

温度ゆらぎサーマルストライピング
損傷度評価試験
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)



2002年3月

(株) 日立製作所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2002

温度ゆらぎサーマルストライピング損傷度評価試験

The Evaluation of Thermal Striping Damages in Temperature Fluctuations

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

祐川正之(*) 莊生和道(*)
川上三雄(*)

要 旨

本報告書は、(株)日立製作所が所有する周波数制御 Na 中熱衝撃実験装置により与えられた温度ゆらぎサーマルストライピング損傷の度合いを、微小割れ発生寿命試験に基づき評価し、核燃料サイクル開発機構殿で開発中の周波数に着目したサーマルストライピング低ひずみ熱サイクル寿命及び高サイクル熱疲労評価手法の策定・検証に資するものである。主な成果は以下の通りである：

- (1) X線による残留応力測定の結果、損傷付与材及び未損傷材の表面残留応力に有意な差は見られなかったことから、温度ゆらぎサーマルストライピングによる残留応力への影響は無いと判断される。
- (2) ひずみゲージ法による残留応力測定の結果、試験片加工前後のひずみ変化は小さく、薄板曲げ疲労試験時の全ひずみ範囲と比較すると無視し得る大きさであることから、試験片加工がサーマルストライピング損傷部位に与える影響は小さいと判断される。
- (3) 薄板曲げ疲労試験の結果、損傷付与材の疲労寿命は 815000 回、未損傷材の疲労寿命は 618000 回となった。一方、316FR 鋼板材の室温における疲労寿命は、最適疲労破損式より 580000 回である。このことから、損傷付与材及び未損傷材の疲労寿命は、全く損傷を受けていない材料の疲労寿命であると言える。また、損傷付与材及び未損傷材の疲労寿命は、最適疲労破損式の疲労寿命に対して factor of 2 の範囲内にあり、データのばらつきの範囲内であると言える。

本報告書は、(株)日立製作所が核燃料サイクル開発機構殿との契約により実施した業務成果に関するものである。

サイクル機構担当部： 大洗工学センター 要素技術開発部
* : (株)日立製作所 原子力事業部 日立生産本部 燃料サイクル部

目次

1. 目的	1
2. 試験片の製作	2
2.1 試験片の種類	2
2.2 試験片の形状	2
2.3 試験片の加工要領	3
3. 損傷評価試験	17
3.1 非破壊試験	17
(1) X線による残留応力測定	17
(2) ひずみゲージ法による残留応力測定	19
3.2 薄板曲げ疲労試験	31
(1) 試験装置	31
(2) 試験条件	31
(3) 疲労試験時のひずみ測定法	32
(4) 損傷度評価法	33
(5) 繰返しひずみ振幅の設定	33
(6) 試験結果	35
4. 損傷係数評価	56
5. まとめ	57

[付録]

付録A：参考試験材の試験方法、試験結果一覧	付- 1
付録B：最適疲労線図の室温への適用性	付-17
付録C：薄板曲げ疲労試験結果に関する考察	付-21
付録D：残留応力計測法及びき裂測定法の参考資料	付-32

表リスト

表 2-1	試験片の加工及び試験要領（その 1）	9
表 2-2	試験片の加工及び試験要領（その 2）	10
表 3. 1-1	X線回折法による残留応力測定結果	25
表 3. 1-2	試験片加工工程におけるひずみ測定結果 (その 1 : 素材から $W=17\text{mm}$ 試験片加工まで)	29
表 3. 1-3	試験片加工工程におけるひずみ測定結果 (その 2 : $W=17\text{mm}$ 試験片から $W=6\text{mm}$ 試験片加工まで)	30
表 3. 2-1	疲労試験時のひずみゲージ貼付け位置とき裂発生部のひずみ換算補正係数	44
表 3. 2-2	薄板曲げ疲労試験結果	50

図リスト

図 2-1	試験片の基本形状	5
図 2-2	試験片形状の検討履歴	6
図 2-3	W=17mm 試験片形状	7
図 2-4	W=6mm 試験片形状 (サーマルストライピング損傷度評価試験最終形状)	8
図 2-5	損傷付与材における加工工程の外観 (その 1)	11
図 2-6	損傷付与材における加工工程の外観 (その 2)	12
図 2-7	損傷付与材における加工工程の外観 (その 3)	13
図 2-8	未損傷材における加工工程の外観 (その 1)	14
図 2-9	未損傷材における加工工程の外観 (その 2)	15
図 2-10	未損傷材における加工工程の外観 (その 3)	16
図 3. 1-1	X 線回折法による残留応力測定装置	22
図 3. 1-2	X 線回折法による試験材受け入れ状態の残留応力測定位置	23
図 3. 1-3	X 線回折法による試験片加工後の残留応力測定位置	24
図 3. 1-4	残留応力測定結果 (試験片加工前、表面のみ)	26
図 3. 1-5	残留応力測定結果 (試験片加工後)	27
図 3. 1-6	ひずみゲージ法による残留応力測定状況	28
図 3. 2-1	薄板曲げ疲労試験装置構成	38
図 3. 2-2	薄板曲げ疲労試験装置構成	39
図 3. 2-3	疲労試験概要	40
図 3. 2-4	薄板曲げ疲労試験状況	41
図 3. 2-5	316FR 鋼板母材の疲労強度	42
図 3. 2-6	316FR 鋼 (板) 疲労強度の平均値と実測値の関係 (550°C、0.001mm/mm/s)	42
図 3. 2-7	最適疲労破損式	43
図 3. 2-8	損傷度評価試験	45
図 3. 2-9	試験片切り欠き部のひずみ集中測定要領	46
図 3. 2-10	試験片表面のひずみ分布 (W=6mm 試験片、R=12.5mm : 最終形状 TP)	47
図 3. 2-11	繰返し試験時の荷重、ひずみ及びき裂進展挙動 (損傷付与材)	48
図 3. 2-12	繰返し試験時の荷重、ひずみ及びき裂進展挙動 (未損傷材)	49
図 3. 2-13	レプリカ法による疲労き裂進展状況 (損傷付与材)	51
図 3. 2-14	レプリカ法による疲労き裂進展状況 (未損傷材)	52
図 3. 2-15	薄板曲げ疲労試験結果	53
図 3. 2-16	疲労試験後の試験片外観写真 (損傷付与材)	54
図 3. 2-17	疲労試験後の試験片外観写真 (未損傷材)	55

1. 目的

高速炉の炉心出口近傍や配管合流部など、乱流挙動によって高低温冷却材が混合を起こす多くの領域では、その混合過程で不規則な冷却材温度ゆらぎが恒常に発生する。この温度ゆらぎを伴った冷却材が、炉内に位置する各種の構造物の表面近傍を通過すると、冷却材の不規則な温度ゆらぎが構造材料中に伝播し、その材料は高サイクル熱疲労（以下、「サーマルストライピング」という）を受ける。本評価試験では、「周波数制御ホットスポット温度ゆらぎによるき裂発生基礎実験」にてサーマルストライピングを50万回与えた損傷付与試験片について、薄板曲げ疲労試験による微少割れ発生寿命試験を行い、同一素材である未損傷材料の試験片との結果を比較検討することによって、サーマルストライピングによる損傷度を評価する。

2. 試験片の製作

2.1 試験片の種類

本評価試験に供した試験片は下記の2種である。両者とも材質は316FR鋼で、同一溶解、製造ロットの材料である。

(1) 損傷付与材

試験片加工前の寸法は、縦×横×厚みがそれぞれ50mm×50mm×10mmであり、「周波数制御ホットスポット温度ゆらぎによるき裂発生基礎実験」において、この試験片の片面中心部に、直径15mmの範囲で、温度200°Cと500°Cのナトリウムによるサーマルストライピング損傷を50万回与えた試験片である。

(2) 未損傷材

損傷付与材と同一溶解、製造ロットの材料である。ただし、サーマルストライピング損傷は与えていない。

2.2 試験片の形状

まず、「サーマルストライピング付与範囲 $\phi 15\text{mm}$ を可能な限り残存させること、あるいはこの範囲から必ずき裂が発生すること。」を考慮し、図2-1(b)に示すような基本形状を検討した。この形状は、「試験片の中央部にサーマルストライピング付与範囲を位置させ、両側面から双曲線状に曲率半径R=15mmの切り欠きを設けて、周囲に対し断面積を減少させることによってその中心部のサーマルストライピング損傷付与部の強度評価を行う」という目的に基づく形状である。

次に、図2-1(b)に示した形状を基に、別途同一素材である「参照試験材」による予備的な疲労試験を行った結果、図2-2に示すように、き裂発生位置が試験片の中心から外れた切れき部のコーナであることを確認した。このき裂発生位置はサーマルストライピング損傷付与範囲外であるため、サーマルストライピングによる損傷度を評価するという試験の目的を達成するためには、試験片の形状を改良する必要がある。

したがって、図2-2中に示すように、サーマルストライピング損傷付与範囲内からき裂を発生させるため、試験片の最小断面幅をW=6mmに縮小した。この形状の場合、サーマルストライピングによる損傷度が比較的大きい $\phi 10$ 部の軸方向長さは6.3mmと十分に長く、参照試験材による予備的な疲労試験結果を考慮しても、 $\phi 10$ 部の範囲内からき裂が発生すると考えられる。

図2-1(b)に示したW=17mmの試験片形状を図2-3に示す。この形状では、X線による残留応力測定（「3.1 非破壊試験」に示す）及び参照試験材による疲労試験（付録Aに

示す)を実施した。また、改良形状である $W=6\text{mm}$ の試験片形状を図 2-4 に示す。この形状を用いて、損傷付与材及び未損傷材の疲労試験を実施した。

2.3 試験片の加工要領

前記の試験片形状検討履歴を反映し、試験片の加工（あるいは途中試験も含む）を行った。サーマルストライピング損傷度評価試験片は「損傷付与材」と「未損傷材」の 2 種であるが、疲労強度を比較評価するため両者の試験片製作工程は同じにした。加工要領を表 2-1～表 2-2 に示す。

素材は、「周波数制御ホットスポット温度ゆらぎによるき裂発生基礎実験」が終了した後保管していたもので、寸法は縦×横×厚みがそれぞれ $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 10\text{mm}$ である。両供試体は、前記図 2-3～図 2-4 に示した疲労試験片に加工する前に、受け入れ状態の表面性状を評価すべく、後述する試験片表面の残留応力を X 線回折法（付録 D 参照）により測定し、その後以下の加工に供した。

(1) 粗分割

最終的な評価試験である薄板曲げ疲労試験の試験片は、前記図 2-4 に示したように板厚 4mm である。そのため第一の加工工程として板厚 10mm の素材をワイヤカットにて 2 等分した。ワイヤカットの加工代は約 0.3mm である。従って、粗分割によって片側 4.85mm の 2 片となる。このとき分割によって試験片表面の応力状態が変化するか否かを、ひずみゲージ法（付録 D 参照）によって測定した。本結果については後述する。

(2) $W=17\text{mm}$ 試験片加工

2 分割後、サーマルストライピング付与面及び既加工面に損傷を加えないよう留意しながら、新生分割面のみに機械加工を加え、最終的に表面と同じ #1200 粒度のサンドペーパにより、加工面を研磨した。最終研磨方向は表面と同じ方向であり、後述する疲労試験時に負荷方向と同じ（平行方向）になる方向である。

その後、前記図 2-3 に示す $W=17\text{mm}$ 試験片形状に加工し、試験片に貼り付けた。

(3) $W=6\text{mm}$ 試験片加工

この後、最終的な損傷度評価試験に供するため、図 2-4 に示す $W=6\text{mm}$ 試験片に加工した。追加加工は両側面の切り欠き部のみであり、評価対象となる表面に関しては、外傷を与えないよう加工治具および表面保護に十分な配慮を行った。

加工前後は、試験片の表裏面にひずみゲージを貼り、ひずみの変化を監視した。

その後、前記ひずみゲージを取り外し、新たに加工終了後本試験で繰返しひずみを設定、あるいは負荷状態を連続で監視するためのひずみゲージに貼り替え、試験片の準備

は終了となる。各試験片の加工工程における外観写真を図 2-5～図 2-10 に示す。

以上の工程を経て、下記試験片の準備が完了し、次章にて実施するサーマルストライピング損傷度評価試験に供する。

- ・損傷付与材 : 1 体
- ・未損傷材 : 1 体

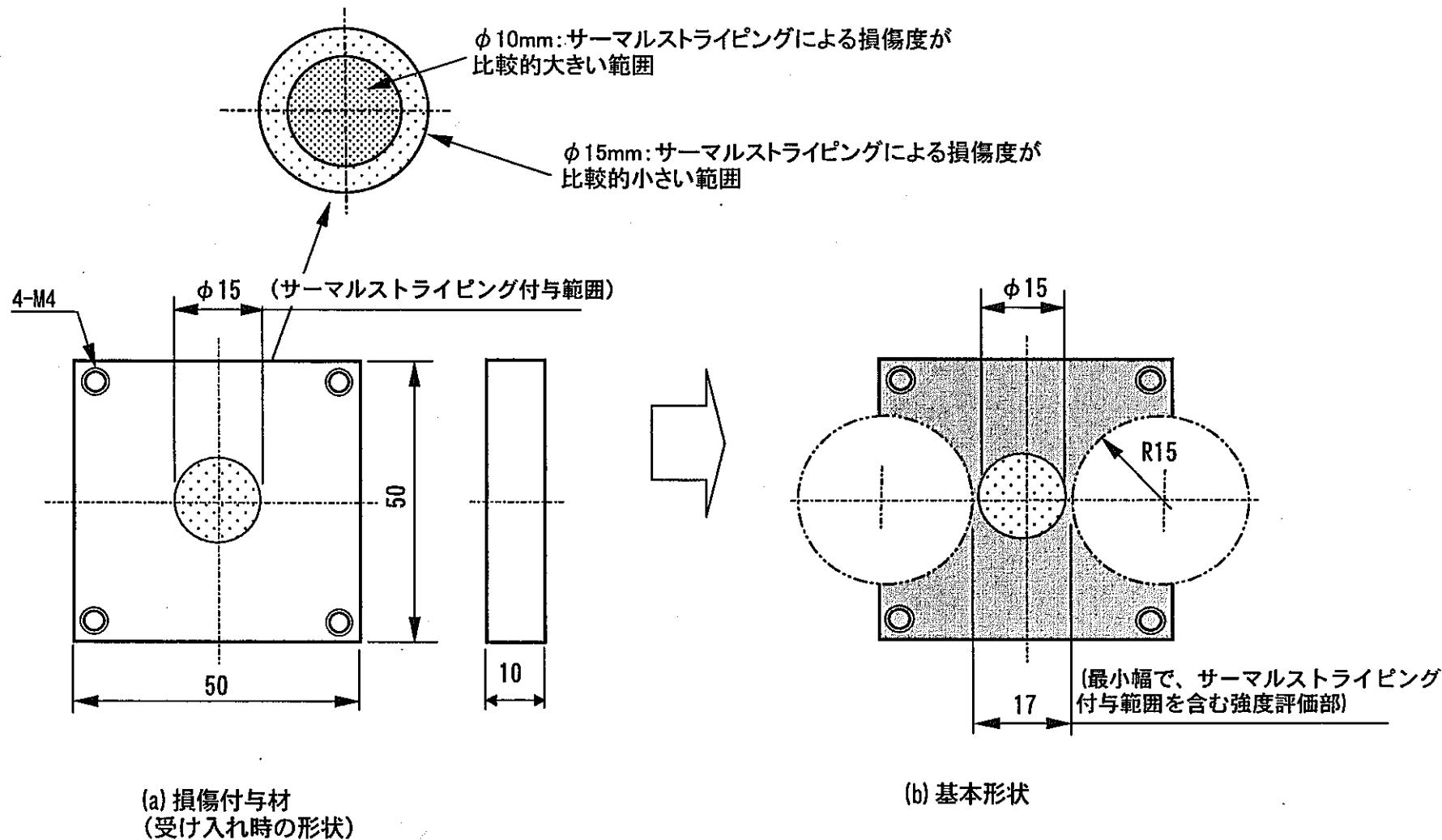


図2-1 試験片の基本形状

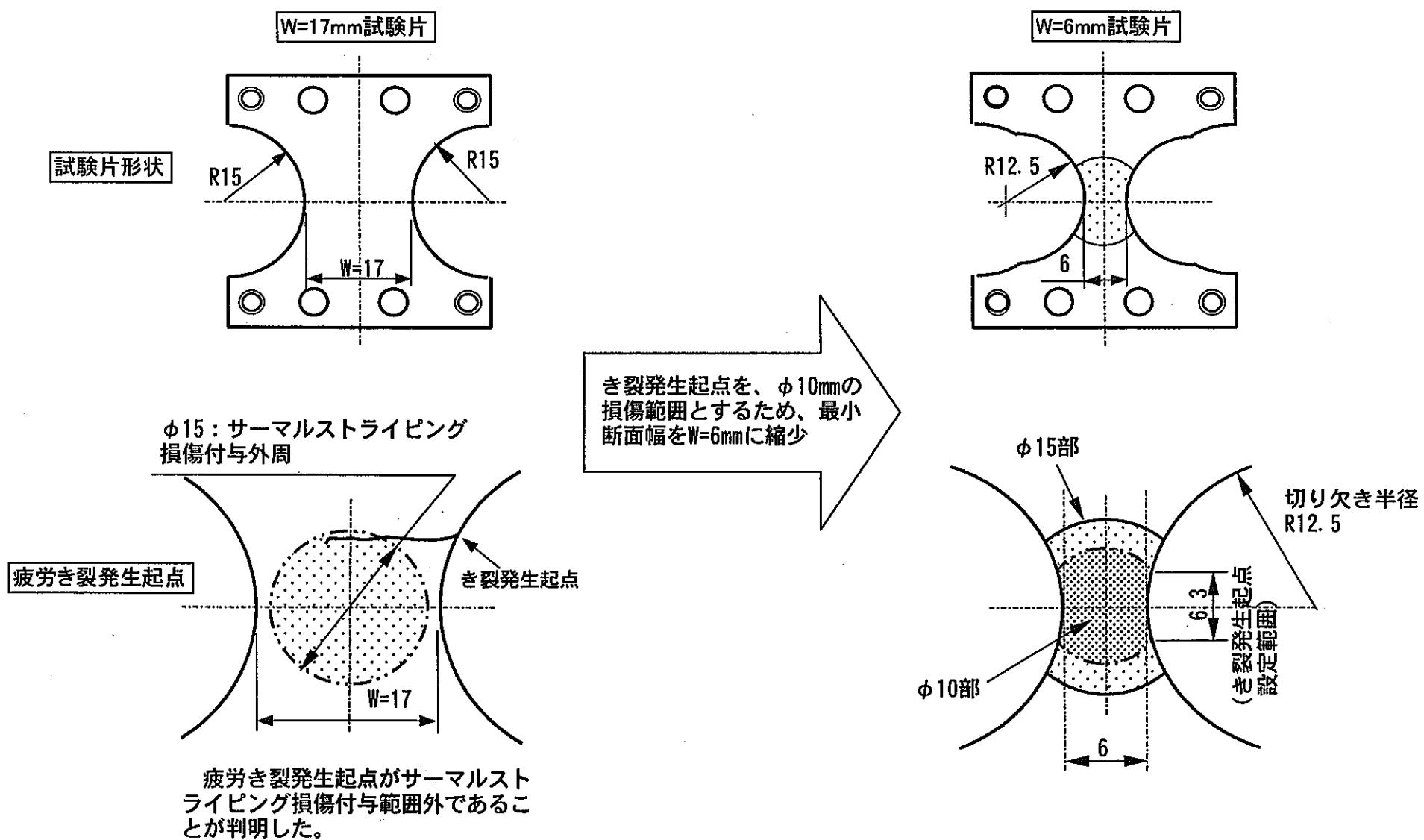


図2-2

試験片形状の検討履歴

(サーマルストライピング付与痕、
損傷付与材のみ)

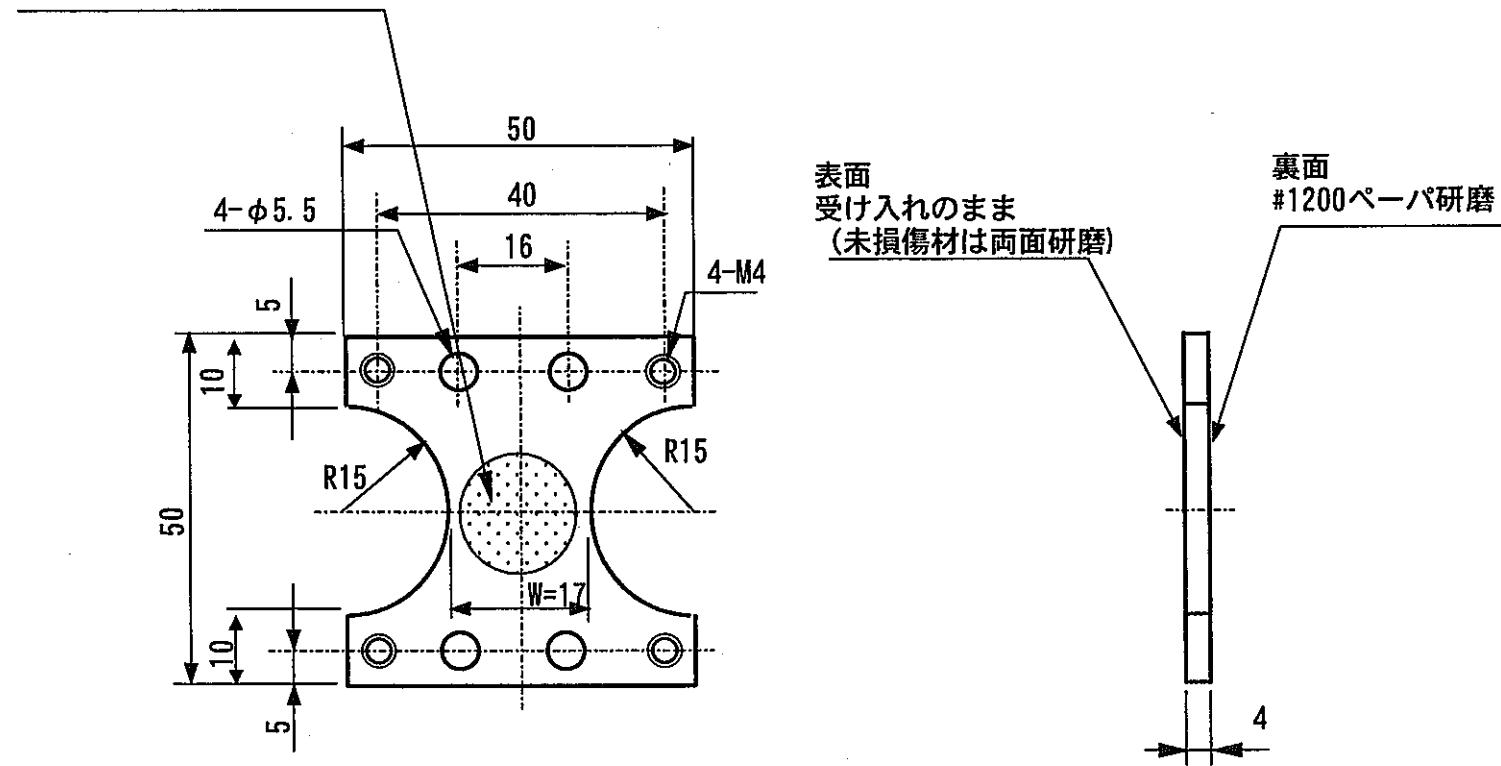


図2-3 W = 17 mm試験片形状

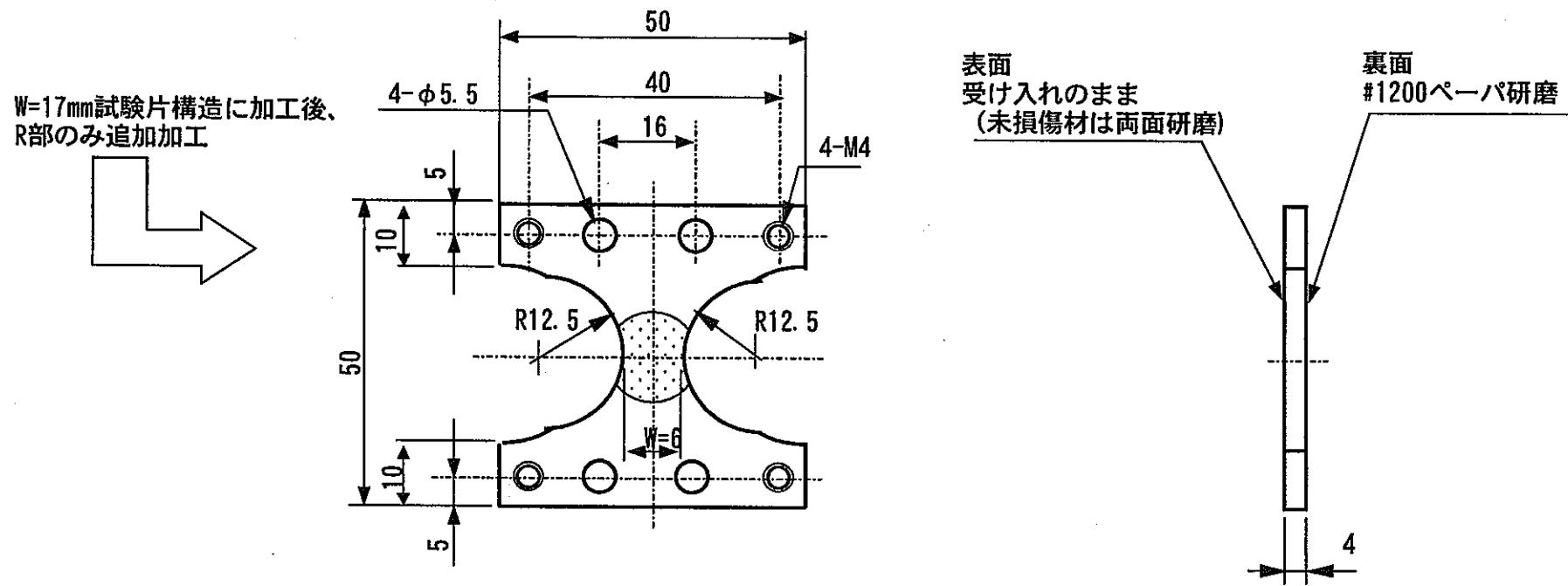


図2-4

W = 6 mm試験片形状(サーマルストライピング損傷度評価試験最終形状)

表2-1 試験片の加工及び試験要領(その1)

試験片 加工手順	サーマルストライピング損傷付与材及び未使材共通	備考
素材 (受け入れ状態)	<p>サーマルストライピング付与痕、4-M4 (既設) (損傷付与材のみ)</p>	<p>・試験片加工前にX線回折法による残留応力測定をする。</p>
ひずみゲージ貼り付け	<p>直行2軸ひずみゲージ 東京測器FCA-1-17-005LE</p> <p>表面 : ①、② 2ヶ所、裏面 : ① 1ヶ所</p>	<p>・試験片加工時のひずみ変化を測定する。 ひずみゲージ貼りつけ後ゼロ点調整</p>
粗分割	<p>10 (分割前) 5 (分割後)</p> <p>ワイヤカットにて板厚の半分より分割</p>	<p>・試験片分割後、ひずみゲージにより開放ひずみを測定する。</p>
試験片加工 (Aタイプ試験片)	<p>加工せず (サーマルストライピング付与面)</p> <p>機械加工後研磨</p>	<p>・試験片加工後、①ひずみゲージにより開放ひずみを測定し、 ②ひずみゲージを取り外し、X線回折法により残留応力を測定する。</p>

その2に続く

表2-2 試験片の加工及び試験要領(その2)

試験片 工手順	加工 サーマルストライピング損傷付与材及び未使材共通	備考
ひずみゲージ貼り直し	<p>直行2軸ひずみゲージ 東京測器FCA-1-17-005LE</p> <p>表裏面：各1ヶ所</p>	<p>・試験片加工時のひずみ変化を測定する。 ひずみゲージ貼りつけ後ゼロ点調整</p>
追加工	<p>W=17, R=15mmを W=6, R=12.5mmに追加工</p>	<p>・試験片加工後のひずみを測定する。</p>
ひずみゲージ貼り替え(疲労試験時のひずみ範囲確認用)	<p>ひずみゲージ (東京測器研究所製#FLA-1-17-31)</p> <p>B端：固定側</p> <p>A端：負荷側</p> <p>ひずみゲージは裏面に貼りつけた</p>	<p>上記第1回疲労試験時に對し、固定側と負荷側を反転させた。</p>
サーマルストライピング損傷度評価試験	<p>ひずみ 振幅</p> <p>参考材のデータ</p> <p>$\Delta \epsilon = 0.46\%$</p> <p>繰返し数</p>	<p>ひずみゲージは裏面</p>
終了		

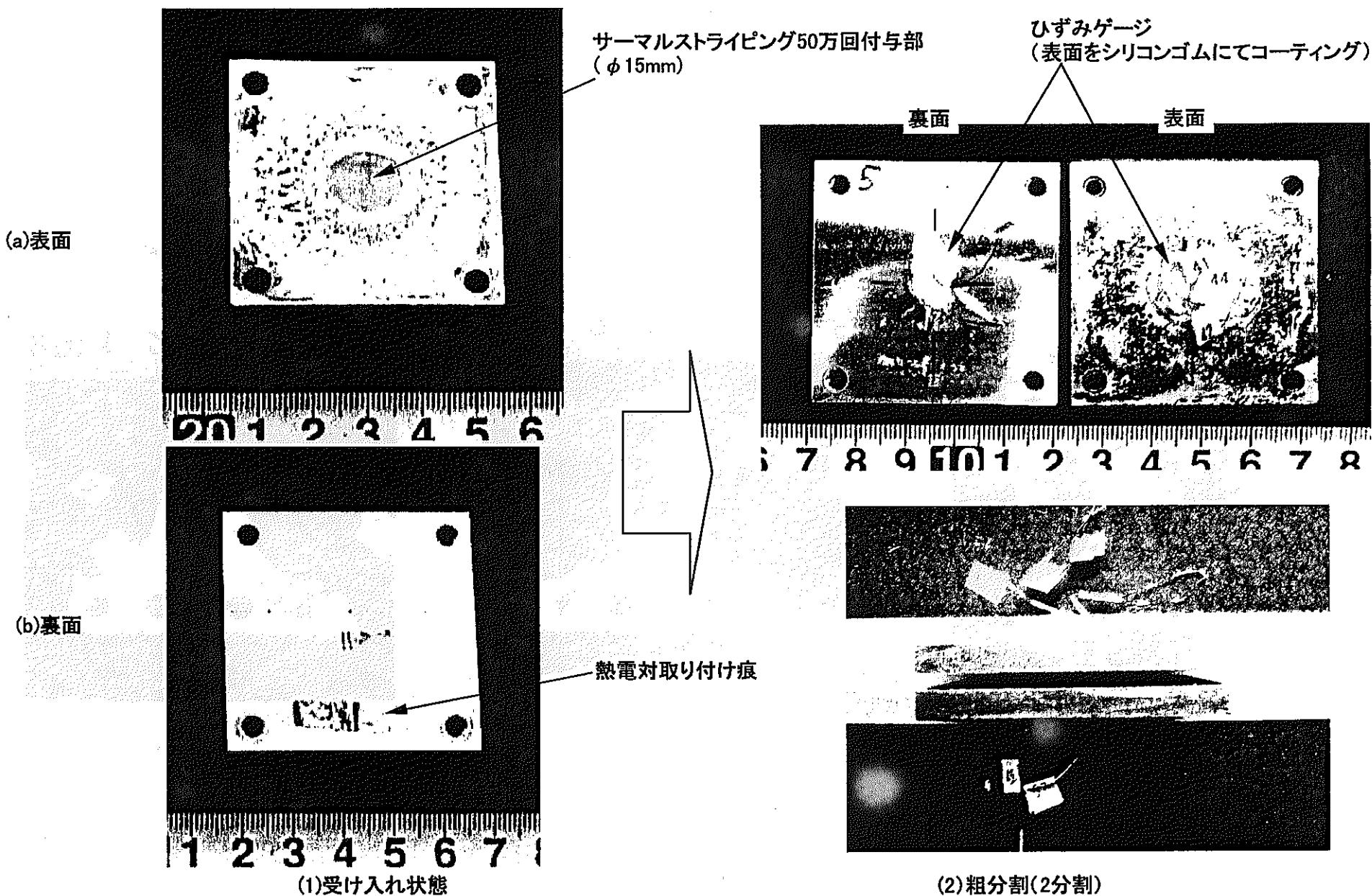
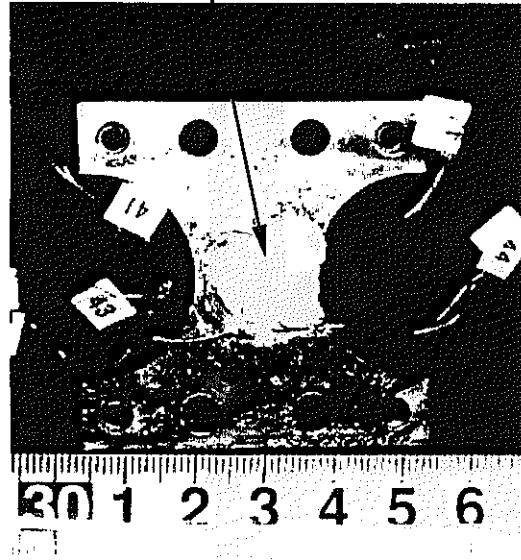


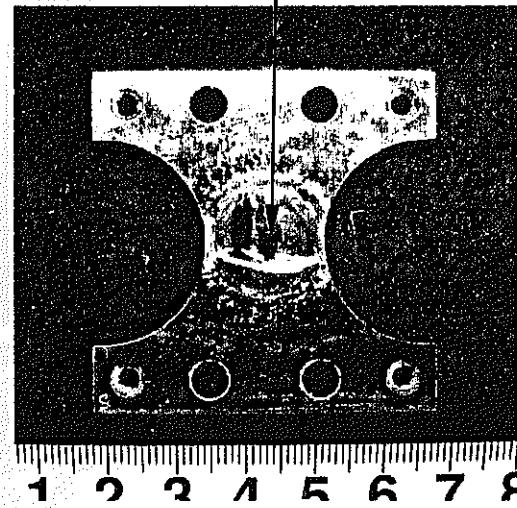
図2-5 損傷付与材における加工工程の外観(その1)

ひずみゲージ
(表面をシリコンゴムにてコーティング)

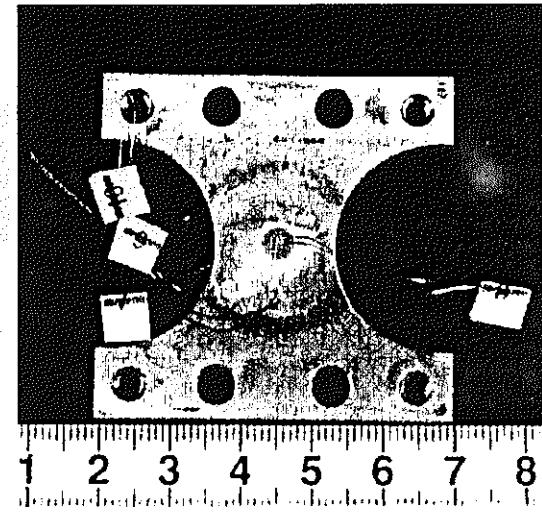
サーマルストライピング50万回付与部
を試験片の中央に加工(最小幅W=17mm)



(3)W=17mm試験片に加工



(4)ひずみゲージ取り外し後



(5)最終加工前のひずみゲージ取り着け状況

図2-6 損傷付与材における加工工程の外観(その2)

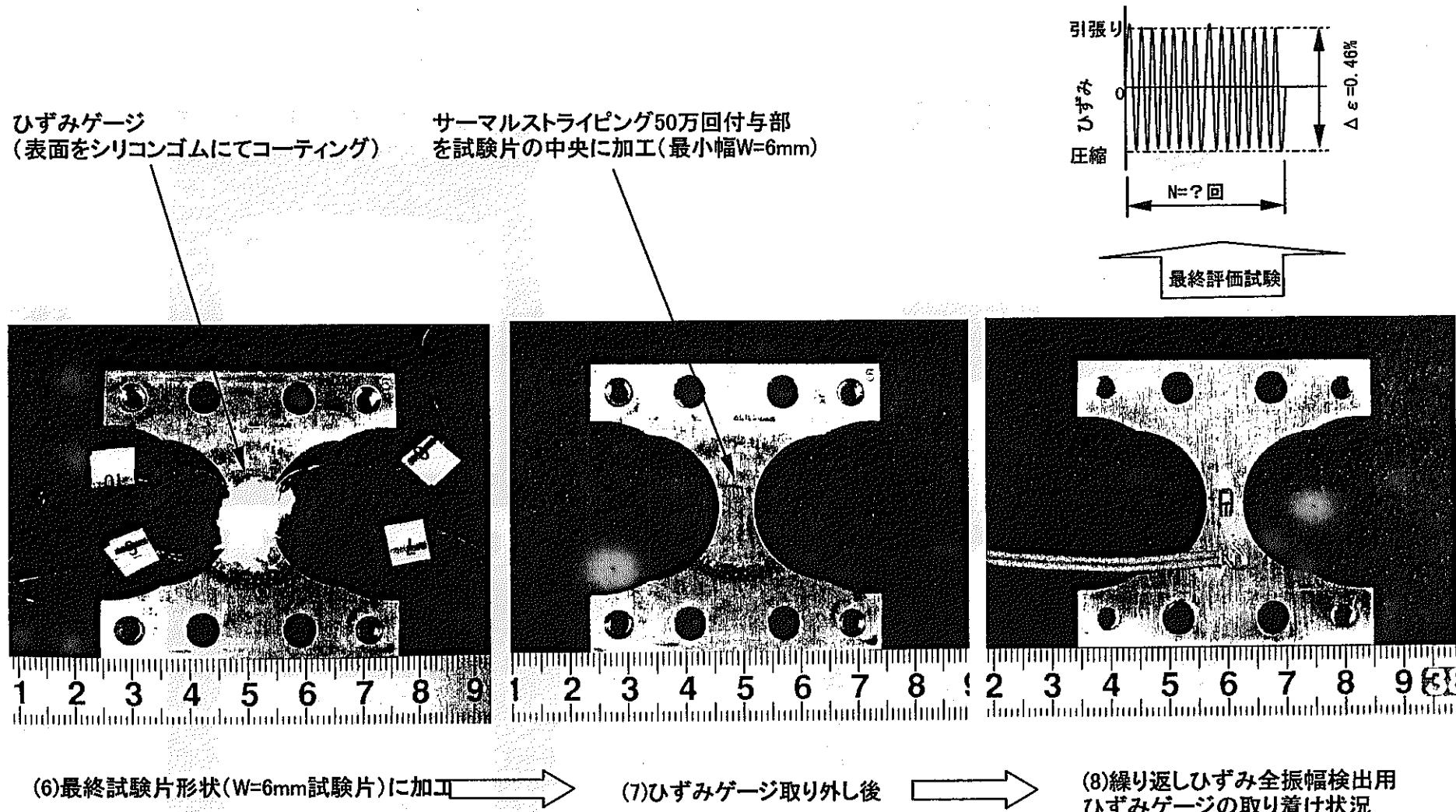


図2-7 損傷付与材における加工工程の外観(その3)

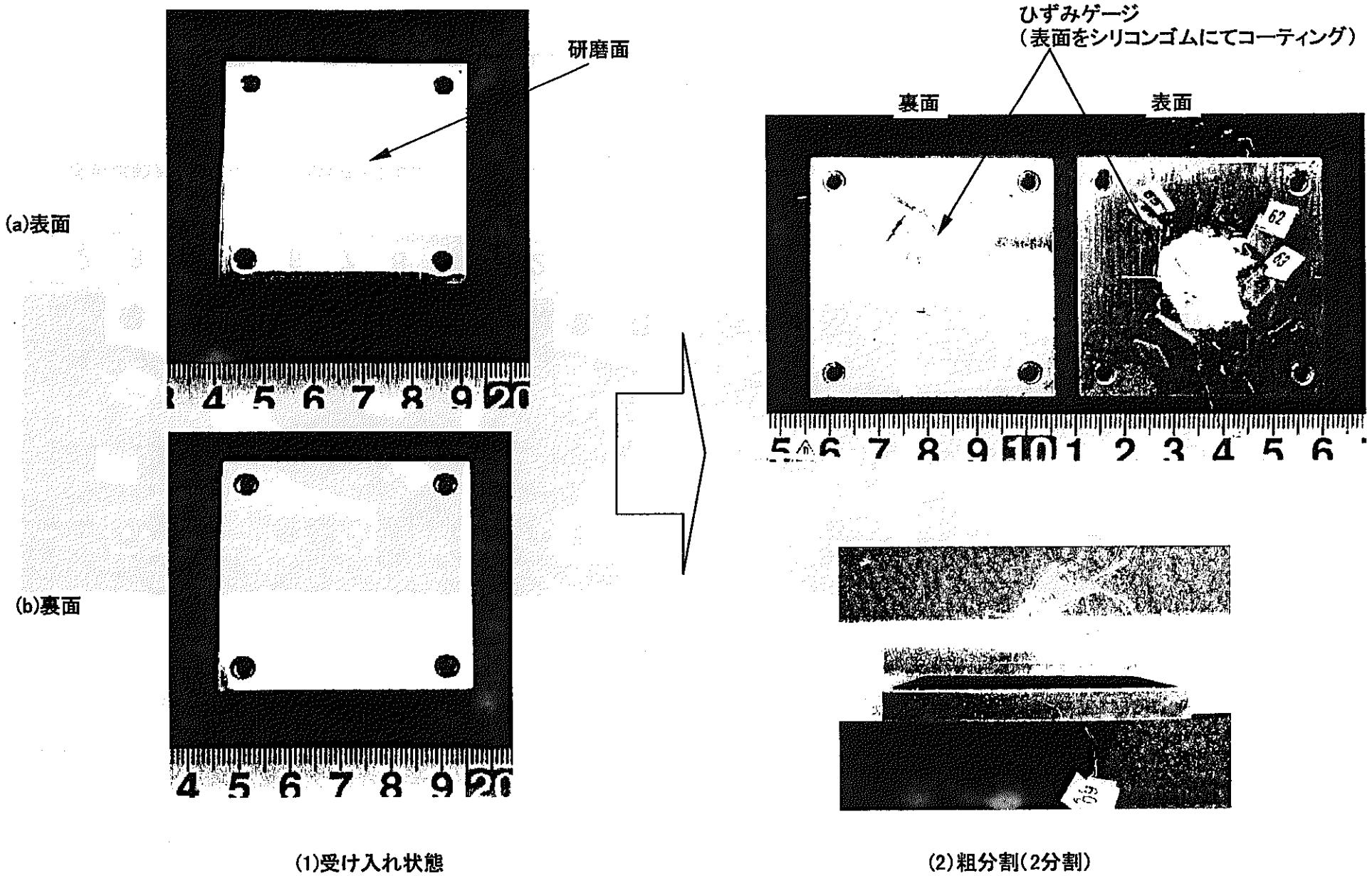


図2-8 未損傷材における加工工程の外観(その1)

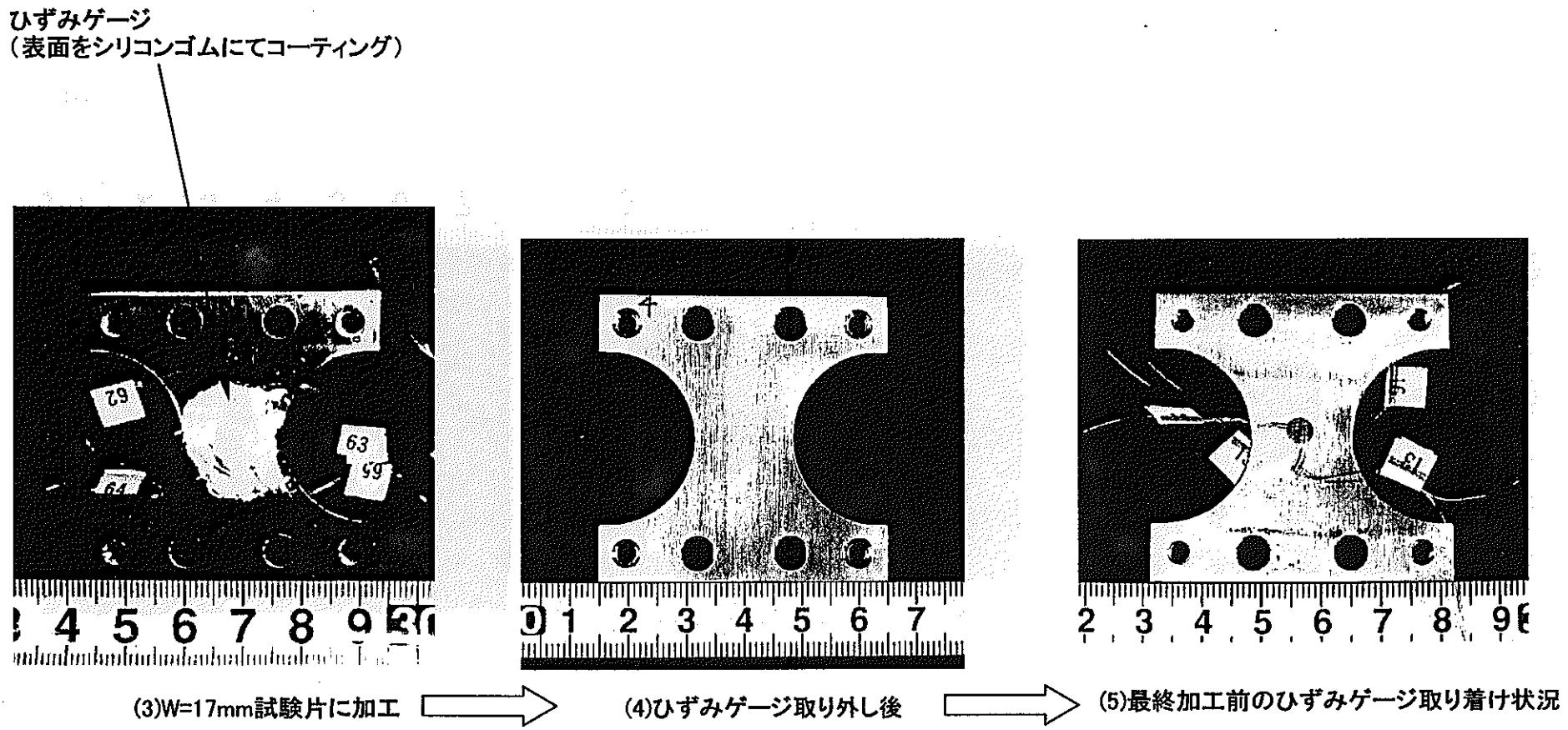
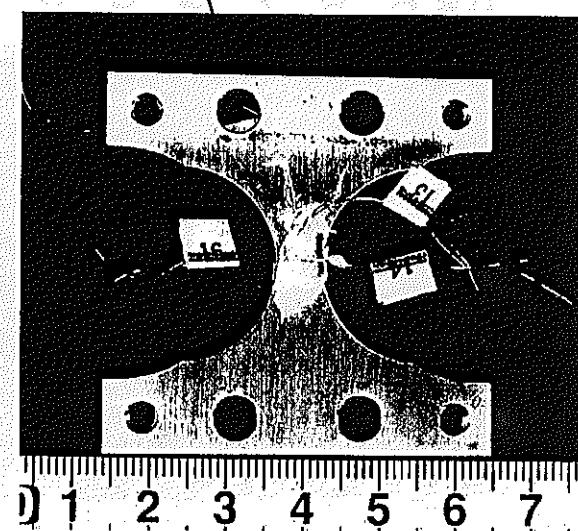
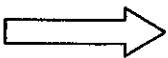


図2-9 未損傷材における加工工程の外観(その2)

ひずみゲージ
(表面をシリコンゴムにてコーティング)



(6)最終試験片形状(W=6mm試験片)に加工



(7)ひずみゲージ取り外し後

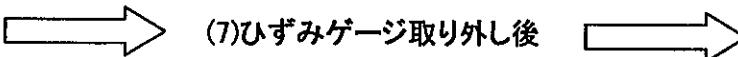
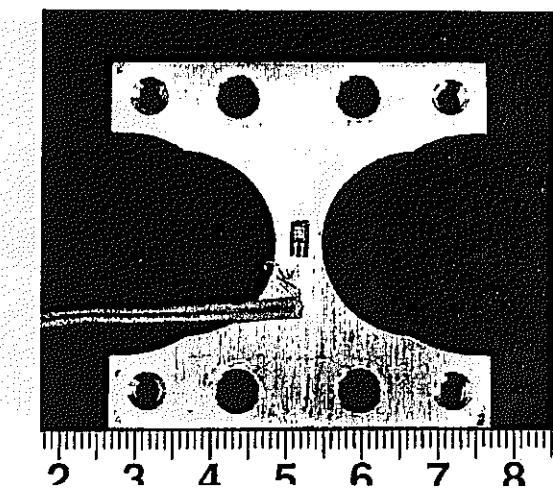
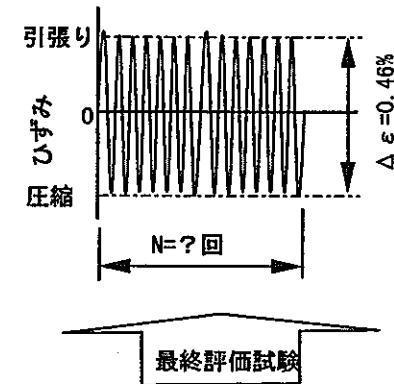
(8)繰り返しひずみ全振幅検出用
ひずみゲージの取り着け状況

図2-10 未損傷材における加工工程の外観(その3)

3. 損傷度評価試験

3.1 非破壊試験

(1) X線による残留応力測定

a. 測定方法

X線回折法による残留応力測定方法は、被測定物の表面にX線を照射し、結晶格子面間のひずみから残留応力を算出する方法であり、試料表面に接触することなく、完全な非破壊試験が可能な残留応力測定手法である。

今回の測定に使用した装置は、理学電機（株）製X線応力測定装置（型式MFS-3M）で、X線の照射面積は4mm×4mmの範囲である。装置の外観を図3.1-1に示す。

X線回折法による残留応力測定概念を、付録Dに示す。

b. 供試体

供試体は、損傷付与材及び未損傷材の2種で、それぞれ50mm×50mm×10mmの受け入れ状態と、これを疲労試験片に加工した後の状態について測定した。各供試体における測定位置を図3.1-2～図3.1-3に示す。

(a) 試験片加工前の測定位置

損傷付与材の表面は、その中心部に直径Φ15mmのサーマルストライピング痕があり、やや青みがかった表面模様が見られる。そのため、X線回折法による残留応力は、試験片の中心部から外周に向かって2mm間隔でサーマルストライピング痕の範囲を詳細に測定し、さらにその外周は4mm間隔と中心に比し粗い間隔で測定した。

また、試験片の最終加工時の影響（研磨方向）を見るため、試験片中心から外周に向かって90°2位相について測定し、各測定点ではさらにその縦横2方向（X,Y方向）について測定した。

なお、損傷付与材の裏面は、フライス盤による機械加工面なので、試験片中心と、外周側に16mmの2点を参考データとして測定した。

これに対し、未損傷材は、表面全域が試験片加工時の仕上げ面のままの状態であることから、残留応力の分布が僅少と考えられるため、1中心線軸上の測定とした。測定点は、中心から外縁に向かって4mmの間隔とした。裏面も同様である。

(b) 疲労試験片加工後の測定位置

疲労試験片に加工した後は、図3.1-3に示す「W=17mm試験片」の状態で測定した。測定位置は、損傷付与材試験片の表裏面、未損傷材試験片の表裏面で、いずれも試験片中心と、4mm離れた位置の2点である。

c. 試験片加工前（受け入れ状態）の残留応力測定結果

X線回折法による残留応力測定結果を表3.1-1、図3.1-4～図3.1-5に示す。

(a) 試験片X方向の残留応力

試験片のX方向とは、試験片を製作したときの最終表面仕上げである粒度#1200のサンドペーパによる仕上げ方向と直角方向に与えた名称である。

損傷付与材における残留応力（以下「 σ_R 」で表示）は、試験片中心部で圧縮の「以下（-）記号で表示」 $\sigma_R=-295\text{ MPa}$ であり、試験片の研磨方向と直角方向であるA-A線上では、試験片中央部のサーマルストライピング付与範囲 $\phi 15\text{ mm}$ 内で $\sigma_R=-382\sim-456\text{ MPa}$ 、その外周側では $-259\sim-334\text{ MPa}$ という結果が得られた。

また、同試験片における前記A-A線と直角方向のB-B線上の残留応力は、サーマルストライピング損傷付与範囲内では $\sigma_R=-420\text{ MPa}$ 、その外周側では $\sigma_R=-307\sim-395\text{ MPa}$ であった。

なお、本試験片は縦横（X、Y方向）対称形状であり、さらにサーマルストライピング50万回損傷付与試験条件も、試験片の中心を軸に対称に付与されていたことを考慮すると、A-A線上とB-B線上において残留応力に特異性が有るとは考えにくく、測定値のバラツキと考える。

サーマルストライピング損傷付与範囲内とそれ以外の範囲における残留応力は、この測定値の中に包含され、両者に有意差は無いと考える。

一方、未損傷材におけるA-A線上のX方向残留応力は、 $-333\sim-450\text{ MPa}$ であった。

この値は、試験片表面の最終加工条件によって発生したものと考えられる。

(b) 試験片Y方向の残留応力

試験片のY方向は、試験片を製作したときの最終表面仕上げである粒度#1200のサンドペーパによる仕上げ方向と同一方向である。

損傷付与材における残留応力は、試験片中心部で圧縮の $\sigma_R=-224\text{ MPa}$ であり、A-A線上ではサーマルストライピング付与範囲内で $\sigma_R=-83\sim-197\text{ MPa}$ 、その外周側では $\sigma_R=-77\sim-115\text{ MPa}$ であり、同試験片におけるB-B線上の残留応力は、サーマルストライピング損傷付与範囲内では $\sigma_R=-315\text{ MPa}$ 、その外周側では $-55\sim-171\text{ MPa}$ であった。

また、未損傷材におけるA-A線上のX方向残留応力は、 $\sigma_R=-264\sim-383\text{ MPa}$ であった。

以上の結果より、損傷付与材のY方向（製作時の最終研磨方向と同一方向）残留

応力は、同試験片の X 方向の結果に比し全体的に約 200~300MPa 引張側の値であった。

未損傷材においても同様に 100~150MPa 引張側であり、研磨方向による有意差が確認された。

サーマルストライピング損傷付与範囲内とそれ以外の範囲における残留応力は、B-B 線上で前者の方が圧縮側に大きい分布が見られるが、同試験片の A-A 線上ではほぼ同等の値が得られていることおよび、前記した X 方向の測定結果についても、50 万回損傷付与による影響の無いことから、本試験結果に関しても同様な判断ができる。

d. 疲労試験片加工後の残留応力測定結果

疲労試験片 (W=17mm 試験片) 加工後の残留応力は、加工前の値とほぼ同等である。このことより、試験片加工によって表面の応力状態が変化していないことが確認された。

なお、この試験片加工時の残留応力の変化に関しては、後述するひずみゲージ法によっても確認する。

e. まとめ

上記結果を総合すると、試験片表面の残留応力は試験材の受け入れ状態あるいはその後の試験片製作過程の測定結果から、サーマルストライピング 50 万回損傷付与したことによる有意差は見られず、熱サイクルによる影響は無いと判断される。

(2) ひずみゲージ法による残留応力測定

a. 測定方法

ひずみゲージ法による残留応力測定方法は、被測定物の表面にひずみゲージを接着剤で貼り、該ひずみゲージの周囲が加工などによって開放されたときに発生するひずみを、ひずみゲージ内の抵抗線によって電気的に検出し、ひずみに換算測定する手法である。したがって、X 線回折法が完全な被接触で応力を測定するのに対し、本ひずみゲージ法は被測定物を切断開放することに特徴がある。

今回の測定に使用したひずみゲージは、東京測器研究所（株）製の直交 2 軸ゲージ（型式 FCV-1-1/5-005LE）で、ひずみ測定には同社製測定機器（データロガー型式 TDS-302）を用いた。なお、同ひずみゲージにおけるひずみ検出部はゲージベース内の 1mm × 1mm の範囲である。

ひずみゲージを貼る場合、被測定物の表面をペーパタオルあるいは脱脂綿などを

用いて、有機溶剤（本試験ではアセトンを用いた）により脱脂を行う。したがって、試験片の表面をこれらの材料でこすることになるが、試験片に対し非常に柔らかいものなので、試験片の表面に傷などの悪影響を与えることは無い。

ひずみ測定時の状況を図3.1-6に示す。ひずみゲージは機械加工時にも常時取り付けた状態であるため、切削油等からの損傷を避けるため、シリコンゴム（信越化学工業#KE-348-W）にてコーティングした。さらに、機械加工時の邪魔になるためリード線（ひずみゲージから測定器に接続するビニール被服電線）を設けない仕様とした。そのため、ゲージリード（付録D参照）との接続はハンダ接合あるいは、クリップによる挟み込み方式を採用した。

ひずみゲージ法による残留応力測定概念を、付録Dに示す。

b. 供試体

供試体は、損傷付与材及び未損傷材の試験片の2種で、それぞれ50mm×50mm×10mmの受け入れ状態から、前述した疲労試験片に加工する過程の残留応力（開放ひずみ）を測定した。

ひずみの測定は次の2段階に分類される。第1段階は加工前の形状からW=17mm試験片に加工するまで、第2段階はW=17mm試験片から最終疲労試験片形状であるW=6mm試験片に加工するまでである。

c. ひずみゲージ法による残留応力測定結果

表3.1-2および表3.1-3に、各試験片加工工程概要と測定結果を合わせて示す。

(a) 受け入れ素材からW=17mm試験片まで

最終的な疲労試験片の厚みは、前述のごとく4mmとした。そのため、板厚10mmの試験片をワイヤカットにて厚み方向に2分割した。このときの発生ひずみは損傷付与材の表面で、 $\varepsilon = -50 \sim -80 (\times 10^{-6} \text{ストレイン})$ 、未損傷材で $\varepsilon = -44 \sim -109 (\times 10^{-6} \text{ストレイン})$ であり、両者同等であった。

このあと、試験片中央部の最小幅をW=17mmに加工した。初期からのひずみは損傷付与材で $\varepsilon = -5 \sim 70 (\times 10^{-6} \text{ストレイン})$ 、未使用の試験片で $\varepsilon = -31 \sim -138 (\times 10^{-6} \text{ストレイン})$ であった。

(b) W=17mm試験片から最終形状試験片まで

試験片中央部の最小幅をW=17mmからW=6mmに加工したときのひずみは損傷付与材で $\varepsilon = 36 \sim 104 (\times 10^{-6} \text{ストレイン})$ 、未損傷材で $\varepsilon = -40 \sim 56 (\times 10^{-6} \text{ストレイン})$ であった。

(c) まとめ

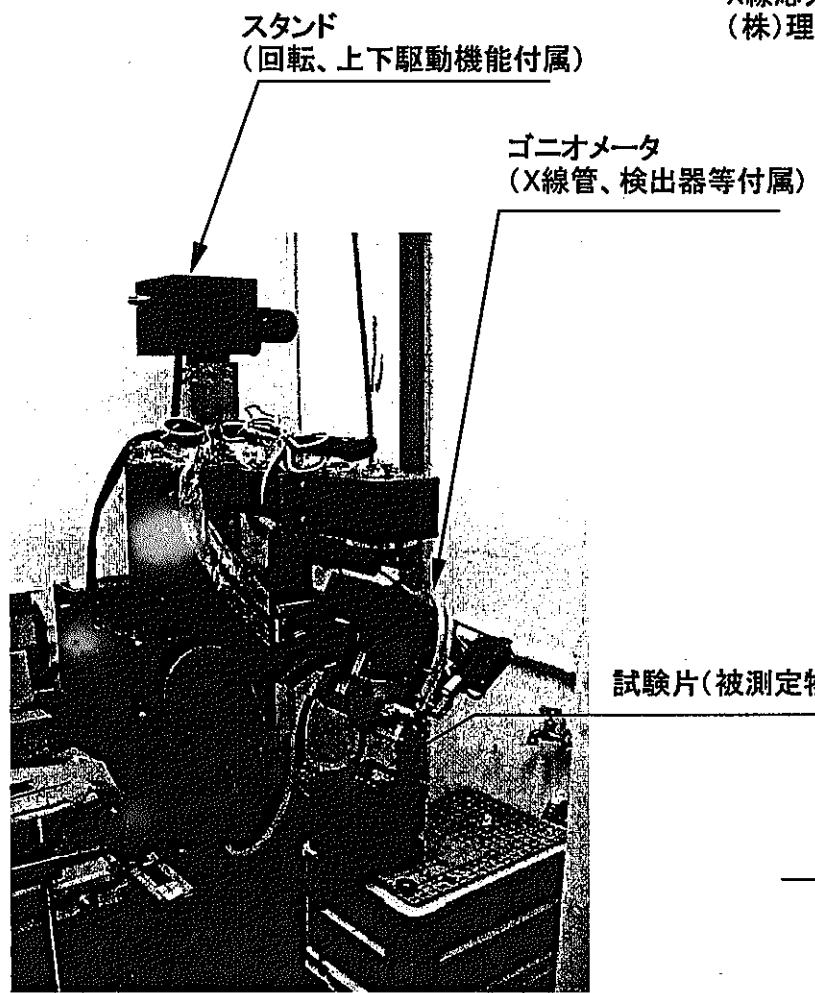
試験片の加工時には、試験片に過大な外力が作用しないように、加工治具を工夫し機械加工時の切削量、切削速度などに注意を払った。

一般に、ひずみゲージは外力をかけないで放置しただけでも、0点のドリフトが発生し、さらに被測定物の温度変化においてもみかけのひずみが発生する。今回、試験片加工時に試験片の温度上昇を把握しなかったため、その影響を分析することはできないが、前記した試験片表面でのひずみ変化には、経時変化と温度の両者の影響が含まれているものと考えられる。

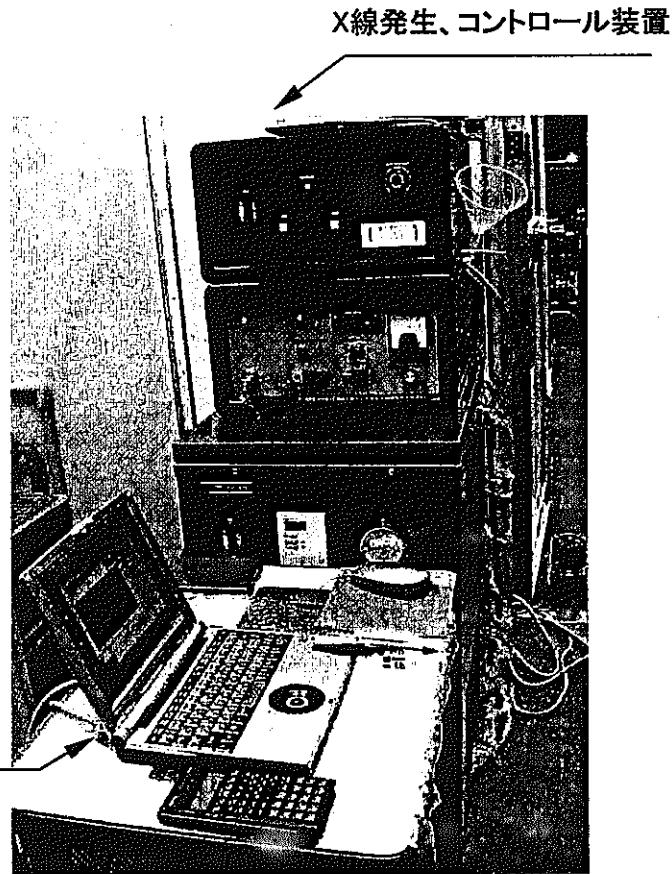
また、ひずみの変化の多くが試験片の表裏両面で、同一方向に移動していることからも、加工時に曲げ変形などが加わったものではないことがわかる。

上記で得られた値は、以降の疲労試験時の繰返しひずみ全振幅と比較すると、無視し得る大きさであり、問題無い値と判断する。

X線応力測定装置:
(株)理学電機 型式MFS-3M



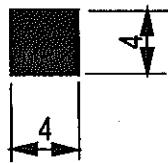
(a) 装置本体



(b) コントロール装置、機器

図3.1-1 X線回折法による残留応力測定装置

■は測定位置を示し、X線照射面積は



である。

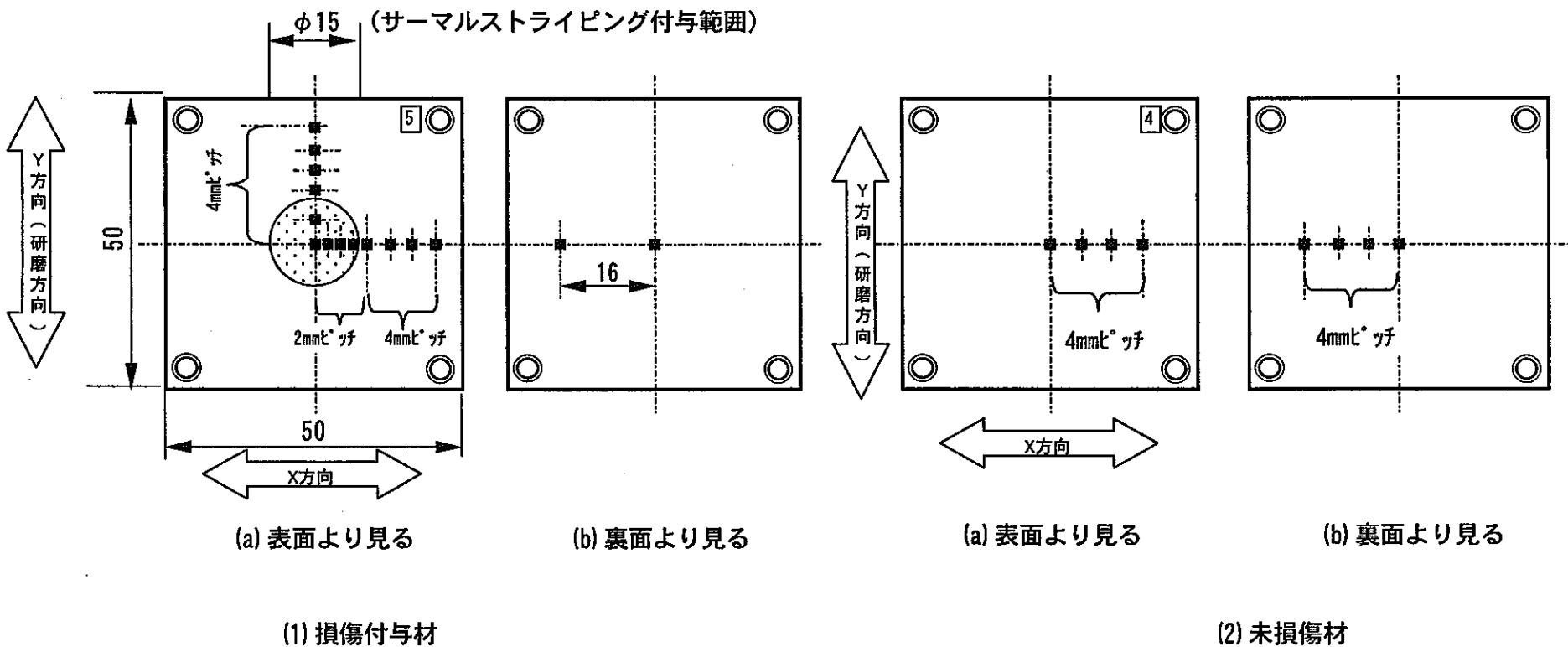
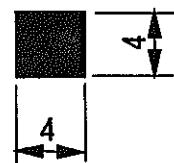
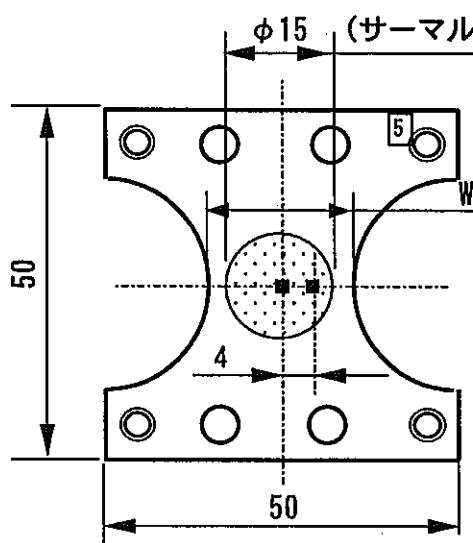


図3.1-2 X線回折法による試験材受け入れ状態の残留応力測定位置

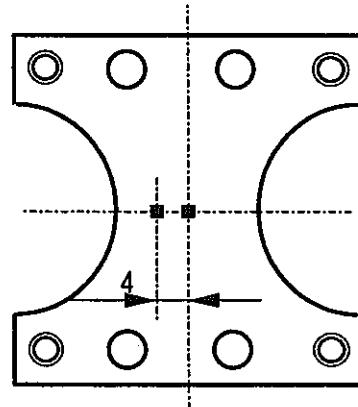
■は測定位置を示し、X線照射面積は



である。

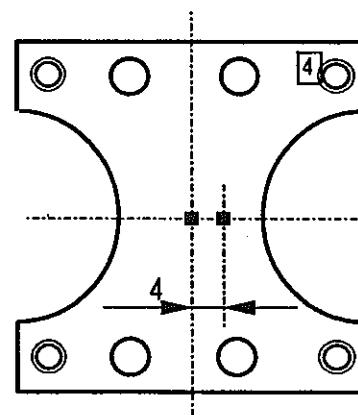


(a) 表面より見る

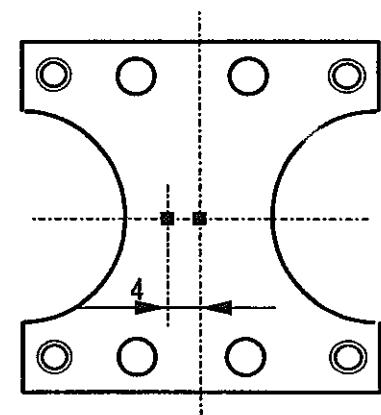


(b) 裏面より見る

(1) 損傷付材



(a) 表面より見る



(b) 裏面より見る

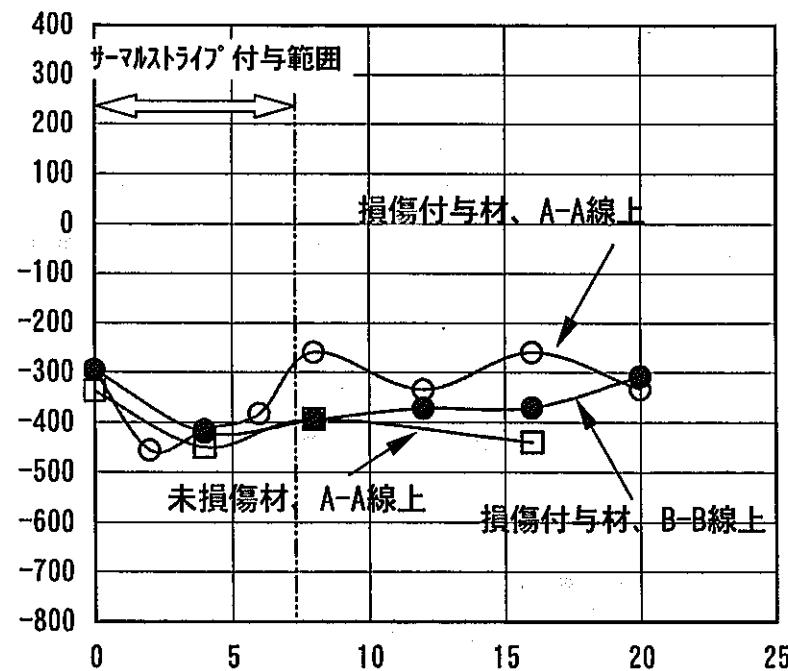
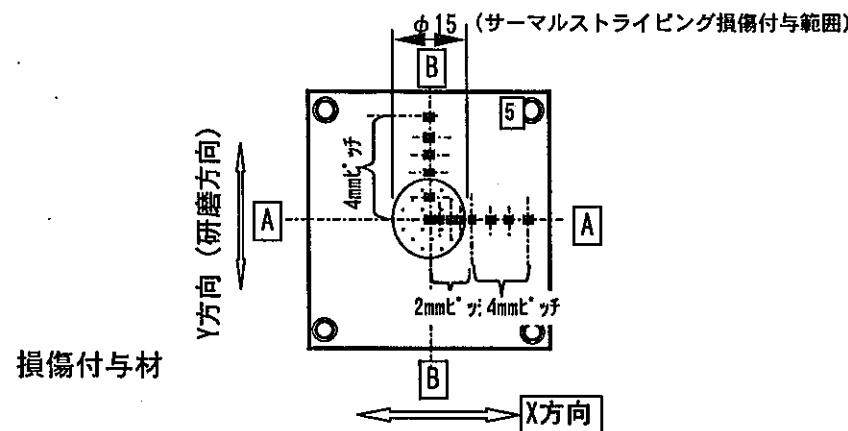
(2) 未損傷材

図3.1-3 X線回折法による試験片加工後の残留応力測定位置

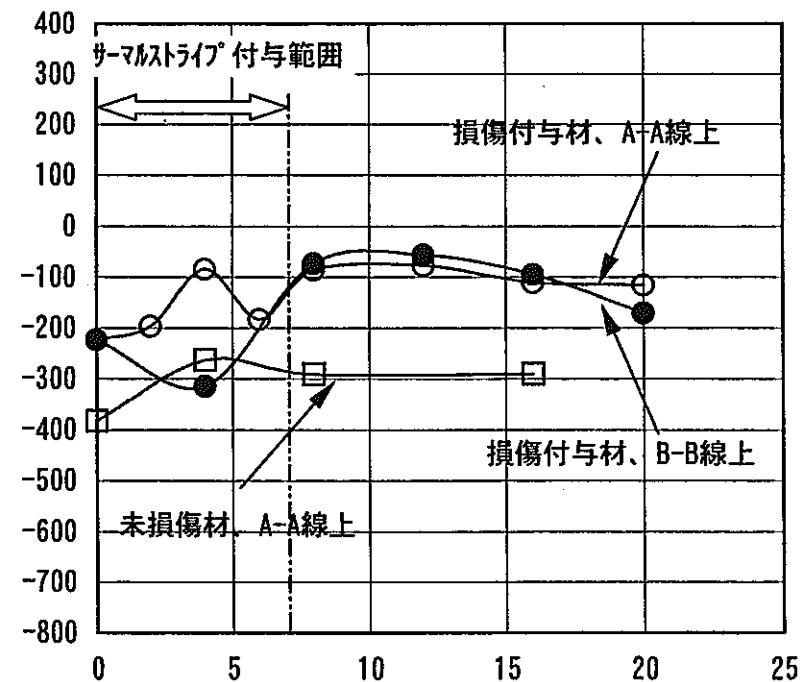
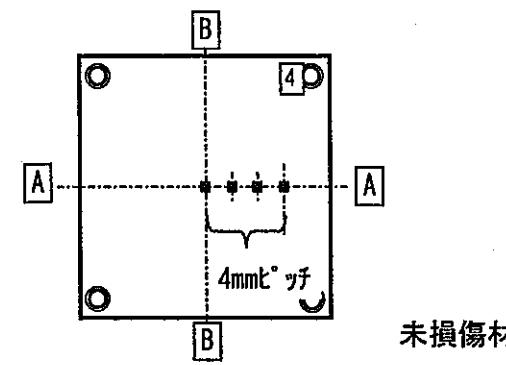
表3.1-1 X線回折法による残留応力測定結果

(単位: MPa)

試験片概要	加工前(受け入れ状態)						試験片加工後											
測定位置 (中心 からの距離) (mm)	(1) 損傷付与材			(2) 未損傷材			(1) 損傷付与材			(2) 未損傷材			(1) 損傷付与材			(2) 未損傷材		
	A-A線上		B-B線上		A-A線上		表面(A-A線上)				裏面(A-A線上)							
	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
0	-295	-224	-295	-224	-337	-383	-427	-178	-366	-296	-439	-334	-250	-266				
2	-456	-197																
4	-414	-83	-420	-315	-450	-264	-370	-97	-349	-228	-558	-374	-207	-239				
6	-382	-183																
8	-259	-85	-395	-73	-394	-292												
12	-334	-77	-371	-55														
16	-259	-110	-370	-94	-440	-291												
20	-333	-115	-307	-171														



(a) X方向残留応力



(b) Y方向残留応力

図3.1-4 残留応力測定結果（試験片加工前、表面のみ）

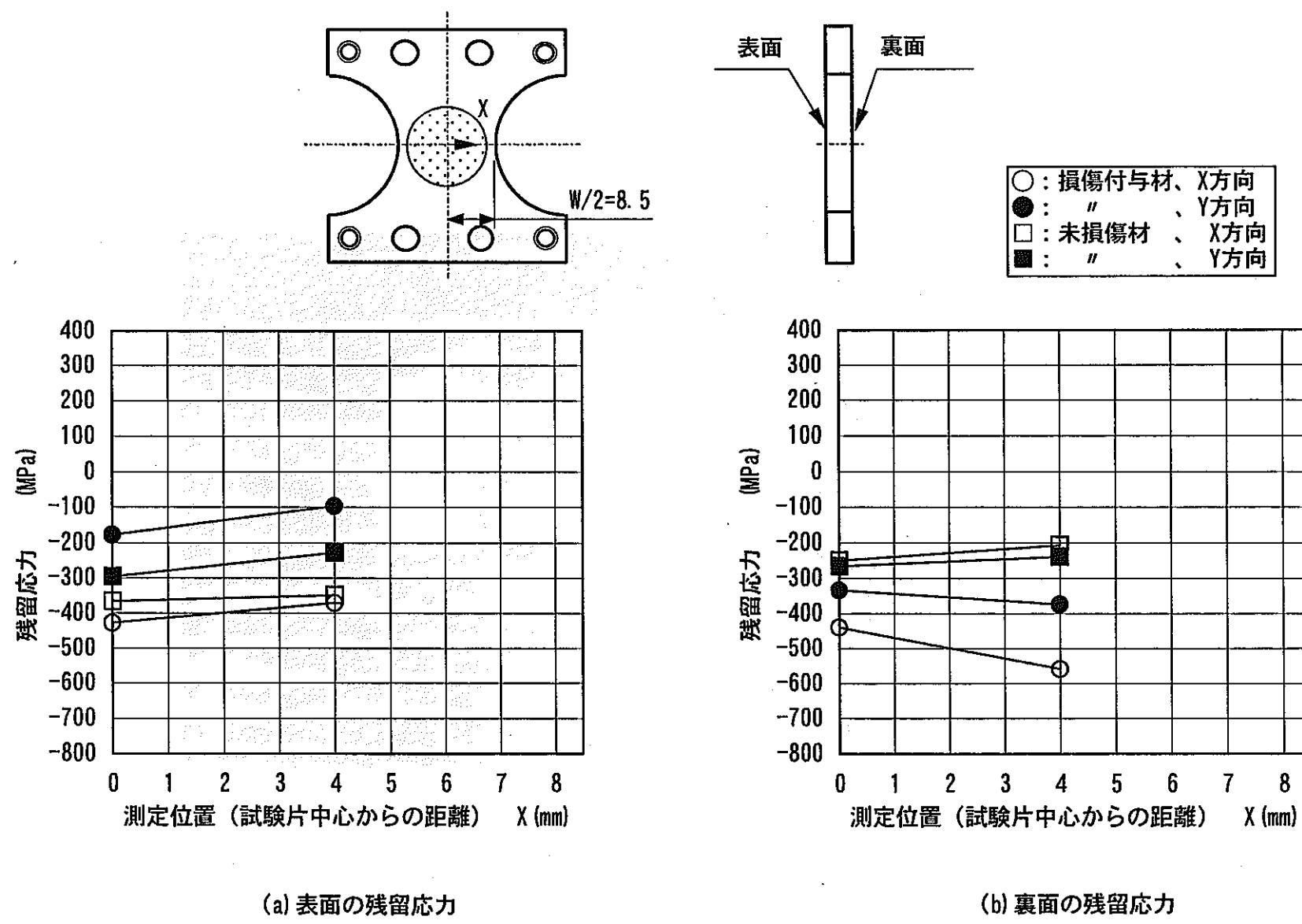


図3.1-5 残留応力測定結果（試験片加工後）

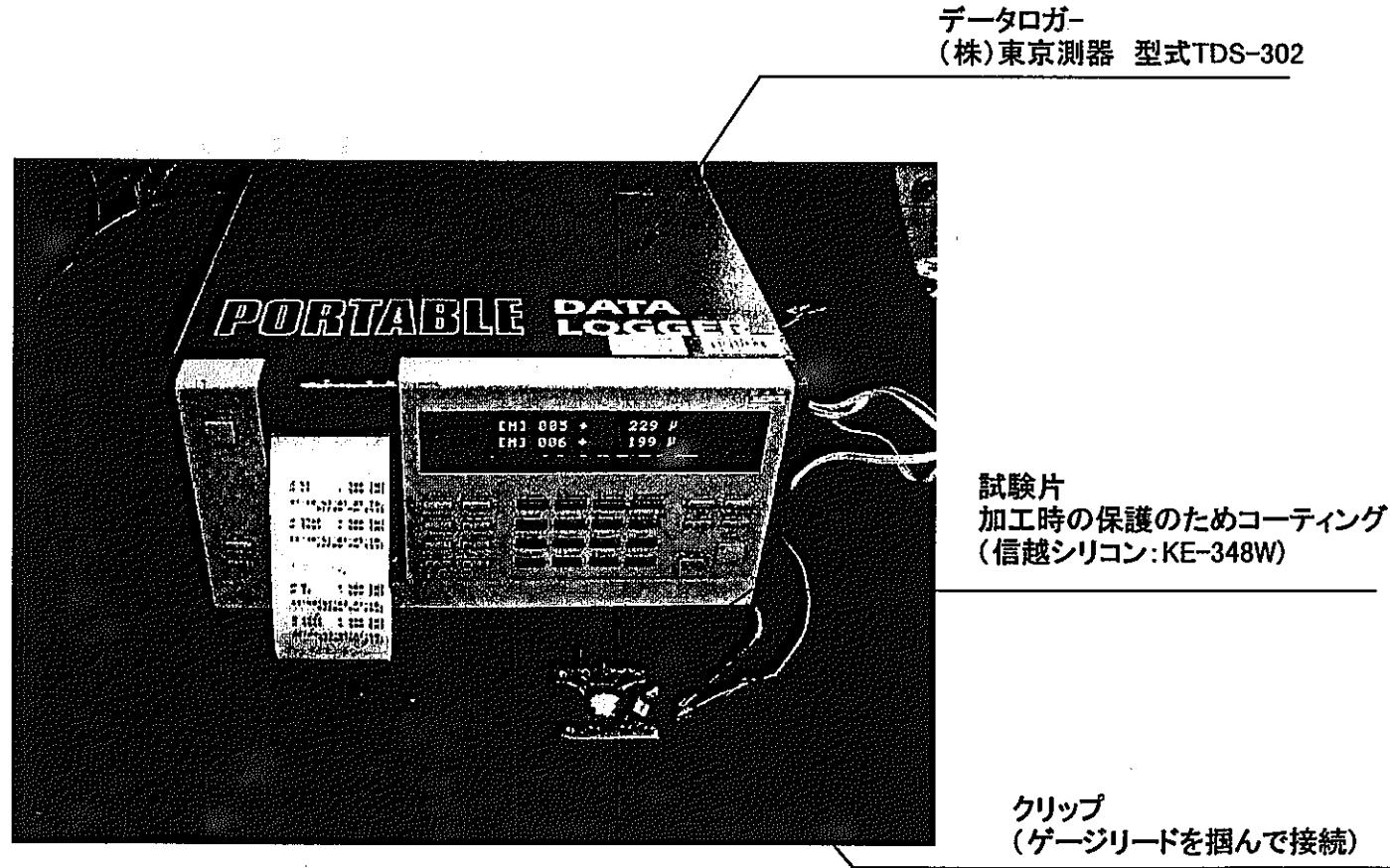
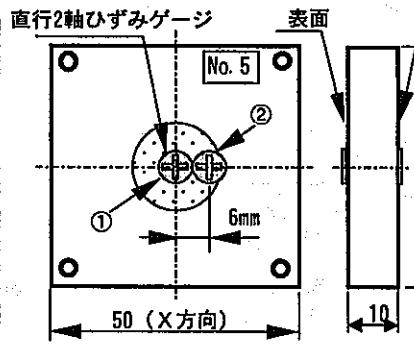
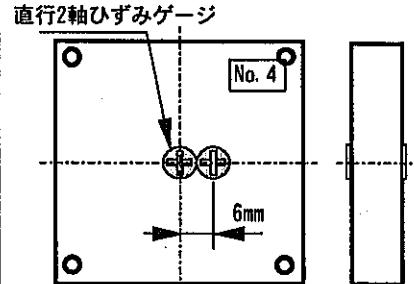


図3.1-6 ひずみゲージ法による残留応力測定状況

表3.1-2

試験片加工工程におけるひずみ測定結果（その1：素材からW=17mm試験片加工まで）

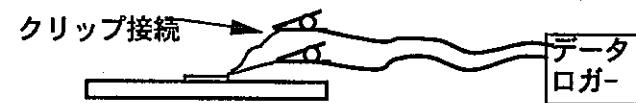
単位： μ ($\times 10^{-6}$)

区分	ひずみゲージ貼り付け位置 (ゲージ；東京測器#FCA-1-17-005LE)	加工手順	初期状態(加工前) →		2分割後 →		試験片加工後	その2に 続く
			構造概要		0.3(切断代)			
損傷付与材			表面	X方向 X① 0 X② 0	-62 -50	-5 3		
			裏面	Y方向 Y① 0 Y② 0	-80 -66	70 70		
未損傷材			表面	X方向 X① 0 X② 0	-69 -109	-92 -138		
			裏面	Y方向 Y① 0 Y② 0	-78 -44	-52 -31		
備考			ゼロ点調整		ワイヤカットにて分割		試験片に外力が作用しないよう配慮して加工	

ハンダ付け  計測線の接続、取り外しはハンダ付けとした。

表3. 1-3 試験片加工工程におけるひずみ測定結果（その2：W=17mm試験片からW=6mm試験片加工まで）
単位： μ ($\times 10^{-6}$)

区分	ひずみゲージ貼り付け位置 (ゲージ；東京測器#FCA-1-17-005LE)	加工手順	加工前	試験片加工後	試験
			構造概要		
損傷付与材			表面	X方向	0
				Y方向	57
			裏面	X方向	0
				Y方向	36
			表面	X方向	0
				Y方向	41
			裏面	X方向	0
				Y方向	104
未損傷材			表面	X方向	0
				Y方向	-40
			裏面	X方向	0
				Y方向	56
			表面	X方向	0
				Y方向	7
				X方向	32
備考			ゼロ点調整		



計測線の接続、取り外しはクリップ方式とした。

3.2 薄板曲げ疲労試験

(1) 試験装置

薄板曲げ疲労試験に使用した装置の構成を図 3.2-1 に示す。疲労試験機本体は、(株)島津製作所製 SERVO-PULSER (型式 EHF-0.1、最大荷重: ± 1 kN、最大繰返し変位: ± 25mm、繰返し速度: 0.001~110Hz) である。

本装置は上記本体以外に、油圧供給ユニットと試験条件を設定するコントローラ (同社製、型式 CONTROLLER#4825) で構成される。装置の外観写真を図 3.2-2 に示す。

薄板曲げ疲労試験時における、試験片の取り付けおよび繰返し負荷装置の概要を図 3.2-3 に示す。

試験片は、その片端を試験片固定ブロックに、ボルト (M5×2 本) にて固定し、他方の片端は、負荷治具を介し試験機のフレームに設けられている中心軸に取り付け、この間で両端の相対的上下繰返し駆動により平面曲げ疲労試験を行うものである。この中心軸には荷重を電気信号に変換し出力するロードセルと、後述する曲げ変形を吸収する軸受けが設けられている。

本疲労試験は薄板の片持ち梁式平面曲げ試験であるが、上下に繰返し稼動するのは試験片の固定側である。

なお、試験片の 1 端を固定し、他端に片持ち梁式に曲げ変位を与えた場合、試験片のたわみに応じて、繰返し変位負荷点は円弧を描く。この円弧は、モーメントアーム (本試験では 52mm) と設定変位によって定まる。したがって、試験片に出来るだけ純粋な曲げ応力を与えるには、この負荷点の円弧の軌跡に追従できる負荷構造が必要となる。これに対応するため、本試験装置では図 3.2-3 に示す 2 個の球面軸受けを組み合わせた構造を採用した。

疲労試験時の外観写真を図 3.2-4 に示す。

(2) 試験条件

「周波数制御ホットスポット温度ゆらぎによるき裂発生基礎実験」で負荷したサーマルストライピングによる損傷は、ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon = 0.32\%$ に相当することが別途実施した FEM 結果より分かっている。図 3.2-5 に示すように、ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon = 0.32\%$ での疲労寿命 N_f は、316FR 鋼板材で 2.5×10^8 回となり、このことから、50 万回のサーマルストライピングによる損傷は非常に小さいことが予測される。したがって、薄板曲げ疲労試験では、損傷付与材と未損傷材の差が出やすいように、可能な範囲で長寿命、低ひずみ範囲を狙って試験を行う。

図 3.2-6 に示すように、316FR 鋼板材では、疲労寿命のばらつき範囲が factor of 5 となっている。このことから、予測寿命に対する実測寿命は最長 5 倍となることが分かる。このばらつき範囲を考慮し、試験条件を決定する。

ひずみ範囲及び周波数をパラメータとした予測試験時間と破損寿命をまとめて図 3.2-7 に示す。試験期間は 1 ヶ月程度を見込んでおり、損傷付与材と未損傷材の 2 体実施する場合、疲労寿命のばらつき factor of 5 を考慮すると、1 体当たりの試験期間は 72h となる。したがって、この条件を満足する範囲で長寿命、低ひずみ範囲の条件として、ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon = 0.45\%$ 程度、周波数 3Hz を試験条件として設定する。

試験条件をまとめて以下に示す。

- ① 温度 : 室温
- ② ひずみ範囲 : 0.45% 程度
- ③ ひずみ速度 : 3Hz
- ④ 試験時の監視 : 繰返し荷重、ひずみゲージ出力
- ⑤ き裂の確認 : 任意の繰返し数ごとにレプリカ法（付録D 参照）、或いは目視による観察を行う。

(3) 疲労試験時のひずみ測定方法

本試験は、繰返し全ひずみ範囲をパラメータとした疲労試験である。ひずみの測定は以下の方法によって行った。ひずみ測定の系統は前記図 3.2-1 に示す。

ひずみの測定は、ひずみゲージ法（付録D 参照）により行った。使用したひずみゲージは（株）東京測器研究所製、型式 FLA-1-17-3L、接着剤も同社製型式 CN である。本ひずみゲージのひずみ検出部は $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の範囲で、素線の線膨張係数は $\alpha = 17 \times 10^{-6}/\text{°C}$ を採用し、被測定物（試験片）とほぼ同等とすることによって、室温などの変化による見かけのひずみの出力を極力無くすよう配慮した。

疲労試験時のひずみは、時間とともに常に変化する動的ひずみである。ひずみゲージからの出力は、ゲージリードを介してストレインメータ（東京測器研究所製、型式 DA32D）に接続し、アナライジングレコーダ（YOKOGAWA 製型式 AR1100A）にて読み取り、数値の直読又はチャートにプリントアウトして記録する。

なお、ひずみゲージを被測定物に接着し被測定物と共に疲労を与えた場合、被測定物と同様に疲労被害を受けることになり、その出力が変化する。今回使用したひずみゲージの室温における耐疲労性（安定出力範囲）は、メーカーのカタログによると繰返しひずみ範囲 $\Delta \varepsilon = \pm 0.15\%$ において繰返し数 $N=1000000$ 回であった。

ひずみゲージの繰返しによる劣化は与えられたひずみ範囲によって異なる。本試験のひずみ範囲は、後述の付録Aに示すように $\Delta \epsilon = \pm 0.3 \sim 0.6\%$ であり、使用したゲージの耐久性は前記繰返し回数よりも小さいことが推定される。

今回の試験においては、新規に貼ったひずみゲージにより繰返しひずみ振幅を設定し、以降はコントローラに表示される変位あるいは荷重を監視することによし疲労試験を行った。さらに、ひずみゲージは繰返しによって出力にシフトが発生するため、約100000回前後の繰返しを目途に新しいひずみゲージに交換し、疲労試験を継続した。

(4) 損傷度評価法

サーマルストライピング50万回付与による損傷度の評価試験のひとつとして、本節において薄板曲げ疲労試験を行う。損傷度評価内容を図3.2-8に示す。

本法では、前節までに製作してきた損傷付与材及び未損傷材を用いて、同一試験条件にて疲労試験を行い、その強度（ここではき裂発生に伴う荷重低下繰返し数）を比較することによって評価するものである。

(5) 繰返しひずみ振幅の設定

a. 試験片のひずみ分布特性試験

疲労試験を行うに先立ち、前節で設定された疲労試験片形状による、最小断面部のひずみ集中特性を以下に検討した。

本疲労試験に供した試験片の形状は、受け入れ時の素材寸法の制約より、前節に記したような特殊形状である。つまり、サーマルストライピング50万回損傷付与部を、試験片の中央部に位置させ、該中央部を最小断面積にすることによって薄板曲げ試験時の最大応力部とし、その部位から破断させ疲労強度を求めるものである。そのため試験片は両側面から半円状の切り欠きを設けた形状とした。

しかしながら、この切り欠きによって試験片の中央部は、形状不連続に起因する応力集中が発生する。疲労き裂は最大ひずみ部或いはその極近傍に発生するため、疲労試験時の繰返しひずみ振幅は、当該最大ひずみ部で評価する必要がある。そこで、疲労試験を行うに先立ち、別途、同一試験片形状のひずみ分布を、同一材料を用いた予備試験片にて実測した。ひずみ分布測定概要を図3.2-9に示す。

ひずみ分布は、1枚のゲージベースに5個の素子が組み込まれている「応力（ひずみ）集中測定用ゲージ（東京測器研究所製、型式FYV-1-17）」を用い、各試験片の幅に合わせて適宜切断し使用した。各素子の測定面積は $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の範囲であり、

各素子間のピッチは 2mm である。

ひずみ測定は、後述する疲労試験と同じ固定治具および試験装置を用い、試験片最小断面部の応力で約 $\sigma = 300 \sim 400 \text{ MPa}$ を静的に負荷して求めた。測定結果を図 3.2-10 に示す。

図 3.2-10 に示すように、試験片の長手方向のひずみ分布は、試験片の断面積と負荷モーメントの関係から計算で求めることが出来るので、本試験片では幅方向のひずみ分布のみを実測した。

長手方向ひずみ分布の計算結果及び幅方向の測定結果を図 3.2-10 に示す。

その結果、試験片の長手方向のひずみ分布は、固定側 1mm の位置に最大値があり、幅方向のひずみ集中係数は $\alpha = 1.045$ であった。

b. 疲労試験時のひずみ設定および測定要領

(a) ひずみ設定要領

前項で求めた、各試験片形状における疲労試験時のひずみ計測位置（ひずみゲージ貼りつけ位置）、およびその補正係数を表 3.2-1 に整理して示す。

疲労き裂の発生起点は、試験片に応力を付与したときに発生するひずみの最大部位あるいはその周辺である。従って、繰返しひずみ振幅の値はこのひずみ集中を考慮し付与することが必要である。

以上のことから、ひずみゲージの貼り付け位置は試験片の中心から固定側に 1.0mm、補正係数は 1.045 とした。

(b) ひずみ測定要領

疲労試験時のひずみは前章で述べたように、ひずみゲージからの出力をストレインメータ（東京測器研究所製、型式 DA32D）を介し、アナライジングレコーダ（YOKOGAWA 製型式 AR1100A）にて読み取り、CRT モニタ表示による数値の直読又はチャートにプリントアウトして測定した。

(c) ひずみ全振幅の設定

以下に実施する薄板曲げ疲労試験時の繰返しひずみ全振幅 ($\Delta \varepsilon$) は、別途予備検討を行い、主に破断寿命の観点から「 $\Delta \varepsilon = 0.46\%$ 」を選定した。従って、サマルストライピング 50 万回損傷付与材も未損傷材もこのひずみ振幅で評価を行うこととした。

繰返しひずみ全振幅 $\Delta \varepsilon = 0.46\%$ を与える場合のひずみゲージの出力 (ε) は、前期 (a) の結果より以下で算出した。

$$\text{ひずみゲージ出力} \pm \varepsilon = (\Delta \varepsilon / 2) / \alpha = 0.23\% / 1.045 = \pm 0.22\%$$

(6) 試験結果

a. 疲労試験時の荷重およびき裂の挙動

疲労試験時の繰返し荷重は、き裂の発生などによって変化する。この荷重の変動は、巨視的にはひずみの挙動と同時に監視しているが、詳細な値は疲労試験装置の制御機器（(株) 島津製作所、型式 CONTROLLER#4825）のデジタル表示を読み取り、記録することにより行った。

(a) 損傷付与材

疲労試験時の荷重の挙動を前記ひずみの挙動とともに図 3.2-11 に、疲労き裂の進展状況をレプリカ法（付録D参照）で測定した代表例を図 3.2-13 に示す。

. 繰返し荷重の挙動

疲労き裂が発生し、繰返し荷重に変化が生じるのは、発生したき裂が数 mm 程度まで進展した時点であった。

繰返し荷重全振幅は、定常疲労試験時において $\Delta P=0.223\text{kN}$ であった。今回の試験は繰返し変位一定の試験である。そのため荷重は、疲労き裂の進展に伴い減少する。試験片の破断の定義を「10%荷重低下」としたときの繰返し数は $N=815000$ 回であった。

図 3.2-11 (b) には疲労試験過程における平均荷重 (= (最大引張荷重-最大圧縮荷重) / 2) の挙動を示す。多少の荷重変動はあるが、定常繰返し時においては良好な両振り状態を示し、最終破断に至るに従って、引張側に移行している。これは、本試験片における疲労き裂が、後述するように試験片の表面（上面）から発生したための挙動である。つまり、繰返し変位一定で試験した場合、疲労き裂が試験片の片面に発生すると、き裂の開・閉口方向で負荷荷重のアンバランスが発生することによるものであり、前章にて示した試験要領からも妥当な挙動といえる。

. き裂の挙動

疲労き裂は後項で述べるように、サーマルストライピング付与面から発生した。き裂の発生は試験片最小断面近傍のコーナ 1箇所からであった。

き裂発生繰返し数は、 $N_c=700000$ 回で、10%荷重低下繰返し数 (N_f) に対するき裂発生繰返し数 (N_c) は、 $N_c/N_f=86\%$ であった。

(b) 未損傷材

疲労試験時の荷重の挙動を前記ひずみの挙動とともに図 3.2-12 に、疲労き裂の進展状況を、レプリカ法で測定した代表例を図 3.2-14 に示す。

・ 繰返し荷重の挙動

繰返し荷重全振幅は、定常疲労試験時において $\Delta P=0.222kN$ であり、10%荷重低下繰返し数は $N_f=618000$ 回であった。

図 3.2-12 (b) には疲労試験過程における平均荷重の挙動を示す。定常繰返し時においては良好な両振り状態を示し、最終破断に至るに従って、上記 (a) 損傷付与材の挙動と逆に圧縮側に移行している。これは、本試験片における疲労き裂が、損傷付与材とは逆に試験片の裏面（下面）から発生したための挙動である。

・ き裂の挙動

疲労き裂は、繰返しに伴い表裏面 3箇所から発生した。各き裂の途中長さから推定すると、最初にき裂が発生したのは、試験片裏面（試験時の下側）の一コーナで、その後ほぼ同時に同裏面の反対コーナと、表面（試験時の上面）の一コーナから発生した。

き裂発生が試験片の裏面であったため、正確な疲労き裂発生繰返し数を得ることはできないが、進展後の挙動から推定すると 50 数万回と推定される。10%荷重低下繰返し数 (N_f) に対するき裂発生繰返し数 (N_c) は、 $N_c/N_f=87\%$ で、上記損傷付与材と同等と推定する。

b. 疲労強度

損傷付与材と未損傷材の疲労試験結果の一覧を表 3.2-2 に、それらの S-N 曲線を図 3.2-15 に示す。同図における繰返しひずみ振幅は、前述したひずみ集中を加味した値であり、破断繰返し数は定常繰返し時の荷重の 10%低下時を持って整理した。

その結果、10%荷重低下繰返し数は、以下であった。

損傷付与材 : 815000 回

未損傷材 : 618000 回

c. 疲労試験による破断状況

薄板曲げ疲労試験後の試験片外観及び破断状況を図 3.2-16～図 3.2-17 に示す。

(a) 損傷付与材

疲労き裂は、試験時に上面に位置させていたサーマルストライピング付与面から発生した。き裂発生起点は、試験片の中央から疲労試験時の固定側に約 2.8mm の位置で、試験片のコーナ部であった。反対面（試験時の下面）からのき裂発生は無い。

(b) 未損傷材

疲労き裂は繰返しと共に表裏面の 3箇所から発生した。き裂の発生位置は、試験片の固定側に約 1mm の位置で、試験片のコーナ部である。前節で検討したひずみ集

中の結果とよい一致を示している。

なお、表面き裂と裏面き裂は貫通していない。このことより、両振り繰返しにより表裏個別にき裂が発生したことがわかる。

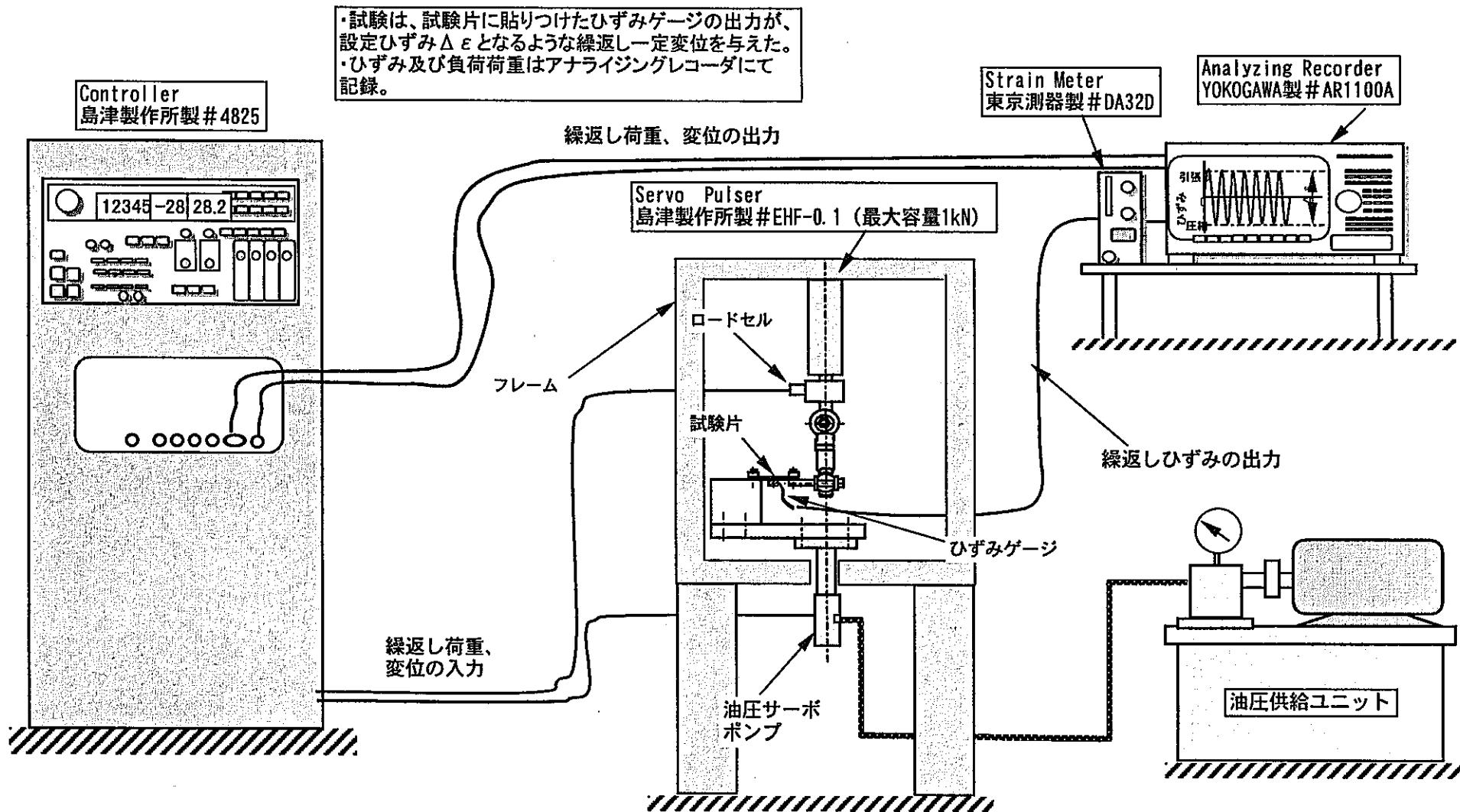


図3.2-1 薄板曲げ疲労試験装置構成

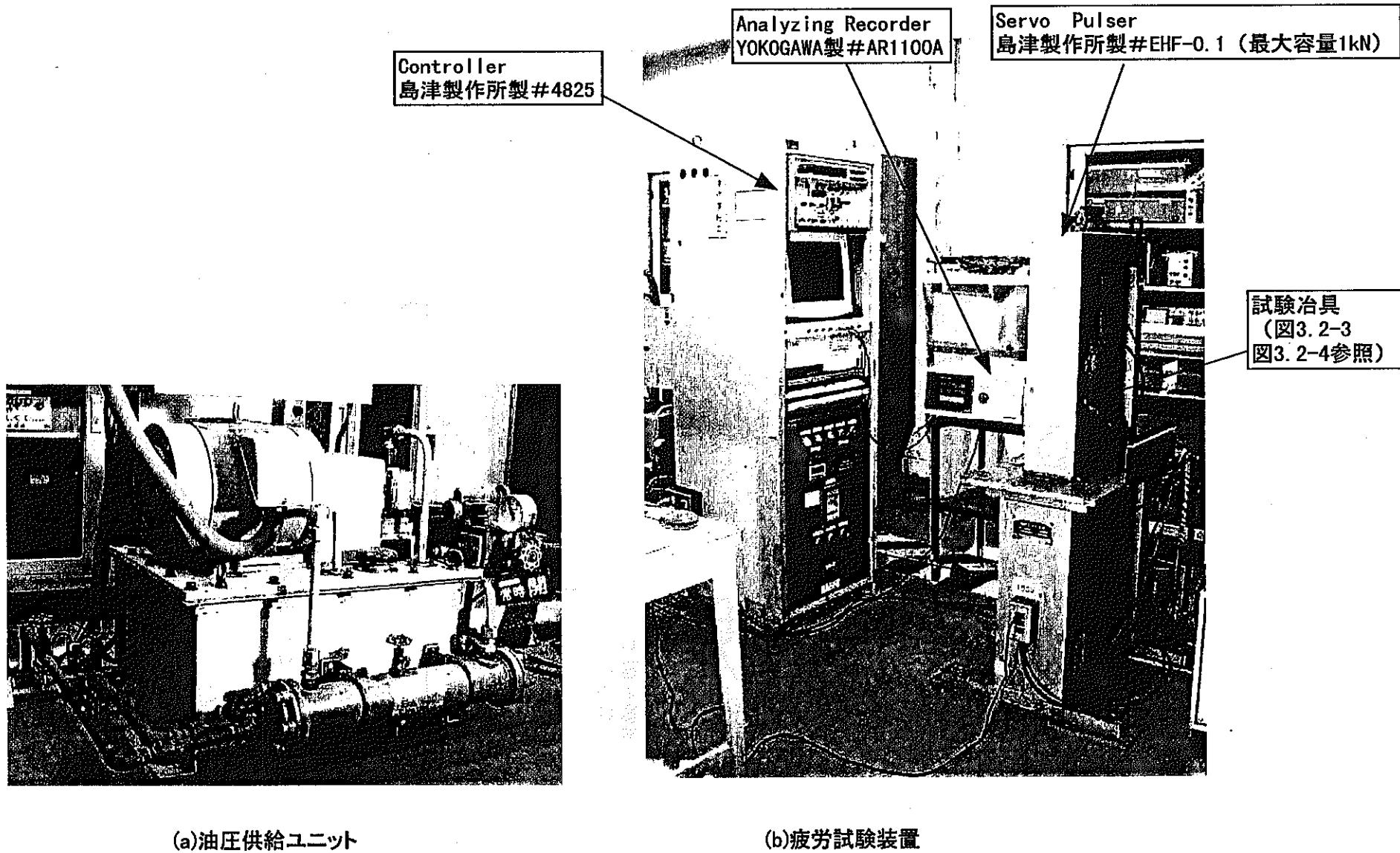


図 3.2-2 薄板曲げ疲労試験装置構成

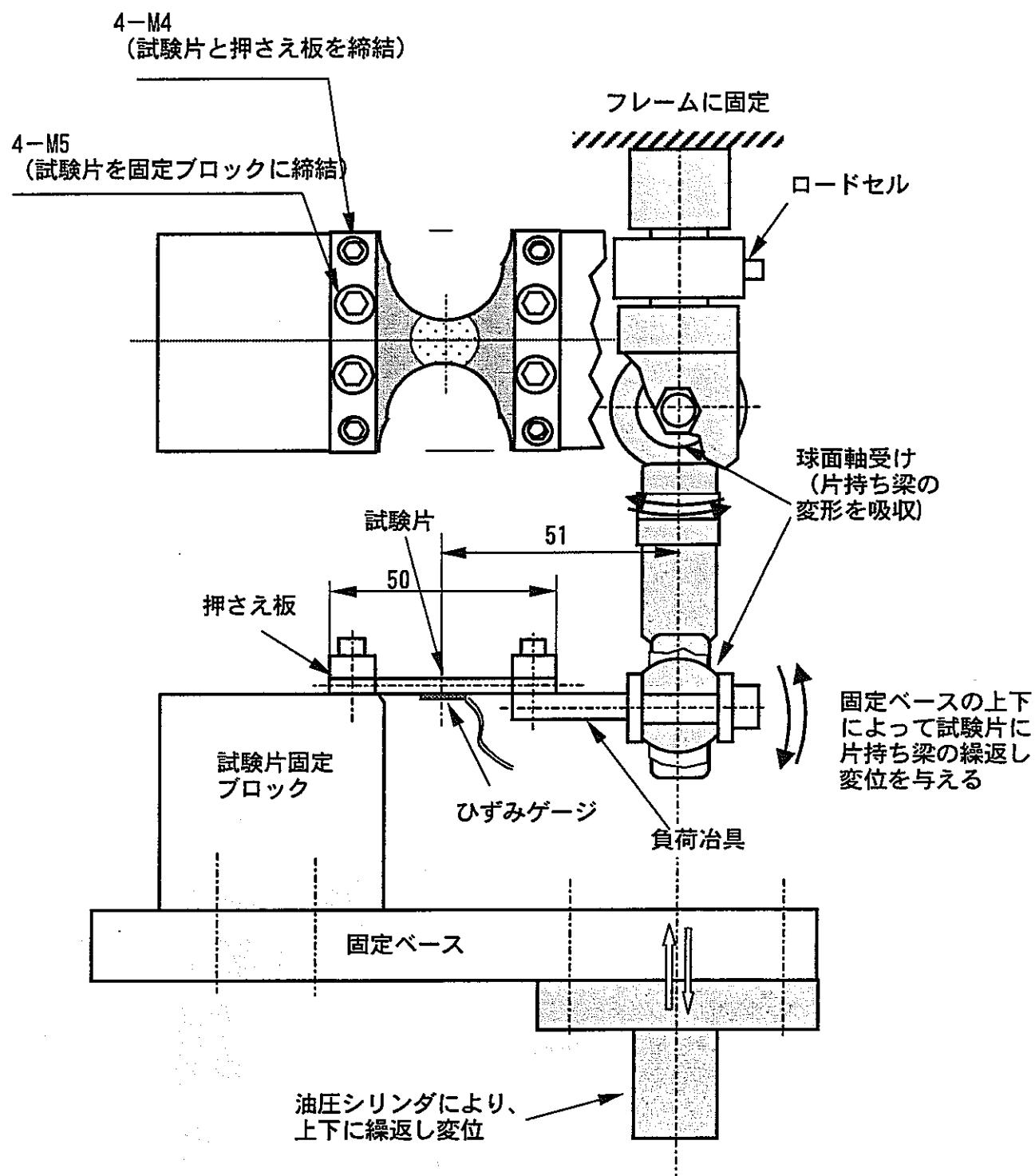
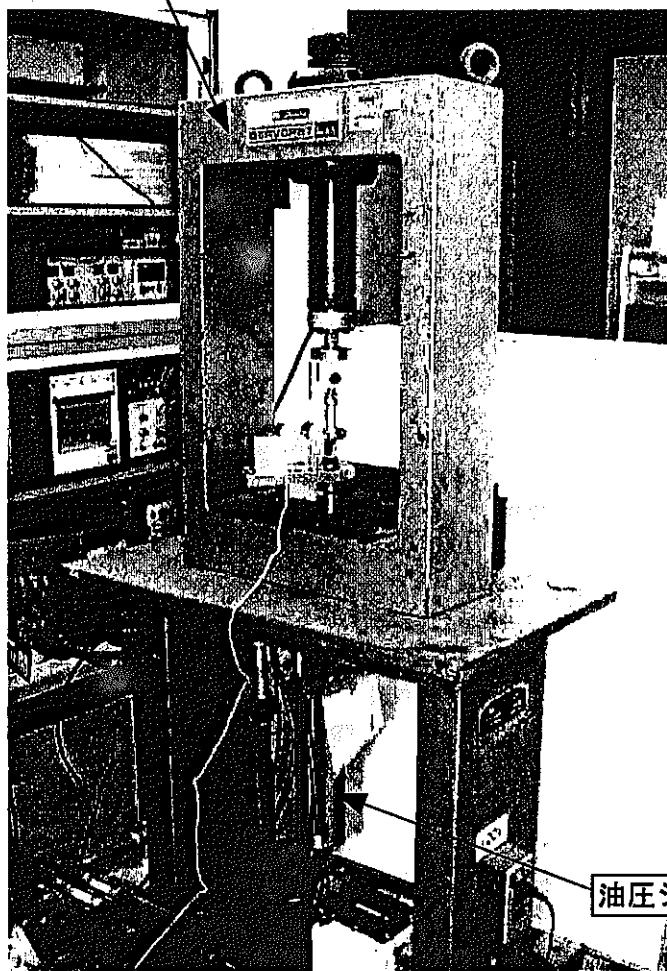
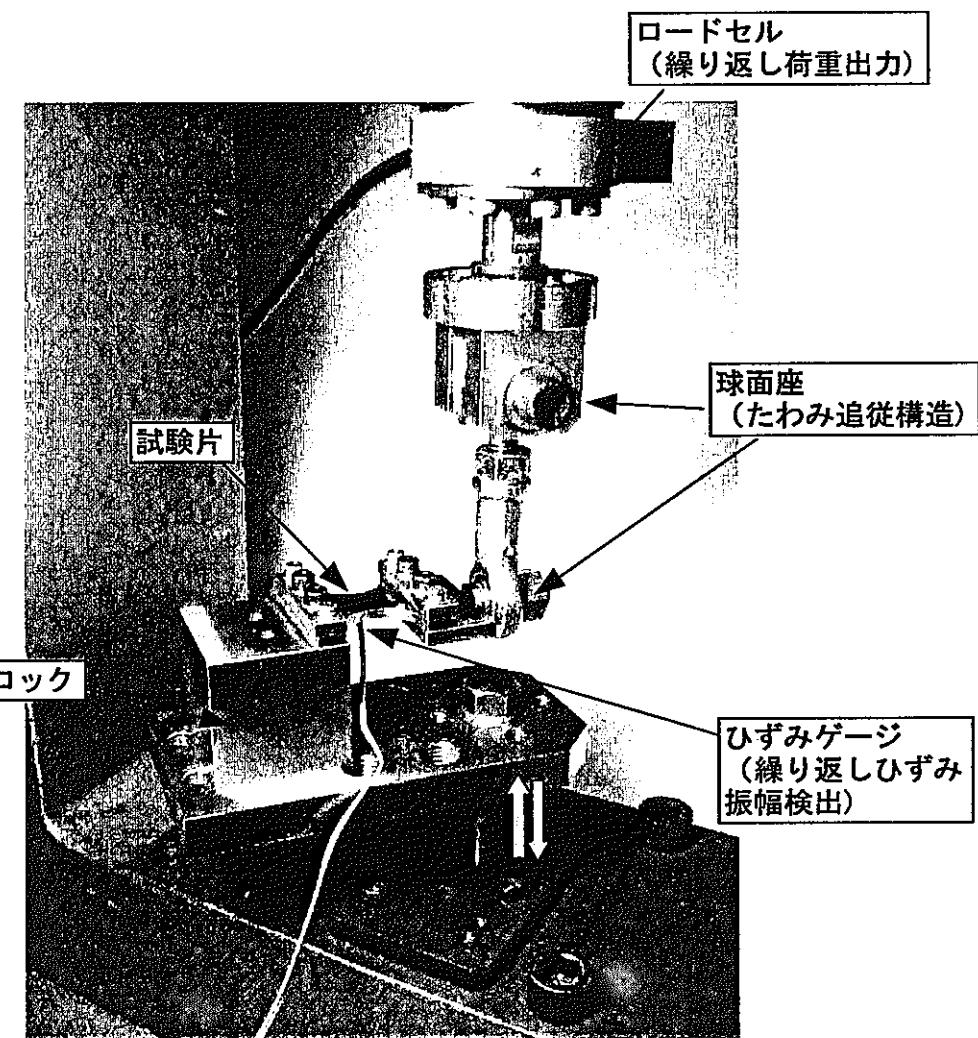


図3.2-3 疲労試験概要

Servo Pulser
島津製作所製#EHF-0.1（最大容量1kN）



(a)試験装置全体



(b)疲労試験状況

図3.2-4 薄板曲げ疲労試験状況

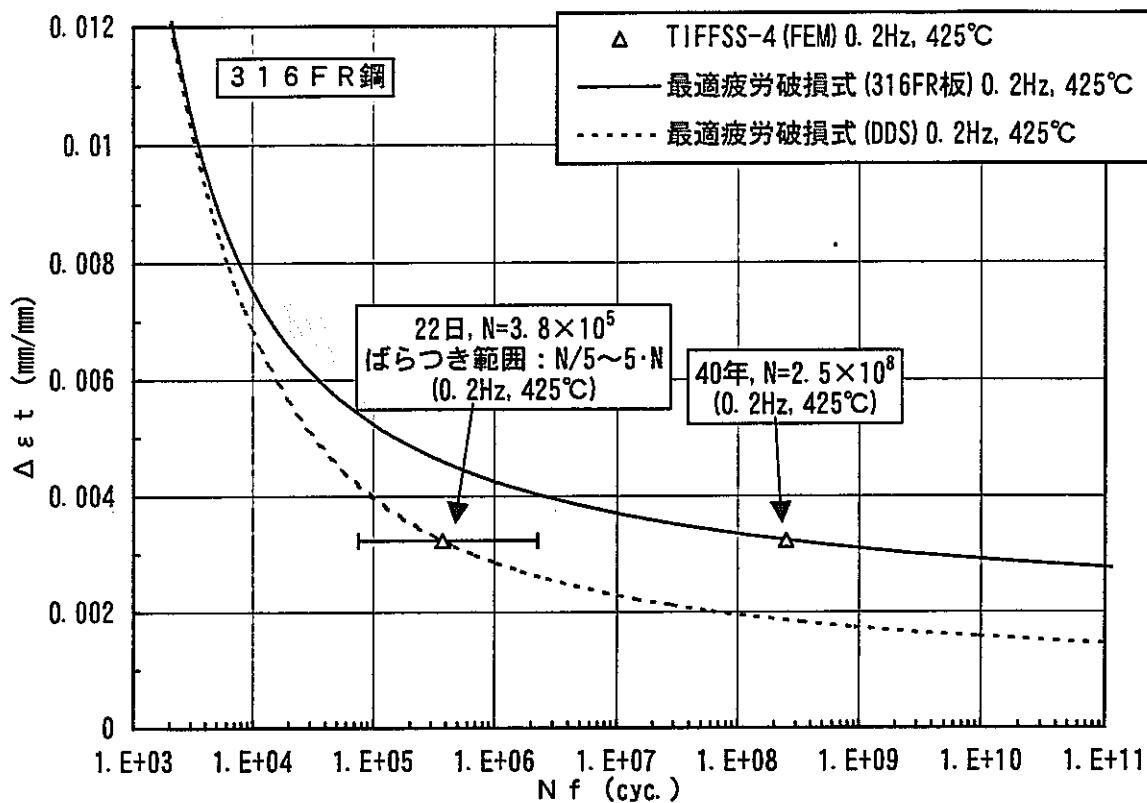
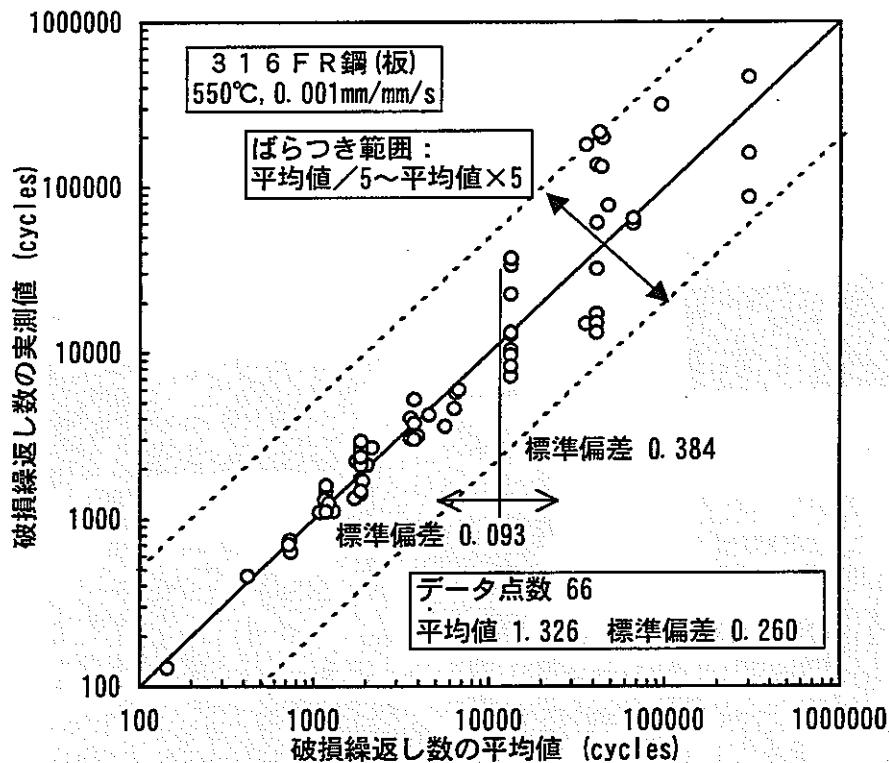


図3.2-5 316 FR鋼板母材の疲労強度

図3.2-6 316 FR鋼(板)疲労強度の平均値と実測値の関係 ($550^\circ\text{C}, 0.001\text{mm/mm/s}$)

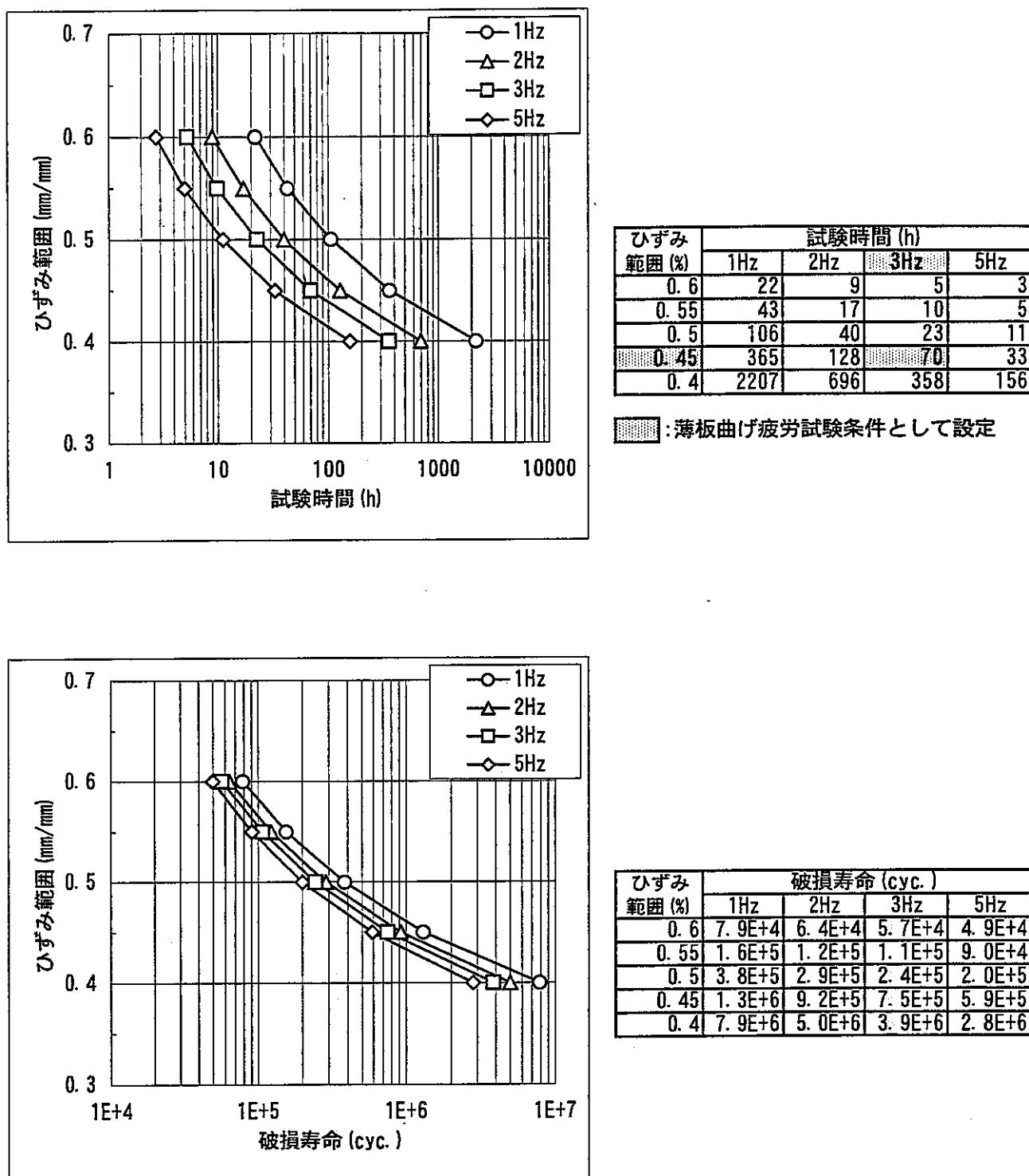


図3.2-7 最適疲労破損式 (316FR板材、25°C、1~5Hz)

表3.2-1 疲労試験時のひずみゲージ貼りつけ位置とき裂発生部のひずみ換算補正係数

試験片タイプ	W=6mm試験片	備考
疲労試験時のひずみゲージ貼りつけ位置	<p>図中には、W=6mmの試験片が示されています。試験片は中央に最大ひずみ発生部があり、その直下にひずみゲージが貼付されています。試験片は固定側と負荷側に分かれています。ひずみゲージの位置は、最大ひずみ発生部から一定の距離離れた位置にあります。</p>	
補正係数(き裂発生部位の繰返しひずみ換算係数)	1.045	
備考	ひずみ出力に上記係数を積して、繰返しひずみとする。	

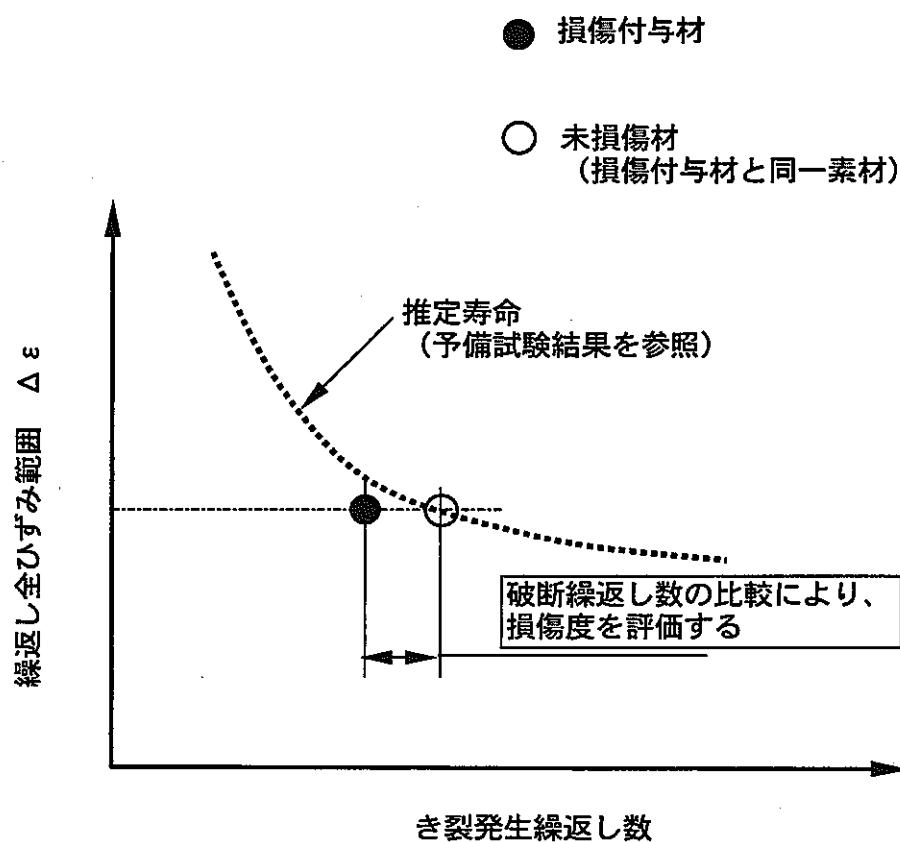
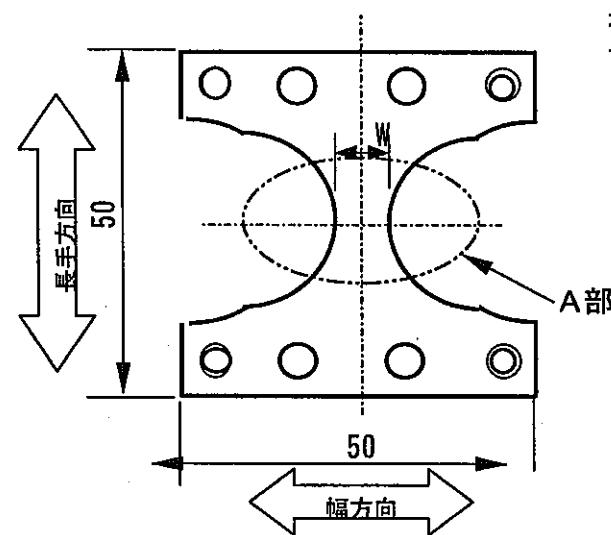
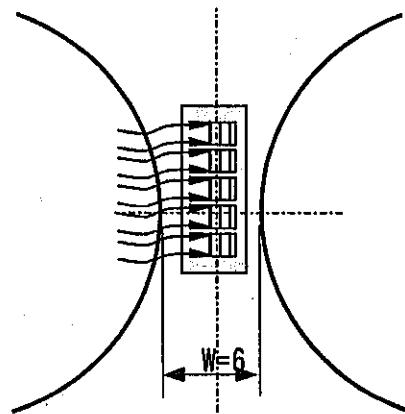
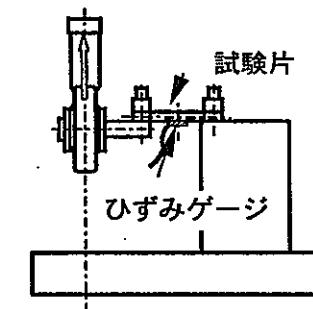
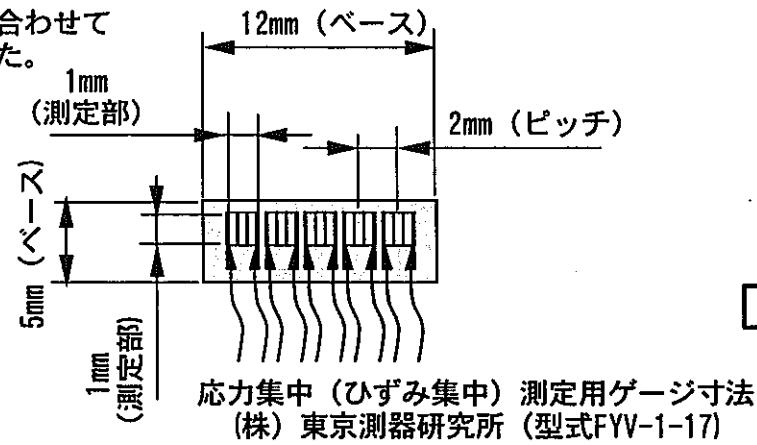


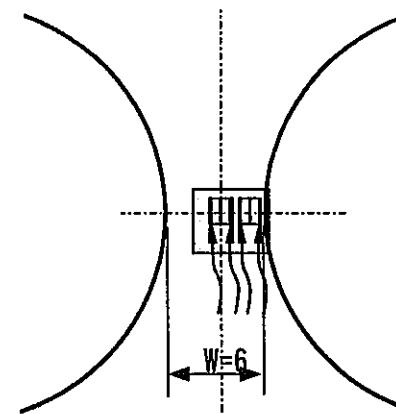
図3.2-8 損傷度評価試験



A部

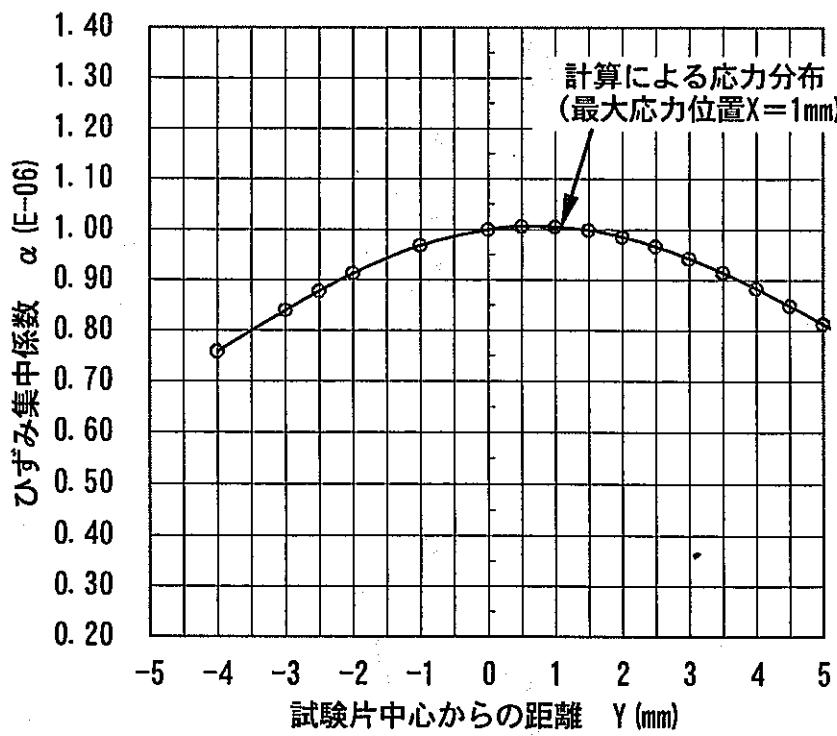
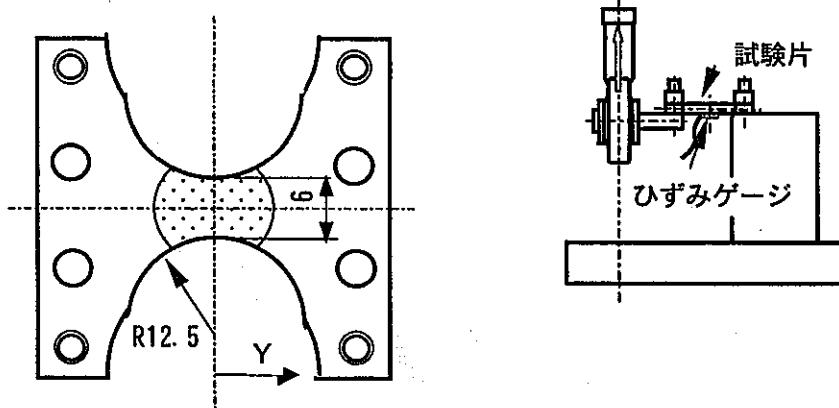


(a) 長手方向分布

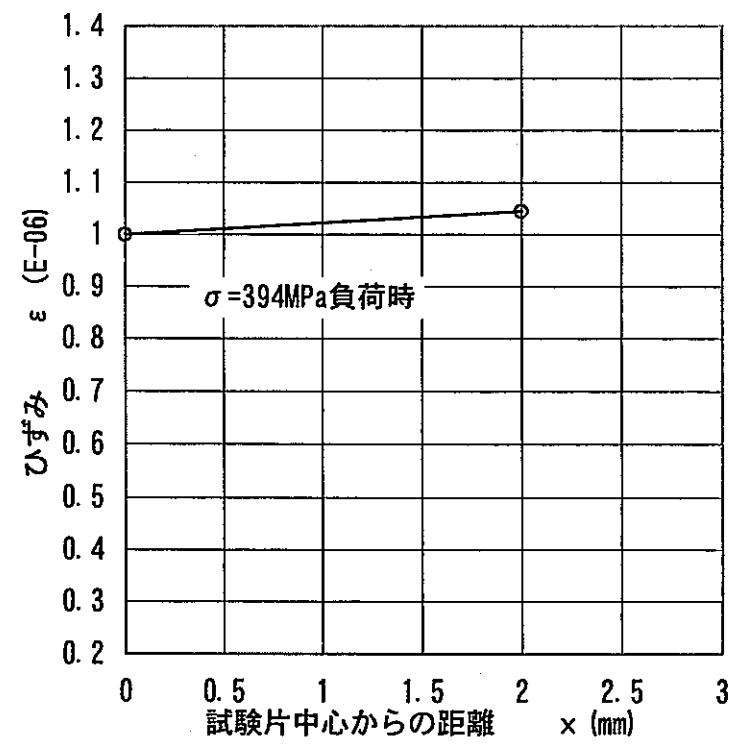
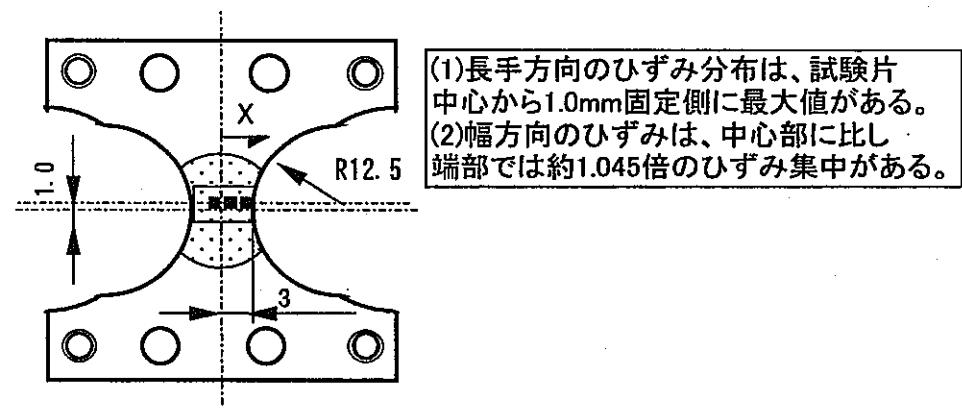


(b) 幅方向分布

図3.2-9 試験片切り欠き部のひずみ集中測定要領

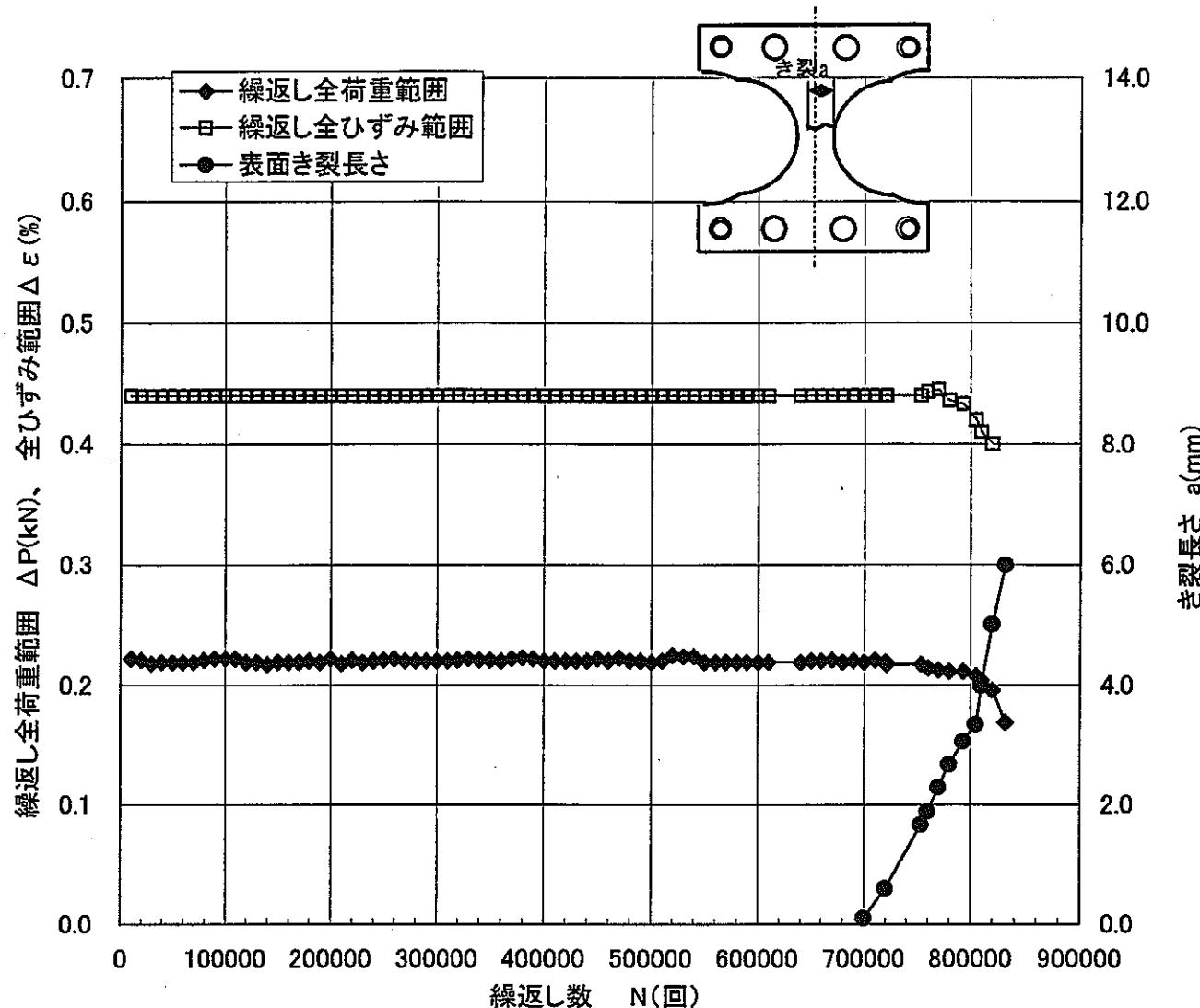


(a)長手方向のひずみ分布

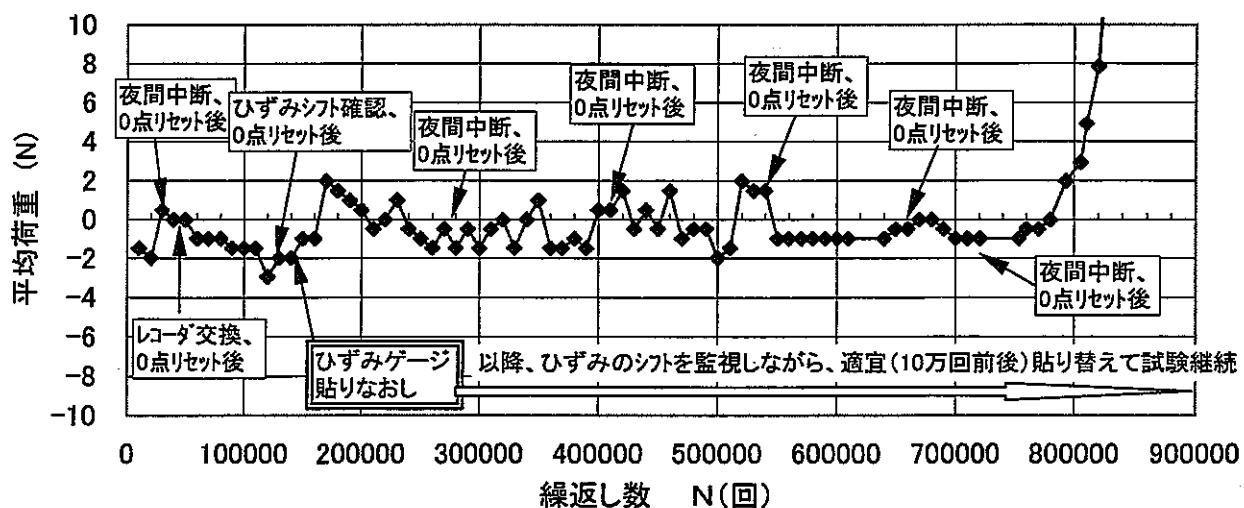


(b)幅方向のひずみ分布

図3.2-10 試験片表面のひずみ分布(W=6mm試験片, R=12.5mm:最終形状TP)

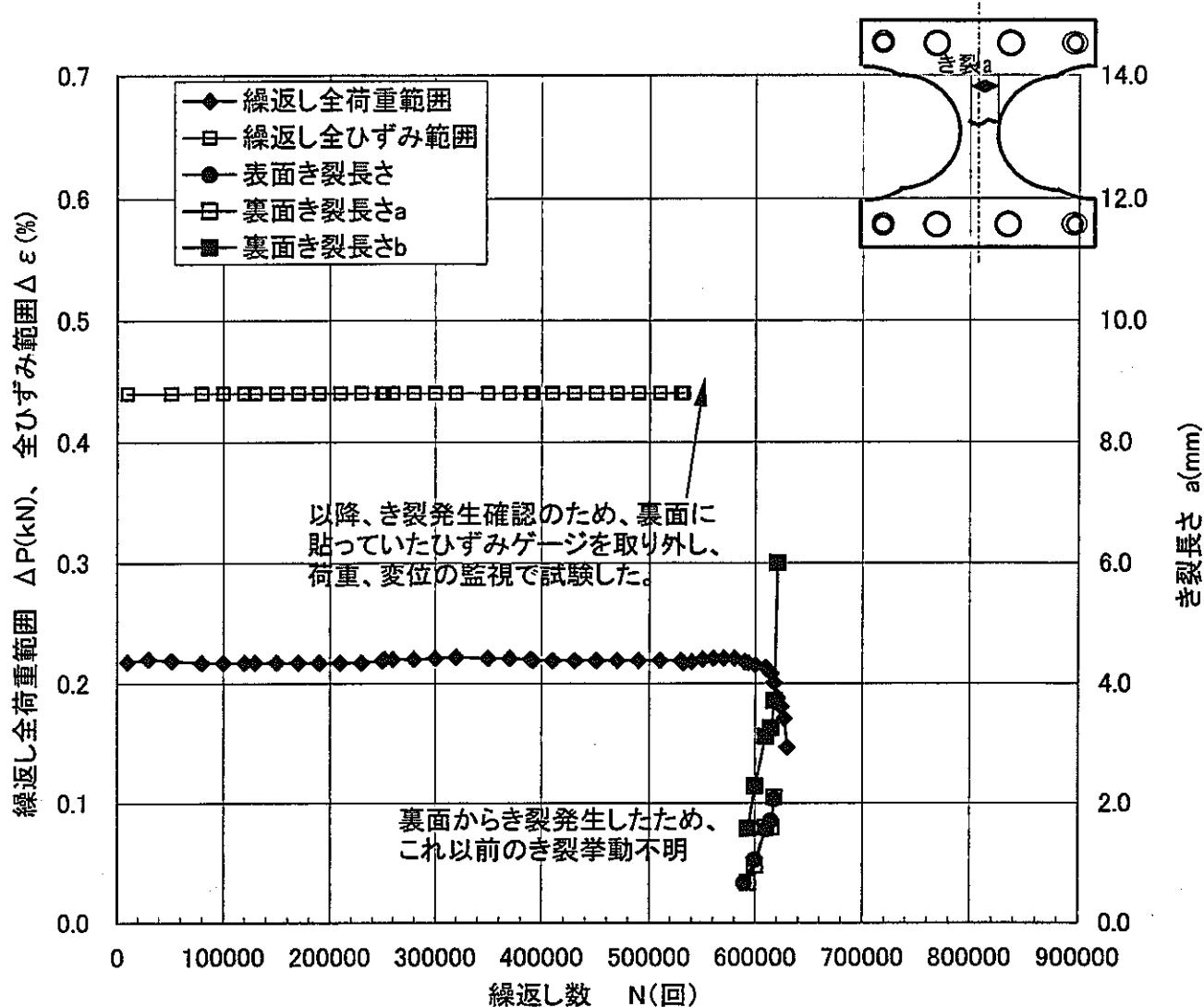


(a) 繰返し全荷重範囲、全ひずみ範囲、表面き裂長さの挙動

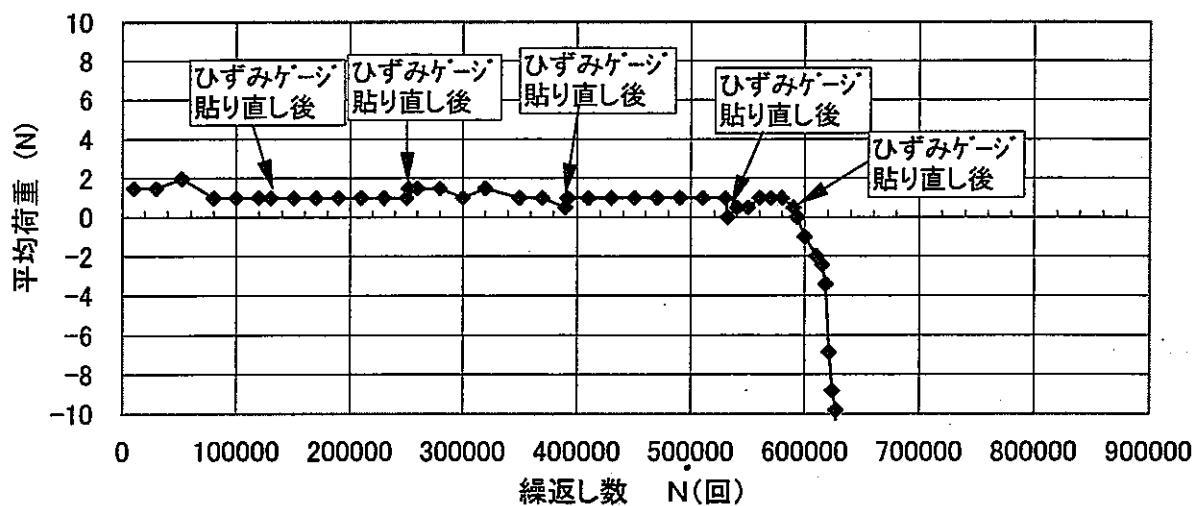


(b) 繰返し平均荷重の挙動

図3.2-11 繰返し試験時の荷重、ひずみ及びき裂進展挙動
(損傷付与材)



(a) 縦返し全荷重範囲、全ひずみ範囲、表面き裂長さの挙動



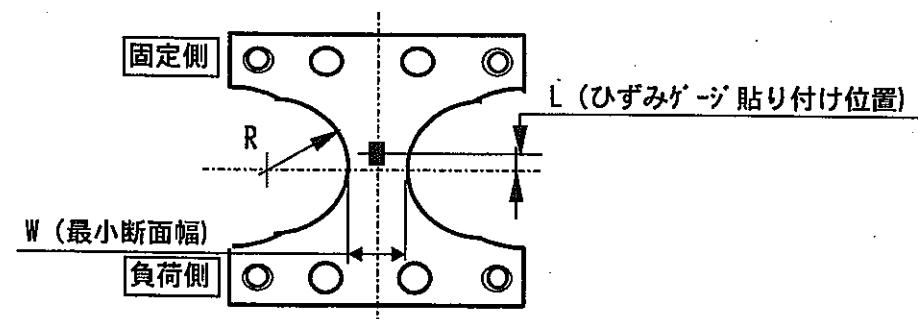
(b) 縦返し平均荷重の挙動

図3.2-12 縦返し試験時の荷重、ひずみ及びき裂進展挙動
(未損傷材)

表3.2-2 薄板曲げ疲労試験結果

試験片		試験条件			試験結果					備考	
区分	TP寸法 (mm)	全ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ (%)	全荷重範囲 ΔP (N)	応力範囲 *1 $\Delta \sigma$ (MPa)	繰返し数 (回)			き裂位置			
					き裂発生	荷重低下10%	荷重低下25%	表面	裏面		
損傷付与材	W6	0.46	223	729	700,000	815,000	830,000	有	(微小き裂有)		
未損傷材	W6	0.46	222	727	550,000	618,000	627,000	有	有	き裂進展挙動から外挿してき裂発生繰返し数を求めた	

*1: 応力範囲は全荷重範囲 ΔP (N) より算出



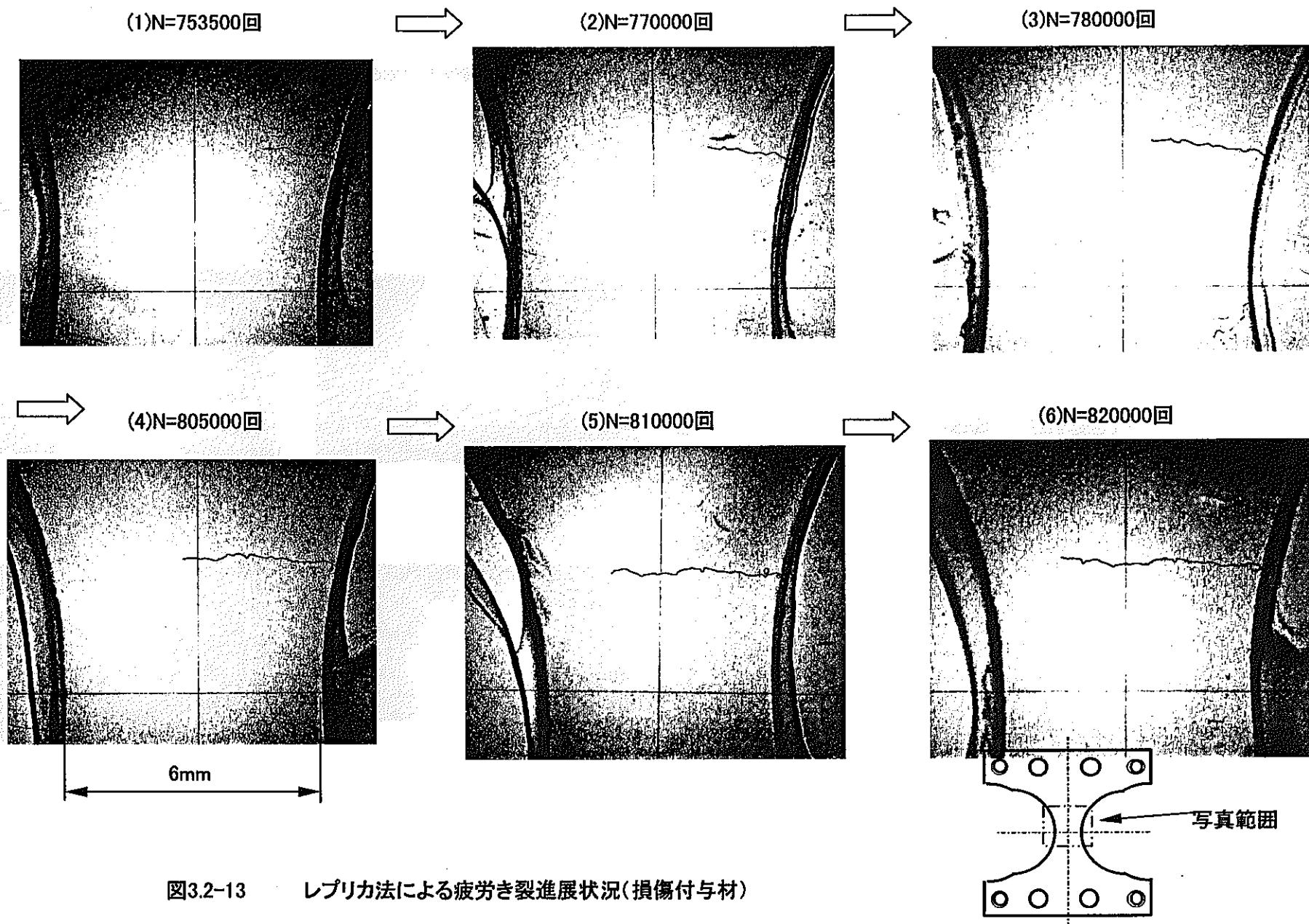
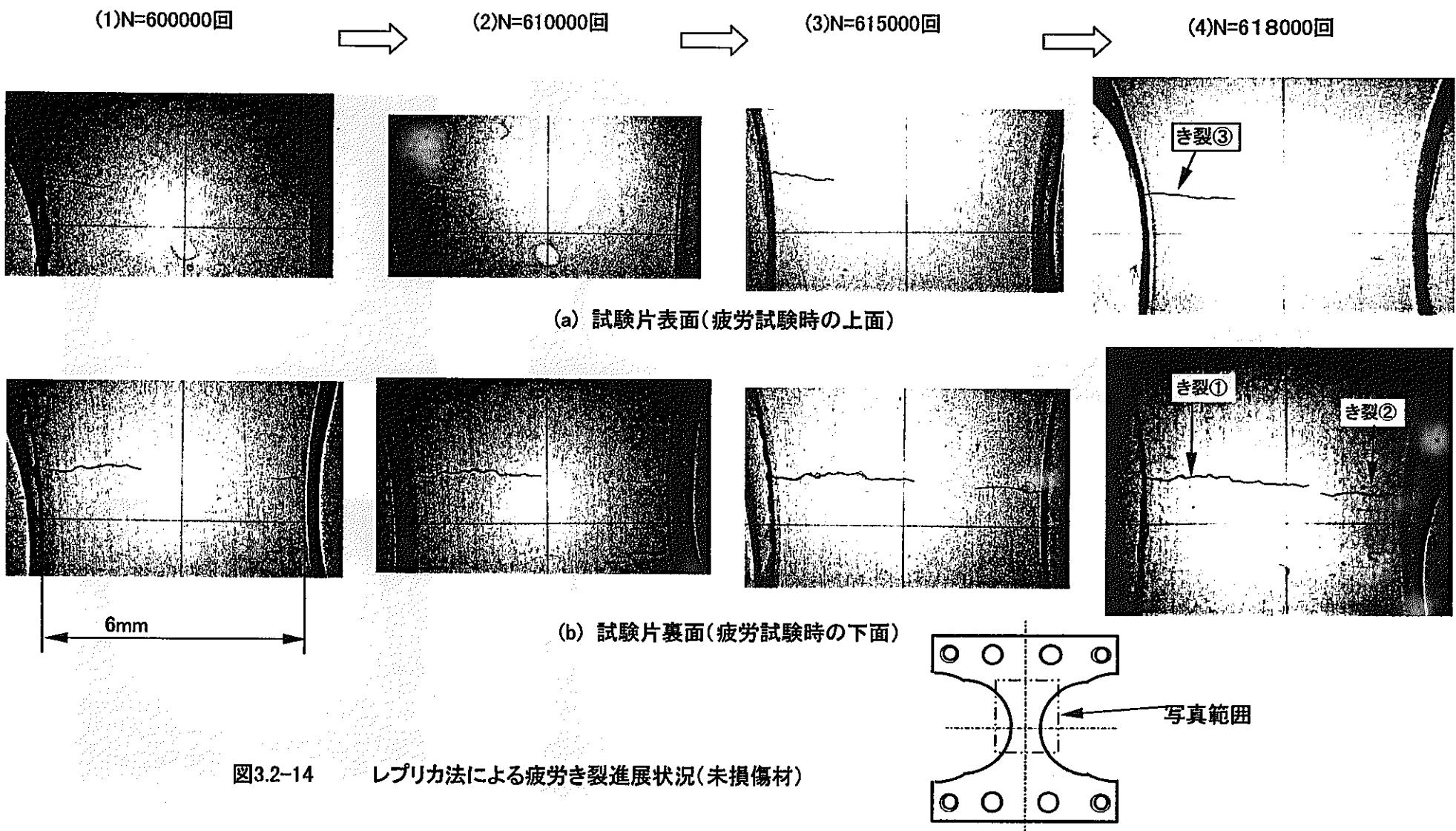
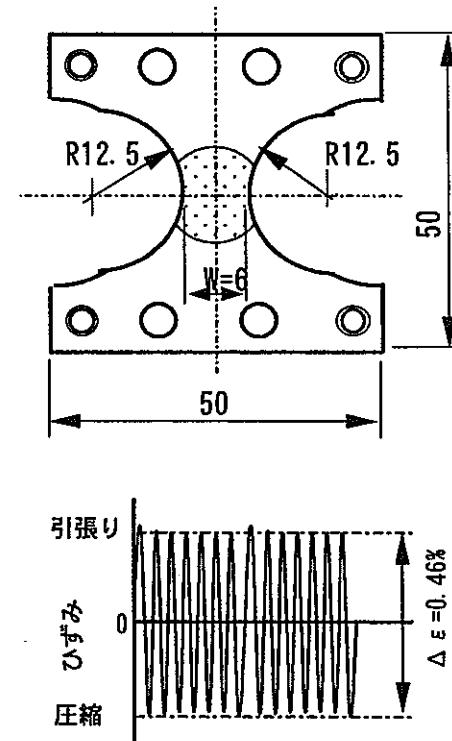
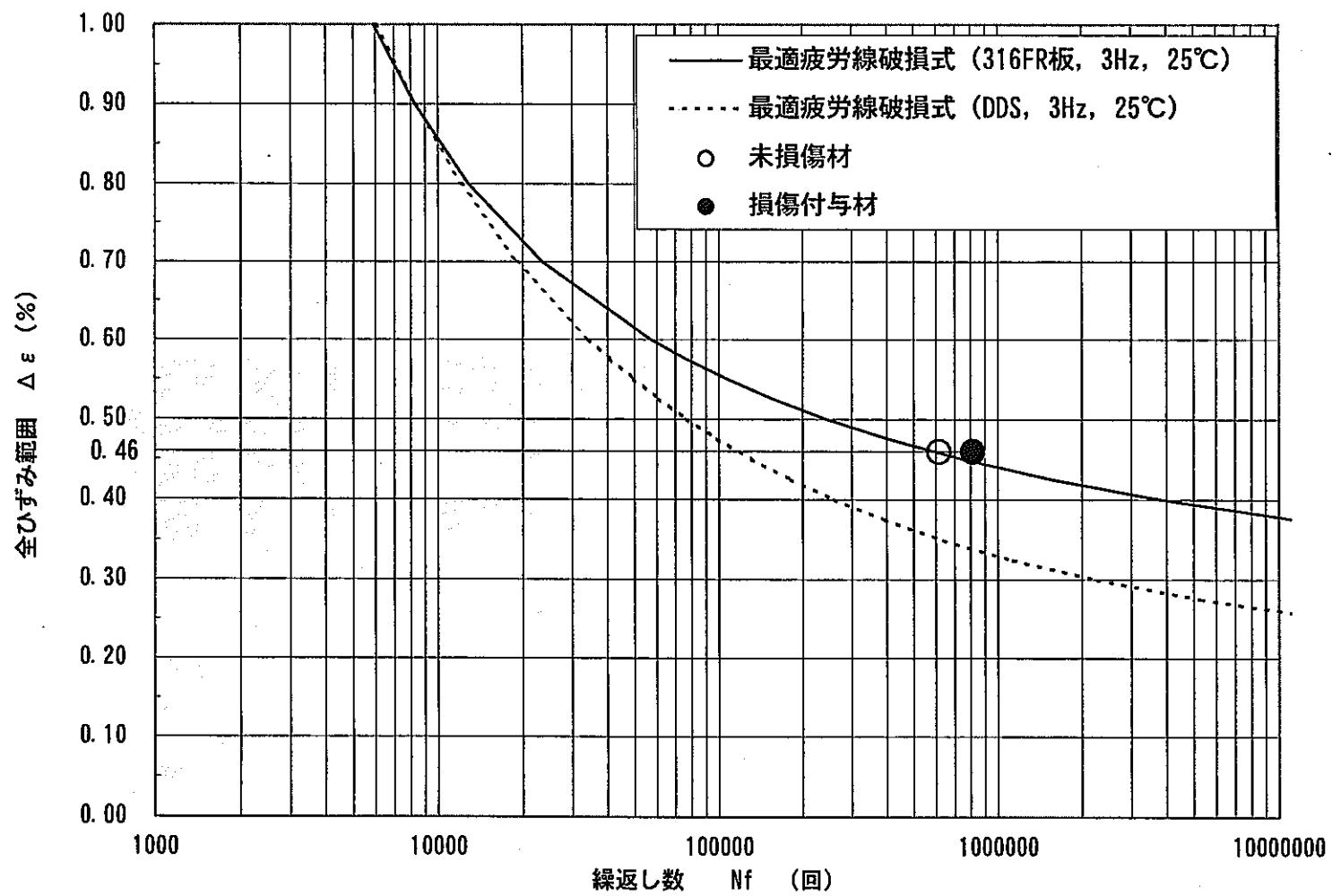


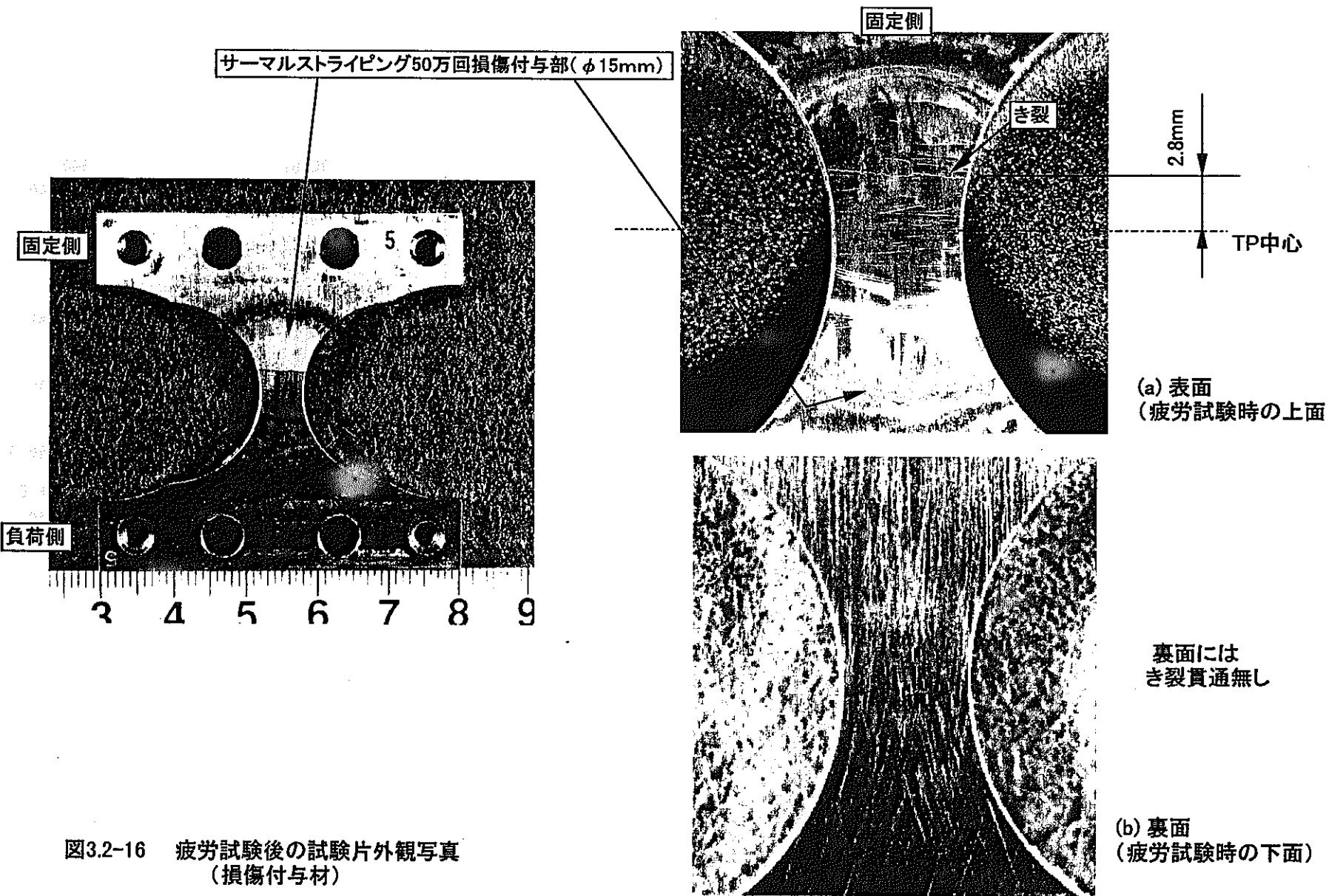
図3.2-13 レプリカ法による疲労き裂進展状況(損傷付与材)

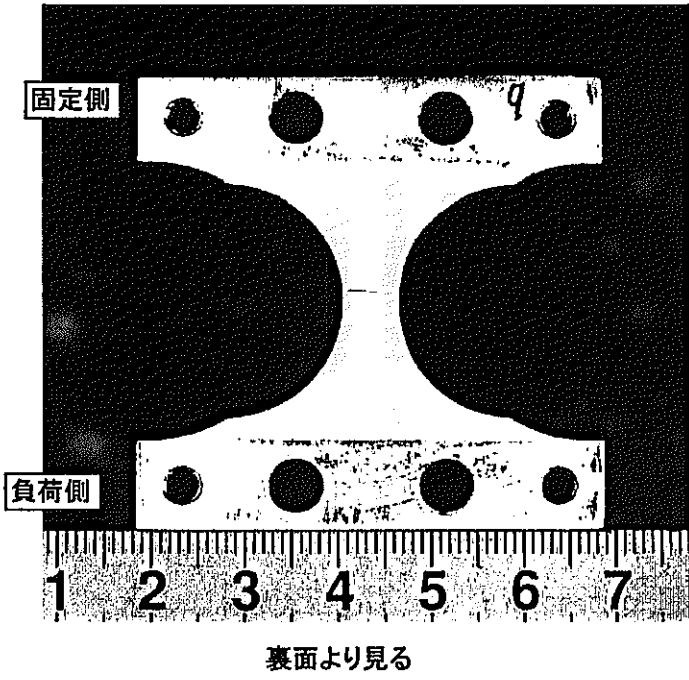




注) 試験結果については、荷重10%低下時点を N_f とした。

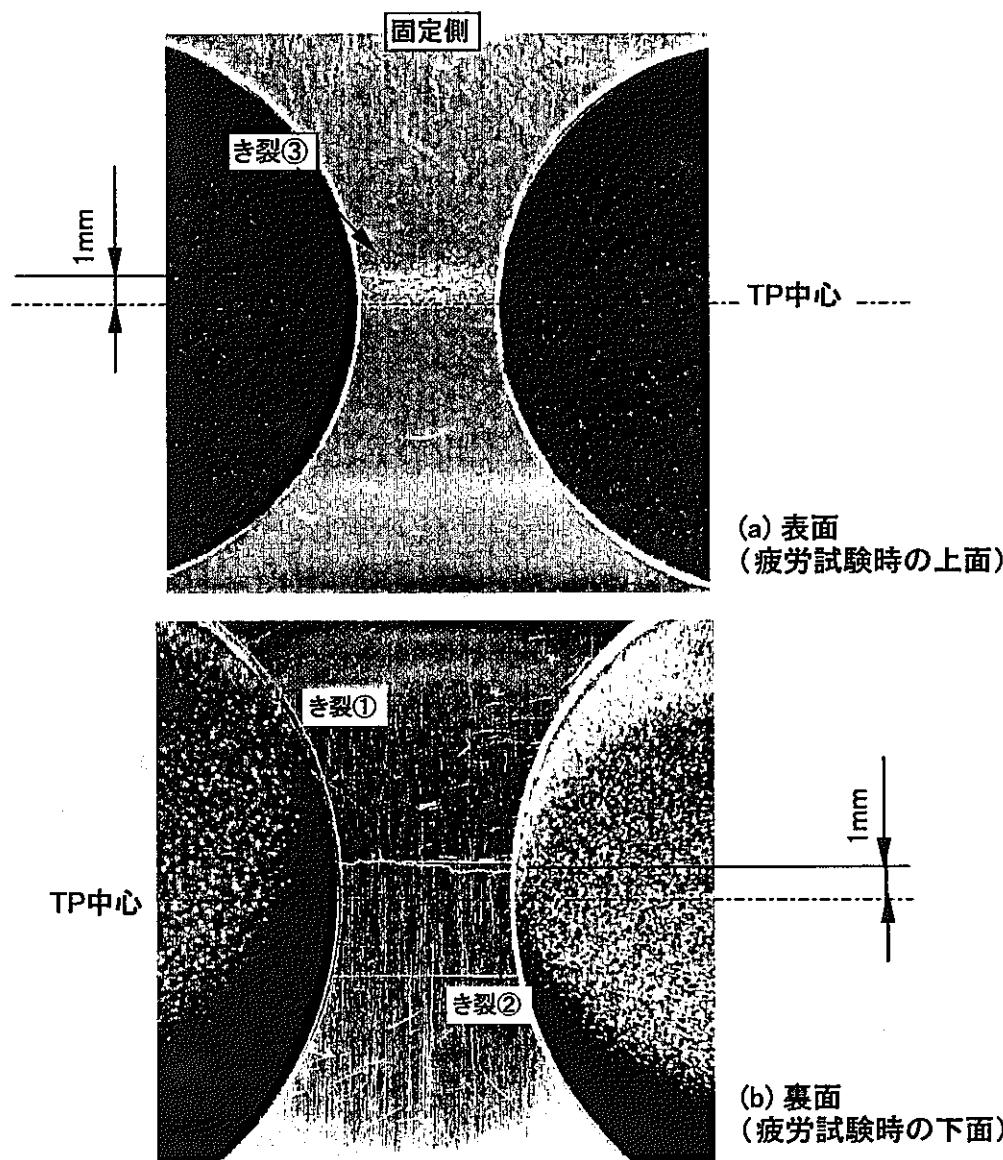
図3.2-15 薄板曲げ疲労試験結果





裏面より見る

図3.2-17 疲労試験後の試験片外観写真
(未損傷材)



4. 損傷係数評価

(1) 「周波数制御ホットスポット温度ゆらぎによるき裂発生基礎実験」による損傷係数評価

「周波数制御ホットスポット温度ゆらぎによるき裂発生基礎実験」では、温度範囲 $\Delta T=240^{\circ}\text{C}$ (ナトリウム出口ノズル温度差)、周波数 0.2Hz の条件で、50万回のサーマルストライピング損傷を与えた。試験後、試験体の表面を観察したが、き裂の発生は認められなかった。

一方、別途実施した FEM 結果より、「周波数制御ホットスポット温度ゆらぎによるき裂発生基礎実験」におけるサーマルストライピング試験は、ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon=0.32\%$ に相当することが分かっている。前出の図 3.2-5 に示したように、ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon=0.32\%$ 、周波数 0.2Hz における 316FR 鋼板材の疲労寿命は 2.5×10^8 回となる。サーマルストライピング試験の回数は 50 万回であるから、サーマルストライピングによる損傷係数 $D_f=(50\text{ 万回}/2.5\times10^8\text{ 回})=0.002$ となる。 $D_f=0.002$ という値は、通常、微小き裂の発生が起こり得ない損傷である。

(2) 薄板曲げ疲労試験による損傷係数評価

「3.2 薄板曲げ疲労試験」で述べたように、損傷付与材の $N_f=815000$ 回、未損傷材の $N_f=618000$ 回となった。

一方、316FR 鋼板材の室温における疲労寿命 N_f は、前出の図 3.2-15 に示した最適疲労破損式より 580000 回である。このことから、損傷付与材及び未損傷材の N_f は、全く損傷を受けていない材料の寿命であると言える。また、損傷付与材及び未損傷材の N_f は、最適疲労破損式の $N_f=580000$ 回に対して factor of 2 の範囲内にあり、データのばらつきの範囲内であると言える。

(3) まとめ

以上のことから、「周波数制御ホットスポット温度ゆらぎによるき裂発生基礎実験」におけるサーマルストライピング試験で与えた損傷係数は、 $D_f=0.002$ と小さく、薄板曲げ疲労試験の結果からも有意な寿命差は見られなかつたことから、データのばらつきの範囲内であることが分かった。

5. まとめ

サーマルストライピングを 50 万回与えた損傷付与材及び損傷を与えていない未損傷材を対象として、X線及びひずみゲージ法による残留応力測定、薄板曲げ疲労試験を行った結果、以下の成果が得られた。

- (1) X線による残留応力測定の結果、損傷付与材及び未損傷材の表面残留応力に有意な差は見られなかったことから、温度ゆらぎサーマルストライピングによる残留応力への影響は無いと判断される。
- (2) ひずみゲージ法による残留応力測定の結果、試験片加工前後のひずみ変化は小さく、薄板曲げ疲労試験時の全ひずみ範囲と比較すると無視し得る大きさであることから、試験片加工がサーマルストライピング損傷部位に与える影響は小さいと判断される。
- (3) 薄板曲げ疲労試験の結果、損傷付与材の疲労寿命は 815000 回、未損傷材の疲労寿命は 618000 回となった。一方、316FR 鋼板材の室温における疲労寿命は、最適疲労破損式より 580000 回である。このことから、損傷付与材及び未損傷材の疲労寿命は、全く損傷を受けていない材料の疲労寿命であると言える。また、損傷付与材及び未損傷材の疲労寿命は、最適疲労破損式の疲労寿命に対して factor of 2 の範囲内にあり、データのばらつきの範囲内であると言える。

付録A：参照試験材の試験方法、試験結果一覧

付録A：参照試験材の試験方法、試験結果一覧

S-N カーブの取得及び試験片形状の最適化を図ることを目的として、損傷付与材及び未損傷材と同一溶解、製造ロットの 316FR 鋼を用いた薄板曲げ疲労試験を実施した。試験片の名称については、損傷付与材及び未損傷材と区別する目的で、「参照試験材」と定義した。なお、参照試験材の試験片の製作方法、疲労試験方法等は、損傷付与材及び未損傷材と基本的には同様である。

参照試験材の薄板曲げ疲労試験結果一覧を表 A-1 に示す。参照試験材は全部で 9 体あり、試験片の最小断面幅 $W=17\text{mm}$ 、 8mm 及び 6mm の 3 つの形状に分けられる。

(1) 試験片の形状

試験片の形状を表 A-2 に示す。表中に示すように、試験片の形状は、 $W=17\text{mm}$ 、 8mm 及び 6mm の 3 つに分けられる。「2. 試験片の製作」で述べたように、最初は $W=17\text{mm}$ の試験片で疲労試験を実施していたが、き裂発生位置がサーマルストライピング損傷付与範囲外であることが分かったため、試験片形状を $W=8\text{mm}$ 及び $W=6\text{mm}$ に変更して疲労試験を継続した。この結果、 $W=6\text{mm}$ であれば、サーマルストライピングによる損傷度が比較的大きい中央部 $\phi 10$ 部からき裂が発生することが見込まれたので、最終的に $W=6\text{mm}$ を採用し、損傷付与材及び未損傷材の疲労試験を実施した。

(2) 試験方法

損傷付与材及び未損傷材では、ひずみ範囲が一定となるように試験を実施した。更に、ひずみゲージの繰返しによる劣化を考慮して、約 100,000 回前後を目処に新しいひずみゲージに交換して試験を実施した。この結果、試験中の平均荷重はほぼ一定となっており、平均ひずみもほぼ一定であったと考えられる。

一方、参照試験材では、ひずみ範囲及び平均ひずみが一定となるように試験を実施していたが、表 A-1 に示した TP No. 9 を除いて、ひずみゲージの定期的な交換は実施しなかった。この結果、後述の図 A-1～図 A-5 に示すように、試験中の平均荷重がシフトしていることが分かった。この場合、試験片の表面あるいは裏面のいずれかにひずみが累積し、き裂が発生しやすい状態であったことが推測される。

(3) 試験結果

表 A-1 に示した参照試験材の内、損傷付与材及び未損傷材と同じ全ひずみ範囲 0.46% で試験を行った TP No. 5～9 について、疲労試験時の全ひずみ範囲、全荷重範囲及びき裂進展挙動を図 A-1～図 A-5 に示す。全ての試験において、全ひずみ範囲はほぼ 0.46% 一定に制御されている。

また、各図中に (b) として、試験中の平均荷重の挙動を示している。平均荷重はシフ

トしており、試験片の表面あるいは裏面のいずれかにひずみが累積し、き裂が発生しやすい状態であったことが推測される。

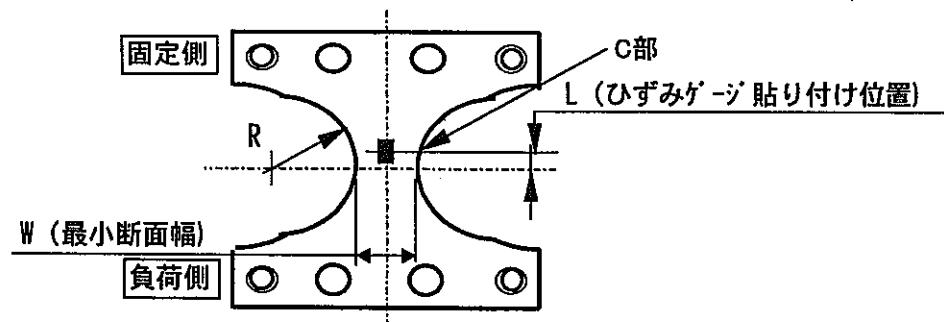
損傷付与材、未損傷材及び参照試験材の破損繰返し数と全ひずみ範囲の関係を図 A-6 に示す。損傷付与材と未損傷材の破損繰返し数は 316FR 鋼板材の最適疲労破損式とほぼ一致しているが、参照試験材の破損繰返し数は 316FR 鋼板材の最適疲労破損式と DDS の最適疲労破損式の間に位置している。き裂発生繰返し数、荷重低下 10% 繰返し数（破損繰返し数 N_f ）をまとめて表 A-1 中に示す。

参照試験材の疲労試験後の外観写真を図 A-7～図 A-11 に示す。試験後のき裂位置をまとめて表 A-1 中に示す。TP No. 9 を除いて全て表面に主き裂が発生しているが、裏面にも微小なき裂が生じていた。

表A-1 薄板曲げ疲労試験結果

試験片			試験条件			試験結果					備考	
区分	No.	TP寸法 (mm)	全ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ (%)	全荷重範囲 ΔP (N)	応力範囲 *1 $\Delta \sigma$ (Mpa)	繰返し数 (回)			き裂位置			
						き裂発生	荷重低下10%	荷重低下25%	表面	裏面		
参照試験材	1	W17	0.47	592	711	未確認	136,230	10%低下で中断	有	(微小き裂有)		
	2	W17	0.58	670	804	"	48,870	"	有	(微小き裂有)		
	3	W17	0.35	490	588	"	995,200	"	有	(微小き裂有)		
	4	W17	0.27	402	483	"	>4,060,000	>4,060,000	無	無	未破断	
	5	W17	0.46	590	708	166,000	237,000	250,000	有	(微小き裂有)		
	6	W17	0.46	572	687	100,000	292,000	302,000	有	(微小き裂有)		
	7	W8	0.46	288	709	120,000	255,000	272,000	有	(微小き裂有)		
	8	W6	0.46	220	719	120,000	233,000	239,000	有	(微小き裂有)		
	9	W6	0.46	226	739	360,000	446,000	455,000	(微小き裂有)	有	き裂進展挙動から外挿してき裂発生繰返し数を求めた	

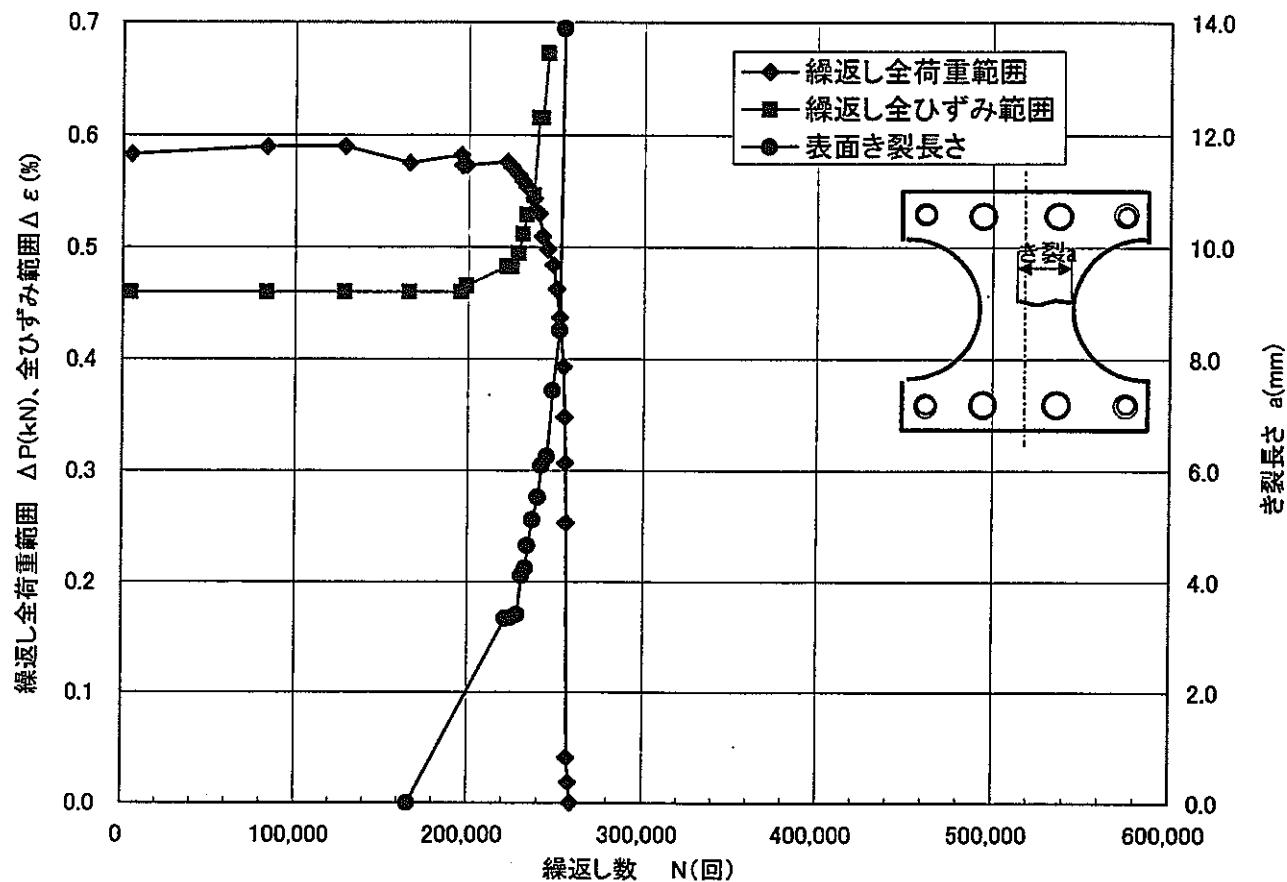
*1：応力範囲は全荷重範囲 ΔP (N) より算出



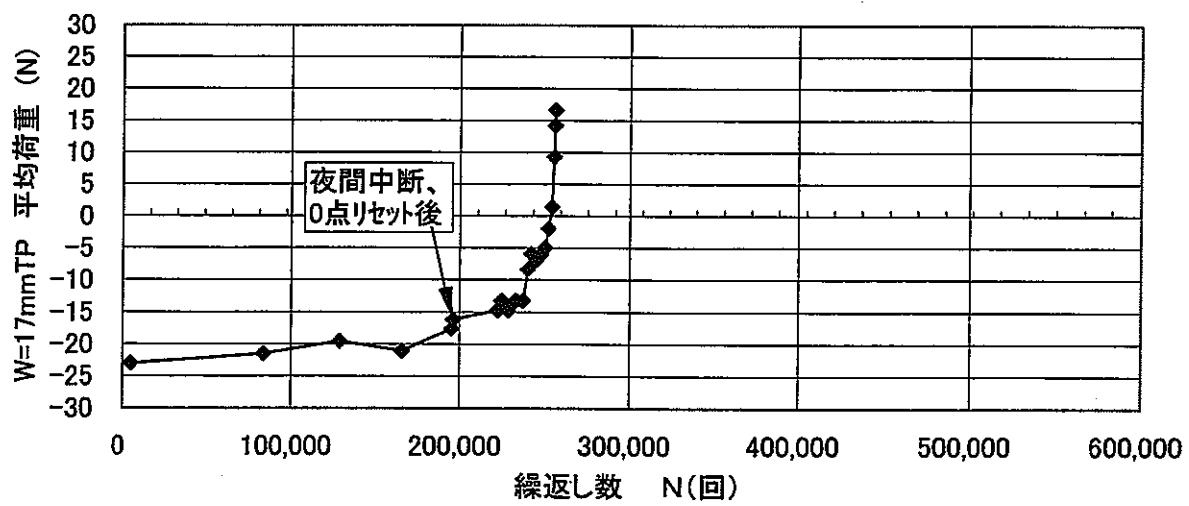
表A-2 薄板曲げ疲労試験時のひずみゲージ貼りつけ位置とき裂発生部のひずみ換算補正係数

試験片タイプ	W=17mm試験片	W=8mm試験片	W=6mm試験片	備考
疲労試験時のひずみゲージ貼りつけ位置				
補正係数(き裂発生部位の繰り返しひずみ換算係数)	1.15	1.054	1.045	
備考	ひずみ出力に上記係数を積して、繰り返しひずみとする。	同左	同左	

試験片および試験条件			破断繰返し数（回）		備考
TPNo.	最小幅W	$\Delta \varepsilon$ (%)	き裂発生Nc	10%荷重低下Nf	
参考試験材 5	17mm	0.46	166,000	237,000	



(a) 繰返し全荷重範囲、全ひずみ範囲、表面き裂長さの挙動



(b) 繰返し平均荷重の挙動

図A-1 繰返し試験時の荷重、ひずみ及びき裂進展挙動 (TPNo. 5)