

金属材料の破壊原因の調査方法

Steps to Find Factors Causing Ruptures of Metallic Materials

辻 栄治* 水越 朋之* 花立 有功*
Eiji Tsuji Tomoyuki Mizukosi Yukoo Hanatate

藤田 直也* 藤井 俊之* 足立 振一郎*
Naoya Fujita Tosiya Fujii Shinichirou Adachi

(1997年2月27日 受理)

キーワード：金属材料，破壊，破面解析，フラクトグラフィ，延性破壊，脆性破壊，疲労破壊，環境破壊，
応力腐食割れ，水素脆性

1. はじめに

鉄鋼を初めとして銅やアルミニウム合金などの金属材料は、工場の生産設備、機械装置類、自動車、電気製品など、あらゆる製品に利用されている。これらの製品は十分な強度計算に基づいて設計され、細心の注意をはらって製造されているはずで、故障したり壊れたりするかも知れないということを想定して作られているわけではない。しかし、短期間で故障する製品があることも事実である。破壊事故が起きれば原因調査が行われる訳であるが、時には責任回避のための調査と思われるものもある。破壊事故の調査目的は事故の再発防止にあるべきで、そのためには、関係者は事故品にかかわるすべての事実や現象を明らかにして、真の原因を探索せねばならない。破壊原因の調査は破断品の調査と同時に破壊力学による検証を併用することが理想的であるが、ここではこれまで手がけてきた事故調査に基づいて、破面解析を中心とした破断品の調査に絞って話を進める。

2. 調査方法

金属材料が何らかの原因で破壊したとき、まず、その材料がどのような割れ方（破壊様式）をしたかを調べることから始める。金属材料は割れ方により、それぞれ異なる特徴を破断面に残す。いわば破断面は破壊過程の記録といえる。この破断面の観察、調査は、フラクトグラフィまたは破面解析と呼ばれ、原因調査の有

力な手法となっている。破面解析により、破壊様式が、例えば疲労破壊ということがわかれば、何故そのような破壊が起こったのか、材質、形状、使用状況など色々な角度から検討し、主因と思われる要素を推定して対策を打ち出す。このような調査活動の手順は図1のようにまとめられるが、図1の流れに沿って具体的に説明する。

(1) 情報収集

破面解析が事故調査において中心的な役割を果たすことは言うまでもないが、実際には、図1に示したような手順で総合的調査を行い、結論として対策を打ち出す。図1の情報収集の欄で多くの内容を列挙したが、これらは、破面解析により明らかになった破壊様式が、どのような要因で引き起こされたのかを判断するのに必要となる。例えば、負荷がかかっていない銅パイプが応力腐食割れであるとわかったとき使用環境が重要となる。月に数万個単位で生産される機械部品の場合、事故率により必要な情報の内容が変わる。事故率が0.1%以上あるような場合は全製品に共通の欠陥が考えられ、将来、事故が多発する恐れもある。このような場合、使用材質や製造履歴が重要となる。しかし事故率が0.01%以下で、万に1つというような場合は事故品そのものに特有の原因があると思われる。過去の使用実績などを考慮すれば材質や製法などの基本的変更の必要はなく、また、すでに使用中の同一品の信頼性も揺るがないであろう。このようにして、破壊様式によって必要な情報の内容も異なるが、できるだけ多くの情報を集めておくことが肝要で、一見、不要と思える情報でも後の原因推定や対策の段階で大変役に立つことがある。

(2) 破断部の調査

* 材料技術部 金属材料グループ

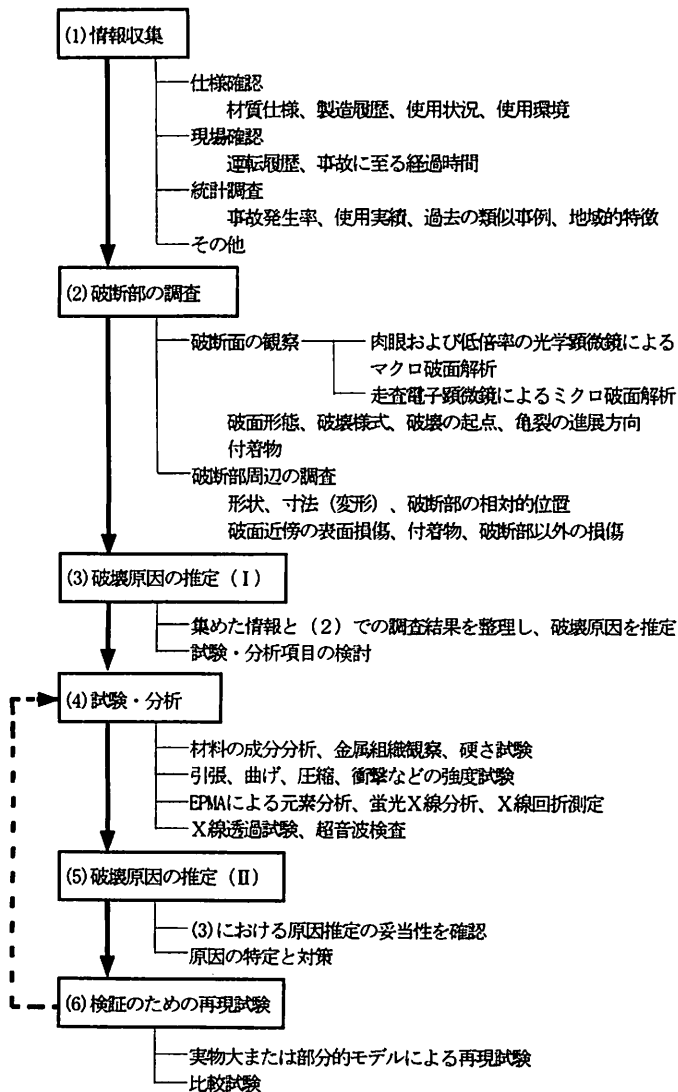


図1 破壊事故調査活動の流れ

(2)-(A) 破面解析

破断面の観察による破面解析（フラクトグラフィ）は事故調査の第1歩で最も重要な作業である。これにより金属材料が、どのような割れ方をしたかという破壊様式、どの部分から割れが開始したかという破壊の開始部位、そして、亀裂の進展方向などがわかる。破面解析は2通りに大別され、肉眼、ルーペ、低倍率の光学顕微鏡（実体顕微鏡）によるマクロ破面解析と走査電子顕微鏡によるミクロ破面解析があり、通常両者を併用して破面解析を行う。金属材料の破壊様式は、塑性変形を起こした後に破壊する延性破壊、塑性変形をほとんど伴わずに破壊する脆性破壊、繰り返し応力により徐々に亀裂が進展する疲労破壊、そして、腐食環境が破壊に重要な役割を果たす環境破壊

の4種類に大別される。表1に、工業用によく使用されている金属材料について、各破壊様式とマクロ的、ミクロ的特徴を列記する。そして、実際に手掛けた事例の破面写真に基づいて各破壊様式を説明する。

(a) 延性破壊

延性破壊とは、端的にいうと、破断に至るまでに大きな変形を伴う破壊であり、金属の特徴の1つともいえるもので、ほとんどの金属材料にみられる。

マクロ的特徴としては、破断面は鈍い灰白色（銅合金では素地に応じた色）を呈し、図2に示すように、部材の外周部では鍛造品のバリのように破面から立上がったシャーリップと呼ばれる部分が現れる。シャーリップはせん断破壊であり、部材の外周部で変形が拘束されない状態で発生する。疲労破壊の最終破断部や全面的に脆性破壊であってもシャーリップが現れることがあるが、この部分は延性破壊である。

ミクロ的特徴は、図3、4に示すように、ディンプルと呼ばれる凹凸の連続模様と、図5に示すようなすべり面破壊によって生じるうねった縞模様であるが、通常、ディンプルが観察される場合が多い。ディンプルには均一引張りにより生じる

表1 破壊様式と破面の特徴

破壊様式	破面の特徴	
	肉眼又は実体顕微鏡によるマクロ観察	走査電子顕微鏡によるミクロ観察
延性（塑性）破壊	鈍い灰白色 シャーリップ：せん断破壊 最終破断部	等軸ディンプル：引張り破壊 伸長ディンプル：せん断破壊 うねった縞模様：すべり面破壊
脆性破壊	キラキラした銀白色の反射 シェフロンパターン（山形模様）： 粒内型急速破壊、亀裂の進展方向 放射状模様：亀裂の進展方向	擬へき開破面 リバーパターン 粒状破面 複雑破面
疲労破壊	ビーチマーク（貝殻状模様） ラチェットマーク： 複数の応力集中ヶ所 フィッシュアイ：破壊の起点 放射状模様：亀裂の進展方向	ストライエーション： 応力サイクルと対応 ストライエーション状模様： 応力サイクルと対応しない 二次クラック ラブマーク又は無特徴破面
環境破壊	水素脆性	粒状破面 ヘークアーマ
	応力腐食割れ	粒状破面 羽毛状模様
	高温破壊	粒状破面 ディンプル 引け巣

等軸ディンプルとせん断や引き裂きにより生じる伸長型ディンプルがある。伸長型ディンプルでは伸びの方向から亀裂の進展方向がわかる。一般に、ディンプルの凹凸の大きさや深さは材料の変形量によって変化する。縞模様には細かいリップと呼ばれる模様も現れることがあるが、これらは後に述べる疲労破壊のストライエーション模様とよく似ており混同しないように注意する必要がある。

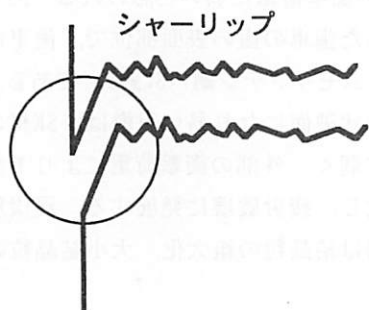


図2 シャールリップの模式図

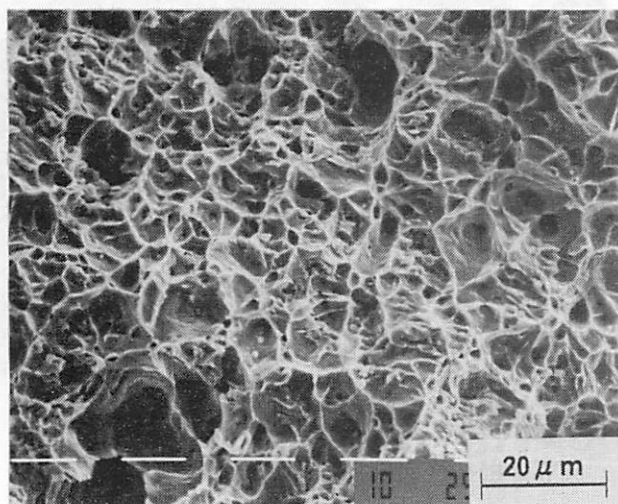


図3 等軸ディンプル (SS400)

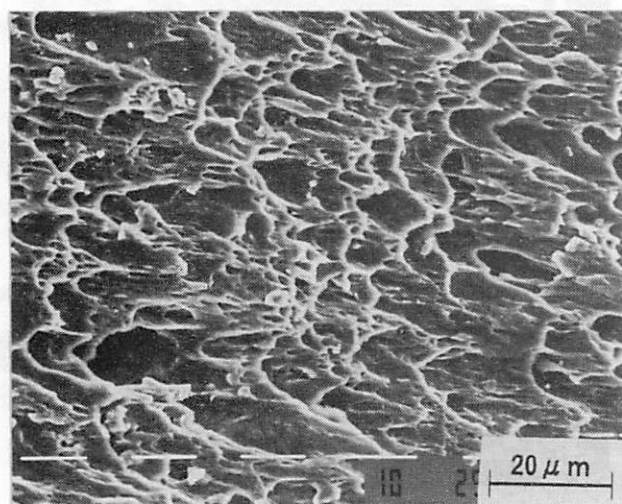


図4 伸長型ディンプル (SS400)

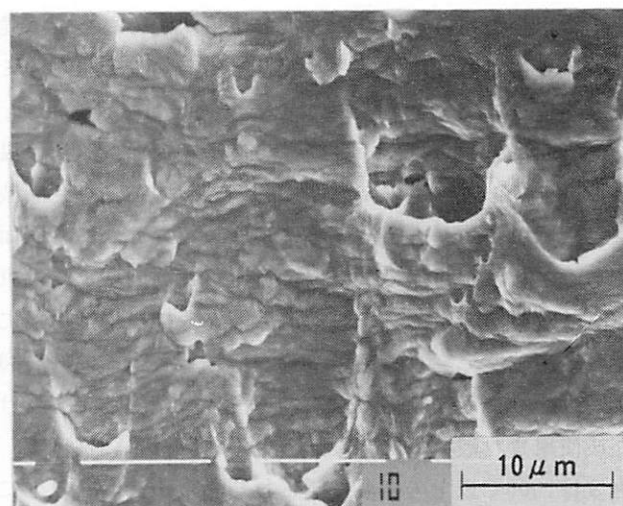


図5 すべり面破壊による縞模様

(b) 脆性破壊

脆性破壊とは、ほとんど塑性変形を伴わず、かなり速い速度で亀裂が伝播する破壊のことで、亀裂の進行中に破面の周辺に塑性変形を生じることなく、分離によって破断が進行する。感覚的には、ガラスやセラミックスの破壊と同様である。脆性破壊は焼き入れされた炭素工具鋼、ある程度大型の調質鋼、マイナス数十度の低温にさらされた一般構造用鋼、ある種の鋳鉄などにみられる。さらに、通常は延性を示す鋼材でも、大型材になったり、ボイラーの爆発のように破断速度が異常に大きい場合、脆性破壊となる。また、冷間で大きな加工を受けたSS材や、結晶粒が異常に粗大化した耐熱鋼においても脆性破壊する場合がある。

脆性破面のマクロの特徴としては、破面全体が銀白色で、刃物や鋳鉄の場合を除いて、破面を動かすとキラキラ光り、微小な反射面のあることがわかる。特徴的模様としては、図6で示すようなシェフロンパターン（山形模様、山笠模様）や後述の図15に類似した放射状模様が見られ、亀裂の進展方向がわかる。しかし、必ずしもこのような模様が現れるとは限らず、無特徴な破面を呈する場合も多くある。

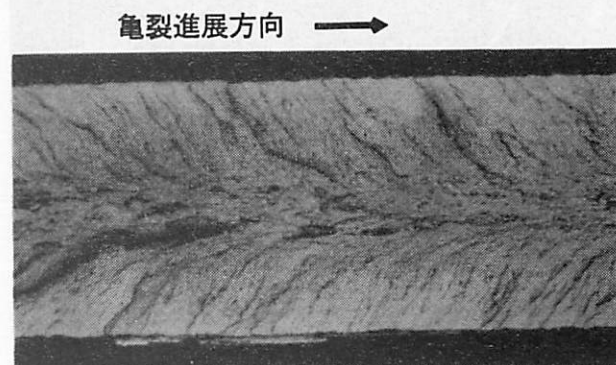


図6 シェフロンパターン⁽¹⁾

工業用金属材料のうち、通常の使用状況のもとで、脆性破壊を生じるのは大半が鉄鋼材料であり、それらのミクロの特徴は擬へき開破面とリバーパターン、粒状破面、複雑破面に分けられる。金属は、ある特定温度（遷移温度）以下では、一定の結晶面において破壊し、へき開破壊と呼ばれるが、へき開破壊に類似しているがへき開面であるかどうか明瞭でない場合、擬へき開破壊と呼ばれる。鉄鋼材料の中では一般構造用鋼材や機械構造用鋼に擬へき開破壊で割れる例が多くみられるが、その例を図7、8、9に示す。図7は冷間で大きな塑性加工を受けた後使用され破壊した一般構造用圧延鋼材（SS材）で、図8は1000℃以上の高温に晒され結晶粒が $100\mu\text{m}$ 以上に粗大化したFe-Cr-Al系合金である。両破面共に岩を割ったような比較的単純な状態で、破面上には明瞭なりバーパターンが観察される。リバーパターンとは小さな流れが合流して大きな流れになる川の様子と似ていることが

らつけられた名称で破面上でのミクロな亀裂伝播方向がわかる。図9は調質された機械構造用炭素鋼（S45C）の大型材の破面で、前2者に比べて凹凸の多い微細な破面となっており、ディンプルが混在する場合が多く、わずかの塑性変形を伴っていると思われる。図10、11に粒状破面の例を示す。図10は、工具鋼（SK5）を860℃より水焼き入れた後、強制破壊した破面で、ほぼ破面全体が粒状となっている。粒界割れとなるような熱処理は、製品の形状が複雑であれば、焼き割れを生じる危険性があり、また使用中の衝撃荷重に弱いと思われる。図11は短期間で疲労破壊した歯車の歯の表面部位で、歯車は浸炭処理されたクロームモリブデン鋼（SCM材）である。浸炭層がこのような粒状破面になり易い組織は、SK材の場合と同様、衝撃力に弱く、外部の衝撃荷重により予想以上に簡単に亀裂を生じ、疲労破壊に発展する。浸炭層が粒状破面となる原因は結晶粒の粗大化、大小結晶粒の混在、粒

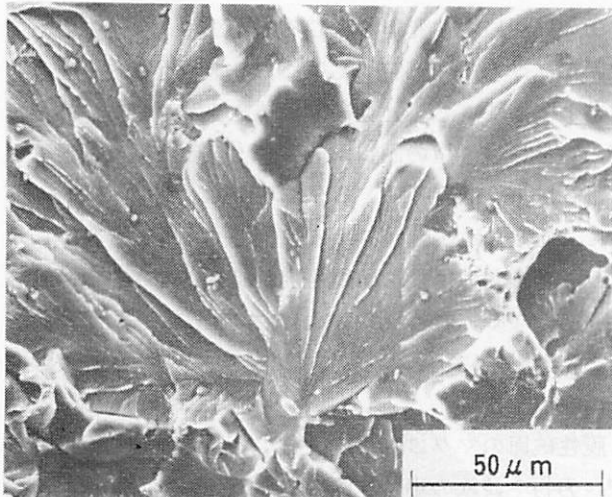


図7 擬へき開破面、冷間加工されたSS400の脆性破面

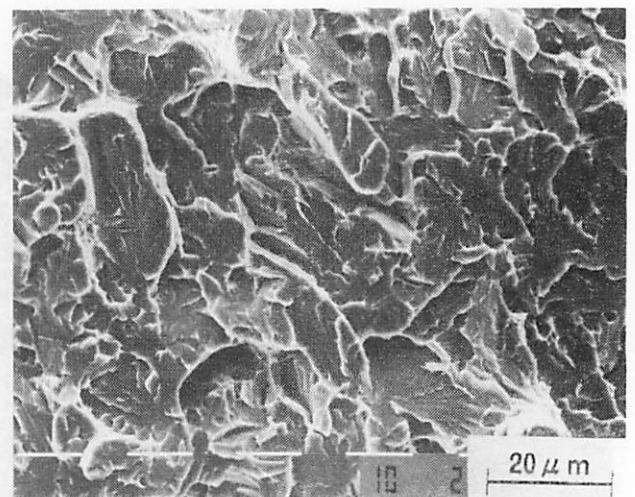


図9 擬へき開破面、調質されたS45Cの大型材

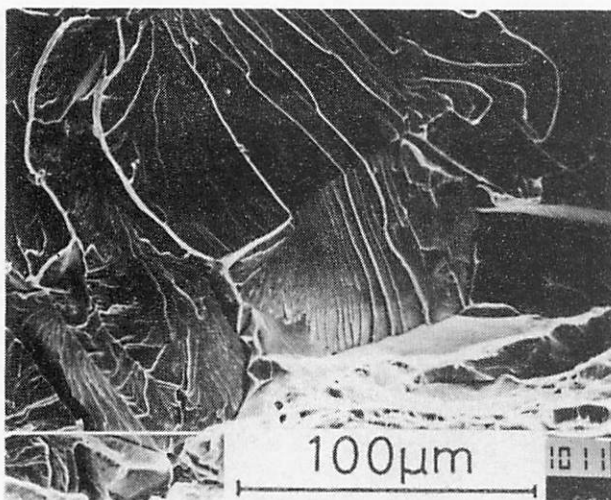


図8 擬へき開破面、結晶粒が粗大化したFe-Cr-Al合金の脆性破面（ $100\mu\text{m}$ ）

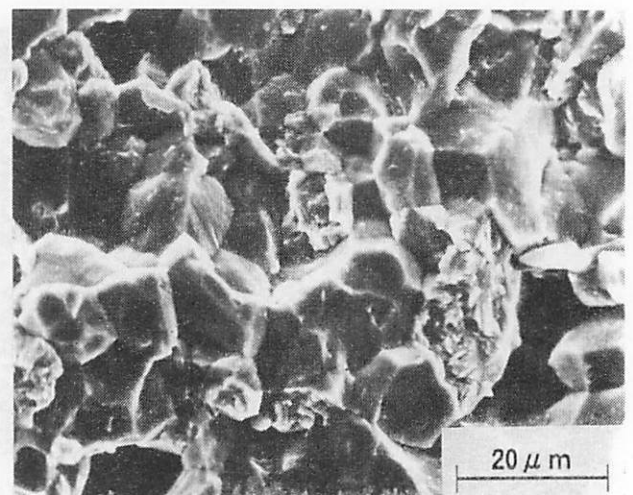


図10 粒状破面、水焼入れされたSK5の脆性破面

界酸化が考えられる。脆性破壊ではあるが、前2者と異なり特徴的な模様のない複雑な破面を図12に示す。図12は、工具鋼(SK5)を860℃より油焼き入れした後、強制破壊した破面で、図10の水焼き入れの場合の破面と全く異なった凹凸の激しい状態で表現し難い破面である。

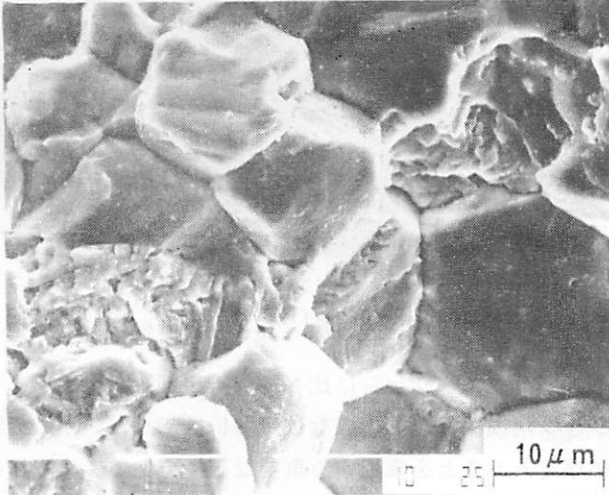


図11 粒状破面、SCM材の浸炭部

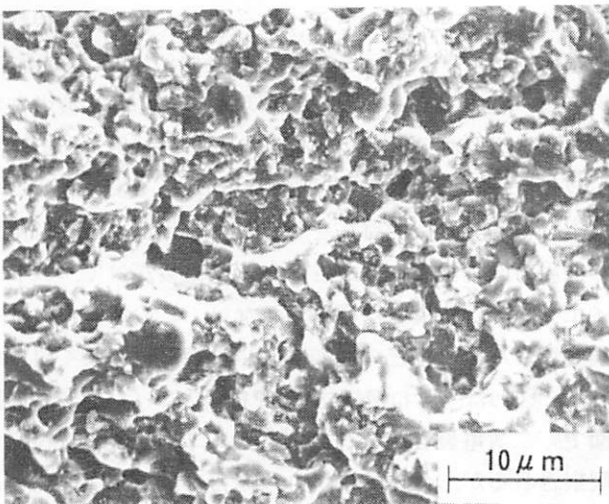


図12 複雑破面 油焼入れされたSK5の脆性破面

(c) 疲労破壊

繰り返し荷重を受けて徐々に亀裂が進展する破壊を疲労破壊と呼ぶが、機械構造物の破壊の7～8割は疲労破壊であるといわれている⁽²⁾。疲労破壊した部材は、外観的に伸びやくびれなどの変形がなく脆性的であるが、ミクロ的には著しい塑性変形を伴っている。破壊は、材料表面で塑性すべりにより、引張り応力と45°方向に発生した亀裂がその方向に進展する第1段階(1結晶程度)、これに続いて引張り応力に垂直に進展する第2段階、そして最終的な機械的破断の第3段階に分けられる。この内、主要部分を占めるのは第2段階でマクロ的、ミクロの特徴が破面に現れる。

目視では、部材がロッド状の場合、丁度、大根を2つに輪切りにしたような状態で、破面は比較的平滑な場合が多い。マクロの特徴的模様としては、図13、14、15で示すような、ビーチマーク(又は貝殻模様)、ラチェットマーク、放射状模様が多く観察され、破壊の開始部位や亀裂の進展方向がわかる。ビーチマークは繰り返し荷重の大きさが、時により異なったり、不規則であったりする場合に現れやすい。図13は、多数の同心円からなる典型的なビーチマークで、起点は円の中心付近、亀裂の進展は円周と垂直方向である。ラチェットマークは応力集中部が多数有り、それぞれを起点として亀裂が発生し、結合する際に生じた段である。図14では、破面外周部のいたる所から、中心に向かう長さ2～3mmの線状に見える模様である。図15のような放射状模様は、肉眼では判別しにくい、低倍率の実体顕微鏡で十分観察できる。放射状模様は応力が高く、亀裂進展速度が大きい場合に現れる。これらの特徴以外に、破壊の起点を示すフィッシュアイと呼ばれる模様がある。破壊の起点は通常材料

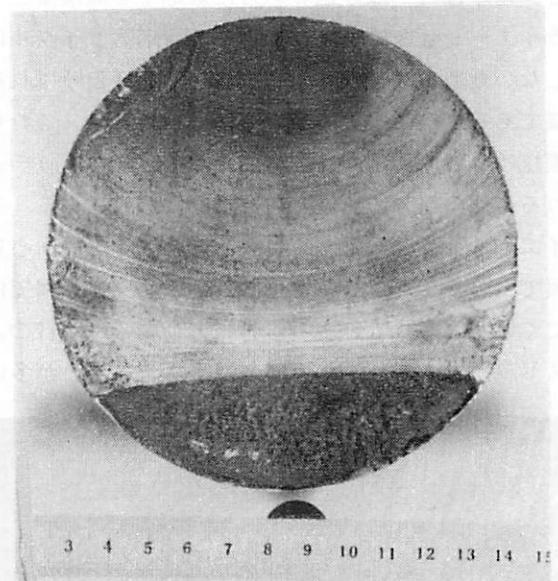


図13 ビーチマーク、調質されたマルテンサイト系ステンレス鋼のピストンロッド

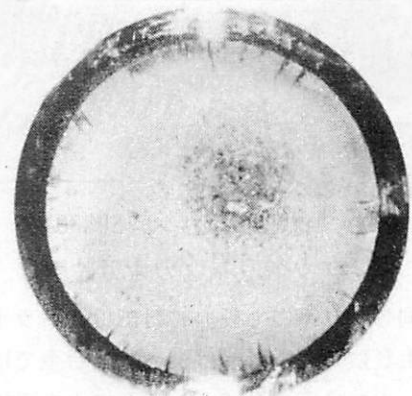


図14 ラチェットマーク、SUS 364製シャフト

表面にあるが、高硬度材や表面硬化材などでは、表面下の介在物を起点とすることがあり、破面の部材表面近傍で円形の模様として観察される。



図15 放射状模様、SUP材コイルパネの疲労破壊

ミクロの特徴模様の最も重要なものは、ストライエーションと呼ばれ、繰り返し応力に対応する縞模様と、ストライエーションに酷似しているが、応力サイクルに対応しないため、ストライエーション状模様と呼ばれる縞模様である。それぞれの例を図16、17に示す。これらの縞模様は亀裂進展方向に沿ったプラトー又はパッチと呼ばれる帯状の部分に進展方向に垂直に形成される。ストライエーションは、アルミ合金や銅合金などの面心立方金属で生じやすく、鉄系合金などの体心立方金属では生じにくいと言われている。体心立方金属では図17のようなストライエーション状模様が観察されることが多い。

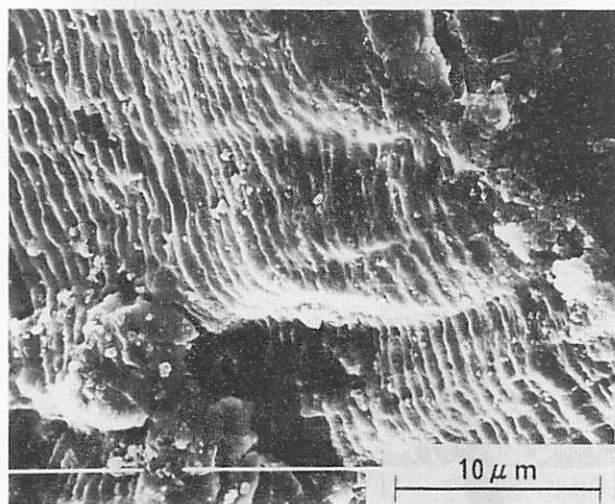


図16 ストライエーション、SUS304製
ガasketリングの疲労破壊

そして、同じ結晶系でも硬い材料ではストライエーションはより生じにくく、軸受け鋼や超硬合金では観察されていない。1つの応力サイクルごとに1つの縞が形成され、その間隔を測定すれば、亀裂の進展速度が計算でき

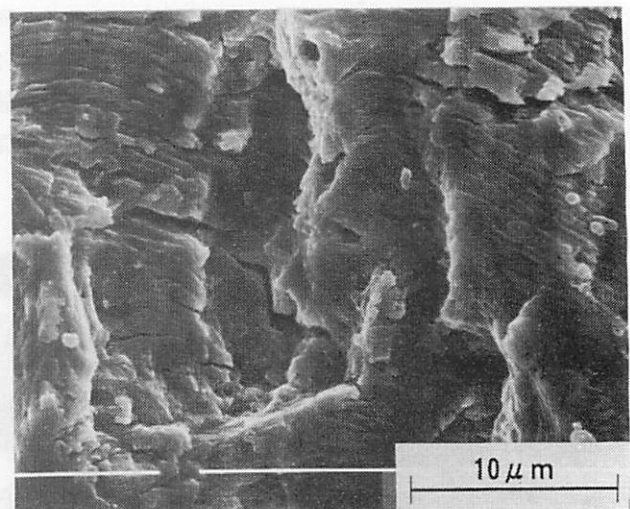


図17 ストライエーション状模様、S45C
材の疲労破壊

るストライエーションに比べて、不規則なストライエーション状模様は、この様な数値解析はできないが、疲労破壊であることを確認する重要な証拠である。実際の事故調査においては、マクロの特徴や使用状況から判断して、疲労破壊であると推定できる場合でも、破面からストライエーションやストライエーション状模様が観察できない例が多くある。それらの例を図18、19、20に示す。図18は、明瞭なビーチマークが現れ、明らかに疲労破壊であると思われる図13の破面のミクロの特徴である。ストライエーション状模様は図17に見られるような、二次亀裂（もしくは裂け目）をししばし伴うが、図18は亀裂の進展方向に垂直に形成された二次亀裂だけで、ストライエーション状模様は観察されない。この様な特徴は、調質鋼やバネ材などの比較的硬い鉄鋼材料でよく観察される。図19は、ばね鋼鋼材（SUP材）のコイル巻パネの破面で、二次亀裂とかすかなストライエーション状模様が観察されるが、全体的には丸みを帯びた無特徴破面であ

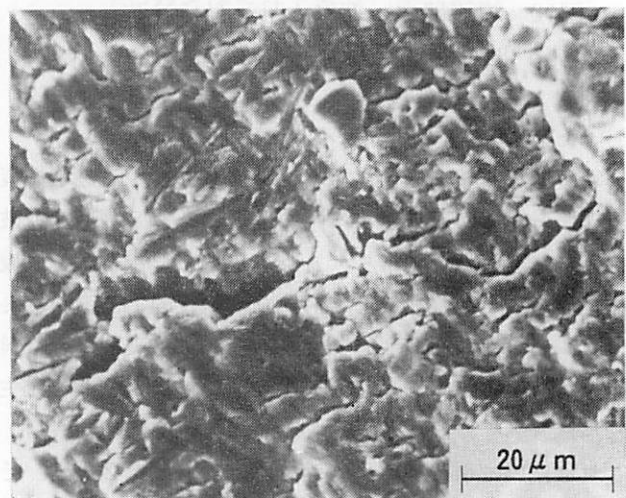


図18 二次亀裂、調質されたマルテンサイト系
ステンレス鋼の疲労破壊

る。図20は図16のような明瞭なストライエーションが観察された破面の他の部分である。場所的には、亀裂進展の比較的初期の破面で、全体的に何らかの特徴的模様が見られない。これは、繰り返し応力により、相対する破面が繰り返し押しつけられ、こすれ合って、模様を消してしまったためと思われる。時にはこのように、相対する破面がこすれ合う場合、ラブマークと呼ばれるすり傷のような条痕が観察されることがある。このような無特徴な破面は、疲労破壊特有の模様ではないが、繰り返し応力を受けたことを示す証拠であり、破面解析をする上で有力な情報の1つである。

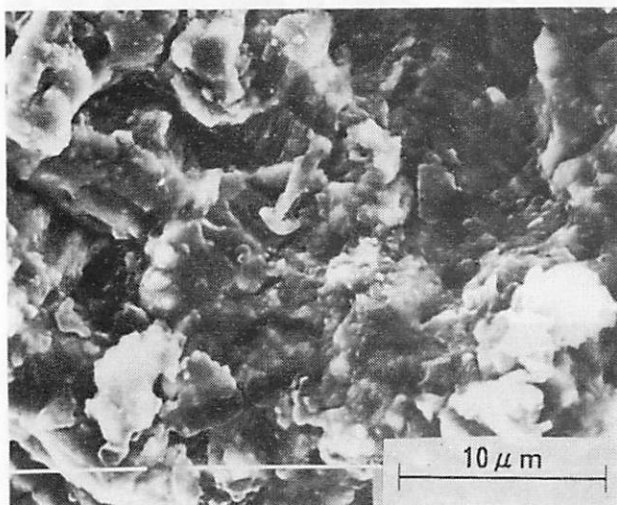


図19 無特徴模様、SUP材コイルパネの疲労破壊

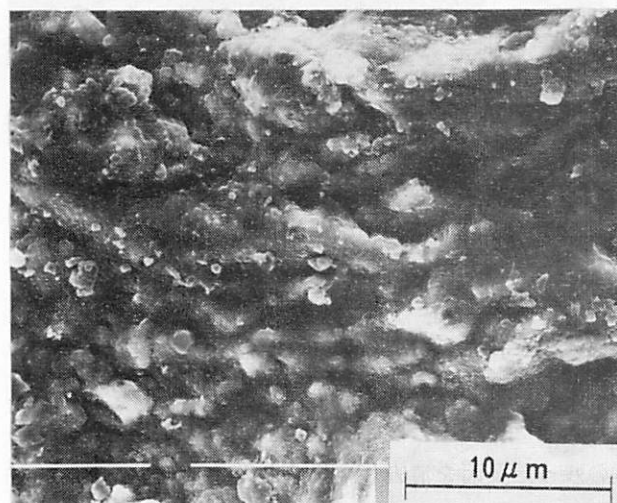


図20 無特徴模様、SUS304製ガスケットリングの疲労破壊

(d) 環境破壊⁽³⁾

一般に、腐食環境中では、表面や亀裂の先端における腐食、酸化などにより破壊強度が低下するが、このように環境に促進されるような破壊を環境破壊と呼ぶ。環境破壊は水素脆性と応力腐食割れに分類されるのが普通であ

るが、広義の意味では、高温雰囲気も環境の1つと考えられるので、表1では、高温破壊も環境破壊の1つに分類した。しかし、高温破壊については適当な事例を入手できなかったため、ここでは、水素脆性と応力腐食割れについて説明する。高温破壊については他の文献を参照されたい。水素脆性が実用上重要な問題となっている金属材料は鉄鋼材料であり、特に断らない限り、水素脆性といえば鉄鋼材料に関するものであると思って差し支えないであろう。水素脆性は材料中の水素の影響により脆化する現象で、水素は溶接、メッキ、水素雰囲気中での熱処理など部材の製造工程で進入する場合と、使用環境例えば腐食反応や電気防食により進入する場合がある。そして、水素脆性に対する感受性は、一般に、材料の強度や硬さが大きい程大きくなるといわれている。

応力腐食割れは材質、外部応力または内部歪み、腐食環境の三つの要因が同時に満たされたときに生じる。応力腐食割れを生じる材料としてはオーステナイト系ステンレス鋼、純銅および銅合金がよく知られているが、その他各種鉄鋼材料、アルミニウム合金などほとんどの工業用金属材料で生じる。

マクロの特徴としては、水素脆化割れ、応力腐食割れ共に脆性的破壊であるため、破断部周辺で伸びやくびれなどの変形は生じない。破面は一般に銀白色を呈し、また、キラキラした微小な反射面が認められる。破面以外に、よく知られている特徴的現象としては時間依存性があり、遅れ破壊を生じることである。特に、鋼の水素脆性は特有の時間依存性があり、このため、鋼の水素脆性にたいして別名「遅れ破壊」と呼ばれることが多い。水素脆化割れの破面形成、成長機構は、他の脆性破壊と異なり、特に引張強さが 120kg/mm^2 を超えるような鋼では、破面にその特徴が顕著に現れる。通常、脆性破壊した鋼の破面は、全面ほぼ同じ模様が形成され、観察部位で大きく変化することはない。しかし、高強度鋼の水素脆化割れは、破壊の進行（応力拡大レベルの増大）とともに粒界割れ→擬へき開→ディンプルと変化する。特に、この場合の粒状破面は、先に述べた脆性破壊（図10、図11）や次に述べる応力腐食割れの粒状破面（図22）に比べて特徴的模様がみられる。図21にタッピングネジの浸炭部の水素脆化割れ破面を示す。この粒状破面には、細い線状のヘアライン（テアライン）と呼ばれる模様やディンプルが観察され、塑性変形を伴ったことを示しているが、他の粒状破面にはそれらが観察されない。応力腐食割れによる事故発生率の最も高い実用金属材料はオーステナイト系ステンレスであり、破壊は粒界型と粒内型がある。それぞれの破面を図22、23に示す。粒界型は、溶接や使用環境温度による部材の鋭敏化が原因で発生するが、単なる粒界腐食と異なり、部材に引張り応力が作用していないと

生じない。図23の粒内型破面は、羽毛状模様または流れ模様と呼ばれており、特定の結晶面に沿う腐食溶解により生じると考えられている。大きな塑性加工を受けた部材によく発生する。図24は、40%Zn黄銅の粒界型応力腐食割れ破面で、やはり塑性加工を受けた部材で発生しやすい。

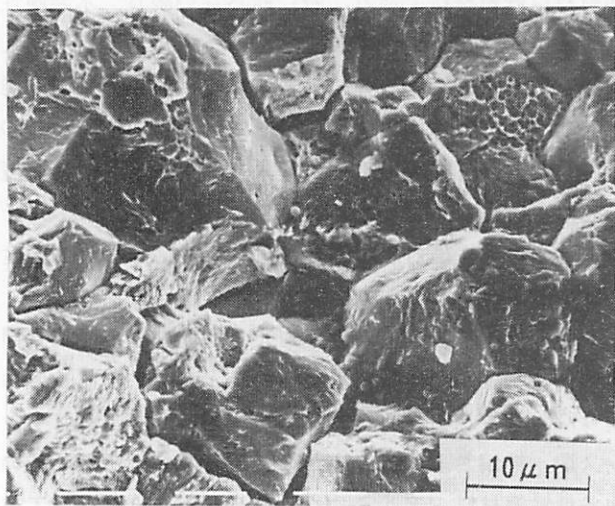


図21 粒状破面、ヘアーラインとディンプルが混在、ネジ浸炭部の水素脆化割れ

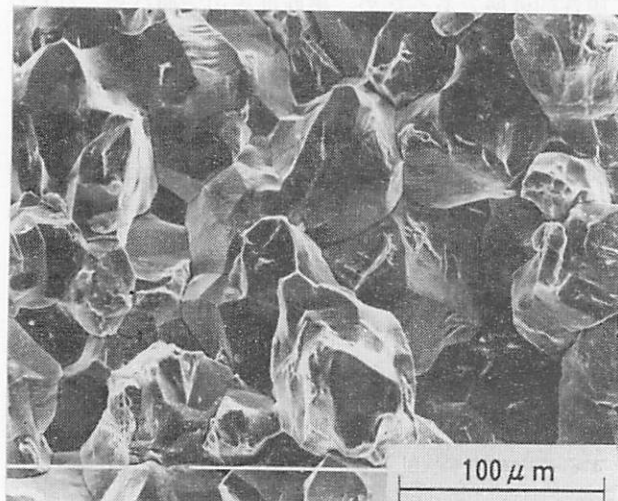


図22 粒状破面、SUS304材溶接部の粒界型応力腐食割れ

(2)-(B) 破断部周辺の調査

本来、破壊するはずのないものが破壊するのであるから、破断部周辺の部材には、破壊する前と比べて、何らかの変化や、破壊に関与したと思われる要因の痕跡が残っている場合が多くあり、これらは、原因の推定の際に有力な情報となりうる。破断部周辺の調査対象としては、段付きシャフトのRの取り方、変形に伴う寸法変化、表面の摩耗痕、亀裂の有無、腐食性付着物、腐食孔などがあり、原因の絞り込みに大変役立つ。時には、破断部とある程度距離があり、直接関係がないような部分、例え

ば軸受け部の摩耗状況、フレームの寸法精度などの調査が重要な手がかりとなる場合もある。回転軸が軸受けのずれにより疲労破壊したような場合、破断部をいくら調べても欠陥は見つからない。

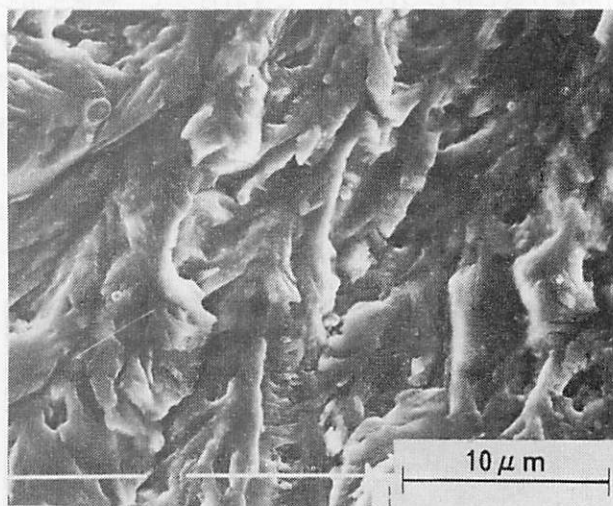


図23 羽毛状模様、SUS304の粒内型応力腐食割れ

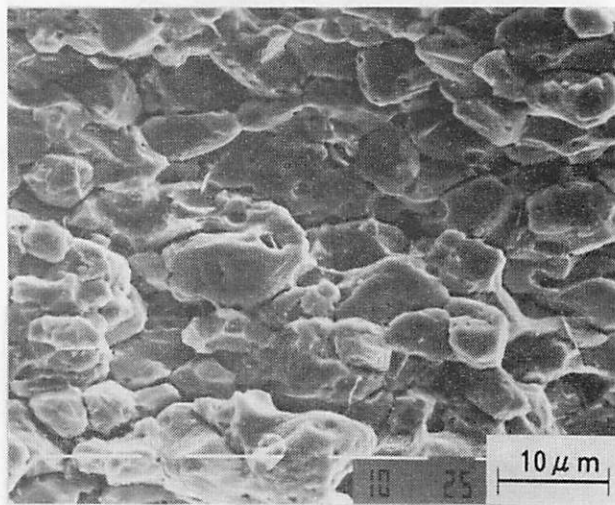


図24 粒状破面、40%Zn黄銅の応力腐食割れ

(3) 破壊原因の推定 (1)

前述の(1)と(2)の結果をつき合わせて破壊原因として最も可能性の高い要因を推定する訳であるが、まだこの時点では2、3の疑わしい要因が残る。そこで、これらの残った要因を消去し、推定した主要因の妥当性を確認するため、図1(4)の欄で示した試験、分析を行なう。必要な試験、分析は事故の種類、言い換えれば、破壊様式によって、その都度判断し、さらに必要があれば、事故品と類似した材料の破壊実験に関する文献を調査し、推定の参考にする。

(4) 試験・分析

事故調査でよく行われる試験・分析の種類を図1(4)の欄に列挙する。ほとんどは材質検査に関するものであるが、EPM A (X線マイクロアナライザー) や蛍光X線

は、応力腐食割れの場合、付着物の分析に大きな威力を発揮する。図1に記述していないが、事故が起こる前に実施される検査として部材表面の応力測定がある。事故が起こったときの被害が甚大であるような大型構造物や機械、例えば鉄橋や大型船舶に対して応力が集中すると思われる部分に歪ゲージを貼り付けて、一定期間表面応力の連続測定が行われる。また、重要な化学プラントでは全ての溶接箇所の残留応力が測定されているようである。

(5) 破壊原因の推定 (Ⅱ)

この段階で初めて破壊原因の推定 (Ⅰ) で推定した破壊要因がより確実性の高いものになり、これに基づいて対策を打ち出すことができる。通常は、これで調査終了ということになるが、破壊原因を完全に解明したことにはならない。なぜなら、主要因が決まれば、それを除去することにより、事故は起こらなくなる筈で、実物大または部分的なモデルによる再現試験で破壊しないことを確認する必要があるからである。この再現試験で破壊した場合、破壊原因の推定 (Ⅰ) または (Ⅱ) で下した破壊要因に対する判断が誤りであったことになり、別の要因を捜さねばならない。そのためには、図1の破線で示したように、別の試験・分析を行い、破壊原因の推定 (Ⅱ) に到ることになる。事故の大きさにもよるが、この再現試験は、大変な経費と時間を必要とするため、実際には行われない場合が多いようである。ただし、簡単な比較試験で検証できる場合は、それを行うに越したことはないであろう。一例を挙げると、タッピングネジの

破壊原因が電気メッキ後のベーキング不足による水素脆性であると判断したとき、所定のベーキング処理を施せば脆化しなくなるはずで、このようなケースでは、ハンマーで強制的に破壊し、破面を比較観察すれば直ちにその判断が正しいかどうかわかる。

3. おわりに

最初に少し触れたように、当初から事故を想定して機械を作ったり、使用したりする人はいないであろう。しかし、時には事故が起こるのも事実で、一旦、事故が起これば、これまで述べてきたような面倒な調査をしなければならない。しかし、ものは考えようで、事故品を1つの貴重な実験試料と考え、調査結果や事故にかかわる色々な事実や現象を整理し、蓄積すれば、再発防止だけでなく、機械や装置の改良や開発に大変役立つことと思われる。

参考文献

- 1) 北川英夫, 小寺沢良一 共編, フラクトグラフィ, 培風館, 1977, p 65
- 2) 辻, 花立, 藤田, 藤井, 水越, 大阪府立産業技術総合研究所報告, 5, 81(1996)
- 3) 小寺沢良一, フラクトグラフィとその応用, 日刊工業新聞社, 1981, p 155