

# タービンの予防保全技術

## Preventive Maintenance Technology for Turbine Components

経年火力設備の増加と、電力需要の変化による運用の過酷化が進んでいる現状で、これら設備の長寿命化と保守管理のために、予防保全技術が重要な課題となっている。日立製作所はその一つとして、余寿命診断技術の確立と、そのシステム化を進めてきた。

余寿命診断技術については、すでに、電気抵抗法、硬さ測定法および微視き裂法を実機に適用し、機器の安全性と信頼性に寄与している。日立製作所では、さらに研究を進め、ここに、組織観察法、エッチ法および微小パンチ法を開発した。これらにより、すべての損傷や劣化度が検出可能となった。さらに、多数の機器の余寿命診断を迅速かつ精度よく行うために、タービンの余寿命診断システムを開発した。

丹 敏美\* *Toshimi Tan*  
 祐川正之\*\* *Masayuki Sukekawa*  
 桜井茂雄\*\*\* *Shigeo Sakurai*  
 川崎喜也\*\*\*\* *Yoshiya Kawasaki*

### 1 緒 言

近年、火力設備では、累積運転時間が10万時間を超えるタービン設備が60%以上に達するなど、経年設備が急速に増加してきている。一方、電力需要の変化、燃料の多様化などの事情により、DSS(毎日起動・停止)化、WSS(毎週起動・停止)化など運用の過酷化が一段と進んでいる。このため、経年タービンに対し、計画的な予防保全による耐力の維持向上および寿命延伸化が、ますます重要となっている。予防保全の強化および取り組みを図1に示す。主な対応は余寿命診断、耐力向上技術<sup>1)</sup>、コンピュータによる予防保全の管理などである。余寿命診断は、対象機器の寿命が定量的に把握できることから、計画的な部品取り替えなどによってプラント全体の長寿命化につながる一つの強力な手段である。本稿では、非破壊検査による余寿命診断技術として開発した組織観察法、脆化評価法およびシステム化について述べる。

### 2 経年劣化メカニズム

蒸気タービンのように、高温(400℃以上)で使用される機器では、長時間使用するとさまざまな損傷を受け、材料は経年劣化していく。クリープ損傷とは、応力が作用すると時間とともに変形を生じ、キャビティ(空孔)が発生してこれが成長して破断に至る現象であり、疲労損傷とは、繰返し応力(熱応力など)を受けて微視き裂が発生し、これが成長して破断に至る現象である。また脆化とは、不純物(リンなど)が粒界に偏析して脆くなる現象で、温度依存形の劣化である。経年劣化

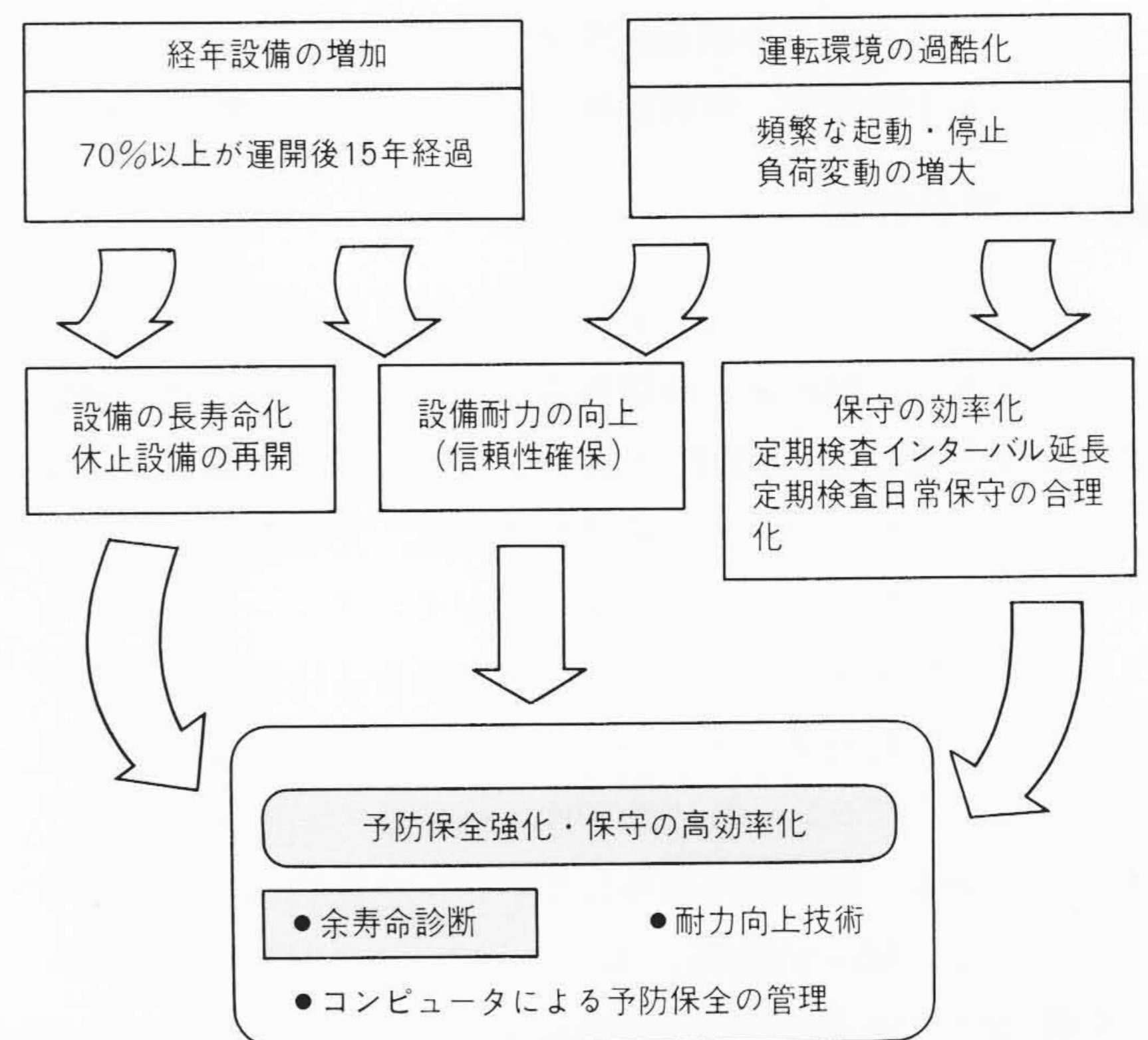
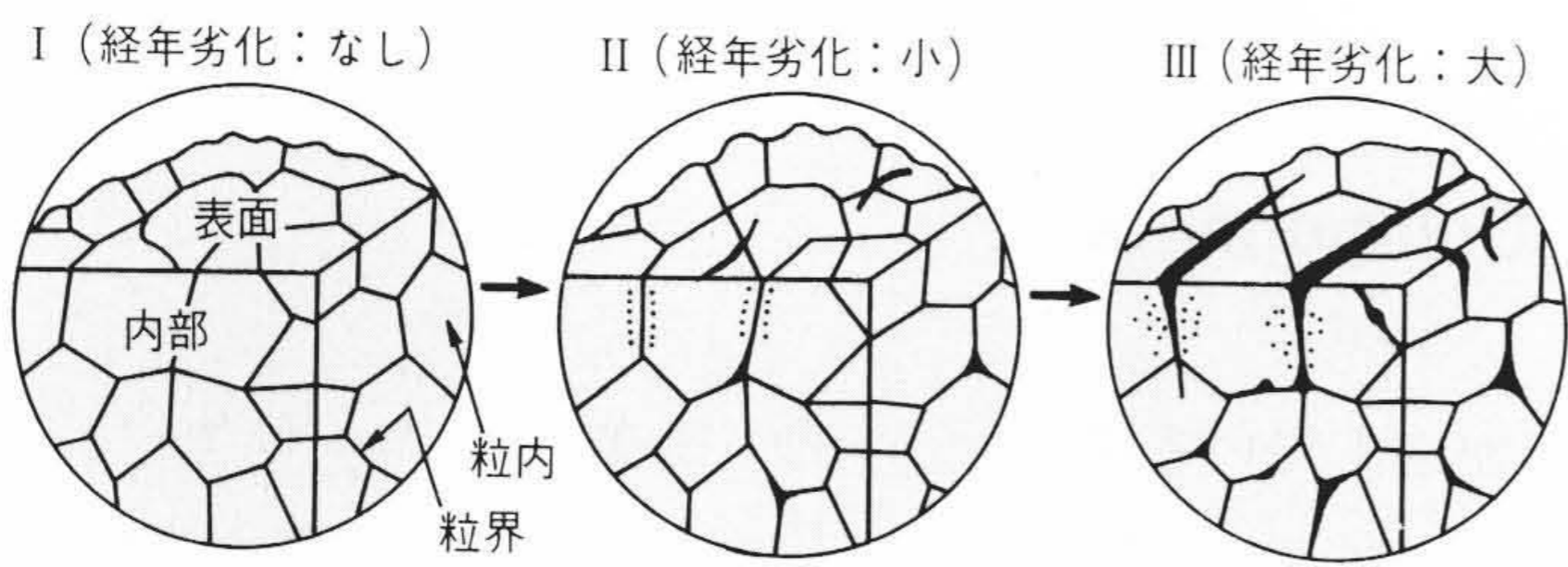


図1 予防保全強化・保守の高効率化の必要性 経年設備の増加や運転環境の過酷化により、予防保全強化・保守の高効率化が必要である。

に伴い、材料の組織が変化していく状態の模式図を図2に示す。クリープ損傷では、部材内部の結晶粒界に炭化物が凝集・粗大化するとともに、キャビティが発生・成長していく。疲労損傷では、部材表面の結晶粒内に微視き裂が発生し、進展していく。一方、脆化では部材内部の結晶粒界に、不純物が

\* 日立製作所 日立工場 \*\* 日立製作所 日立研究所 \*\*\* 日立製作所 機械研究所 工学博士 \*\*\*\* 株式会社日立エンジニアリングサービス





損傷	部材	現象要素	I	II	III
クリープ	内部(粒界)	炭化物	散在	凝集	粗大
		キャビティ(空孔)	なし	発生	成長
疲労	表面(粒内)	微視き裂	なし	発生	進展
脆化	内部(粒界)	不純物(リン)	散在	偏析(小)	偏析(大)

図2 経年劣化メカニズム 高温で長時間使用される材料は、組織がいろいろ変化していく。

時間とともに偏析していく。これらの経年劣化メカニズムを解明することは、余寿命診断技術を開発するうえで重要なことである。経年劣化に伴う材料の物理変化や組織変化に着目し、それらの変化量と損傷度や劣化度との関係を定量的に評価し診断する技術が、非破壊検査による余寿命診断法である。

### 3 余寿命診断

余寿命診断の方法には、非破壊検査法、解析法および破壊検査法がある。解析法と破壊検査法(サンプル採取)は、評価に長時間を要し、特に後者では、サンプル採取が困難である場合が多い。これに対して非破壊検査法は、比較的短時間に多くの個所が診断でき、しかも定期的なモニタリングもできることから、非破壊検査による余寿命診断を主体に進めてきている。火力発電用蒸気タービン本体の余寿命診断は昭和59年から実施し、プラント数で約50件、機器数で約250台に達し、機器の安全性・信頼性に寄与している。主要機器は、高・中圧ロータ(Cr-Mo-V鍛鋼)、高・中圧車室・主要弁(Cr-Mo-V鋳鋼)などである。非破壊検査による余寿命診断技術の例を表1に示す。各損傷に対する評価方法について多数の研究を進めてきたので、その概要を以下に述べる。

表1 非破壊検査による余寿命診断技術 各損傷形態での余寿命診断技術の例を示す。

手法	損傷形態			
	クリープ	疲労	脆化	備考
電気抵抗法	◎	—	—	—
硬さ測定法	◎	—	—	—
組織観察法	○	—	—	レプリカ
微視き裂測定法	—	◎	—	レプリカ
エッチ法	—	—	○	レプリカ
微小パンチ法	—	—	○	準非破壊

注：◎(実用化済み)，○：(研究開発済み)

#### 3.1 クリープ損傷

クリープ損傷を検出する診断法については、電気抵抗法<sup>2),3)</sup>や硬さ測定法<sup>2),3)</sup>を実機に実用化している。これらの手法は、主に粒界に炭化物が凝集・粗大化することによって、電気抵抗が低下したり硬度が低下する現象をとらえたものである。一方、組織観察法は、粒界に発生するキャビティの成長挙動に着目した方法で、損傷そのものを把握できる可能性を持っており、重要な手法の一つと思われる。ここでは、組織観察法<sup>2)~4)</sup>について詳細に述べる。

組織観察法は、実機ではレプリカによって組織を観察するものである。具体的には、対象部位を研磨し、腐食させた後にレプリカフィルムで転写する。このレプリカに金蒸着させた後に、走査電子顕微鏡で観察する。レプリカの採取手順を図3に、レプリカによるキャビティの観察例を図4に示す。レプリカ観察では、直接観察に比べ、キャビティの凹凸が逆に観察される。この組織観察によるクリープ損傷評価技術の開発においては、試験片による損傷材を作製し、試料をそのまま走査電子顕微鏡で1,000倍から2,000倍に拡大し、数百か所の視野を観察した。観察量としては、キャビティの数・長さ・面積で、画像解析装置によって定量化を図った。なお、以下の検討では、クリープ損傷率は試験時間を破断時間で割り、無次元化した値である。クリープ損傷率 $\phi_c = 1$ とは、クリープ破断を意味する。

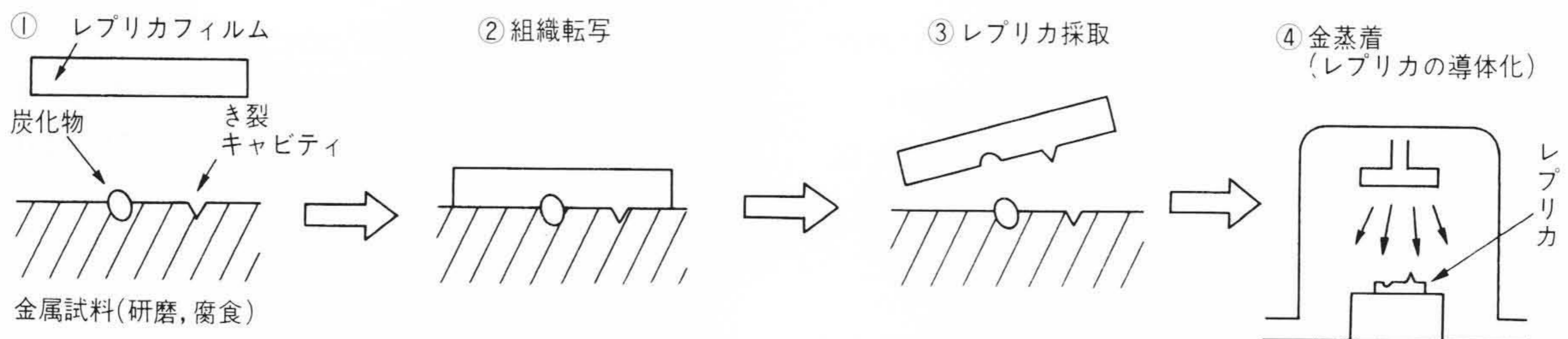
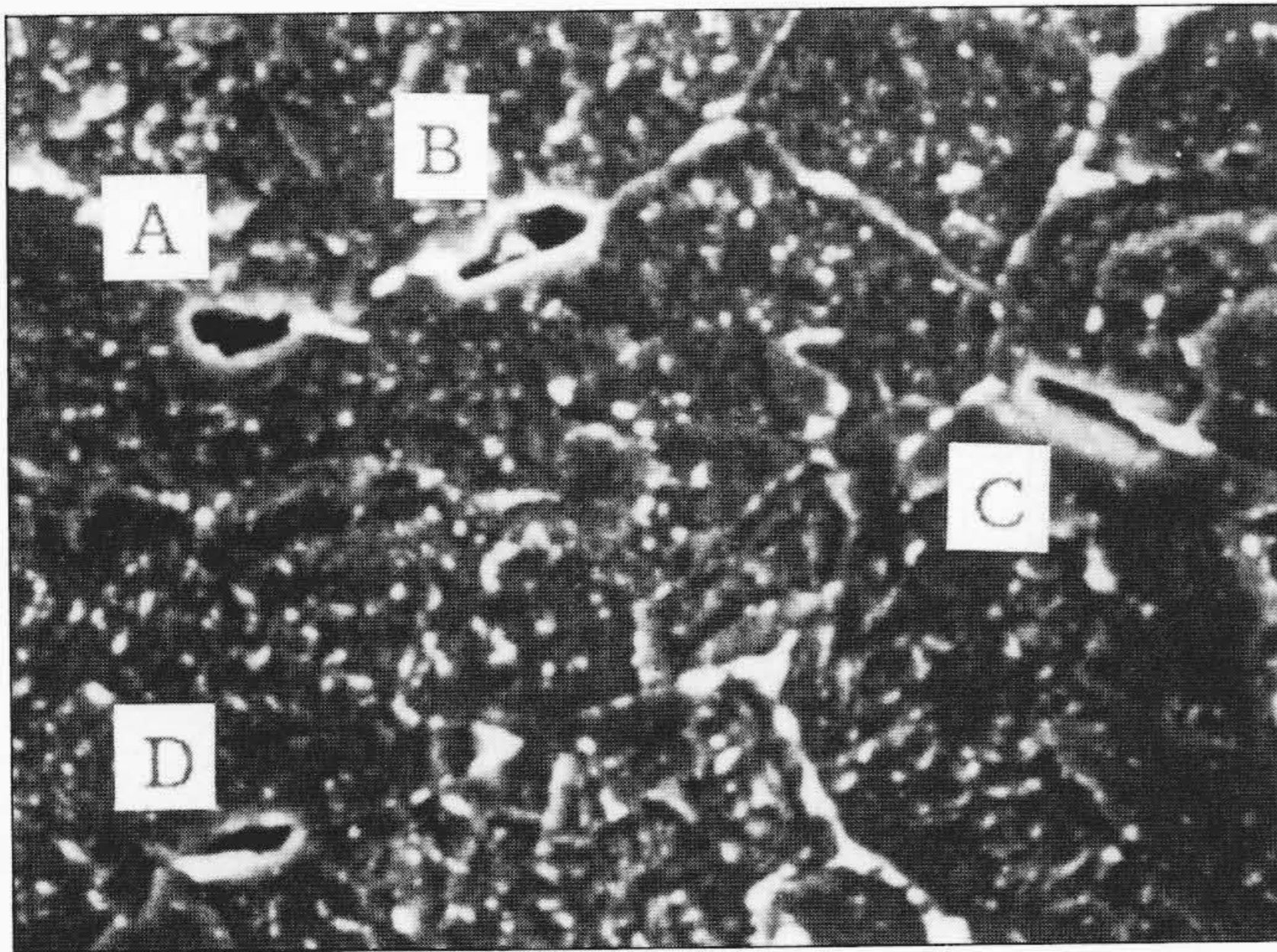
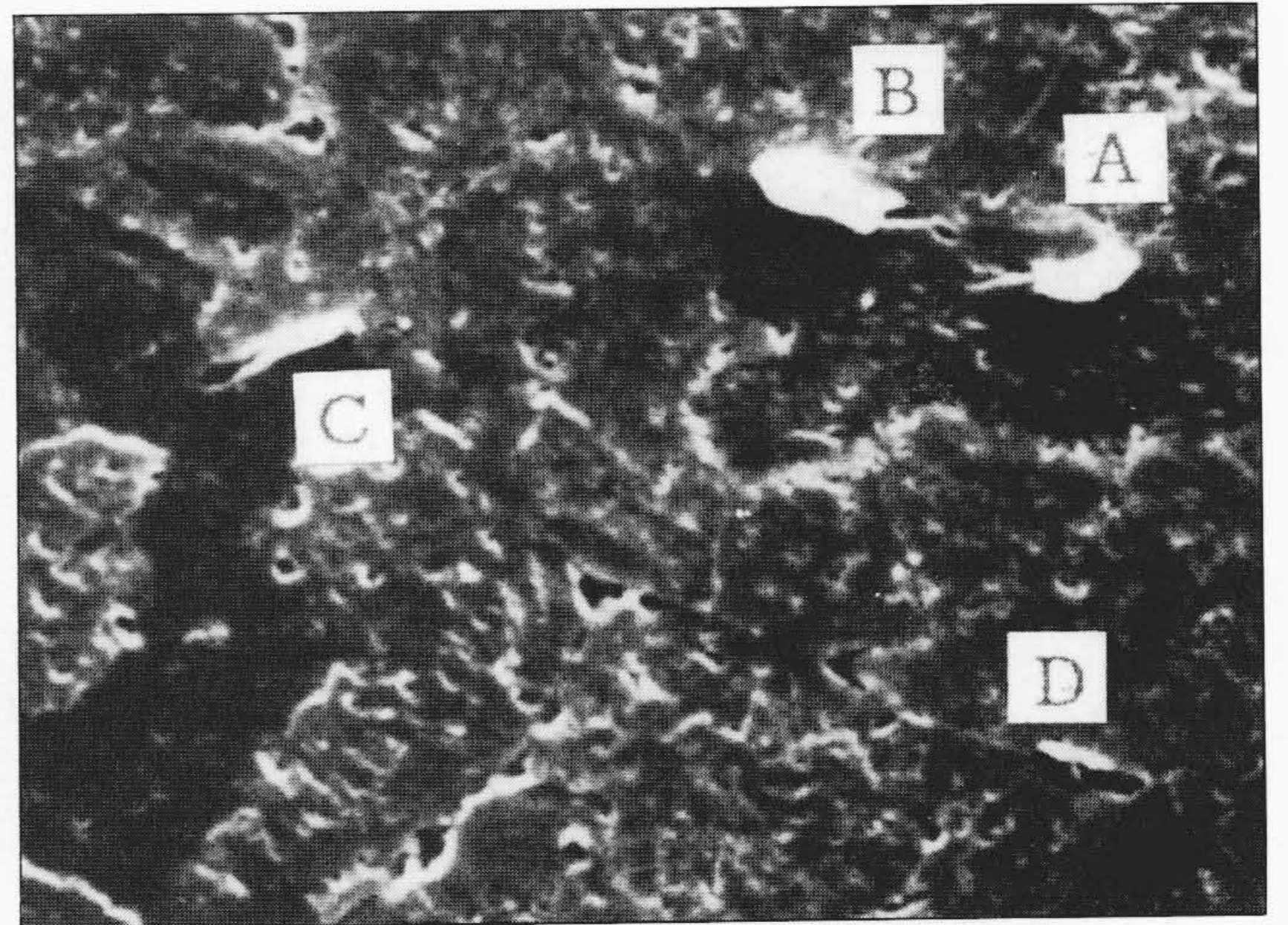


図3 レプリカの採取手順 金属表面の研磨・腐食を行った後に、レプリカフィルムをはり付け、金属表面の凹凸を転写する。





(a) 直接観察



(b) レプリカ観察

5 μm

図4 レプリカによるキャビティの観察例 A~Dは、キャビティ(空孔)で、レプリカ観察では、直接観察に比べ、キャビティの凹凸が逆に観察される。

(1) キャビティの数

キャビティの数による損傷評価として、参照線を横切る粒界の総数に対するキャビティの存在する粒界の数の比率で表したAパラメータを用いる手法が広く用いられている。直接観察(走査電子顕微鏡)とレプリカによって観察した、損傷パラメータAとクリープ損傷率の関係を図5に示す。両者の間には、良い相関性が認められる。Aパラメータ法は、キャビティの存在する結晶粒界の数による評価法であるが、キャビティの数そのものを用いた評価法について次に示す。この場合のキャビティの数は、観察されたキャビティの総数を総観察視野面積で割り算して、1mm<sup>2</sup>当たりの数と定義したものである。単位面積当たりのキャビティ数とクリープ損傷率の関係を図6に示す。キャビティ数(対数表示)は、クリープ損傷が進むにつれて増加し、Aパラメータ法と同様に、クリープ損傷と良い相関性があり、キャビティの数そのものを用いる点で、精度

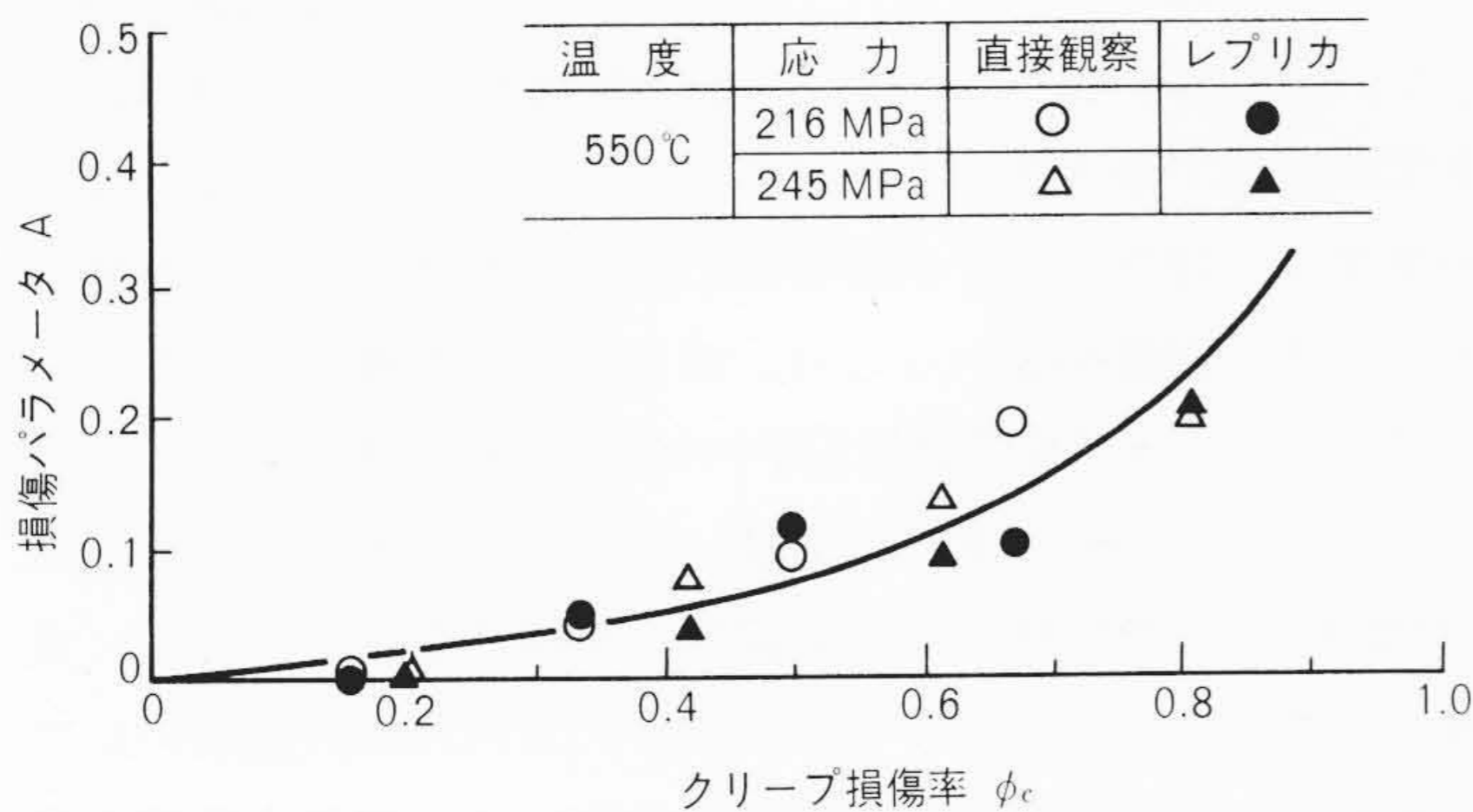


図5 損傷パラメータAとクリープ損傷率の関係(Cr-Mo-V鍛鋼)  
キャビティの存在する粒界数の比率を求めることにより、クリープ損傷が診断できる。

的に優れている。

(2) キャビティの平均長さと同面積

図7に観察されたキャビティの長さと同面積の関係を示す。横軸は、キャビティの長さで、縦軸はすべてのキャビティ数に対する、ある長さのキャビティの比を示している。この観察結果は下記の現象を裏付けている。すなわち、キャビティは、クリープ損傷の初期から発生し、クリープ損傷の進行とともに成長・合体し、やがてき裂となる。また、クリープ損傷の

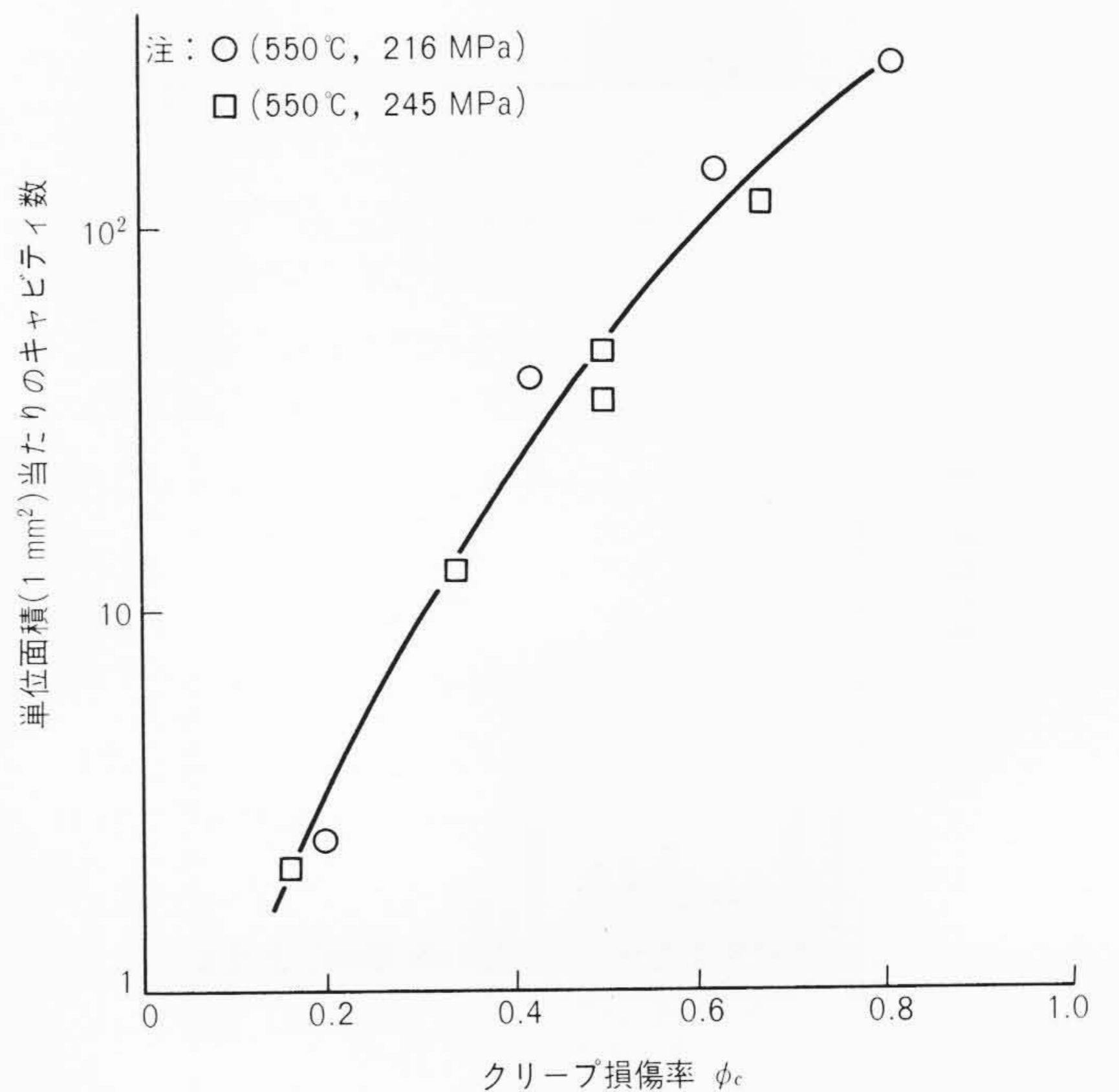


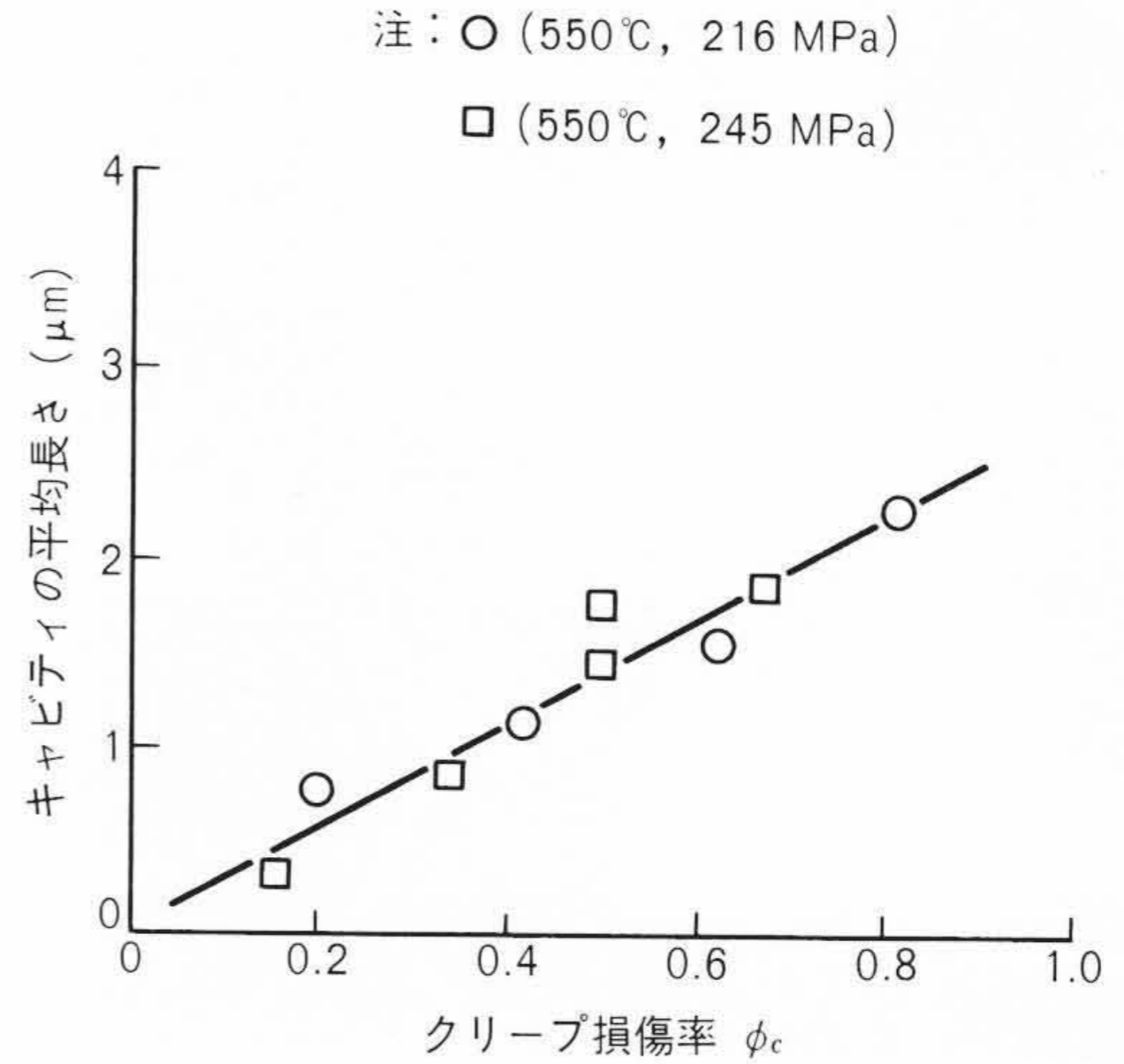
図6 キャビティ数とクリープ損傷率の関係(Cr-Mo-V鍛鋼)  
単位面積当たりのキャビティ数を求めることにより、クリープ損傷が診断できる。



初期から末期(寿命)に至る期間中、新しいキャビティも発生している。したがって、キャビティにより損傷を評価する場合には、観察される全キャビティの平均的状态量をパラメータに使用することが、精度の高い方法と考えられる。この平均的状态量としては、キャビティ平均長さ(全単独キャビティの最大長さの算術平均値)および占有面積率(全単独キャビティの総面積を総観察視野面積で割った値)が、クリープ損傷と良い相関性を示している。一例として、**図8**にキャビティ平均長さとクリープ損傷率の関係を示す。両者の間には、直線的な良い相関性を示しており、平均的状态量のパラメータによる評価法が優れていることを裏付けている。

クリープ損傷の診断法について、電気抵抗法、硬さ測定法および組織観察法について述べたが、一つの手法で行うのは十分とは言い難く、複数の利点をうまく活用して総合的に評価することが、精度の向上につながると考える。

実機の余寿命診断では、試験データに基づき作成された診



**図8** キャビティの平均長さとクリープ損傷率の関係(Cr-Mo-V鍛鋼) キャビティの平均長さを測定することにより、クリープ損傷が診断できる。

断線図から測定部のクリープ損傷率を求め、下記(1)式からクリープ損傷による余寿命 $L_c$ が予測される。

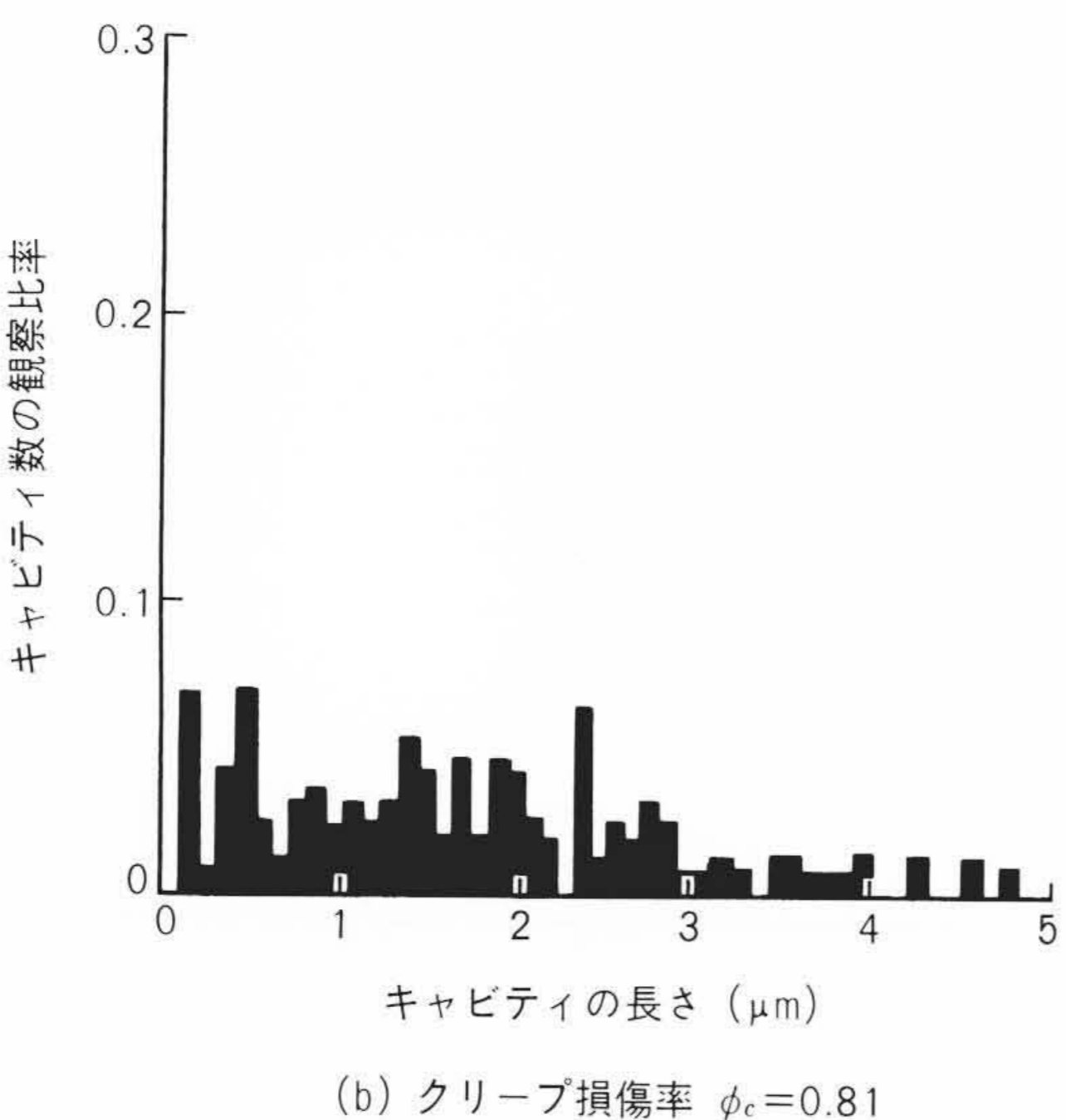
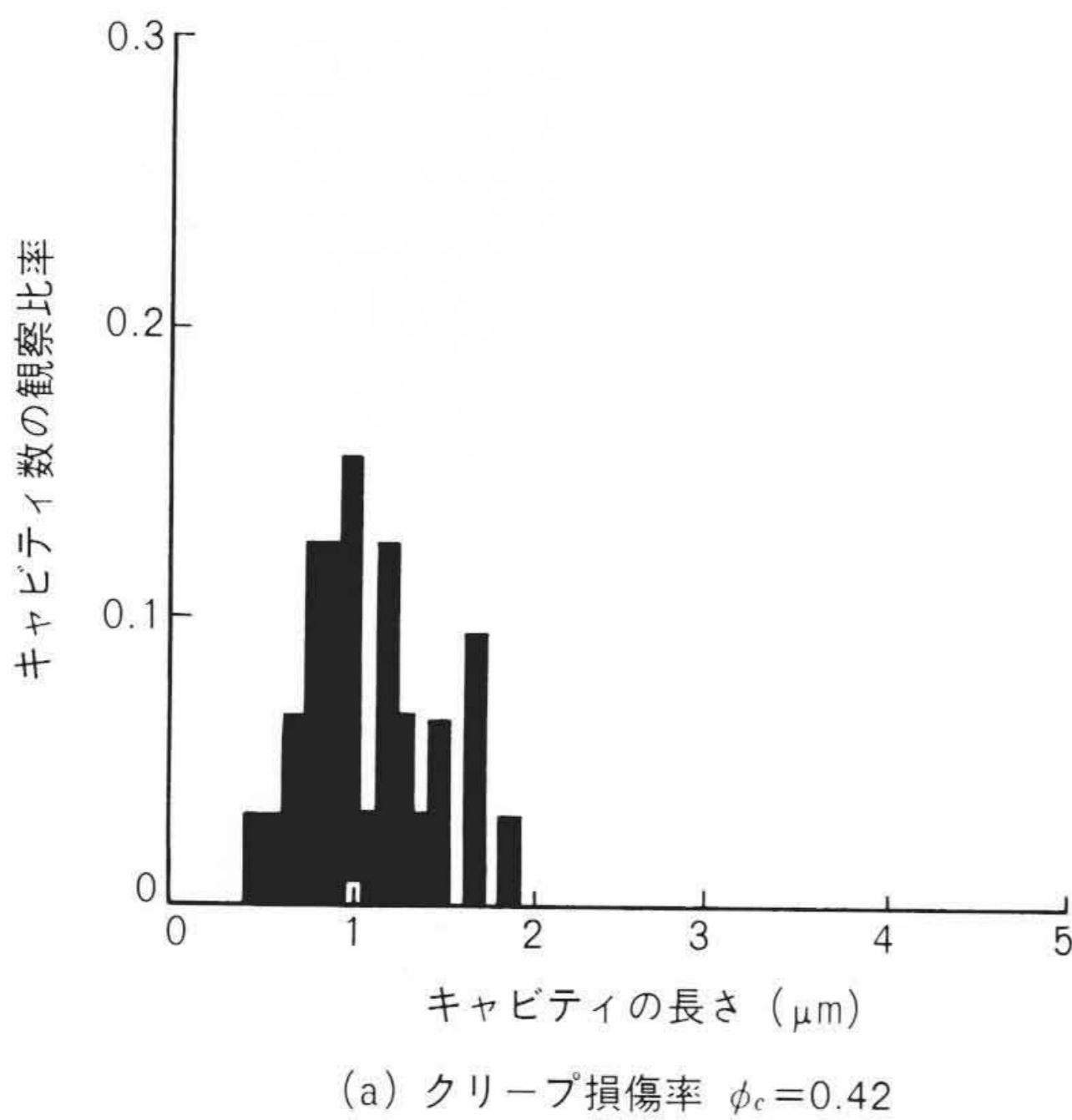
$$L_c = \left( \frac{1}{\phi_c} - 1 \right) \times t \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $\phi_c$ はクリープ損傷率、 $t$ は累積運転時間(h)である。

**3.2 疲労損傷**

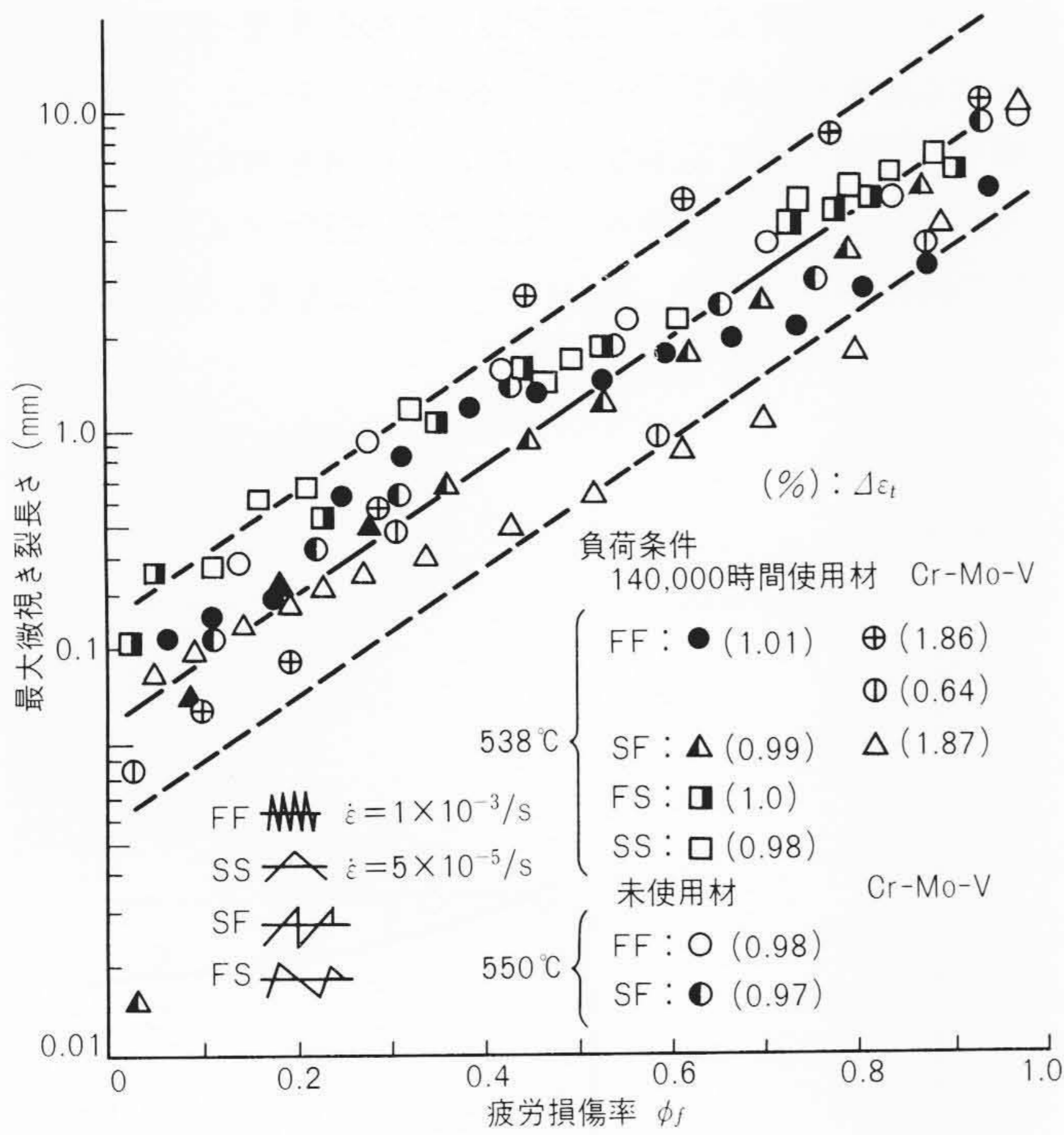
疲労損傷の診断法については、いろいろな手法の妥当性を検討した。電気抵抗法は、損傷メカニズムが異なることから相関性は得られなかった。硬さ測定法やX線回折法(半価幅比)については、損傷の初期段階(疲労損傷率:約0.2)までは検出可能であるが、それ以上では相関性が認められなかった。一方、熱応力のような繰返し負荷を受ける部材の表面には損傷初期から微小なき裂が多数発生し、それらは成長あるいは合体を繰返し、主き裂を形成する。微視き裂測定法<sup>2),4)</sup>とは、主き裂に至る微視き裂の成長挙動をレプリカを用いて検出することにより、疲労損傷(クリープ疲労損傷含む。)を診断する方法である。

最大微視き裂長さと疲労損傷率の関係を**図9**に示す。これらのデータは、各負荷条件で高温低サイクル疲労試験を中断して、試験片の表面での微視き裂の状況をレプリカに転写し、光学顕微鏡で最大微視き裂長さを測定したものである。疲労損傷率は、繰返し数を破断繰返し数で割り無次元化した値である。疲労損傷率 $\phi_f = 1$ とは、疲労破断を意味する。なお、同図にはクリープ疲労試験(図中のSS・SF・SFが相当する。)のデータも合わせて載せてある。同図から最大微視き裂長さ(対数表示)と疲労損傷は、直線的な相関性を示している。実機の評価では、対象とする表面積が大きいので、数個のレプリカをサンプリングし、数理統計手法によって最大微視き裂長さを推定する方法をとっている。実機の余寿命診断では、試験データに基づき作成した診断線図から測定部の疲労損傷



**図7** キャビティの長さと数の関係 キャビティは、クリープ損傷の進行とともに成長していく。





注：略語説明 FF, SS, SF, FS (低サイクル疲労試験での波形)  
 $\dot{\epsilon}$  (ひずみ速度),  $\Delta\epsilon_t$  (全ひずみ範囲)

図9 最大微視き裂長さと疲労損傷率の関係(Cr-Mo-V 鋼)  
 最大微視き裂長さを求めることにより、疲労損傷が診断できる。

率を求め、次の(2)式から疲労損傷による余寿命  $L_f$  が予測される。

$$L_f = \left( \frac{1}{\phi_f} - 1 \right) \times n \dots\dots\dots(2)$$

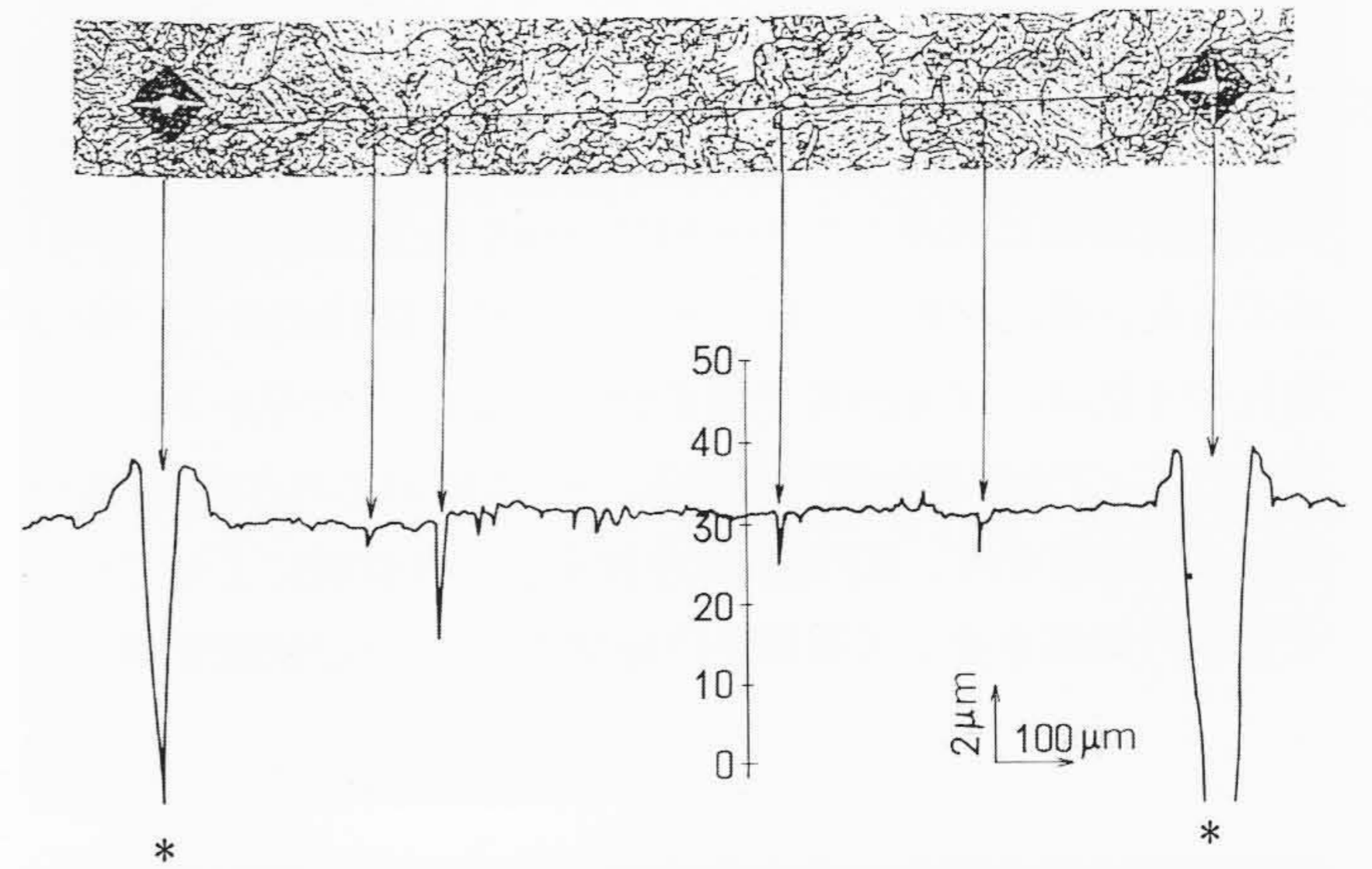
ここで、 $\phi_f$  は疲労損傷率、 $n$  は累積起動・停止回数(回)である。

### 3.3 脆化

Cr-Mo-V 鋼のような低合金鋼は、高温で長時間加熱されるとリンなどの不純物が粒界に偏析し、粒界強度が低下する。現象としては、靱性の低下(脆くなる。)が現れ、脆化傾向を示す。脆化診断技術として、エッチ法<sup>4)</sup>と微小パンチ法<sup>5)</sup>について述べる。

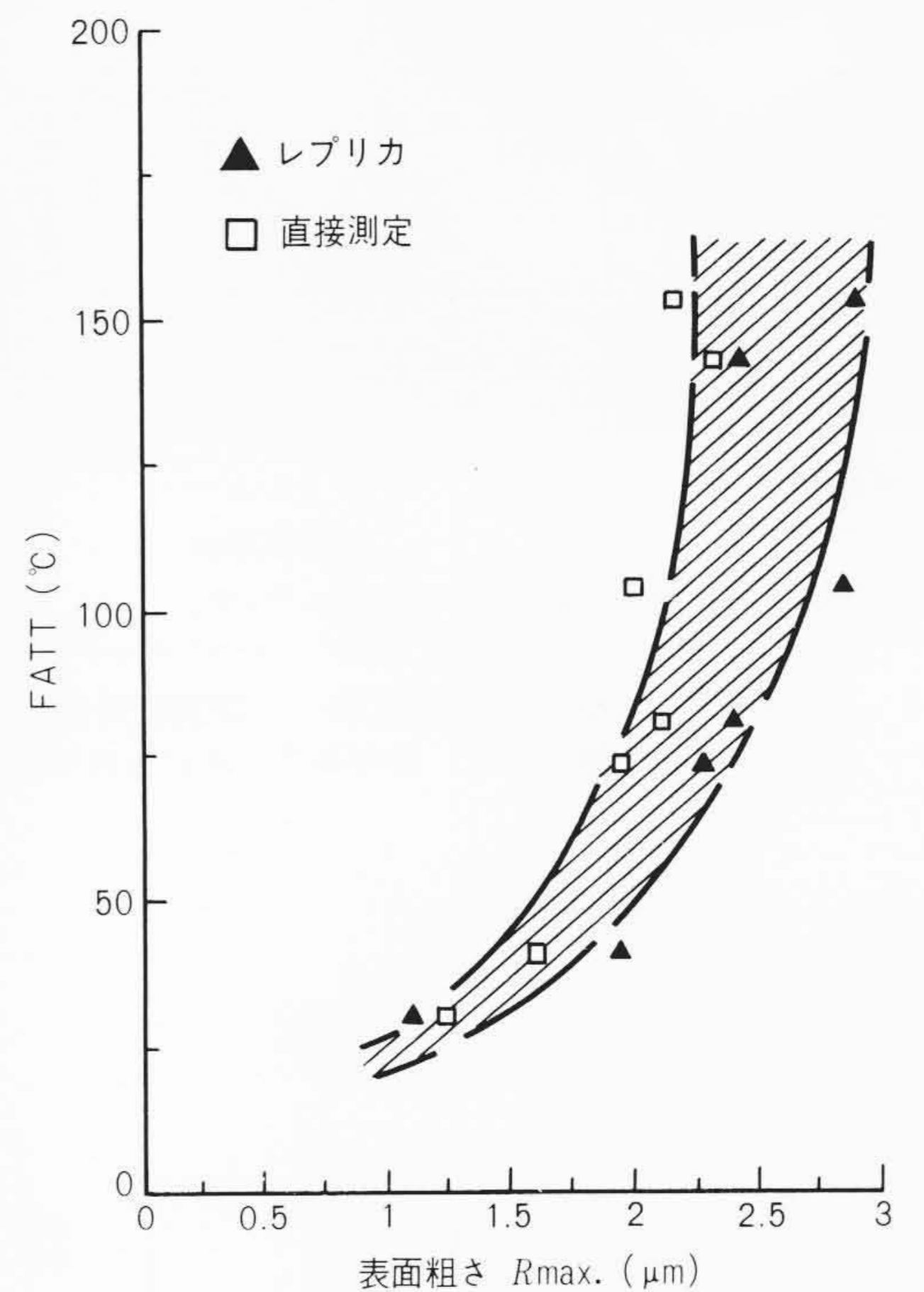
#### (1) エッチ法

エッチ(Etch)法は、ピクリン酸飽和水溶液で粒界を選択的に腐食させ、リンの粒界偏析量を粒界腐食溝の深さ(粗さ)で計測することによって、脆化を検出する方法である。脆化したCr-Mo-V 鋼を腐食させた後に、表面粗さを測定した。結果を図10に示す。表面粗さ(最大粗さ)とFATT(Fracture Appearance Transition Temperature: 破面遷移温度)の関係を図11に示す。FATTは破壊靱性値と良い関係があり、FATTが高いほど脆くなるということで、表面粗さと良い相関性が認められる。なお、同図中には直接測定とレプリカの測定も合わせて載せてある。実機への適用の場合には、腐食部をレプリカに転写し、レプリカの粗さを粗さ計で測定する



\* 硬さ計による圧痕(こん)

図10 表面マイクロ組織(腐食後)と表面粗さとの対応 脆化した材料は、粒界が選択的に腐食され、へこみの状況が粗さ計で測定される。



注：略語説明 FATT (Fracture Appearance Transition Temperature: 破面遷移温度)

図11 表面粗さとFATTの関係(Cr-Mo-V 鋼) 表面粗さを測定し、FATTを求めることにより、脆化が診断できる。

ことを行って行く。このように、エッチ法は非破壊的に脆化を検出評価できるものである。さらに、FATTが求められれば、経年脆化した部材の許容欠陥寸法が評価できることになる。

#### (2) 微小パンチ法

破壊試験によって直接脆化を評価する方法には、破壊靱性



試験やシャルピー衝撃試験がある。この方法では、試験片が大きく、実機から採取することはきわめて困難である。そこで、サンプリングが可能ないように試験片のミニチュア化を図り、脆化診断に適用したのがSP (Small Punch: 微小パンチ) 法である。脆化診断用試験片形状の比較を図12に示す。SP試験片の寸法は、10 mm角で厚さが0.5 mmとかなり小さく、実機からサンプル採取が可能である。SP試験用治具と荷重-変位曲線を図13に示す。SP試験片を固定し、試験機によってパンチ先端の鋼球を介して荷重かけ破壊させる。SP試験で得られ

る負荷荷重と負荷変位の関係を表したのが荷重-変位曲線で、延性材と脆性材の典型例を示す。SPエネルギーは、荷重-変位曲線下の面積として定義する。なお、面積を求める際の荷重と変位の上限は、破壊時点までとする。SPエネルギーと試験温度の関係を探ると、図14に示すようになる。SPエネルギー

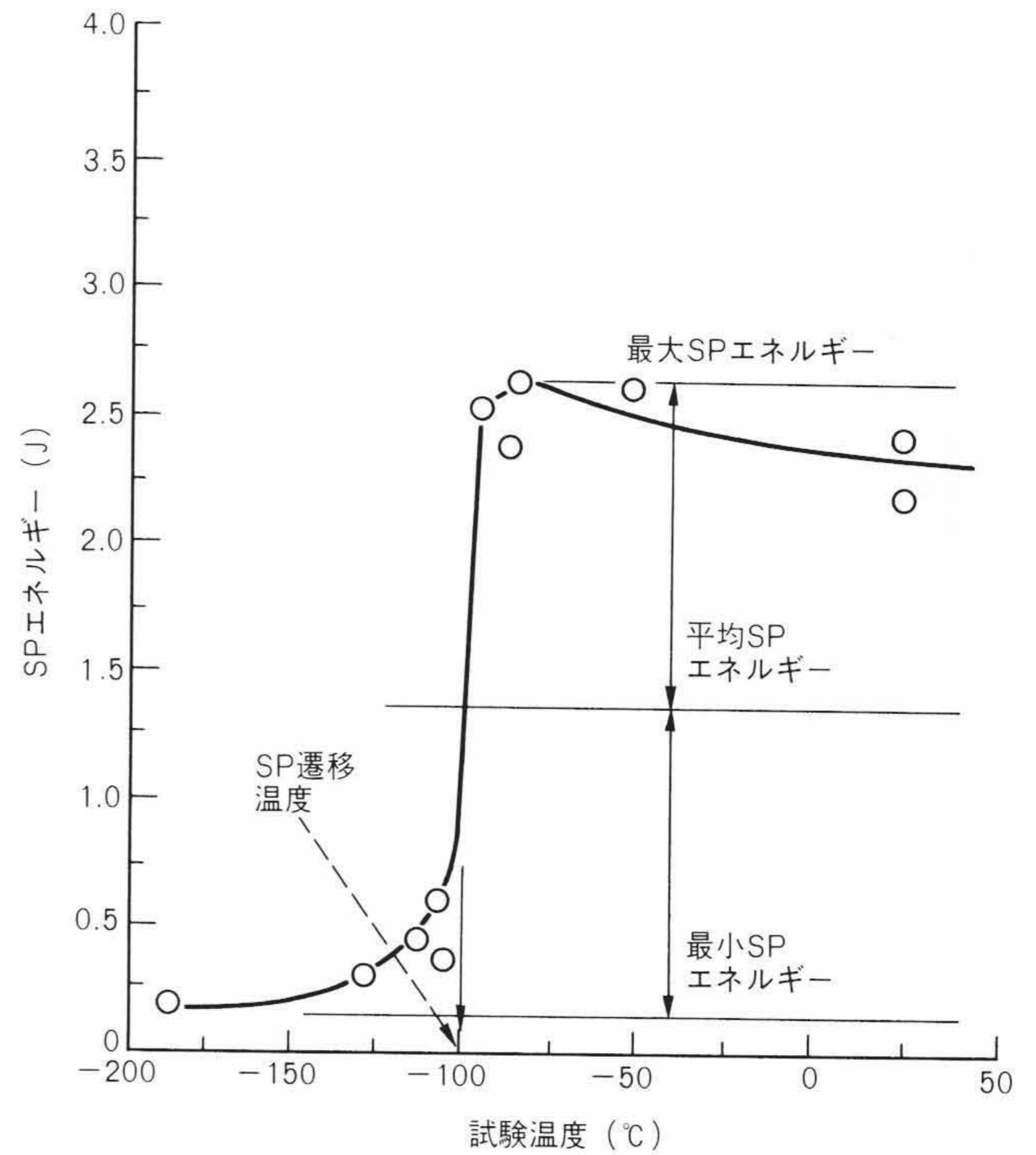
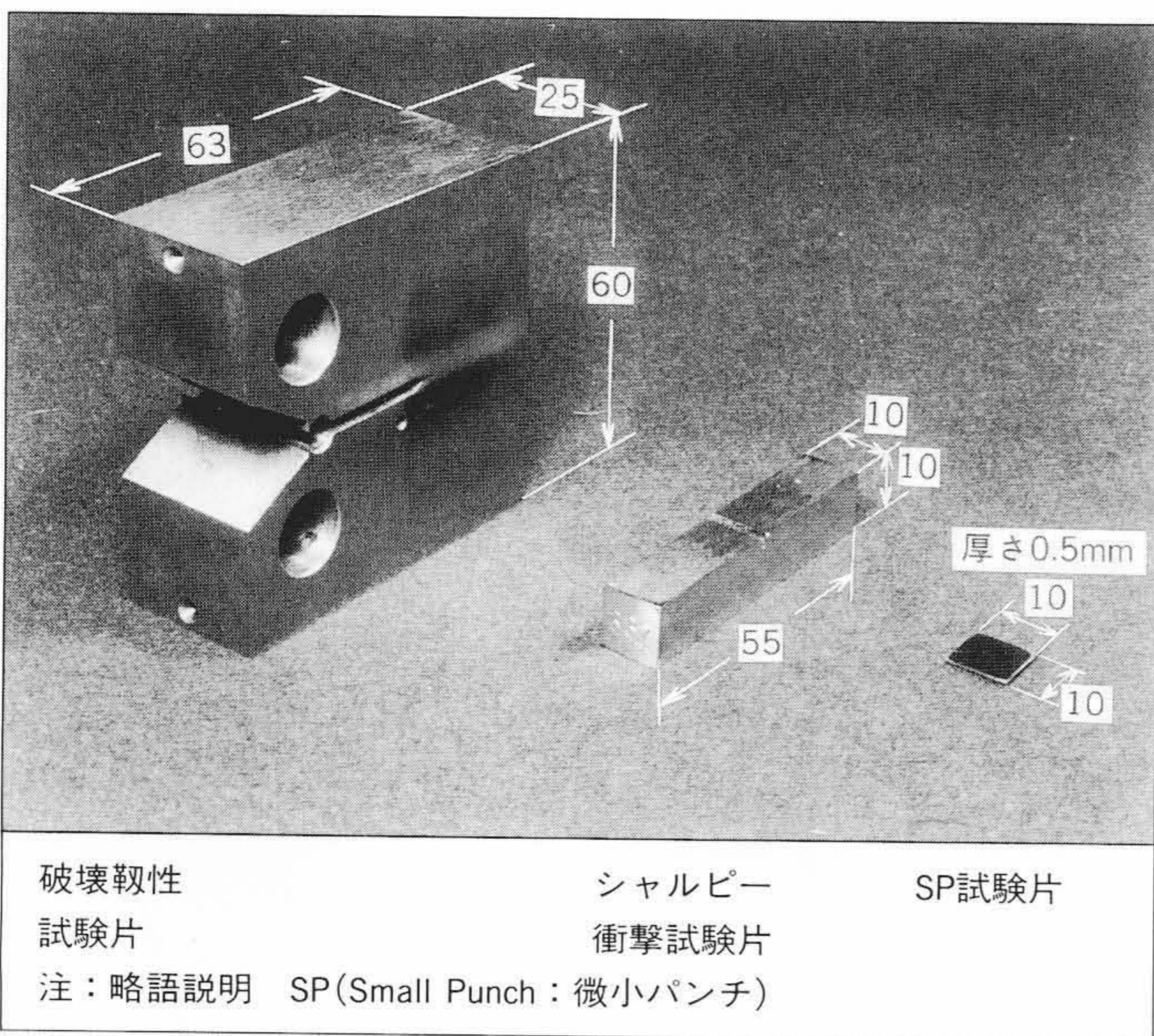
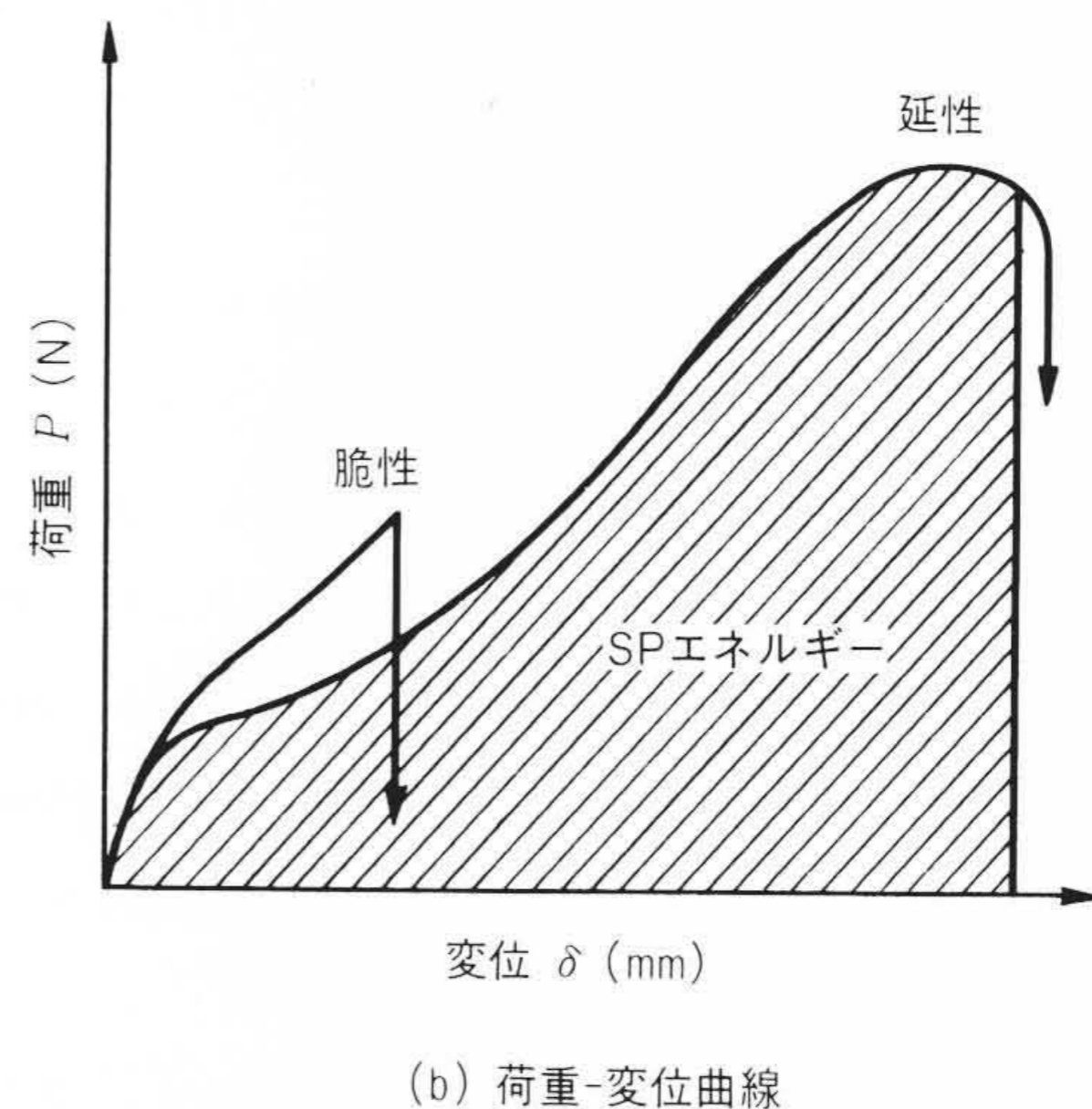
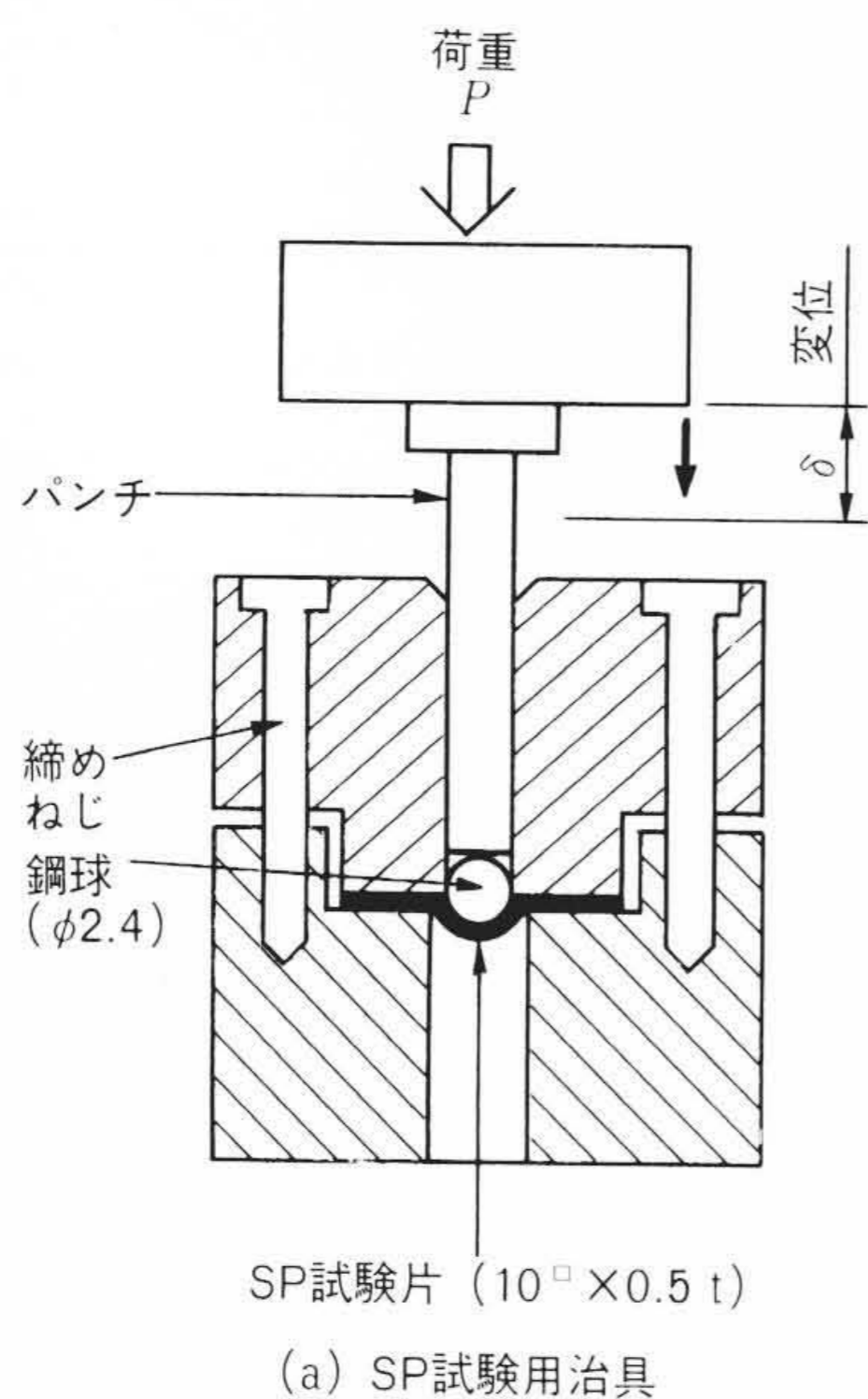


図12 脆化診断用試験片形状の比較 SP試験片は、破壊靱性試験片やシャルピー衝撃試験片より、きわめて小さいものである。

図14 SPエネルギーと試験温度の関係 平均SPエネルギーとSP遷移温度の定義を示す。



注: 略語説明 SP (Small Punch: 微小パンチ)

図13 微小パンチ試験の概要 10 mm角×0.5 mm厚さのミニチュア試験片を用いることが特徴である。



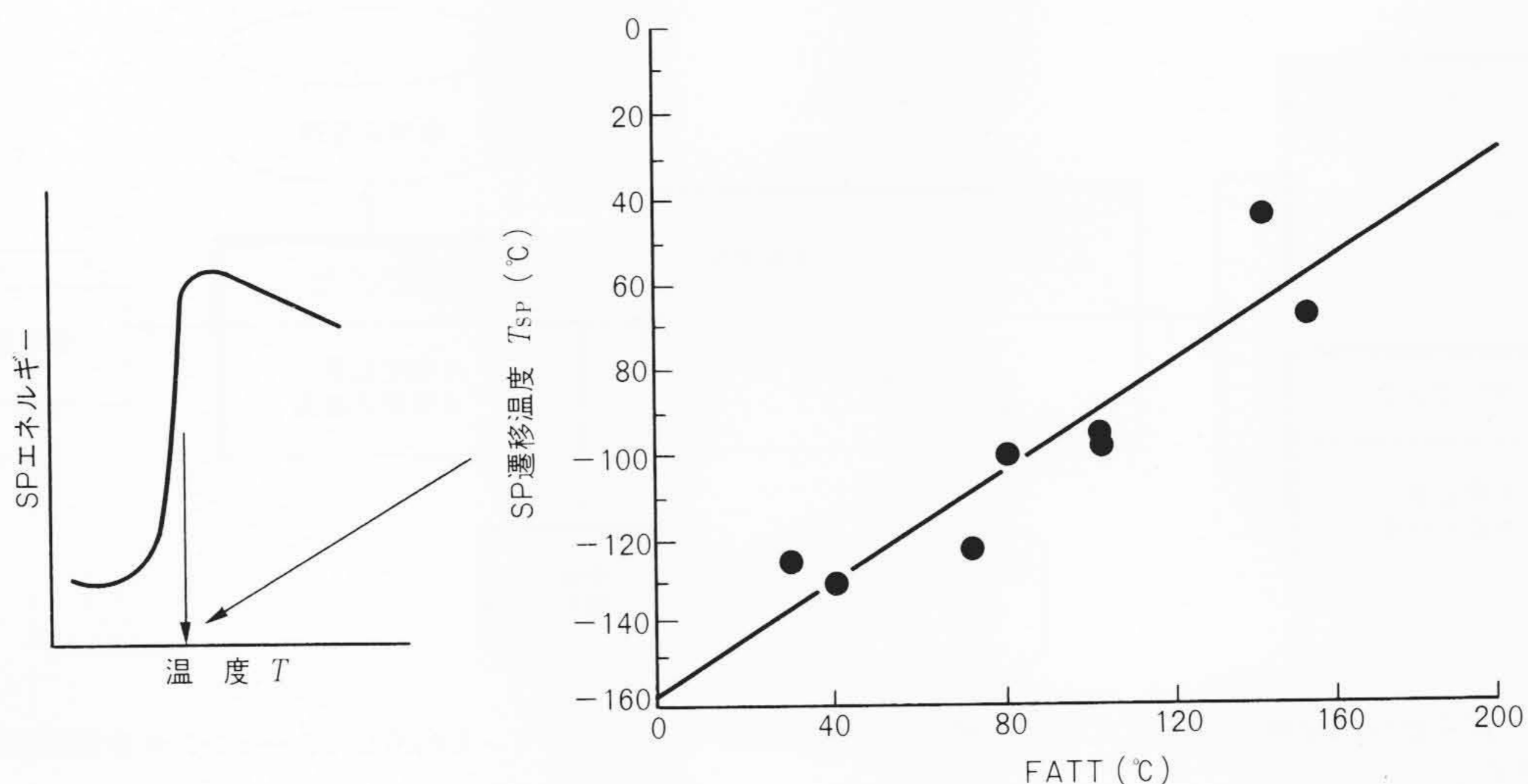


図15 SP遷移温度とFATTの関係(Cr-Mo-V鋳鋼) 断できる。

SP遷移温度からFATTを求めることにより、脆化が診

一の温度依存性は、シャルピー衝撃試験結果と似ており、急激に破壊エネルギー値が低下する温度が存在する。同図中で、最大SPエネルギーと最小SPエネルギーの平均値を平均SPエネルギーとし、平均SPエネルギーを与える温度をSP遷移温度  $T_{SP}$  と定義する。シャルピー衝撃試験で、すでにFATTがわかっている材料を使用しSP試験を実施してSP遷移温度を求めた。SP遷移温度  $T_{SP}$  とFATTとの関係を図15に示す。両者には良い相関が認められる。さらに、破面観察でも破壊形態がほぼ一致していることを確認している。なお、 $T_{SP}$  とFATTを比較すると、 $T_{SP}$  はFATTよりも約160℃低温側へシフトしている。これは、シャルピー衝撃試験片はV形切欠を持つ形状であるのに対し、SP試験片は板状の平滑形状であることと、両者の負荷速度の違いに起因するものと思われる。このように、微小パンチ法はきわめて小さい試験片によって精度よく脆化診断ができることから、準非破壊試験として有効な手法である。

以上、脆化診断法としてエッチ法と微小パンチ法について述べた。それぞれの特徴を生かし、サンプル採取が比較的可能なタービンケーシングの経年脆化診断フローチャートを図16に示す。

#### 4 タービンの余寿命診断システム

タービンの余寿命診断は、定期検査時に実施される。最近の電力需要のピークは、夏型だけでなく冬型にも生じ、定期検査がある時期に集中することが予想される。そこで、多数のプラントの余寿命診断を迅速かつ精度よく行うために、余寿命診断システムを開発した。システムの概要を図17に示す。このシステムは、運転履歴や測定値をワークステーションに入力し、測定結果や余寿命結果を出力させるものである。余寿命診断システムの操作状況を図18に示す。

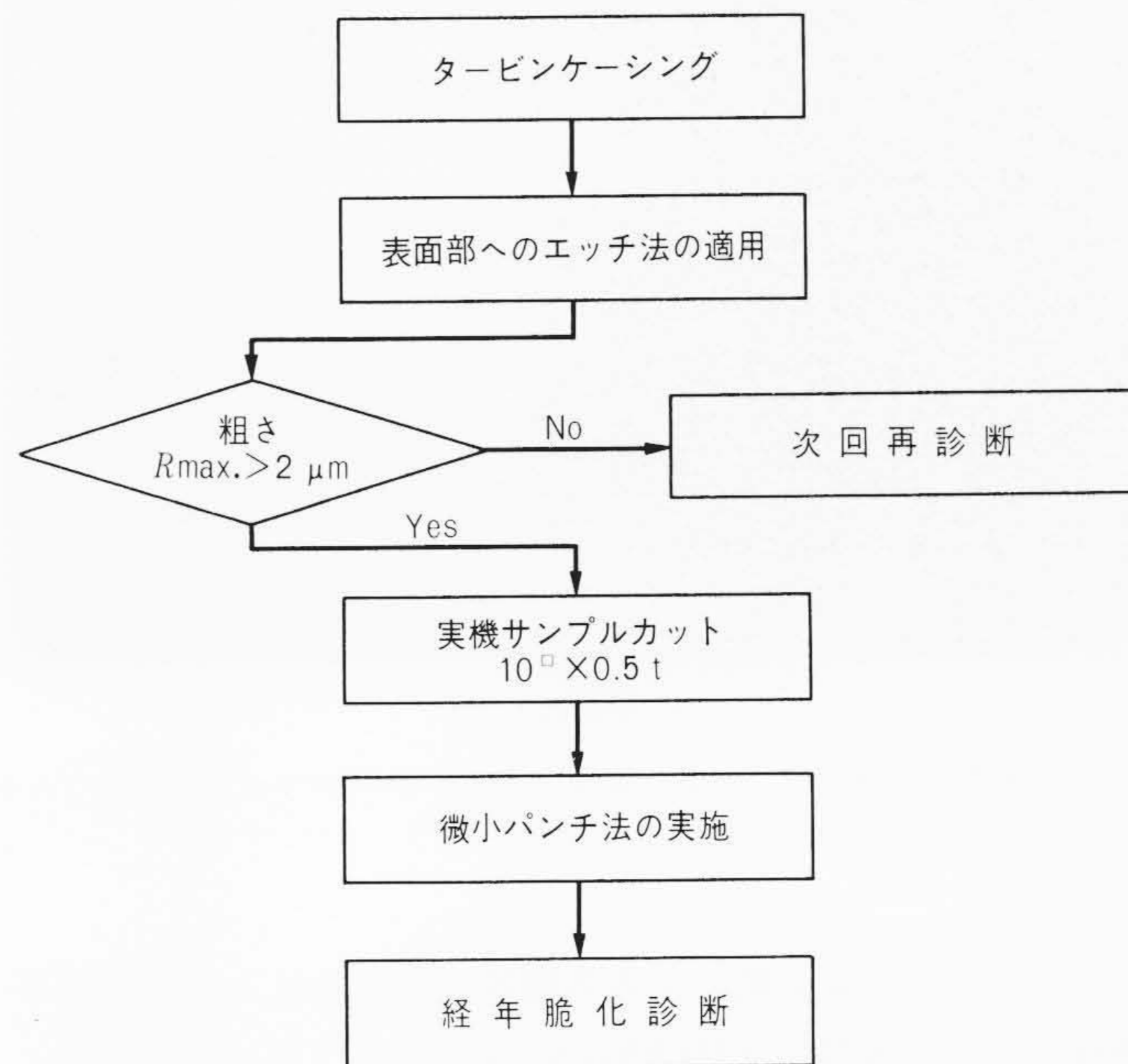


図16 タービンケーシングの経年脆化診断フローチャート エッチ法と微小パンチ法を組み合わせた、タービンケーシングの経年脆化診断を示す。

タービンの余寿命診断システムの特徴と利点は次に述べるとおりである。

- (1) 対話形で構成されており、だれでも操作できること。
- (2) 測定データは、パーソナルコンピュータ(現地用)によってフロッピーに格納し、このシステムでは手での入力が不要であること。
- (3) 材料の診断データが格納されていること。
- (4) 報告書に使用できる図や表が出力されること。
- (5) 余寿命診断の結果がデータベースとして格納されており、経歴管理ができること。



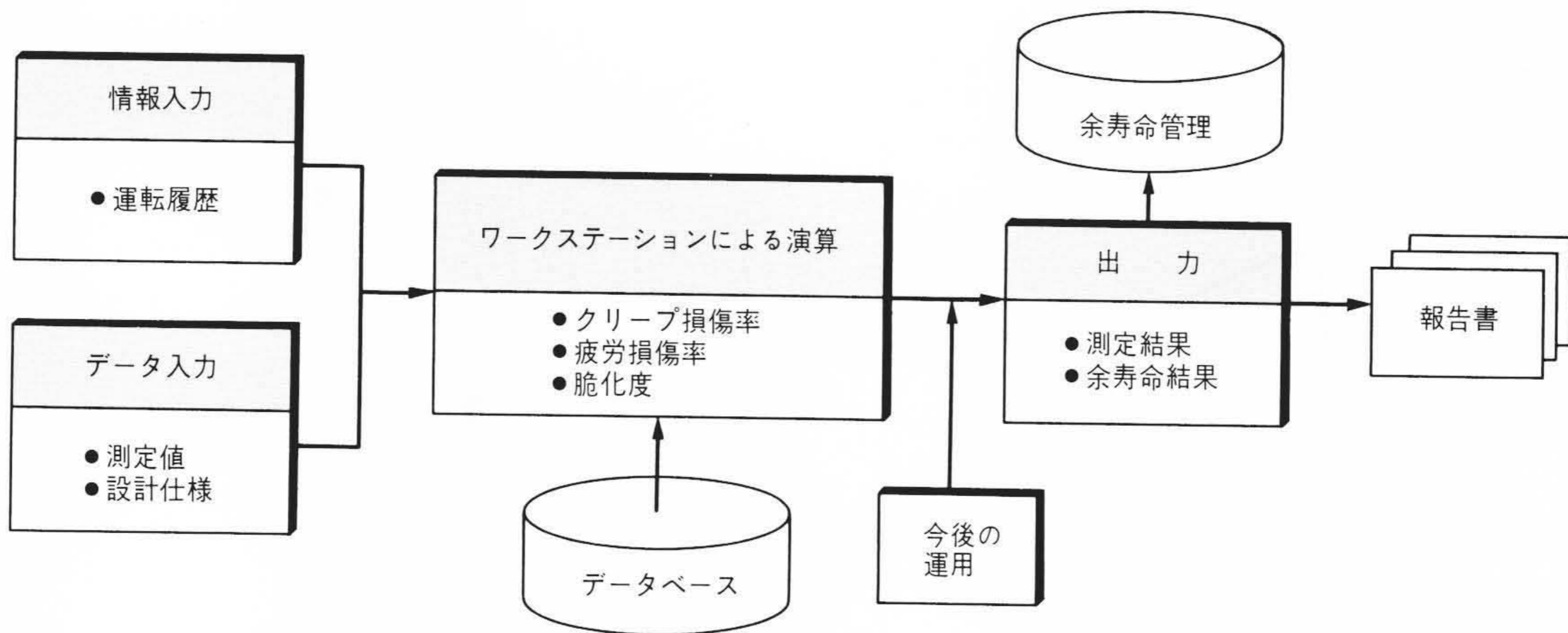
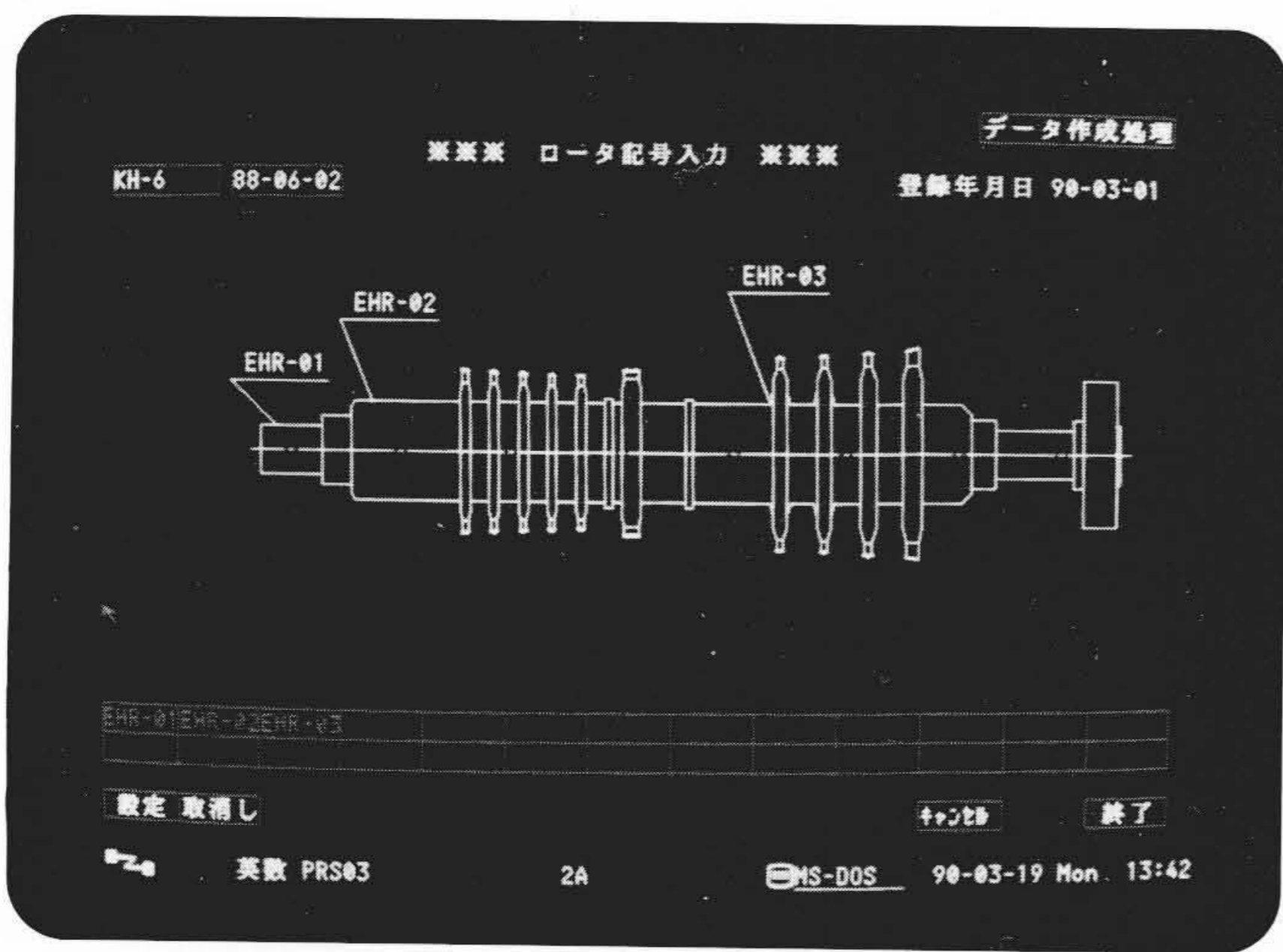


図17 タービンの余寿命診断システムの概要 対話形ワークステーションを利用したタービンの余寿命診断システムを示す。



(a) 画面出力例



(b) 操作状況

図18 余寿命診断システムの操作状況 ハードウェアは日立ワークステーション2020で、診断用データベース機能を持たせている。

さらに、余寿命診断による各機器の余寿命は、火力総合予防保全システム“New HIAMPS”(Hitachi Advanced Maintenance Planning System)でも管理される。

## 5 結 言

経年火力設備の長寿命化と保守管理の計画的な推進のために、最近注目されている非破壊検査による余寿命診断技術の開発状況と、そのシステム化について述べた。

余寿命診断では、レプリカを用いれば、すべての損傷や劣化度が検出可能であることが示唆されるが、一つの手法だけでなく、特徴を生かした複数の手法を併用することが大切であると思われる。

今後は、さらにデータを蓄積しながら精度の向上を図るとともに、システムのネットワーク化を進めていく考えである。

## 参考文献

- 1) 村田，外：タービン設備の余寿命診断と耐力向上対策，火力原子力発電，40，10，94～98(平1-10)
- 2) 丹，外：タービン設備の余寿命診断技術の現状と今後の課題，電気現場技術，26，305，57～62(昭62-10)
- 3) 祐川：高温材料の非破壊手法によるクリープ損傷評価，圧力技術，26，6，16～22(昭63-11)
- 4) 桜井，外：微視損傷に基づく高温機器余寿命診断の高精度化，圧力技術，27，1，32～40(平1-2)
- 5) 村山，外：微小パンチ(SP)試験による脆化診断技術の開発，火力原子力発電，41，2，51～57(平2-2)