

異種接合材の設計のための 破壊力学

野田 尚昭
小田 和広
高瀬 康
堀田 源治

【共著】

コロナ社

はじめに

地球温暖化の問題を背景として、エネルギーの有効利用は世界的な要求である。その中において、特にエネルギー消費の大きな乗り物・搬送機械の軽量化はこれまでも多くの努力がなされているが、依然として要求がなされており、今後においても大きな課題となっている。軽量化の方法としては、高張力鋼による薄板構造、アルミニウムやマグネシウム合金の使用、さらにより軽量化が期待できる高強度プラスチックや炭素繊維強化プラスチックの利用がある。材料コストや製造コストを考慮すると、単独材料での軽量化は実用的に困難なために、プラスチックや金属などさまざまな材料特性を活かして組み合わせるマルチマテリアル化が注目されて久しい。その核となるのが異種材料接合技術であり、航空機や自動車など輸送手段における軽量化の切り札として期待されている。その技術は、人命にもかかわるため、安全に関する高い信頼性が要求され、その強度の信頼性向上に関しても、多くの取組みがなされている。このような異種接合には、金属やプラスチック、セラミックスなどの非金属を一体化する技術ならびに材料そのものを強化した繊維強化材料が含まれるが、ここでは、それらを異種材料接合材（異種接合材とも略記する）と呼ぶ。

異種材料接合材は材料の組合せ、接着の仕方などに多くの種類があり、接合界面ならびにその近くに存在する空孔やき裂等の欠陥の寸法・形状・方向などはさまざまな状態にある。特に、異種材料接合材では、見かけ上欠陥が存在しない場合でも、接合界面の材料変化によって応力集中やはく離が生じる。このような界面の応力集中は、材料の組合せに依存して変化するので、その理解が難しい。このような観点から、著者らは先に、『異種接合材の材料力学と応力

集中』（コロナ社，2017年）を上梓した。そこでは，比較的良好に知られている切欠きや空かに加えて，介在物による応力集中に及ぼす形状比や弾性定数の影響を示すとともに，介在物が周期的に配列する場合の平均的な弾性係数を説明した。しかし，き裂のような欠陥による応力が無限大となる場合には，通常の応力集中とは異なるので，さらに理解が難しい。

均質材中のき裂を応力拡大係数（stress intensity factor, SIF と略記し記号 K を用いる）で評価できることは，今日ではよく知られており，構造設計にもよく用いられる。このような，通常の均質材料中のき裂の応力拡大係数（き裂先端の無限大となる応力の大きさ，すなわち，き裂の厳しさを表す）と，界面にはく離が生じたときの界面き裂の応力拡大係数（界面き裂の厳しさを表す）とは，類似点も多いが，種々の違いがある。ここでは，一例として，引張りと内圧の影響の違いを説明する。図 1 に，均質無限板のき裂が引張りを受ける場合と内圧を受ける場合を示す。き裂から離れた点の応力状態は，図 (a) では $\sigma_y = \sigma$ であり，図 (b) では $\sigma_y = 0$ であり，全く異なる。しかし，図 1 に示すように，き裂先端の厳しさを表す応力拡大係数はどちらも $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ と表され，同じである（第 2 章参照）。このように，均質材では，引張りを受ける問題と内圧を受ける問題の応力拡大係数は等しい。このことは，圧力容器に生じたき裂の評価などの多くの実用問題を考える際に有用である。

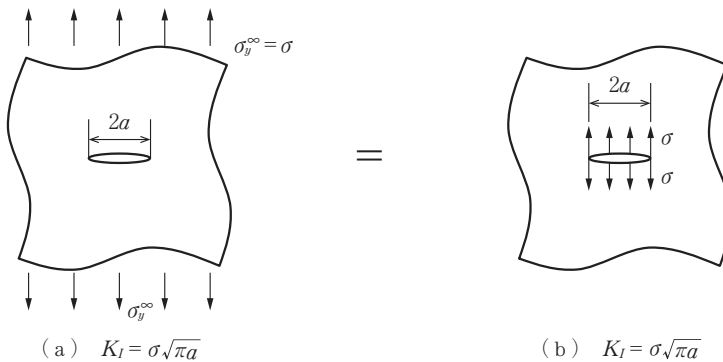


図 1 き裂が引張り σ を受ける場合と内圧 σ を受ける場合の厳しさは等しい

図1と対比して、**図2**に異種接合材の界面き裂の引張りと内圧を受ける問題を示す。図示するように界面き裂では、均質材と違って引張りを受ける問題と内圧を受ける問題の応力拡大係数は等しくはならない（第2章参照）。どの程度異なるかは上下の材料組合せに依存する。このように、異種接合材では、きわめて基本的な問題でも均質材とは異なることが多い。しかし、そのような違いに関して明確にまとめた書物は見当たらない。そこで、本書では、このような異種接合材の力学、特に特異応力が生じる問題に関して、読者の理解が得られるように、わかりやすく記述することに努めている。

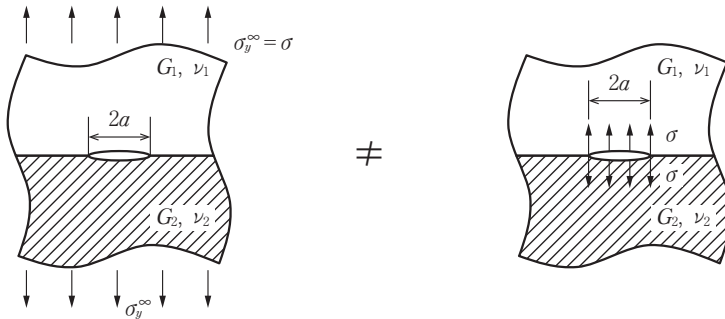


図2 界面き裂が引張り σ を受ける場合と内圧 σ を受ける場合の厳しさは異なる

第1章で異種接合材や複合材の概略を説明したあと、第2章と第3章では、2次元異種接合材（AB型）の界面き裂問題を解説する。ここで2次元問題とは、異材接合板のような平面応力（板厚方向の応力が0，薄板），平面ひずみ（板厚方向のひずみが0，厚板）の問題のことである。また，AB型とは2種類の材料A，Bからなる問題とする。そして，第4章では，3次元立体中の界面のき裂に拡張するため，まず，基本となる，均質材（A型）中のき裂問題を取り上げる。ついで，第5章で，3次元異種接合材（AB型）の界面および界面近傍に存在するき裂の問題へと発展させる。第6章では，接着接合材（ABA型）について述べる。接着接合材の問題では，き裂が存在しない場合にも特異応力が生じるので，2種類の異種接合材料によるサンドイッチ構造（ABA型）の強度評価に有用な特異応力場の強さ（ISSF）について説明する。第7章で

は熱応力とき裂の応力拡大係数 (SIF) について記述し、仮想き裂を用いた接着接合材の強度評価の方法について研究成果を報告する。

本書においては、異種接合材に使われる用語について統一するとともに、材料の種類を A, B, C と表すことで接合のパターンを AB 型や ABC 型などと表現して読者の理解の便を図った。また、章のタイトルを (荷重方向, 材料の形態, き裂の存在場所, き裂の形状) の組合せで整理することで、読者が最初から順に読まなくても必要に応じて章を選べるように研究や設計の効率化を配慮した。また著者の構成を大学の研究者と企業出身研究者の共著として、実務的な専門書となるように図った。例えば、FEM などによる解析手法としての数式については省き、図表として示すことで第一線の技術者がすぐに利用できるようにした。また、材料組合せを変化させたときのデータが膨大となる際には、ある条件下のデータを示し、他の材料の組合せは付録や文献を参照していただくこととして、技術者の読み物として興味が持てるように配慮した。

本書では、可能な限り最新の研究成果を盛り込むことで、異種材料接合技術を課題とする企業での開発者・研究者にとっても指針となるように配慮した。例えば、Stress Intensity Factors Handbook, Vol.5 (2001-7・Society of Materials Science Japan) (Editors 野田尚昭他 9 名) の 17 節には発行年以前の多くの異種接合材近傍のき裂の問題が紹介されているが、本書で紹介する内容のほとんどはそこに含まれていない、最新の著者らの研究成果である。本書を手にした読者がそれぞれの業務課題である軽量化技術などについて有益なヒントを得られることを著者一同願うものである。

2023 年 9 月

野田 尚昭

小田 和広

高瀬 康

堀田 源治

目 次

第 1 章 異種接合材の設計と本書の特徴

1.1 異種接合材の特徴	1
1.1.1 異種接合材の歴史と用途	1
1.1.2 異種接合材の種類と応用	2
1.1.3 異種接合材，複合材料の力学的な特徴	3
1.2 異種接合材の分類と呼称	5
1.3 通常のき裂の応力拡大係数 SIF と界面き裂の応力拡大係数 SIF の 違いについて	6
1.4 特異応力場の強さに注目した異種接合材の強度評価	9
1.4.1 ISSF 法による異種接合材の強度評価	9
1.4.2 仮想き裂法による異種接合材の強度評価	11
1.4.3 実際の界面き裂を有する異種接合材の強度評価	13

第 2 章 異種接合無限板と異種接合有限板 (AB 型) 中の内部界面き裂の応力拡大係数

2.1 異種接合無限板中の内部界面き裂 [内圧]	16
2.2 異種接合無限板中の内部界面き裂 [界面に垂直方向の引張り]	20
2.3 異種接合無限板中の内部界面き裂 [界面に平行方向の引張り]	24
2.4 異種接合有限板中の内部界面き裂 [引張り]	27

2.4.1	引張りを受ける均質材の有限板の中央き裂の問題	28
2.4.2	異種接合有限板中の中央界面き裂の応力拡大係数の例	29
2.4.3	任意材料組合せにおける異種接合有限板中央界面き裂の応力拡大係数	30

第3章 異種接合半無限板と異種接合有限板 (AB型) の縁界面き裂の応力拡大係数

3.1	縁界面き裂モデルと内部界面き裂モデルとの比較	33
3.2	異種接合半無限板 (AB型) の縁界面き裂の二重特異応力場について	35
3.3	き裂のない異種接合板 (AB型) 端部の特異応力場の強さについて	38
3.4	異種接合半無限板 (AB型) の縁界面き裂の応力拡大係数 [引張り]	41
3.5	異種接合有限板 (AB型) の縁界面き裂と均質有限板の縁き裂との比較 [引張り]	45
3.6	異種接合半無限板 (AB型) の縁界面き裂の応力拡大係数 [面内曲げ]	48
3.7	異種接合有限板 (AB型) の縁界面き裂と均質有限板の縁き裂との比較 [面内曲げ]	54

第4章 均質材 (A型) の3次元き裂の応力拡大係数

4.1	無限体 (A型) のモードI型だ円形き裂および長方形き裂の応力拡大係数 [引張り]	57
4.2	無限体 (A型) の傾斜した長方形き裂の応力拡大係数 [引張り]	60
4.3	半無限体 (A型) のモードI型表面き裂の応力拡大係数 [引張り]	61
4.4	半無限体 (A型) の表面に垂直な表面き裂の応力拡大係数 [せん断]	64
4.5	半無限体 (A型) の傾斜した半だ円形表面き裂の応力拡大係数 [引張り]	69
4.5.1	引張応力を受ける半無限体表面の傾斜表面き裂問題	69
4.5.2	モードI, II, III型応力拡大係数のき裂前縁沿いの分布	70
4.6	半無限体 (A型) の傾斜した表面き裂の応力拡大係数 [圧縮]	73

4.6.1	遠方で圧縮荷重を受ける半無限体における傾斜した半だ円形表面き裂の問題	73
4.6.2	モードⅡ型応力拡大係数 K_{II} の特性	74
4.6.3	モードⅢ型応力拡大係数 K_{III} および K_{II} との比較	76
4.7	半無限体 (A 型) の傾斜した表面き裂の応力拡大係数 [転がり接触]	78
4.7.1	転がり接触荷重を受ける表面層の破壊問題	78
4.7.2	Hertz 接触圧力を受ける半円形表面き裂のモデル	79
4.7.3	接触荷重を受ける傾斜表面き裂の応力拡大係数	79

第5章 異種接合材 (AB 型) 界面および界面近傍の3次元き裂の応力拡大係数

5.1	異種接合無限体 (AB 型) のだ円形界面き裂 [引張り]	82
5.2	傾斜機能材 (AB 型) のだ円形き裂 [引張り]	85
5.3	異種接合無限体 (AB 型) 界面に平行なだ円形き裂 [引張り]	87
5.3.1	異種接合界面に平行なだ円き裂の無次元化応力拡大係数	88
5.3.2	剛性比 E_1 , E_2 が広汎に異なる異材界面に平行で、形状が広汎に異なるき裂の応力拡大係数の近似的解法	89
5.4	異種接合無限体 (AB 型) 界面に垂直なだ円形き裂 [引張り]	92
5.4.1	異種接合界面に垂直なだ円き裂に対する無次元化応力拡大係数	92
5.4.2	異種接合界面に垂直なだ円形き裂に対して接合材の剛性比と界面からの距離が異なる場合の応力拡大係数	93
5.5	異種接合無限体 (AB 型) 界面に斜めなだ円形き裂 [引張り]	98
5.5.1	異種接合界面に斜めなだ円き裂に対する無次元化応力拡大係数	98
5.5.2	過去の研究結果との比較	99
5.5.3	異種接合界面近傍の傾斜だ円き裂の応力拡大係数	100
5.6	異種接合無限体 (AB 型) 界面に垂直に接する長方形き裂 [引張り]	106
5.6.1	界面き裂の引張問題での注意点	106
5.6.2	界面に垂直に接する長方形き裂の無次元化応力拡大係数	107
5.6.3	2次元き裂問題との比較	107
5.6.4	無限体中の長方形き裂と半無限体表面の長方形縁き裂との比較	109

- 5.6.5 異種接合界面に垂直に接する長方形き裂の \sqrt{area} パラメータによる応力
拡大係数……………110

第6章 異種接合材の強度評価のための特異応力場の強さ ISSF

- 6.1 異種接合板（ABA型）および異種接合円柱（ABA型）の接着層厚さ全
範囲における特異応力場の強さ ISSF……………115
- 6.2 異種接合板（ABA型）および異種接合柱（ABA型）の接着強度の簡便
な評価法……………120
- 6.2.1 異種接合板（ABA型）における接着強度……………120
- 6.2.2 異種接合柱（ABA型）接着強度の2次元モデルによる評価の妥当性……………125
- 6.3 重ね合わせ継手（ABA型）における特異応力場 ISSF……………130
- 6.3.1 単純重ね合わせ継手 SLJ（ABA型）と二重重ね合わせ継手 DLJ（ABA型）
の実験結果の矛盾点……………130
- 6.3.2 単純重ね合わせ継手 SLJ（ABA型）の接着面の曲げ変形が ISSF に与え
る影響……………131
- 6.3.3 単純重ね合わせ継手 SLJ（ABA型）と二重重ね合わせ継手 DLJ（ABA型）
が同一強度を得られる条件……………134
- 6.3.4 単純重ね合わせ継手 SLJ（ABA型）における接着強度……………137

第7章 異種接合材の仮想き裂法による強度評価

- 7.1 異種接合材（ABA型）の仮想き裂による強度評価……………142
- 7.1.1 異種接合材（ABA型）の仮想き裂による強度評価の有用性……………142
- 7.1.2 仮想界面き裂の応力拡大係数の表示……………143
- 7.1.3 仮想き裂法による異種接合材（ABA型）の強度評価……………148
- 7.2 熱応力が生じた異種接合材（ABA型）の仮想き裂による強度評価……………150
- 7.2.1 熱応力により生じる界面端部特異応力場……………150
- 7.2.2 熱応力問題の縁界面き裂の重ね合わせによる解析法（AB型）……………152
- 7.2.3 熱応力問題の縁界面き裂の応力拡大係数（ABA型）……………156

7.2.4	熱応力が生じた異種接合材（ABA型）の仮想き裂による強度評価法	159
7.3	異種接合材（ABC型）の仮想き裂による強度評価	161
7.3.1	界面端部特異応力場に与える材料組合せの影響	161
7.3.2	界面き裂の応力拡大係数 SIF と界面端部特異応力場 ISSF との関係	164
7.3.3	仮想き裂による異種接合材（ABC型）の強度評価	167
付録	種々のき裂に対する応力拡大係数 SIF および特異場の強さ ISSF の資料	170
引用・参考文献		243
おわりに		254
索引		256

第 1 章

異種接合材の設計と本書の特徴

SDGs の進展は新たな省エネルギーと軽薄短小の機運をさらに高めている。ドローンの発展、空飛ぶ自動車の具現化、EV の生産体制の整備などにおいては軽量化が大きな課題である。軽量化の方法としては、高張力銅による薄板構造、アルミニウムやマグネシウム合金の使用、さらにより軽量化が期待できる高強度プラスチックや炭素繊維強化プラスチックの利用がある。しかし、材料コストや製造コストを考慮すると、単独材料での軽量化は実用的に困難なために、プラスチックや金属などさまざまな材料特性を活かして組み合わせるマルチマテリアル化が注目されて久しい。その核となるのが異種材料接合技術である。このような技術は、航空機や自動車など人命にかかわる輸送手段に軽量化の切り札として望まれていることから、安全に関する高い信頼性が要求される。安全性の中でも強度的な問題は重要であり、材料、接着剤や接合界面などに存在する空孔や介在物などが強度に及ぼす影響については多くの研究がなされている。異種接合材とは、2 種類以上の材料を組み合わせ、素材の持つそれぞれの特性を活かし単独では得られなかった機能、性能を持たせた材料をいう。異種接合材には、金属やプラスチック、セラミックスなどの非金属を一体化する技術ならびに材料そのものを強化した繊維強化材料が含まれる。

1.1 異種接合材の特徴

1.1.1 異種接合材の歴史と用途

第 2 次世界大戦時に金属の供給が制限され、特に重要な戦略機材である航空機の設計に支障をきたした。英国のデ・ハビランド社では、1940 年代に木材やペーパーハニカムにフェノール樹脂を含浸させた材料を代用資材として機体材

料設計を行い、モスキートという爆撃機を製作した。モスキートは金属製の機体に比べて性能は遜色なかった。また、フェノール樹脂のおかげで腐る心配もなく、軽量で高強度を維持することができ、副次的効果としてレーダー反射断面積が小さく、敵のレーダーに捕捉されにくいという効果もあった。また、同年代に米国においても1940年代初頭にガラス繊維を不飽和ポリエステル樹脂で固める技術が開発され、のちにこれはGFRP (glass fiber reinforced plastics) と呼ばれるようになり、1940年は近代的な意味での複合材料の幕開けの年であった。現在ではその優れた特性を活かした用途として航空機以外にもレジャーボート、ラケット、つり竿、風力発電のブレードなどに使用されている。

1.1.2 異種接合材の種類と応用

異種接合材には、素材の繊維・微粒子を積層・混合・分散し強化したもの、板材・棒材・発泡材などを加工・変形し接着・溶接・圧延接合・溶着したものなどさまざまなものがある。なお、本書においては、いわゆる複合材料と異種材料の接合体を取り扱い、前者には大きく分けて金属基複合材 (metal matrix composite, MMC) と繊維強化プラスチック (fiber reinforced plastics, FRP) がある。後者には製鉄所などで使用される鋼板圧延ロールのような複合構造物も含める。繊維強化材料などでは、樹脂母材に対して繊維を「強化材」と呼ぶことが多いが、ここでは異なる材料同士を以後「異材」と呼び、主として金属材料において用いられている「介在物」はそのまま限定して用いることにする。金属基複合材料 (MMC) とは、金属母材に他物質を介在させたもので、アルミニウムを母材として、金属酸化物 (Al_2O_3 , SiO_2 など) や炭化物 (SiC , WC , TiC など) を介在させて耐摩耗性、耐熱性を図った材料が自動車エンジンに使われている。またチタンやニッケルを母材としてマグネシウムやアルミニウムを介在させたものが航空機エンジン部品に使用されている。その他、アルミニウム合金を母材としてセラミックスなどの無機質を強化材とする複合材料も電気機器の絶縁体に使用されている。

薄板や棒状素材が多い複合材料に対して、構造物そのものが異材接合で連結

構成される場合も、広義には複合材ということができよう。例えば、防波堤や海洋工事に用いられるコンクリートと鋼材で構成される箱状構造物（ハイブリッドケーソン）などは鉄骨構造物とコンクリートからなる代表的な複合構造物といわれている。このように“複合構造物”は土木・建築工学の分野では一般化されており、同様に異種材料を連続して一つの構造物とした複合体はほかの分野でも多く見られる。多様な異種材料の組合せによる複合構造物は各種の用途に用いられており、中でも圧延用複合ロールはその代表的なもので、胴部直径 600 mm ～ 850 mm、全長 10 m 前後で重量も 10 t を超えるものも多い。鋼材の圧延に供されるロール胴部には耐摩耗性に優れたハイス材や一部の小型ロールには超硬材が用いられ、軸部には合金鋼が主として用いられるが、球状黒鉛鋳鉄も使われている。両者の接合は遠心力鋳造による溶融拡散接合や連続肉盛溶接がおもな方法であるが、一部の小型ロールには熱間等方圧加圧法（hot isostatic pressing, HIP）が用いられている。このような大型複合構造物において設計上重要な点は、異種接合材料間の接合を考慮に入れた材料の組合せと同時に、寸法・形状も製造設備、技術上考慮すべき重要な点である。繊維強化プラスチック（FRP）は、プラスチックを基材に繊維で強化した複合材料であり、基材には、エポキシ樹脂、ポリエステル樹脂などが使用され、強化材には、ガラス繊維強化樹脂（glass fiber reinforced plastics, GFRP）、炭素繊維強化樹脂（carbon fiber reinforced plastics, CFRP）、アラミド繊維強化樹脂（aramid fiber reinforced plastics, AFRP）などがあり、軽量、高強度、高弾性、耐衝撃性の特色を生かし宇宙・航空機関係、自動車、船舶、つり竿のほか、絶縁特性から電気・電子・家電部品に、また耐候性、耐酸・耐アルカリ特性よりパラボラアンテナ、浴槽、ベランダ、床、屋根材などに使用されている。

1.1.3 異種接合材、複合材料の力学的な特徴

複合材料の力学的な特徴を挙げると① 軽くて強い、② 不均質、③ 異方性、などである。

① 軽くて強い：軽くて強いのは複合材料の最大の特徴で、複合材料の繊維

4 1. 異種接合材の設計と本書の特徴

方向の強さは通常金属よりも大きい。複合材料と単一材料との強度についての比較には、しばしば比強度、比弾性率という言葉が使われる。比強度とは、比重量（単位体積あたりの重量）あたりの引張強さである。つまり引張強さを比重量で割った値となる。引張強さの単位を $[N/cm^2]$ 、比重量の単位を $[N/cm^3]$ とすると、比強度の単位は $[cm]$ となる。また、比弾性率とは、材料の弾性率を比重で割った値で、弾性率の単位を $[N/cm^2]$ 、比重量の単位を $[N/cm^3]$ とすると比弾性率の単位は $[cm]$ となる。比強度が大きいほど、軽いわりに強い材料であり、比弾性率の値が高ければ同じ重量でより高い弾性率が得られることになる。これは航空機などに使用する複合材料は特に軽いことが重要な要素であるため、強さや弾性係数を比重量で割った値で性能を評価するほうが便利のためである。

② 不均質：通常金属やプラスチックは材料中のどの部分においても性質が同じである。これを均質体という。ところが、例えば複合材料の GFRP はガラス繊維の部分とプラスチックの部分では性質が異なる不均質体である。ガラス繊維を多く使えば強い FRP ができる。また、ガラス繊維は繊維の束を糸巻きに巻き取ったロービング、織物にしたクロス、数 cm の長さに切ってランダムに降り積もらせたマットなどの製品が製作可能であり、そのおのおのによって強さが変わる。すなわち複合材は目的に合わせて強度を持たせる自由度が存在する。すなわち“設計できる”材料ともいえる。

③ 異方性：ガラス繊維を同一方向に並べて樹脂で固めたもの（一方向強化材）は繊維方向と繊維に直角方向では強さが違うことは容易に想像できる。このように方向によって性質が異なることを異方性という。木材や竹などの材料は異方性を持つ。一方、通常金属は等方性を持っている。この異方性を利用して従来の等方性材料にはなかった設計も可能である。例えば、FRP 製の容器を設計する場合には、周方向に作用する力は長手方向の 2 倍となり、容器を等方性材料で製作した場合には、長手方向に

避け目が入る可能性がある。そこで周方向の強さと長手方向の強さの比を2:1になるように設計することになる。

1.2 異種接合材の分類と呼称

最近の設計の現場においては、3D-CADにより、材料の色彩だけでなく質感までも表現できるようになり、設計技術者は異種接合材の設計に関して、便利なツールを提供されるようになった。しかし、一方で、異種接合材の設計や、それを構造部材として設計する際に参考となる書籍や資料が少ないのも現実問題となっている。これまでの設計図書などにおいては、ある特定の材料の組合せによる解説がほとんどであるため、新規材料を導入する場合や、既存の材料でも、その組合せを変更する場合には、実験等による試行錯誤を余儀なくされている。本書では、任意の材料同士の組合せについて強度評価ができる方法について言及しており、本書の大きな特徴の一つとなっている。

異種接合材では、材料の重ね方とき裂などが生じる位置によって問題が異なってくるため、問題の種類が多く複雑となる。そこで本書においては、各章テーマごとに異種接合材の種類を表1.1のようなA型、AB型等の呼称で表現し、読者の理解の便を図る。

本書では、まず最も基本的な2種類の異種接合板（AB型）を、2次元き裂問題として解説する。つぎに、3次元の均質材（A型）中のき裂問題を解説

表 1.1 異種接合材の分類と呼称

呼 称	異種接合材の内容	平面または立体の区別
A 型	均質材	3次元（均質材の立体問題を取り上げて、平面問題との関係を説明）
AB 型	2種類の異種接合材	2次元（平面の異種接合材）
		3次元（立体の異種接合材）
ABA 型	2種類の異種接合材によるサンドイッチ構造	2次元（平面の異種接合材）
ABC 型	3種類の異種接合材	2次元（平面の異種接合材）

おわりに

本書の狙いは、特異応力場に基づく異種接合材の力学的取扱いの理解を促進するという点である。均質材のき裂に対する破壊力学の講義を行う際、導入編として、機械屋を賢くさせた重大事故といわれているリバティ船とコメット号の破壊事故がよく利用される。これによって、学生は、き裂による応力集中（特異応力場）を理解することが重要であり、破壊防止のために必要な理論であることを身近に感じるようである。重大事故による経済的損失が莫大なものであることまで紹介すると、眠気も若干覚めるように見える。

一方、近年普及している異種接合材の強度を身近に感じてもらう話題は何かよいであろうか。本書の話題の中心である「界面端部の特異応力場の強さ (ISSF)」を、き裂の特異応力場との関連で説明してもあまりピンとこないようである。しかし、本書の第6章に詳述している「接着層の厚さによって接着強度が変わる」という実験結果を話題にすると反応がよい。接着層が薄いほど（接着剤を節約するほど）強度が向上するという事実は、学生にとっては新鮮であり、意外に感じるようである。子供の頃の工作などの経験では、余分にはみ出すほど接着剤を塗った方が“強く”接着されるように思っているからである（傷口に塗り薬をたっぷりつけると早く治るように思えるのも同様の感覚であろう）。第6章では、接着層厚さが減少すると一定荷重下での ISSF が減少し安全になることを示している。「なぜ接着層が薄いほど強度が増すのか？」と疑問をもつことで、ISSF を実感してもらいたい。

また、均質半無限板 (A 型) の縁き裂の解 ($K_I = 1.1215\sigma\sqrt{\pi a}$) に相当する、半無限異種接合板 (AB 型) 界面の縁き裂の解 (第3章) についても、本書のもう一つの主要テーマとなっている。縁界面き裂が板幅 W に対して十分短くなると、き裂がないときの特異応力場 ISSF が、その応力拡大係数に強く影響

する（相対き裂長さ $a/W \rightarrow 0$ で無次元化応力拡大係数 $F_1, F_2 \rightarrow \infty$ となる挙動を二重特異性と呼び、第3章に詳述している）。このため応力拡大係数の表記を工夫し、 $F_1, F_2 \rightarrow \infty$ の場合でも、つねに有限値となる係数 C_1, C_2 を定義した。これは通常の破壊力学において、 $r \rightarrow 0$ の場合に無限大となるき裂先端の特異応力 $\sigma_y(r) \rightarrow \infty$ の代わりに、有限値である応力拡大係数 K で、き裂の特異場を表すことができることとよく似ている。著者らの経験では、均質材のき裂の解析では、有限板の問題より、半無限板の問題の解析のほうが容易である（境界条件が少ないため）。すなわち、無限板→半無限板→有限板の流れで問題が解決され、その応力拡大係数の資料が蓄積されてきた。一方、界面き裂の問題では、接合無限板の界面き裂の厳密解は存在するものの、それはあくまでも内圧の解であり、実用上重要な引張りの解ではなかった。すなわち、特定の材料組合せについての接合有限板の内部き裂が多く解析された。有限板中の界面き裂やき裂がない場合の界面端部の ISSF が解析され（第2章）、半無限接合板の縁界面き裂や無限接合板の内部き裂の引張りの解にたどり着いた。すなわち、有限板→半無限板／無限板の流れで問題が解決された。その本質的理由は、き裂のない接合有限板端部の ISSF が明確にならないと、接合半無限板の縁界面き裂の二重特異性が明確とならないことによる。このことは、異種接合材の力学的性質に対して、均質材と異なる考えを持つ必要があることの一例として紹介しておきたい。

上述の二つの例は、いずれも「界面端部の特異応力場の強さ（ISSF）」が関係している。異種接合材の強度特性を表すのに適したトピックであるため、読者の興味を引けば幸いである。異種接合材の評価技術も疲労破壊防止技術とよく似ており、材料選びから製作過程および接着施工方法、その後の管理など種々の因子が影響を与える。異種接合材の破壊強度向上に対して、物理的、化学的、冶金学的、設計、加工、材料に至るまで、あらゆる観点からの調査、検討が必要となる。本書で取り上げた破壊力学に基づくアプローチが、異種接合材の設計の一助となれば望外の喜びである。

小田 和広

野田 尚昭

索

引

【い】	仮想界面き裂の応力拡大係数	143	【に】	二重特異応力場	35		
異種接合円柱 (ABA 型)	115	仮想き裂法	11	【ね】	熱応力が生じた異種接合材 (ABA 型) の仮想き裂による強度評価	150	
異種接合材	1	—による異種接合材 (ABA 型) の強度評価	148	熱応力により生じる界面端部特異応力場	150		
異種接合板 (ABA 型)	115	【き】	金属基複合材	2	【は】	半無限体 (A 型) の傾斜した半だ円形表面き裂	69
異種接合板 (ABA 型) における接着強度	120	【こ】	転がり接触	78	半無限体 (A 型) のモード I 型表面き裂	61	
異種接合半無限板 (AB 型) の縁界面き裂	41	【し】	振動特異性	13	【む】	無限体 (A 型) の傾斜した長方形き裂	60
異種接合無限体 (AB 型) 界面に垂直に接する長方形き裂	106	【せ】	繊維強化プラスチック	2	【も】	モード I 型だ円形き裂	57
異種接合無限体 (AB 型) 界面に斜めなだ円形き裂	98	【た】	端部の特異応力場	38	【ゆ】	有限板の中央き裂	28
異種接合無限体 (AB 型) のだ円形界面き裂	82	【ち】	長方形き裂	57			
異種接合無限板中の内部界面き裂	16	【と】	特異応力場の強さ ISSF 9, 115				
異種接合有限板 (AB 型) の縁界面き裂	45						
異種接合有限板中の中央界面き裂	29						
【か】	界面き裂	13					
【D】	Dundurs の複合パラメータ	20	【G】	GFRP	2		

— 著 者 略 歴 —

野田 尚昭 (のだ なおあき)

- 1979 年 九州工業大学工学部機械工学第二学科卒業
- 1981 年 九州工業大学大学院工学研究科修士課程修了 (機械工学専攻)
- 1984 年 九州大学大学院工学研究科博士課程修了 (機械工学専攻)
工学博士
- 1984 年 九州工業大学講師
- 1985 年 米国リーハイ大学客員研究員
- 1987 年 九州工業大学助教授
- 2003 年 九州工業大学教授
- 2022 年 九州工業大学名誉教授

小田 和広 (おだ かずひろ)

- 1990 年 九州工業大学工学部機械工学科卒業
- 1992 年 九州工業大学大学院工学研究科博士前期課程修了 (設計生産工学専攻)
- 1995 年 九州工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了 (設計生産工学専攻)
博士 (工学)
- 1995 年 徳山工業高等専門学校助手
- 1996 年 徳山工業高等専門学校講師
- 1998 年 徳山工業高等専門学校助教授
- 2011 年 徳山工業高等専門学校教授
- 2012 年 大分大学教授
現在に至る

高瀬 康 (たかせ やすし)

- 1993 年 九州工業大学工学部設計生産工学科卒業
- 2002 年 九州工業大学技術専門職員
現在に至る
- 2007 年 博士 (工学) (九州工業大学)

堀田 源治 (ほった げんじ)

- 1979 年 九州工業大学工学部第二部機械工学科卒業
- 1979 年 日本国有鉄道勤務
- 1985 年 株式会社メイテック勤務
- 1995 年 株式会社日鉄エレックス勤務
- 2008 年 有明工業高等専門学校教授
- 2015 年 博士 (工学) (熊本大学)
- 2019 年 有明工業高等専門学校客員教授
- 2019 年 九州工業大学客員教授
現在に至る

異種接合材の設計のための破壊力学

Fracture Mechanics for the Design of Bonded Dissimilar Materials and Structures

© Noda, Oda, Takase, Hotta 2023

2023年11月16日 初版第1刷発行



検印省略

著者 野田 尚昭
小田 和広
高瀬 康
堀田 源治
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来 真也
印刷所 新日本印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04685-4 C3053 Printed in Japan

(森岡)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。