

## 鋼構造性能向上のための鋼材組織制御指針のメゾスコピック解析手法の開発

大阪大学・工・生産科学専攻 大畑 充

### 1. はじめに

近年、低環境負荷型、循環型構造社会の構築やライフサイクルコスト低減を見据えた革新的な鉄鋼材料の創製技術の進歩にはめざましいものがある。中でも、合金元素添加を極力抑えた超微細結晶粒化や、鋼材組織レベルでの不均質を利用した微細複相組織化などにより、鋼構造物の飛躍的な延命化を可能にする鋼材開発が進んでいる。このような超微細・複相組織化による鋼材の強度・破壊性能を向上させるための組織設計を可能し、さらに、メゾスコピック組織構造と実構造性能を直結させることにより、先進鉄鋼材料の開発さらには斬新な構造設計・施工に活かされるものと考えられる。そのため、複相材の新たな損傷・破壊クライテリアの確立と、鋼材組織と直結した構造性能評価手法の構築が望まれる。

本研究は、鋼材組織の複相化による微視的な力学的不均質を積極的に利用して鋼材破壊特性を向上させるための組織制御指針を解明することを第1の目的とし、複相組織鋼のマイクロ損傷・破壊メカニズムの解明とこれによる新たなメゾスコピック損傷メカニクスを構築する。第2に、実構造部材の破壊性能と鋼材組織特性との定量的相関性を導くためのメゾマクロ横断的・同時解析法を確立することを目的とする。

### 2. 本研究のアプローチと位置づけ

鋼材、特に複相組織を有する鋼材の微視組織を制御することにより実構造部材における延性破壊抵抗（低・極低サイクルを含む）が向上することが大いに期待できる。そのための組織制御のあり方を解明することは、迅速・合理的かつ構造性能規定型の鋼材開発に有益であるばかりでなく、新たな鋼材性能を見いだす糸口となり得る。

一般に、鋼構造部材が延性破壊や脆性破壊する場合には、溶接・接合部などに既存の欠陥や構造的・形状的な応力・歪集中部からの延性き裂の発生がそれらの破壊挙動の根源となる。延性き裂の発生限界を定量的に捉えることは、構造性能の破壊力学的手法による評価に結びつけられるばかりでなく、き裂発生から最終破壊に至るまでの全挙動と鋼材組織因子の影響を解明するための基本になると考えられる。一方、従来から構造部材の延性き裂の発生限界を捉えるべく、主としてボイドの成長・連結挙動を連続体力学の範疇でモデル化したいわゆる多孔質体の損傷力学に基づいて、限界値特性をシミュレーションするという試みが広く行われている。しかし、このようなモデルは、必ずしも材料のメゾレベル（組織レベル）での特性と関連づけられるものではなく、そのため、き裂発生抵抗を制御あるいは向上させるための材料のあり方にフィードバックできるものではない。従って、性能向上のための鋼材組織制御指針の構築さらには新たな鋼材開発につなげるためには、鋼材の組織因子を取り込んだ新たな損傷メカニクスを構築することが不可欠である。

そこで、本研究では、図1に示すような「鋼材組織形態」・

「構造性能」直結型シミュレーション法を構築するため、次のようなアプローチを提案した。

1. ミクロレベルでの材料損傷機構解明
2. メゾスコピック変形解析法の開発
3. メゾマクロ横断的・連成解析法の開発

すなわち、従来の鋼材の延性破壊に対する多孔質体の損傷力学に代わり、メゾスコピック応力・歪解析手法の開発を基に、複相組織鋼の転位や格子欠陥発現挙動に着目した材料組織密接型の延性き裂発生に対する新たな損傷メカニクスの構築を目指す。また、それを基に実際の構造部材の破壊性能評価へ結びつけるためのメゾマクロ横断的解析手法を確立することより、相互に影響を及ぼし合うメゾ力学特性および損傷特性と、マクロ力学特性との横断化解析手法を構築する。

本報では、二相組織を有する鋼材を対象に、延性き裂発生に対する新たな損傷メカニクスの構築、およびそのためのメゾスコピック解析手法を構築するための基礎的検討として、延性き裂発生をもたらす支配的な材料損傷を解明するために実施した実験・観察結果について述べる。得られた結果は、マイクロ損傷機構と鋼材組織特性とを結びつけるメゾスコピック解析手法の構築に反映されるが、さらに、このようなマイクロ損傷を捉えるメゾレベルでの応力・歪場特性がマクロレベルでの応力・歪場を導く連成された解析手法であることが必要となる。そこで、第1ステップとして、二相組織形態に起因するメゾレベルでの特性を考慮した材料損傷概念を提案し、これが、マクロ解析で得られる力学パラメータを用いることによりマクロな構造部材の延性き裂発生限界の予測に適用可能であるかについて検討した結果について報告する。なお、本報では、高歪繰返し荷重が載荷される場合を想定した材料損傷概念の提案と、その構造延性き裂発生限界の予測への適用性について検討した結果について報告する。

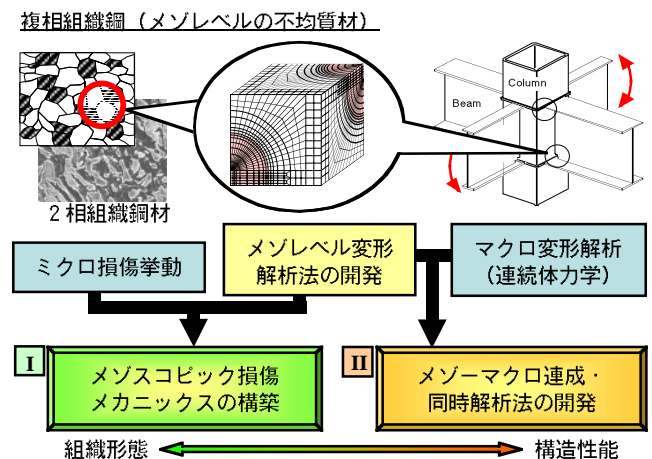


図1 鋼材特性ー構造性能相互評価のアプローチ

### 3. 二相組織を有する鋼材のメゾレベル応力・歪場特性を考慮した繰返し荷重下での材料損傷概念の提案

二相組織を有する構造用鋼の延性き裂の発生に支配的な材料挙動を明確にするため、歪付与に伴うボイド挙動と鋼材組織との関係を観察しながら考察した。これにより、応力反転を伴う高歪繰返し荷重が作用する場合の材料損傷概念について、二相鋼のバウシニング効果の力学的および材料学的両特性が延性き裂発生に支配的な材料損傷に及ぼす影響を考慮して提案した。

#### 3-1 延性き裂発生を支配するマイクロ損傷挙動

単調増加型荷重を受ける二相組織鋼材の延性き裂発生を支配する材料損傷挙動を明らかにするための実験・観察を行った。使用鋼材は、板厚 13mm のフェライト-パーライトの二相組織を有する溶接構造用鋼 SM490YB である。図 2 は本鋼材の組織の様子を示したものであり、ピッカース硬度で約 80 程度異なる硬質パーライト相が圧延方向に層状に分布している。各パーライト相は、形状、大きさにおいて比較的ランダムに存在している。鋼材の延性き裂の発生挙動の観察および限界特性試験には、図 3 に示すように平滑丸棒引張試験片に加えて切欠き底半径が異なる 4 種類の円周切欠き付丸棒引張試験片 (R0.1, R0.2, R1, R2 材: 切欠き底半径  $R=0.1, 0.2, 1, 2\text{mm}$ ) を用いた。これは、実構造部材で想定される種々の形状不連続部やそれにより異なる多軸応力状態を模擬するものである。

単調増加型引張荷重による破断試験から試験点タイプにより延性き裂の発生挙動に違いがみられ、平滑、R2 および R1 材ではくびれ底断面中央部で微小ボイドの発生・連結により延性き裂が発生することが確認された。これに対して、切欠き底半径の鋭い R0.2 材および R0.1 材では最大荷重前

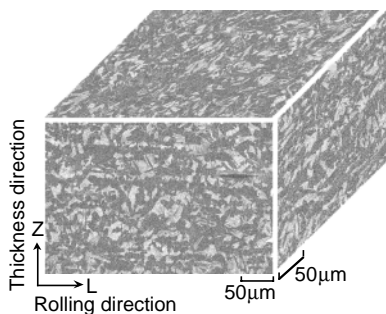


図 2 フェライト-パーライト二相組織鋼の組織写真

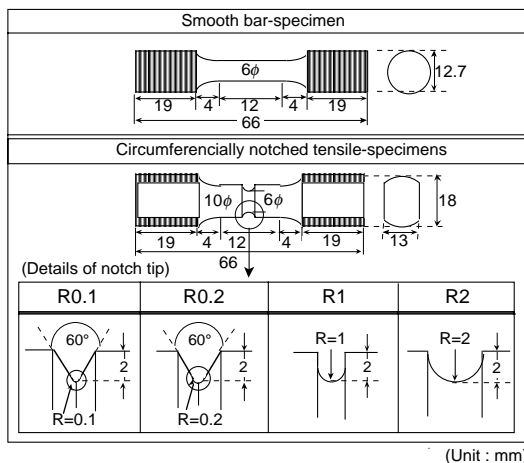


図 3 延性き裂発生特性評価のための丸棒引張試験片

後で切欠き底表面で生じた強せん断変形帯に沿って発生したボイドの連結により延性き裂が発生することがわかった。

さらに、延性き裂の発生挙動をより詳細に検討するために、引張荷重開始から延性き裂の発生に至るまでの材料挙動について、主として鋼材組織とボイドの発生・成長・連結挙動の関連に着目して観察を行った。図 4 は、平滑材を対象に、延性き裂が発生した負荷歪レベル (くびれ底断面中央部での相当塑性歪が 122%) に近い約 105% の塑性歪 (くびれ底断面中央部での相当塑性歪: 後述の FEM 解析により算定) を付与後、除荷した試験片のくびれ底断面中央部の SEM 写真を示したものである。写真 A は引張方向 (鋼板圧延方向) に対して垂直な面、写真 B, B' は平行な面の観察結果である。1 $\mu\text{m}$  程度以下の小さなボイドが数多く見られ、そのほとんどがフェライト-パーライト二相境界におけるフェライト相側で生じていることがわかる。このようなボイドは約 100% 程度以上の大きな塑性歪の付与により顕著に見られるようになり、それ以前の歪レベルでは比較的大きな 10 $\mu\text{m}$  程度のボイドがわずかに見られるのみであった。この低歪レベルから存在するボイドは大きな MnS 介在物に起因したボイドであることが確認されている。また、破断面におけるディンプルの様子と破断面近傍の組織との比較から、破面の大部分を占めるディンプルの大きさは、図 4 で見られたボイド径程度に小さく変形後の結晶粒径 (引張方向に垂直な方向の粒径: 約 10 $\mu\text{m}$  程度) と比べてもより小さいことが分かった。さらに、低歪レベルで MnS 介在物に起因して発生・成長したボイドに対応すると思われる破面上の大きなディンプル間距離は大きく、このようなボイドは延性き裂の発生にはほとんど影響を及ぼしていないものと考えられる。以上の観察から、強度が異なる二相組織からなるフェライト-パーライト鋼では、大きな塑性歪の付与により二相境界の軟質相 (フェライト相) 側で微小ボイドが発生し、さらなる歪付与によってそのようなボイドが発生する条件が複数の二相境界近傍で満たされることによってボイド数が増加しそれらが連結することによって延性き裂が発生することがわかった。すなわち、低歪レベルから発生するボイドが成長し、それらが連結することにより発生するとい

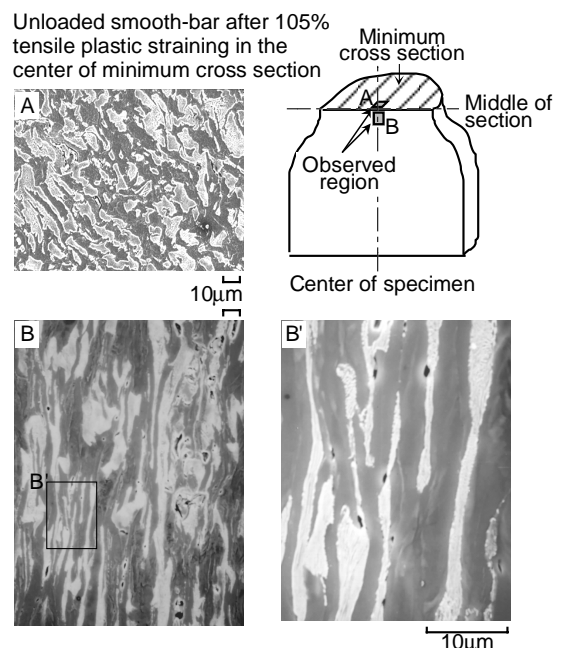


図 4 延性き裂発生を支配するマイクロ損傷挙動

う一般に認知されている延性き裂発生挙動とは異なり、延性き裂発生直前の歪レベルでの微小ボイドの発生が支配的であることがわかった。

### 3-2 メゾレベル応力・歪場特性を考慮した繰返し材料損傷概念

材料のバウシinger効果は、塑性変形より大きな不均一をもたらす硬い第二相を含む材料では顕著に現れる。また、その機構は、予変形（予歪）によりこれらの不均一境界に集積 (pile-up) したすべり転位によって長範囲内部応力（逆応力）が形成され、それが逆方向負荷時には運動転位に作用する実応力を低下させることに起因するものと考えられている。このような長範囲内部応力を生じさせる集積転位のうち、逆運動し得る可動転位 (Directionally movable dislocations) の運動による塑性変形が逆変形初期のバウシinger歪の原因であることが実証されている。また、単結晶金属や炭化物や析出物の分散合金において、逆変形負荷による転位密度や転位構造（セル壁やタングル化された転位構造など）が、予変形時の負荷応力以上の逆負荷応力レベルにおいて予変形負荷終了時とほぼ同じ程度に回復されることが観察されている。

一方、前節での二相組織鋼材の延性き裂発生挙動の観察から、大きな塑性変形を伴った後（およそ延性き裂発生限界歪の8割程度の大きな塑性変形付与後）に、主として、二相境界でのフェライト相側での微小ボイドの発生が延性き裂発生に支配的であることが推察された。このフェライト相側での微小ボイドの発生源としては微小な析出物や介在物などが考えられるが、少なくとも転位密度が大きな領域でボイドが優先して形成されるものと考えられる。すなわち、延性き裂の発生をもたらす材料損傷として、二相組織境界で発生する微小ボイドの発生核生成に支配的であると考えられる転位密度や転位構造の進展程度を考えるのが妥当である。

そこで、二相組織鋼材のメゾレベルでの応力・歪場特性を考慮して、延性き裂発生に支配的な材料損傷の進展概念を考案した。図5は、この材料損傷概念を模式的に示したものである。(b)図、(c)図は、それぞれ外応力およびそれと逆方向への外応力が作用したときのフェライト-パーライト相境界近傍のフェライト相（軟質相）の転位構造と密度分布を模式的に示したものである。二相組織鋼に負荷（負荷応力  $\tau^A$ ）を与えると、フェライト-パーライト相境界近傍のフェライト相（軟質相）に転位が集積して転位密度が増加し、そこで大きな長範囲内部応力  $\tau_{int}^A$  が形成される。その後、逆方向に負荷すると、可逆運動転位 (Directionally movable dislocations) の移動によって転位密度が減少し、このときのマクロ塑性歪（逆変形初期のバウシinger歪）に対

応：(a) 図中①は延性き裂に対する材料損傷には影響をもたらさないと考える。さらに逆方向負荷応力が増加すると、予負荷終了時(A)に形成されたものと同じ転位構造（転位密度）が再構築される。どのよう逆負荷レベルで再構築されるかについては、予応力と同じ負荷応力レベルであるという結果が報告されているが、ここでは二相境界近傍での転位密度や転位構造とより密接に関連する長範囲内部応力  $\tau_{int}^B$  が予負荷終了時のそれ  $\tau_{int}^A$  と同じとなる負荷レベル(B)であると想定することとした。すなわち、長範囲内部応力が逆変形初期のバウシinger歪およびその後の変形による転位構造の進展程度との関連において支配的な指標になり得るものと考え、逆変形時の内部応力が予変形終了時以上に増加するまでは材料損傷の進展はないとした有効材料損傷概念を考案した ((a) 図中①+②)。

### 3-3 繰返し材料損傷概念に基づく損傷解析法

不均一塑性変形により軟質相（本鋼材ではフェライト相）で形成される平均的な長範囲内部応力は、マクロ力学的には移動硬化則に基づく背応力に対応するものと考えられる。すなわち、フェライト相内での結晶粒界や形成された転位セルによる長範囲内部応力が二相組織境界により形成されるそれよりも無視し得るほど小さい場合には、背応力が二相組織境界近傍でのフェライト相での長範囲内部応力に対応するものとして差し支えないと考えた。

そこで、連続体力学での FEM 解析に、材料構成式として非圧縮性の Mises の降伏条件を拡張した(1)式で示される非線形等方/移動硬化（複合硬化）モデルを採用した。

$$f(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_p) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{ij}$  は応力テンソル、 $\alpha_{ij}$  は降伏曲面の中心移動を表す背応力テンソルであり、 $\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_p)$  は等方硬化成分を表す塑性歪の関数である相当応力である。さらに、降伏曲面の中心移動（移動硬化則）を定める法則は、別途実施した圧縮予歪材の引張試験で得られる一軸状態での背応力  $\alpha$  の増加傾向が予歪量の増加に伴って低下するという実験結果から、(2)式で示される Ziegler の発展則に緩和項を取り入れた拡張した発展則を適用した。

$$d\alpha_{ij} = (C/\bar{\sigma})(\sigma_{ij} - \alpha_{ij})d\bar{\epsilon}_p - \gamma\alpha_{ij}d\bar{\epsilon}_p \quad (2)$$

ここで、 $C$  および  $\gamma$  は、それぞれ初期移動硬化率と塑性歪の増加に伴う移動硬化量の緩和傾向を定める材料定数である。

このような複合硬化材料モデルを適用することにより、応力反転を伴う繰返し歪付与材の二相境界近傍フェライト相での長範囲内部応力すなわち材料損傷の進展挙動を、本解析による背応力の挙動により評価できるものと考えられる。また、本解析モデルにより部材内部の応力・歪場特性や変形挙動をより精度良く解析できるものと考えられる。

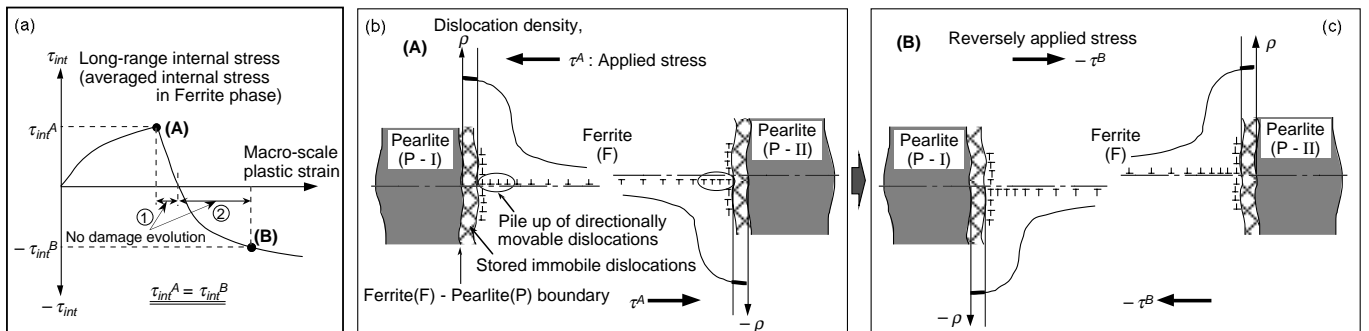


図5 考案した二相組織鋼材のメゾレベル応力・歪場特性を考慮した延性き裂発生に支配的な材料損傷概念の模式図

#### 4. 繰返し負荷を受ける部材の延性き裂発生限界予測への有効損傷概念の適用性

3章での検討により、延性き裂の発生を支配するマイクロレベルでの損傷挙動、すなわち微小ボイドの発生をもたらす損傷を鋼材の二相組織形態に依存する長範囲内部応力特性と結びつけた有効材料損傷概念を考案した。そこで、二相鋼材の延性き裂の発生限界値を単調増加型の引張試験から決定し、本概念の適用により繰返し負荷を受ける部材の延性き裂発生限界の予測を試みた。

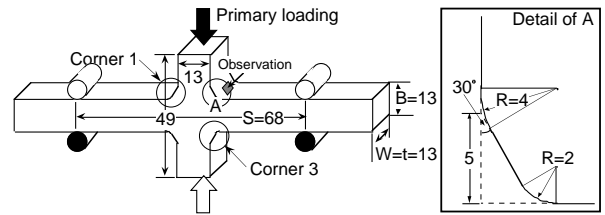


図7 正負交番繰返し载荷試験に用いた小型十字型試験片

##### 4-1 材料特性としての延性き裂発生限界値の決定

従来から、単調増加型の引張負荷を受ける場合の鋼材の延性き裂発生は、マクロ的には応力多軸場に依存した塑性歪支配型の限界値特性を示すことが知られている。そこで、図2に示した応力多軸場が異なる5種類の引張試験片を用いて、実験およびFEM解析の結果から、材料特性としての延性き裂発生限界値をマクロ力学パラメータとして相当塑性歪と応力多軸度を用いて決定した。図6に得られた結果を示す。実験で試験片中央部から延性き裂が発生したものは、従来の結果と同様に、き裂発生限界歪は応力多軸度の上昇とともに小さくなる傾向が得られた。一方、切欠き底表面からき裂が発生した試験片(R0.2およびR0.1材)では、応力多軸度にはほとんど差が見られず限界歪がほぼ一定となる結果が得られた。

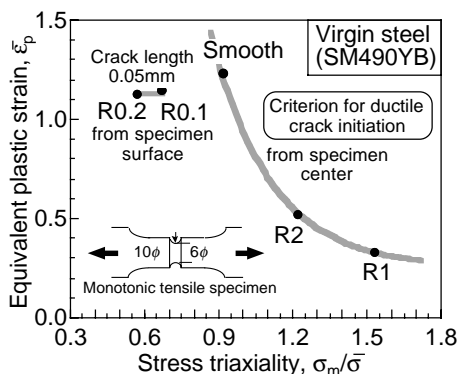


図6 単調増加型引張試験片を用いて得られた二相鋼材の延性き裂発生限界

##### 4-2 繰返し負荷を受ける部材の延性き裂発生限界の予測

相当塑性歪と応力多軸度を用いた材料特性としての延性き裂発生限界を用いて、考案した材料損傷概念を適用して繰返し負荷を受ける部材の延性き裂の発生限界を予測した。ここでは、一例として、構造部材における応力・歪集中部を模擬した試験体のき裂発生限界の予測結果について報告する。

図7に示すような、鋼板から切り出した十字型試験片を対象として、正負交番の大変形繰返し荷重を与える試験を実施した。延性き裂は、鋭い円周切欠き付丸棒試験で見られた挙動と同じで、コーナー部の応力・歪集中部表面から強せん断変形帯に沿って発生したボイドの連結により発生することが確認された。この十字型試験片の繰返しFEM解析を実施し、有効損傷概念を適用して延性き裂の発生限界を予測した。その結果を図8に示す。本概念を適用せずに予測した結果(図中、記号□)は実験結果と大きく異なっている。一方、本概念に基づいて材料損傷に寄与しない塑性歪を除外して予測した結果(図中、記号●)は実験結果と良く一致しており、

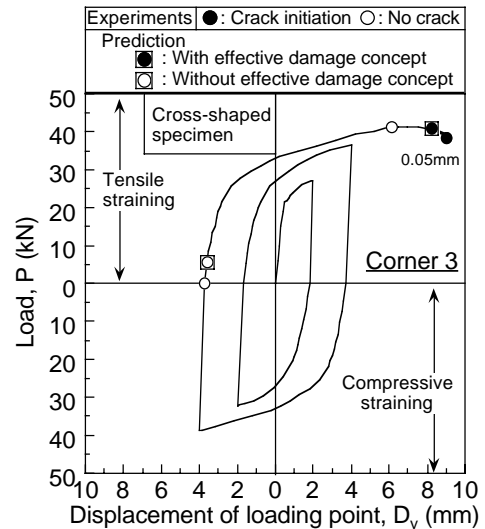


図8 有効損傷概念の適用による延性き裂発生限界の予測結果と実験結果の比較

本概念の妥当性が実証された。

#### 5. 終わりに

本報では、二相組織を有する鋼材の延性き裂発生に対する新たな損傷メカニクスの構築、およびそのためのメソスコピック解析手法を構築するための基礎的検討を実施し、延性き裂発生に支配的なマイクロ材料損傷挙動を解明した。これにより、延性き裂発生との関係を結びつけるためのメソスコピック損傷メカニクスの構築の方向性が明確にされた。一方、図1に示した本研究で目的とする鋼材の二相組織形態と構造性能としての延性き裂発生限界を相互に結びつける評価システムを構築するためには、さらに開発すべきメゾマクロ連成解析により、マイクロ損傷を捉えるメゾレベルでの応力・歪場特性がマクロレベルでの応力・歪場と連動したものでなければならない。本報では、まず二相組織形態がもたらすメゾレベルでの応力・歪場特性をマクロな力学特性に取込み、マクロ力学パラメータを用いた限界条件から、考案した材料損傷概念に基づいて繰返し負荷を受ける部材の延性き裂発生限界を予測できることを実証した。今後は、考案した有効損傷概念に見合うメソスコピック応力・歪場特性とマクロ力学特性との連成解析法の構築に向けたさらなる検討を行う。

(文献省略)