

不均質材力学の現状と材料開発への展開

—材料学と力学の融合を求めるインターフェイスメカニクス—

豊田政男

Masao Toyoda

大阪大学工学部 生産加工工学科 教授

The State-of-the-Art of Heterogenous Mechanics and Its Application to Development of Materials
—Interface Mechanics for Practical Fusion between Material Science and Mechanics—

1 はじめに

自然界に存在する物質を、我々人間が何らかの目的をもって使用すると、その物質は『材料』に変わる。しかも、人間は、使用目的を達成するために、個々の自然界の物質のみでなく、そこから抽出したり、または合成することによって新しい『材料』を生み出してきた。

一般に材料は単一の物質から成るのでなく、材料そのものが不均質であるのが普通であり、更に、最近では材料の有効利用を図るために、積極的に材料を集め、更には複合化して使用されることが多くなってきている。異なる性質をもつ材を適切に組み合わせて用いることは、必要であるもののなかなか容易ではない。

通常の金属材料でも多結晶体、すなわち、それぞれ一定の方向に強い特性を持つ単結晶の集まりである。しかし、このような異なる特性を持つものが50～100個も集まると、材料としての性質は、それぞれの個々の性質の平均的な特性を示すようになる。そのような材料に対して、力が働いたときの変形や強度を考えるとときには、本来不均質であるが、不均質とは考えず、性質は連続でどこも同じ性質を持つ材料（等方均質な連続体）として取り扱う。これが一般の「連続体力学」の基本となっている。

異材が混合あるいは接合されて作られている、あるいは意図して作った『不均質材』の評価において、力学的特性の異なるものが混合・接合されていることによって外力と材料内の応力・歪分布などの変形の関係がどうなるかが問題となる。また、材料の性能評価にとって、変形状態を代表する「力の流れ」とともに、使用に耐える、あるいは壊れるなどの限界を与える「強度」を知ることが重要である。均質でない材料、あるいはそれらが用いて作られた構造・製品の力学挙動を取り扱うものが「不均質材力学」と呼ばれている。

本稿では、不均質材力学の基本とそれを材料特性の制御

にどのように活かしていくべきかについて考える。

2 不均質を考える —不均質材の力の流れ—

2.1 構造化を支える不均質材力学

材料あるいはそれを用いた構造が使用されるためには、ニーズに対応する必要性能・機能を満足することが必要であり、それらを満足させるように開発・製作が行われる必要がある。材料に関して、要求性能・機能を満足させるものを合成・創成することを、『材料設計』と呼ぶ。ここでは、材料のもつ特性を最大限活かすことを『材料構造化』と呼ぶ。材料を目的に合わせて作るのに、材料構造化には不均質材に対する評価が不可欠である。製品が使用状態にあるときに材料の破損などを伴わず機能が発揮されることが必要で、この「破損が生じないようにする」手法を明らかにすることが「力学」的評価である。

特に材料構造化・複合化にとって、異なった性質を持つ材料の「つなぎ」が重要となり、その異材の「つなぎ」を力学的に扱おうとするものが『不均質材力学』である。

2.2 なぜ不均質界面端部で応力集中が生じるのか

材料そのものの不均質、あるいは異なる材料が組み合わされた巨視的不均質のいずれであっても、不均質が存在することによって、不均質部近傍の変形がどのようなかが重要である。不均質材では、例え切欠きのような形状的な不連続が存在せず平滑な形状のものであっても、材料が不連続になる部分で応力の分布が生じる。形状的に均一なものに応力の分布が生じるのは、その部分部分で変形に差が生じ、その変形を整合させるように変形するためである。例えば、材料の一部分が低強度であるものを含む、いわゆる軟質溶接継手が巨視的な引張りを受けた場合、高強度材によって低強度部の塑性変形が拘束される結果、低強度部

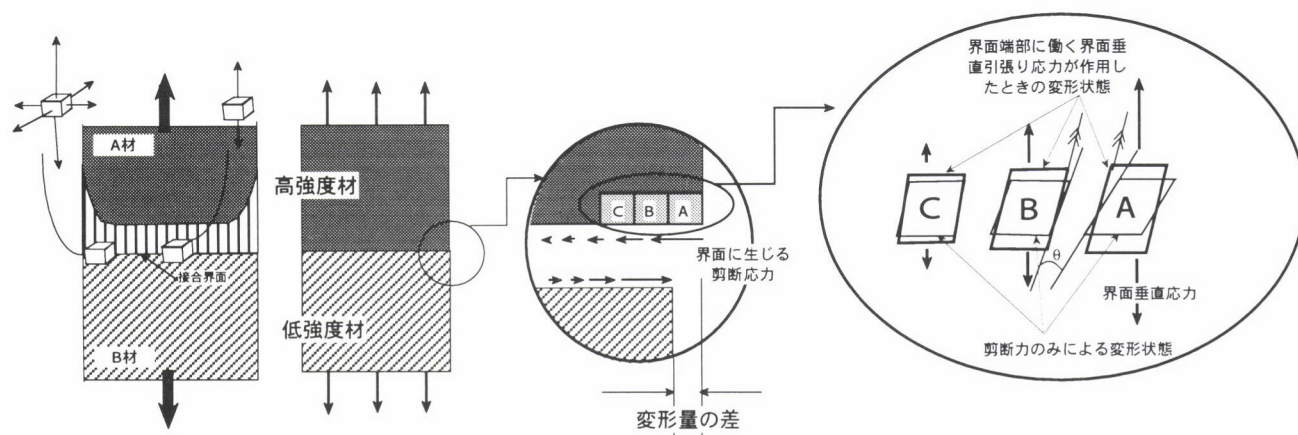


図1 異材接合界面端部における変形と界面垂直応力集中が生じる理由の説明図

は多軸引張り応力状態となり、引張応力が大きくなる¹⁾。

異なる材料を接合してお互いの特性を活かして総合的に高機能となることを期待して使われる複合化材料では、異材接合界面の応力、特に異材接合界面端部の応力特性が問題となる。例えば二つの異なる材の接合体が接合界面に垂直に一樣な引張り力を受ける場合、異材接合界面端部のみが平均引張り応力よりも大きくなる。図1²⁾は、なぜ界面端部で界面垂直方向の応力が大きくなるかを説明したもので、もし、それぞれの材が一樣な引張り力を受けると前述のように強度や縦弾性係数などの変形抵抗の差のために変形量に差が生じる。この差をうめるために界面に沿って剪断力が生じるが、その大きさは変形差の大きな界面端部で大きくなる。いま、図に示すような界面端部の微少な要素A、B、Cを考えると剪断応力のみが作用するときには端部に近い要素A、B、Cの順にゆがみの大きな剪断変形が生じるが、そのままでは、要素Aと要素Bの側面は平行とならず、元々一体の要素AとBが接合された状態となるためには界面垂直方向の引張り力が作用して、引き延ばされた状態とならねばならず、そのため界面端部では大きな界面垂直応力が働くことになる。

この界面端部は、力学的には「特異点」とよばれ、界面端部では応力が発散する(無限大の大きな応力となる)。界面端部からの距離を r とすると、界面端部近傍の応力成分 σ_{ij} は、

$$\sigma_{ij} \propto 1/r\lambda$$

のように表され、この λ は「特異性指数」と呼ばれ、特異性の強さを表す指標で、主に両材料の縦弾性係数の比や降伏応力の比などに依存する³⁾。また、 λ は界面端部近傍の形状にも大きく依存するので、界面端部の形状の制御は端部集中応力を低減するのに重要な因子となる。

このように、異材が接合されている場合、接合界面端部

の処理が重要で、界面端部の処理を誤ると接合界面破壊などの問題が生じ、接合による機能向上が果たせないことになる。

2.3 微視的不均質がもたらすもの

現実には存在する工業材料は、既に述べたように微視的に見ればいろいろな特性を持つ材の集まりで、微視的不均質の存在は避けがたい。そのような不均質が存在するときでも、力の流れの基本的な特性はこれまで述べたとおりであるが、局部的に強度的不均質な部分が存在する場合の不均質部周りの応力・歪の代表的特性をまとめたものが図2である。不均質部の形状の代表例として矩形状の不均質部を取り上げてあるが、図に示すように、不均質部およびその周りでは応力や歪が大きくなったり小さくなる現象を示し、その挙動が後に述べるように破壊特性を大きく左右するようになる。

このような応力・歪特性は、異なる相の界面での剥離破壊や硬化部での割れなどの破壊を生じやすくすることになり、局部的な不均質部の制御が重要であることを物語っており、局部的不均質の存在による変形特性の変化を知ることとは材料設計にとって重要である。

3 不均質をめぐる最近の力学的話題は—Mis-Match問題—

材料の不均質に注目した力学的評価に関しては古くから研究が行われており、溶接部に関して不均質問題を扱った我が国での研究の流れを見ると、(1)20数年前の軟質溶接継手の強度問題、(2)10年ほど前の溶接熱影響部粗粒域の局部脆化部(LBZと呼ばれた)問題、を中心とした研究論文が多く見られ、最近になって改めて、その流れがヨーロッパ

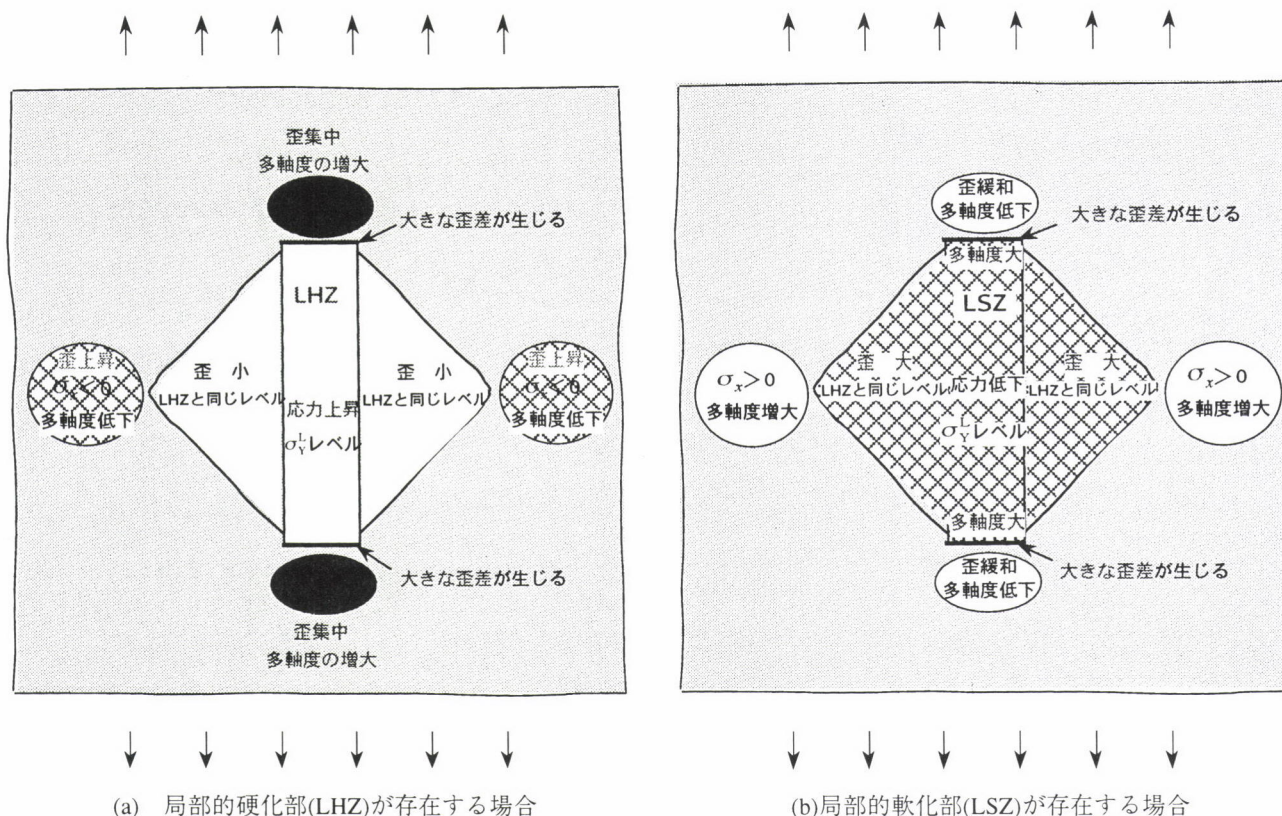


図2 局部的不均質を持つ材が引張りを受けるときの不均質部周りの変形の特徴

を中心とした不均質問題の研究の流れにつながっている。その流れの集大成として、1993、1996年に溶接部の「Mis-Match」を主題とする国際会議（ドイツのGKSSが主催）が開催され多くの研究者の注目を集めた。ただ、大きな流れの中で、解析や計測手法の進展による新しい知見も得られているが、我が国ではかなり前に取り上げられていたものも数多い。

このような流れの中で、最近大きく問題として取り上げられている問題は、

- (a) 溶接継手における溶接金属のマッチング問題、特に破壊特性とマッチングの問題
- (b) 異材接合界面問題：異材接合界面端部の力学的特異性問題と界面強度評価問題
- (c) 異材接合体の熱応力・残留応力問題
- (d) 塑性拘束問題：強度的不均質に起因する変形拘束が破壊挙動に及ぼす影響問題
- (e) 微視的不均質問題と材料組織制御への展開

などがあり、特に、(b)の異材接合界面問題、(d)の塑性拘束問題、(e)の微視的不均質の力学的取り扱い問題は、現在、不均質材力学研究分野で大きな流れとなっている。

これらの問題を統合的に取扱う学問体系として、著者は「インターフェイスメカニクス (Interface Mechanics)」

なる体系を提案している²⁾。

特に、本稿では紙面の都合で、不均質材や接合界面の破壊問題のみを重点的に取り扱うが、問題となるのは、不均質の存在がもたらす変形挙動への影響と、不均質材での破壊の発生・伝播のクライテリオンである。破壊の力学的な取り扱いについては「破壊力学 (Fracture Mechanics)」という体系が古くから提案されており、破壊力学の基本は亀裂を持つ材料を考え、「亀裂先端近傍の変形パラメータ」と、「それに対応する破壊抵抗」を対比させて破壊問題を考えようとするものである。次項以降で述べるように、いろいろな不均質材を取り扱うとき、単純に従来の破壊力学パラメータを用いることはできず、不均質材に対しても適用できるような統合的な評価手法が必要となる。

4 不均質がもたらす破壊問題の統合的評価へ

4.1 異材接合界面の破壊強度評価はどうする

接合界面強度に注目するときの異材接合界面がもつ特徴を形状的、材質的、付加応力の因子の三つに分けて主なもの挙げると図3のようになる²⁾、これら因子が存在するために、接合界面の強度評価には均質材と異なる難しさがあ

る。特に、界面強度を決める接合界面の破壊は、異材接合界面端部や界面の欠陥部・形状変化部などの力学的特異点から生じる場合が多く、それを考慮した力学的評価パラメータが必要となる。

異材接合体の強度評価でこれまでに用いられている指標は、大きく分けて、「単一評価パラメータ法」と「複数評価パラメータ法」の2つがある。前者に属するのが、a) 接合界面の平均的な応力：公称応力法、b) 接合界面の破壊点近傍の応力：最大応力法、c) 破壊発生点近傍の応力特異場の大きさ：特異場応力法⁴⁾、などがあり、後者に属するものとしては、d) 特異性パラメータと特異場の大きさ： $\kappa_{cr}-\lambda$ 法⁵⁾、e) 特異場に仮想した亀裂による応力場の変化：特異場仮想亀裂法⁶⁾、などがある。

(1) 単一評価パラメータ法

異材接合界面強度評価については、応力の分布が複雑に変化するためa)のような平均値指標では評価できないことは理解できる。そこで、応力の集中特性を考慮したものとして、b)の最大応力を用いることが考えられ、有限要素法などの数値解析が容易に使えるようになって多くの研究成果の中でも用いられているが、破壊発生点となる異材接合界面端部は力学的には特異点となり、最大応力をどのような形で求めるのが問題となる。数値計算の仕方でも値がどうにでもなり、都合のよい評価がなされている文献なども見られる。

破壊発生点近傍の接合界面は前述のように特異応力場を持つ。主に亀裂を持つ材の破壊を対象とする線形弾性破壊力学では、亀裂先端の特異応力場の大きさを表す応力拡大係数 K が破壊パラメータとして用いられている。c)の方法は、この方法のアナロジーによって、接合界面端部での応

力場の大きさ κ を破壊指標として用いようとするものである。この方法が妥当となることは、溶射皮膜の界面密着強度評価試験法の一つであるピンテストに適用し、 κ を破壊指標として用いたときの限界値 κ_{cr} が皮膜厚さや試験片形状に依存しない材料定数となることが示されている⁴⁾。ピンテストなどの比較的限定された条件の下では応力特異場の大きさを指標とする単一評価パラメータ法も工業的には適用可能である。

(2) 複数評価パラメータ法

接合界面端部近傍の応力特異性が材料の組み合わせと、試験片形状などに依存するため、c)のような限界応力特異場の大きさ κ_{cr} を指標とした場合、試験片ごとに異なる値となる。そこでd)では、物理的意味はともかくも、限界応力場の大きさは応力特異性パラメータ λ の関数とする考え方が提案されている⁵⁾。また、e)は、亀裂を仮想し、その亀裂の大きさの変化による応力状態の変化をパラメータとするものである。これらの提案は、異材接合界面の破壊（発生）強度は、破壊発生点近傍の応力分布の変化が重要であることを指摘するものであるが、パラメータの物理的意味を必ずしも明確にするものではない。

4.2 応力分布場をもつ材の脆性破壊発生評価

パラメータの提案

(1) 応力分布場の破壊限界指標としてのワイブル応力

多くの破壊は応力集中部から生じるわけで、破壊を考えると応力分布場の取り扱いが問題となる。脆性破壊を呈する材料においては、材料の破壊強度などのばらつきを取り扱う手法としてローカルアプローチがある⁷⁾。そこでは破壊が生じる高応力部分の応力の大きさと高応力域の広がり（大きな応力を呈する領域の体積）を考慮したパラメータである次式のワイブル応力 σ_w が評価に用いられている。

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \int_{V_{process}} (\sigma_{eff})^m dV \right]^{1/m}$$

したがって、破壊発生点近傍の応力分布が与えられている場合、材料（界面特性）にのみ依存する指標 m を用いてワイブル応力が計算でき、また、限界ワイブル応力が既知の場合には、異材接合界面での応力分布を解析によって求めることによって、破壊応力などの限界値が求められる。異材接合界面に対するワイブル応力の算出方法についても明らかにされている⁸⁾。

ワイブル応力は、前述のように基本的には応力の大きさとその広がり（領域の体積）の二つの因子を含むパラメータである。異材接合界面の応力が支配的な破壊の場合で、もし、界面端部近傍の応力成分が同じ特異性を持つ場合は、限界ワイブル応力を破壊指標とする考え方と前述のc)の特異応力場の大きさ

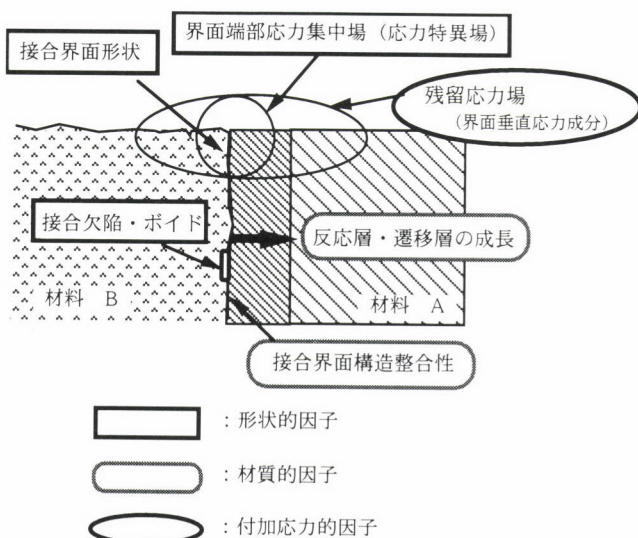


図3 異材接合界面の強度支配因子

きさのみを指標とする考え方とは同じものとなるのが導かれ、ワイブル応力を破壊限界指標とする方法は、これまでの手法を包括するとともに、破壊条件の考え方に意味を与える統合的な取り扱いができる方法といえる。

このワイブル応力を用いた評価は、溶接部のような巨視的な強度不均質を持つような場合の破壊靱性評価やその破壊評価への応用に関しても統合的な取り扱いを可能とするものであり、また、次項に述べる材料開発への展開においても活用できる考え方である。

5 不均質材力学の材料開発への展開を目指して —微視的不均質を考慮した材料の組織制御の方向を知る—

5.1 材料の微視的不均質と破壊

材料に微視的な不均質が存在しても、引張り強さのような巨視的な強度は、微視的不均質の影響は小さく、平均的な性質を示す場合が多い。それに対して、材料の破壊特性、特に材料のミクロ的な破壊の芽の発生には、微視的な不均質の存在の影響が大きい。破壊特性を考えると、微視的不均質は、マクロ的な不均質の場合と同じように、a) 各部の強度が異なる強度的不均質、と、b) 各部の破壊限界が異なる靱性的不均質、の二つに分類できる。

材料で微視的不均質が存在する例は数多いが、破壊が問題となるような代表的なものを図4に示す。いろいろな第二相が含まれる材料では、一般には、靱性の低い脆い相は硬いことが多く、脆くて高強度な相の存在が問題となる。

微視的不均質でも、特に強度的な不均質が存在すると、材料の各部分の応力や歪の大きさが異なり、その結果として材料の破壊の芽を作ったり破壊が伝播しやすくなったりして、破壊強度や変形能が異なることになる。また、材料設計においては、それぞれの相の材料特性を制御するとともに、第二相の形態（形と分布）をどのように制御するかが重要となる。

5.2 微視的不均質と材料の破壊の形態

微視的なレベルで強度的不均質が存在する材料の破壊形態は、強度的不均質に起因する応力・歪分布の影響を受ける。特に、強度の高い「硬い相」の周りの変形特性が破壊の発生特性を大きく支配する。生じる破壊の種類は材料によって異なるが、静的な荷重を受ける場合の代表的な破壊様式は「劈開亀裂」と「延性亀裂」のいずれかである。どちらの亀裂が先に生じるかは、材料の持っている破壊変形抵抗に依存する。

「劈開亀裂」が生じる場合、一般には、a) 硬い相そのものの、b) 硬い相と軟らかい相の界面近傍、さらにはc) 軟らかい相内、の三つの破壊形態が考えられる。硬い相で破壊が生じるのは、引張り応力が働く方向に比較的細長い形状の場合が多い。それは、図5で説明するように、引張り応力を受けると硬い相が存在しても比較的小さな応力レベルで硬い相に塑性変形が生じ、その部分には硬い相の降伏応力レベルの応力が生じる⁹⁾。その応力の大きさは、硬い相の形には大きくは依存しないが、図に示すように引張られる

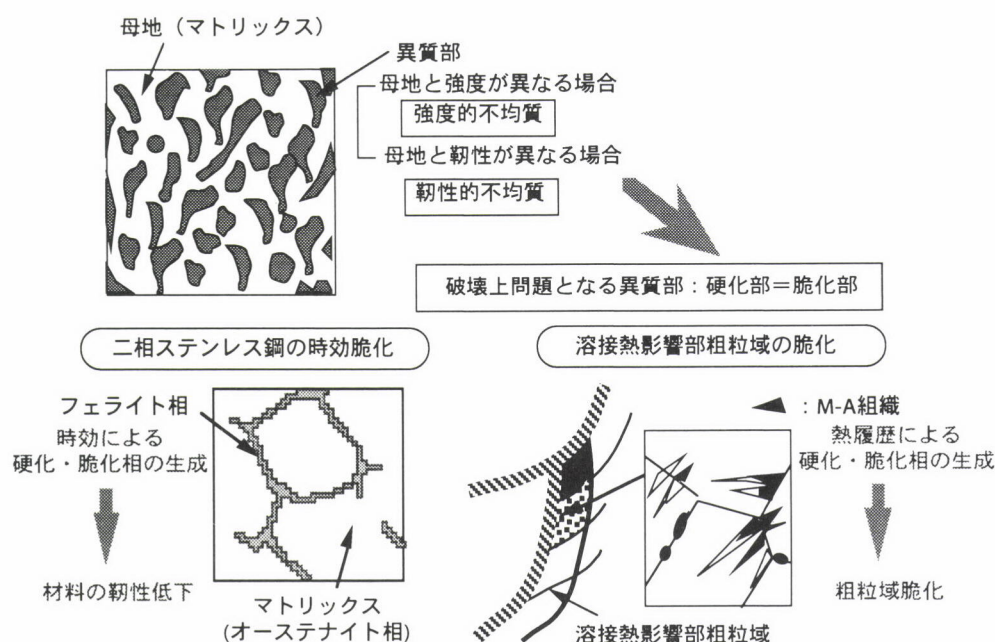


図4 材料中の微視的不均質と微視的不均質が破壊性能を支配する代表例

方向に細長い形状のものは、大きな応力が生じる領域が広がる^{9,10)}。材料特性はミクロ的にもばらつきを持つので大きな応力が生じる領域が広がると、それだけ破壊が生じやすくなる。

一方、例え軟らかい相（母地、あるいは第二相とも）であっても、図6に示すような硬い相に囲まれた部分では、あたかも全体が硬い部分であるような挙動を示すため¹¹⁾、図5と同じようにその部分の応力は硬い相の降伏応力レベルとかなり大きなものになる。一般に材料の破壊限界応力は、その材料の降伏応力に依存するため、軟らかい相と硬い相の強度差が大きい場合、軟らかい相内であっても劈開亀裂が生じることがある。

延性亀裂の発生は、歪の大きさに決まるため、変形のしやすい軟らかい相で生じることが多い。これまでの延性破壊の理論で指摘されているように、MnSや炭化物などの介在物が延性亀裂の基本的特徴であるデンプルと呼ばれる破面の発生源となることは知られている。結晶粒の大きさを超えるもう少し大きなスケールでの不均質をもつ場合は、硬い相が存在すると、硬い相の周りで歪の大きくなる部分が存在し、その部分で介在物を起点とする延性亀裂が発生しやすい。

このようにマイクロ亀裂の発生は、微視的不均質の状態、特に、(a)それぞれの組織の強度レベル、(b)硬い組織の形状、特に細長比 (slenderness ratio)、(c)硬い組織の分布状態、特に近接状態、(d)母地の組織、硬い組織か軟らかい組織か、などに依存するため、生じる組織の材質そのものとともに「形状と分布」の制御が重要である。

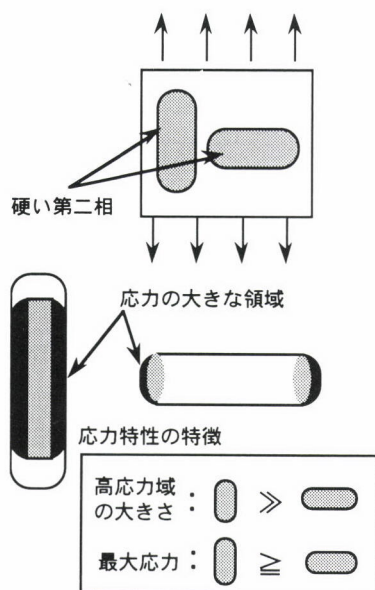


図5 細長い硬化相内の応力特性の説明図

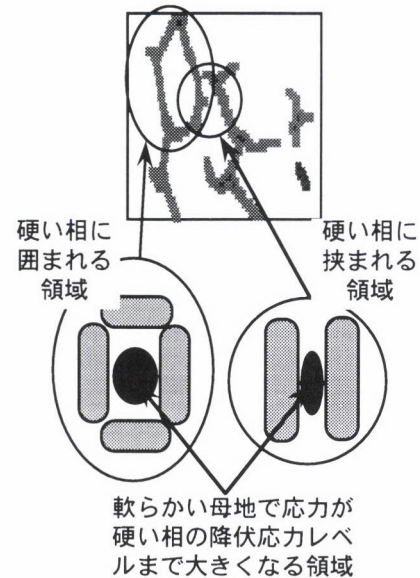


図6 硬化相に囲まれた軟らかい母地の応力特性の説明図

5.3 微視的破壊発生の評価手法

微視的不均質を制御して破壊性能に優れた材料を設計するには、微視的不均質の影響を掴むことができるような評価の方法が必要である。そのためには、a)微視的不均質をどのようにモデル化し、変形特性を解析するか、と、b)応力・歪などの力学的な指標を用いて亀裂発生などの破壊限界をいかに評価するか、の二つが問題となる。

破壊発生の評価には、何らかの破壊限界条件を考える必要がある。破壊には劈開亀裂か延性亀裂かによって用いられる破壊条件が異なるが、例えば、微視的不均質を持つ材の変形解析結果に対して、

- 1) 劈開亀裂発生判定：注目組織の応力分布の情報を用いて、前述のローカルアプローチに基づくワイブル応力を計算し、その大小で亀裂発生に及ぼす組織形態の影響を判断できる。
- 2) 延性亀裂発生判定：延性亀裂発生限界条件については、現状必ずしも明確とはいえないが、延性亀裂は歪依存型で、その破壊限界歪はその場所での応力の多軸度に依存することが知られおり、例えば、島貫¹²⁾は破壊相当塑性歪 ϵ_P - 応力多軸度 $\sigma_H/\bar{\sigma}$ (σ_H ：静水圧応力、 $\bar{\sigma}$ ：相当応力) 関係を指標ととり、その限界曲線が材料ごとに存在することを示している。その限界条件の考え方を用いると図7に示すように、解析によって求められた各位置での $\epsilon_P - \sigma_H/\bar{\sigma}$ 関係をプロットして、その集合の中で一定の傾きを持つ限界曲線で η 値が最大となるようなときの η 値を指標として用い、その大小で亀裂発生に及ぼす組織形態の影響を判断できる。

微視的不均質を持つ材の組織制御にこれらを活かすためには、不均質を持つ材の基本的な不均質パターンに対して

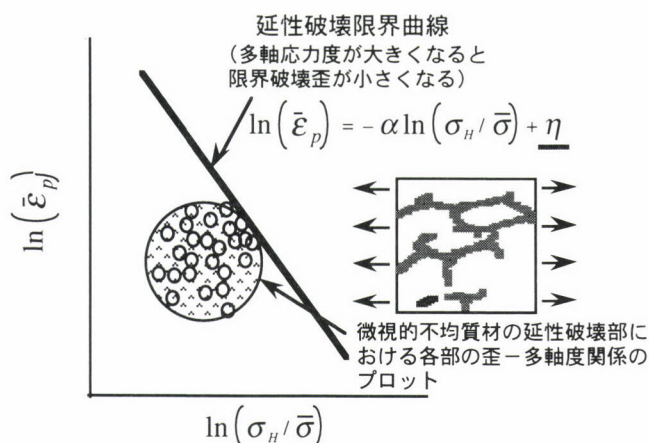


図7 微視的不均質を持つ材の各部の応力・歪解析結果を用いた延性亀裂発生限界指標の評価方法の例

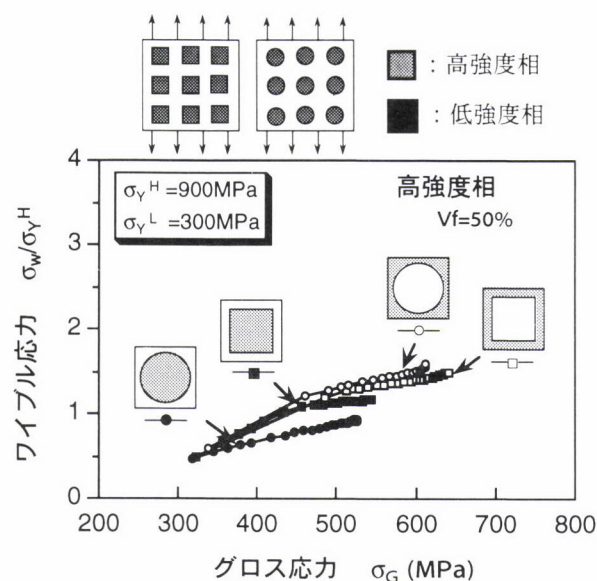
変形解析を行い、上述のワイブル応力や延性破壊限界指標をもとめ、対象とする破壊に対して抵抗が大きくなるように（ワイブル応力や η 値が小さくなるように）、各組織の強度レベル、第二相の形状・寸法などの組織形態などのあり方に関して最適な方向を探ることができる。

一例として図8に、図中に示すような第二相もつ材料を考え、第二相の形状が円形か矩形か、また、母地が軟質か硬質かによって上記の破壊限界指標がどのように変わるかを示す¹³⁾。例えば、硬い相が存在するときには、軟らかい母地に丸い形で硬い相が存在するときに劈開破壊が一番生じにくいこと、また、軟らかい相で延性破壊するときには、軟らかい相を硬い相でくるむ形で、しかも矩形の形状の方が軟らかい部分での延性亀裂が生じにくいことなどが分かる。ここではごく基本的な場合の結果のみについて示したが、既にいろいろな不均質形態についての解析を進めており、二相組織金属についてのデータベースを構築すること、破壊限界についての観察の蓄積が重要である。このような解析は既に材料設計に活かされている例もある¹⁴⁾。

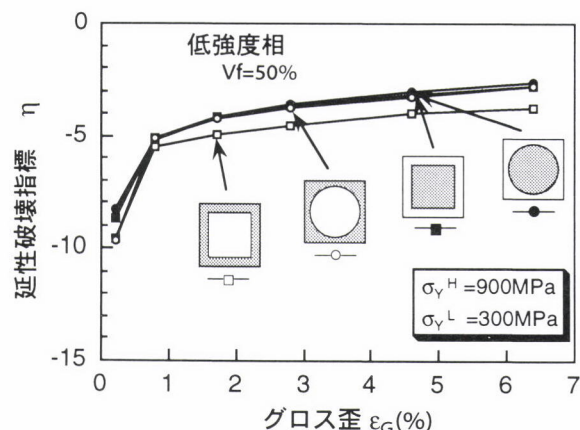
このように、微視的不均質を持つ材の変形挙動に関する解析・評価を通じて混合組織材料の破壊特性を制御するなど、材料の設計に活かすことが可能である。

6 おわりに —不均質材力学を活かすために—

不均質性は材料にとっての本質である。材料の構造化が活きるためには、不均質に伴う特性をいかに活かすかが問われる。多くの材料開発については材料の作り方に重点が置かれていることも事実である。その一方で、力学的な取り扱いでは、出来上がった材料の性能評価に重点が置かれ、「材料ありき」からの展開であることが多かった。



(a) ワイブル応力に及ぼす不均質形態の影響



(b) 延性亀裂発生限界指標に及ぼす不均質形態の影響

図8 微視的不均質を持つ材の不均質形態の基本パターンにおける劈開・延性亀裂発生限界指標の計算例

ここで述べた重点は「材料学」と「力学」との接点を求めようとするものであり、「不均質材力学」あるいは「インターフェイスメカニクス」の本質はその接点を創り上げ、実際の材料開発・材料評価に活かすことにある。

鉄鋼材料の特性制御に関しても、材料の微視的・巨視的不均質を活かした形で検討されることはまだまだあるのではなかろうか。本稿では、異なる分野の情報・解析などの融合は、新しい材料学の分野を生み出す可能性のあることであり、今後の発展が期待される。

参考文献

- 1) 佐藤邦彦, 豊田政男: 溶接学会誌, 40(1971), 885
- 2) 豊田政男: インターフェイスメカニクス, 理工学社 (1991)
- 3) 例えば, D.B. Bogy: Int. J. Solid Struct., 6(1970),

1287

- 4) 例えば, 井上好章, 豊田政男: 溶接学会論文集, 9-1(1991), 167, など
- 5) 例えば, 服部敏男: 日本機械学会論文集 (A編), 54(1988), 597, など
- 6) 例えば, 寺崎俊夫: 溶接学会全国大会講演概要, 47(1990), など
- 7) 例えば, Beremin, F.M.: Metal Trans. A, 14A(1983), 2277
- 8) Satoh, S., Tsukamoto, M., Mimami, F. and Toyoda, M.: Proc. of 15th Int. Conf. on OMAE, Vol.III, (1996), 157
- 9) 例えば, 豊田政男, 南二三吉: 鋼溶接熱影響部靱性に果たす局部的硬化部まわりの応力・歪特性の役割, 日本造船学会論文集, 171(1992), 427, など
- 10) 例えば, 豊田政男: 鉄と鋼, 78(1992), 1407, 及び, 溶接学会誌, 62(1993), 603-616, などを参照
- 11) 野口泰隆, 南二三吉, 豊田政男: 溶接学会全国大会講演概要, 59
- 12) 島貫広志: 溶接学会全国大会講演概要, 57(1995)
- 13) 豊田政男, 南二三吉: (to be published)
- 14) 川端文丸, 天野虔一, 板倉教次, 南二三吉, 荊洪陽, 豊田政男: 日本造船学会論文集, 173(1993), 349, など

(1997年1月20日受付)