



表1 不均質材における不均質な特性の代表例とその影響(豊田)

不均質な特性	特に重要な影響	不均質性の具体例
弾性定数	接合界面端部の応力特異性 ⇒集中応力分布の形を決定	金属とセラミックスの接合体など 溶射皮膜, 薄膜
強度 (変形特性)	不均一変形 ⇒応力・歪の集中, 変形の先行 ⇒界面付加応力⇒界面剝離割れ 変形拘束 ⇒延性強度の上昇 ⇒多軸応力度の増加による破壊	二相金属や複合組織材料 局部的硬化・軟化部 クラッド材, ろう接, 接着継手 軟質溶接継手, 鋼溶接部 HAZ 軟化, ろう接継手 硬質溶接継手
破壊靱性	局部的脆化部 (LBZ) の存在 ⇒靱性のばらつき ⇒寸法効果 接合部の脆性体の先行破壊	鋼溶接 HAZ 粗粒域 複合材料亀裂材 金属とセラミックスの接合体 界面反応相第二相の生成
熱定数	不均一熱変形 ⇒熱応力・残留応力 ⇒真性内部応力	セラミックスと金属の接合体 溶射皮膜, 薄膜

## 2.2 不均質材の力学的分類

現実の材料で, 不均質というとき, どのような性質の不均質が問題となるかは, 注目する評価特性に依存する。表1は, 複合化材料や鋼溶接部などで問題となる主な不均質性とその影響及び具体的な例をまとめたものである。

不均質材と異材界面の形態は, 注目するスケールによって異なる。二つの異なる材料からなる場合でも, 巨視的なレベルでの力学的取り扱いからは次の三つに分類される,

①巨視的等方性不均質材: 粒子均一分散強化材料, など

②巨視的異方性材料(多くの場合直交異方性体): 長繊維強化複合材料, 一方向凝固合金, 強圧延金属板, など

③巨視的異材接合体(等方性材料の接合): 金属/セラミックス接合体, クラッド鋼板, 異材溶接接合体, など。

これらの不均質材の変形を取り扱う場合, 全体的な変形, すなわち構造部材としての変形を考える場合と, 材料の破壊特性, 特に接合界面近傍の変形を考える場合とで, 注目すべき点が異なる。いずれにしる不均質材では, 異方性を考える必要性が生じる場合と, 異材が接合されている界面の挙動に注目しなければならない場合の二つが基本となる。

## 3. 不均質材の変形のいくつかの特徴

### 3.1 不均質材の変形特性

不均質材と均質材の力学的変形特性の大きな差は, 表1に示したように,

◇力の伝わり方, 特に応力・歪の集中や緩和などの不均一な変形の発生, 中でも応力特異現象の存在, と

◇残留応力のような熱定数が異なることにより生じる付加的な応力の発生  
の二つが挙げられる。

図1は, 材料の弾性係数や降伏強度等が異なる場合の変形の特徴を簡単にまとめたものである。異材接合界面を持つ不均質材で問題となる力学的特徴は:

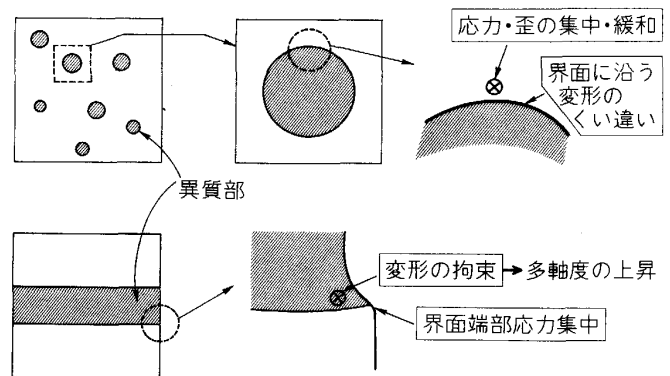


図1 代表的な強度的不均質をもつ材の変形の特徴

①異なる材料の接合界面で生じる変形の食い違いと応力集中・応力緩和現象, と

②異材接合界面の端部が存在するときの界面端部での応力集中, 特に界面垂直方向の応力の集中, の二つである。

### 3.2 接合界面端部の応力特異挙動

いま, 弾性定数の異なる二つの材料の接合体の界面近傍の応力特性について考える。異材接合界面において, 応力特性が問題となるのは接合界面と垂直方向に引張りを受ける(直列モデル)場合である。界面方向に垂直な単純引張り力を受ける二材の接合界面近傍の変形を考え, もし二材が接合されていなければ, 図2(a)のように幅方向に変位差が生じる。二材が接合されているので, この変位(歪)差をなくするために剪断応力が界面に沿って生じ, (b)図のように変形する。剪断力は端部程大きくなり, 端部近傍の微小要素の変形は(c)図に示すようになって, 剪断変形のみでは要素間の変形が適合せず, 図のような界面に垂直な引張り応力が生じることになる<sup>1)</sup>。接合体の負荷形態に関係無く界面端部ではこのような応力集中が生じる。この応力分布及び集中応力の大きさは二つの材料の弾性係数の組み合わせに依存する<sup>3)~6)</sup>。

異材接合界面端部に生じる応力集中は, 均質材のき裂

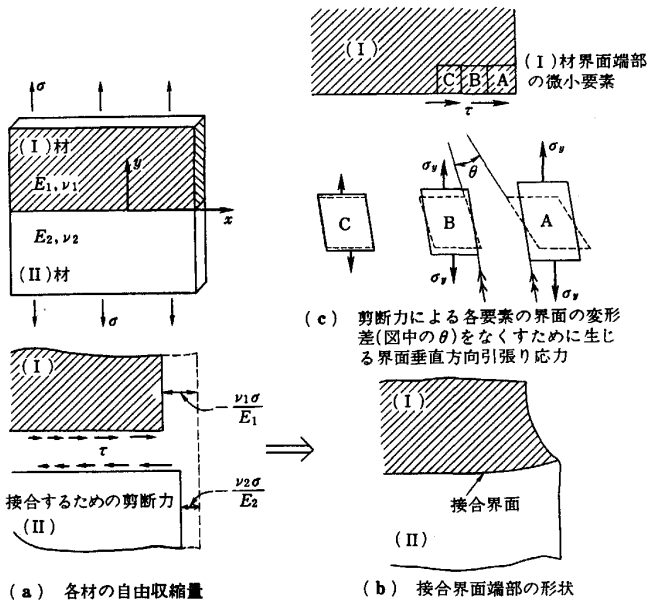
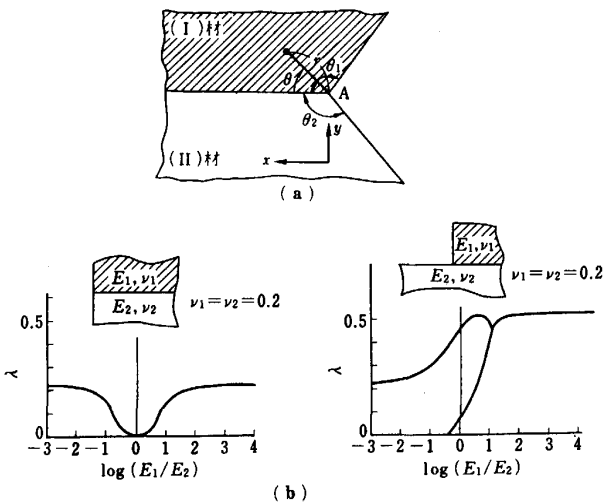


図2 異材接合界面での変形と異面端部に生じる応力集中の説明図(豊田)<sup>1)</sup>



(b)図の場合には  $\log E_1/E_2$  が0近傍では二つの特異性パラメータをもつ

図3 異材接合界面端部における特異性パラメータ $\lambda$ と二材の縦弾性応力の比 $E_1/E_2$ の関係(Heinらより作成)<sup>8)</sup>

先端や食い違い中心と同じように、力学的には応力特異点となる、弾性き裂先端近傍では、応力・歪はき裂先端からの距離 $r$ の平方根に逆比例する特異性を示すが、異材接合界面端部では、界面端部からの距離を $r$ とすると、近傍の応力成分 $\sigma_{ij}$ は、 $\sigma_{ij} \propto 1/r^\lambda$ と表される。ここで $\lambda$ は特異性パラメータである。この特異性パラメータ $\lambda$ は、図3(a)に示すような、界面端部の各部材の開き角 $\theta_1, \theta_2$ をもつ二つの異なる弾性材料の接合体について、二次元弾性論に基づく固有関数展開法<sup>7)</sup>によって、特性方程式を解くことによって求められる。図3に代表的な端部形状に対する特異性パラメータと材料

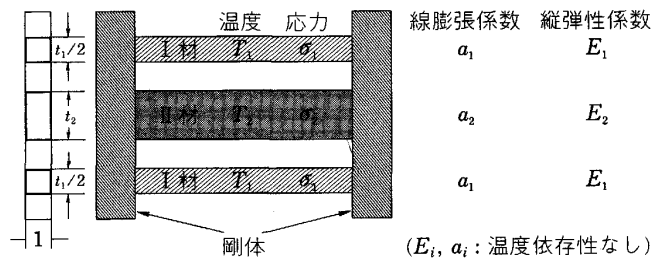


図4 二材接合基本モデル

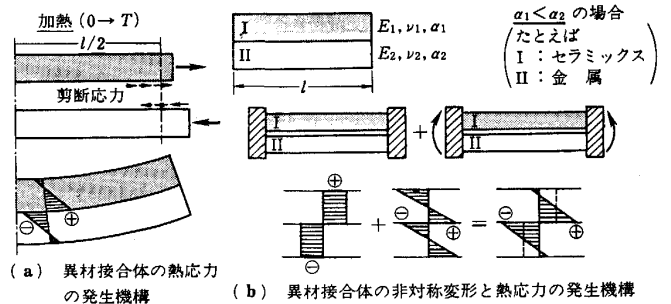


図5 異材接合体の熱応力発生機構の説明図(豊田)<sup>1)</sup>

の弾性定数の組み合わせの関係の計算例を示す<sup>8)</sup>。

### 3.3 異材接合体の熱応力・残留応力

不均質材あるいは異材接合体における力学的特徴の代表的なものに熱応力問題がある。材料はそれぞれの物性値をもち、複合化するために用いられる材料の組み合わせは、多くの場合それらがかなり異なる。熱応力を問題とするとき、問題となるのは材料の線膨張係数 $\alpha$ と縦弾性係数 $E$ である。一般の複合化では、基材となる金属材料に比べて、高性能・高機能材料であるセラミックスや高融点金属などは線膨張係数が小さく、弾性係数が同程度か、大きいものが多い。

材料の線膨張係数 $\alpha$ の差のために生じる熱応力を説明するために、図4のような異なる二材が剛体に接合されたモデルを考える。図のように材料定数などを決め、それぞれの材料が $T_1, T_2$ だけ温度上昇したとする。両材の熱歪と機械的歪の和で与えられる見かけ上の歪が等しいことより、(I)、(II)材に生じる応力を $\sigma_1, \sigma_2$ とすると、各材の応力は

$$\sigma_1 = \frac{(\alpha_2 T_2 - \alpha_1 T_1) E_1}{1 + E_1 t_1 / E_2 t_2}$$

$$\sigma_2 = \frac{(\alpha_2 T_2 - \alpha_1 T_1) E_1 (t_1 / t_2)}{1 + E_1 t_1 / E_2 t_2}$$

いま、皮膜・薄膜のように $t_1 \ll t_2$ とすると、 $\sigma_1 = (\alpha_2 T_2 - \alpha_1 T_1) E_1$  ;  $t_1 / t_2 \ll 1$ となる。

熱応力は、二材の熱歪差 $\alpha_2 T_2 - \alpha_1 T_1$ に比例し、材料の弾性定数の影響を受けることが分かる。

異材が接合されているときには、図5のように材料間

の自由熱膨張の差をうめるために界面に剪断応力が生じ、さらに非対称配置の場合には図のように曲がり変形が生じる。この場合端部ごく近傍を除いた部分では図(b)のように二材接合モデルの軸力のバランスと巨視的な曲げを組み合わせた熱応力が発生する。

異材接合体で熱応力が特に問題となるのは、異材接合界面端部である。その部分での熱応力の特徴は：

①端部ごく近傍に、大きな剪断応力が生じ、界面端部の存在が界面垂直方向集中応力を生じさせる。端部近傍以外は界面と平行方向応力のみが生じる。

②端部近傍では応力集中が著しい。界面端部近傍の応力分布の形は、材料定数の組み合わせによって異なる。

③端部近傍に生じる最大引張り主応力方向は界面とある傾きをもつ。

弾性熱応力場の特異点近傍の応力成分  $\sigma_{ij}$  は

$$\sigma_{ij} = \lambda r^{-\lambda} + \sigma_0$$

の形をしている。第一項の  $\lambda$  は特異性パラメータである。 $\sigma_0$  は非特異項であり、外的負荷による場合には、この非特異項が第一項に比べて小さく無視できるのに対して、熱応力問題では、端部近傍の集中応力に比べてもかなり大きいのが特徴である。

不均質材の熱応力・残留応力の計算には、数値解析がよく用いられる。最近汎用コードも多く、簡単に計算できるが、その場合以下の点に注意すべきである<sup>1)9)</sup>。

①メッシュサイズが結果に大きな影響を与えるため、その決定には、注目する現象に応じた注意が必要である。特に、特定の最大応力  $\sigma_{max}$  などを評価に用いる場合、注意する必要がある。

②特異性を考えた評価では、 $\sigma_0$  を考慮することが必要である。

③特異場の大きさは部材板厚の数%程度であることを考慮する必要がある。

#### 4. 不均質材の強度

##### 4.1 強度支配形態

異なる特性を持つ材料が混合あるいは接合された不均質材の強度が、どの材料特性によって決まるのかを知ることは重要である。例えば、強度の異なる材料が接合された場合、材料のうち一番低い強度で全体の強度が決まるとする考え方があり、溶接継手ではそう考えるべきであると書かれている本もある。しかし、そのような考え方に立てば、低強度なろう材で接合されたり接継手などは、到底使えないことになる。

不均質材の強度支配形態は、現実には複雑であるが、大きく分けると：

- ①材料の体積分率に依存する、いわゆる混合則型、
- ②最低強度が支配する最弱モデル (Weakest Link Model, WLM) 型
- ③変形拘束に大きく依存する塑性拘束型、

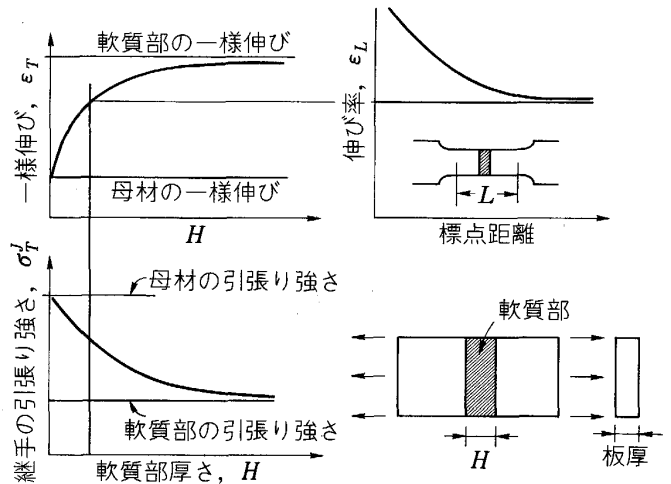


図6 軟質部を含む継手の引張り強さ・延性に及ぼす軟質部寸法の影響

に分けられる<sup>1)</sup>。①、③は寸法が関与する。①の代表例が、狭義の複合材料の強度である。

##### 4.2 軟質溶接継手の強度<sup>10)</sup>

上述の③の支配形態の代表例が、図6に示すような一部分に低強度部を含む継手が引張りを受ける場合の静的強度である。例えば溶接金属の強度が母材よりも低い継手、あるいは溶接熱影響部で軟化が生じた場合など。この継手の強度は低強度部(軟質部)寸法、特に板厚に対する相対的寸法が継手の延性強度に大きく関与し、図6のように軟質部の寸法が母材板厚あるいは試験片直径より小さくなると、軟質部自体の強度より大きくなり、母材の強度を目指して上昇する<sup>10)11)</sup>。

この場合、強度が試験片寸法に依存することに加え、特に注意すべきことは、継手の延性評価である。一般には一定の有限標点距離間での伸び率で延性が評価されるが、不均質材では図6に示すように標点距離のとり方で伸び率は異なってくることもあり、一様伸び  $\epsilon_T$  で評価するのが普遍的である<sup>1)</sup>。また、溶接継手部の疲労試験などを行うとき、特に歪制御型試験などでは、歪の意義そのものを十分に考えることが必要である。

##### 4.3 溶接熱影響部破壊靱性

溶接 HAZ 部、特に多層溶接 HAZ 部では、溶接時の多重熱サイクルのために複雑な組織分布を示し、そのため、

(a)強度的不均質、と (b)靱性的不均質の二つが存在し、しかもそれはサブミリメートルという局部的である。例えば近年の TMCP 鋼のようなものでは、全体的には HAZ 靱性は高いにもかかわらず、非常に局部的ではあるが靱性の低い部分 (Local Brittle Zone, LBZ) が存在することが指摘され、問題視されてきた<sup>12)13)</sup>。その主な特徴をまとめると次のようである<sup>1)13)</sup>：

= HAZ 部で靱性の低い部分には炭素濃度の高いマル

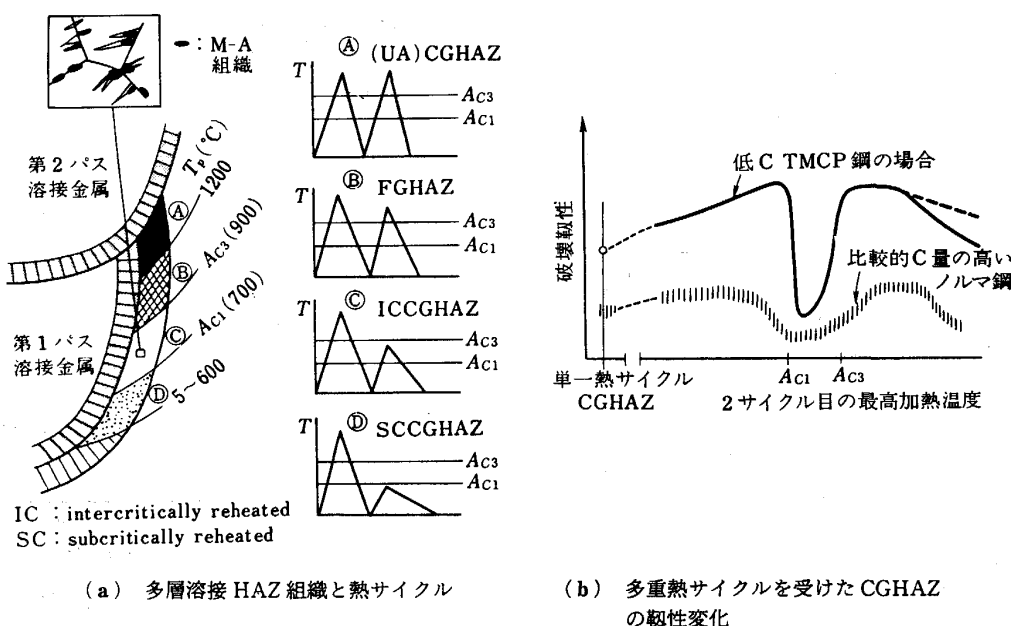


図 7 多重熱サイクルを受けた粗粒域 (CGHAZ) の靱性に及ぼす後熱サイクルの影響 (豊田)

テンサイト (M-A constituent) が存在する。

= 最近の HT50 級 鋼材では、多重熱履歴を受ける場合、CGHAZ のうち次の熱サイクルで  $A_{C1}$  と  $A_{C3}$  温度の間に加熱される、いわゆる ICCGHAZ 領域に M-A 組織が多く生成される (図 7)。

= 材料の破壊靱性は、M-A 組織の割合 (M-A%) と、破面単位で整理できる。

= M-A 組織は、母材の炭素等量などにあまり関係無く、1% 程度の炭素を含む高 C 組織で、硬さも Hv 700 程度と高い。

= M-A 組織は負荷時のマイクロクラックの発生源となり、マイクロクラックの形態は、M-A 組織そのものが割れる場合と、M-A と隣接するマトリクスとの境界にき裂が生じる場合の二つがある。

= M-A を含む組織が約  $450^{\circ}\text{C}$  以上のいわゆるテンパー熱サイクルを後続パスによって受けると、M-A 組織はフェライトとセメンタイトに分解し、靱性の回復が生じることがある。

= CGHAZ の靱性劣化特性は、溶接入熱、鋼材の成分系の影響が大きい。

#### 4.4 異材接合界面強度評価の問題点

異材接合界面の強度をいかに評価すべきかは重要な問題である。異材接合体の界面強度の制御と品質管理などでは、明確な評価指標が必要となる。界面強度評価のあり方は、考えている界面の定義に大きく関係し、破壊形態と強度の意義を十分に考える必要がある。特に、界面端部の集中応力と複雑な破壊形態に注意を払う必要があり、試験の目的の明確化が問われる。異材接合界面強度評価のあり方・問題点については文献 1), 9) にまとめ

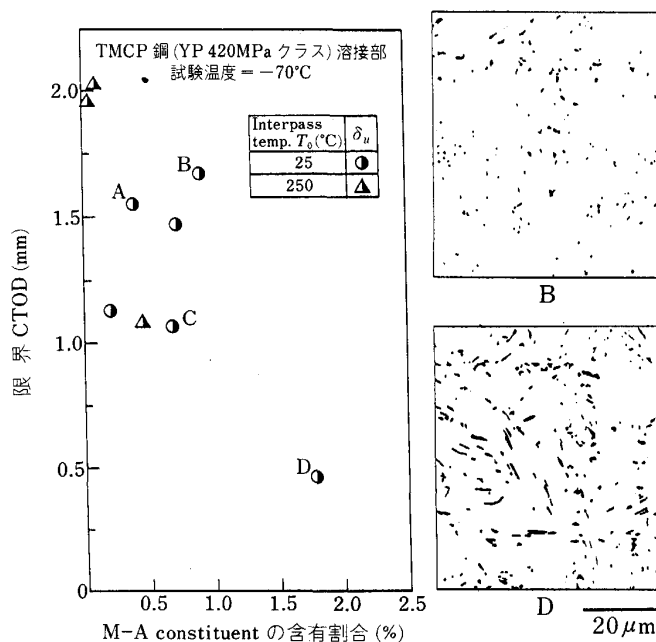


図 8 CGHAZ 限界 CTOD とき裂発生点近傍の M-A constituent 分布状態<sup>15)17)</sup>

られている。

#### 5. 不均質材の力学と材料開発などへの活用の考え方

不均質材の力学特性を十分に把握できると、材料の複合化あるいは既存の材料の改良など、いわゆる材料設計への活用が図れる。

例えば、低降伏比高張力鋼は、二相域焼入れ・焼き戻し処理を行うことによって、低強度で高い加工硬化特性

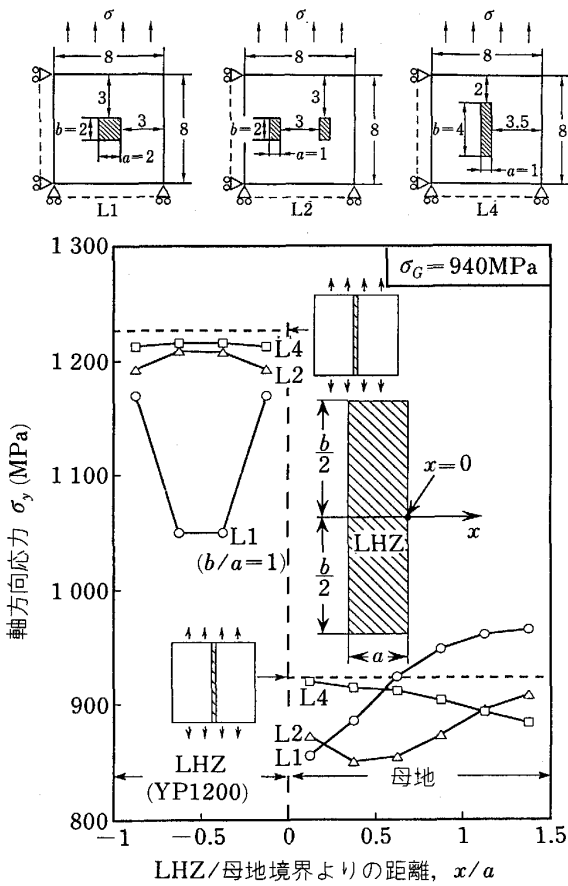


図9 局所的な硬化部(LHZ)を含む材が引張り応力を受ける場合硬化部近傍の応力分布特性へのLHZの細長比の影響<sup>15)17)</sup>

を持つ材料を、強度の高い母地に混在させることによって実現されている<sup>14)</sup>。これはまさに不均質材の変形特性を積極的に活用したものである。

材料の破壊特性を考える上では、局所的不均質、特に強度的不均質な部分の応力・歪特性を知ることが重要となる。

ここでは、一つの例として、前述の溶接CGHAZ部を取り上げ、靱性と不均質の関係を考えてみる。図8は、溶接HAZ部の限界CTODと破壊発生点でのM-A組織の分布を示したものである。図のように、M-Aが多く、しかもその形状が細長くラス状になるものほど低い破壊靱性を示す傾向がある。この場合の破壊の発生点について停留マイクロ亀裂の観察によると、M-A そのものおよびM-Aと母地の界面で発生しているものが認められる。

前述のように、一般にM-A組織のような脆い組織は硬い(高強度な)ものが多い。このような局所的な硬化部(LHZ)周りの応力特性は、LHZの形状の影響を受け、図9に示すように、硬い部分が存在すると、硬い部分で応力が著しく大きくなる<sup>15)</sup>。その最大応力値は、硬いものが存在することが影響して、いずれの形状でも

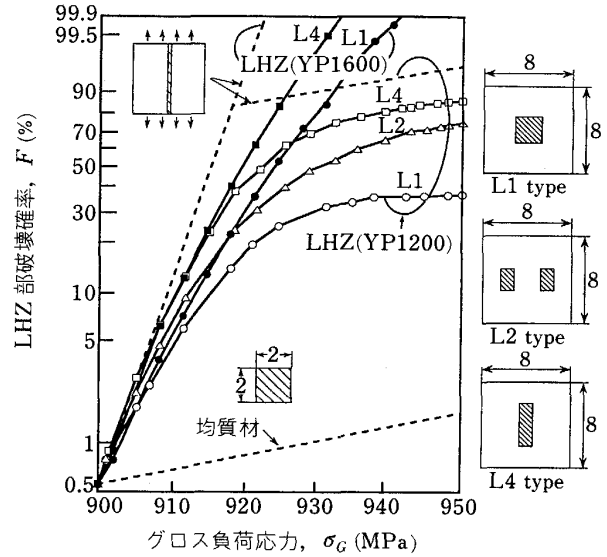


図10 局所的硬化部における破壊確率に及ぼすLHZの細長比の影響<sup>17)</sup>

ほぼ同じ大きさとなるが、大きな応力が作用している領域の寸法は、同じLHZの体積率であっても、細長比の大きな細長いものが含まれるほど大きくなる。これは、その部分での破壊の確率が大きくなることを意味し、図10に、一例としてLHZ(M-A)部分での破壊確率を、ローカルアプローチ<sup>16)</sup>に基づいて解析した例を示す<sup>17)</sup>。このように同じ体積率でLHZが含まれていても、細長いものが多い場合には、LHZでの破壊、すなわち破壊の目が生じ易いことを意味している。またこの傾向は、硬化部と母地との界面における変形の食い違いに注目しても全く同じ傾向である<sup>17)</sup>。

このような解析例に基づいて、LHZの形状制御のあり方などが考察され、材料開発の方向付けが可能となる。

ここでは、一例を示したに過ぎないが、材料開発・設計に当たって、不均質材の力学のような力学情報と材料科学との『知的融合』が新しい方向をもたらし、これが著者の指摘する『インターフェイスメカニクス』そのものであり、今後の多面的な融合への努力が望まれる。

文 献

- 1) 豊田政男: インターフェイスメカニクス (1991) [理工学社]
- 2) 先端材料 (先端材料スタディ・フォーラム '84 編) (1984) [通商産業調査会]
- 3) J. Dundurs: Discussion. J. of Appl. Mech., **36** (1969), p. 650
- 4) D. B. Bogy: Int. J. Soid Struct., **6** (1970), p. 1287
- 5) D. B. Bogy: J. of Appl. Mech., **38** (1971), p. 377
- 6) D. B. Bogy: J. of Appl. Mech., **42** (1975), p. 93
- 7) M. L. Williams: J. of Appl. Mech., **19** (1952), p. 526
- 8) V. L. Hein and F. Erdogan: Int. J. of Fracture Mech., **7** (1971), p. 317
- 9) 異材接合界面の力学 (Part 1) (溶接学会構造研究委員会, MechBID 委員会編) (1991)

- 10) 佐藤邦彦, 豊田政男: 溶接学会誌, **40** (1971), p. 885
- 11) K. Satoh, M. Toyoda, K. Ukita and T. Matsuura: *Weld. J.*, **58** (1979), p. 25s
- 12) M. Toyoda: Fracture Toughness Evaluation of Steel Welds (Review Part 1), IIW Doc. X-1191-89 (1989)
- 13) M. Toyoda: Fracture Toughness Evaluation of Steel Welds (Review Part 2) (1989) Osaka University
- 14) 佐藤邦彦, 豊田政男, 塚本光男, 渡辺 之: 溶接学会論文集, **3** (1985), p. 589
- 15) F. Minami, M. Toyoda, H. G. Jing, F. Kawabata and K. Amano: *Proc. of OMAE, III-B ASME* (1993), p. 459
- 16) C. Claudio, M. Toyoda and F. Minami: 日本造船学会論文集, **171** (1992), No. 3-5
- 17) 南二三吉, 豊田政男: 日本造船学会論文集, **171** (1992), No. 2-18