	○	-

クリップゲージ取り付け高さ  $H_0 = 2.51 (mm)$

図2-73(1) 四点曲げ試験の測定位置図: (TP-1)



記号	名称
◇	DCポテンシャル法給電位置
□	AC " "
○	AC/IX用ポテンシャル法センシング位置
●	DCポテンシャル法Refセンシング位置
■	直ゲージ貼付位置
▽	変位計(中央部変位)位置
☆	クリップ開口変位位置



ポテンシャル リードワイヤ間隔(測定値), 測定対象

位置	測定間隔(mm)	DC法	AC法
A	2.4.2	○	○
B	2.4.2	○	○
C-1	1.2.0	○	○
C-2	1.1.9	○	-
C-3	1.2.0	○	-
Ref-A	5.2	○	-
Ref-B	5.2	○	-

クリップゲージ取り付け高さ  $H_G = 2.51(\text{mm})$

図 2-73(2) 四点曲げ試験の測定位置図: (TP-2)

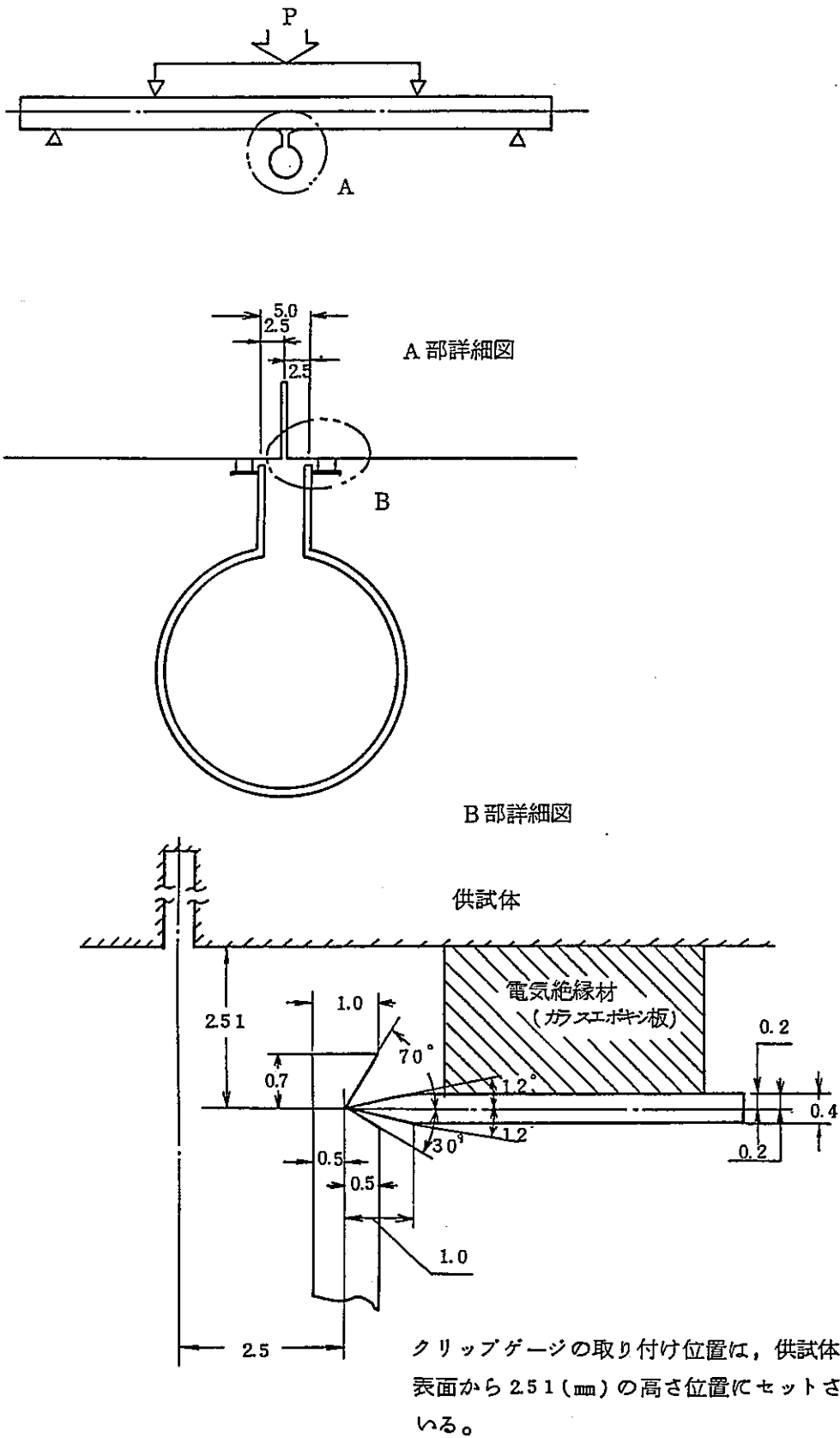
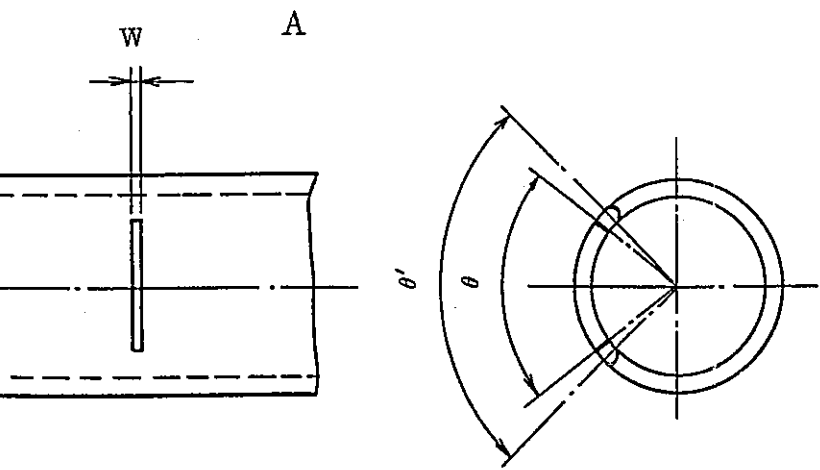
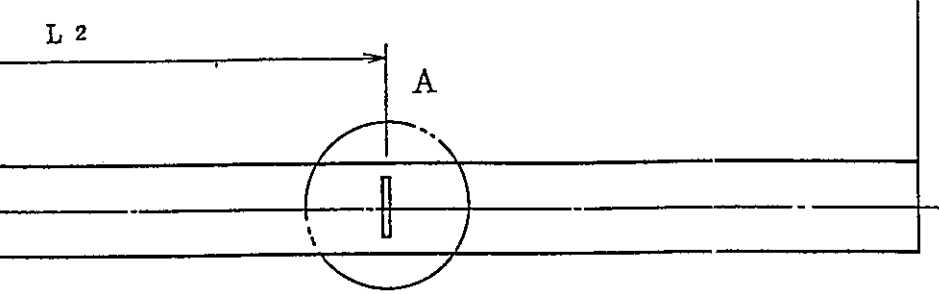


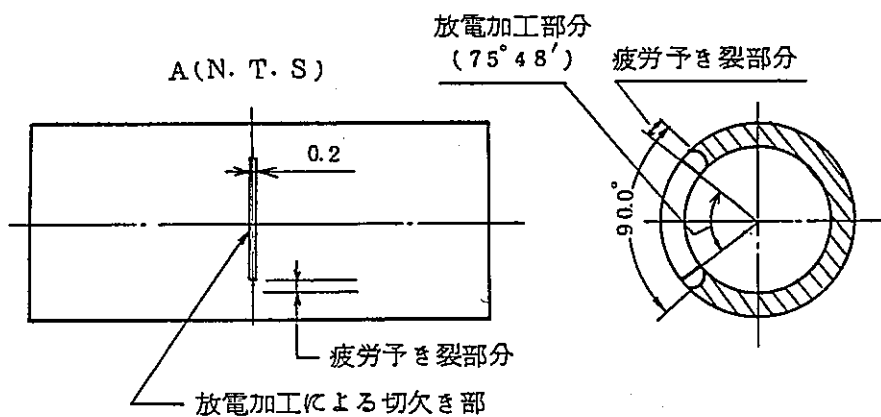
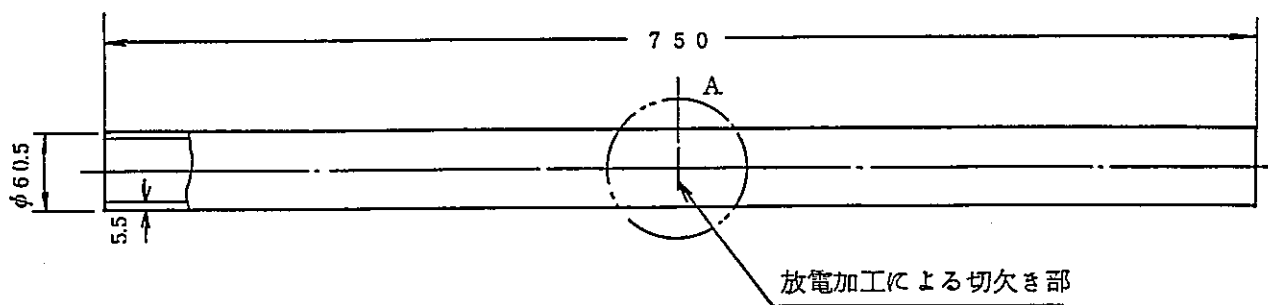
図2-74 四点曲げ試験のクリップゲージ取り付け図



管 No.	$L_1$	$L_2$	D	t	W	$\theta$
TP-1	750	375	$\phi 60.6$	6.2	0.25	$75^\circ$
TP-2	750	375	$\phi 60.6$	6.2	0.28	$75^\circ$

\*:予き

図2-75 四点曲げ試験の供試体寸法



項目	備	考
材 質	SUS316NG	
人 工 欠 陥	円周方向角度 $\theta = 75^\circ 48'$ , スリット巾 $0.2^{+0.15} \text{mm}$ の放電加工後, さらに, $\theta' = 90.0^\circ$ (管外面より見て) まで, 疲労予き裂を導入した。	
疲労予き裂条件	最大荷重を 8.9 (tonf) とし, 最大予き裂荷重を, 最大荷重の 25% 値としたもの 疲労予き裂荷重 = 2,200~220 (kgf) (応力比 0.1) 疲労予き裂周波数 = 1.5 (Hz)	
供 試 体 員 数	2 体 (TP-1, TP-2)	

図 2-76. 四点曲げ試験の供試体について

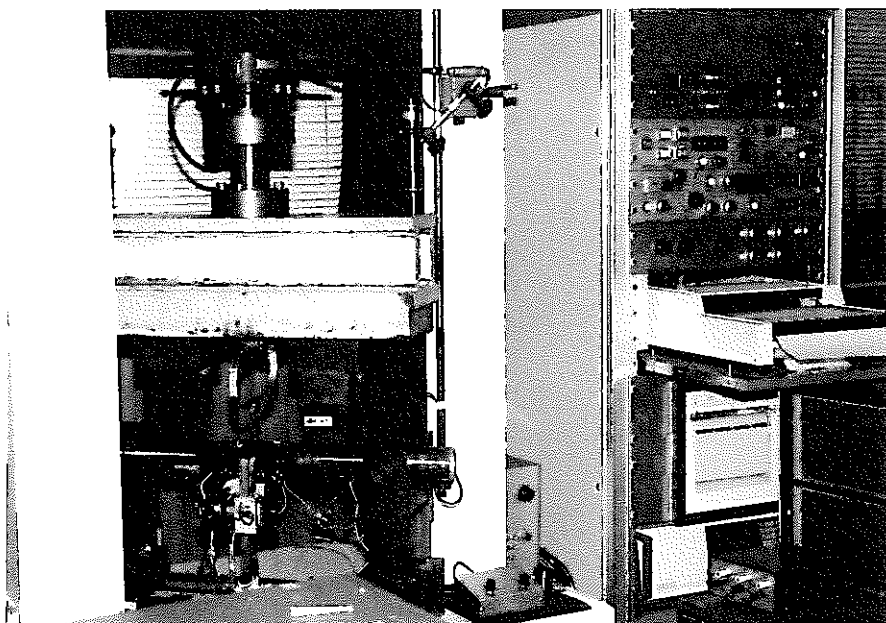
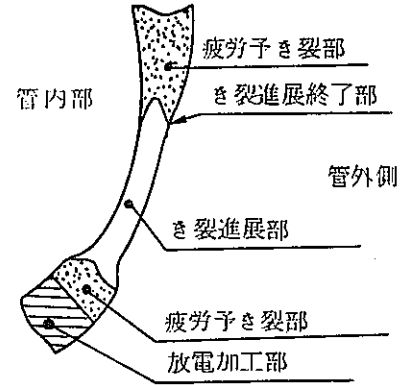
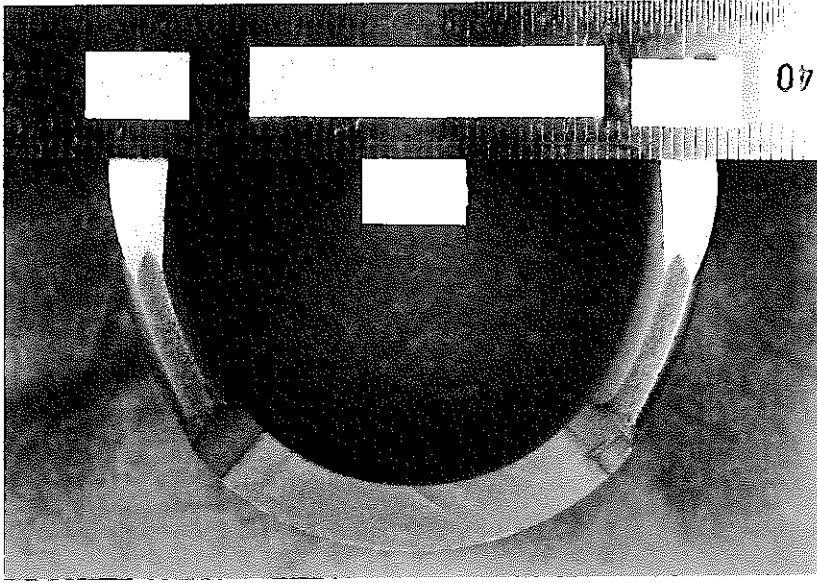
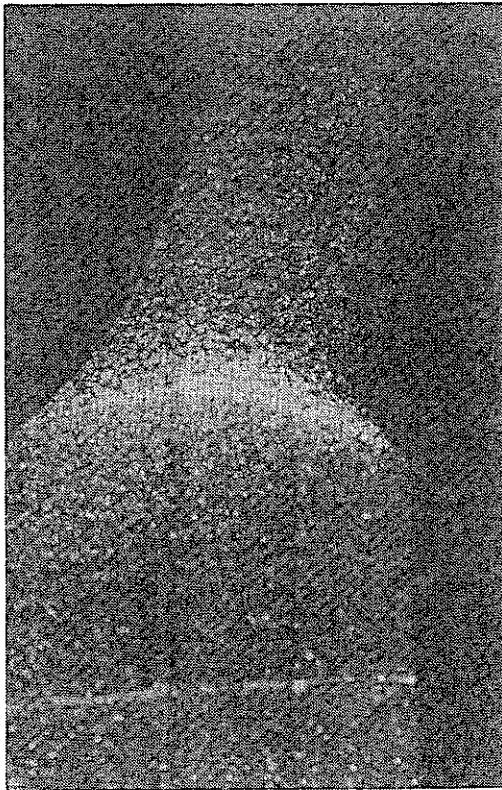


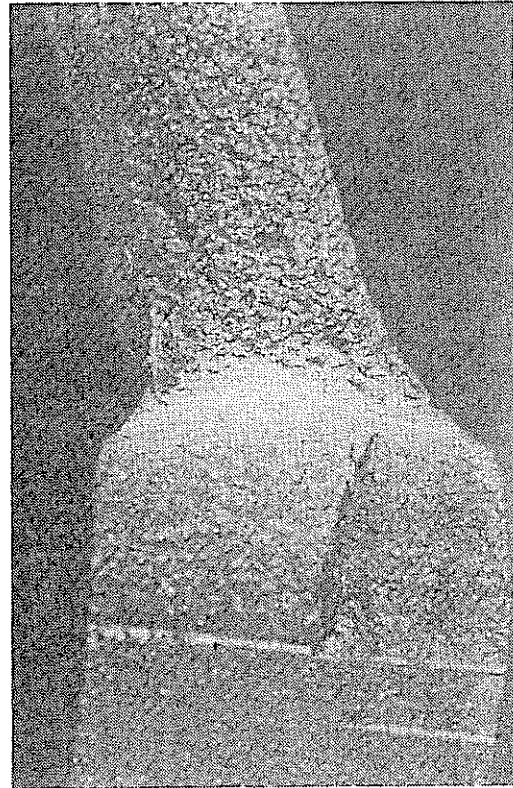
図 2 - 77 四点曲げ試験の試験状況写真 (試験前)



A面き裂長さ  
1 6.47 (mm)  
C面き裂長さ  
1 6.64 (mm)  
トータルき裂長さ  
3 3.11 (mm)

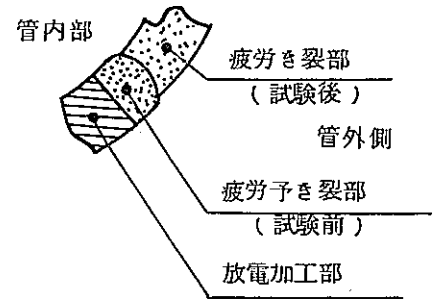
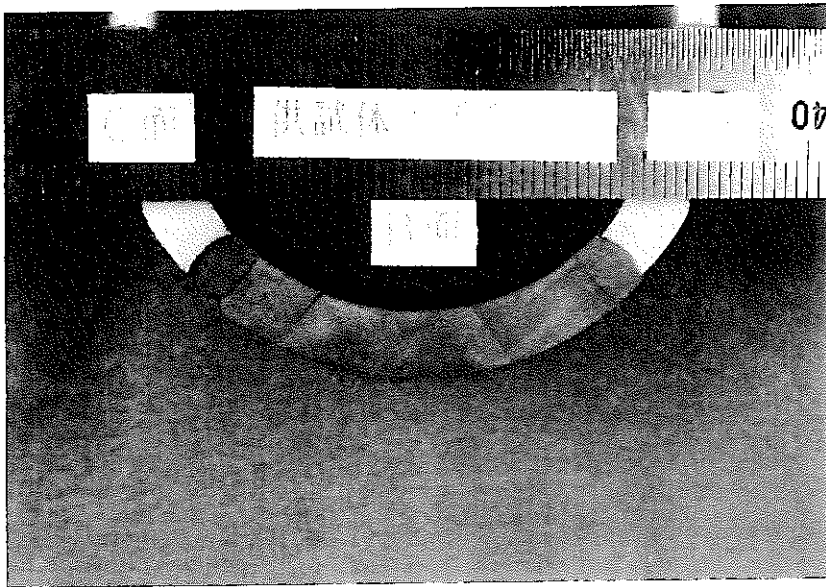


C面側 (×10)

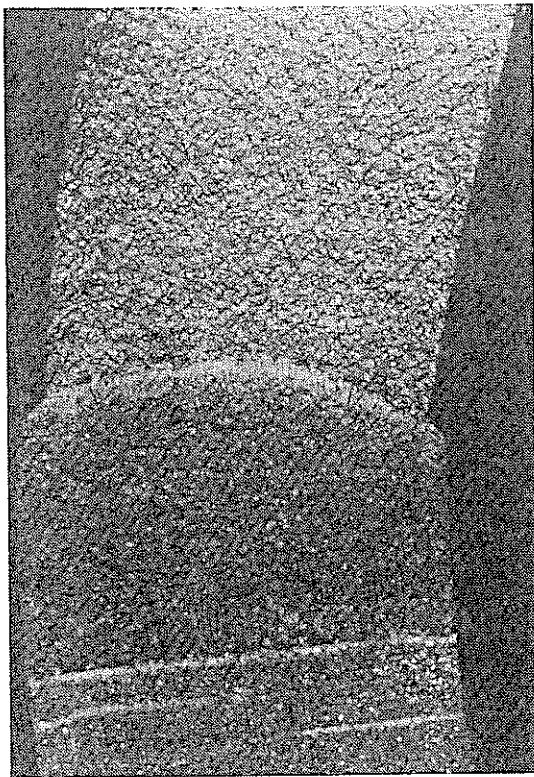


A面側 (×10)

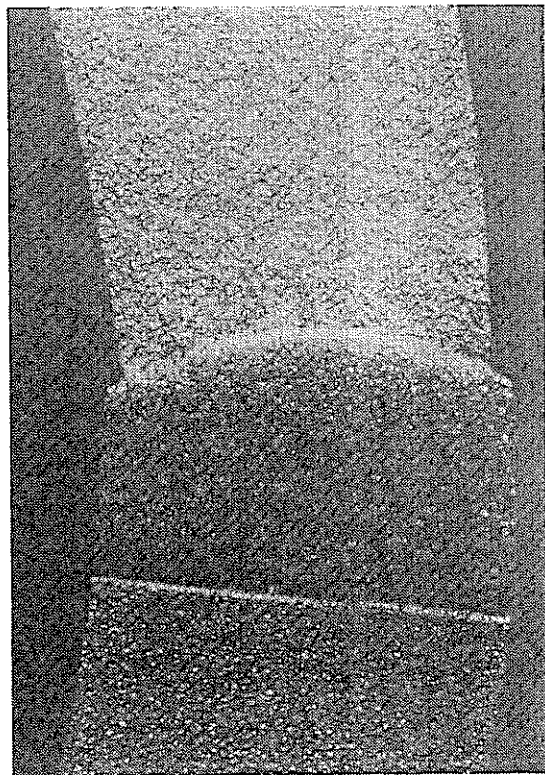
図2-78 四点曲げ試験の破面写真 (TP-1)



A面き裂長さ  
0.28 (mm)  
C面き裂長さ  
0.38 (mm)  
トータルき裂長さ  
0.66 (mm)



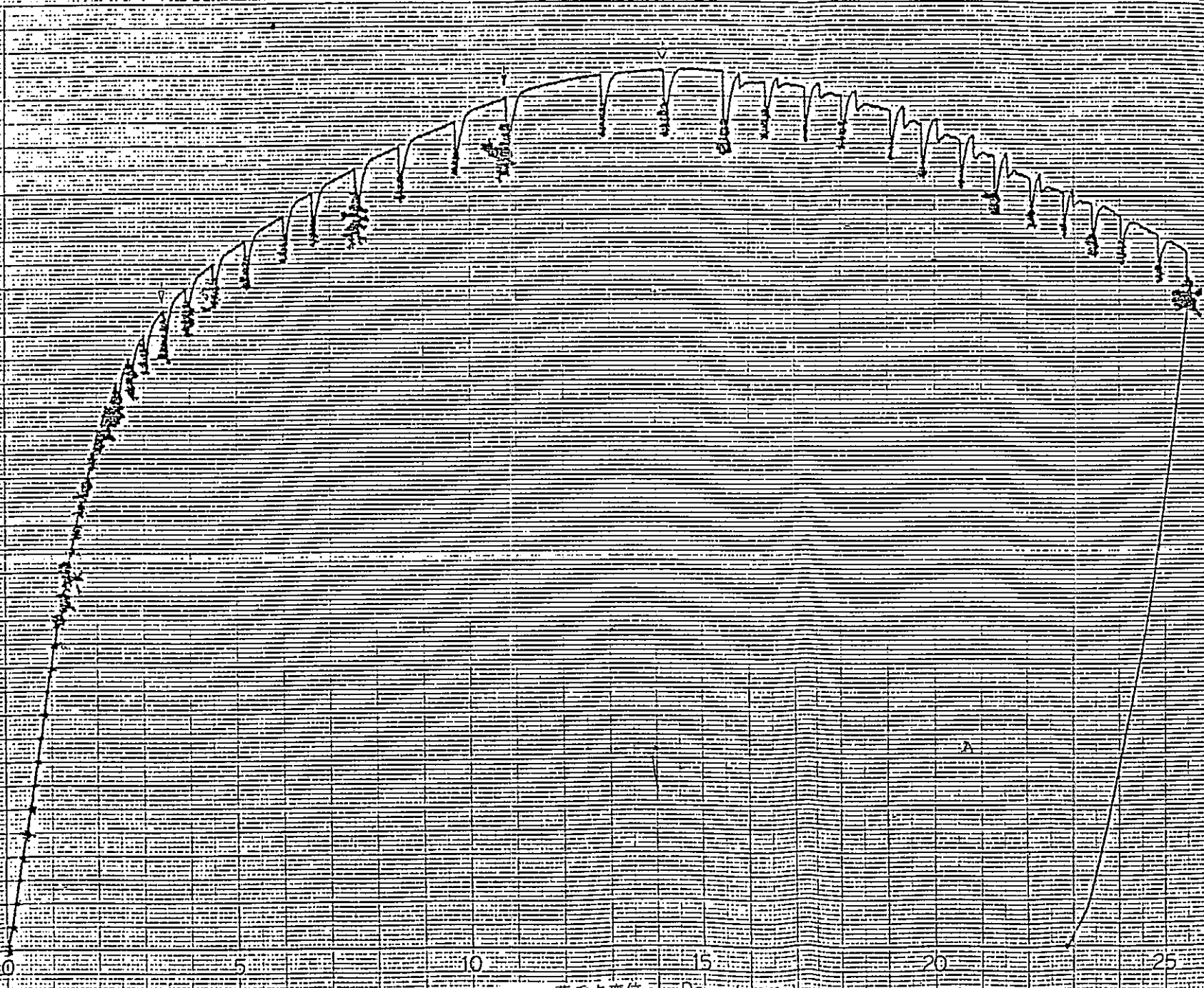
C面側 (×10)



A面側 (×10)

図2-79 四点曲げ試験の破面写真 (TP-2)





- ; Pmax : 最大荷重点
- ; ポテンシャル特性の変
- ; 外面観察上でのき裂発

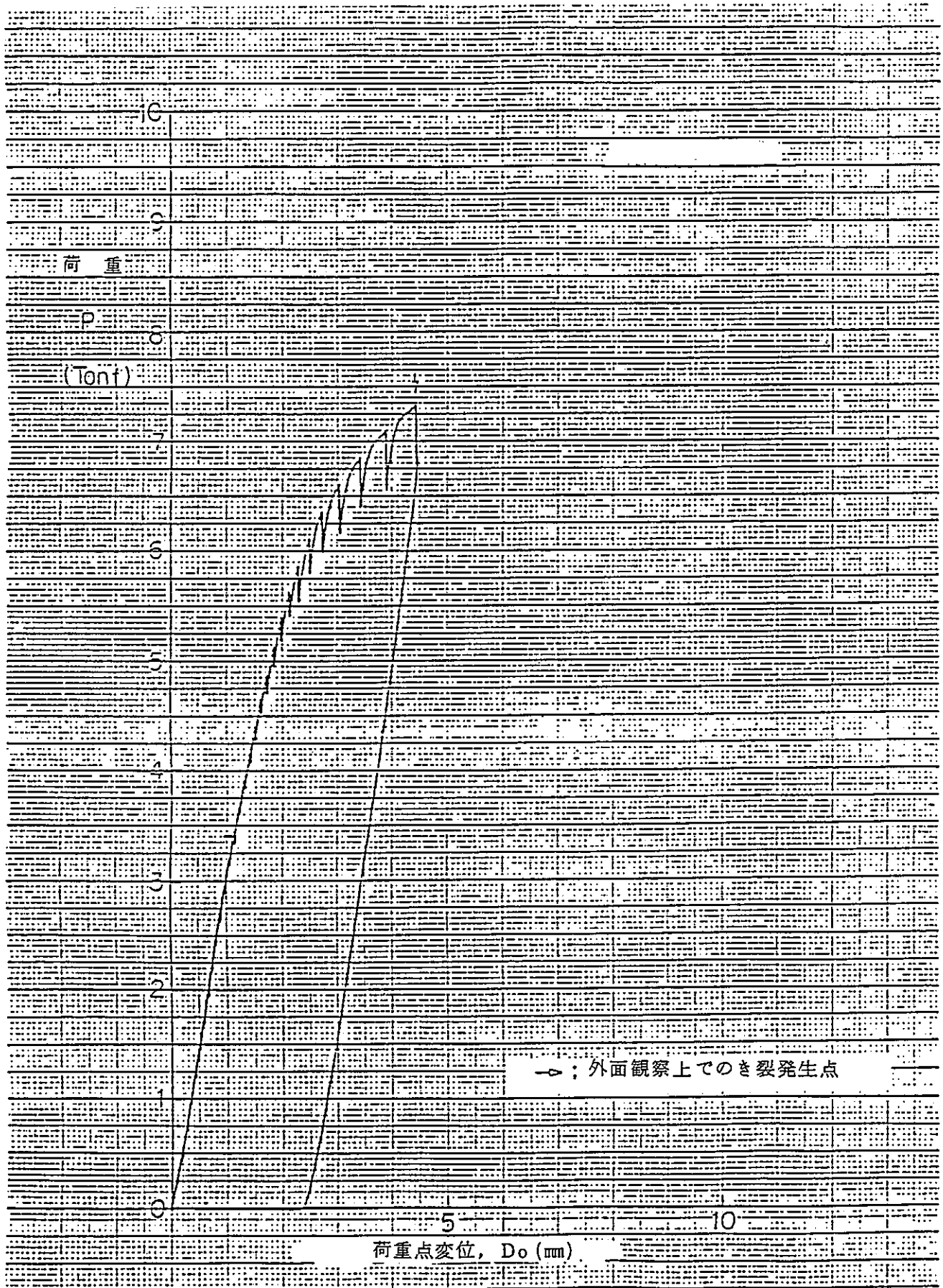


図 2-81 四点曲げ試験の荷重と荷重点変位との関係 (TP-2)

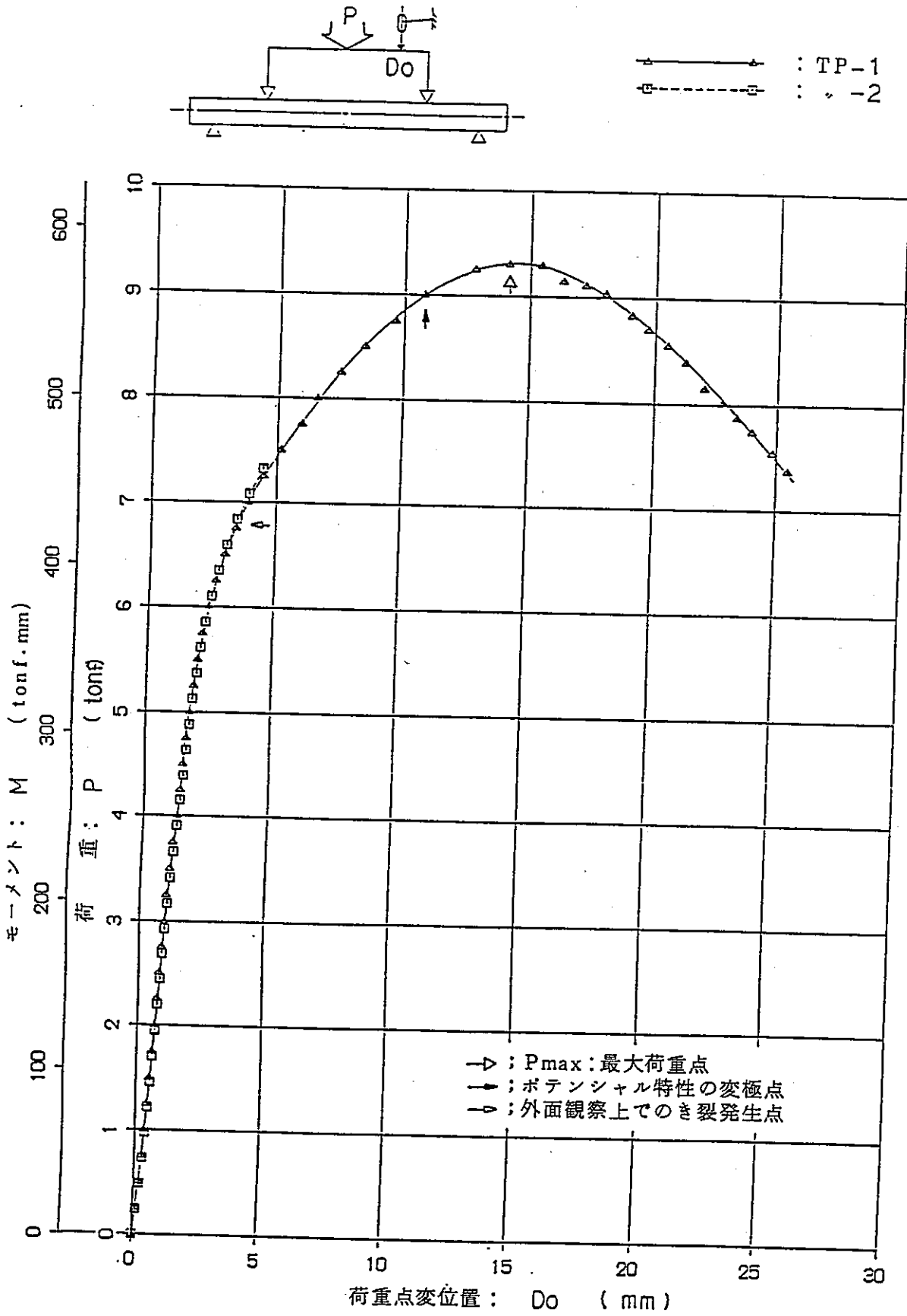


図2-82 四点曲げ試験のモーメント，荷重と荷重点変位置との関係

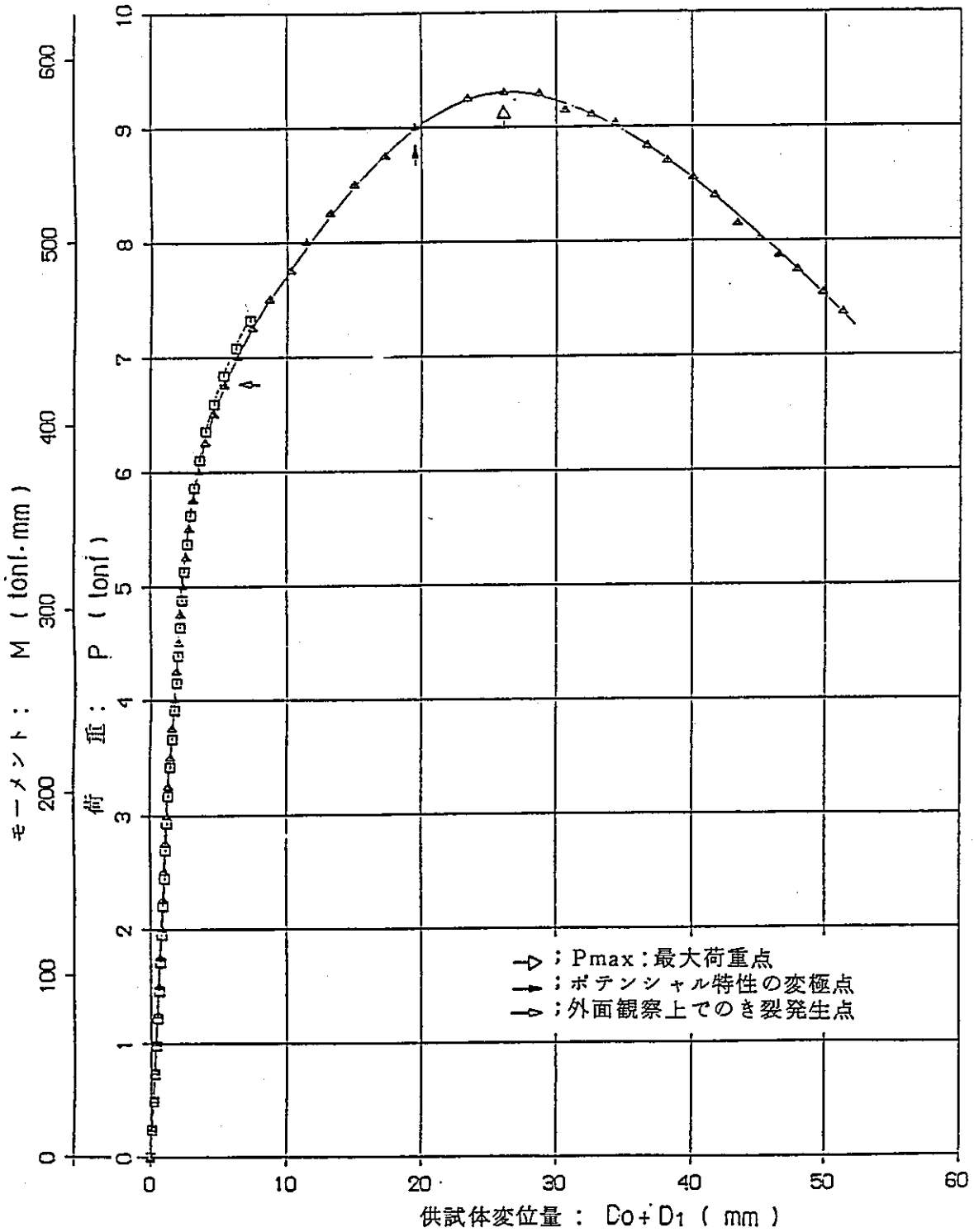
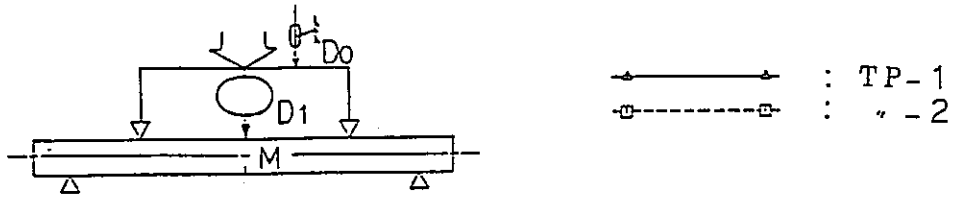


図 2-83 四点曲げ試験のモーメント、荷重と供試体変位量との関係

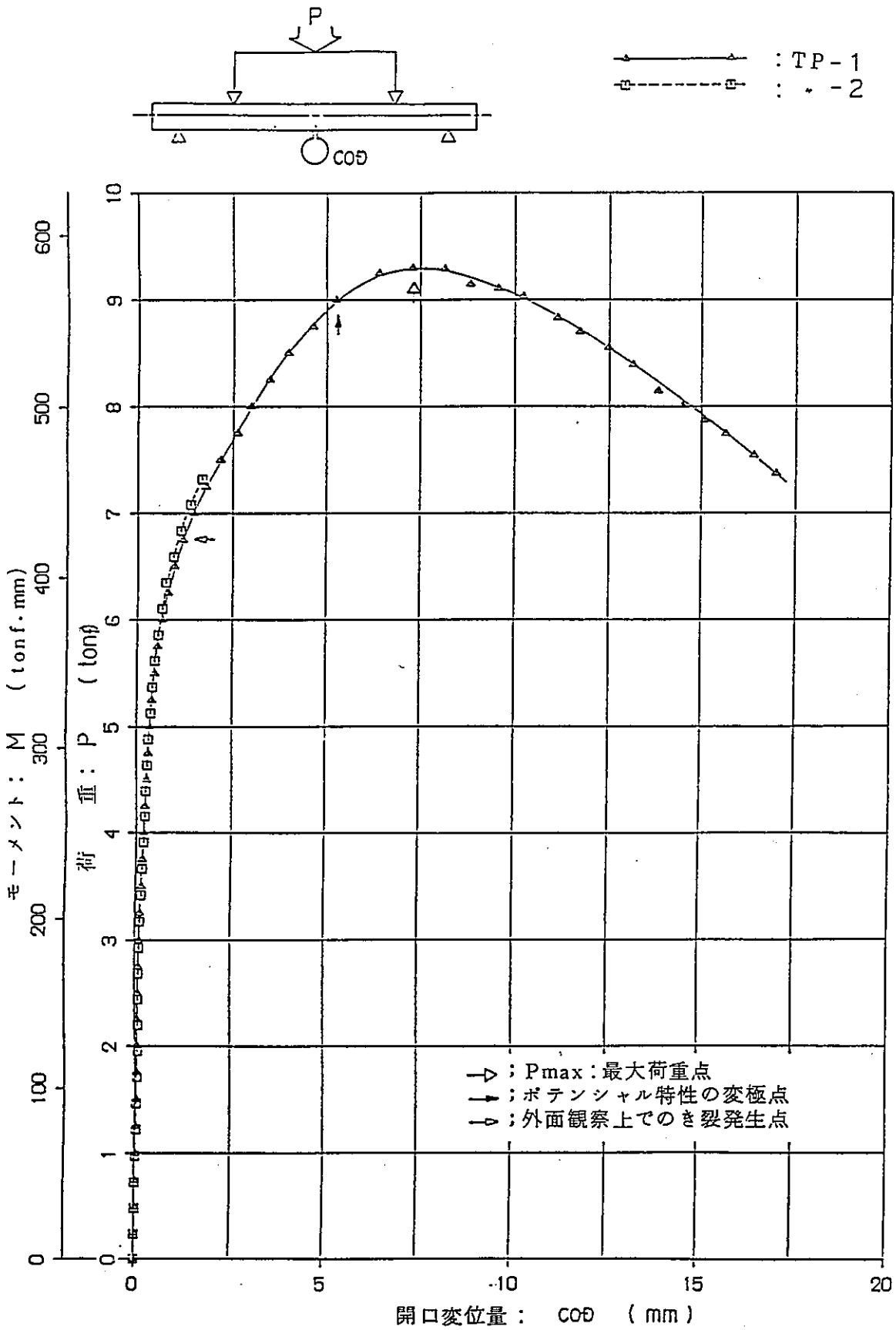


図2-84 四点曲げ試験のモーメント，荷重と開口変位量との関係

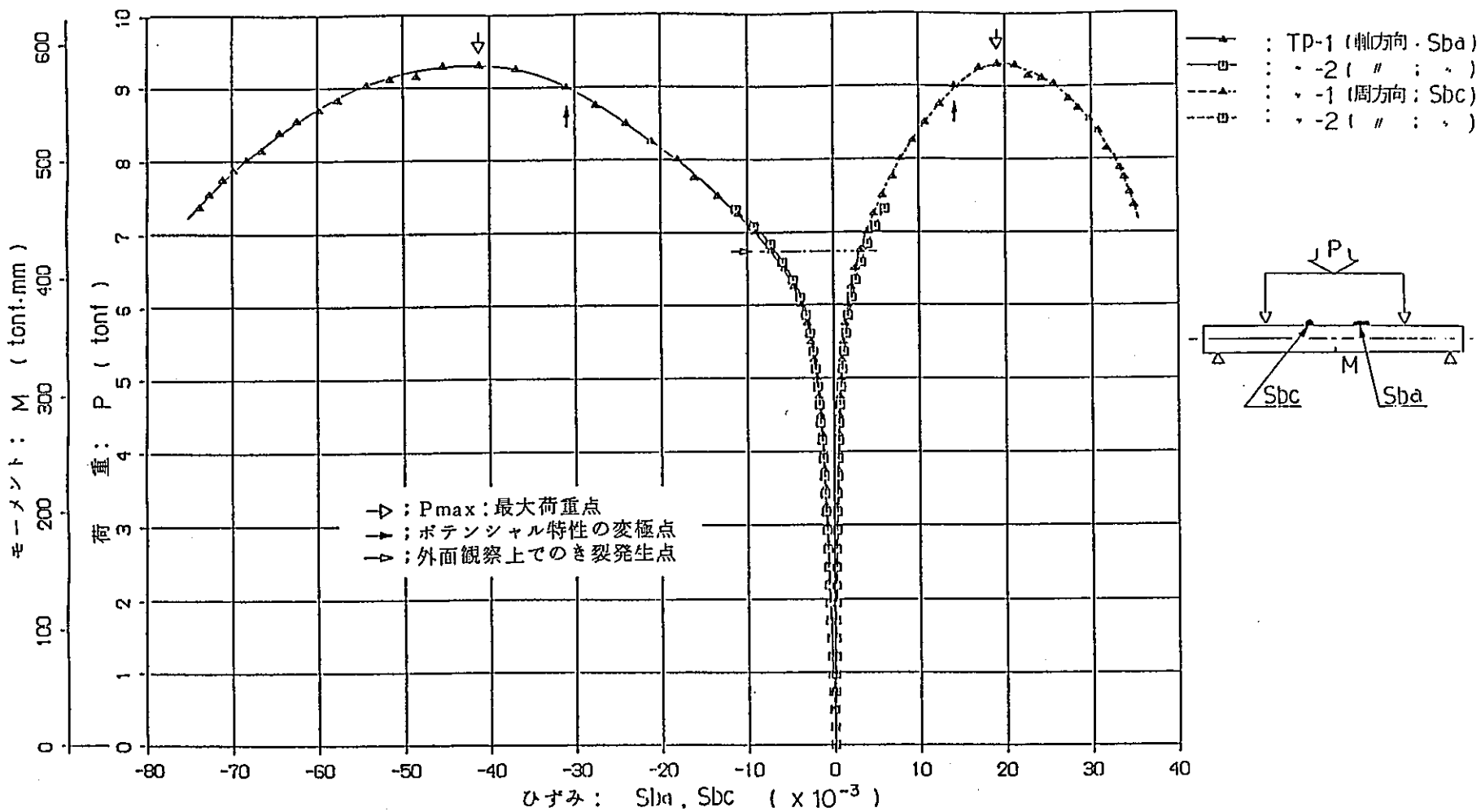


図 2-85 四点曲げ試験のモーメント，荷重とひずみの関係図

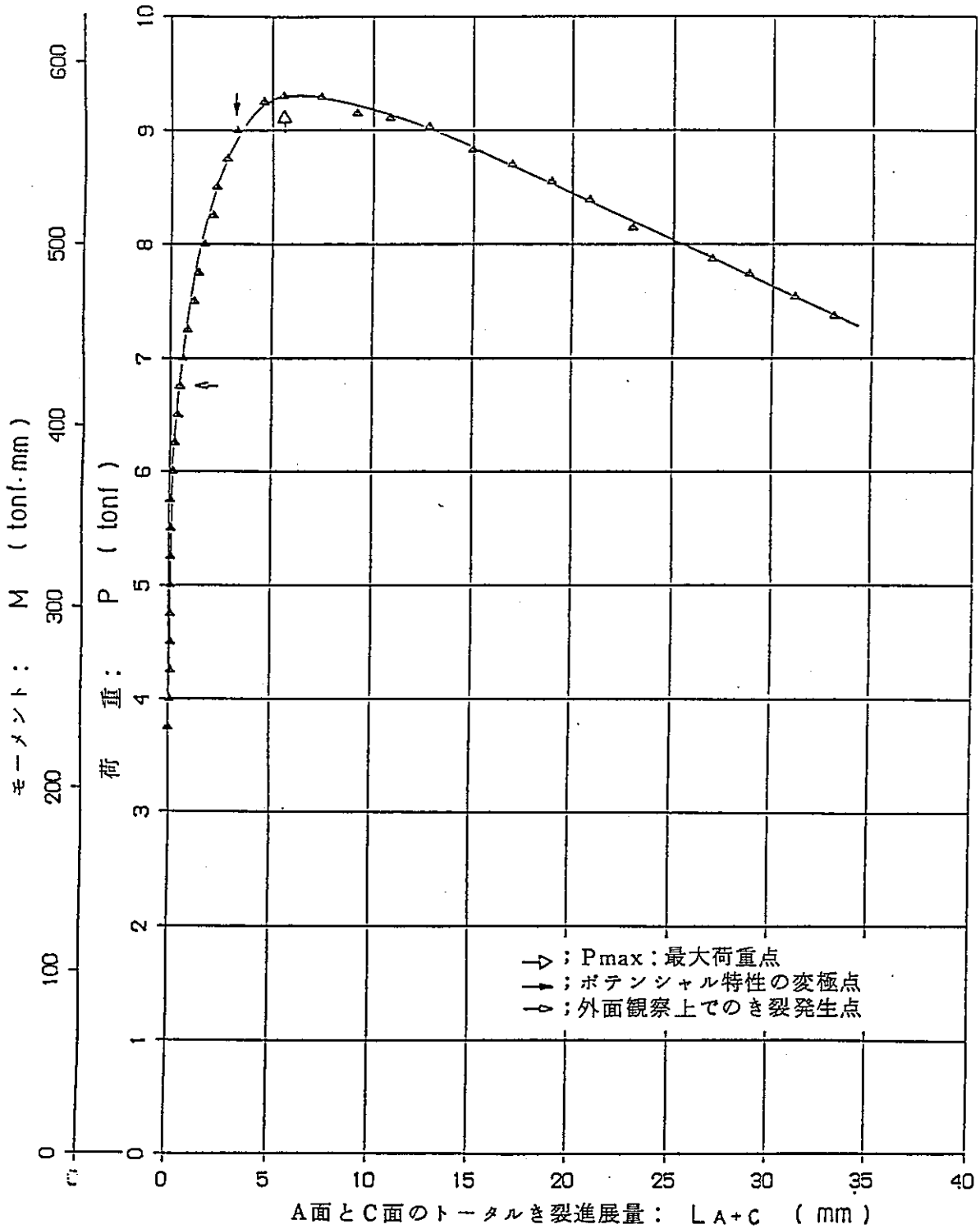
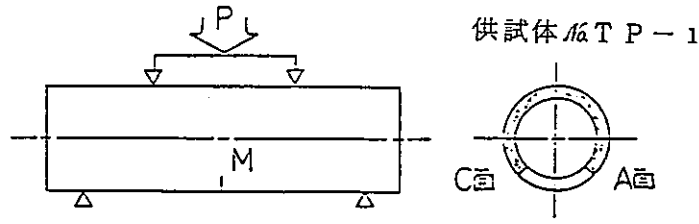


図2-86 四点曲げ試験のモーメント、荷重とA面とC面のトータルき裂進展量との関係

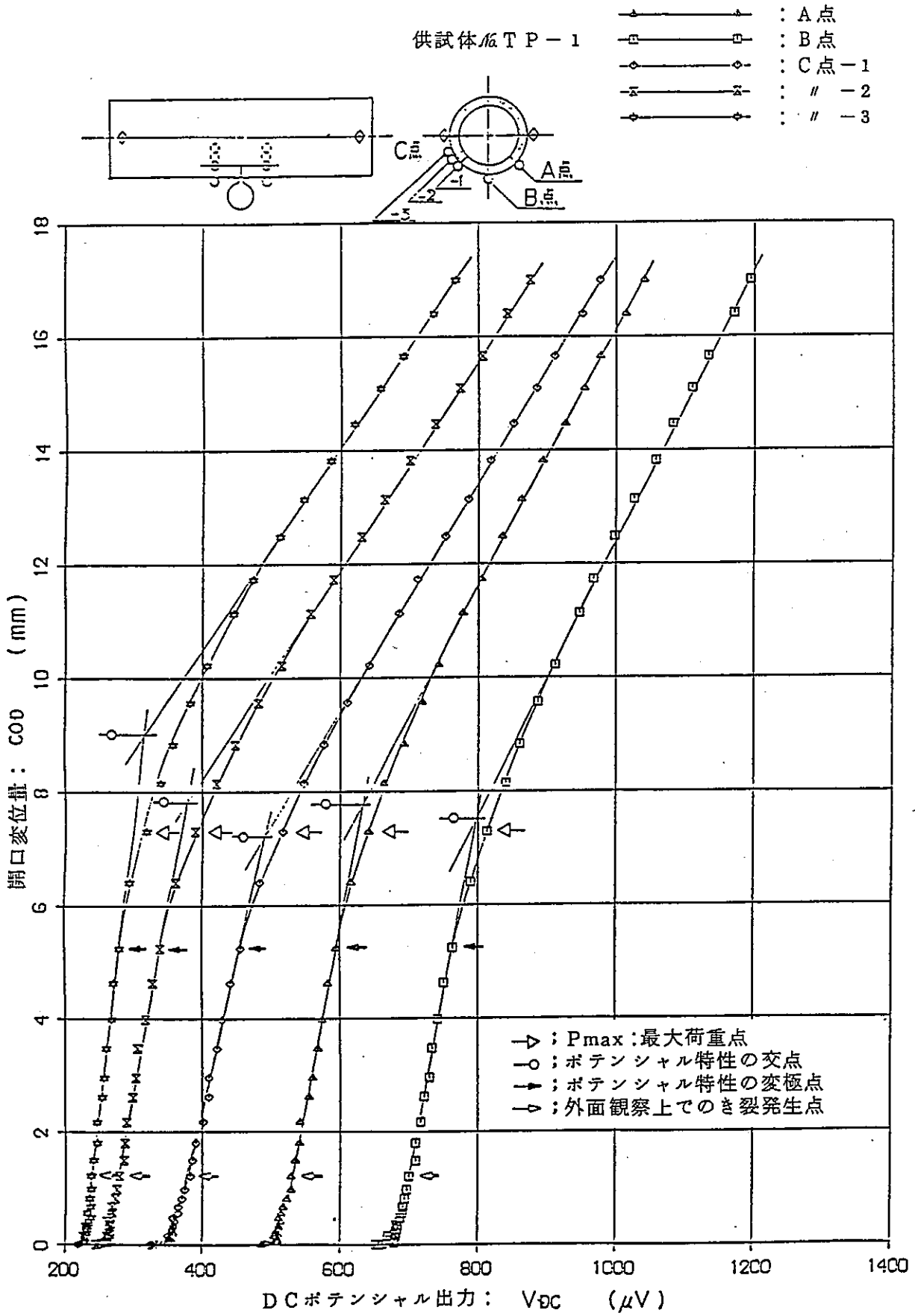


図 2-87 四点曲げ試験の開口変位量と D C ポテンシャル出力との関係



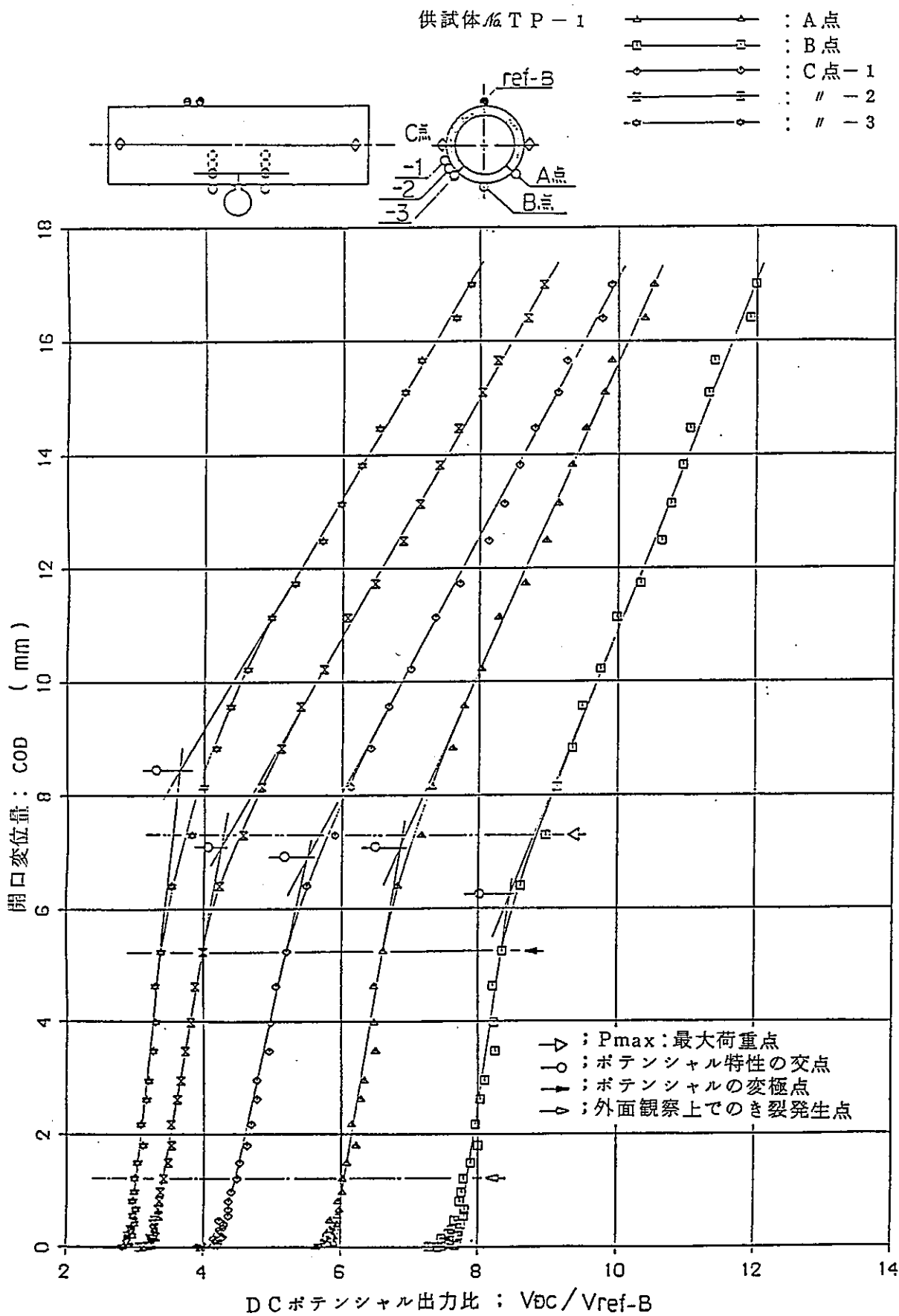


図2-88 四点曲げ試験の開口変位量とDCポテンシャル出力比との関係

供試体 No TP-1

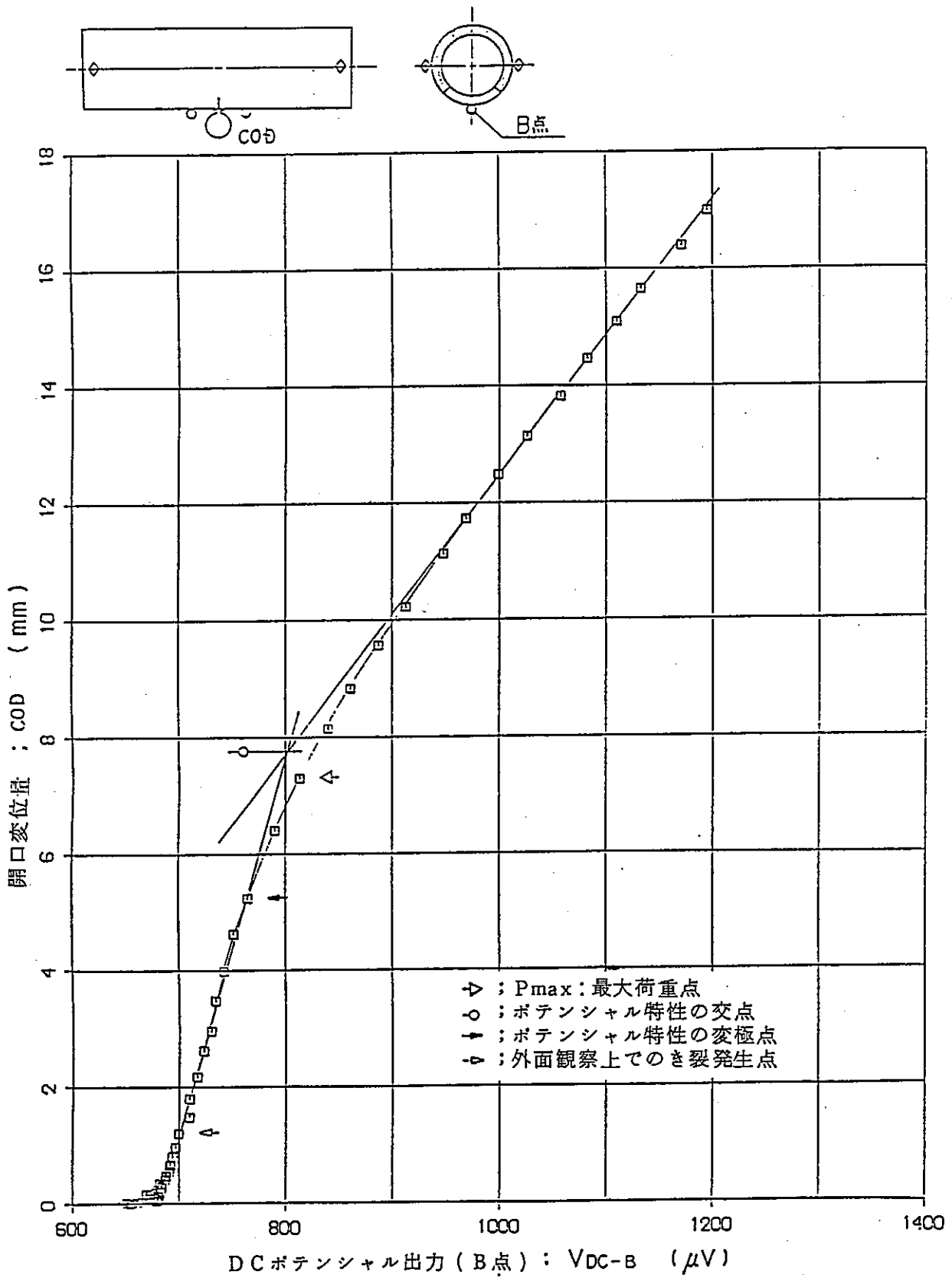


図 2-89 四点曲げ試験の開口変位量とDCポテンシャル出力 (B点) との関係

供試体 No. TP-1

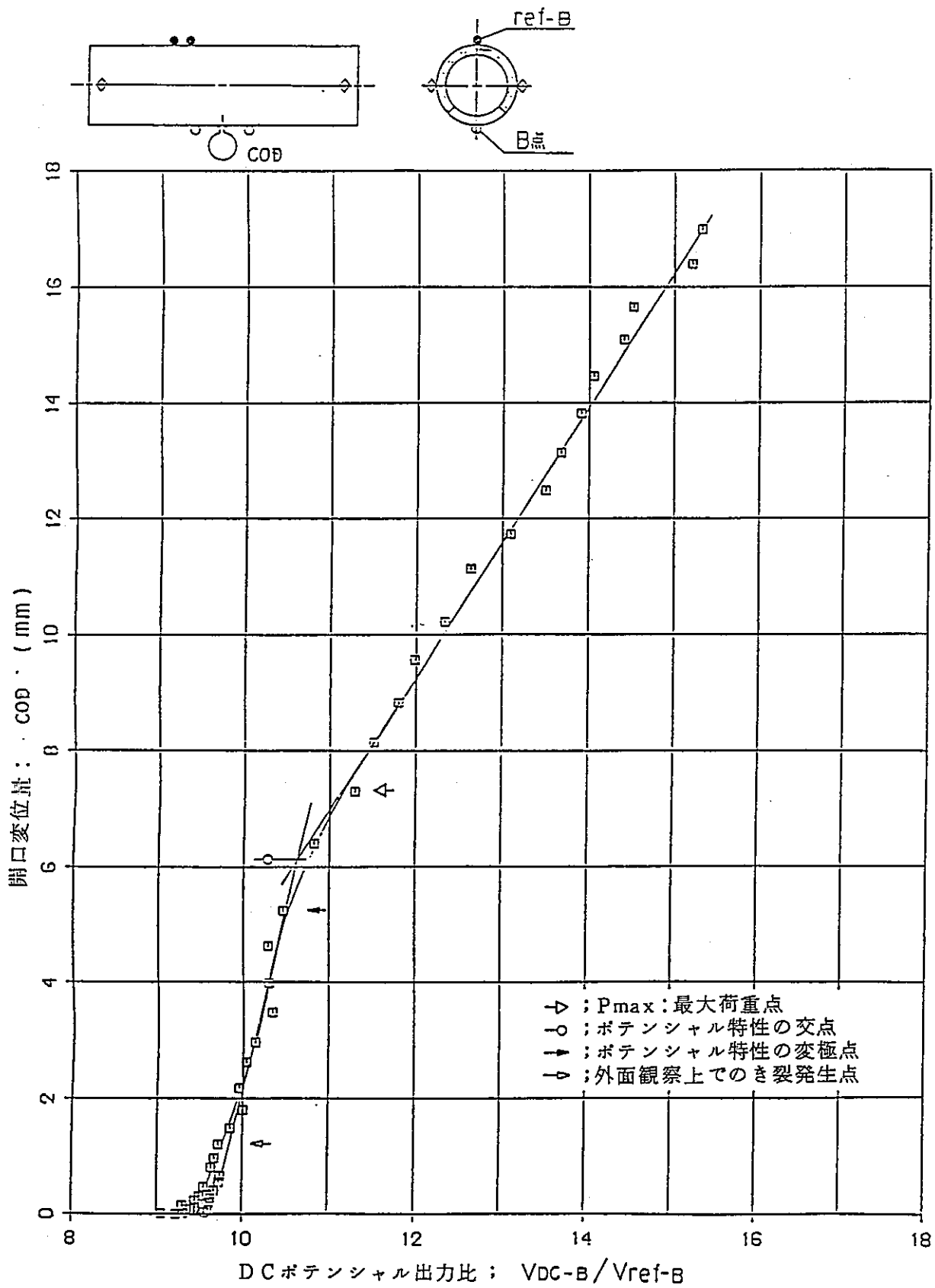


図2-90 四点曲げ試験の開口変位量とDCポテンシャル出力比 (B点) との関係

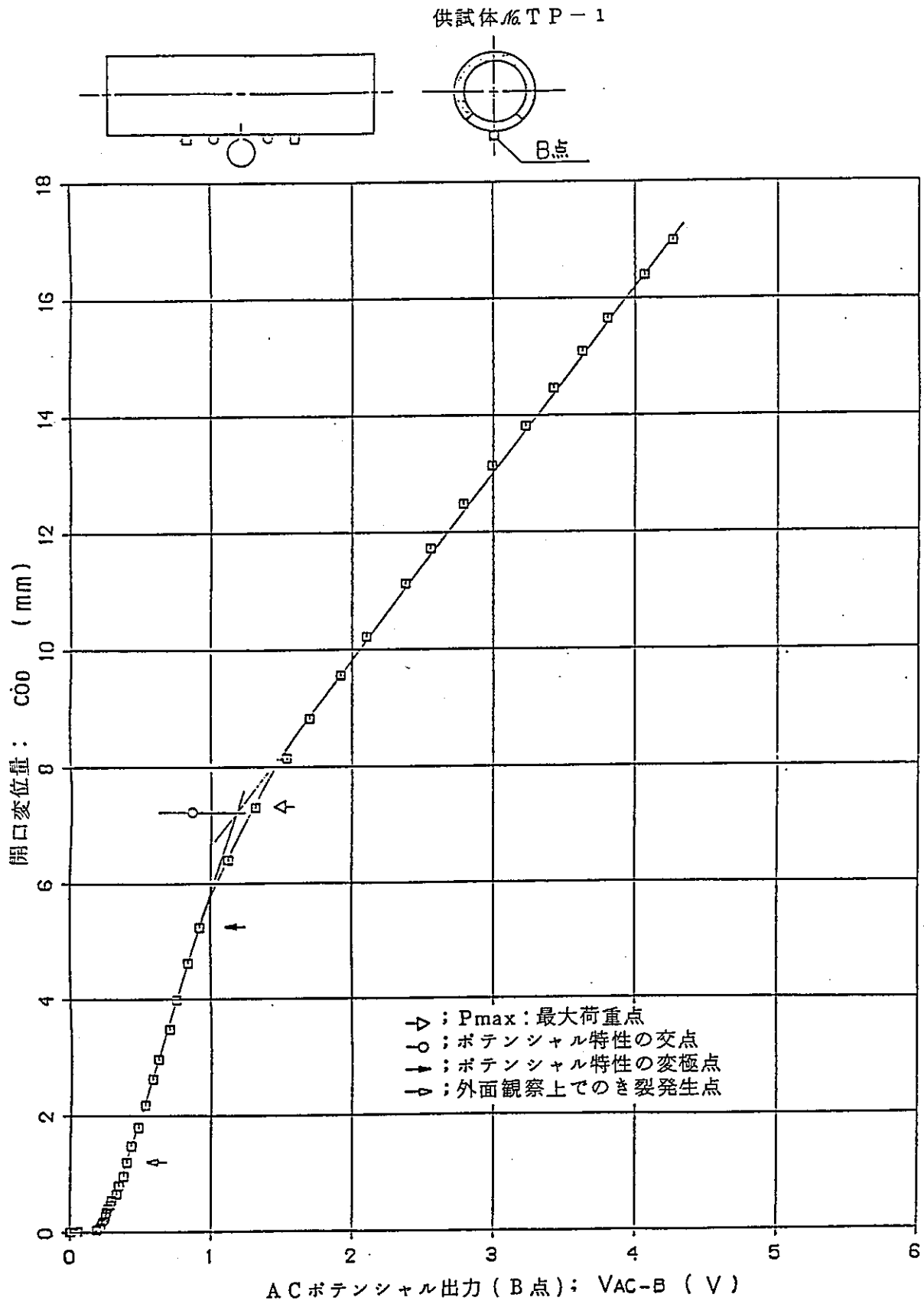


図2-91 四点曲げ試験の開口変位量とACポテンシャル出力 (B点) との関係

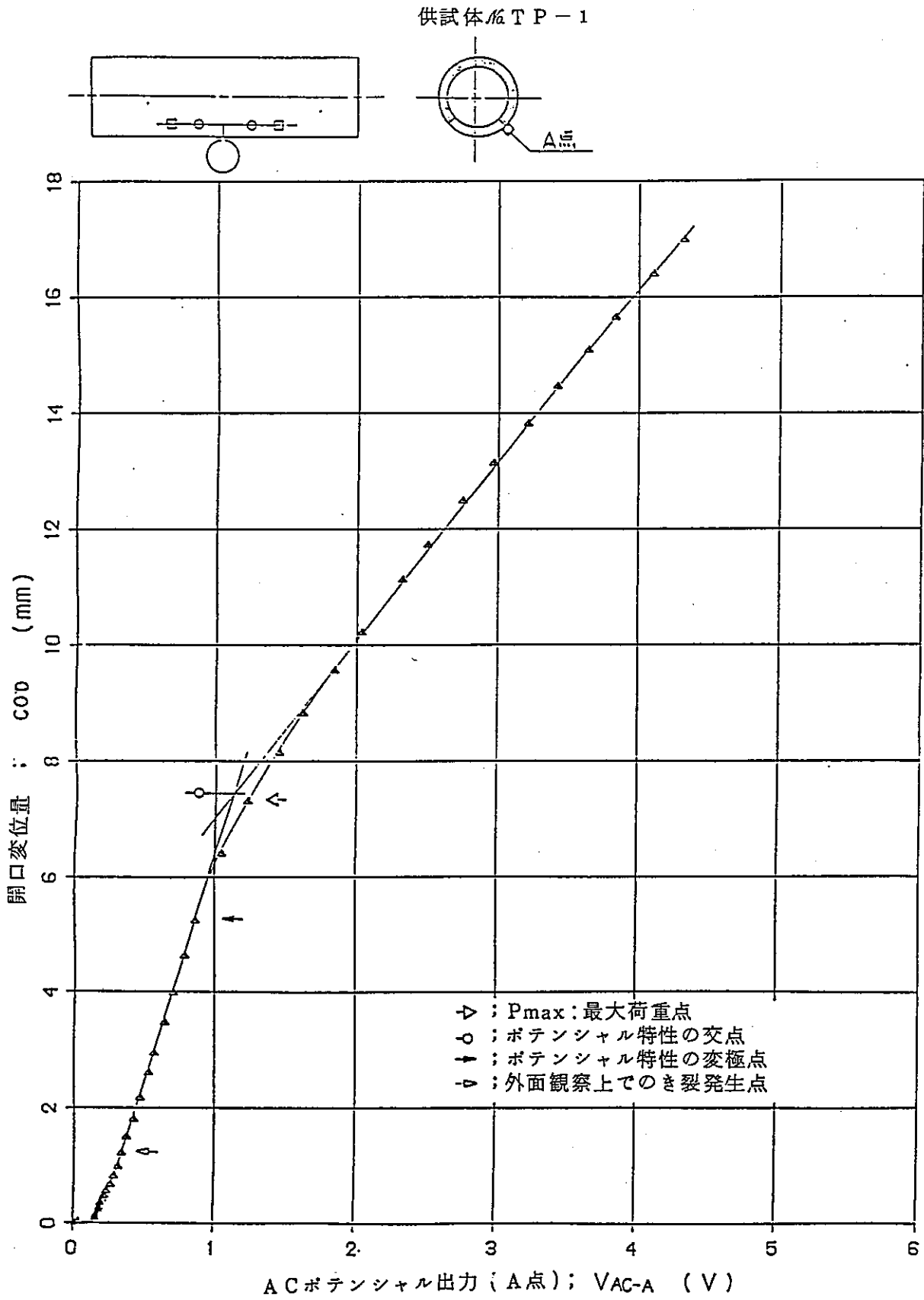


図 2-92 四点曲げ試験の開口変位量と ACポテンシャル出力 (A点) との関係

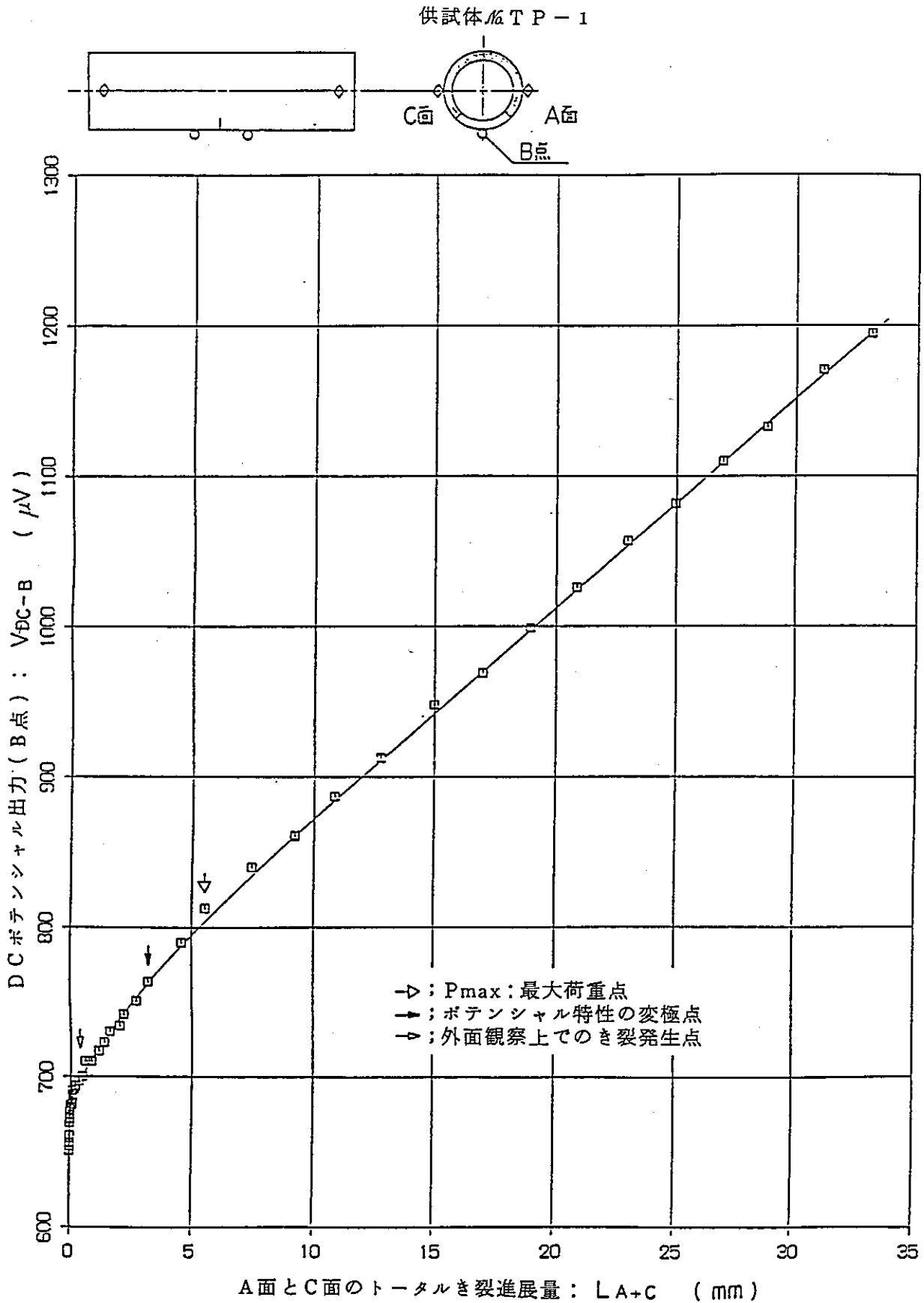


図2-93 四点曲げ試験のA面とC面のトータルき裂進展量とDCポテンシャル出力 (B点) の関係

供試体 No TP-1

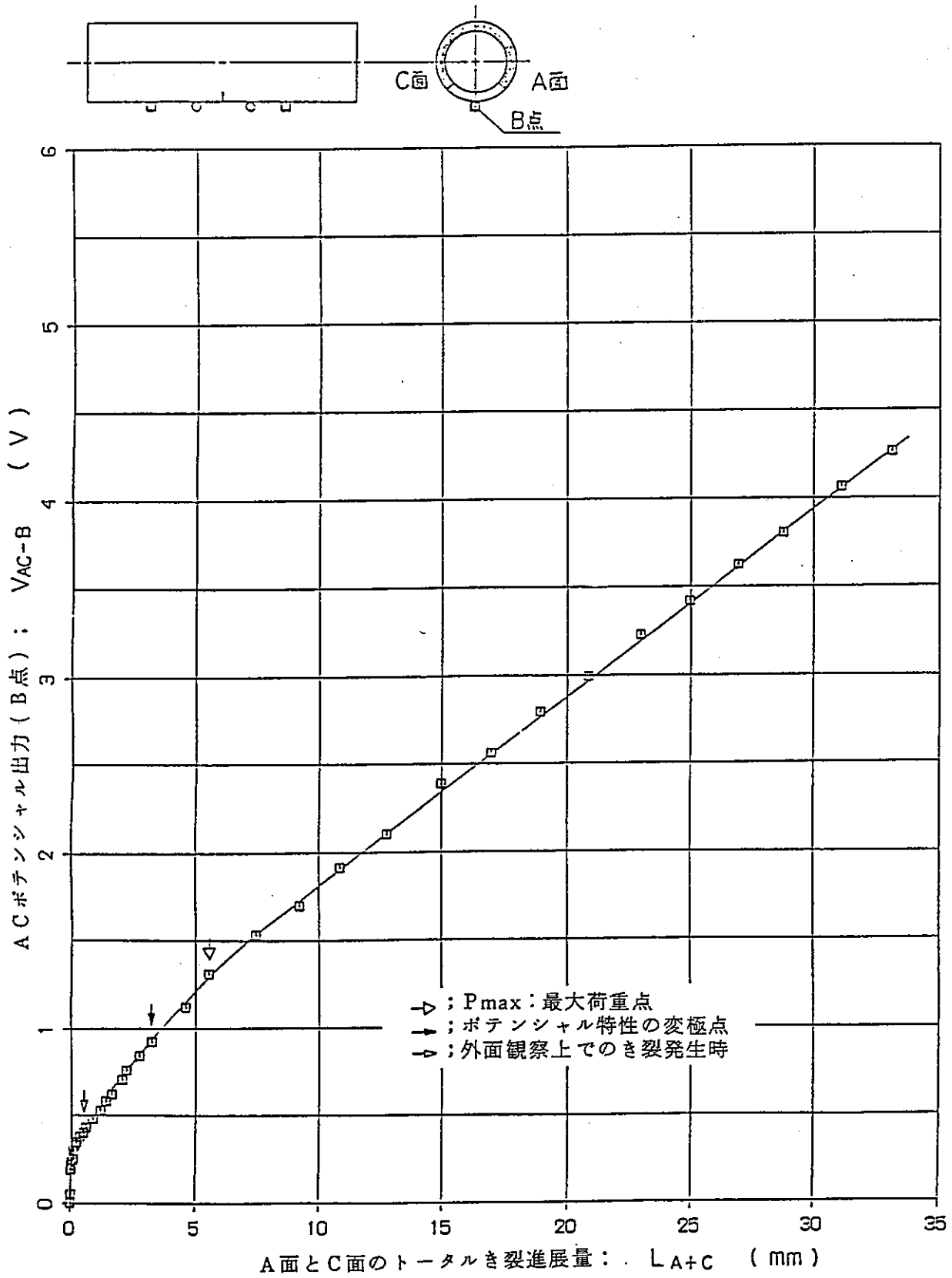


図2-94 四点曲げ試験のA面とC面のトータルき裂進展量とACポテンシャル出力(B点)の関係

供試体 No. TP-1

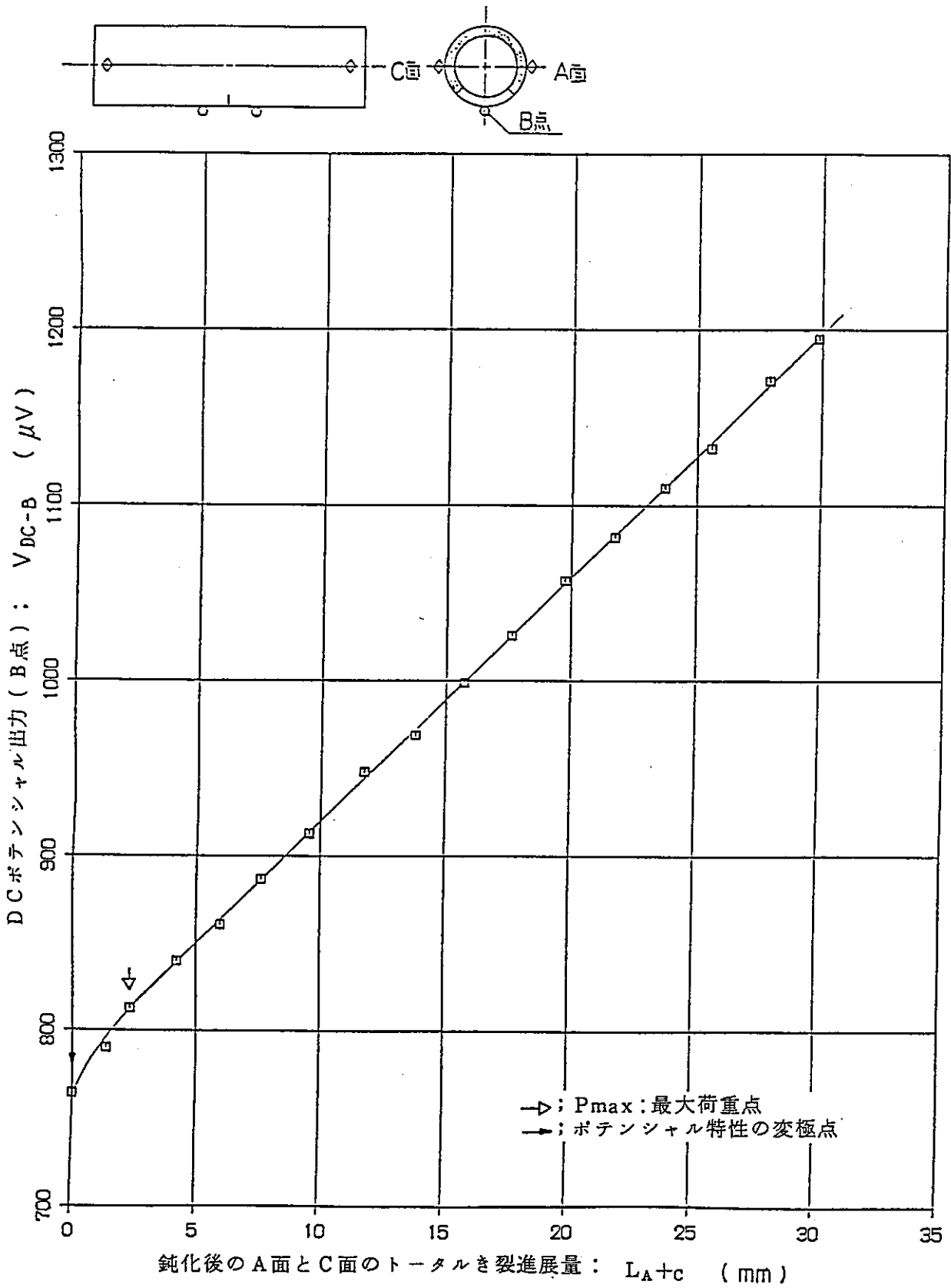


図 2-95 四点曲げ試験の鈍化後のA面, C面のトータルき裂進展量とDCポテンシャル出力 (B点) の関係



供試体 No TP-1

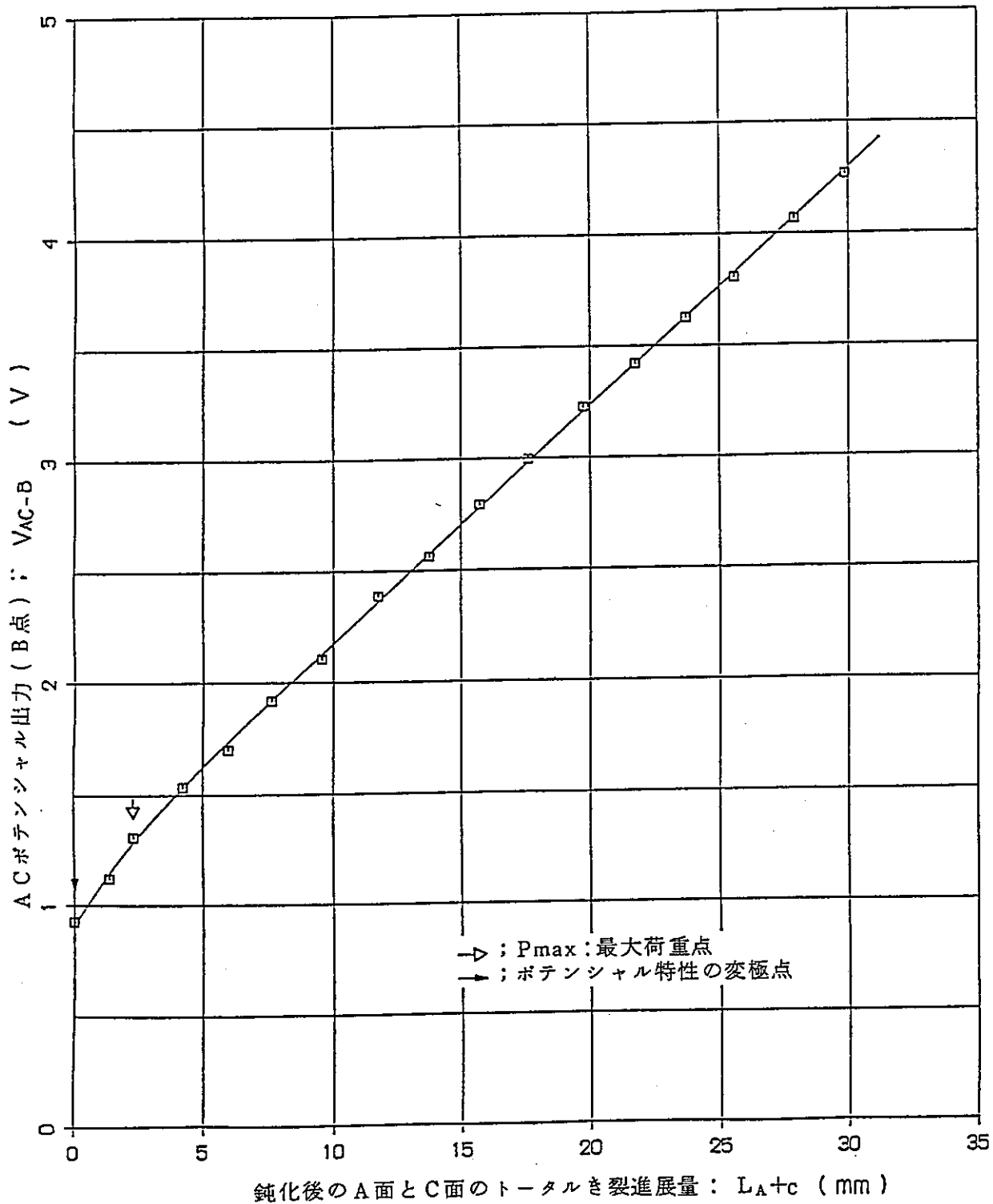
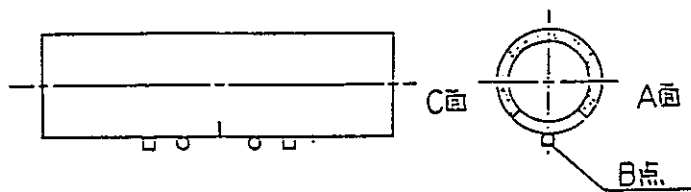
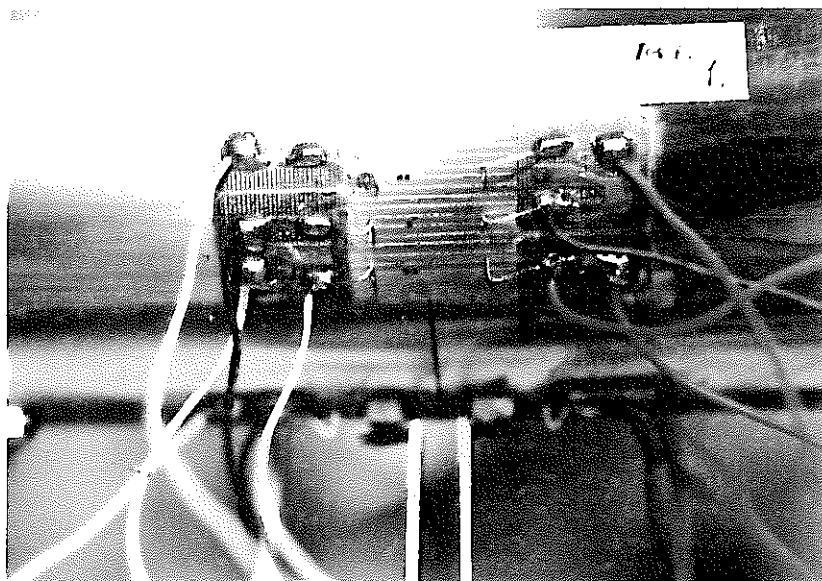


図 2-96 四点曲げ試験の鈍化後のA面, C面のトータルき裂進展量と ACポテンシャル出力 (B点) の関係



dat.[1]  
荷重  
0.00 (tonf)  
A面き裂長さ  
0.59 (mm)

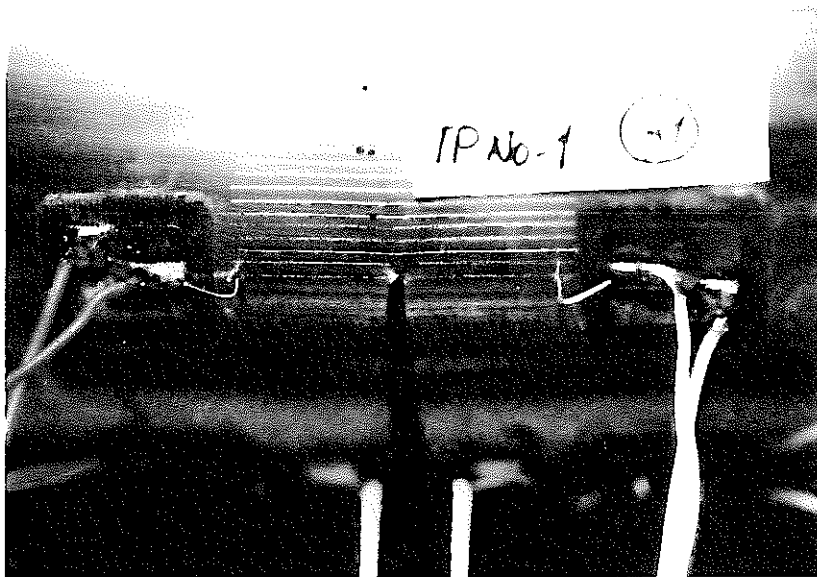


dat.[25]  
荷重  
6.00 (tonf)  
A面き裂長さ  
0.08 (mm)

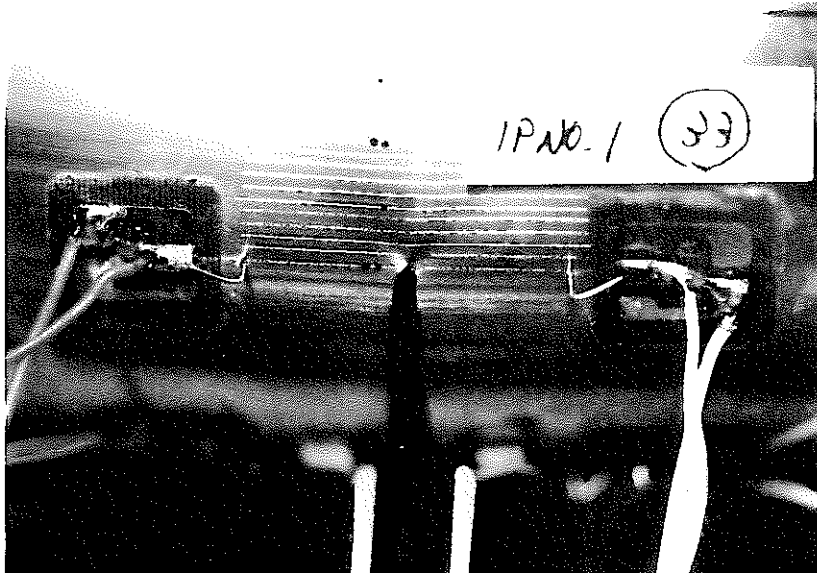


dat.[29]  
荷重  
7.00 (tonf)  
A面き裂長さ  
0.28 (mm)

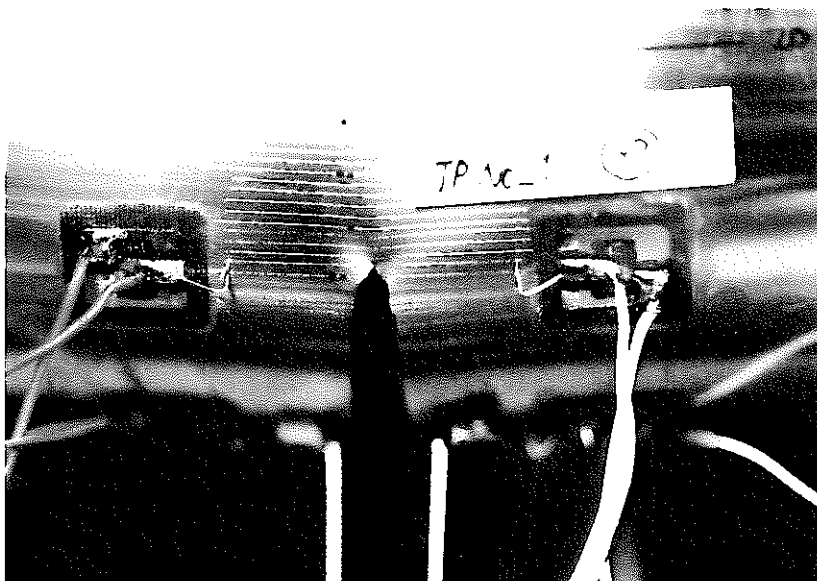
図 2 - 97 四点曲げ試験の試験状況写真 (TP - 1)



dat. [31]  
荷重  
7.50 (tonf)  
A面き裂長さ  
0.59 (mm)

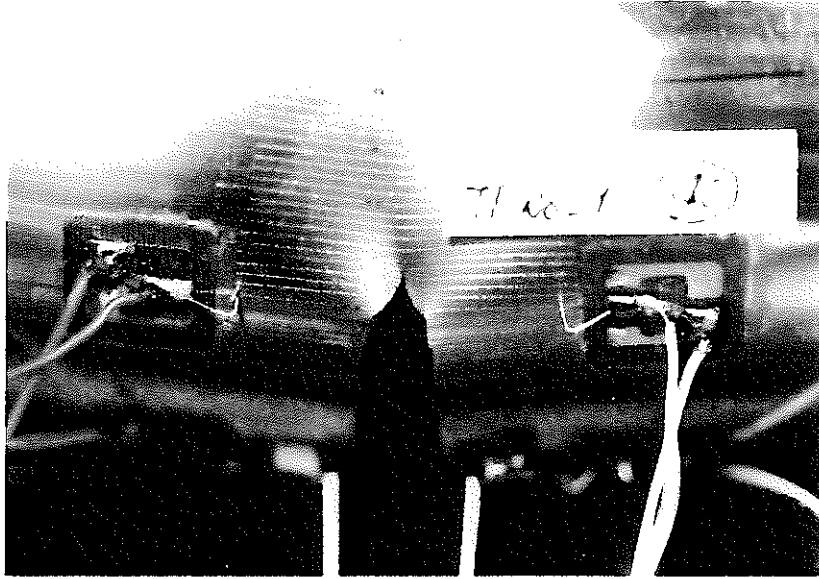


dat. [33]  
荷重  
8.00 (tonf)  
A面き裂長さ  
0.81 (mm)



dat. [37]  
荷重  
9.00 (tonf)  
A面き裂長さ  
1.60 (mm)

図 2 - 98 四点曲げ試験の試験状況写真 (TP - 1)



dat. [40]  
荷重  
9.29 (tonf)  
A面き裂長さ  
3.62 (mm)



dat. [45]  
荷重  
8.70 (tonf)  
A面き裂長さ  
8.41 (mm)

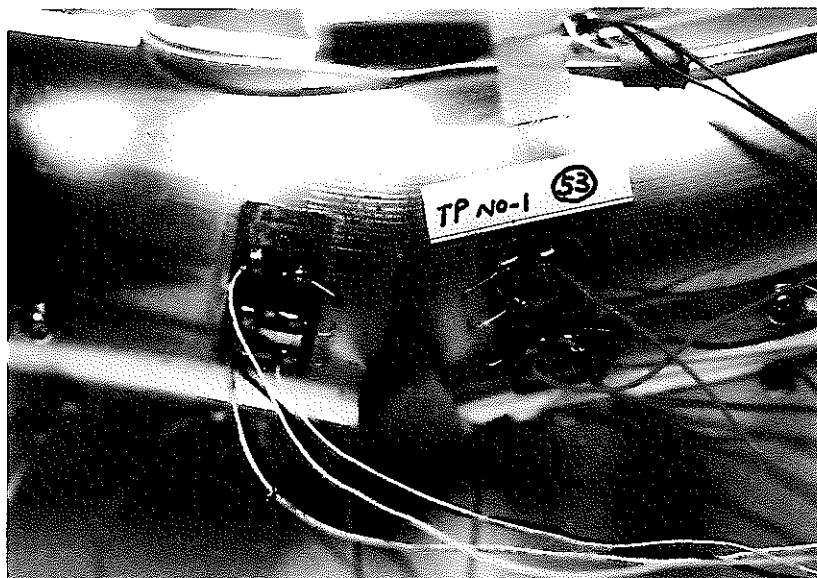


dat. [47]  
荷重  
8.39 (tonf)  
A面き裂長さ  
10.36 (mm)

図 2 - 99 四点曲げ試験の試験状況写真 (TP - 1)



dat.[53]  
荷重  
7.37 (tonf)  
A面き裂長さ  
16.47 (mm)



dat.[53]  
荷重  
7.37 (tonf)  
C面き裂長さ  
16.64 (mm)

図 2 - 100 四点曲げ試験の試験状況写真 (TP - 1)

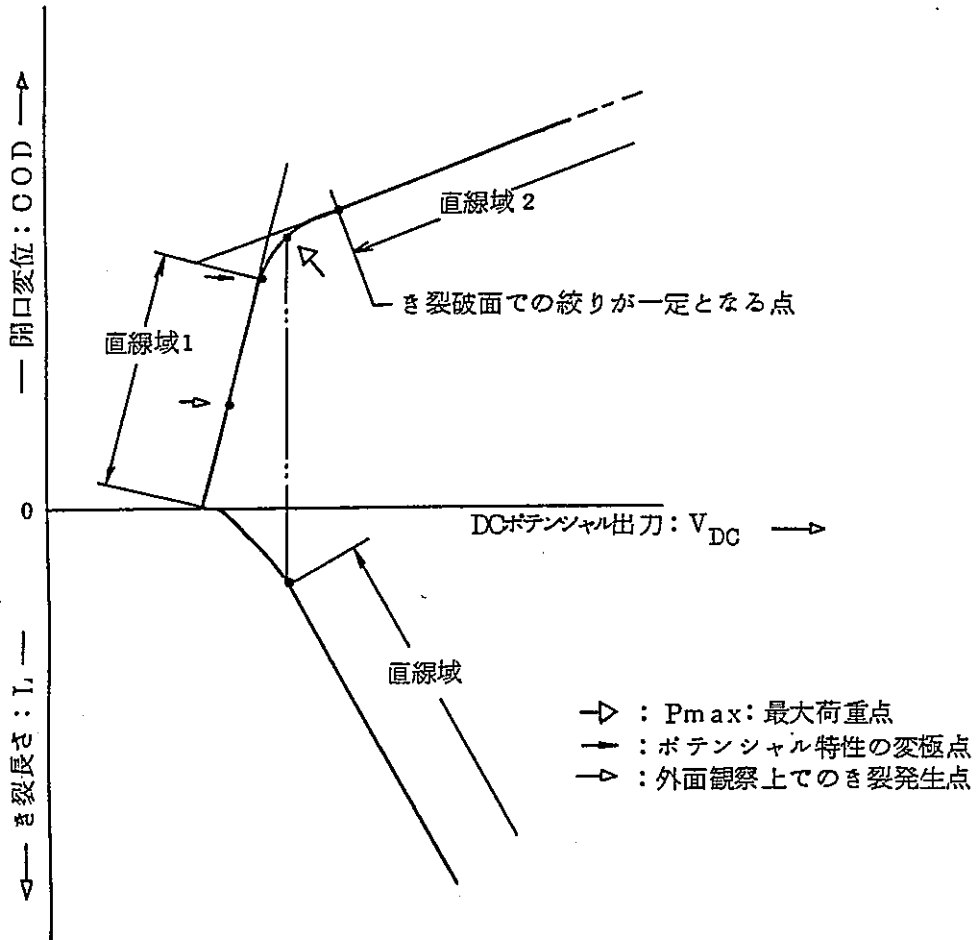


図 2 - 101 四点曲げ試験の DC ポテンシャル出力と開口変位, き裂長さとの関係

表 2-21 四点曲げ試験の測定項目

測定項目	測定点数	備 考
荷 重	1	試験機既設のロードセルより
荷重点変位	2	棒状変位計にて測定 不動点は試験機のハウジングより取る。
中央部変位	1	荷重点からの供試体中央部の変位量
開口変位	1	クリップゲージによる
DCポテンシャル	7	7点中2点はレファレンス出力である。
ACポテンシャル	3	
ひずみゲージ	4	
き裂長さ	2	A面, C面の供試体管外表面のき裂進展量を示す。
切欠き端部の写し取り	1	A面のみ

表 2-22 四点曲げ試験のAC, DCポテンシャル測定条件

ポテンシャル法	項 目	条 件
D C 法	電流条件	片側 5.0(A) CONST.毎 トータル 10.0(A) CONST.
	測定条件	供給電流とリバーシングさせた場合の電位変化量をポテンシャル電位とする。
A C 法	電流条件	AC60(Hz), 5(A) 装置のレンジセット; 6(最大位置)
	ゲイン設定	ゲイン目盛の設定; 3.00にセット

表 2 - 23 材料の化学組成

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
%	0.007	0.61	1.62	0.025	0.001	12.75	16.44	2.61

表 2 - 24 材料の機械的性質

0.2%耐力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)
30	61	71



表 2-25 四点曲げ試験の測定結果 (TP-1)

...<< 供試体 : TP-1 >>...

dat. [ No ]	荷重 P [tonf]	モーメント H [tonf・mm]	変位:[mm]		.....		歪ゲージ			
			荷重点 D0	中央部 D1	供試体 D0+D1	開口 COD	Sbc	Sba [×10 <sup>-6</sup> ]	S1	S2
[ 1 ]	0.00	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0	1	1	0
[ 2 ]	0.25	15.6	0.120	0.011	0.131	0.008	25	-64	57	50
[ 3 ]	0.50	31.3	0.200	0.025	0.225	0.015	49	-131	110	103
[ 4 ]	0.75	46.9	0.280	0.043	0.323	0.027	75	-198	164	156
[ 5 ]	1.00	62.5	0.350	0.058	0.408	0.035	97	-262	213	204
[ 6 ]	1.25	78.1	0.440	0.083	0.523	0.042	124	-333	270	254
[ 7 ]	1.50	93.8	0.520	0.104	0.624	0.054	151	-400	325	308
[ 8 ]	1.75	109.4	0.600	0.122	0.722	0.062	177	-471	378	360
[ 9 ]	2.00	125.0	0.670	0.144	0.814	0.073	203	-538	430	410
[ 10 ]	2.25	140.6	0.750	0.165	0.915	0.085	230	-606	485	462
[ 11 ]	2.50	156.3	0.820	0.187	1.007	0.092	257	-675	537	514
[ 12 ]	2.75	171.9	0.900	0.212	1.112	0.104	288	-750	591	568
[ 13 ]	3.00	187.5	0.980	0.245	1.225	0.123	321	-829	642	620
[ 14 ]	3.25	203.1	1.060	0.273	1.333	0.139	359	-918	696	675
[ 15 ]	3.50	218.8	1.150	0.309	1.459	0.158	405	-1018	751	733
[ 16 ]	3.75	234.4	1.230	0.349	1.579	0.185	453	-1126	805	794
[ 17 ]	4.00	250.0	1.330	0.392	1.722	0.208	511	-1252	861	855
[ 18 ]	4.25	265.6	1.430	0.446	1.876	0.243	583	-1394	925	930
[ 19 ]	4.50	281.3	1.530	0.496	2.026	0.277	656	-1547	978	986
[ 20 ]	4.75	296.9	1.640	0.561	2.201	0.316	747	-1736	1040	1053
[ 21 ]	5.00	312.5	1.760	0.626	2.386	0.355	850	-1949	1099	1119
[ 22 ]	5.25	328.1	1.900	0.716	2.616	0.412	1006	-2262	1165	1192
[ 23 ]	5.50	343.8	2.030	0.817	2.847	0.478	1180	-2620	1223	1256
[ 24 ]	5.75	359.4	2.200	0.935	3.135	0.555	1381	-3053	1296	1335
[ 25 ]	6.00	375.0	2.400	1.115	3.515	0.671	1701	-3770	1349	1396
[ 26 ]	6.25	390.6	2.680	1.331	4.011	0.809	2073	-4609	1434	1489
[ 27 ]	6.50	406.3	3.000	1.601	4.601	0.979	2530	-5690	1509	1576
[ 28 ]	6.75	421.9	3.410	1.968	5.378	1.210	3158	-7175	1584	1668
[ 29 ]	7.00	437.5	3.880	2.424	6.304	1.491	3932	-9038	1638	1746
[ 30 ]	7.25	453.1	4.470	2.942	7.412	1.803	4783	-11005	1766	1895
[ 31 ]	7.50	468.8	5.160	3.558	8.718	2.181	5804	-13334	1883	2035
[ 32 ]	7.75	484.4	5.980	4.284	10.264	2.620	7017	-16030	2022	2201
[ 33 ]	8.00	500.0	6.590	4.845	11.435	2.960	7947	-18051	2132	2326
[ 34 ]	8.25	515.6	7.520	5.701	13.221	3.476	9370	-21077	2312	2529
[ 35 ]	8.50	531.3	8.460	6.561	15.021	3.985	10752	-23991	2514	2743
[ 36 ]	8.75	546.9	9.650	7.637	17.287	4.632	12481	-27584	2784	3014
[ 37 ]	9.00	562.5	10.770	8.694	19.464	5.252	14141	-31006	3052	3266
[ 38 ]	9.25	578.1	12.800	10.597	23.397	6.401	17023	-36914	3575	3722
[ 39 ]	9.30	581.3	14.140	11.986	26.126	7.291	19139	-41176	3803	3902
[ 40 ]	9.29	580.6	15.430	13.327	28.757	8.154	21198	-45309	3972	4018
[ 41 ]	9.15	571.9	16.330	14.338	30.668	8.832	22744	-48374	4062	4056
[ 42 ]	9.11	569.4	17.220	15.414	32.634	9.568	24306	-51475	4131	4068
[ 43 ]	9.03	564.4	18.010	16.355	34.365	10.224	25687	-54169	4133	4029
[ 44 ]	8.83	551.9	19.050	17.626	36.676	11.130	27445	-57624	4143	3999
[ 45 ]	8.70	543.8	19.720	18.460	38.180	11.728	28545	-59790	4137	3969
[ 46 ]	8.55	534.4	20.530	19.514	40.044	12.484	29839	-62358	4105	3916
[ 47 ]	8.39	524.4	21.260	20.421	41.681	13.138	30856	-64440	4086	3886
[ 48 ]	8.15	509.4	22.040	21.367	43.407	13.819	31843	-66514	4044	3857
[ 49 ]	8.01	500.6	22.760	22.263	45.023	14.472	32655	-68288	4002	3829
[ 50 ]	7.87	491.9	23.400	23.112	46.512	15.098	33346	-69845	3929	3771
[ 51 ]	7.74	483.8	24.010	23.910	47.920	15.657	33880	-71108	3920	3757
[ 52 ]	7.54	471.3	24.830	24.978	49.808	16.402	34507	-72681	3895	3724
[ 53 ]	7.37	460.6	25.460	25.838	51.298	16.996	34957	-73832	3865	3679

; P<sub>max</sub> : 最大荷重点  
 ; ポテンシャル特性の変極点  
 ; 外面観察上でのき裂発生日

表 2-26 四点曲げ試験の測定結果 (TP-1)

… << 供試体 : TP-1 >> …

Dat. [ No ]	AC法 ; (V)			DC法 ; (μV)					き裂長さ ; (mm)				
	A	B	C-1	a	b	c-1	c-2	c-3	Ref-a	Ref-b	(A)	(B)	(A)+(C)
{ 1 }	0.000	0.000	0.000	488	655	327	246	220	69	71	-.-	-.-	-.-
{ 2 }	0.001	0.006	0.005	489	657	323	247	221	71	71	-.-	-.-	-.-
{ 3 }	0.006	0.013	0.011	492	652	326	246	221	70	72	-.-	-.-	-.-
{ 4 }	0.036	0.053	0.056	494	662	334	250	222	71	71	-.-	-.-	-.-
{ 5 }	0.141	0.189	0.207	507	679	352	255	229	69	71	-.-	-.-	-.-
{ 6 }	0.140	0.191	0.205	507	679	347	260	227	69	71	-.-	-.-	-.-
{ 7 }	0.144	0.198	0.213	507	680	351	263	231	71	72	-.-	-.-	-.-
{ 8 }	0.152	0.211	0.225	506	680	357	257	229	70	71	-.-	-.-	-.-
{ 9 }	0.149	0.210	0.225	512	682	353	260	230	71	72	-.-	-.-	-.-
{ 10 }	0.155	0.219	0.232	503	673	353	260	228	69	72	-.-	-.-	-.-
{ 11 }	0.153	0.217	0.230	510	677	355	264	228	71	72	-.-	-.-	-.-
{ 12 }	0.155	0.218	0.233	511	680	355	262	229	71	72	-.-	-.-	-.-
{ 13 }	0.158	0.224	0.239	511	681	353	261	229	70	72	-.-	-.-	-.-
{ 14 }	0.157	0.223	0.236	509	680	355	264	230	71	72	-.-	-.-	-.-
{ 15 }	0.164	0.232	0.247	505	670	351	260	230	69	72	-.-	-.-	-.-
{ 16 }	0.168	0.235	0.249	512	678	359	266	227	71	71	0.00	0.00	0.00
{ 17 }	0.176	0.247	0.259	509	683	357	263	233	71	71	0.08	0.01	0.09
{ 18 }	0.179	0.250	0.264	508	680	357	267	230	70	72	0.08	0.01	0.09
{ 19 }	0.182	0.253	0.270	512	684	357	264	231	71	71	0.08	0.01	0.09
{ 20 }	0.190	0.259	0.277	513	684	359	265	234	71	72	0.08	0.01	0.09
{ 21 }	0.190	0.260	0.278	513	682	359	264	230	70	71	0.08	0.01	0.09
{ 22 }	0.205	0.270	0.294	515	687	360	261	235	69	71	0.08	0.01	0.09
{ 23 }	0.218	0.284	0.307	513	688	358	267	238	70	72	0.08	0.01	0.09
{ 24 }	0.232	0.297	0.320	516	691	366	269	233	70	71	0.07	0.01	0.08
{ 25 }	0.263	0.331	0.347	519	692	366	268	237	70	71	0.08	0.10	0.18
{ 26 }	0.284	0.347	0.367	524	694	371	273	236	70	72	0.09	0.14	0.23
{ 27 }	0.316	0.380	0.401	530	697	375	275	238	71	72	0.13	0.23	0.36
→ { 28 }	0.343	0.401	0.435	530	700	383	279	238	71	72	0.20	0.28	0.48
{ 29 }	0.374	0.431	0.477	536	710	386	286	242	71	72	0.28	0.32	0.60
{ 30 }	0.423	0.480	0.530	542	710	391	287	247	69	71	0.36	0.49	0.85
{ 31 }	0.471	0.530	0.588	543	717	402	290	247	70	72	0.59	0.57	1.16
{ 32 }	0.529	0.584	0.655	556	723	410	299	255	71	72	0.71	0.66	1.37
{ 33 }	0.567	0.624	0.704	561	730	410	304	258	69	72	0.81	0.82	1.63
{ 34 }	0.644	0.708	0.789	569	734	422	306	261	69	71	0.95	0.95	2.04
{ 35 }	0.701	0.761	0.858	575	742	430	318	268	70	72	1.07	1.13	2.20
{ 36 }	0.784	0.844	0.957	583	751	443	329	271	71	73	1.32	1.40	2.72
→ { 37 }	0.861	0.927	1.055	595	764	458	340	280	71	73	1.60	1.62	3.22
{ 38 }	1.050	1.122	1.289	616	790	486	363	295	70	73	2.27	2.32	4.59
→ { 39 }	1.230	1.310	1.528	641	813	518	390	318	69	72	2.74	2.82	5.56
{ 40 }	1.456	1.535	1.806	664	840	548	421	340	71	73	3.62	3.83	7.45
{ 41 }	1.624	1.701	2.023	693	861	577	449	358	71	73	4.45	4.76	9.21
{ 42 }	1.840	1.918	2.292	719	887	610	483	383	69	74	5.28	5.57	10.85
{ 43 }	2.034	2.105	2.529	743	913	642	516	407	69	74	6.30	6.48	12.78
{ 44 }	2.325	2.388	2.873	778	948	686	557	446	71	75	7.38	7.60	14.98
{ 45 }	2.506	2.563	3.090	805	969	712	590	474	71	74	8.41	8.58	16.99
{ 46 }	2.752	2.794	3.379	835	999	753	630	513	69	74	9.37	9.58	18.95
{ 47 }	2.967	2.995	3.629	863	1026	785	663	547	69	75	10.36	10.49	20.85
{ 48 }	3.213	3.228	3.905	894	1057	818	700	585	69	76	11.33	11.65	22.98
{ 49 }	3.420	3.421	4.143	927	1082	851	737	619	71	77	12.33	12.64	24.97
{ 50 }	3.641	3.625	4.386	955	1110	885	773	657	71	77	13.28	13.66	26.94
{ 51 }	3.833	3.806	4.603	978	1133	911	806	691	71	78	14.30	14.50	28.80
{ 52 }	4.102	4.065	4.899	1014	1171	952	842	735	71	77	15.45	15.67	31.12
{ 53 }	4.320	4.265	5.134	1040	1195	978	876	767	71	78	16.47	16.64	33.11

→ ; Pmax. : 最大荷重点  
 → ; ポテンシャル特性の変極点  
 → ; 外面観察上でのき裂発起点

表 2-27 四点曲げ試験の測定結果 (TP-2)

…くく供試体 : TP-2 >>…

dat. [ No ]	荷重 P [tonf]	モーメント M [tonf・mm]	変位:(mm)				歪ゲージ [×10 <sup>-6</sup> ]			
			荷重点 D0	中央部 D1	供試体 D0+D1	開口 COD	Sbc	Sba	S1	S2
[ 1 ]	0.00	0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0	0	0
[ 2 ]	0.24	15.3	0.125	-0.003	0.122	0.011	23	-66	48	52
[ 3 ]	0.49	30.5	0.220	0.014	0.234	0.019	48	-135	99	102
[ 4 ]	0.73	45.8	0.305	0.032	0.337	0.026	73	-207	152	156
[ 5 ]	0.98	61.0	0.385	0.049	0.434	0.038	100	-274	200	208
[ 6 ]	1.22	76.3	0.475	0.071	0.546	0.050	127	-344	253	259
[ 7 ]	1.46	91.6	0.555	0.092	0.647	0.057	153	-413	305	311
[ 8 ]	1.71	106.8	0.630	0.113	0.743	0.069	179	-484	356	363
[ 9 ]	1.95	122.1	0.705	0.131	0.836	0.080	203	-550	404	412
[1 0]	2.20	137.3	0.785	0.155	0.940	0.096	235	-613	460	467
[1 1]	2.44	152.6	0.855	0.177	1.032	0.096	259	-681	508	515
[1 2]	2.69	167.8	0.935	0.201	1.136	0.111	291	-760	564	569
[1 3]	2.93	183.1	1.010	0.230	1.240	0.127	324	-838	611	616
[1 4]	3.17	198.4	1.090	0.261	1.351	0.142	363	-927	667	669
[1 5]	3.42	213.6	1.180	0.293	1.473	0.165	416	-1037	715	717
[1 6]	3.66	228.9	1.265	0.325	1.590	0.184	459	-1133	778	778
[1 7]	3.91	244.1	1.350	0.367	1.717	0.208	514	-1244	832	831
[1 8]	4.15	259.4	1.435	0.410	1.845	0.231	583	-1376	886	883
[1 9]	4.39	274.7	1.535	0.452	1.987	0.254	659	-1508	944	938
[2 0]	4.64	289.9	1.640	0.512	2.152	0.292	767	-1665	1012	1002
[2 1]	4.88	305.2	1.750	0.565	2.315	0.327	881	-1854	1065	1054
[2 2]	5.13	320.4	1.870	0.646	2.516	0.381	1057	-2104	1131	1119
[2 3]	5.37	335.7	2.005	0.717	2.722	0.423	1231	-2388	1195	1179
[2 4]	5.62	351.0	2.145	0.816	2.961	0.485	1466	-2761	1252	1234
[2 5]	5.86	366.2	2.310	0.925	3.235	0.558	1729	-3199	1314	1294
[2 6]	6.10	381.5	2.525	1.102	3.627	0.666	2142	-3871	1386	1358
[2 7]	6.35	396.7	2.770	1.289	4.059	0.752	2606	-4726	1443	1413
[2 8]	6.59	412.0	3.085	1.554	4.639	0.951	3256	-5946	1508	1472
[2 9]	6.84	427.2	3.460	1.879	5.339	1.148	3978	-7322	1605	1561
[3 0]	7.08	442.5	3.930	2.292	6.222	1.406	4949	-9219	1682	1628
→[3 1]	7.32	457.8	4.465	2.783	7.248	1.703	6026	-11314	1779	1711
[3 2]	0.00	0.0	---	---	---	1.449	5490	-9739	291	240

→ ; 外面観察上でのき裂発生点

表 2-28 四点曲げ試験の測定結果 (TP-2)

… << 供試体 : TP-2 >> …

Dat. { No }	AC法; [V]			DC法; [ $\mu$ V]							き裂長さ; [mm]		
	A	B	C-1	a	b	c-1	c-2	c-3	Ref-a	Ref-b	{A}	{B}	{A}+{C}
{ 1 }	0.000	0.000	0.000	540	710	362	285	239	71	75	-.-	-.-	-.-
{ 2 }	0.001	0.000	0.000	542	712	366	286	241	73	77	-.-	-.-	-.-
{ 3 }	0.000	0.001	0.000	540	711	364	285	240	71	75	-.-	-.-	-.-
{ 4 }	0.001	0.002	0.000	541	712	364	286	240	73	75	-.-	-.-	-.-
{ 5 }	0.000	0.002	0.001	542	711	366	286	241	74	76	-.-	-.-	-.-
{ 6 }	0.000	0.004	0.000	542	712	366	286	240	73	76	-.-	-.-	-.-
{ 7 }	0.000	0.006	0.001	542	712	366	286	241	72	76	-.-	-.-	-.-
{ 8 }	0.001	0.008	0.003	542	712	367	287	242	74	77	-.-	-.-	-.-
{ 9 }	0.001	0.009	0.003	541	712	365	287	241	74	76	-.-	-.-	-.-
{ 10 }	0.003	0.011	0.007	542	713	367	286	243	75	77	-.-	-.-	-.-
{ 11 }	0.004	0.014	0.009	542	712	367	286	241	73	75	-.-	-.-	-.-
{ 12 }	0.006	0.015	0.011	544	713	368	287	242	75	77	-.-	-.-	-.-
{ 13 }	0.008	0.017	0.011	542	712	367	286	241	74	77	-.-	-.-	-.-
{ 14 }	0.011	0.023	0.015	542	712	366	286	241	72	75	-.-	-.-	-.-
{ 15 }	0.013	0.023	0.018	542	714	368	286	241	73	76	-.-	-.-	-.-
{ 16 }	0.016	0.028	0.023	542	712	367	286	241	72	75	-.-	-.-	-.-
{ 17 }	0.019	0.030	0.027	545	715	369	290	243	75	77	-.-	-.-	-.-
{ 18 }	0.024	0.034	0.031	545	713	369	289	242	73	77	-.-	-.-	-.-
{ 19 }	0.027	0.038	0.036	545	714	370	290	243	73	76	-.-	-.-	-.-
{ 20 }	0.032	0.043	0.040	545	716	370	290	243	73	75	-.-	-.-	-.-
{ 21 }	0.038	0.050	0.046	546	717	370	290	244	73	77	-.-	-.-	-.-
{ 22 }	0.043	0.057	0.054	547	717	372	292	244	74	76	0.00	0.00	0.00
{ 23 }	0.051	0.064	0.065	548	718	374	293	244	72	75	0.00	0.01	0.01
{ 24 }	0.060	0.074	0.075	549	719	375	294	245	74	76	0.02	0.05	0.07
{ 25 }	0.071	0.083	0.088	552	722	378	296	247	74	78	0.02	0.07	0.09
{ 26 }	0.086	0.096	0.107	553	723	379	296	247	73	77	0.03	0.08	0.11
{ 27 }	0.105	0.116	0.126	555	725	380	298	249	74	76	0.03	0.10	0.13
{ 28 }	0.132	0.141	0.160	558	728	387	302	250	73	75	0.03	0.15	0.18
{ 29 }	0.163	0.173	0.201	562	730	388	306	252	73	76	0.10	0.21	0.31
{ 30 }	0.207	0.216	0.258	567	736	396	310	255	72	76	0.15	0.30	0.45
→ { 31 }	0.260	0.271	0.330	571	740	402	314	257	74	76	0.28	0.38	0.66
{ 32 }	0.211	0.217	0.275	569	739	401	313	256	72	76	0.28	0.38	0.66

→ ; 外面観察上でのき裂発生日

## 2.4 応力拡大係数解析

### 2.4.1 概要

疲労き裂進展速度評価に用いる応力拡大係数は、「2.1 入口管き裂進展試験」に述べているように、平板に対するRaju-Nawman<sup>2)</sup>の式等により算定されている。

曲率半径の大きい大口径管の場合は、平板に対する評価式を用いても誤差は小さいと考えられるが、実証炉入口管のように小口径管の場合には曲率の影響を無視できない可能性がある。

この影響を評価するため、3次元ソリッド要素を用いた有限要素法解析（弾性）により、配管及び配管を展開した寸法を有する平板に種々のき裂を想定した解析モデルについて応力拡大係数を求める。

### 2.4.2 解析対象及び解析条件

#### (1) 解析対象

図2-102に示す管中心に種々のき裂を有する配管及び配管を展開した寸法を有する平板の2種類の形状とする。

配管を展開する際の考え方を以下に示す。

#### (i) 周方向

##### (a) $\theta = 0^\circ \sim 67.5^\circ$ の範囲

角度 $0^\circ$ から $67.5^\circ$ までの範囲は、図2-103に示すように内周、外周両側共に円弧上の延べ距離を平板展開後のX方向の距離とした。

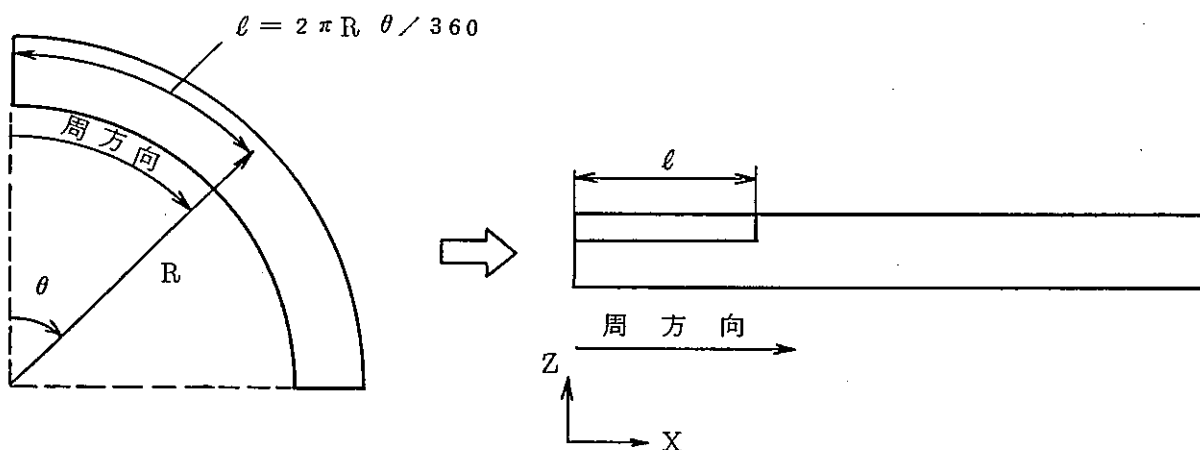


図2-103 周方向の展開 ( $0^\circ \sim 67.5^\circ$ )

(b)  $\theta = 67.5^\circ \sim 90^\circ$  の範囲

67.5° の X 方向の距離は上記(a)より決定。90° の X 方向距離は180° までの距離の 1/2 とし、67.5° ~ 90° の中間層に関しては、2等分とした。

なお、180° までの距離は、板厚を一定とし配管モデルと平板モデルの面積が等しくなるように設定した。(図2-104に計算式を示す。)

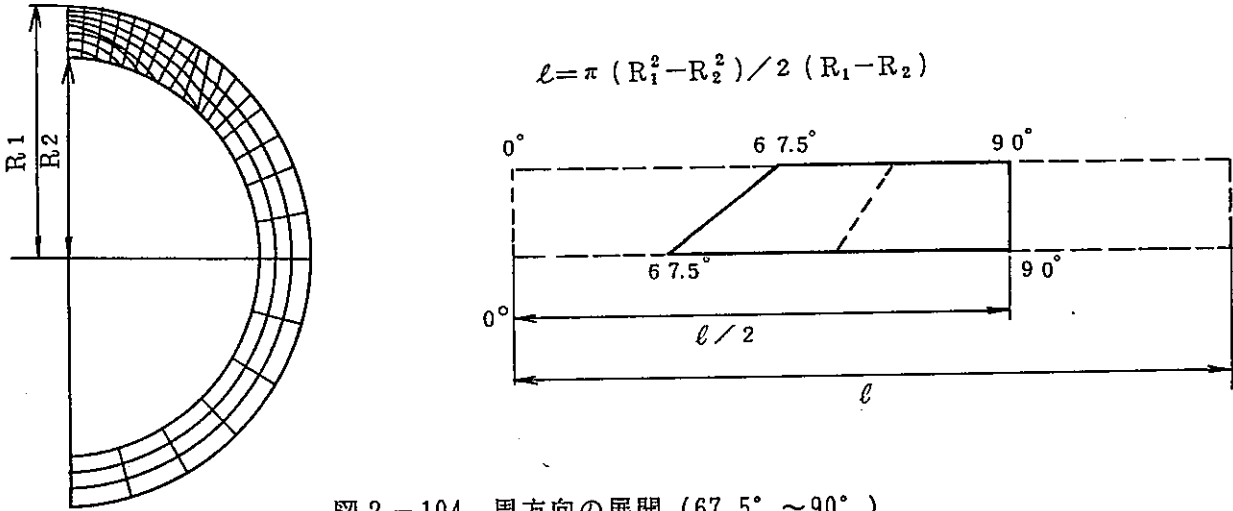


図2-104 周方向の展開 (67.5° ~ 90°)

(c) 90° ~ 180°

90° から180° の範囲においては、角度に合わせて6等分した。

(ii) 板厚方向

板厚方向の距離  $l'$  は、配管モデルにおける円弧の中心から座標までの距離  $R'$  を内側の円弧の半径  $R$  で差し引いた長さとした。

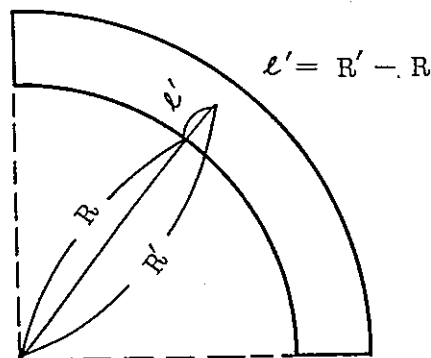


図2-105 板厚方向

(iii) 軸方向

軸方向の長さに関しては、配管モデルと同一とした。

以上をまとめて図 2-106 に示す。

(2) 解析モデル

中心に周方向（配管モデル）の切欠きを有する解析対象体を、対象性を考慮し、 $1/4$  について三次元ソリッド要素を用いて要素分割する。

なお、配管あるいは平板の形状・寸法は同一であるが、き裂部のアスペクト比を交えるため、配管、平板についてそれぞれ 2 種類の要素分割を行っている。

以下に三次元ソリッド要素による要素分割を示す。

(i) アスペクト比の小さい切欠きを対象（アスペクト比： $a/c = 0.26$ ）

61年度に実施した疲労き裂進展試験中、アスペクト比が最も小さい TP-2（ $a/c = 0.26$ ）を模擬することを意図した解析モデルの全体の要素分割図を配管、平板それぞれについて図 2-107, 108 に示す。

なお、切欠き部についてのモデル形状の相違を以下に示す。

(a) 表面切欠き

配管及び平板の表面切欠き形状をそれぞれ図 2-109, 110 に示す。

(b) 貫通切欠き

配管及び平板の貫通切欠き形状をそれぞれ図 2-111, 112 に示す。なお、配管と平板ではき裂寸法が若干異なるが、その程度が最大で数%程度なので、応力拡大係数評価結果に対する影響は小さい。

(ii) アスペクト比が比較的大きな切欠きを対象

（アスペクト比： $a/c = 0.5$ ）

(i) の場合の約 2 倍のアスペクト比を有する切欠きを対象とした解析モデルについて以下に示す。

なお、配管及び平板の全体要素分割図はそれぞれ図 2-113, 114 であり、以下は切欠き部についてのモデル形状の相違を示す。

(a) 表面切欠き

配管及び平板の表面切欠き形状をそれぞれ図 2-115, 116 に示す。

(b) 貫通切欠き

配管及び平板の貫通切欠きをそれぞれ図 2-117, 118を示す。

以上をまとめて解析ケースを表 2-29に示す。

(3) 解析条件

(i) 材料定数及び断面寸法

解析に使用した材料定数は、

縦弾性定数： $2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$

ポアソン比：0.3

である。また、断面寸法等は図 2-102に示す。

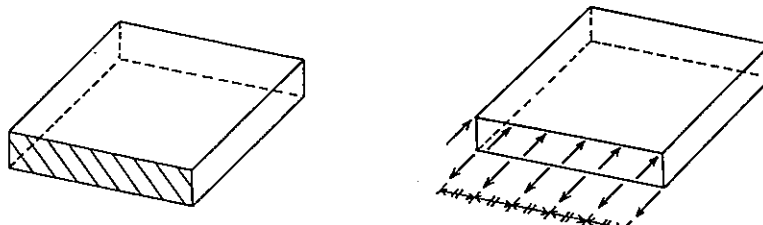
(ii) 境界条件


解析モデルが供試体の 1/4であることを考慮し、境界条件を定める。引張荷重に対する境界条件を配管モデルで代表して図 2-119に、曲げ荷重に対する境界条件を図 2-120に示す。

(iii) 荷重条件

引張荷重と曲げ荷重の 2 種類とし、引張荷重はき裂面の反対側の面に分布荷重 ( $1 \text{ kgf/mm}^2$ ) として与え、平板に与える曲げ荷重は、き裂面の反対側の面の上下 (板の上面と下面) に平板幅方向に等間隔で、き裂面に引張応力が発生するよう  $\pm 50 \text{ kgf}$  を 6カ所負荷する。

以上より、引張荷重に対しては配管、平板いずれについても一様膜応力は  $1 \text{ kgf/mm}^2$ 、曲げ荷重に対しては平板について、一様曲げ応力は  $3.68 \text{ kgf/mm}^2$  である。



( 部分：等分布荷重を負荷)  
引張荷重

曲げ荷重

(iv) 使用解析コード

汎用線形、非線形解析コード「MARC」を使用する。解析に使用する要素は、図 2-121に示す要素 21\*の 20 節点ソリッド要素とする。



なお、解析は弾性範囲とする。

注記) \* : 「MARC」マニュアル上の呼び名

(4) 応力拡大係数の解析方法

解析は、先ず「MARC」の機能である仮想き裂進展法により、き裂先端のJ積分値を求め、次に下記式により応力拡大係数を算定する。

$$K = \sqrt{\frac{E}{1 - \nu^2}} \times J \dots\dots\dots (2-9)$$

ここに、

- K : 応力拡大係数
- E : 縦弾性定数
- ν : ポアソン比
- J : J積分値

である。

以下に具体的な評価内容を示す。

(i) J積分値の計算方法

(a) 仮想き裂進展法

「MARC」では、J積分値を求めるのに仮想き裂進展法<sup>9), 10)</sup>を用いるので、以下仮想き裂進展法について記述する。

図2-122において、Γ内の領域をAとすると、Γ内のポテンシャルエネルギーPは

$$P = \int_A W_{dx1} dx2 - \int_{\Gamma} T_i \cdot U_i d\Gamma \dots\dots\dots (2-10)$$

で表わされる。

ここに、

- $W (\int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij})$  : ひずみエネルギー密度関数
- $T_i$  : 表面力
- $U_i$  : 変位
- $\epsilon_{ij}$  : ひずみ
- $\sigma_{ij}$  : 応力

き裂先端を  $\Delta a$  だけ微小進展させると

$$J = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{P(a + \Delta a) - P(a)}{\Delta a} = - \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta a} = - \frac{\delta P}{\delta a} \dots\dots\dots (2-11)$$

となる。

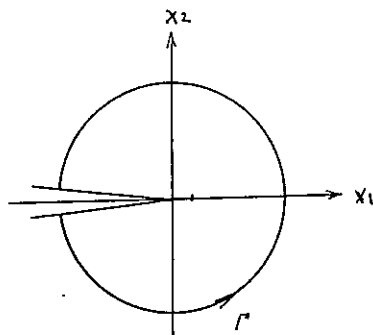


図 2 - 122 き裂先端の積分経路

(b) 解析内容

図 2 - 123中に破線で示した経路について、仮想き裂進展法を用い J 積分値を評価する。

同図中の経路は、き裂先端の評価点回りの要素にのみ仮想き裂進展を考慮したものである。

仮想き裂進展量は、図 2 - 124に示すように、き裂先端の評価点の節点について  $10^{-3}$ mm、回りの中間節点について  $0.5 \times 10^{-3}$ mm とする。以上の条件下で解析を行い、求められたポテンシャルの変化量を用いると、J 積分値は本解析モデルについて、

$$J = - \frac{2 \times \Delta P}{\Delta A} \dots\dots\dots (2-12)$$

となる。

ここに、

$\Delta P$  : ひずみエネルギーの変化量

$\Delta A$  : 仮想き裂進展面積

である。

(c) 仮想き裂進展面積

(b)に延べる  $\Delta A$  の求め方を以下に示す。

(i) き裂最深点

き裂最深点での仮想き裂進展面積は、図 2-125 に示す斜線部の面積となる。

斜線部の面積は、

$$\Delta S = \int_{x_0}^{x_1} y' dX - \int_{x_0}^{x_1} y dX \dots\dots\dots (2-13)$$

- もとの節点位置  $x = (x, y, z)$
- 移動後の節点位置  $x' = (x', y', z')$

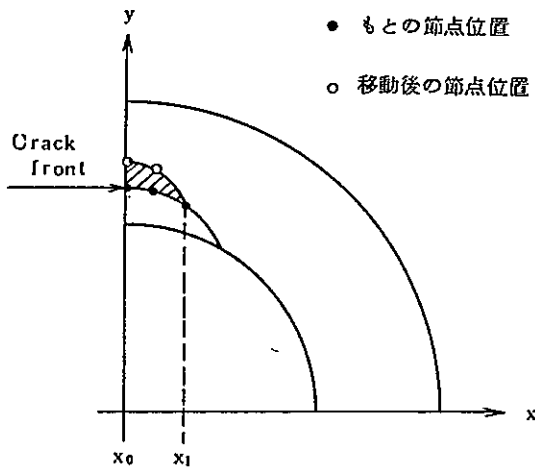


図 2-125 き裂最深点の仮想き裂進展面積

(ii) き裂表面点

き裂表面点での仮想き裂進展面積は、図 2-126 に示す斜線部の面積となる。

斜線部の面積は、

$$\Delta S = \int_{x_0}^{x_2} y' dX - \int_{x_0}^{x_1} y dX - \Delta S' \dots\dots\dots (2-14)$$

ここに

$\Delta S'$  : 図 2-126 中の黒塗り部面積

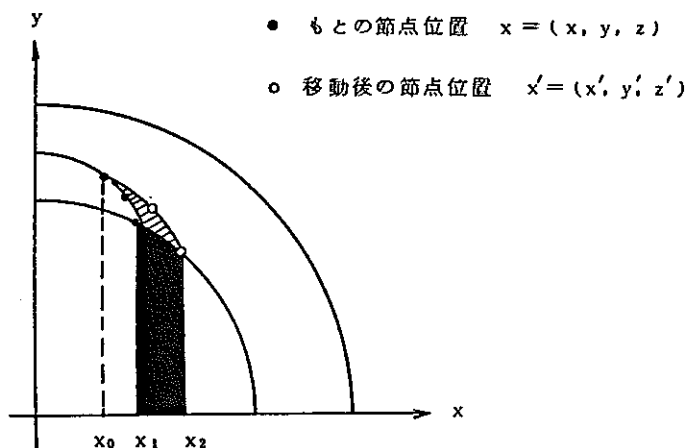


図 2-126 き裂表面点の仮想き裂進展面積

### 2.4.3 解析結果

解析結果を図 2-127~134 に示す。なお、各図の内容を下記に示す。

- (1) 表面き裂 (アスペクト比=0.26, 0.5),  $\sigma_m = 1 \text{ kgf/mm}^2$

図 2-127, 128 にそれぞれアスペクト比が 0.26, 0.5 の場合の応力拡大係数分布を示す。図より、

- (i) 配管と平板の場合を比べると、いずれも平板の方が大きい応力拡大係数を示す。  
(ii) Raju-Newman の解の方が、本解析結果より大きい応力拡大係数を示すことが分かる。

- (2) 貫通き裂,  $\sigma_m = 1 \text{ kgf/mm}^2$

図 2-129, 130 に貫通き裂の場合の応力拡大係数分布を示す。図より

- (i) 配管と平板の場合を比べると、いずれも配管の方が大きい応力拡大係数を示す。  
(ii) Zahoor の式<sup>3)</sup>の方が、LBB 基準の式<sup>1)</sup>より、板厚方向の平均的な応力拡大係数を示していることが分かる。

なお、板厚方向の応力拡大係数の分布が図 2-129, 130 で異なるのは、き裂形状の違いによるものと考えられる。

- (3) 表面き裂 (アスペクト比=0.26, 0.5),  $\sigma_b = 3.68 \text{ kgf/mm}^2$

図 2-131, 132 にそれぞれアスペクト比が 0.25, 0.5 の場合の応力拡大係数分布を示す。図より、

- (i) アスペクト比が小さい図 2-131 の場合、き裂表面点の応力拡大係数が小さく

なっている。

(ii) Raju-Newmanの解の方が、本解析結果より大きい応力拡大係数を示すことが分かる。

(4) 貫通き裂,  $\sigma_b = 3.68 \text{ kgf/mm}^2$

図2-133, 134に貫通き裂の場合の応力分布を示す。

図より,

(i) LBB基準の式<sup>11)</sup>の方が、かなり大きな応力拡大係数の評価となることが分かる。

なお、応力が負になる板厚の1/2以上の点については応力拡大係数としての意味はもたない。

#### 2.4.4 まとめ

種々のき裂寸法について、応力拡大係数解析を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 表面き裂, 引張荷重の場合, 平板の方が配管に比べ大きな応力拡大係数を示す。  
一方, 貫通き裂, 引張荷重の場合, 配管の方が平板に比べ, 概ね大きな応力拡大係数を示す。
- (2) 表面き裂, 曲げ荷重の場合, 最も大きくなるべき, き裂表面点の応力拡大係数が小さくなっている。これは表面点では応力の特異性が $r^{1/2}$ とは異なり, 厳密には $K_I$ を定義できないことも一因かと思われる。表面点近傍の評価例を図2-135に示す。
- (3) Raju-Newmanの解は, いずれも本解析結果より大きい値を示す。
- (4) 貫通き裂の場合, 引張荷重についてはLBB基準の式<sup>11)</sup>よりZahoorの式<sup>9)</sup>が妥当と思われる。
- (5) LBB基準の式<sup>11)</sup>は, 貫通き裂, 曲げ荷重の場合, 過大な値を与える。

表 2-29 応力拡大係数解析の解析ケース

NO.	形状	き裂寸法		荷 重	解析モデル (要素分割)
		a or c' mm	c mm		
1	配管	4.51	17.609	引張	図 2-107
2	平板	4.51	17.618	引張	図 2-108
3				曲げ	
4	配管	18.385	22.187	引張	図 2-107
5	平板	18.395	20.781	引張	図 2-108
6				曲げ	
7	配管	4.0	7.967	引張	図 2-109
8	平板			引張	図 2-110
9				曲げ	
10	配管	18.919	23.786	引張	図 2-109
11	平板	18.928	23.797	引張	図 2-110
12				曲げ	

注記) a : き裂深さ, c : き裂内周円弧長, c' : き裂外周円弧長

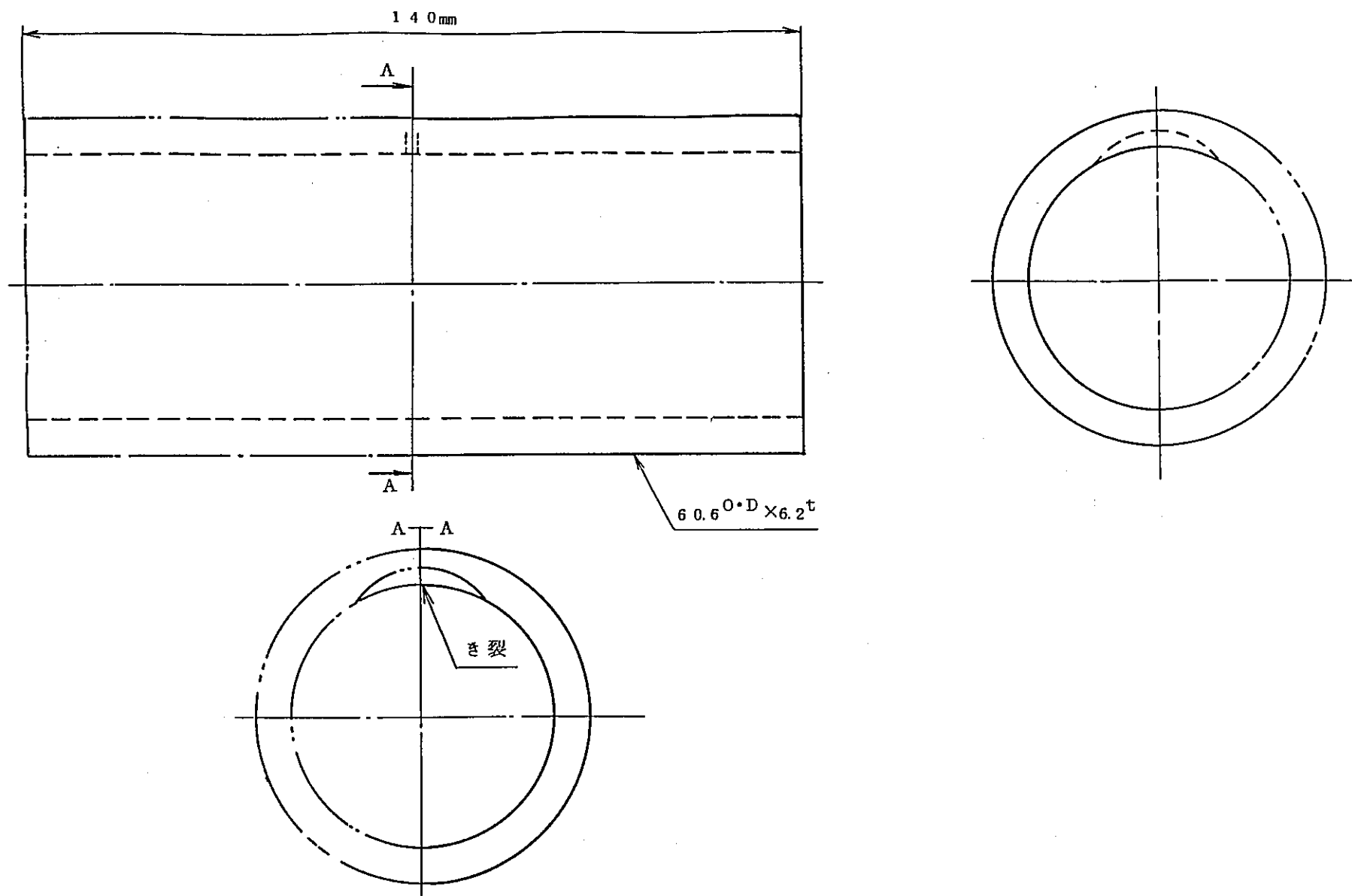


図 2 - 102 応力拡大係数解析の解析対象形状・寸法

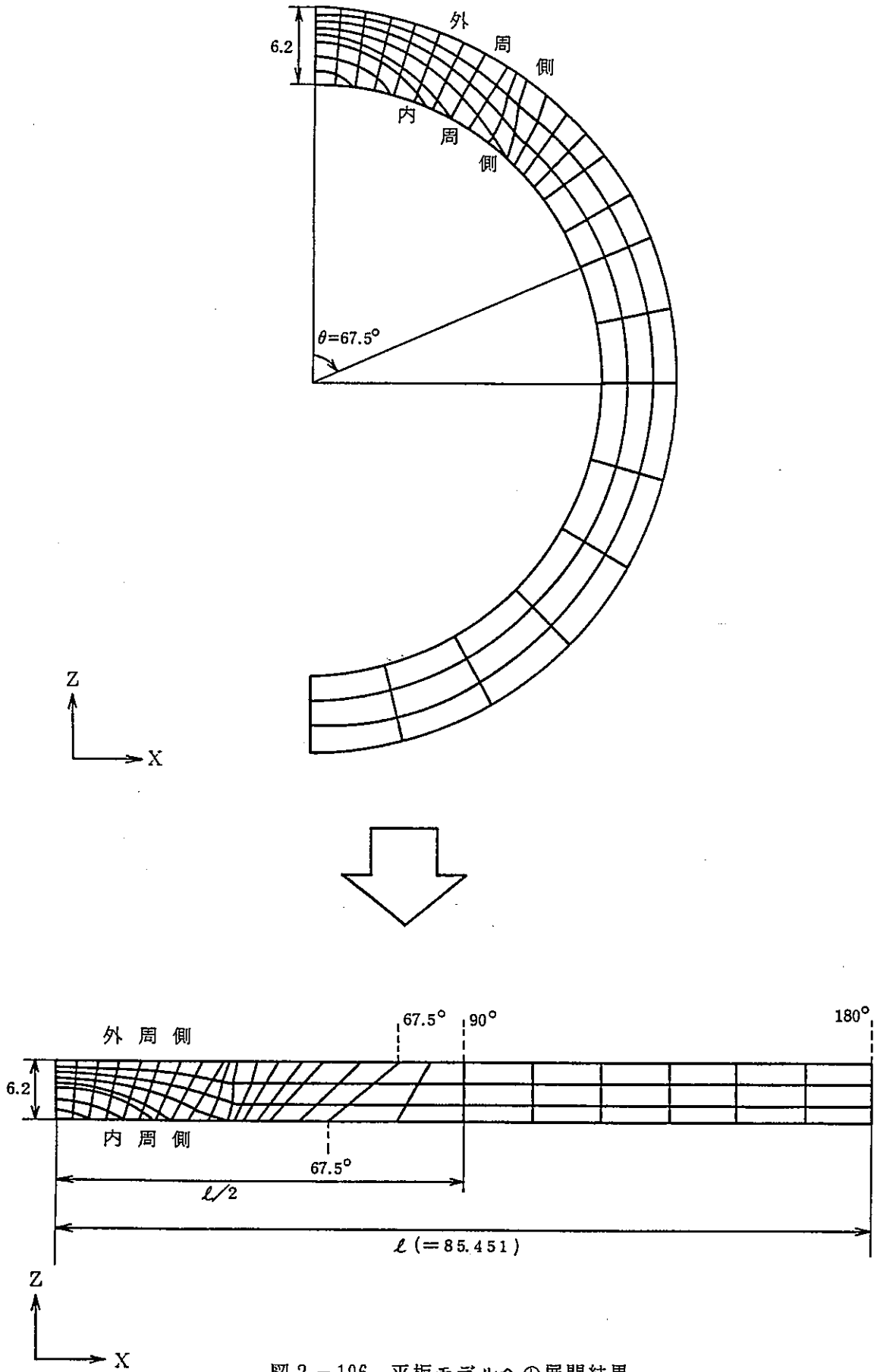
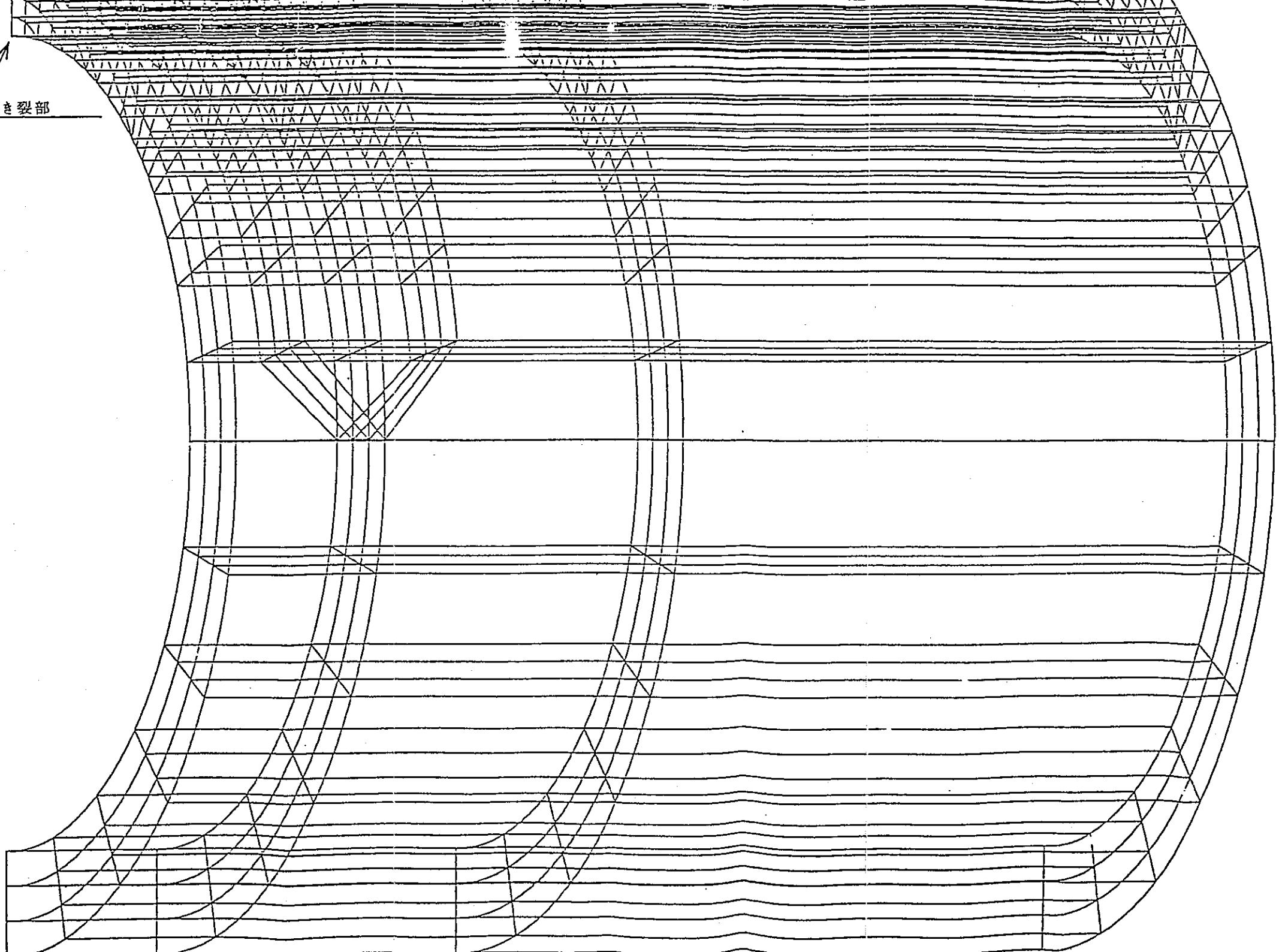


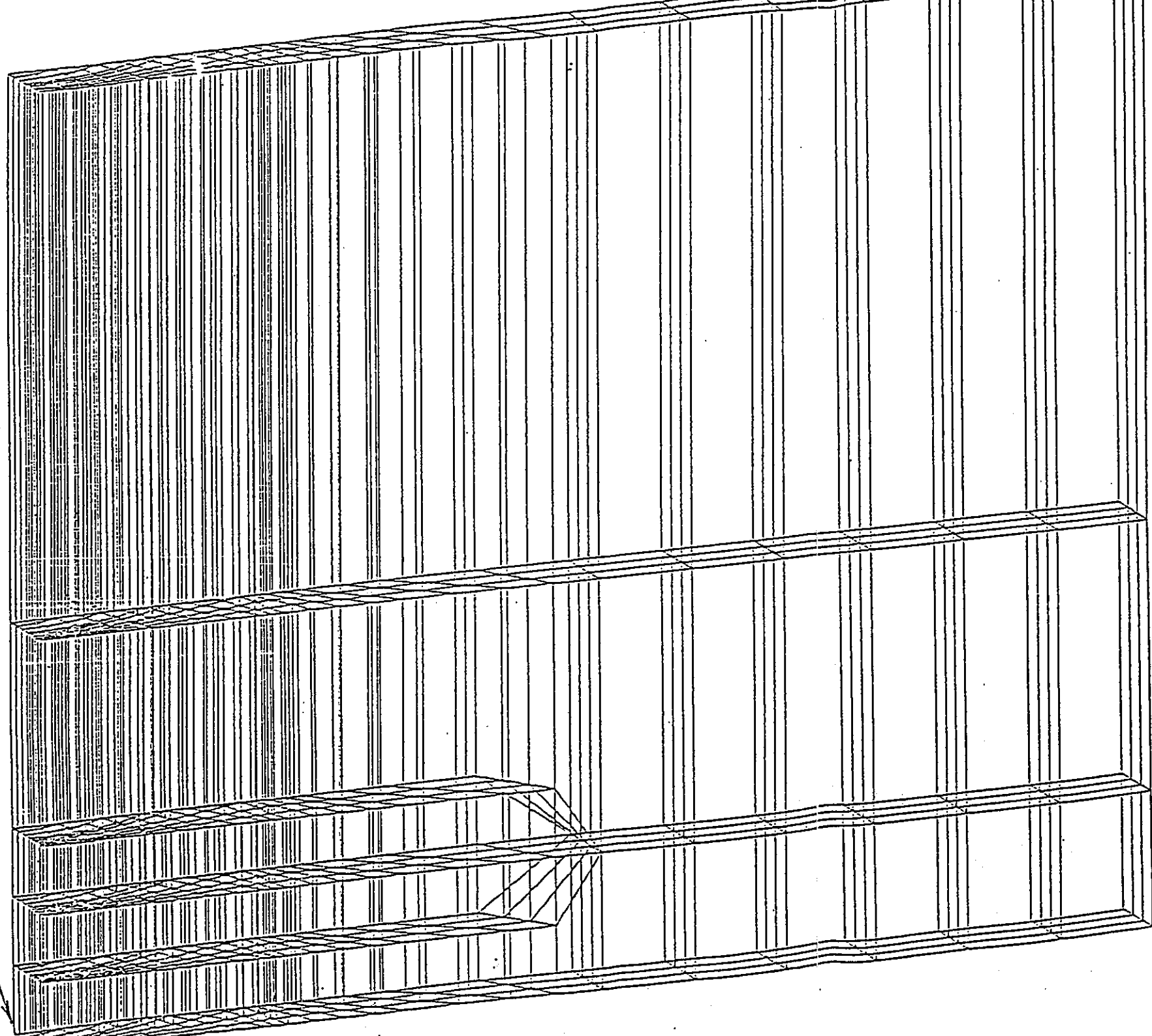
図 2 - 106 平板モデルへの展開結果



き裂部



破裂部



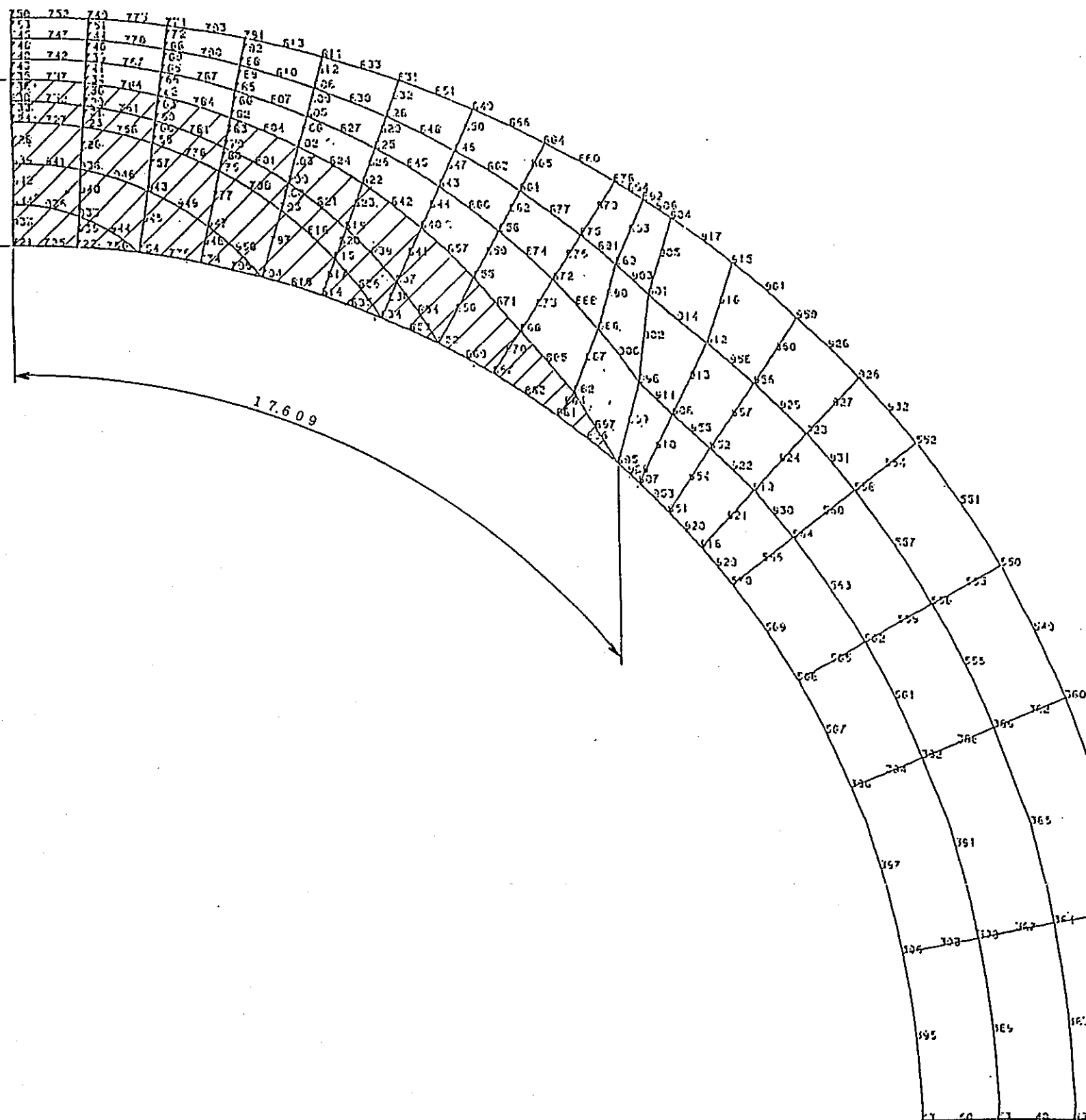


図 2 - 109 き裂形状 (配管モデル, 表面き裂)  
 (要素数 : 469, 節点数 : 2591)

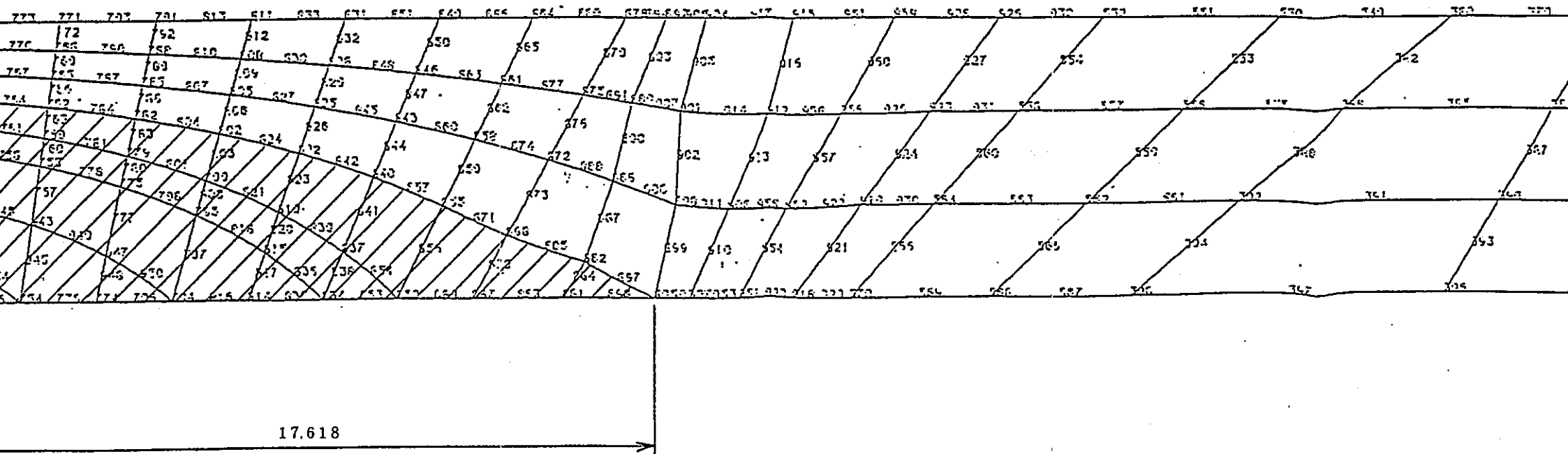


図 2 - 110 き裂形状 (平板モデル, 表面き裂)  
 (要素数 : 469, 節点数 : 2591)

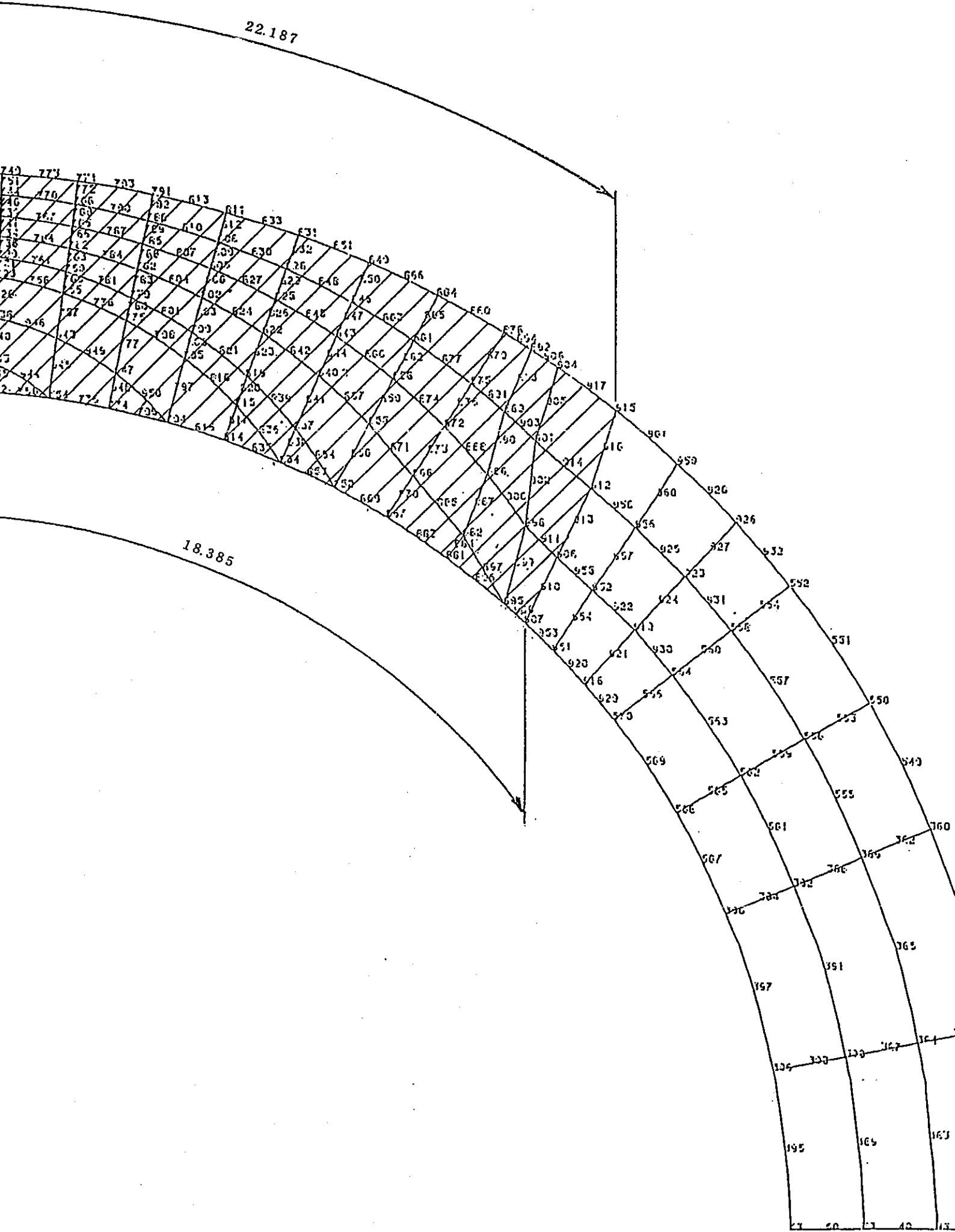


図2-111 き裂形状 (配管モデル, 貫通き裂)

(要素数: 469, 節点数: 2591)

20.781

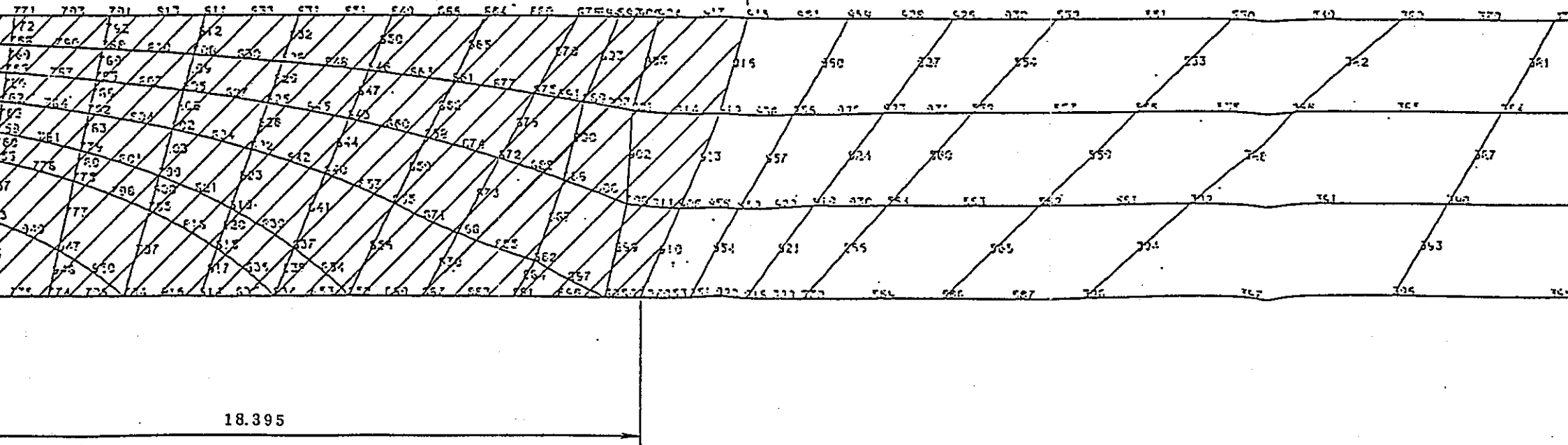
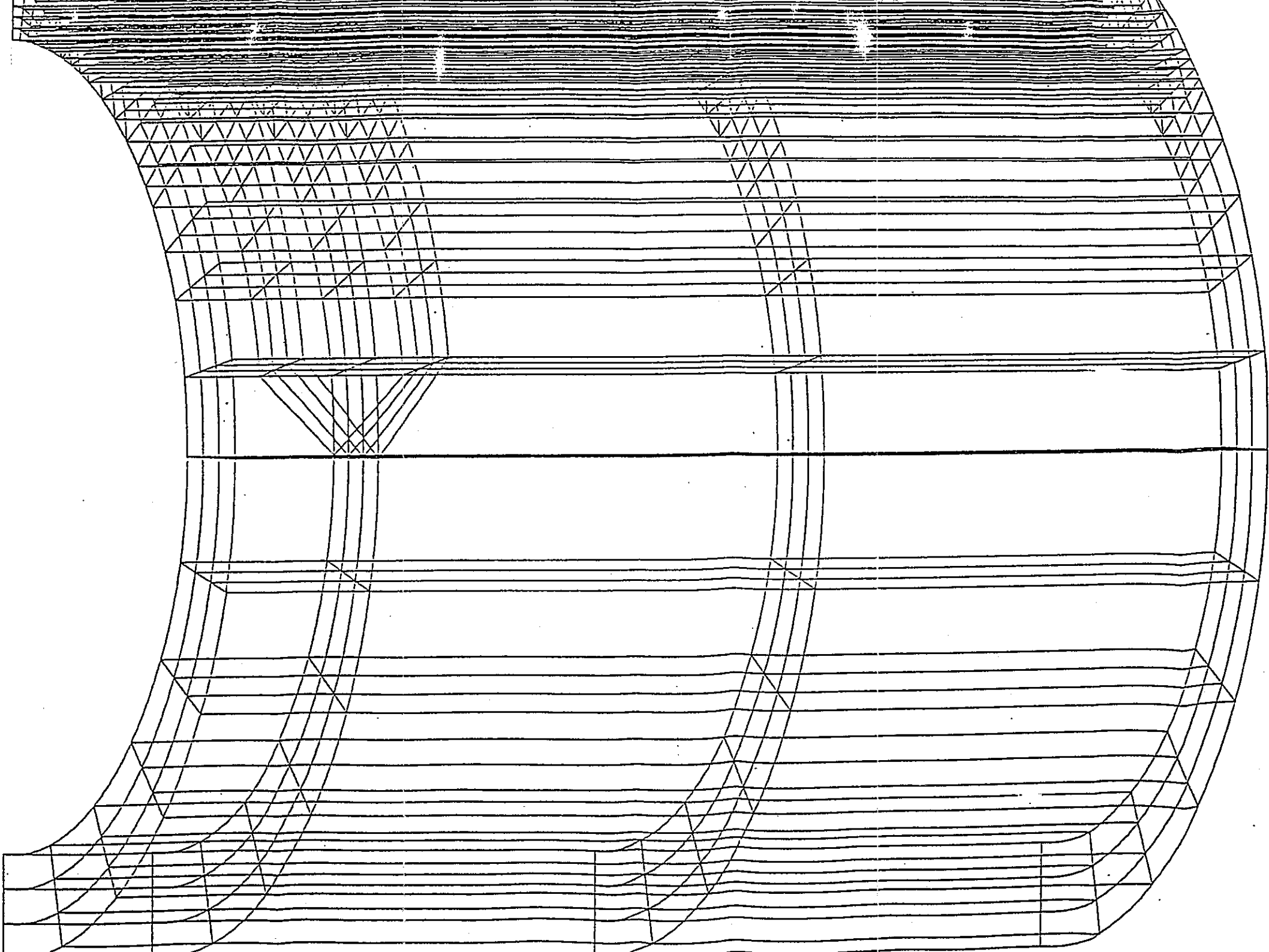
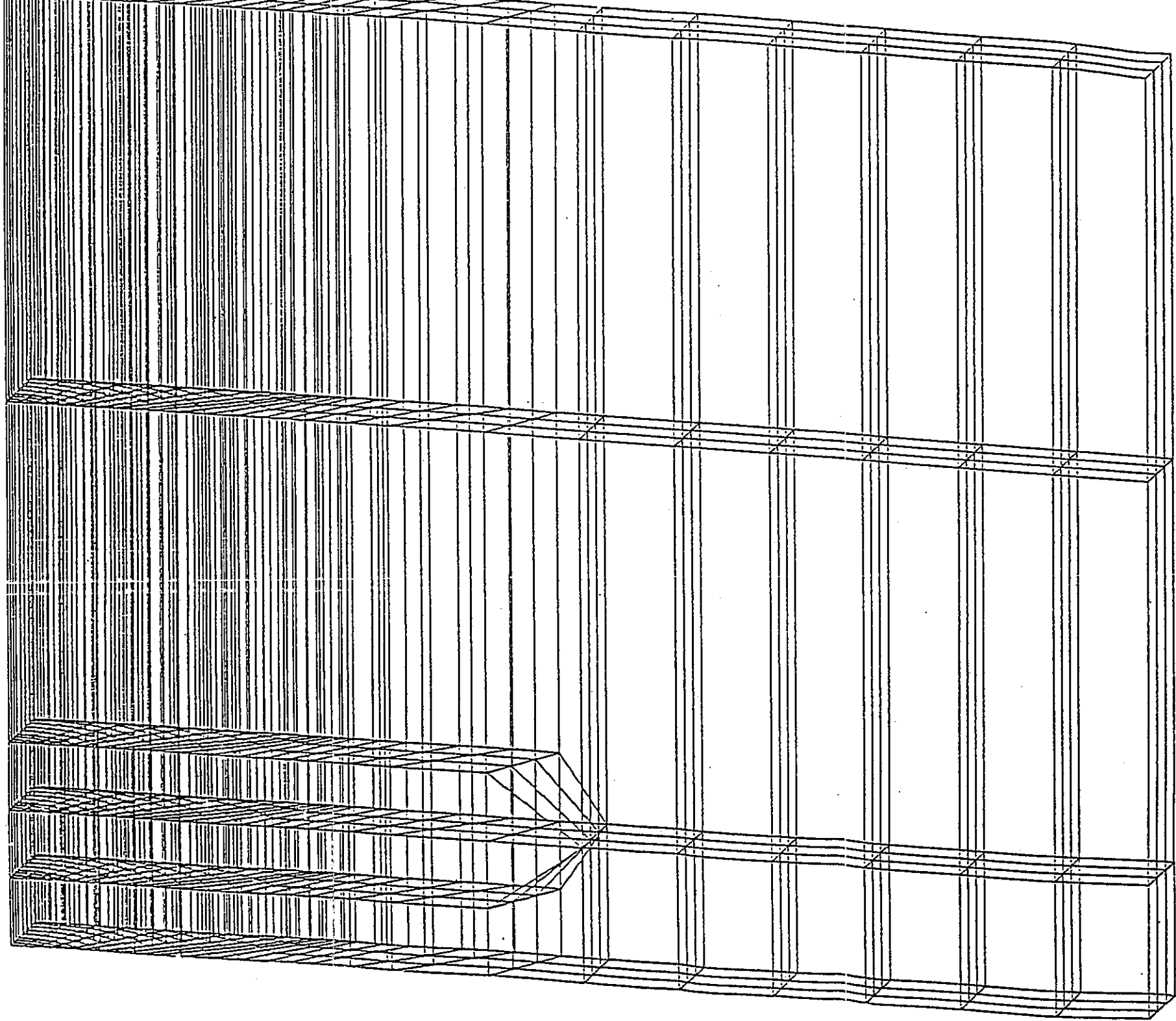


図2-112 き裂形状 (平板モデル, 貫通き裂)  
(要素数: 469, 節点数: 2591)







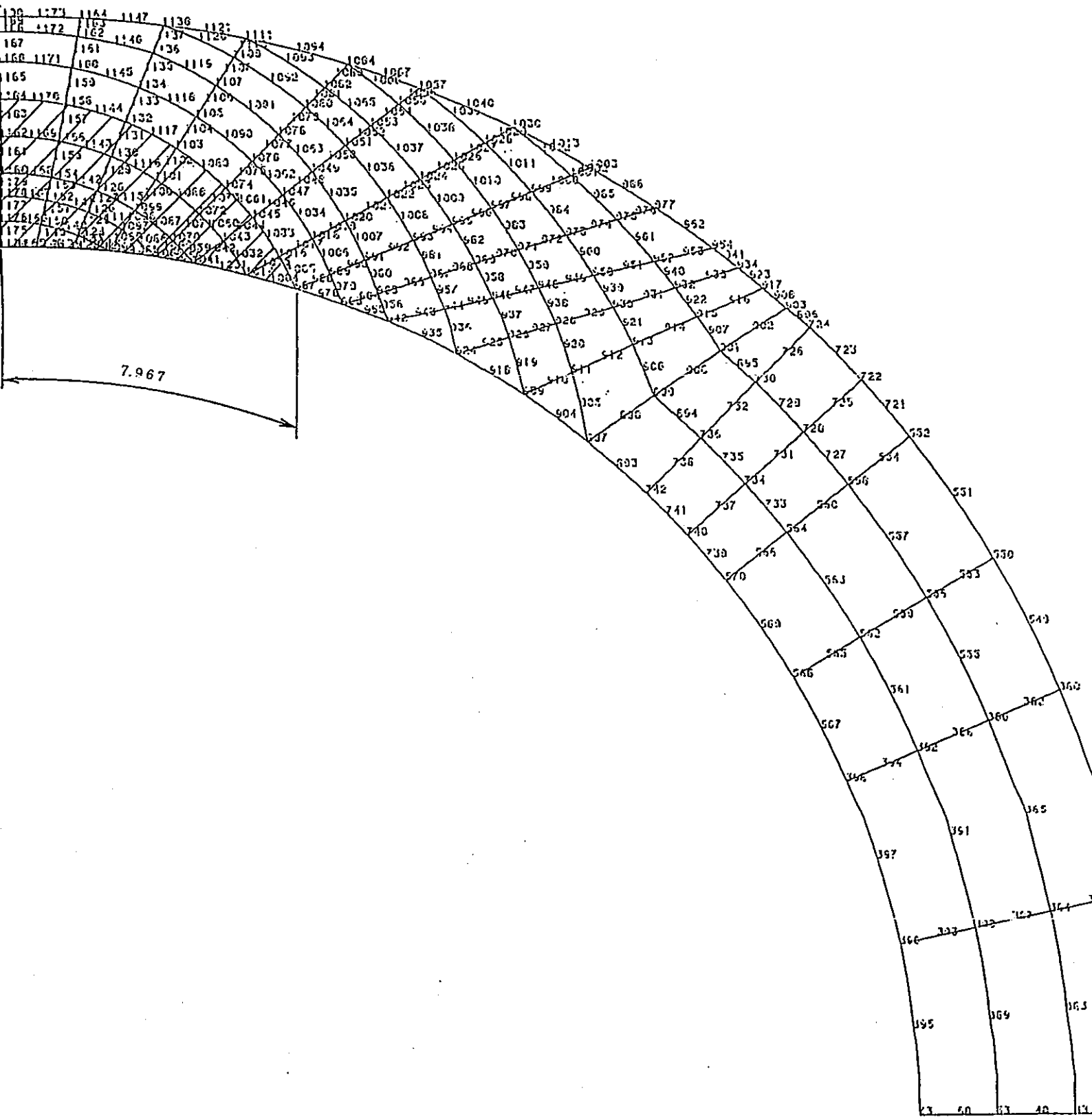
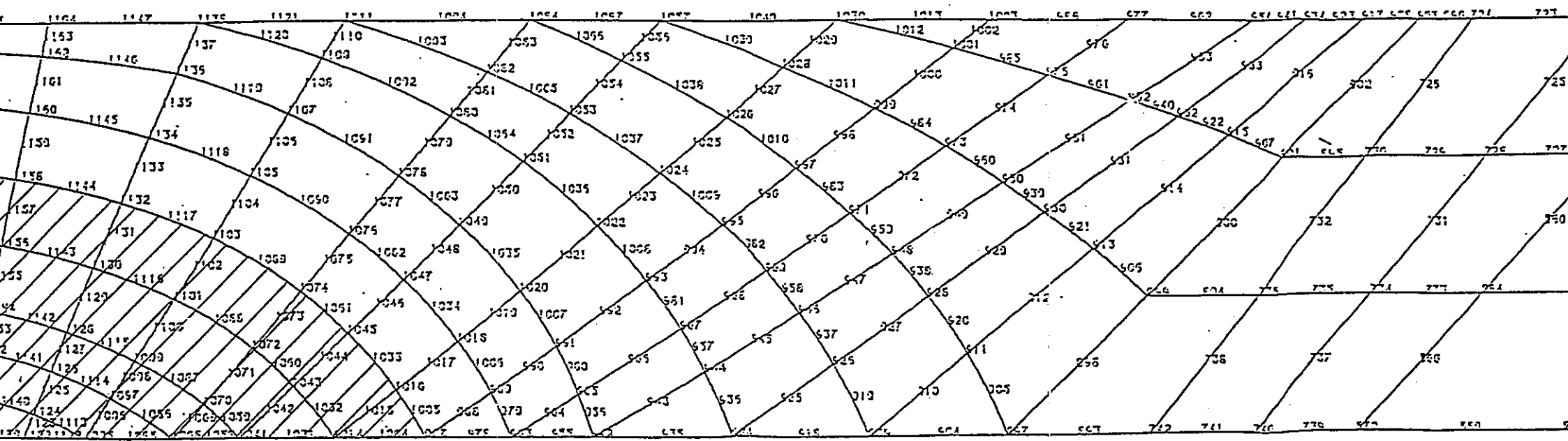


図 2 - 115 き裂形状 (配管モデル, 表面き裂)  
 (要素数 : 614, 節点数 : 3190)



7.967

図2-116 き裂形状 (平板モデル, 表面き裂)  
 (要素数: 614, 節点数: 3190)

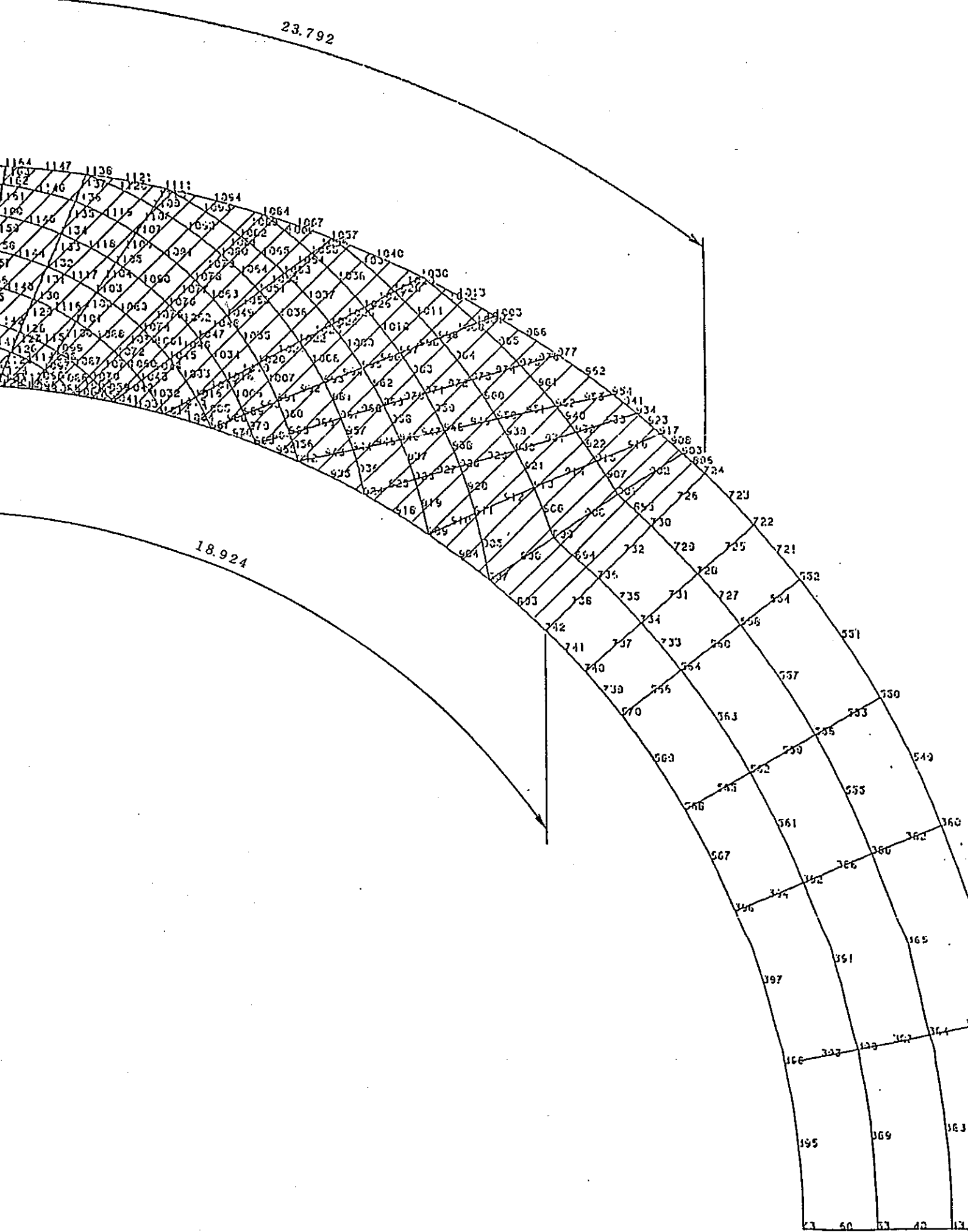
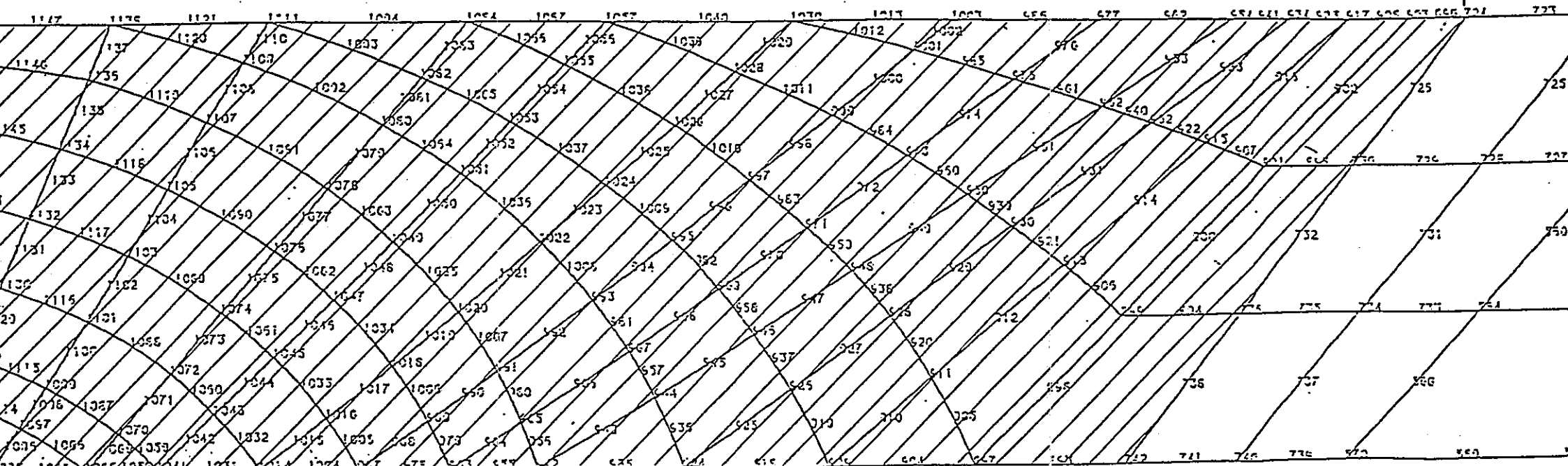
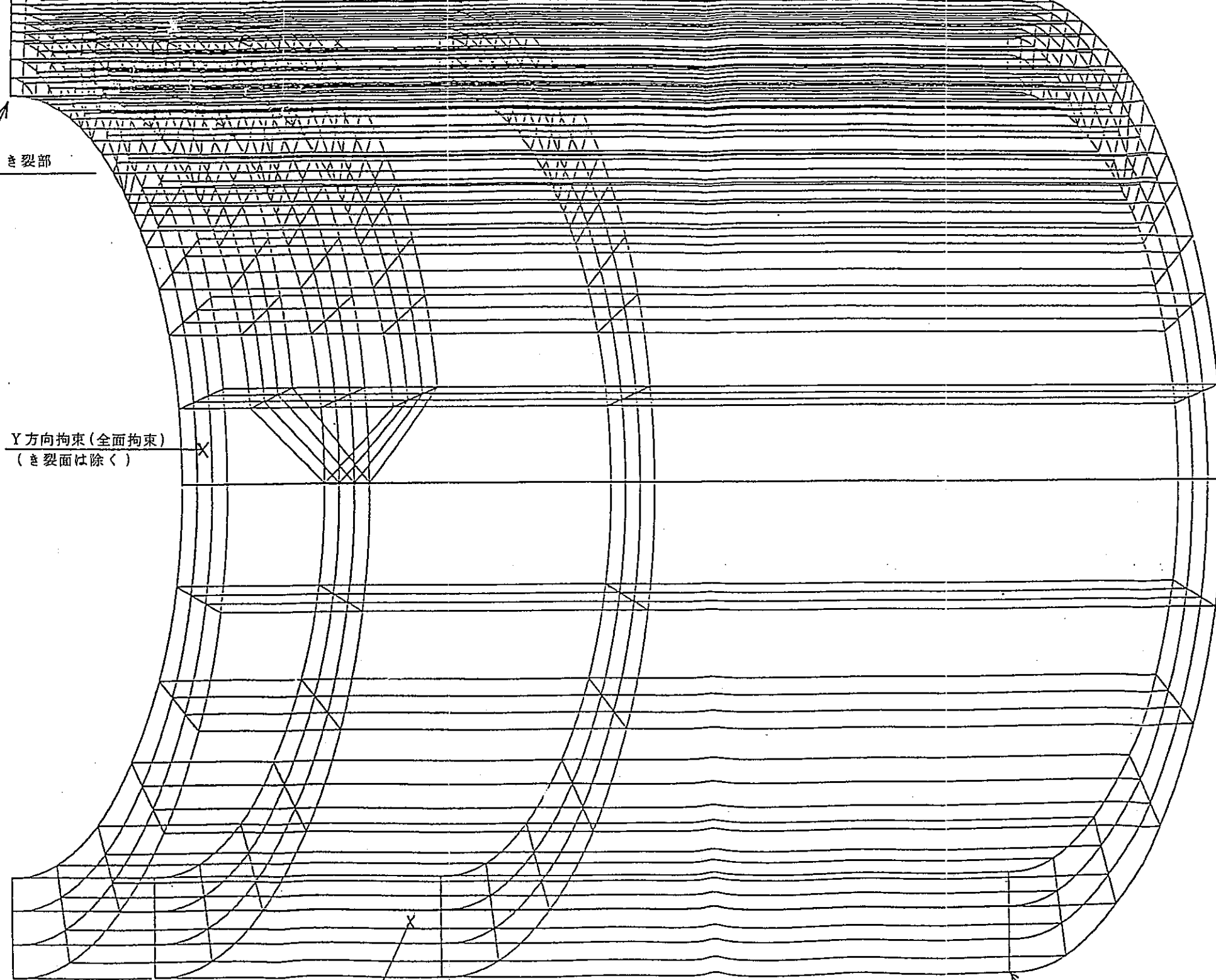


図 2-117 き裂形状 (配管モデル, 貫通き裂)  
 (要素数: 614, 節点数: 3190)



18.928

図2-118 き裂形状 (平板モデル, 貫通き裂)  
 (要素数: 614, 節点数: 3190)

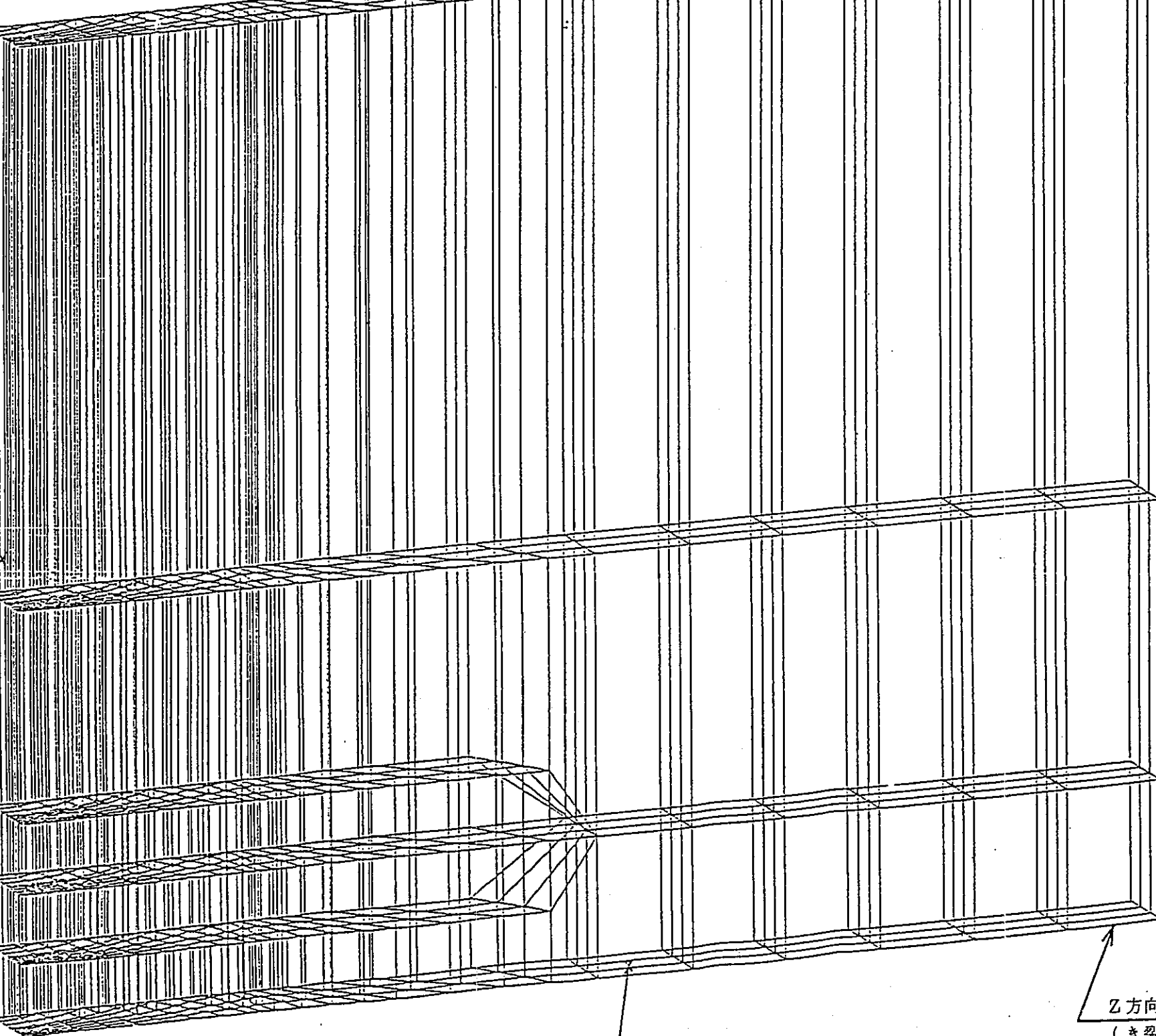


き裂部

Y方向拘束 (全面拘束)  
(き裂面は除く)

Z

Z方向拘束 (全面拘束)

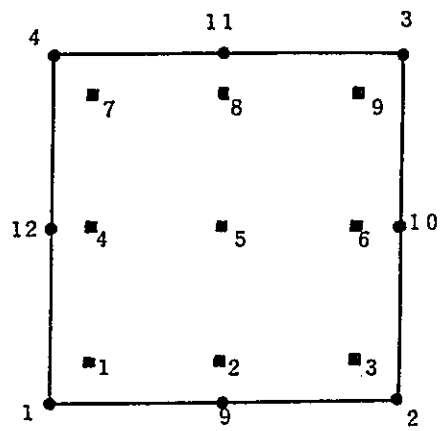
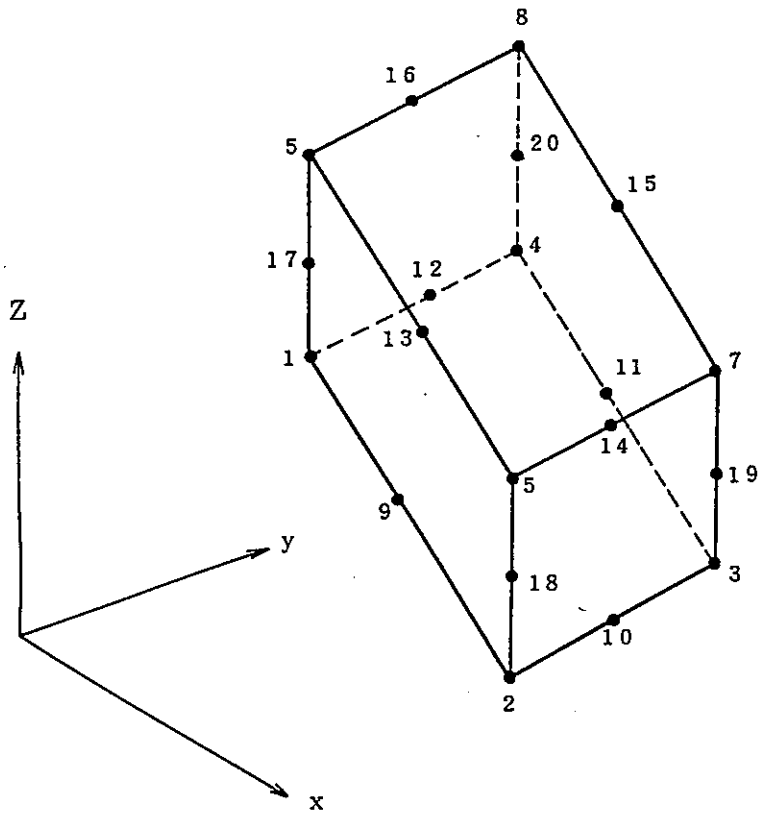


Y



Z方向拘束(1点拘束)  
(き裂面の上側)

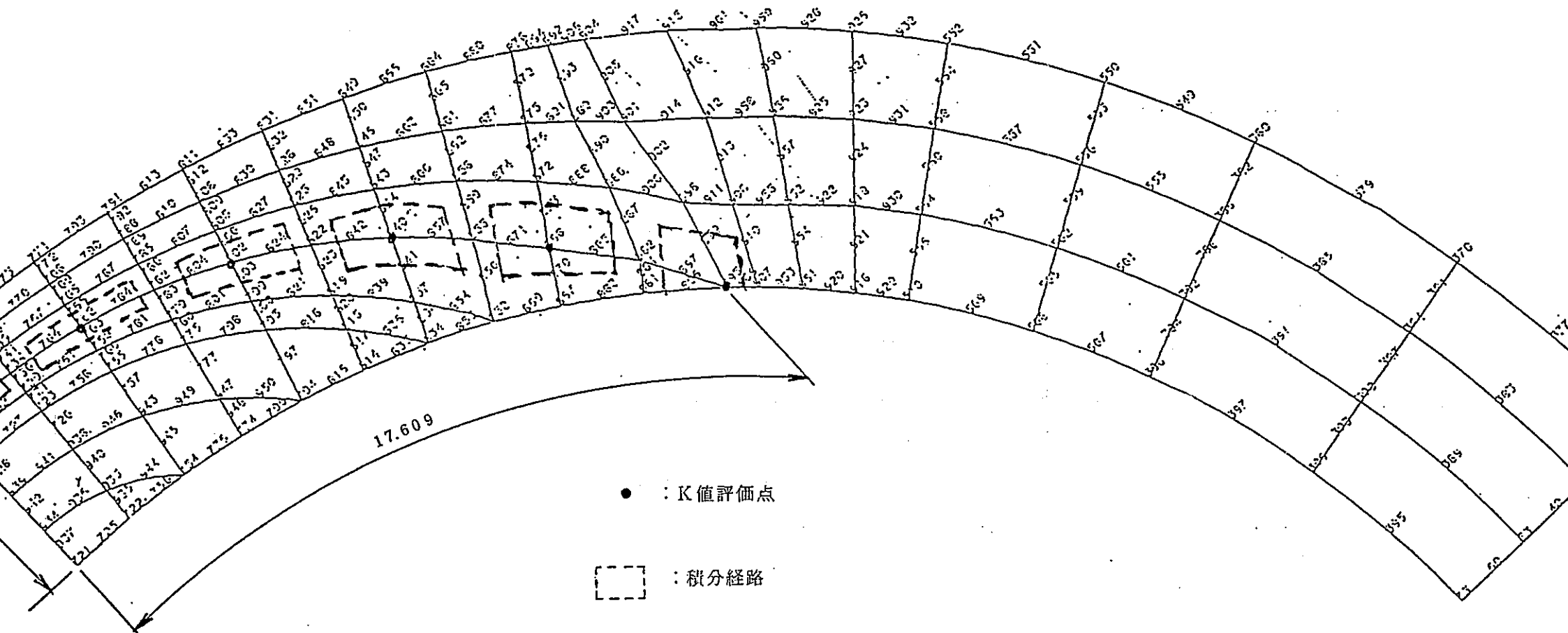
X方向拘束(全面拘束)



(a) 要素形状

(b) 数値積分点  
(板厚方向には3点)

図2-121 20節点ソリッド要素

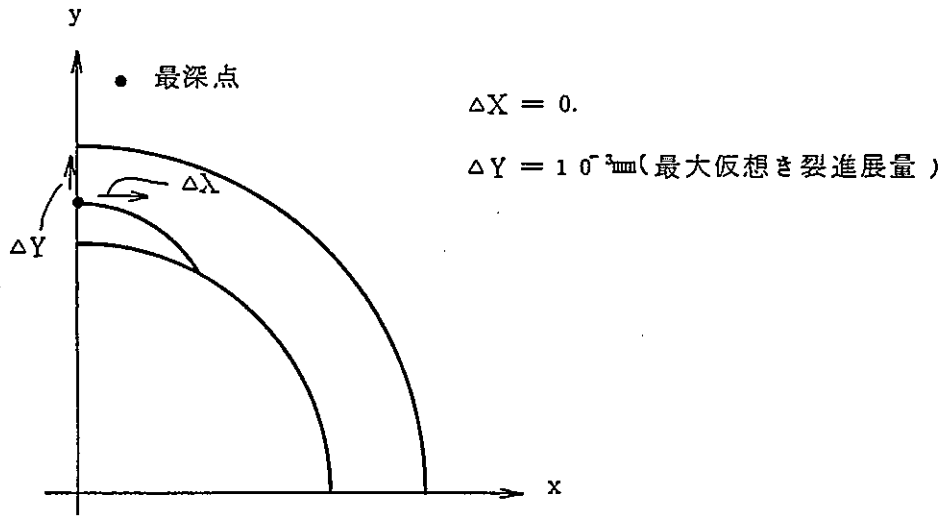


● : K値評価点

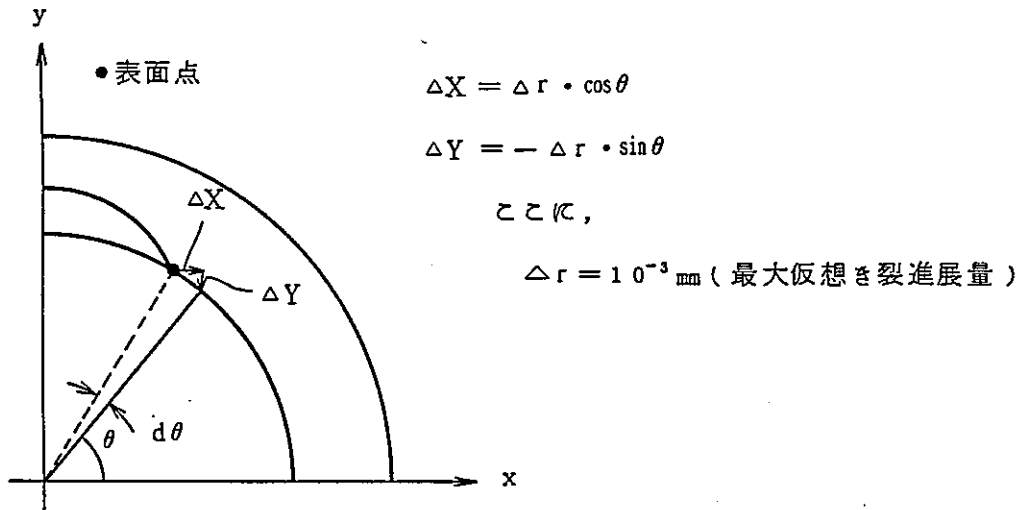
□ : 積分経路

図2-123 積分経路  
(配管モデル, き裂寸法 4 mm × 17.609mm)





(a) き裂最深点



(b) き裂表面点

図 2-124 仮想き裂進展量

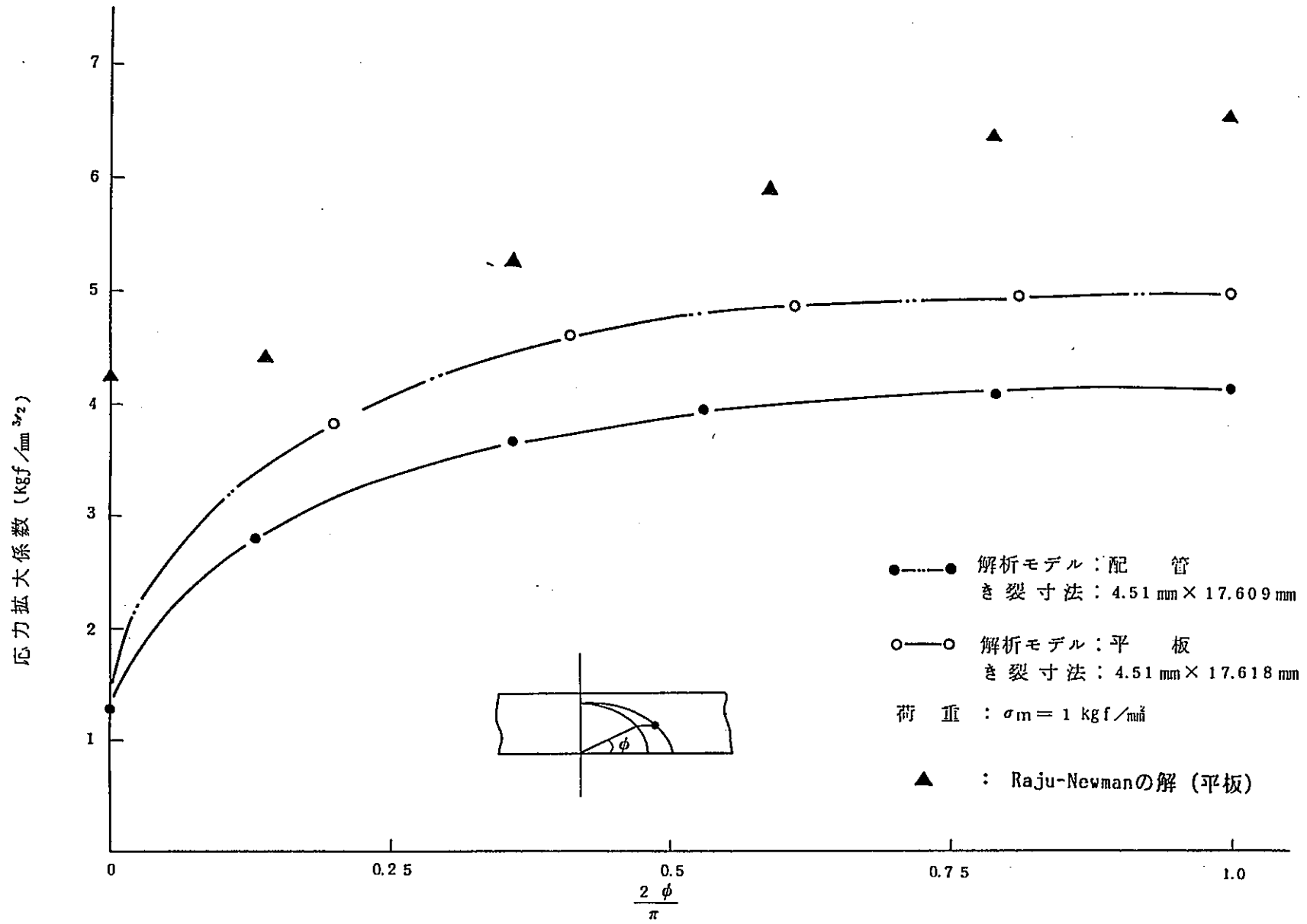


図2-127 応力拡大係数分布 (表面き裂：アスペクト比=0.26,  $\sigma_m = 1 \text{ kgf/mm}^2$ )

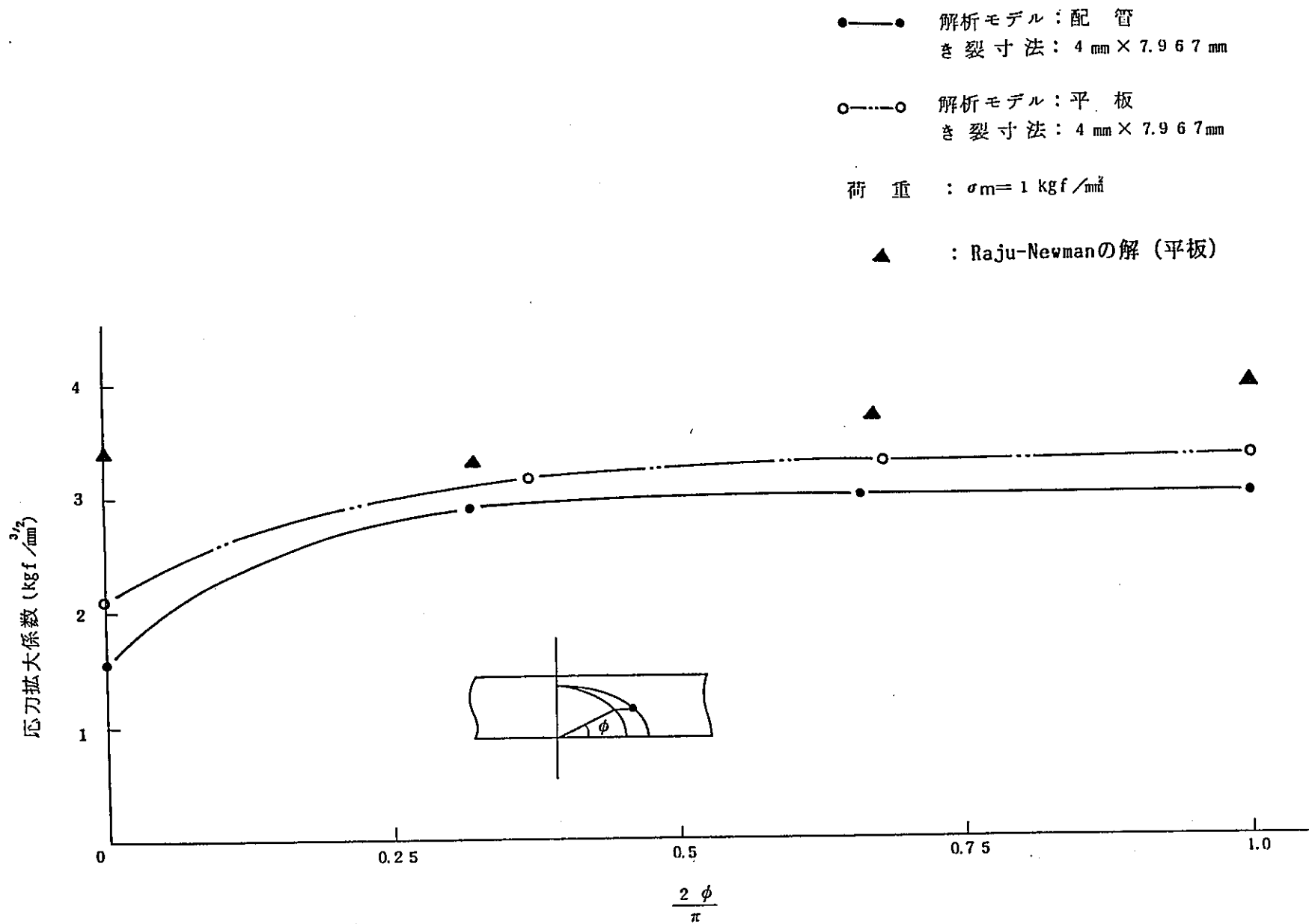


図2-128 応力拡大係数分布 (表面き裂：アスペクト比=0.5,  $\sigma_m = 1 \text{ kgf/mm}^2$ )

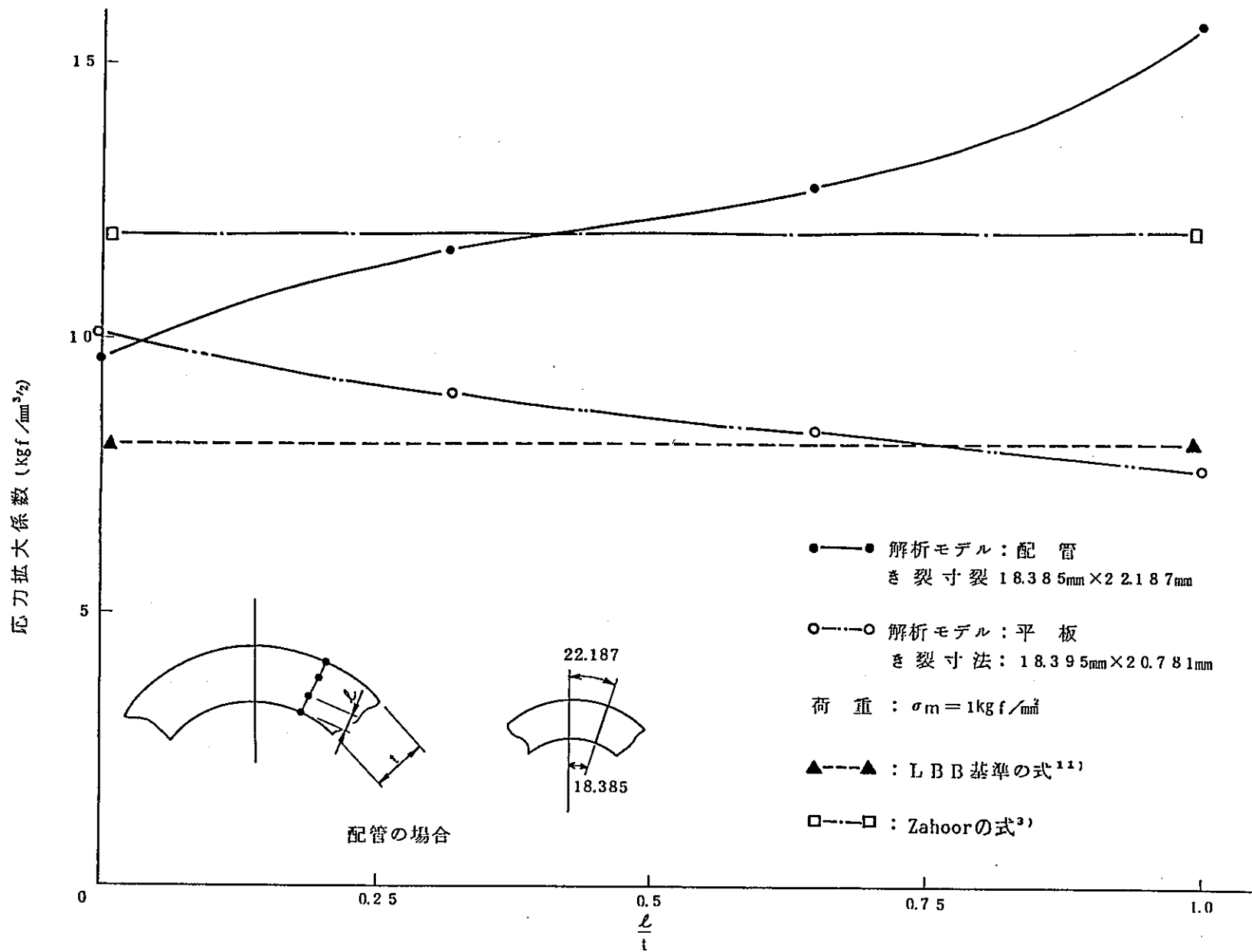


図2-129 応力拡大係数分布 (貫通き裂： $\sigma_m = 1\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

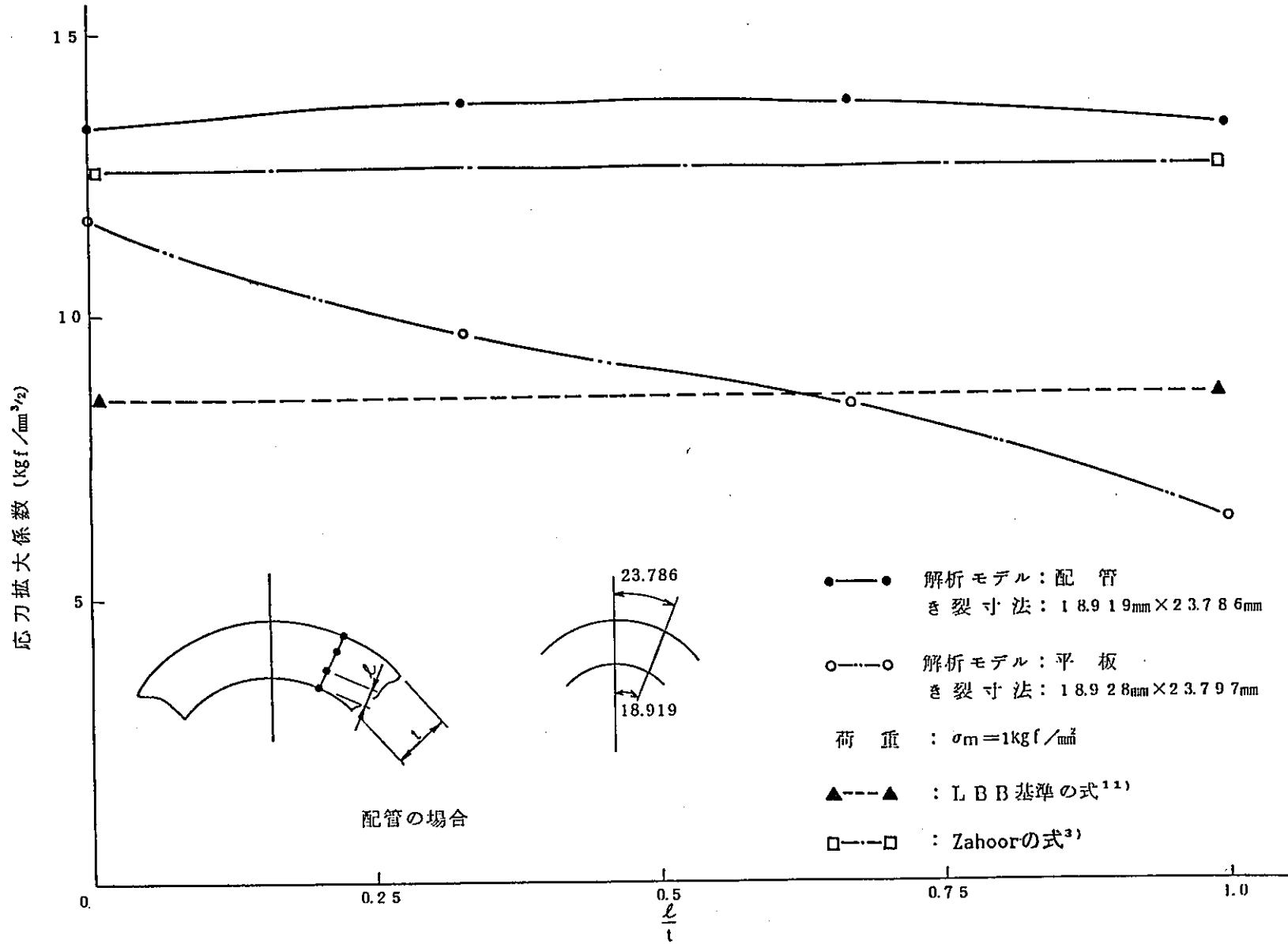


図2-130 応力拡大係数分布 (貫通き裂： $\sigma_m = 1 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ )

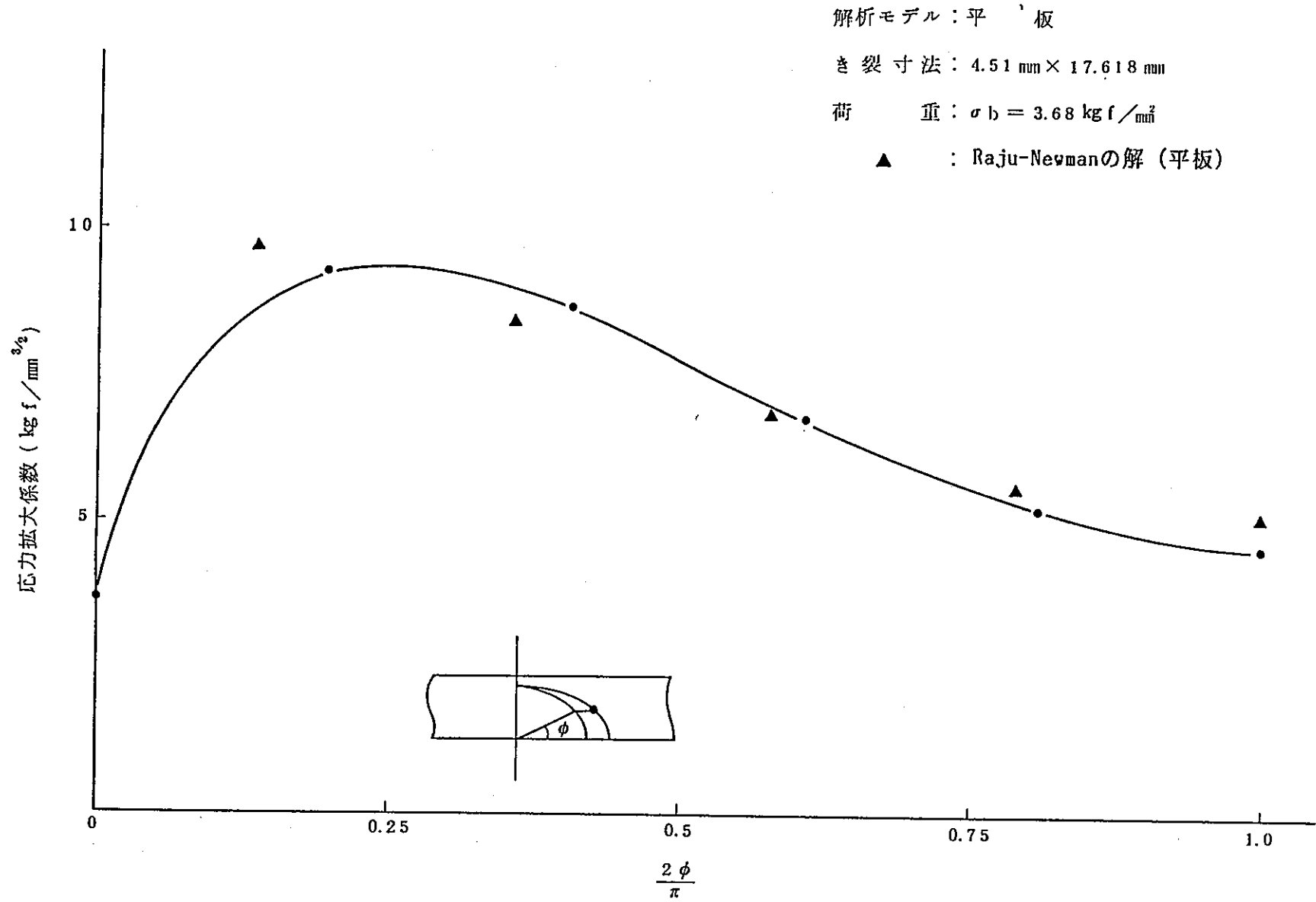


図 2-131 応力拡大係数分布 (表面き裂：アスペクト比=0.26,  $\sigma_b = 3.68 \text{ kgf/mm}^2$ )

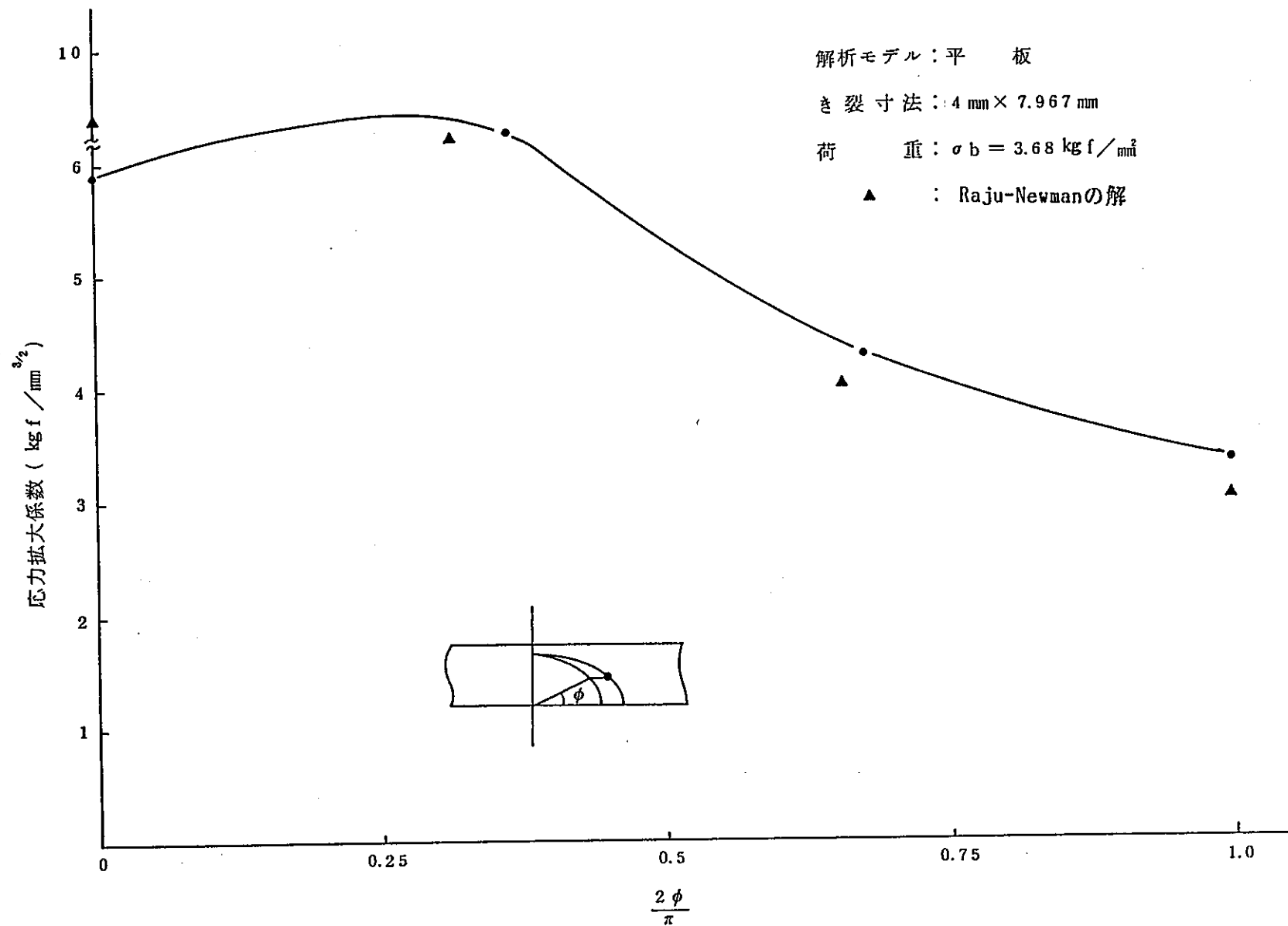


図 2-132 応力拡大係数分布 (表面き裂：アスペクト比=0.5,  $\sigma_b = 3.68 \text{ kgf/mm}^2$ )

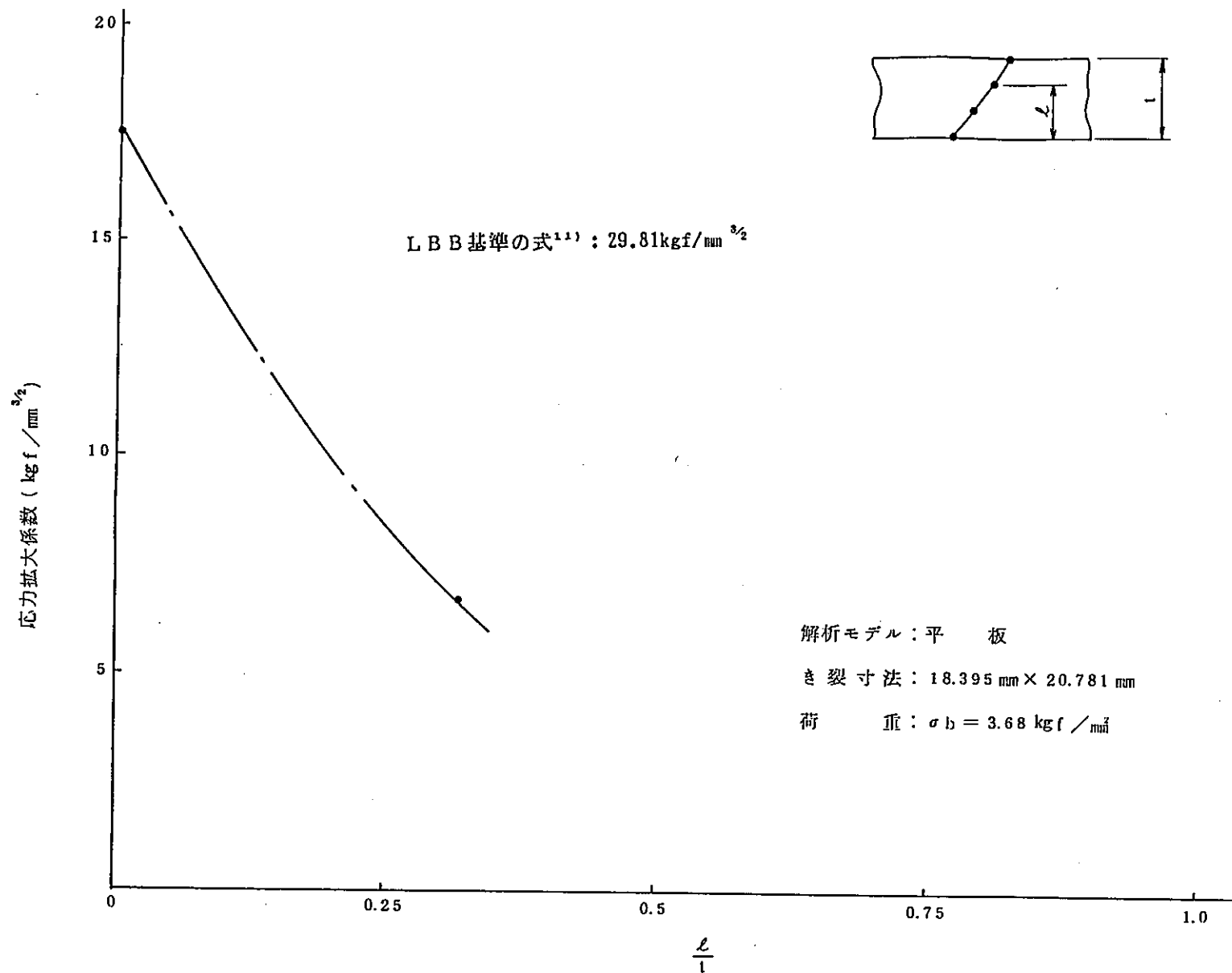


図 2-133 応力拡大係数分布 (解析モデル : 平板, き裂寸法 :  $18.395\text{ mm} \times 20.781\text{ mm}$ )



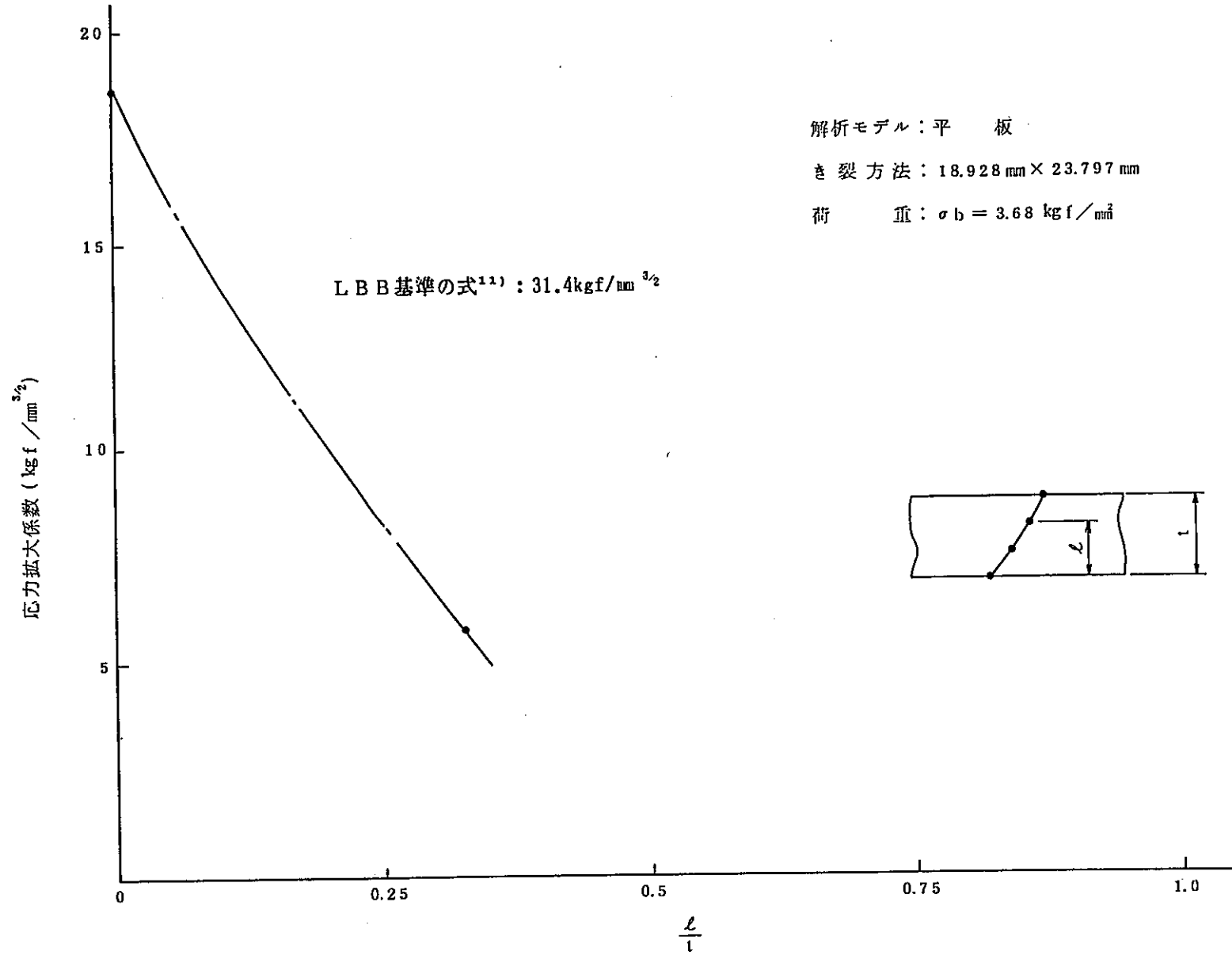


図2-134 応力拡大係数分布 (解析モデル：平板, き裂寸法：18.928 mm × 23.797 mm)

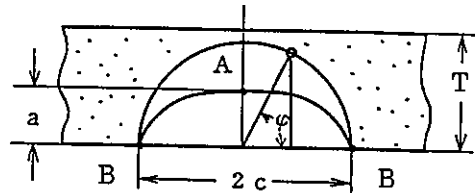
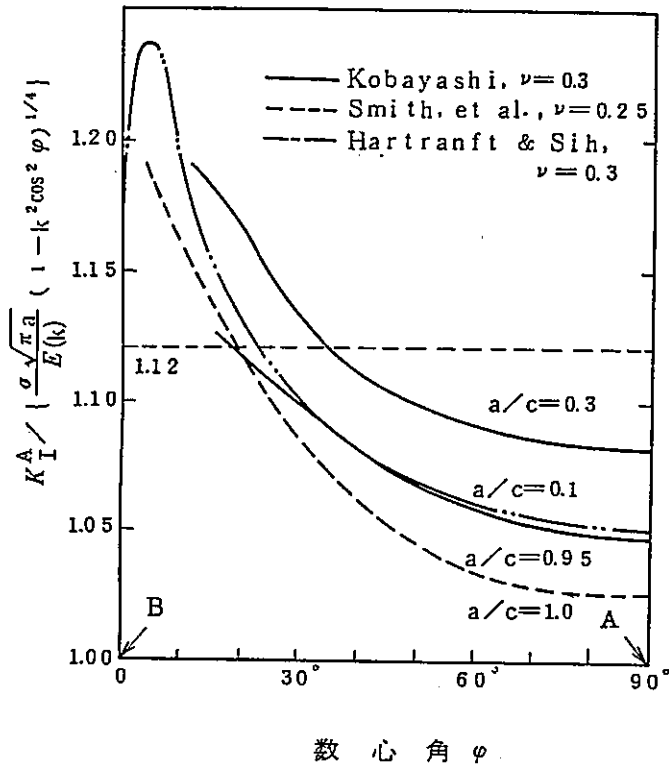


図 2 - 135 半楕円形表面クラックの  $K_I$  分布 ( $a/T < 1$ )  
 [Kobayashi]

## 2.5 結 言

新型転換炉入口管LBB性を評価することを目的として、入口管を模擬した供試体を用いたき裂進展試験、CT試験片を用いた破壊靱性試験、応力拡大係数解析等を行い、以下の結論を得た。

### 2.5.1 疲労き裂進展試験

SUS316・50ASch80配管2体（室温大気中、高温高压水中各1体）について疲労き裂試験を実施した結果、以下の結論を得た。

- (1) 高温水中におけるき裂進展速度は、大気中に比較して加速される。ただし、応力拡大係数範囲が100MPam以上では、環境による加速効果は小さくなる。
- (2) 大気中、高温水中のいずれも、配管によるき裂進展速度は従来得られている試験片によるデータにほぼ一致する。
- (3) き裂進展速度に対する母材、溶接熱影響部、溶着金属の材質の相違の影響は小さい。

き裂進展速度に対して支配的な因子は、室温大気中と高温水中との、環境の効果である。

### 2.5.2 破壊靱性試験

入口管材料（SUS316NG）の延性破壊特性を検討するために、管材料より採取したコンパクトテンション試験片を用いて、弾塑性破壊靱性値 $J_{in}$ を求めると共に、極低サイクル繰返し疲労試験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 母材の $J_{in}$ 値は、20℃で113kgf/mm、300℃で73kgf/mmであった。
- (2) 溶着金属の $J_{in}$ 値は、20℃で32kgf/mmであり、母材に比べてかなり低い。
- (3) 完全両振り負荷において、寿命100回で破壊する負荷は、 $J_{in}$ 値の約1/10レベルである。

### 2.5.3 静的四点曲げき裂進展試験

90°の貫通切欠きを有する供試体の静的四点曲げき裂進展試験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 荷重－き裂進展量の関係が得られた。

なお、最大荷重は、9.3tonf、き裂進展量はき裂両端合計で約33mmまで測定した。

- (2) ポテンシャル出力はき裂情報をよく表わしき裂進展量に対し比例的に出力される。  
また、A C法、D C法共に、ほぼ同等の特性を有する。

#### 2.5.4 応力拡大係数解析

種々のき裂寸法について、応力拡大係数解析を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 表面き裂、引張荷重の場合、平板の方が配管に比べて大きな応力拡大係数を示す。  
一方、貫通き裂、引張荷重の場合、配管の方が平板に比べ、概ね大きな応力拡大係数を示す。
- (2) Raju-Newmanの解は、いずれも本解析結果より大きな値を示す。
- (3) 貫通き裂の場合、引張荷重については、L B B基準の式<sup>1)</sup>よりZahoorの式<sup>3)</sup>が妥当と思われる。
- (4) L B B基準の式<sup>1)</sup>は、貫通き裂、曲げ荷重の場合、過大な値を与える。

## 2.6 参考文献

- 1) PNC ZJ3124 87-013 「原子炉本体入口管LBB評価試験（第2次）」  
(1987年8月)
- 2) J.C. Newman, Jr., I.S. Raju, An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack, Eng. Fracture Mechanics, Vol. 15 (1981), 185.
- 3) Zahoor, A., Closed Form Expressions for Fracture Mechanics Analysis of Cracked Pipes, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 107 (1985), 203.
- 4) Sanders, J. L., Circumferential Through-Crack in a Cylindrical Shell Under Combined Bending and Tension, ASME Journal of Applied Mechanics, vol. 50 (1983), 221.
- 5) Hishida, M., et al., Experimental Study on Crack Growth Behavior for Austenitic Stainless Steel in High Temperature Pure Water, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 108 (1986), 226.
- 6) Bamford, W. H., Fatigue Crack Growth of Stainless Steel Piping in a Pressurized Water Reactor Environment, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 101, 1979, 73.
- 7) Shimizu, T., et al., Surface Crack Propagation Analysis under BWR Environment, Presented at the 4th National Congress on Pressure Vessel and Piping Technology, ASME, June 1983.
- 8) 日本機械学会基準, S001 (昭56) .
- 9) Parks, D. M., Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 12 (1977), 353.
- 10) Parks, D. M., Proc. 1st Int. Conf. Num. Meth. Fract. Mech., 1978, 465.
- 11) Feddersen, C. F., ASTM STP 410 (1966), P77.

添 付 資 料 2.

## 添 付 資 料 2.1

### Raju-Newmanの式との比較解析例

Raju-Newmanの式との比較解析例

1. 解析対象

図-1に示す形状の平板を解析し、応力拡大係数の分布を求め、Raju-Newmanによる解と比較してみる。

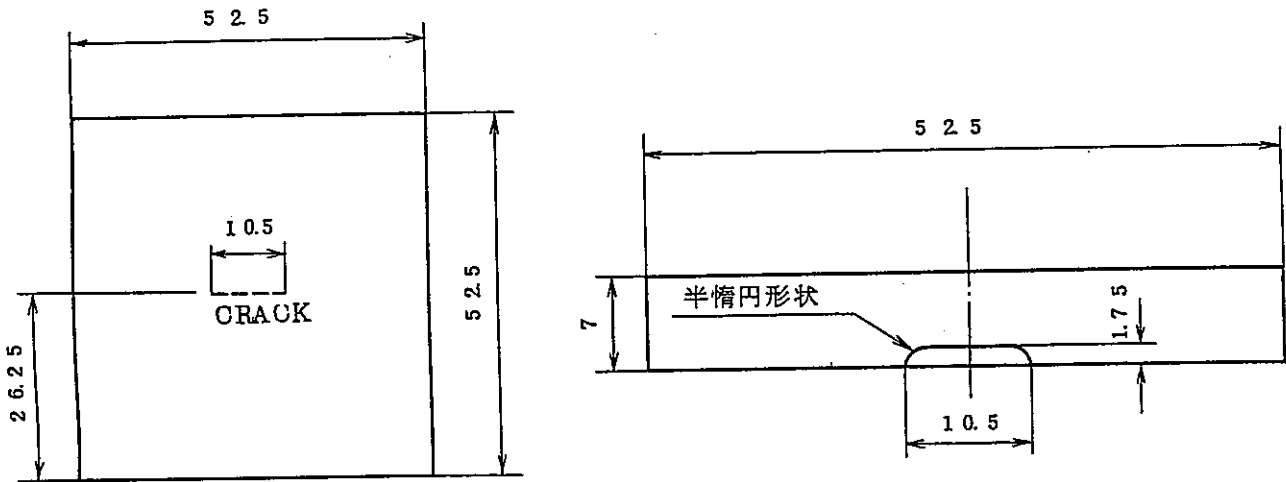
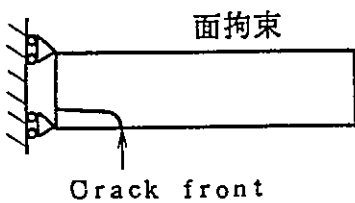


図-1 解析モデル

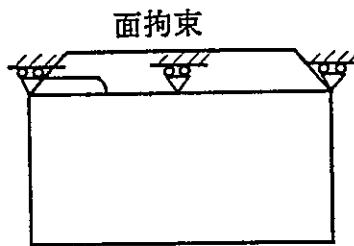
2. 解析条件

(1) 境界条件

解析に用いる境界条件を(A), (B), (C)に示す。

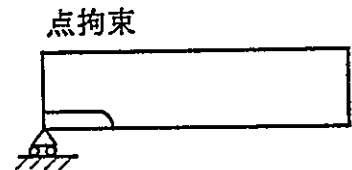


(A)



(B)

き裂部分は除く。



(C)

上下方向に移動しないように1点を拘束する。

(A), (B)は対称条件である。

境界条件としては、(A) + (B) + (C)を用いる。



(2) 材料定数

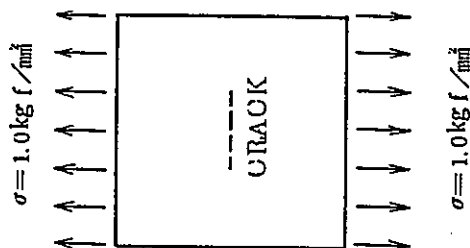
縦弾性定数 (E) =  $2.1 \times 10^4 \text{ kg f/mm}^2$

ポアソン比 ( $\nu$ ) = 0.3

以上の値を物性条件として使用した。

(3) 荷重条件

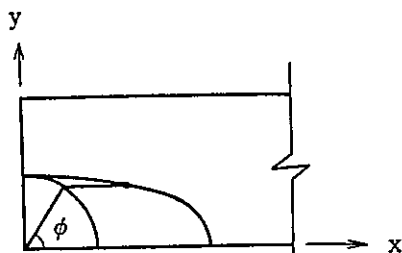
荷重条件としては端部に一様引張を与える。



(4) 解析モデル

対称性より全体の 1 / 4 を取り出し、要素数 186、節点数 1070、20 節点立体要素 (ELEMENT TYPE 21) を使用して解析した。要素分割を図 - 2 に示す。

## 3. 仮想変位量

Path 1, 2\*

- ・ 隅節点は、 $\phi = 90^\circ$  方向のみに0.001移動。
- ・ 中間接点は、 $\phi = 90^\circ$  方向に0.0075移動、  
あるいは、 $\phi = 90^\circ$  方向に0.0005移動。

Path 3, 4\*

- ・ 隅節点は、 $\phi = 78^\circ$  方向のみに0.001移動。
- ・ 中間接点は、 $\phi = 78^\circ$  方向に0.00075移動、  
あるいは、 $\phi = 78^\circ$  方向に0.0005移動。

Path 5, 6\*

- ・ 隅節点は、 $\phi = 64^\circ$  方向のみに0.001移動。
- ・ 中間接点は、 $\phi = 64^\circ$  方向に0.00075移動、  
あるいは、 $\phi = 64^\circ$  方向に0.0005移動。

Path 7, 8\*

- ・ 隅節点は、 $\phi = 47^\circ$  方向のみに0.001移動。
- ・ 中間接点は、 $\phi = 47^\circ$  方向に0.00075移動、  
あるいは、 $\phi = 47^\circ$  方向に0.0005移動。

Path 9, 10\*

- ・ 隅節点は、 $\phi = 27^\circ$  方向のみに0.001移動。
- ・ 中間接点は、 $\phi = 27^\circ$  方向に0.00075移動、  
あるいは、 $\phi = 27^\circ$  方向に0.0005移動。

Path 11, 12\*

- ・ 隅節点は、 $\phi = 0^\circ$  方向のみに0.001移動。
- ・ 中間接点は、 $\phi = 0^\circ$  方向に0.00075移動、  
あるいは、 $\phi = 0^\circ$  方向に0.0005移動。

注記) \* : 奇数の場合、評価点に直接接続している節点のみ移動。  
偶数の場合、評価点回りのより広い範囲を移動。

#### 4. 解析結果

解析結果を表-1に示す。

表-1で分かるように引張荷重の場合、解析結果とRaju-Newmonの式は10%程度の誤差の範囲である。

また、積分範囲の依存性があまりないことが分かる。

図-3に解析結果とRaju-Newmanの式による解の比較を示す。

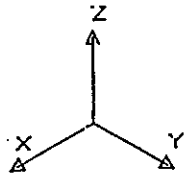
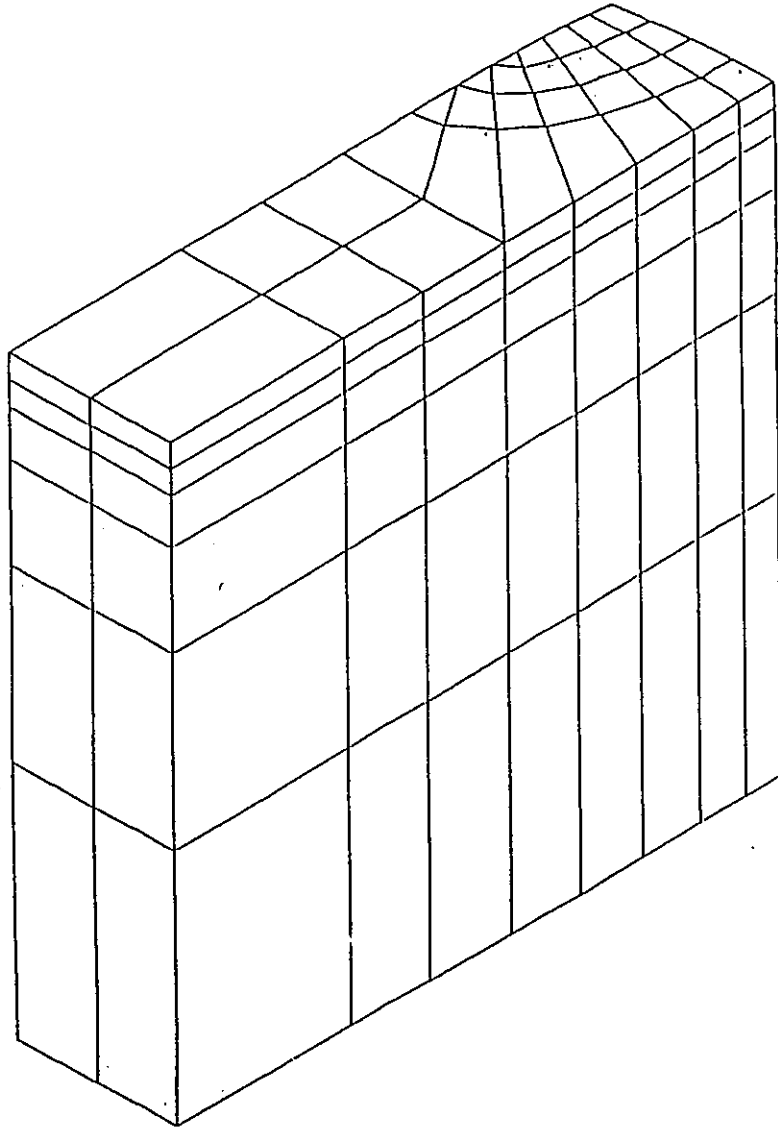


图-2 要素分割图

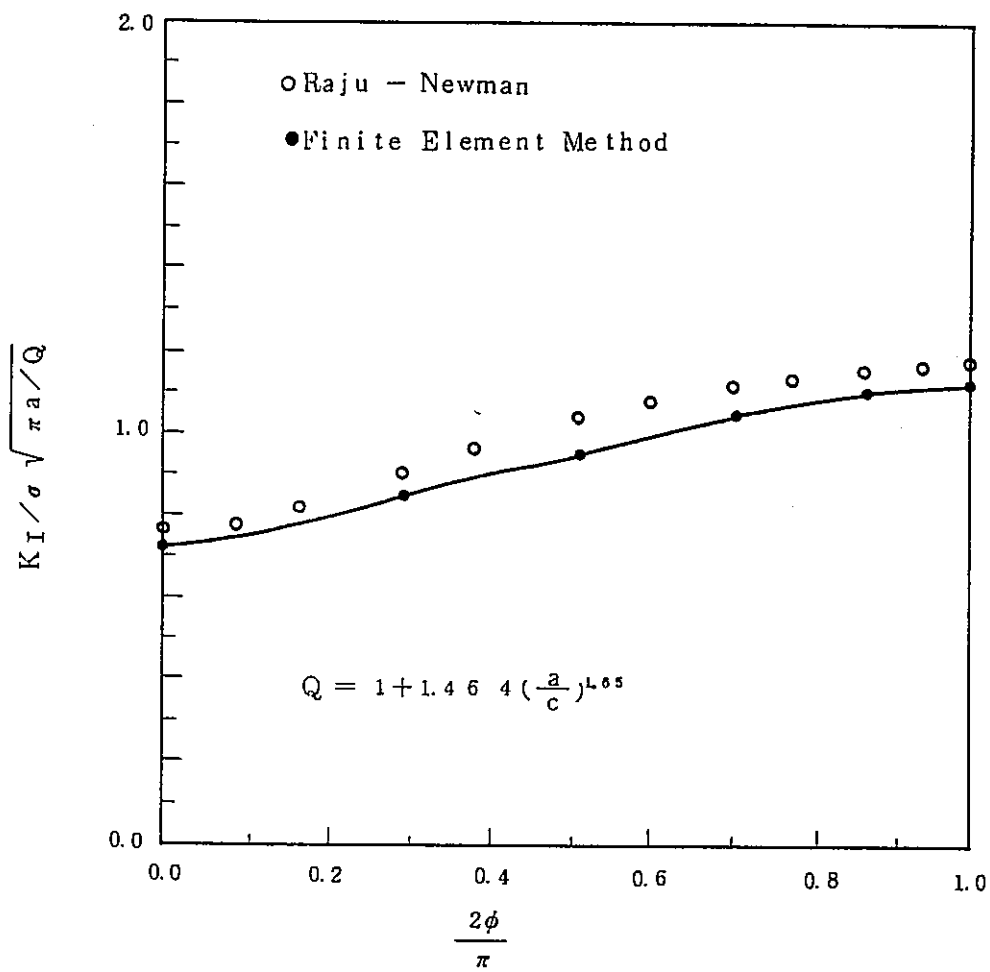
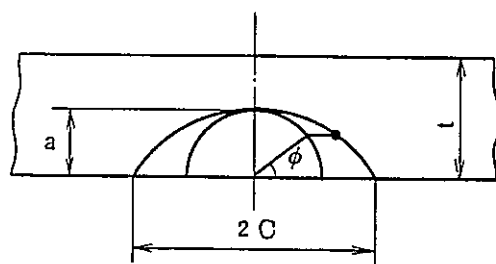
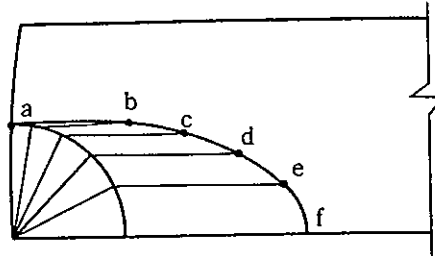


図-3 半楕円表面き裂の応力拡大係数

表-1 解析結果



評価位置の定義

- Path 1, 2 → a
- Path 3, 4 → b
- Path 5, 6 → c
- Path 7, 8 → d
- Path 9, 10 → e
- Path 11, 12 → f

(\*) J. C. Newman, Jr., I. S. Raju : An Empirical Stress - Intensity Factor Equation for the Surface Crack, Engineering Fracture Mechanics, 15 -1, 2, (1981), 185.

Path	$\phi$	$\Delta P$	$\Delta A$	$J(2\Delta P/\Delta A)$	$K_I(\sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}}J)$	$K_I^*$ (Raju - Newman)	Error
1	90	$0.6863 \times 10^{-7}$	$0.5610 \times 10^{-3}$	$2.447 \times 10^{-4}$	2.376	2.477	4.1%
2		$0.2062 \times 10^{-6}$	$0.1729 \times 10^{-2}$	$2.385 \times 10^{-4}$	2.346		5.3%
3	78	$0.1388 \times 10^{-6}$	$0.1161 \times 10^{-2}$	$2.391 \times 10^{-4}$	2.349	2.453	4.2%
4		$0.2743 \times 10^{-6}$	$0.2412 \times 10^{-2}$	$2.274 \times 10^{-4}$	2.291		6.6%
5	64	$0.1329 \times 10^{-6}$	$0.1203 \times 10^{-2}$	$2.209 \times 10^{-4}$	2.258	2.366	4.6%
6		$0.2444 \times 10^{-6}$	$0.2422 \times 10^{-2}$	$2.018 \times 10^{-4}$	2.158		8.8%
7	47	$0.1042 \times 10^{-6}$	$0.1117 \times 10^{-2}$	$1.866 \times 10^{-4}$	2.075	2.187	5.1%
8		$0.1729 \times 10^{-6}$	$0.2161 \times 10^{-2}$	$1.600 \times 10^{-4}$	1.922		12.1%
9	27	$0.6326 \times 10^{-7}$	$0.9455 \times 10^{-3}$	$1.338 \times 10^{-4}$	1.757	1.891	7.1%
10		$0.1008 \times 10^{-6}$	$0.1431 \times 10^{-2}$	$1.409 \times 10^{-4}$	1.803		4.7%
11	0	$0.1820 \times 10^{-7}$	$0.3983 \times 10^{-3}$	$9.139 \times 10^{-5}$	1.452	1.604	9.5%
12		$0.2144 \times 10^{-7}$	$0.3983 \times 10^{-3}$	$1.077 \times 10^{-4}$	1.577		1.7%

## 添 付 資 料 2.2

実証炉入口管き裂進展試験体製作試験検査成績書

整理番号: PNC-348

図書番号: G-TZ-156

改訂番号: 0

パターン: -

承認区分: -

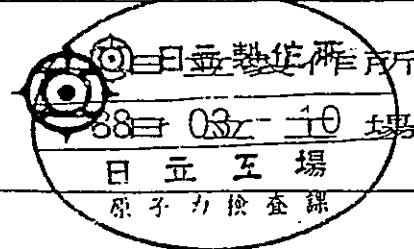



発行月日: 昭和63年 3月 10日

動力炉・核燃料開発事業団 殿

実証炉入口管き裂進展試験体製作  
(入口管LBB評価試験体等の製作)  
試験検査成績書

決定図書

種類	用途	内容程度	配布先	Copy	Peppo
1. 仕様書	1. 参考用	1. 1次	顧客	4	
2. 仕様表	2. 打合せ	2.			
3. 計算書	3. 見積	3.	原子力開発	1	
4. 計画書	4. 承認申請	4.	原子力技術		
5. 説明書	5. 官庁申請	5.	原子QAセンタ		
6. 官庁申請書	6. 工事施工		② 開設	1	
7. 試験検査要領書	7. 検査討				
⑧. 試験検査成績書	⑧. 決定				
9. 納入品明細書	9. 確認				
10. 出荷案内書	10. 質問回答				
11. 取扱説明書		最終	控	1	1

 <p>原子力検査課 日立五場 88年03月10日</p>	承認	審査	審査	審査	作成
					



## 目 次

1. 素材チェックシート .....	添2.2-3
2. ミルシート .....	
3. 員数・外観・寸法記録 .....	添2.2-6
4. 放射線透過試験成績表 .....	添2.2-14
5. 浸透深傷試験成績表 .....	添2.2-16



# 素材チェックシート

審査	作成
(築)	(昇)

顧客名	動力炉・核燃料開発事業団	股	申請番号	日立溶検 第 - 号
品名	入口管LBB評価試験体等の製作	検査場所	(株)日立製作所 日立工場	記録確認 塚田 隆

図面番号	部品番号	部品名	材質	素材寸法 (mm)	員数	材料番号	素材メーカー	検査月日	検査員	備考
10Q251-077	1	供試体 (直管) (欠陥位置 母材)	SUS316TP	2B×SCH80×5500	1	TTE6429	住友金属	63/12	(昇)	
10Q251-076	1	供試体 (直管) (欠陥位置 熱影響部)			1					
10S519-865	1	4点曲げ試験 供試体			1					
10R331-699	3	CT試験片 (母材部切欠試験片)			13					
10R331-699	2	CT試験片 (溶接金属部切欠試験片)	SUS316TP	2B×SCH80×5500	12	TTE6429	住友金属	63/12		
		材料の購入	SUS316TP	2B×SCH80×5500	1	TTE8992	住友金属	63/10	(昇)	

K.K. ヒヤチセイサクシヨ ホンシヤ

ハイカンヨク ステンレスコク コクカン

規 格

Standard JIS G3459 SJS316TP S-C

仕 様 書

Specification 10T313-420-447REV.1 10T354-542-560 REV.1

作業番号 Mill Work No.	寸 法 Size *1				員 数 Quantity		重 量 Weight (kg)	需 要 家 管 理 番 号 Order No. or Job No.
	外 径 O.D.	内 径 I.D.	肉 厚 W.T.	長 び Length	本 数 No. of pcs.	延 べ 長 び Total Length		
TTE6429	28		SCH80	5500	1		45	067964

ミルシート管理No. 原  
NB61901-

製鋼番号 Heat No.	化 学 成 分 Chemical Composition %										試 番 Lot or T.P.No.	引張試験 Tensile Test G.L. 50 *6				衝撃試験 Impact Test				ケツシヨク リフト 2	
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	材 質 Y.S. or Y.P.		引張強さ T.S.	伸 び EL. %	硬 度 HRE	衝撃試験 Impact Test						
	min. *2	max. *2	min. *2	max. *2	min. *2	max. *2	min. *2	max. *2	min. *2	max. *2		3	4	5	6	7	8	9	10		
A6=																					
0481205	0.07	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	10.00	16.00	2.00									
	0.07	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	14.00	18.00	3.00									
	0.07	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	12.80	16.40	2.62									
	0.07	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	12.75	16.44	2.61									

試 験 検 査 Description of Tests		水圧試験 Hydrostatic Test		へん平 Flattening	押しひろげ Flaring (Drift Expanding)	曲 げ Bending	リング拡大 Ring Expansion	リング引張 Ring Tensile	つば出し Flange
外観・寸法 Visual & Dimension	圧力 Pressure	結果 Result							
リヨク	G 130	リヨク		リヨク					
リングゲージ Ring Gauge	ドリフト Drift	チヨクオンハ° タンシヨク ケンサ: リヨク ヒンシヨク シントク タンシヨク ケンサ: リヨク							

スツシヨリ : 1060°C X 2MIN. W.O.

記録確認  
REVIEWED BY  
S原子カ  
61.12.23  
大上

P.O No. 067964  
W.No. Q771517  
SLIP No. 70021  
PRO-JECT トーネ

INVE CONT  
61.10

上記注文品は指定の規格および仕様に従って製造され、その要求事項を満足していることを証明します。

住友金属工業株式会社 鋼  
SUMITOMO METAL INDUST  
STEEL TUBE WORKS

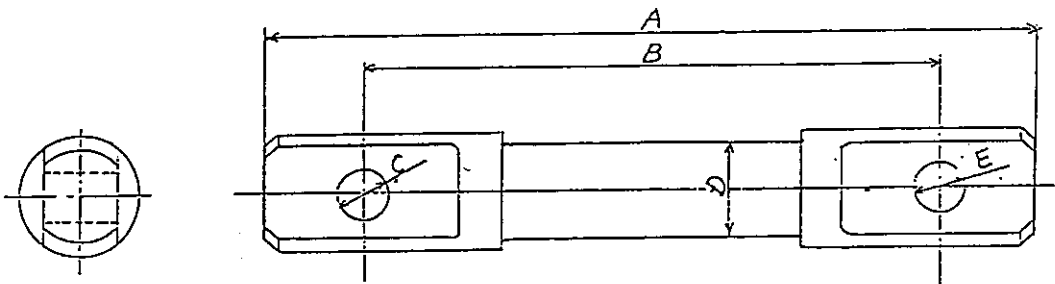




員数・外観・寸法検査記録

品名	入口管LBB評価試験体等の製作	顧客名	動力炉・核燃料開発事業団
部品名	供試体(直管) <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">欠陥位置 母材</span>	御立会者	浅田 隆
作番	Q771728	立会年月日	昭和 63年 / 月 27日
図面番号	10Q251-077		

1. 寸法測定位置図



2. 寸法測定結果

測定箇所	A	B	C	D	E			
図示寸法	475.3	355.3	φ32.2	φ60.5	φ32.2			
公差	±4.	±3.	$\begin{matrix} +0.3 \\ 0 \end{matrix}$	±0.6	$\begin{matrix} +0.3 \\ 0 \end{matrix}$			
実測値	475.3	356.2	32.3	60.6	32.3			
測定箇所								
図示寸法								
公差								
実測値								

(単位: mm)

3. 外観検査結果: 良

4. 員数検査結果: 良

判定: 合格

承認		照査		検査	
----	--	----	--	----	--

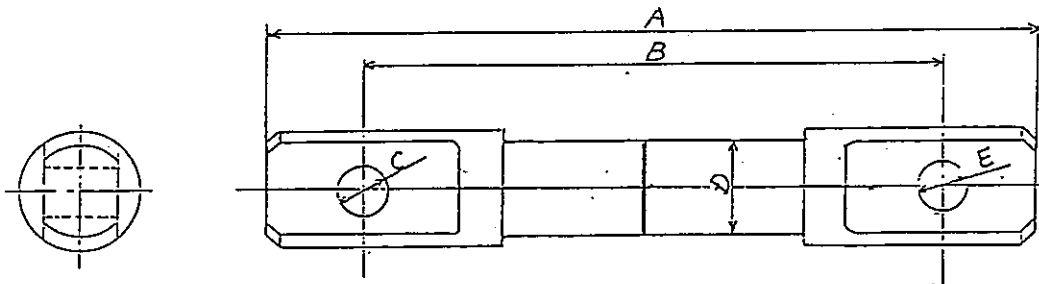
株式会社 日立製作所



員数・外観・寸法検査記録

品名	入口管LBB評価試験体等の製作	顧客名	動力炉・核燃料開発事業団
部品名	供試体(直管) <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">欠陥位置 熱影響部</span>	御立会者	磯田 隆
作番	Q771728	立会年月日	昭和63年 / 月 27日
図面番号	10Q251-076		

1. 寸法測定位置図



2. 寸法測定結果

測定箇所	A	B	C	D	E			
図示寸法	475.3	355.3	φ32.2	φ60.5	φ32.2			
公差	±4	±3	$\begin{matrix} +0.3 \\ 0 \end{matrix}$	±0.6	$\begin{matrix} +0.3 \\ 0 \end{matrix}$			
実測値	475.5	355.5	32.3	60.6	32.3			
測定箇所								
図示寸法								
公差								
実測値								

(単位: mm)

3. 外観検査結果: 良

4. 員数検査結果: 良

判定: 合格

承認		照査		検査	
----	--	----	--	----	--





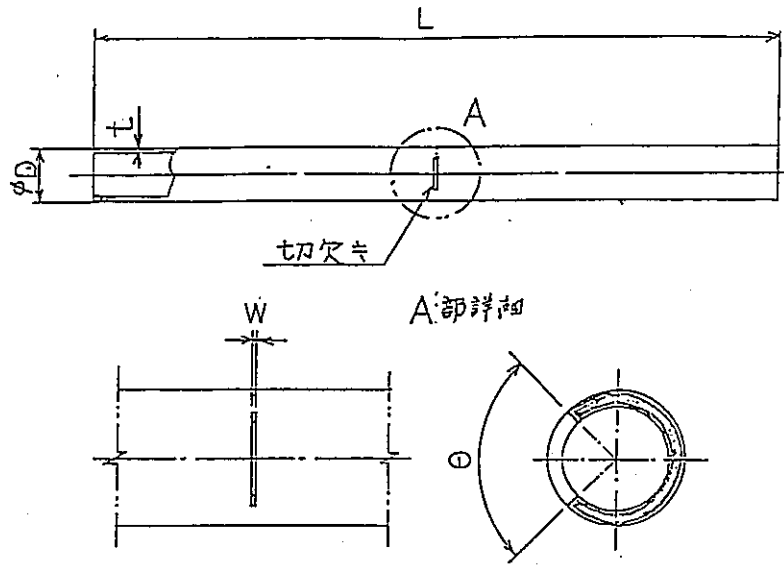




頁数・外観・寸法検査記録

品名	入口管LBB評価試験体等の製作	顧客名	動力炉・核燃料開発事業団
部品名	4点曲げ試験 供試体	御立会者	藤田 隆
作番	Q771728	立会年月日	昭和 63 年 / 月 27 日
図面番号	10S519-865		

1. 寸法測定位置図



2. 寸法測定結果

測定箇所	L	φD	t	W	θ	T.P No
図示寸法	750	60.5	5.5	0.2 <sup>+0.15</sup> <sub>0</sub>	75°48'	TP.1
公差	±4	±0.6	<sup>+1.1</sup> <sub>0</sub>	—	±2°	
実測値	750	60.6	6.2	0.25	75°48'	
測定箇所	L	φD	t	W	θ	T.P No
図示寸法	750	60.5	5.5	0.2 <sup>+0.15</sup> <sub>0</sub>	75°48'	TP 2
公差	±4	±0.6	<sup>+1.1</sup> <sub>0</sub>	—	±2°	
実測値	750	60.6	6.2	0.28	75°48'	(予備品)

(単位: mm)

3. 外観検査結果: 良

4. 頁数検査結果: 良

判定: 合格

承認		照会		検査	
----	--	----	--	----	--

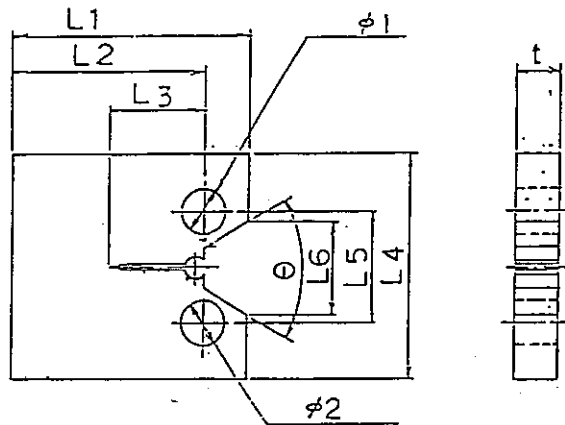
株式会社 日立製作所



員 数 ・ 外 観 ・ 寸 法 検 査 記 録

品 名	入口管 L B B 評価試験体等の製作	顧客 名	動力炉・核燃料開発事業団
部 品 名	CT 試験片 (母材部切欠試験片)	御 立 会 者	磯田 隆
作 番	Q771728	立会年月日	昭和 63 年 / 月 27 日
図 面 番 号	10R331-699		

1. 寸法測定位置図



2. 寸法測定結果

測定箇所	L1	L2	L3	L4	L5	L6	θ	φ1	φ2	t
図示寸法	25±0.2	20±0.1	8±0.3	24±0.1	12	10	60°	5±0.1	5±0.1	3±0.03
公差	—	—	—	—	±1	±1	±2°	—	—	—
T.P. 13	25.1	20.1	8.1	24.0	12	10	60°	5.0	5.0	2.99
↑ 14		20.1	8.0							2.98
15		20.0								2.99
16										
17										
18	25.1									2.99
19	25.0									3.01
20	25.1									3.00
21										3.01
22										2.99
23										3.00
↓ *24										2.99
T.P. *25	25.1	20.0	8.0	24.0	12	10	60°	5.0	5.0	2.99

3. 外観検査結果: 良

\*; 予備品を示す。(単位:mm)

4. 員数検査結果: 良

判 定: 合格

承認		照査		検査	
----	--	----	--	----	--

株式会社 日立製作所

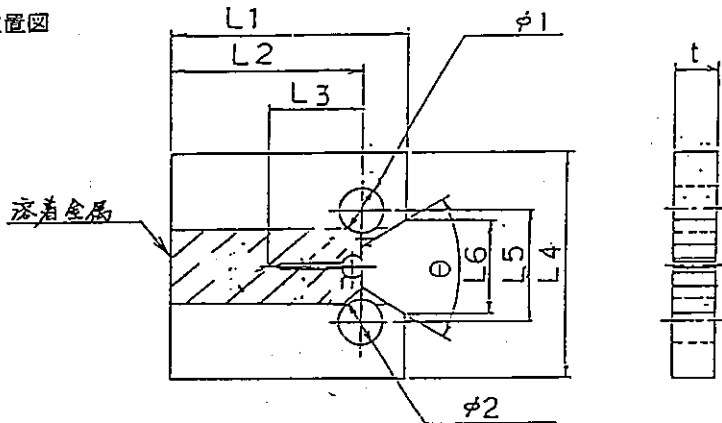


No. \_\_\_\_\_

頁数・外観・寸法検査記録

品名	入口管LBB評価試験体等の製作	顧客名	動力炉・核燃料開発事業団様
部品名	CT試験片(溶着金属部切欠試験片)	御立会者	後田 隆
作番	Q771728	立会年月日	昭和63年 / 月 27日
図面番号	10R331-699		

1. 寸法測定位置図



2. 寸法測定結果

測定箇所	L1	L2	L3	L4	L5	L6	θ	φ1	φ2	t
図示寸法公差	25±0.2	20±0.1	8±0.3	24±0.1	12	10	60°	5±0.1	5±0.1	3±0.03
TP1-1	25.1	20.1	8.0	24.0	12	10	60°	5.0	5.0	3.01
↑ -2		20.0								3.00
↓ -3										2.99
↑ -4		20.0								3.00
↓ -5		20.1								3.01
TP1-6		20.0								3.00
TP2-7										3.00
↑ -8										3.01
↑ -9										3.00
↑ -10										3.01
↓ -11										2.99
TP2-12	25.1	20.0	8.0	24.0	12	10	60°	5.0	5.0	3.00

3. 外観検査結果: 良

本予備品を示す。(単位:mm)

4. 頁数検査結果: 良

判定: 合格

製	権	照	陰	検	査
製	口	査	影	査	査

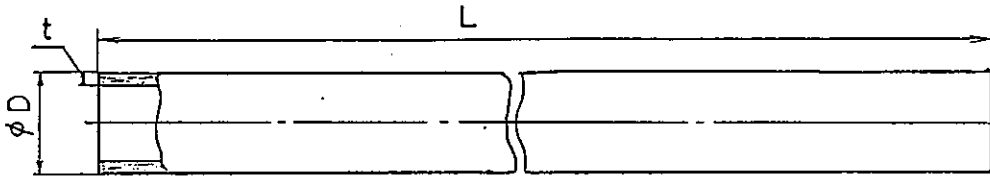
株式会社 日立製作所



員 数 ・ 外 観 ・ 寸 法 検 査 記 録

品 名	入口管LBB評価試験体等の製作	顧客名	動力炉・核燃料開発事業団 監
部 品 名	材料の購入 原子力級 SUS316 2B Sch80×5, 500 1本	御立会者	記城 隆 氏 三浦 正 氏
作 番	Q771728	検査年月日	昭和63年3月10日
図 画 番 号	_____		

1. 寸法測定位置図



2. 寸法測定結果

測定箇所	L	φD	t					
図示寸法	5,500	60.5	5.5					
公差	+10 0	±0.6	+1.0 0					
実測値	5505	60.5	5.7					
測定箇所								
図示寸法								
公差								
実測値								

(単位：mm)

3. 外観検査結果： 良  
 4. 員数検査結果 良  
 判 定： 合格

承認	検査	検査	検査



放射線透過試験成績表

品名	入口管LBB評価試験体等の製作	申請番号	日立溶接 第 _____ 号
部品名	試験体(直管)	顧客 登録番号	動力炉・核燃料開発事業団 殿
作番	A 771728	検査員	記録確認 磯田 隆 殿
図面番号	102251-076	立会年月日	昭和 63 年 1 月 27 日
継手番号	1W-1	径および板厚	φ60.5×4.95×271.5(mm)

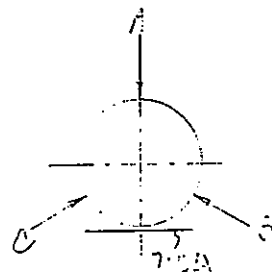
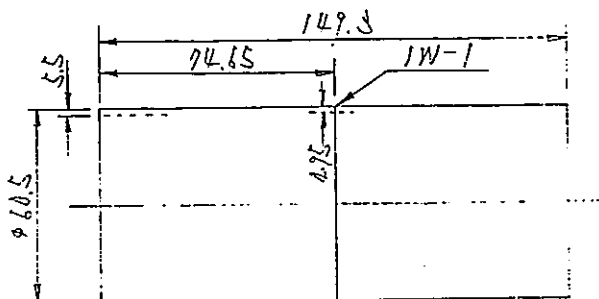
1. 撮影条件

継手名	1. 長手継手 (2) 円周継手 3.		
撮影年月日	昭和 63 年 12 月 10 日 ~ 昭和 _____ 年 _____ 月 _____ 日		
X線電圧	(定格 200 KVP) <del>(200 MeV)</del>	200 KVP <del>MeV</del>	
X線電流	(定格 5 mA)	5 mA	
γ線容量	192 60 Ir, Co, Ci	露出時間	↓ 分 00 秒 <del>10 分 00 秒</del>
焦点距離	600 mm	フィルム枚数	↓ 枚
使用フィルム名	工業用X線フィルム ((富士, コダック) (#80, #100, T, AA))		
透過度計	有孔形板 10 線形 (材厚区分 9.5 mm をこえ 1.5 mm 以下) (線源側, フィルム側) 使用, フィルム濃度 1.9 ~ 4.0		

2. 判定基準

電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令  
第11条, 放射線透過試験による。

3. 撮影位置および方法



4. 現像条件: 20℃ 5分, ((タンク), 皿) 現像  
5. 検査結果: 別紙

承認	検査	検査	検査

株式会社 日立製作所

検査結果



フィルム番号	欠陥の位置および性状	第1回立会	第2回立会
	フィルム有効長さ $65mm$ P:ボロシティ S:スラグ R:写真不良 U:アンダーカット T:タングステンスポット	昭和63年/月27日 残田 啓	昭和 年 月 日 啓
1/W-1 A		(良) 再補調	良 再補調
B		(良) 再補調	良 再補調
C		(良) 再補調	良 再補調
	以下余白	良 再補調	良 再補調
5		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
10		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
15		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
		良 再補調	良 再補調
20		良 再補調	良 再補調



### 浸透探傷試験成績表

申請書番号	日立溶接 第 一 号
品名	入口管LBB評価試験体等の製作
顧客名	動力炉・核燃料開発事業団
部品名	供試体(直管) {欠陥位置 母材}
検査官	記録確認 深田 隆 殿
材質	SUS 316NG
検査年月日	昭和 62年 12月 15日
作番	Q771728
図面番号	10R251-077
継手番号	

1. 探傷条件

浸透液	R-1A(NT)	浸透時間	15分
現像液	R-1S(NT) 原子力用 栄進化学製	現像時間	10分
洗浄液	R-1M(NT)	探傷部温度	20℃
探傷表面状態	グラインダー仕上, 機械加工, (溶接のみ)		

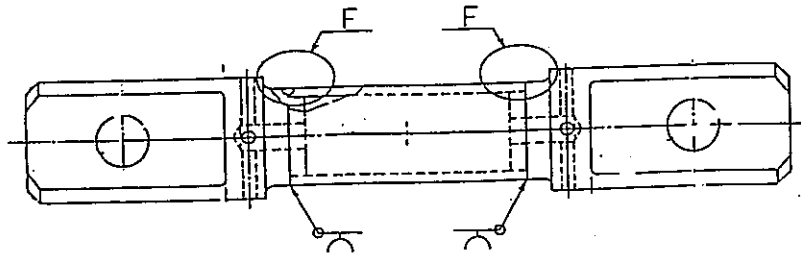
2. 判定基準

電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令  
第11条 浸透探傷試験による。

3. 探傷結果

有害な欠陥を認めず

探傷位置 F部



4. 判定 良

承認	検査	検査	検査

株式会社 日立製作所



### 浸透探傷試験成績表

		申請番号	日立溶検 第 一 号
品名	入口管LBB評価試験体等の製作	顧客名	動力炉・核燃料開発事業団 殿
部品名	供試体(直管) <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">欠陥位置 熱割割部</span>	検査官	記録確認 磯田 隆 殿
材質	SUS 316NG	検査年月日	昭和 62年 12月 15日
作番	Q771728	図面番号	10Q251-076
継手番号			

1. 探傷条件

浸透液	R-1A(NT)	浸透時間	15分
現像液	R-1S(NT) 原子力用 栄進化学製	現像時間	10分
洗浄液	R-1M(NT)	探傷部温度	20℃
		探傷表面状態	グラインダー仕上、 機械加工、 <u>溶接のみ</u>

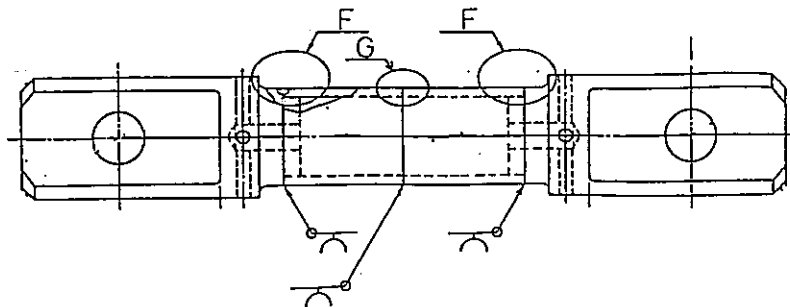
2. 判定基準

電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令  
第11条 浸透探傷試験による。

3. 探傷結果

有害な欠陥を認めず

探傷位置 F, G 部



4. 判定良

承認	検査	照査	検査
(印)	(印)	(印)	(印)

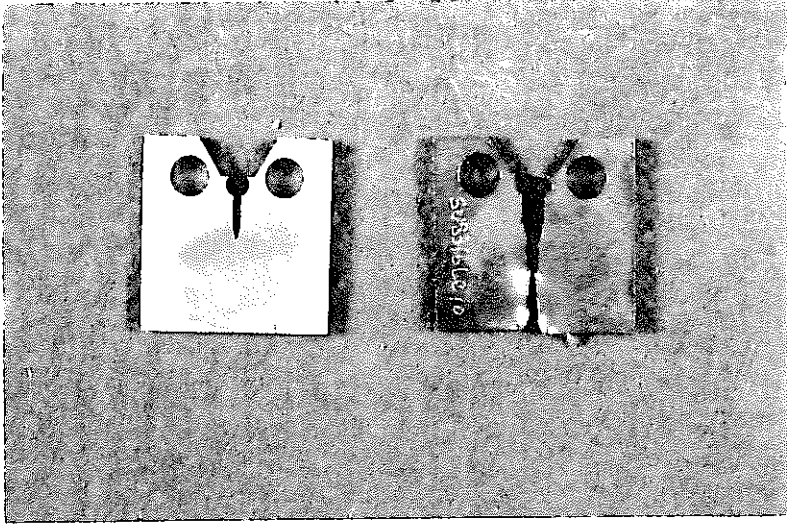
株式会社 日立製作所



## 添 付 資 料 2.3

### 実証炉入口管き裂進展試験体・試験片の写真

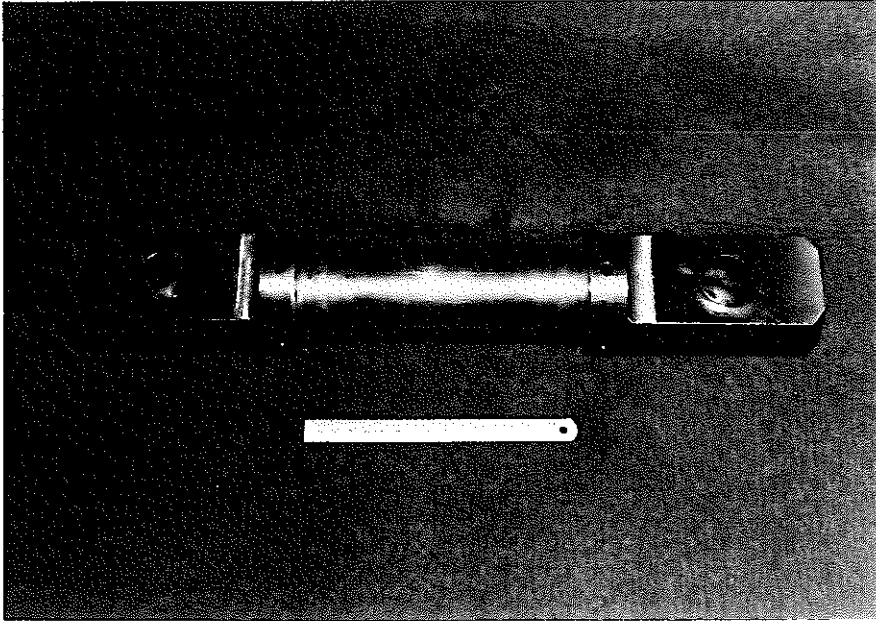
- (1) CT試験片（母材部切欠試験片）
- (2) 直管切欠部供試体
- (3) 四点曲げ試験



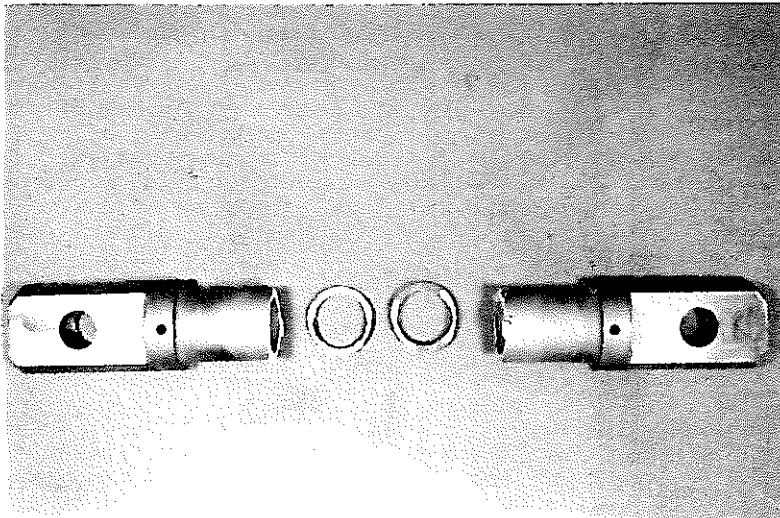
製作時

試験後

添 2.3 - (1) CT 試験片 (母材部切欠試験片)

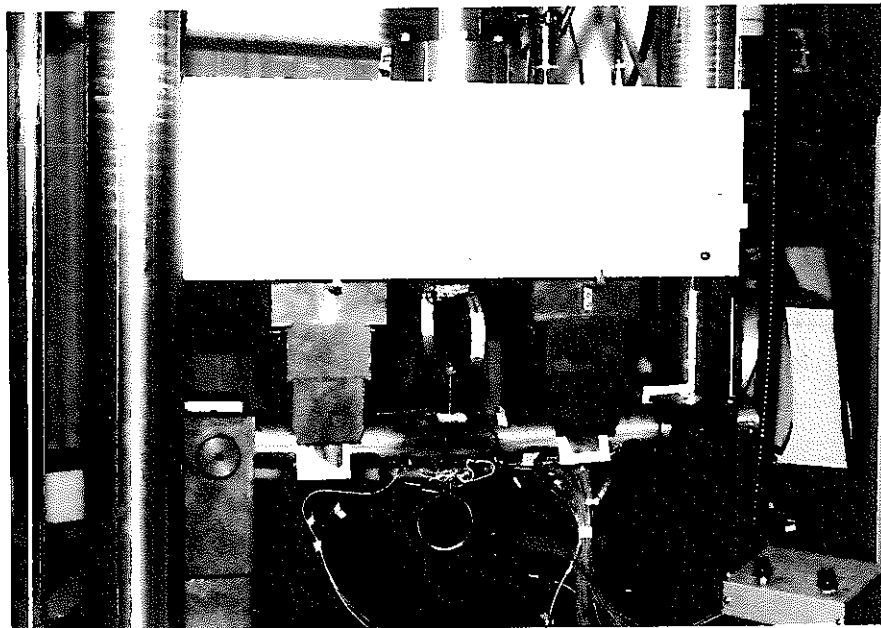


(a) 欠陥加工前

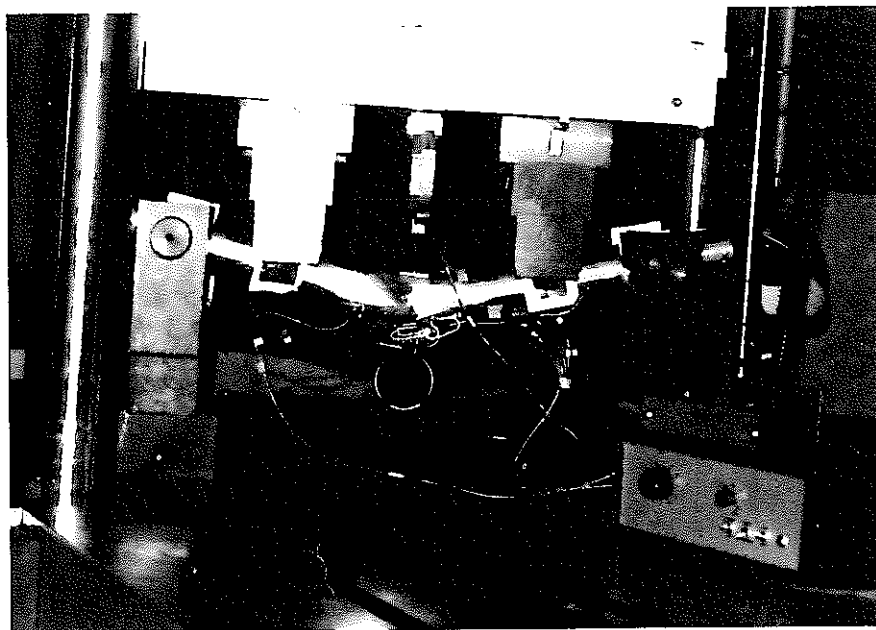


(b) 試験後（破断面観察のためリング状に切断）

添2.3-(2) 直管切欠部供試体



(a) 試験開始直後



(b) 試験後

添 2.3 - (3) 四点曲げ試験