

# 第 1 章 序 章

## 1-1 背 景

私たちが使っている携帯電話の充電部などのコネクタを見ると、非常に微小な構造をしているのがわかる。このような部品は、金属の型にプラスチックを高圧で流し込むプラスチック射出成形によって作られている。

小型プラスチック部品の量産において、第 2 章で紹介する「コアピン」を使用することは欠かせないことである。しかし、コアピンの使用においてさまざまな問題が発生しているのも事実である。その問題とは、射出成形中にコアピンが変形・破損してしまうことである。しかし、コアピンを製作する企業は、コネクタ製品を生産する企業から完成品の形状および寸法を注文されて仕事をしている。つまり、コアピンの設計をする企業は、コアピンを顧客の要求通りの形状・寸法に仕上げなければならないが、コアピンの強度を優先して決めることが許されない。コアピンはもともと強度的に無理のある形状をした製品であると言える。

ただでさえ小さな形状をしたコアピンであるが、製品の小型・高性能化が進むにつれて、コアピンにはさらに微小な形状が求められている。さらに、プラスチック射出成形中、高圧で流れ込んでくるプラスチックはコアピンに曲げ荷重を与える。プラスチック射出成形は製品を大量生産するための技術であるから、1つの金型で成形は何度も行われ、コアピンには繰返し応力が作用する。数あるコアピンの破損原因の中で最も問題となっているのは、この繰返し応力による疲労破壊である<sup>1)</sup>。

疲労破壊とは、「物体の一部（応力集中部）が繰返し応力を受け続けたときに物体の最も脆弱な部位から原子レベルで微細なき裂が発生し，さらに繰返し応力を受け続けることでき裂が成長し，最終的に破壊する」という長時間にわたる破壊現象である．疲労破壊については工業界でかねてから問題とされていた事だが，未だ詳しく解明されていない分野である<sup>2)</sup>．一般的な破壊現象において，90%以上が繰返し加重による疲労破壊であり，残りの10%が落下による破損や不注意による破損とされている．すなわち，この疲労破壊を防止することができれば，破壊は皆無になると言っても過言ではない<sup>3)</sup>．

コアピンの疲労破壊の原因は，材料内に含まれる介在物や微小欠陥，加工時の表面傷を起点とするものとされているが，コアピンのような微小部品の疲労強度特性や破壊機構はもとより，それを調査・評価する確かな方法はやはり確立されていないのが現状である．大規模な製造ラインにおける部品の破損は企業として重大な損害となるため，より疲労に強い材料の開発や，疲労強度の評価方法の模索が叫ばれているのである．しかし現在，世の中に存在する疲労試験機は，コアピンの大きさに比べはるかに大きい物体（試験片）を対象としたものであり，コアピンのような極小部品の疲労強度を調べるにはあまりに不適と言わざるを得ない．

では，なぜ出回っている疲労試験機サイズの試験片から得られる疲労試験の結果を，そのままコアピンの設計に当てはめないのだろうか．それは，材料の疲労強度は試験片の大きさによって異なってくるためである．一般に，大型試験片と小型試験片に繰返し曲げ荷重による疲労試験を行った場合，同じ応力を与えた場合では大型試験片のほうが早く破断するとされている．その理由は，試験片の表面に存在する欠陥の数が影響しているからである．

疲労破壊は物体の最も脆弱な部分から発生することは述べた。物体の最も脆弱な部分とは最大応力部ではなく、その近辺で試験片表面に複数存在している欠陥である。異なる大きさの試験片において、表面に存在する欠陥の数は、当然表面積の広い試験片のほうが多くなる。小型試験片表面の欠陥数は大型のものよりも絶対的に少なくなるため、同応力下では小型試験片の疲労強度のほうが高くなるのである。

このように、試験片のサイズで試験結果に差が出ることを寸法効果と言う<sup>4)</sup>。つまり、コアピンのような微小部品の疲労強度を調べるには、コアピンそのもののサイズの試験片による疲労試験を行わなければならない、そうしなければコアピンの設計に必要な疲労強度のデータは得られないのである。しかし前述の通り、コアピンの実物相当サイズの試験片を扱える疲労試験機は存在しておらず、どのようにその疲労強度を位置付けすればよいのかはまだわかっていないのである。

## 1-2 研究の目的

以上の背景の通り、コアピンのような微小部品の疲労特性はまだ明らかになっていない。よって本研究では、試作型の小型疲労試験機<sup>5)</sup>を用いてコアピンに見立てて作成した試験片に繰返し曲げ疲労試験を行い、その疲労強度特性を評価し、そこからコアピンの疲労寿命を延ばす方法・要因を見出し、これを報告することを目的とする。

## 第 2 章 金型のコアピンについて

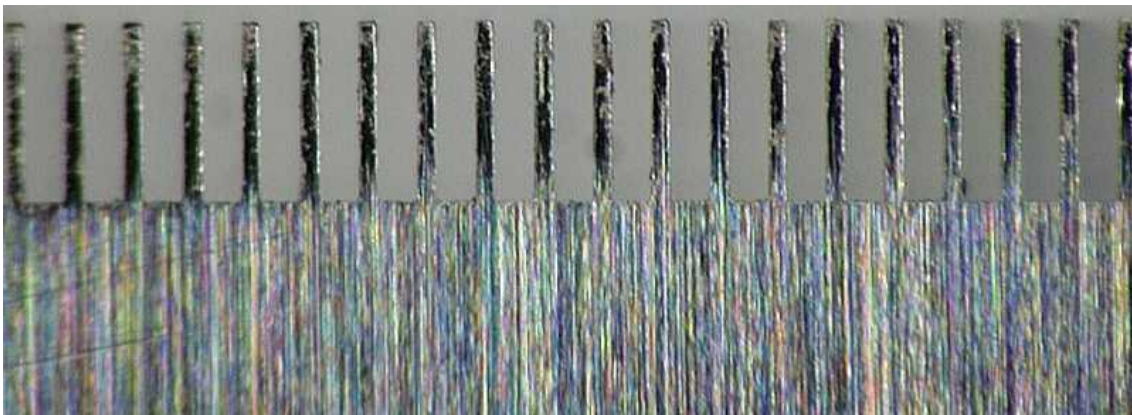
1-1 で述べた通り，近年携帯電話や PC 等の小型薄型化・高機能化は目覚しく進んでいる．携帯電話や PC が小型になるということは，それに使われている部品も同時に小型化しているということである．その中でもコネクタは低背・狭ピッチ化が求められている．

そのコネクタを製作する金型のコアを分割構造にした場合の分割パーツをコアピンと呼称している．コアピンはメインコアに組み込まれ，成形品の形状（コネクタの穴部）を作る役割をする．むしろ，コアピンはコネクタを作るパーツと考えて良いだろう．また，実際に企業で製作されたコアピンを図 1 に示す．

現在コアピンは間隔 0.3 ~ 0.5mm ピッチのコネクタ製作用を主として作られているが，前述の通りさらに細かい間隔を必要とされている．図 2 はコアピン先端の拡大写真である．写真より，コアピンがいかに微小な形状を持っているかが理解できるだろう<sup>1)</sup>．



図1 コアピン（山形精研株式会社提供）



— 0.1mm

図2 コアピン先端部拡大写真（0.1mm ピッチ 溝巾 0.07mm）

## 第 3 章 試験片

### 3-1 化学成分

本研究で使用する試験片の材質は、ダイス鋼 JIS・SKD12 と SKD61 をベースとした改良材である。(コアピン専用鋼 IMO - 8 : 山形精研株式会社製)

以下の表 1 に SKD12 及び SKD61 の化学成分を示す。

表 1 SKD12 及び SKD61 の化学成分

	Cr	Mo	V	Si	C	Mn	P	S
SKD12	4.80	0.90	0.15	0.10	0.95	0.40	0.030	0.030
	~	~	~	~	~	~	以下	以下
	5.50	1.20	0.35	0.40	1.05	0.80		
SKD61	4.80	1.00	0.80	0.80	0.35	0.25	0.030	0.020
	~	~	~	~	~	~	以下	以下
	5.50	1.50	1.15	1.20	0.42	0.50		

### 3-2 熱処理

熱処理は、焼入れの後に焼戻しを 3 回行い、更に残留オーステナイトと焼戻しマルテンサイトの安定化処理を行った。この熱処理は、山形精研株式会社で行なった。その方法を図 3 に示す。

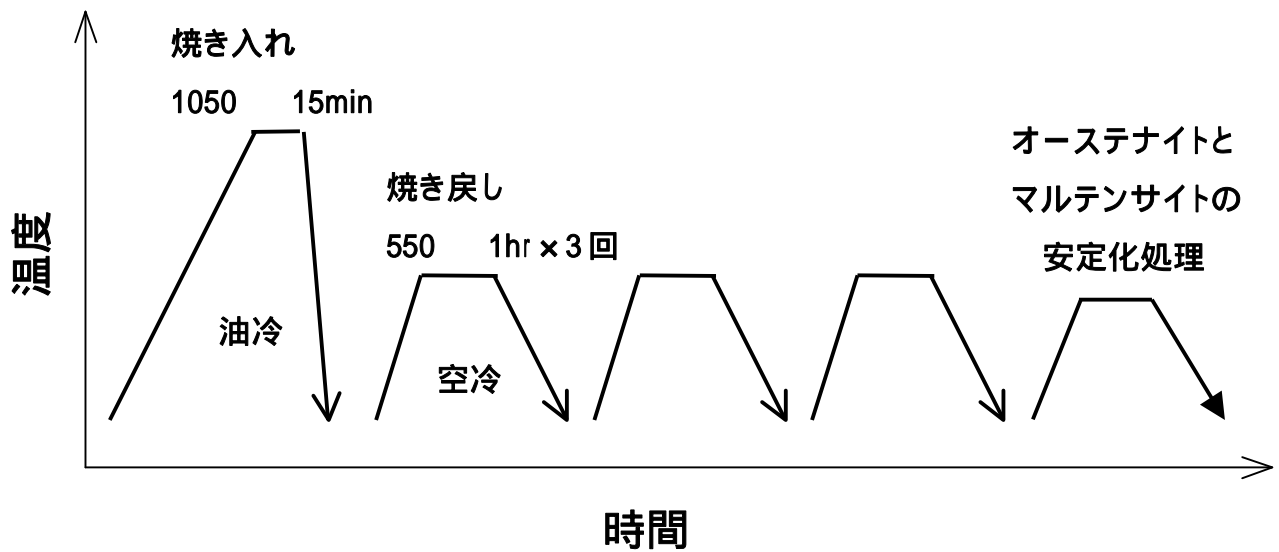


図 3 材料の熱処理

### 3-3 機械的特性

熱処理を施した材料の機械的性質は以下の通り。

硬さ	:	60±1 HRC
破壊靱性値	:	25.1MPa・m <sup>1/2</sup>
ヤング率	:	210GPa

### 3-4 形状

試験片の形状及び寸法を図 4 に示す。試験片は、疲労試験機に取り付ける厚さ 0.8mm の固定部と、厚さ 0.2mm の実際に繰返し曲げ加重を受ける応力負荷部がある。そして段付部切欠半径は 0.3mm である。

また、試験片の加工は放電加工ではなく、すべて研削で行われる。これは、放電加工時に、製品表面に細かい傷が発生するからである。研削に使用した砥石は、チロリット社の CBN 砥石 (97A120JV) であり、研削液を使用しない乾式研磨法で試験片を製作した。ちなみに試験片製作時、試験片長手方向が材料の圧延方向になるよう切り出し、研削は圧延方向と直角の方向に行う。

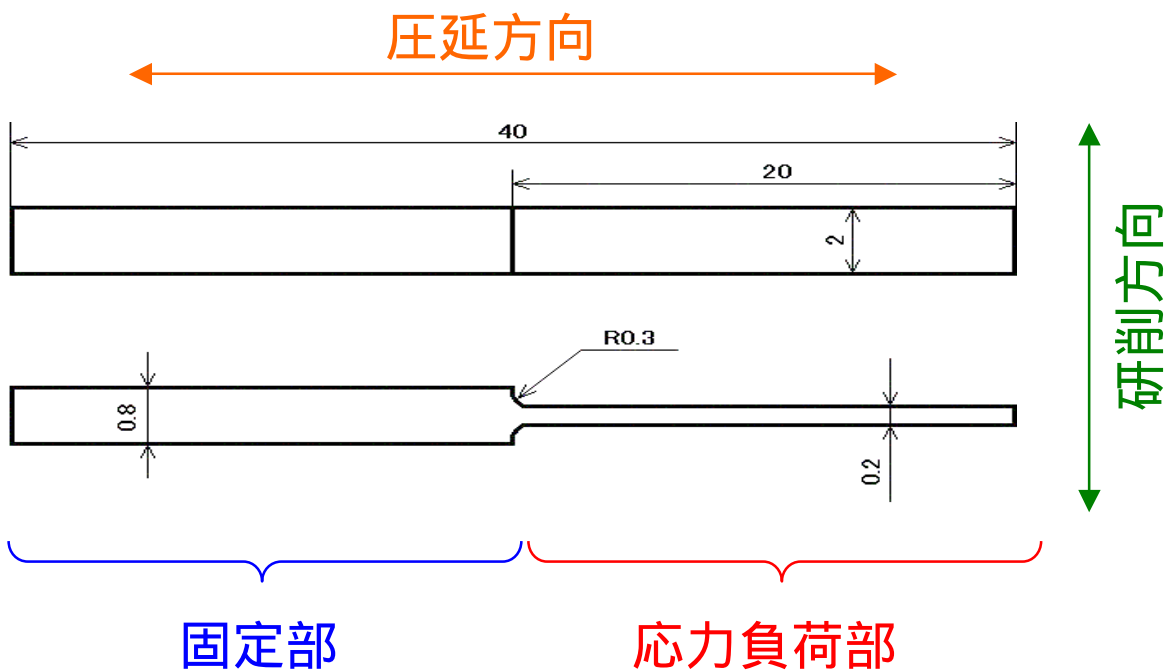


図 4 試験片形状及び寸法



## 第 4 章 改良型ダイス鋼小型試験片の 繰返し曲げ疲労試験

### 4-1 緒言

材料の疲労寿命は与えられる繰返し荷重による応力振幅の大きさに依存している。材料の疲労強度を知るためには、各応力振幅での試験片の疲労寿命を調査しなければならない。さらに材料の疲労強度を定めるにあたり、何か基準となる繰返し数を満たす応力振幅（時間強度）が必要である。

本実験では、どれくらいの応力振幅（繰返し荷重）を与えたとき、試験片が何回の繰返し数で破断するのかを、各応力振幅で疲労試験を行い調査することを目的とする。また、本研究では実用上の観点から繰返し数  $10^6$  回を実験の打ち切り回数とし、この繰返し数  $10^6$  回満たす応力振幅（時間強度）を見出すことも一つの目的である。

## 4-2 実験方法

### 4-2-1 疲労試験機

図 5-1, 5-2 に本研究で使用した小型疲労試験機の概観を示した。図 5-1 は小型疲労試験機を真上から見たもので、図 5-2 はこれを側面から見た図である。また、図 5-2 には試験片取り付け部の拡大図もあわせて示している。

この小型疲労試験機は、モータの回転運動をクランク機構によって往復運動に変換するものである。これによりスリット状の応力負荷板を往復させることで試験片に繰返し曲げ荷重を与える構造である。また、試験片固定板は往復運動の直角方向にスライドさせることができ、これにより試験片に与える応力振幅の大きさを変化させることができる。ちなみに、試験片固定板の移動距離は取り付けられているマイクロメータで計測する。繰返し数のカウントは、非接触式センサで数えられ、カウンタに表示される。試験片が破断すると、自動停止装置によって自動的にモータが停止し、試験が終了する仕組みになっている。

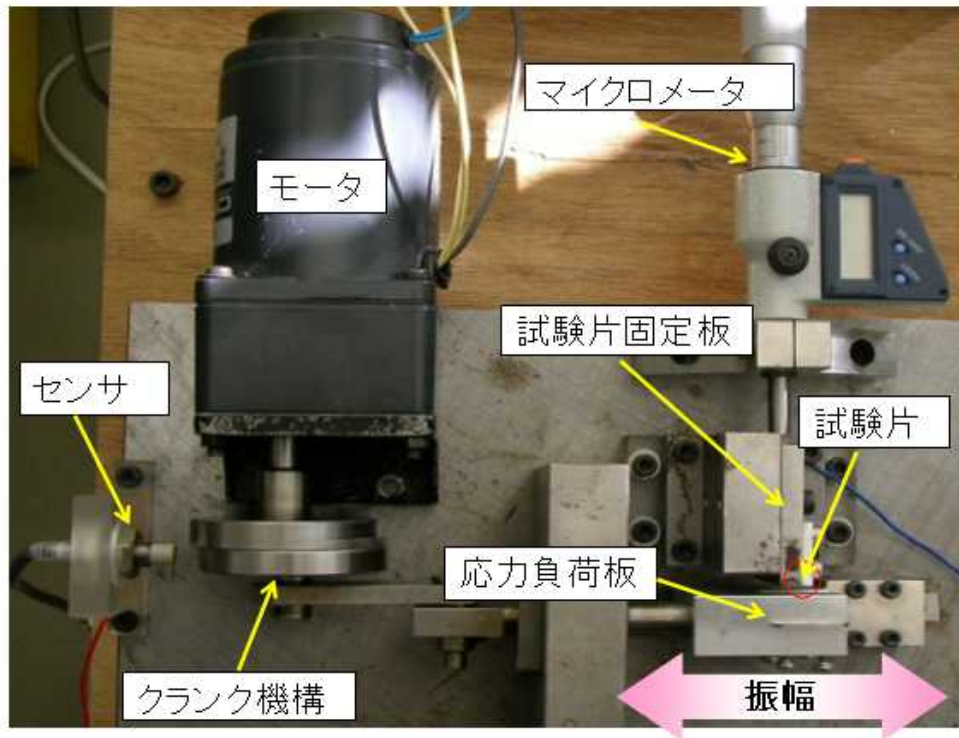


図 5-1 小型疲労試験機

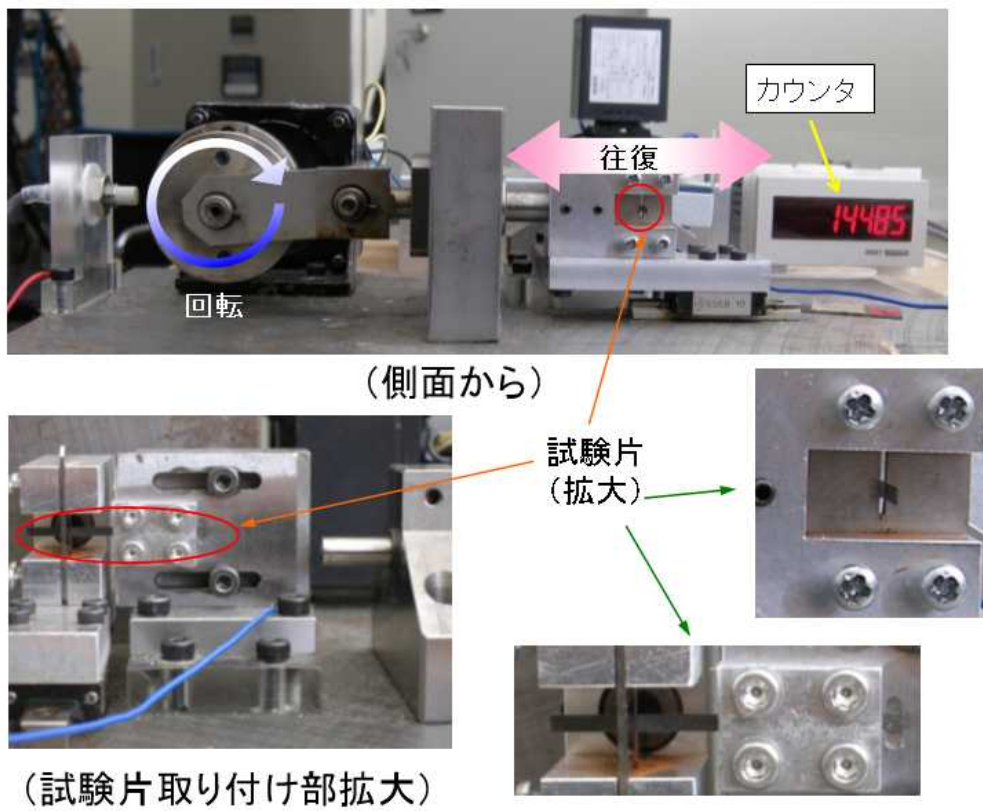


図 5-1 小型疲労試験機の側面図及び拡大図

#### 4-2-2 試験条件

負荷条件は、完全両振り(応力比  $R = -1$ )で、繰返し速度 6Hz、変位 3.04mm の一定である。本研究では実用上の観点から繰返し数  $10^6$  回を実験の打ち切り回数とした。

応力振幅は片持ちはりの曲げの式<sup>7)</sup>に基づき、式 1 より求められる。本実験では  $E, h,$  は一定値であるため、負荷の位置 (= 試験片長さ)  $L$  を変えることにより、応力振幅 を変化させた。また、図 6 は試験片に負荷のかかる様子を模式的に表したものである。図 6 において、A に示す箇所に応力が集中し、ほとんどの試験片はここで破断した。

$$\sigma = \frac{3Eh\delta}{2L^2} \quad \dots \text{式 1}$$

- σ : 応力振幅 [MPa]
- E : ヤング率 [GPa]
- h : 試験片幅 [mm]
- δ : たわみ量 (振幅 × 1/2) [mm]
- L : 負荷の位置 [mm]

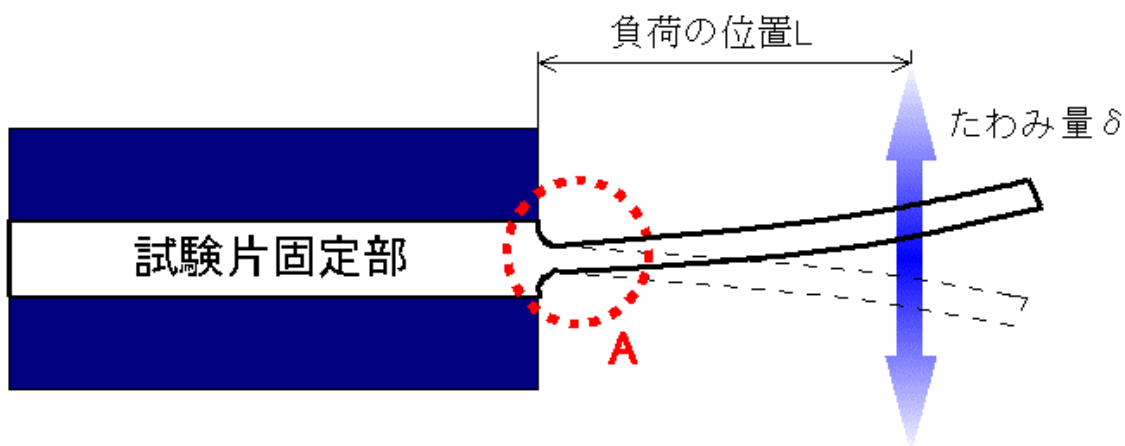


図 6 繰返し曲げ疲労試験模式図

### 4-3 結果及び考察

本実験では応力振幅を変化させ、さまざまな値の応力振幅で試験片に対し疲労試験を行った。本実験で得られた結果を図7の疲労強度特性曲線に示す。

疲労強度特性曲線は、試験片が破断するまでの繰返し数  $N_f$  を横軸(対数)に、そして応力振幅  $\sigma$  を縦軸にとって、応力振幅と寿命の関係を示したグラフである。

図7の疲労強度特性曲線よりわかるのは、与える応力振幅が大きい時、試験片は少ない繰返し数で破断したことから、応力振幅が小さい値の時は試験片の寿命は飛躍的に延びるということである。また、本研究で得られた  $10^6$  回を満たす時間強度は 1550 MPa だった。

ほとんどの試験片は段付部 R0.3mm の終点付近で破断していた。しかし、その段付部 R0.3mm の終点よりも数 mm 先で破断している試験片も存在した。

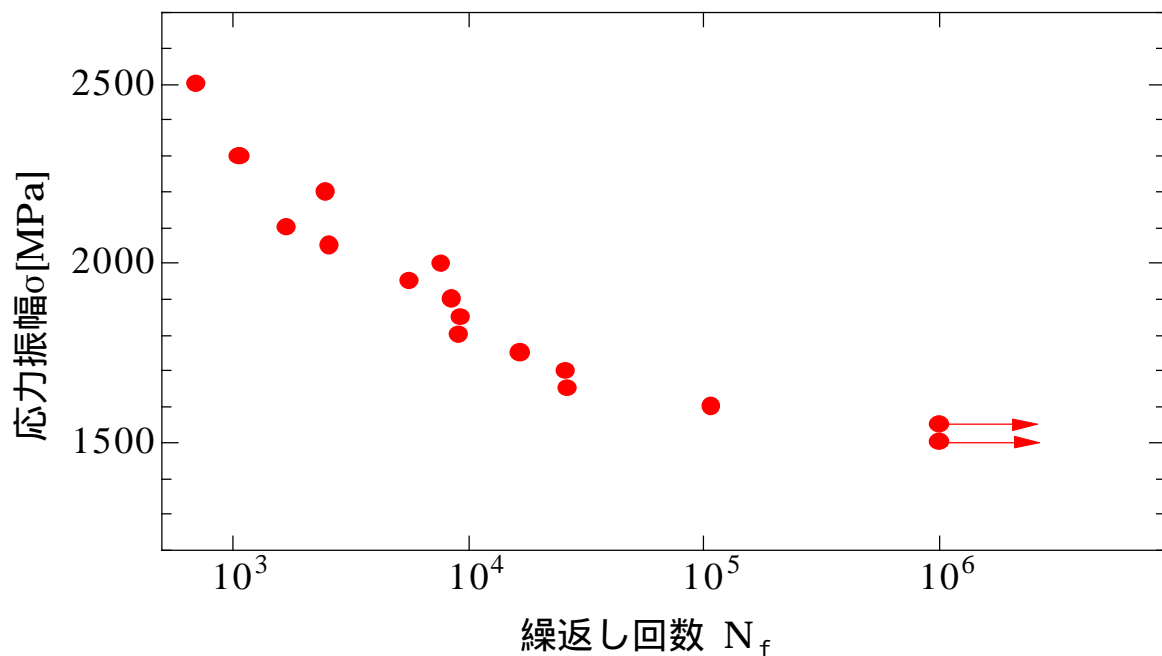


図7 疲労強度特性曲線

#### 4-4 結言

本試験片に対し，各応力で繰返し曲げ荷重疲労試験を行った結果，判明したことは以下の通りである．

- ・試験片の疲労寿命は，加わる応力振幅が大きければ短くなり，応力振幅が小さいとき試験片の寿命は飛躍的に延びることがわかった．
- ・本研究で定めた繰返し数  $10^6$  回を満たす時間強度は，1550 MPa が得られた．
- ・試験片は概ね段付部 R0.3mm の終点付近で破断していたが，その段付部 R0.3mm の終点よりも数 mm 先で破断している試験片もあった．

## 第 5 章 改良型ダイス鋼小型試験片の 繰返し曲げ疲労試験におけるバリの影響

### 5-1 緒言

第 4 章にて本試験片の疲労強度は明らかになった。しかし、第 4 章で使用した試験片は軽く面取りされ、加工後表面に存在するバリを取り去ったものだったのである。

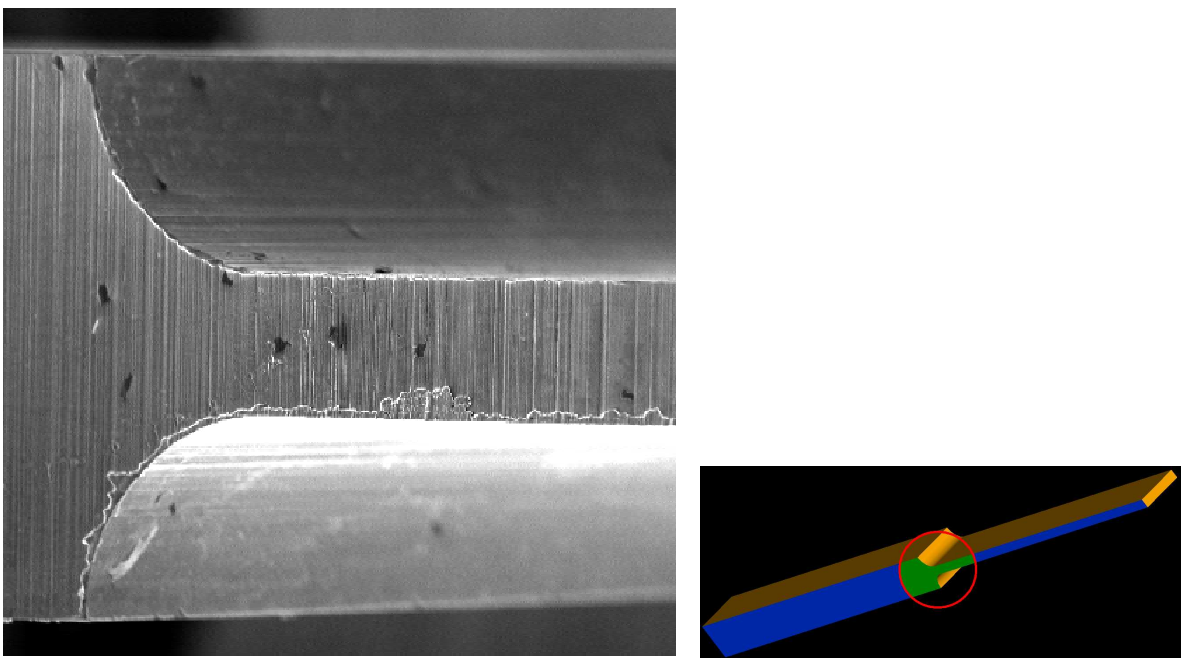
もともとコアピンの製作において、研削加工の後に糸面取り等バリをとる処理は行われず、バリを取るため糸面取りを行うと、角が削られ製品の形状はわずかであるとしても必ず変化する。一般的なサイズの製品ならば、加工後のバリを取ることは当たり前のことである。また、糸面取りしても形状や機能には何ら差し支えないのが普通である。しかしながら、知っての通りコアピンは大変微小な部品であるため、わずかな面取りでもその形状の変化は割合的にも大きいものになるのである。例えば 100 個のお菓子のうちから 1 個を勝手に食べても一見わからないが、2 個あるお菓子の 1 つを勝手に食べたら盗み食いしたことがすぐにばれてしまうのと同じことある。ましてやコアピンの使用目的はプラスチック射出成形で精密な小型コネクタを作製することであるため、コアピンを面取りしてわずかでも形状が変化するのはコネクタ作製において致命的なのである。

このように、コアピンはバリを残したまま使用されているのが現状である。本実験では研削加工後のバリをそのまま残した試験片を用意し、第 4 章と全く同じ方法で疲労試験を行った。これにより、バリの有無が試験片の疲労強度に影響するのかわからないのか調査することを目的とする。

## 5-2 実験方法

使用する試験機及び試験条件は第 4 章と同じ。

本実験で使用する試験片は、第 3 章で紹介したものと同様のものであるが、研削加工の後のバリをそのまま残した仕様となっている。その試験片全ての表面を光学顕微鏡 (BH-2-UMA : OLYMPUS) で観察したところ、全ての試験片にバリが存在していることが確認された。図 8 は試験片に存在するバリを走査型電子顕微鏡 (SEM X JSM-5410LV : 日本電子) を用いて撮影したものである。また、試験片のどの部分を観察したのかわかるよう、補足として 3 次元 CAD の I-DEAS による立体モデルも示す。ちなみに、写真は立体モデルの赤丸内の部分を観察したものである。図 8 を見ると、試験片のエッジに沿ってバリが存在しているのがわかるはずである。



100  $\mu$  m

図 8 試験片に存在するバリ



### 5-3 結果及び考察

本実験ではバリが有る試験片に対して第 4 章と同じように応力振幅を変化させ、各応力振幅で疲労試験を行った。図 9 は、第 4 章で得られたバリの無い試験片のデータに、本実験で得られたバリの有る試験片のデータを重ねて表した疲労強度特性曲線である。図 9 において、赤丸がバリを取った試験片の結果で、青バツがバリを残した試験片の結果を示している。

図 9 の疲労強度特性曲線から、バリの有る試験片もバリの無い試験片と同じように高い応力振幅では早く破断し、同様に低い応力振幅では試験片の寿命は大きく延びたことがわかる。さらに、全体としてバリの有る試験片のほうがバリの無い試験片よりも少し先に破断する傾向が見られた。また、本研究で得られたバリの有る試験片が繰返し数  $10^6$  回を満たす時間強度は 1500 MPa だった。第 4 章でのバリの無い試験片の時間強度は 1550 MPa だったため、本実験ではバリの有る試験片の時間強度はこれに及ばないという結果になった。しかしその差は 50 MPa であるため、試験を繰返せばバリの有る試験片でもバリを取ったときと同じ時間強度を得られるものと推察される。なぜなら、バリを取った試験片も元はバリを残した試験片であり、同一素材の純粋な疲労強度は同じと考えることができるからである。

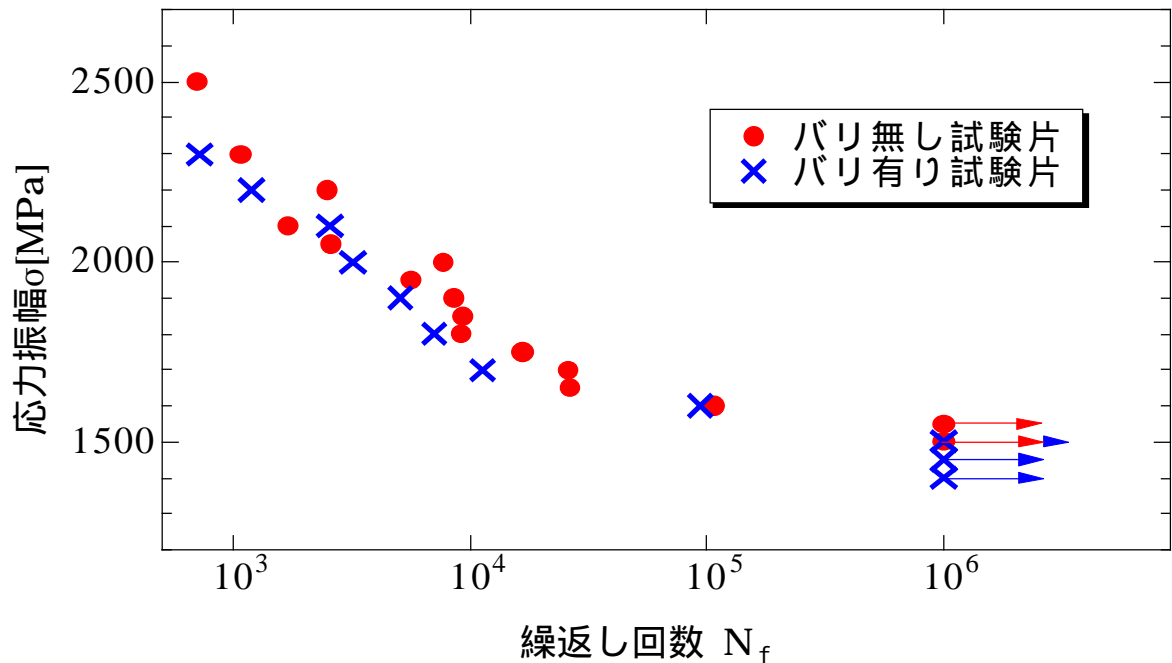


図9 疲労強度特性曲線（バリの有無による比較）

#### 5-4 結言

バリを残した試験片に対し、各応力で繰返し曲げ荷重疲労試験を行い、さらに第4章で得られたデータと本実験で得られたデータを比較した結果、判明したことは以下の通りである。

- ・バリの有無にかかわらず、試験片の疲労寿命は加わる応力振幅が大きければ短くなり、応力振幅が小さいとき試験片の寿命は飛躍的に延びる。
- ・バリの有る試験片が繰返し数  $10^6$  回を満たす時間強度は、1500 MPa だった。
- ・バリを残した試験片のほうが全体的にバリを取去った試験片よりも先に破断した。

## 第 6 章 疲労破面解析

### 6-1 緒言

前述の通り，疲労破壊の原因は表面付近の介在物や加工時の表面傷であるとされている．また，試験片の破面にはき裂の発生源の位置やその種類，き裂進展の様子などの重要な情報が残されている．その試験片がどのような原因で疲労破壊を起こしたのか，破壊の原因を特定することは疲労破壊を防ぐという目的においては欠かせないことである<sup>6)</sup>．本研究では後の第 7 章で述べる一定応力振幅での試験で破断した試験片を中心に，その試験片がどんな原因でどのようにして破壊したのかを明らかにするため，走査型電子顕微鏡を用いて破断面の観察を行った．疲労破面解析は試験片が疲労破壊した原因，すなわち破壊が起きた起点を探し，それにはどのような種類と特徴があるのか調査することを目的とする．

### 6-2 観察方法

#### 6-2-1 破面観察までの流れ

以下のような流れで試験片破断面の観察を行った．

- 1 試験片の破断
- 2 走査型電子顕微鏡を用いて破断面を観察
- 3 破壊の起点を発見
- 4 破壊の起点に介在物らしき物体が確認された場合は，元素分析装置（JED-2110：日本電子）により元素分析を行い，介在物の特定を行う．

## 6-2-2 疲労破面について

疲労破壊させた試験片の破面を正面から観察し，電子顕微鏡により撮影した例を図 10 に示す．また，図 10 には観察方向がわかるよう 3 次元モデルを合わせて示している．このように，試験片の疲労破面には破壊の起点と，遅い疲労き裂進展領域，早い疲労き裂進展領域，そして最終破壊部が存在する<sup>8)9)</sup>．

疲労破壊の起点は破壊した物体の表面またはその近傍に必ず存在している．疲労破壊の最初は起点から発生したき裂がゆっくり半楕円形に進展していく．その破面は比較的なだらかで，観察するとその部分は暗く見える．ゆっくりとしたき裂がある程度進展していくと，あるところからき裂の進展は急に速くなり，最後は残された部分が一気にもぎ取られるように破断するのが疲労破壊の特徴である．

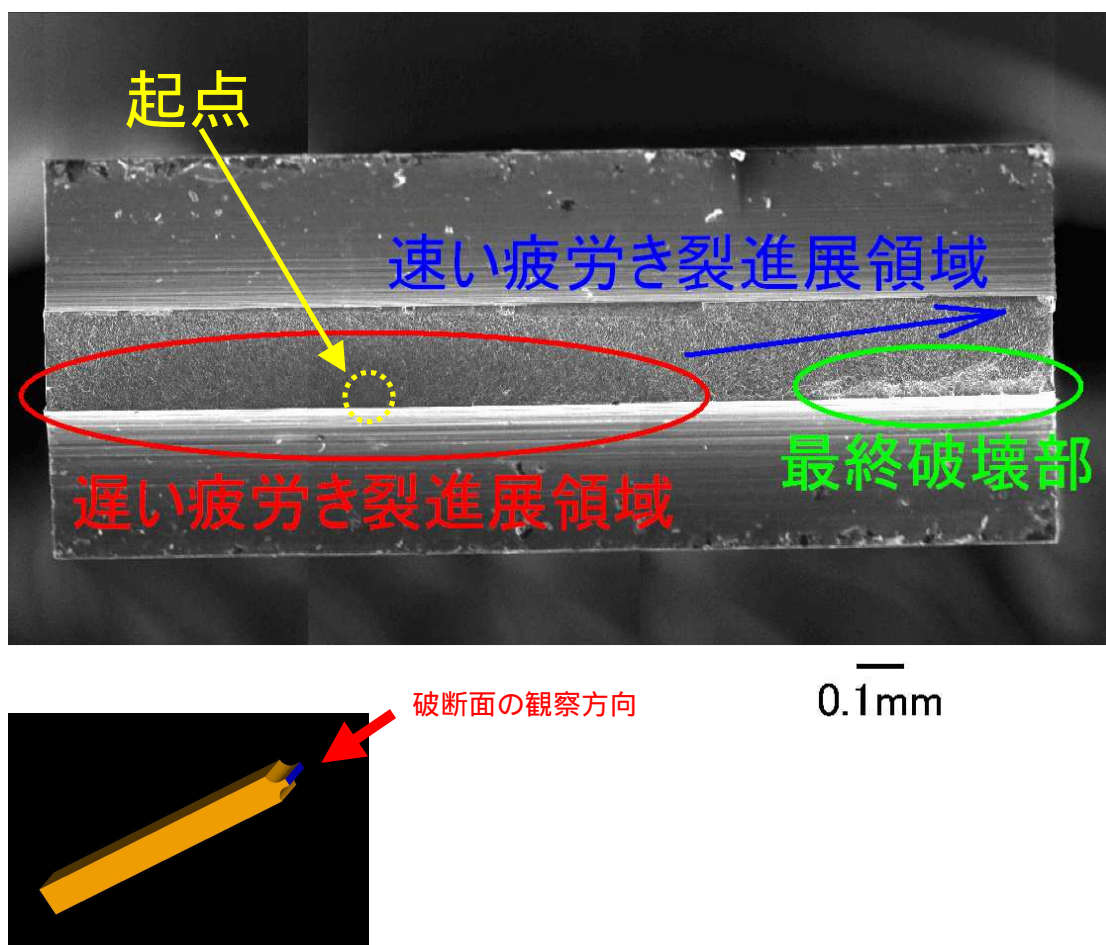


図 10 疲労破面の例

### 6-3 結果及び考察

本研究では、走査型電子顕微鏡を用いて試験片破断面の観察を行った。その結果、疲労き裂の発生源には大きく分け3種類があることがわかった。

#### 6-3-1 介在物型

図 11 にき裂発生源となった介在物を電子顕微鏡で撮影したもの（左図）と、これを元素分析したもの（右図）を示す。左図の赤丸が介在物を示している。元素マッピングにおいて、緑で示された部分は Fe，赤で示された部分は Al であった。よって、この試験片は介在物として析出した Al が原因で破断したものであることがわかる。

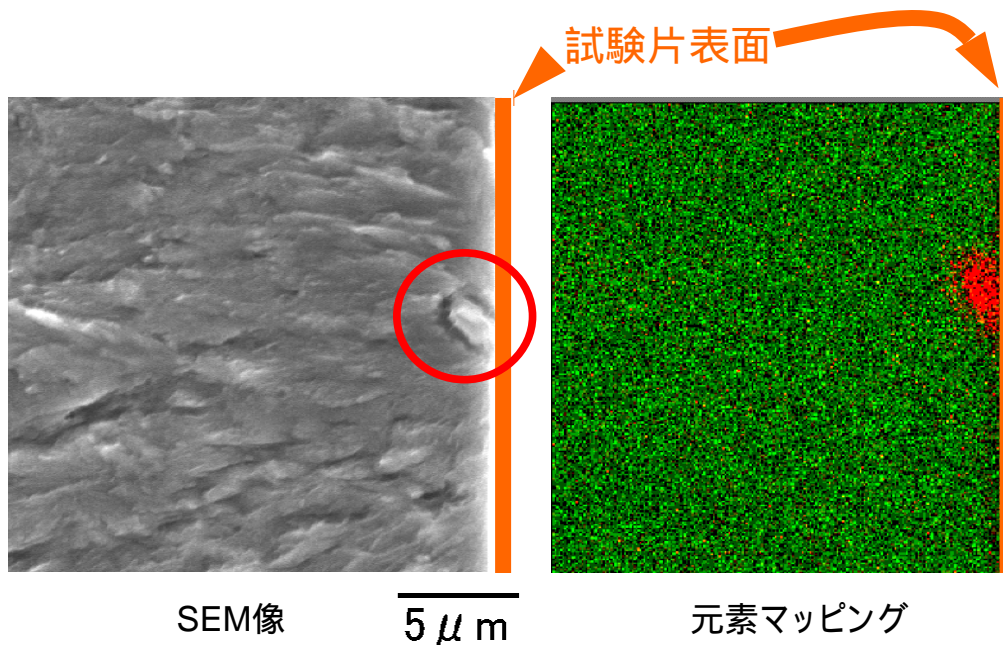


図 11 破断面に存在する介在物と元素分析の結果 (Al)  
(バリ有り試験片, 1460MPa,  $N_f=19824$ )

図 12 は他の試験片を同様に観察し，元素分析を行ったものである．左図の赤丸が介在物を示している．元素分析の結果，緑の部分は Fe，赤で示された部分は V，青の部分は Mo であった．よって，この試験片に存在している介在物は V-Mo であることがわかった．また，この介在物は試験片の表面に存在している訳ではなく，表面から少し内側に存在しているのが確認できる．このように試験片内部の介在物を起点とした疲労破面はフィッシュ・アイ（魚の目）と呼ばれており<sup>10)</sup>，本研究においては特殊な例である．本研究でこのようなフィッシュ・アイ型の疲労破面が見られたのは，この試験片 1 本のみであった．

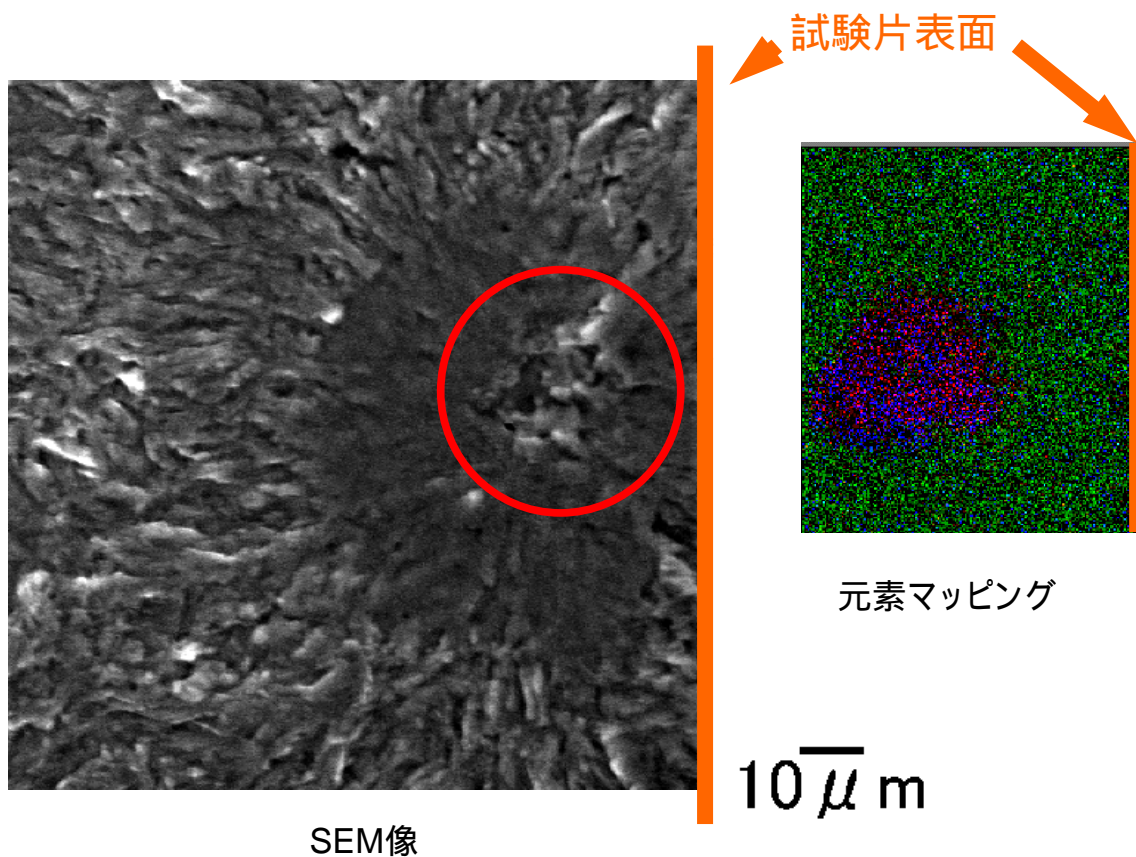


図 12 フィッシュ・アイ型の介在物と元素分析の結果 (V-Mo)  
(バリ無し試験片, 1600MPa,  $N_f=406179$ )

また，破壊源が介在物型だったものの内，さらにその中で介在物の特定ができたものは 70%で，その介在物の半数が Al であった．

### 6-3-2 研削痕型

図 13 は研削痕が原因で破断した試験片の破断面である。研削痕型の疲労破面は、研削加工中にできた砥石の傷からき裂が発生したものである。いかに研削でできる傷が小さいものでも、疲労破壊が起こる原子の視点からではそれは非常に大きな応力集中源となるのである。また、介在物からのき裂が 1 点から発生するのに対し、研削痕からのき裂は研削痕の広い範囲から発生する特徴がある。

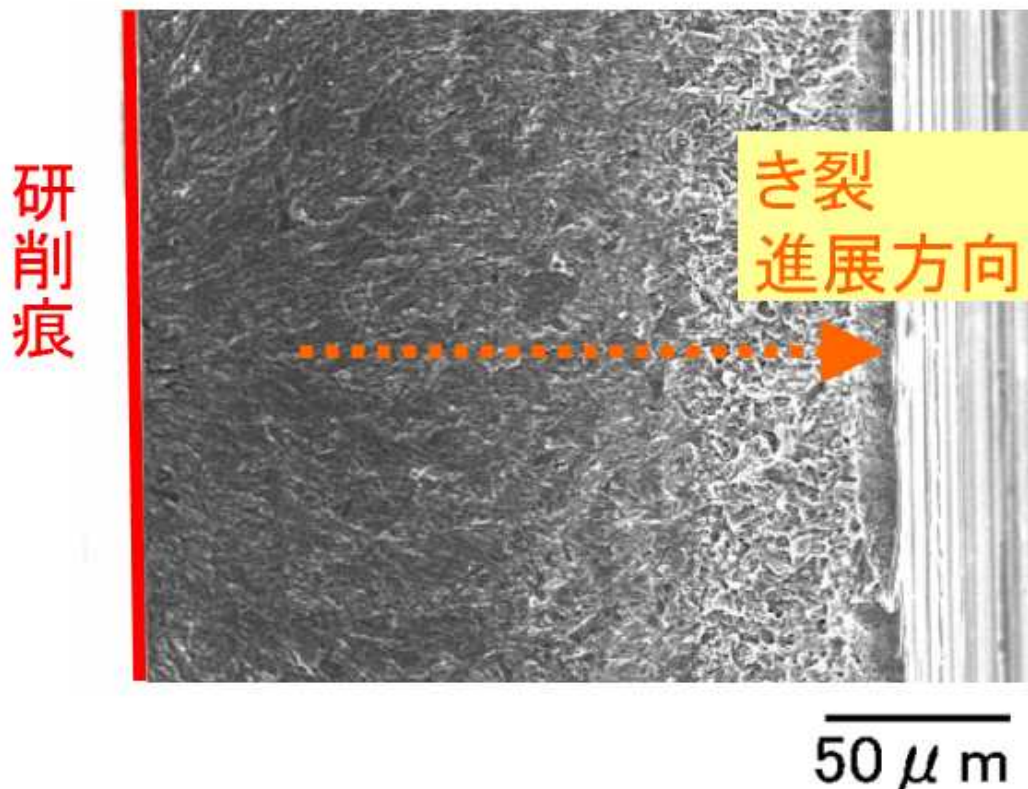


図 13 研削痕型の破面  
(バリ無し試験片, 1500MPa,  $N_f=1847668$ )

### 6-3-3 バリ型

バリを残したままの試験片において、試験片角部に存在するバリを起点として破断しているケースが多く見つかった。図 14 は起点となったバリを示したものである。当然バリ型の破断面を持つものはバリを残した試験片にしか見られなかった。例外としてバリを取った試験片の中でも、取り残したと思われるバリから破断しているものが 1 本だけ存在した。このことから、バリが疲労破壊に与える影響は大きいものであると考えることができる。

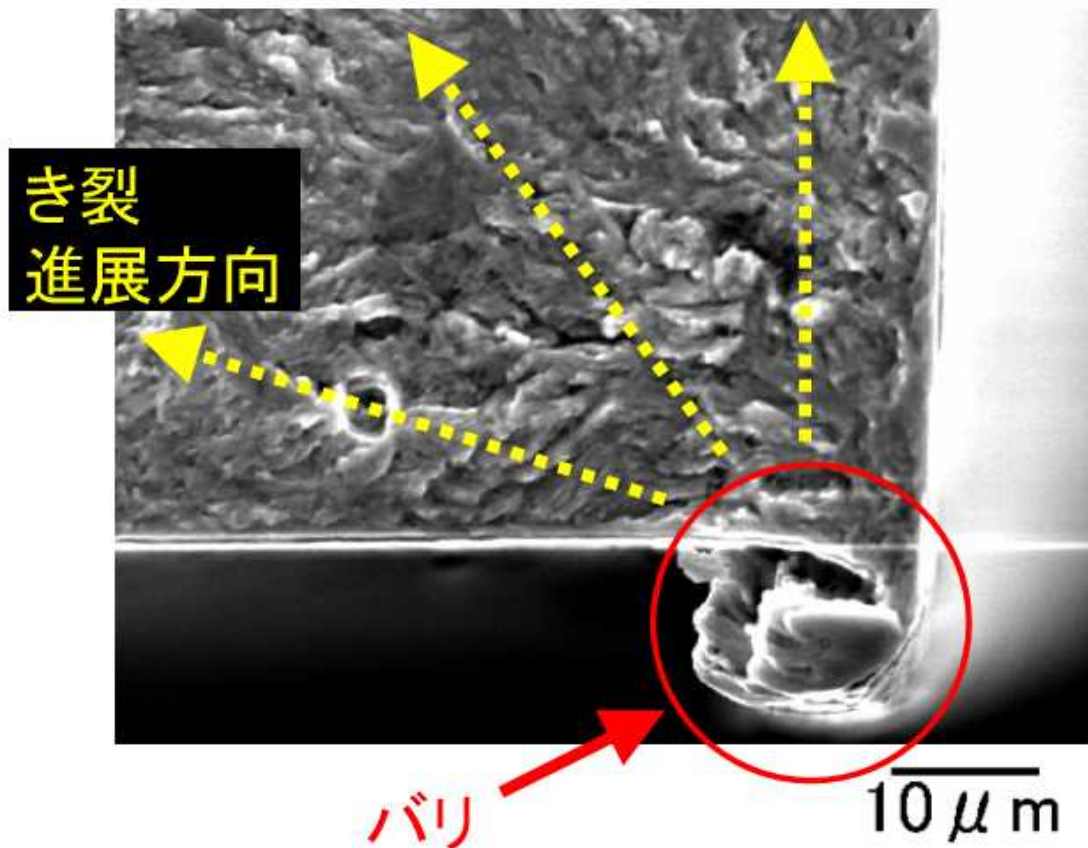


図 14 バリを基点とした破面  
(バリ有り試験片, 1500MPa,  $N_f=110371$ )



## 6-4 結言

本研究で試験片の破断面を電子顕微鏡及び元素分析装置で観察・分析した結果，次のことがわかった．

- ・疲労き裂の発生源は大きく分けて「介在物型」，「研削痕型」及び「バリ型」という3種類のパターンがあることがわかった．
- ・介在物型の中で，元素分析で解析できたのは70%で，確かに介在物が存在している場合にもかかわらず元素分析装置で物質が特定できないものがあった．
- ・元素分析で解析できた70%の介在物の内，半数がAIであった．
- ・バリ型の破断面はバリを残した試験片のみの特徴である．例外として，バリを取り去った試験片の中でもバリを取り残したと思われる箇所から破断していたものが1本だけ確認されたため，バリが疲労破壊に及ぼす影響は大きいと考えられる．

## 第 7 章 定応力疲労試験

### 7-1 緒言

同じ条件で試験を繰り返しても毎回ほぼ同じ結果が得られる引張強さ試験や硬さ試験と違い、疲労試験の結果は同じ条件だとしても非常に広範囲にばらつきを持つ特徴がある<sup>11)</sup>。疲労破壊におけるき裂の発生は原子レベルでの出来事であるため、材料内に存在する介在物や、試験片表面の表面傷が及ぼす影響は大きい。人間から見ればどれも同じ試験片に見えても、原子から見れば試験片のパラメータは一本一本異なるのである。これが疲労試験結果のばらつきの原因であり、疲労破壊が突然発生する原因でもある。

よって、疲労強度を考える上で数本の試験片の寿命のみを材料の疲労強度として考えるのは早計であると言える。第 6 章で明らかとなったように、試験片の破壊原因は多様である。なので、疲労を考えるためには同じ条件（一定応力）で複数の試験片で疲労試験を繰り返し、試験片の寿命とその試験片がどのような原因で破壊したのかを総合的に結びつけて考える必要がある。

また、第 4 章、第 5 章、第 6 章の結果より、試験片にあるバリの有無が疲労破壊に影響を与えていることが明らかになったため、その具体的な影響を見出さなければならない。

本実験では、繰返し数のばらつきと試験片の破壊源を結びつけて考えるため、バリの有る試験片とバリの無い試験片に対して定応力疲労試験を行い、さらにその破面を観察した。そして、それぞれの結果を統計的に処理することを目的とする。

## 7-2 実験方法

### 7-2-1 試験条件及び実験の流れ

試験片はバリの有る試験片とバリの無い試験片を使用した。

試験条件は第 4 章及び第 5 章と同じである。本実験では応力振幅を 1600 MPa の一定に設定し、両試験片に対して定応力疲労試験を行った。応力を一定に設定して複数の試験片に対し疲労試験を繰り返すことを定応力疲労試験と呼ぶ。定応力疲労試験では応力以外の条件・環境を変化させて試験を行うことがあるが、本実験では応力以外の条件も全く同じにして試験を行った。

各試験片の破断後は、第 6 章で述べた通り走査型電子顕微鏡と元素分析装置を用いて、破壊源の特定及び介在物の特定を行った。

結果が出揃った後、各試験片の寿命と疲労破壊源の関係をワイブル分布により統計処理を行った。

また、一定応力振幅を 1600 MPa に設定したのは、企業が設計目標とする繰り返し数  $10^5$  回付近の寿命を調査できる応力として妥当な大きさと判断したからである。

## 7-2-2 ワイブル分布

同一応力で得られた試験結果がばらつくのは前述した．このような同一条件でばらつきを持つ試験結果には，ワイブル分布を用いて検討することが統計的に有効であるとされている．ワイブル分布は，総数  $n$  個のデータの内，寿命の短いほうから第  $i$  番目のデータに対する累積確率  $P$  をメジアンランク法

$$P = \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \quad \dots \text{式 2}$$

で求め，Y 軸に 2 回対数

$$Y = \ln \ln \left( \frac{1}{1 - P} \right) \quad \dots \text{式 3}$$

X 軸に繰返し数  $N_f$  の対数

$$X = \ln N_f \quad \dots \text{式 4}$$

を取ったグラフであり， $Y=mX$  で傾き  $m$  の一次関数で表される<sup>12) 13)</sup>．

## 7-3 結果及び考察

### 7-3-1 定応力疲労試験結果

繰返し数のばらつきを調べるため、両試験片（バリ無し 14 本，バリ有り 18 本）に対し、一定応力振幅 1600 MPa で試験を行った。図 15 は本研究の結果を図 9 の疲労強度特性曲線に重ねてプロットしたものである。図 15 において、白抜きの赤丸がバリの無い試験片の一定応力振幅での結果，細い青バツ印がバリの有る試験片の一定応力振幅での結果を示している。

バリの有無を問わず，試験結果は非常に広い範囲の繰返し数でばらついた。図 15 を見る限り，バリの有る試験片の試験結果の方が比較的大きくばらついているように見える。それを具体的な数値として表すため，繰返し数からばらつき具合を示す標準偏差を求めた。その結果バリ無しでは 490417，バリ有りでは 975602 となり，バリの有る試験片の繰返し数の方がより大きなばらつきを持つことがわかった。

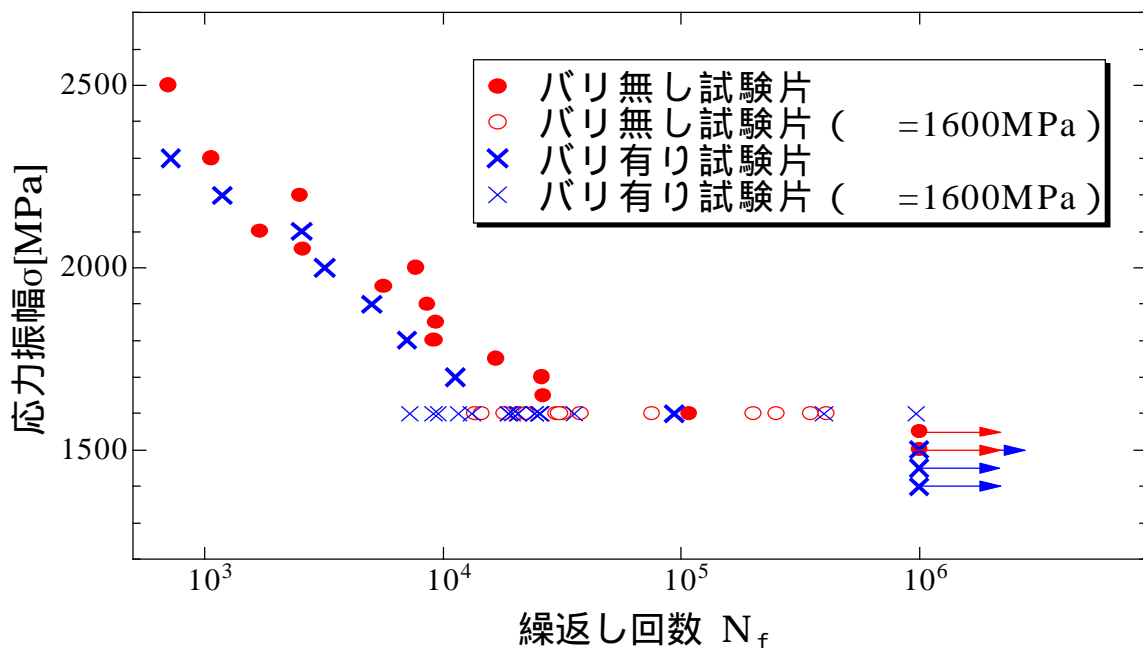


図 15 定応力疲労試験結果（1600MPa）

### 7-3-2 疲労寿命分布

図 16 は本実験で得られたデータのワイブル分布を両試験片ごとに求め、一本一本の破壊原因と合わせてプロットしたものである。データをプロットすると、それぞれのデータは傾きの異なる 2 本の直線で構成されることがわかる。この直線は最小二乗法で求めたもので、傾きの大きい直線上にあるものは短寿命、傾きの小さい直線上にあるものは長寿命であることを示している。それぞれのデータが短寿命：長寿命の比は、バリ無しで 4：3、バリ有りで 5：1 であり、バリの有る試験片は特に短寿命に集中することがわかる。

バリ有り試験片の 50%はバリを起点として破壊していた。もし、これらの試験片がバリの影響を受けなかった場合、いくつかのデータは長寿命側にプロットされていたはずである。つまり、試験片のバリを取り除くことで試験片の寿命を長寿命側に引き上げることができると言える。

また、研削痕型の試験片と介在物型の試験片の疲労寿命を比べてみると、研削痕型は疲労寿命が短くなる傾向があることがわかる。さらに、研削痕型と介在物型よりもバリ型の方が疲労寿命は長いというのも見て取れる。なので、それぞれの原因が疲労強度に及ぼす影響の大きさは研削痕が最も大きく、次に介在物、そしてバリの影響があることがわかった。

長寿命側にプロットされた試験片の破壊源は、破壊の起点に介在物らしき物体が存在していたが、元素分析を行っても母相である Fe しか検出されなかった正体不明の破壊源だった。これらはいずれも長寿命の試験片にしか見つからなかった原因であるため、この正体不明の破壊源は試験片の疲労寿命において重要な要素であると考えられる。本研究ではこの破壊源の正体を特定することができなかったが、この破壊源の正体を解き明かすことが今後の課題と考えられる。

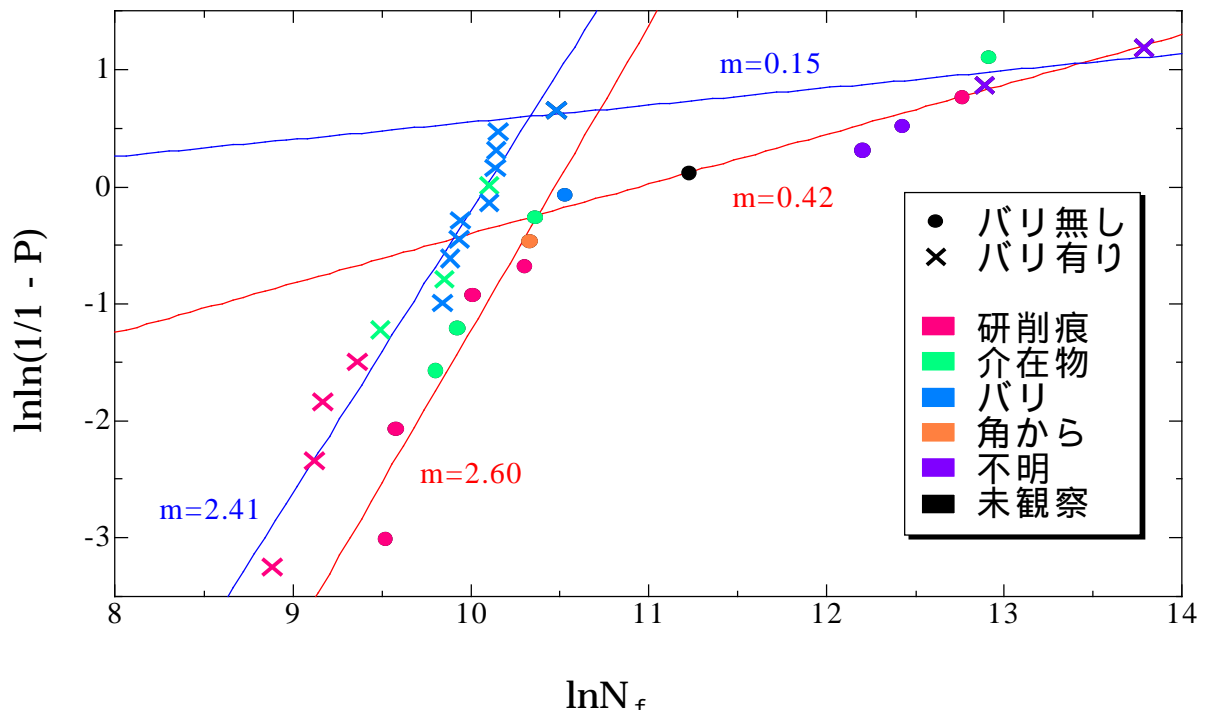


図 16 定応力疲労試験結果のワイブル分布 (1600MPa)

## 7-4 結 言

本実験ではバリの有る試験片とバリの無い試験片に対し、1600 MPa で定応力疲労試験を行い、さらに試験片の疲労破壊源を調査した。そしてそこから得られたデータを集計し、ワイブル分布による統計的処理を行った結果、以下のことが判明した。

- ・バリの有無を問わず、繰返し数は非常に広い範囲でばらついた。
- ・結果の標準偏差を求めたところ、バリ無しでは 490417、バリ有りでは 97560 となり、バリの有る試験片の繰返し数の方がより大きなばらつきを持つことがわかった。
- ・試験結果に対しワイブル分布でデータを処理した。その結果、短寿命：長寿命の比はバリ無しで 4：3、バリ有りでは 5：1 であり、バリの有る試験片は特に短寿命に集中することがわかった。
- ・バリを残した試験片の 50%がバリを起点として破壊していた。この事実から試験片のバリを取り除くことで試験片の寿命を長寿命側に引き上げることができると言える。
- ・疲労強度に及ぼす影響の大きさは  
研削痕 > 介在物 > バリ  
の順に大きくなることがわかった。
- ・長寿命側の試験片には、元素分析で特定できなかった介在物を起点として破壊しているものが集中していた。今後の課題として、正体不明の介在物が何であるのか解明することが挙げられる。



## 第 8 章 有限要素法による解析

### 8-1 緒言

第 4 章で述べた通り，これまでの実験で試験片が破断する位置は毎回同じというわけではないことがわかっている<sup>14)</sup>．物体が疲労破壊する上で，その破壊箇所は応力集中源である．なので，試験片の応力集中源（疲労破壊源）はそれぞれ別の位置に存在していることになる．全く同じ形状の試験片に同じ方法で試験を行っている以上，その応力集中源はどの試験片でも同じ箇所のはずである．実験前の段階で，試験片の段付部 R0.3mm の終点付近に応力集中が起き，そこで破断するはずだろうという事は予想していた．しかし，本試験片において疲労試験中どこに応力が集中するのかは正確にはわからない情報であった．

そこで，本研究では 3 次元 CAD の I-DEAS で試験片のモデルを製作し，有限要素法によって疲労試験中の試験片にどのような応力が発生するのかシミュレーションを行った．

また，本来コアピンの段付部に R をつける事は少ない．さらに本研究では，本来のコアピンの様子を近づけるため，段付部の R を本研究の半径 0.3mm から半径 0.1mm に小さくした試験片を仮定して同様に解析を行った．

### 8-2 方法

解析に用いるのは 3 次元 CAD の I-DEAS である．

試験片のモデルを作成し，実際の疲労試験と同じように仮定した応力を発生させる変位を与える．なお，変位は式 1 から求める．

### 8-3 結果及び考察

図 17 は本研究で実際に行った疲労試験と同様に，試験片に 2000 MPa が発生するものと仮定して有限要素法による解析を行った結果である．有限要素法による解析において，詳しい解析をするためにはモデルにより細かいメッシュを切らなければならない．しかし，細かいメッシュを切れば切るほど PC にかかる負荷は大きくなるため，本研究では試験片の一部を抜き出して解析を行った．また，図 17 の上図に試験片の抜き出した部分を赤丸で示す．

図 17 において，赤い部分が最大応力の発生している箇所であり，応力集中部であることを示している．これを見ると，最大応力は R 部の終点から 0.06mm 固定側に入り込んだ位置であることがわかる．しかし，実際の試験片の破断箇所は R 部の終点より 2～3mm 先の範囲でばらつきを持っていた．よって，試験片には理論上の応力集中部よりも先の地点に応力集中が発生していることになる．すなわち，試験片の破断地点に存在している介在物や研削痕が理論上の応力集中の値よりも大きい応力集中を発生させるということがわかったのである．

また，試験片に加わる応力は 2000 MPa としてたわみを計算し，それを与えて解析を行った．解析の結果，実際に試験片に作用する最大応力は 2260 MPa であることが判明した．計算と解析結果が異なる理由は，計算に用いる式 1 はあくまで材料力学から求められる理論上の式であるからと考える．段付部に R を持つ本試験片に加わる正確な応力と理論式の結果では，応力の値に違いが現れるのである．つまり本研究で行った疲労試験では，設定上試験片に計算で求めた応力よりも大きな応力がかかっていたことになるかと推察する．

さらに本研究では，段付部の R を本研究の半径 0.3mm から半径 0.1mm に小さくした試験片のモデルを作り，試験片に応力 2000 MPa が発生するものとして全く同じ条件で解析を行った．その結果，段付部の R が小さくなくても，最大応力は R 部の終点から固定側に入り込んだ位置に存在することが確認された．また，段付部の R が半径 0.3mm の場合は最大応力が 2260 MPa だったのに対して，半径 0.1mm の場合の 2030 MPa であり，段付部の R を小さくすると最大応力は理論上の値 2000 MPa に近づくことがわかった．

最大応力が R 部の終点から固定側に入り込んだ位置に存在することと、段付部の R の直径が大きいと最大応力が計算よりも高くなる理由は、太さの違う 2 本の片持ち梁を考えることで説明できる。太い方と細い方の 2 本の片持ち梁の自由端に同じ大きさの変位を与えた場合、最大応力は 2 本とも固定端に生じる。しかし、与える変位は同じ値なので、最大応力の大きさは太い片持ち梁の方が大きくなる。これは材料力学上、間違いの無いことである。この事実を踏まえ別の視点で考えると、図 17 において片持ち梁となる応力負荷部は、固定端付近でだんだん太くなる構造をしていることがわかる。本研究において理論式である式 1 を用いるとき、試験片の幅  $h$  は  $0.2\text{mm}$  を代入した。しかしそこから導かれる応力は、段付部が R を持たず直角の場合の応力値である。

これらの事柄から、最大応力が R 部の終点から固定側に入り込んだ位置に存在する事と、段付部の R の直径が大きいと最大応力が計算よりも高くなる理由を以下に述べる。片持ち梁の自由端に同じ大きさの変位を与えた場合、最大応力が生じる固定端の幅が太いほど最大応力は大きくなる。理論上、本試験片の固定端の幅は  $0.2\text{mm}$  である。しかし実際は段付部に R があるため試験片の固定端の幅は連続的に大きくなっている。つまり、段付部 R の影響で試験片幅  $0.2\text{mm}$  よりも固定端の幅が大きくなるため、最大応力は R 部の終点から固定端側に入り込み、さらに理論上の最大応力よりも大きくなるのである。そして、段付部 R を小さくすると、連続的に大きくなる固定端の幅も小さくなる。なので、R の半径が大きくなると試験片の最大応力が大きくなると言えるのである。

しかし実際に段付部 R の半径を  $0.3\text{mm}$  から  $0.1\text{mm}$ 、 $0.03\text{mm}$  と小さくした試験片で疲労試験を行った結果、疲労寿命は段付部 R の半径が小さくなればなるほど短くなる事が報告されている<sup>15) 16)</sup>。この事実と本研究で行った有限要素法による解析の関係については、今後さらに調査検討していかなければならない課題と考えられる。

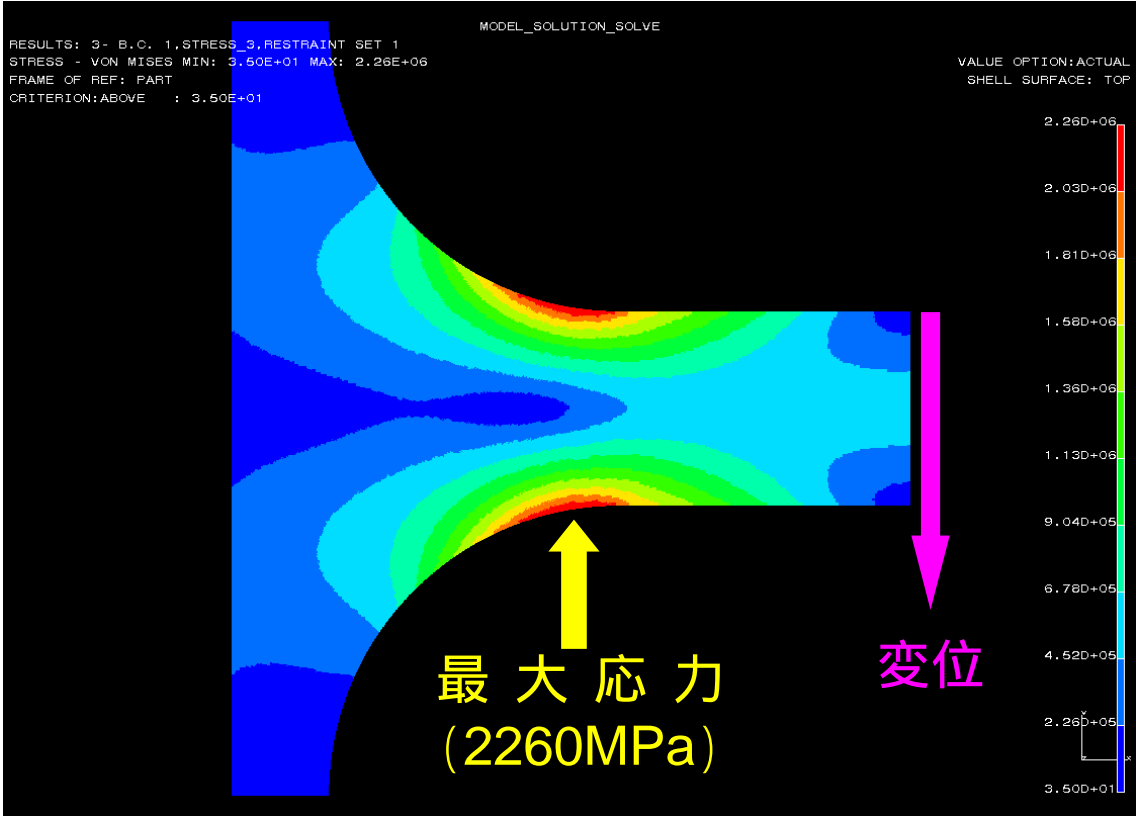
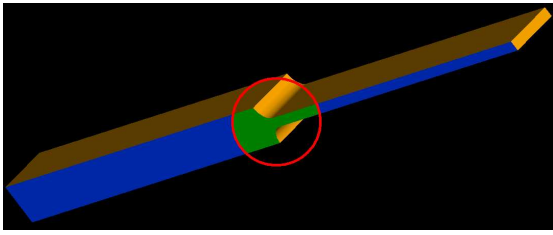


図 17 有限要素法によるシミュレーション (R0.3mm , 2000MPa)

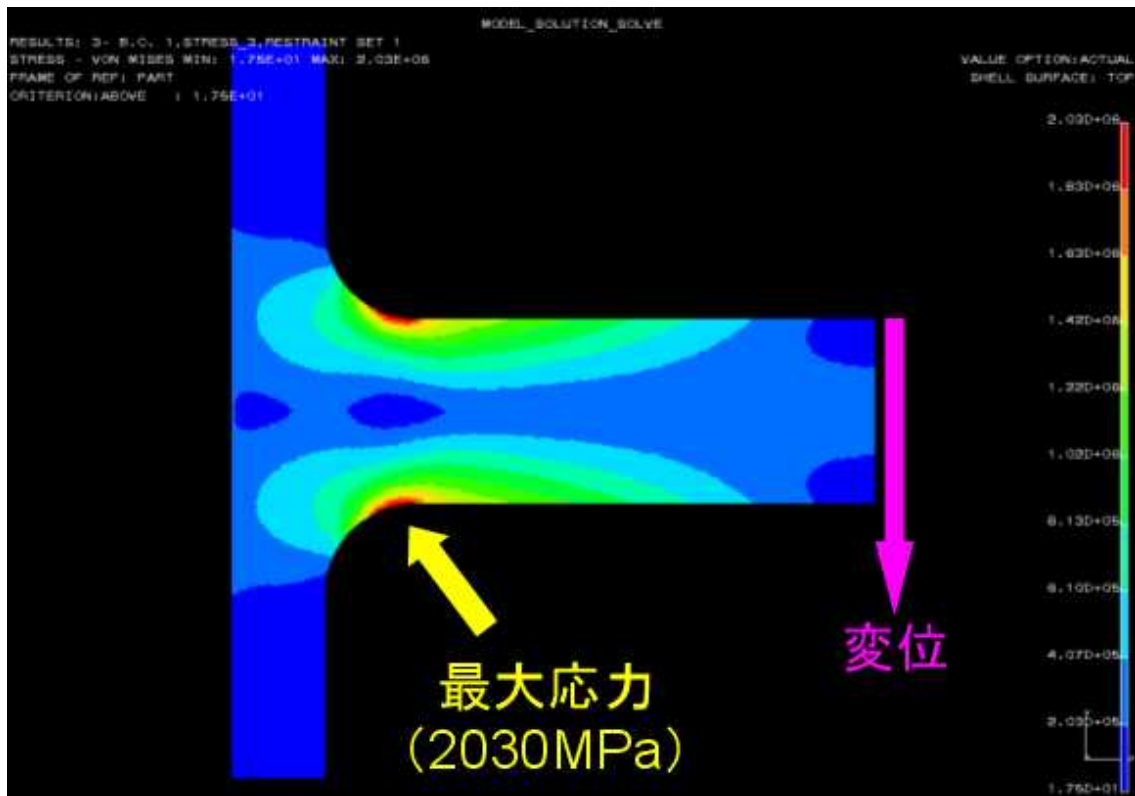


図 18 有限要素法によるシミュレーション (R0.1mm , 2000MPa)

## 8-4 結 言

3次元CADで試験片のモデルを製作し、有限要素法によって疲労試験中の試験片にどのような応力が発生するのかシミュレーションを行った結果、以下の事がわかった。

- ・疲労試験中の試験片における理論上の最大応力は、R部の終点から0.06mm固定側に入り込んだ位置の表面であることが判明した。
- ・試験片には理論上の応力集中部よりも先の地点に応力集中が発生していることから、試験片の破断地点に存在している介在物や研削痕が理論上の応力集中の値よりも大きい応力集中を発生させている。
- ・試験片に加わる応力は2000 MPaとして解析を行った結果、実際に試験片に2260 MPaの最大応力が作用することがわかった。
- ・段付部のRを本研究の半径0.3mmから半径0.1mmに小さくした試験片のモデルを作り、全く同じ条件で解析を行った。その結果、段付部のRが小さくなくても、最大応力はR部の終点から固定側に入り込んだ位置に存在することが確認された。
- ・段付部のRが半径0.3mmの場合は最大応力が2260 MPaだったのに対して、半径0.1mmの場合の2030 MPaであり、段付部のRを小さくすると最大応力は理論上の値2000 MPaに近づくことがわかった。
- ・段付部Rの半径が大きくなると試験片の最大応力が大きくなる理由は、段付部Rの半径の変化がそのまま実際の固定端の幅の変化につながるからである。

## 第 9 章 総 括

第 1 章は序章であり，企業が抱えるコアピンの疲労破壊という問題の現状と，小型試験片で疲労試験を行う必要性を示し，本研究の目的を述べた．

第 2 章はプラスチック射出成形に用いられる金型の一部であるコアピンについて述べた．

第 3 章は本研究で使用了試験片の化学成分，熱処理，機械的特性，そして形状及び加工法について述べた．

第 4 章は本研究で行った疲労試験に用いる小型疲労試験機及び疲労試験の条件について述べた．そして各応力で疲労試験を行い，疲労強度特性曲線を得ることを目的とした．本実験で得られた結果を以下に示す．

- ・試験片の疲労寿命は，加わる応力振幅が大きければ短くなり，応力振幅が小さいとき試験片の寿命は飛躍的に延びることがわかった．
- ・本研究で定めた繰返し数  $10^6$  回を満たす時間強度は，1550 MPa が得られた．
- ・試験片は概ね段付部 R0.3mm の終点付近で破断していたが，その段付部 R0.3mm の終点よりも数 mm 先で破断している試験片も少なくは無かった．

第 5 章はバリを残した試験片を用いて，試験片に存在するバリが試験片の疲労強度に与える影響を調べた．本実験で得られた結果を以下に示す．

- ・バリの有無にかかわらず，試験片の疲労寿命は加わる応力振幅が大きければ短くなり，応力振幅が小さいとき試験片の寿命は飛躍的に延びる．
- ・バリの有る試験片が繰返し数  $10^6$  回を満たす時間強度は，1500 MPa だった．
- ・バリを残した試験片のほうが全体的にバリを取去った試験片よりも先に破断した．

第 6 章は試験片の疲労破壊源を特定するため，破断面を観察した．その結果を以下に示す．

- ・疲労き裂の発生源は大きく分けて「介在物型」，「研削痕型」，そして「バリ型」という 3 種類のパターンがあることがわかった．
- ・介在物型の内，元素分析で解析できたのは 70% で，確かに介在物が存在している場合にもかかわらず元素分析装置で物質が特定できないものがあった．
- ・元素分析で解析できた 70% の介在物の内，半数が Al であった．
- ・バリ型の破断面はバリを残した試験片のみの特徴である．例外として，バリを取り去った試験片の中でもバリを取り残したと思われる箇所から破断していたものが 1 本だけ確認されたため，バリが疲労破壊に及ぼす影響は大きいと考えられる．



第 7 章はバリの有る試験片とバリの無い試験片を使用して，応力振幅を一定にして疲労試験を行った．さらにその試験結果を集計し，統計的に処理した．その結果を以下に示す．

- ・バリの有無を問わず，繰返し数は非常に広い範囲でばらついた．
- ・結果の標準偏差を求めたところ，バリ無しでは 490417，バリ有りでは 97560 となり，バリの有る試験片の繰返し数の方がより大きなばらつきを持つことがわかった．
- ・試験結果に対しワイブル分布でデータを処理した．その結果，短寿命：長寿命の比はバリ無しで 4：3，バリ有りでは 5：1 であり，バリの有る試験片は特に短寿命に集中することがわかった．
- ・バリを残した試験片の 50% がバリを起点として破壊していた．この事実から試験片のバリを取り除くことで試験片の寿命を長寿命側に引き上げることができると言える．
- ・疲労強度に及ぼす影響の大きさは  
研削痕 > 介在物 > バリ  
の順に大きくなることがわかった．
- ・長寿命側の試験片には，元素分析で特定できなかった介在物を起点として破壊しているものが集中していた．今後の課題として，正体不明の介在物が何であるのか解明することが挙げられる．

第 8 章は 3 次元 CAD で試験片のモデルを製作し ,有限要素法によって疲労試験中の試験片にどのような応力が発生するのか解析を行った . その結果を以下に示す .

- ・疲労試験中の本試験片における理論上の最大応力は , R 部の終点から 0.06mm 固定側に入り込んだ位置に発生することが判明した .
- ・試験片には理論上の応力集中部よりも先の地点に応力集中が発生していることから , 試験片の破断地点に存在している介在物や研削痕が理論上の応力集中の値よりも大きい応力集中を発生させている .
- ・試験片に加わる応力は 2000 MPa として解析を行った結果 , 実際に試験片に 2260 MPa の最大応力が作用することがわかった .
- ・段付部の R を本研究の半径 0.3mm から半径 0.1mm に小さくした試験片のモデルを作り , 全く同じ条件で解析を行った . その結果 , 段付部の R が小さくなくても , 最大応力は R 部の終点から固定側に入り込んだ位置に存在することが確認された .
- ・段付部の R が半径 0.3mm の場合は最大応力が 2260 MPa だったのに対して , 半径 0.1mm の場合の 2030 MPa であり , 段付部の R を小さくすると最大応力は理論上の値 2000 MPa に近づくことがわかった .
- ・段付部 R の半径が大きくなると試験片の最大応力が大きくなる理由は , 段付部 R の半径の変化がそのまま実際の固定端の幅の変化につながるからである .

## 参考文献

- 1) 山形精研株式会社ホームページ <http://www.yamagataseiken.co.jp/>
- 2) 日本機械学会：丸善，技術資料 機械・構造物の破損事例と解析技術，P ，1984
- 3) 藤木 榮：日刊工業新聞社，機械部品の疲労破壊・破断面の見方，P3，2002
- 4) 横堀 武夫：技報堂出版株式会社，材料強度学，P197～198，1955
- 5) 岡崎 佳奈：山形大学，2003 年度卒業論文「板状小型試験片の繰返し曲げ疲労強度特性評価」，P6～10，2004
- 6) 小山 信二／鈴木 幸三：森北出版株式会社，はじめての材料力学，P84～95，1997
- 7) 日本機械学会：前述 2)，P33
- 8) 日本機械学会：前述 2)，P33～36
- 9) 藤木 榮：前述 3)，P22～23
- 10) 藤木 榮：前述 3)，P25～27
- 11) 山家 和樹：山形大学，2004 年度卒業論文「板状小型試験片の繰返し曲げ疲労強度特性評価」，P26，2005
- 12) 岡崎 佳奈：前述 5)，P15
- 13) 西田 俊彦／安田 榮一：日刊工業新聞社，セラミックスの力学的特性評価，P41～52，1986
- 14) 山家 和樹：前述 10)，P20～21
- 15) 岡崎 佳奈：前述 5)，P14
- 16) 山家 和樹：前述 10)，P11～12

## 謝辞

小型試験片の疲労強度特性という研究を実施するに当たって、多くの方に支えられて卒業論文を提出するに至りました。

本研究を進めるに当たり数々の助言をいただき、必要な参考資料を用意していただいた来次浩之先生には心から御礼申し上げます。ありがとうございました。

本研究について試験片の製作と、研究を進める上で貴重な情報を提供していただいた山形精研株式会社の染谷工場長に深く感謝の意を示したいと思います。御協力ありがとうございました。

そして、昨年度まで小型試験片の疲労強度特性の研究をされ、本研究においても研究上の疑問に御返答をいただいた山形大学の菅野博士に心から感謝いたします。御助言ありがとうございました。

また、細矢正廣先生、庄司英明先生、工藤誠先生、奥山正先生、宮下智先生、吉田明弘先生のメカトロニクス科の諸先生方には、勤務時間外まで学校に残って御指導いただき心から感謝いたします。

そして、困難に直面した時には互いに助け合い、共に卒業研究を成功させた来次研究室の佐々良介君、佐原雅晶君、難波謙君、さらに、共に2年間を過ごしたメカトロニクス科の諸君、今までありがとうございました。

最後に、卒業研究発表を聞いていただき、御言葉をいただきました赤塚孝雄学校長に深く御礼を申し上げたいと思います。本当にありがとうございました。