

## 序 文

構造物と材料の疲労が対象とする範囲は広く、様々なテーマが含まれる。本書の目的は、まず、これらのテーマについて解説すること、つぎに、疲労を解析する方法と、その解析結果を疲労に強い構造物の設計に役立てる方法を提示すること、最後に、稼働中の構造物の疲労を防止することである。

第1章では、第2章以降の内容を知るためのガイドとして、テーマの全体像を示し、関係する諸要素の重要性について簡潔に紹介する。本書の中心をなす課題は、疲労特性予測と疲労防止設計である。関連する全ての状況を物理的かつ機械的な観点から理解することなく、これらの課題を達成することは不可能である。

第2章では、初めに、構造物が繰返し荷重を受けた場合とその材料の中で何が起きるかについて、基本的な概念を述べる。疲労特性に影響を与えうる数多くの因子を説明し、以降の章につながる必須の基礎知識を述べる。様々な主題を、以下のような分野にわけて提示する。

- \* 疲労特性とその予測についての基本的知識（第2～8章）
- \* 荷重スペクトルと、振幅が変動する繰返し荷重による疲労（第9～11章）
- \* 疲労試験とばらつき（第12、13章）
- \* 特有の疲労条件（第14～17章）
- \* 接合部と構造物の疲労（第18～20章）
- \* 繊維-金属積層材（第21章）

各章で個々の主題について論考を行う。章の最後に主要項目のまとめがあるが、これはサマリーというより、単に、記憶すべき最重要ポイントのまとめである。

構造部材の疲労現象は、定性的には良好に理解されているものの、定量的に正確な疲労特性予測にはまだ限界があると考えられる。したがって、関連する全ての問題を適切に認識し理解することが重要である。このテキストを著した大きな理由の一つがこのことにある。最も重要なのは、材料の疲労メカニズムの知識と、大きく変動する実際の使用条件がそのメカニズムに及ぼしうる影響に関する知識である。動的な荷重をうける構造物の設計者は「疲労防止設計 (design against fatigue)」を行う必要があるが、実行するには、関連する安全面や経済面も含め

た構造物に関する全体的な概念のみならず、詳細設計や材料表面品質、接合部に関する知識を要する。設計者は、同時に、構造物の疲労挙動、疲労限度、き裂発生までの疲労寿命、き裂が進展し最終的な破壊に至るまでの残存寿命について、それらの予測に挑むべきである。ただし、やはり、疲労特性の予測には限界や弱点があるので、予測するには様々な影響因子に関する深い知識が必要となる。

本書の初版は2001年に出版された。大学の授業やその他の講習で使用されたが、参加者は製造業、大学、研究機関、官公庁、工業学校の教員などであった。その経験によれば、本書は多くの方から、疲労の基礎知識を学ぶためだけでなく、設計への適用や研究プログラム用にも使えるテキストとして評価を得た。

今回の第2版の新しい特徴は、付録のCD-ROMである。その第1部は、演習課題や要約を含むが、学生や教員用として、また自習用としても使えるものである。第2部は、稼働中に生じる疲労問題について学べる過去の事例集である。第3部は、疲労防止設計や、疲労の実験研究を計画するという視点を含めた。最後の第4部は、疲労問題の将来の研究の可能性についての著者の考察である。

参照した文献は各章に補足として記載してあるが、その数は通常の技術論文の場合より非常に少ない。本書に数値や図表を引用した文献リストは、各章の終わりに記した。リストの補足として、数は少ないが全般的な参考文献（主に書籍や講演集）も示した。ただし、具体的な問題を詳細に調べたい研究者は、コンピュータのデータベースにアクセスしてほしい。

著者は疲労の問題に40年以上従事してきてようやく本を書く時間ができ、2001年に本書の初版を出版した。7年後となる今回の第2版は、全章の内容に目を通し訂正を加えたが基本的な情報は変えていない。ただし「構造物の疲労防止設計（第20章）」（初版では第19章）は、全面的にその記述を書き換えた。

初版とのもう一つの違いは、付録のCD-ROMである。課題が入っているので、読者に、それらを解くという機会と、この分野における新しい取組みへの指針と刺激を与えるものとなっている。構造物と材料の疲労に取り組む全ての方と、新しい世代の学生にとって、この第2版が有益なものになることを希望する。

## 謝 辞

20年間にわたり、著者は、アムステルダムと North-Eastpolder にある国立航空宇宙技術研究所 (National Aerospace Laboratory NLR) の構造・材料部門で働き、さらに、20年間、正式に退職するまで、デルフト工科大学 (Delft University of Technology) の航空宇宙工学科の構造・材料研究室で働いてきた。どちらの研究室においても、刺激的な雰囲気の中、多くの人々と協力しての勤務であった。疲労試験と微視的評価の本質について理解している仲間や技術者と研究を行うことは素晴らしいことであった。人数が多く全員の名前を挙げられないが、お一人だけ例外として、欠くことのできない顕微鏡試験と写真で助けていただいた Frans Oosterom 氏の名前を挙げたい。また、多くの学部生と大学院生らとの共同作業は、非常に刺激に富むものであった。彼らは未解決の問題を解決に導こうと熱心であった。様々な困難を共にしたが、同時に、家族のような関係でもあった。後任の教官のおかげで、それは著者の退職後も続いている。まず Boud Vogelesang 教授、次に故 Ad Vlot 教授 (早逝が惜しまれる)、さらに現在の Rinze Benedictus 教授に感謝する。3人は皆、良き同僚であり、いつも都合をつけて議論に付き合ってくれた。多くの人々とのくだけたブレインストーミングが妙薬となり、しばしば、新しいアイデアや進歩がもたらされた。

本書の初版の原稿を準備する上で、Scott Fawaz 博士の無私の助力に感謝したい。彼は、デルフトでの博士論文のため作業をしてくれたが、全ての章を読み、様々な改善と訂正を提案してくれた。同じく、Eindhoven 工科大学の故 Hans Overbeeke 教授の助力に感謝したい。Harry van Lipzig 氏の多大なサポートにも感謝したい。彼はデルフトにおける著者の最初の学生であるが、現在、構造疲労に係わる様々な卒業生向けコースの責任者である。

本書の第2版に関しては、René Alderliesten 博士 (Delft University) と Malgorzata Skorupa 教授 (University of Mining and Metallurgy, Krakow) から、個別の章についての有益なコメントを頂いた。感謝したい。

本書の出版は、著者と Springer Science + Business Media との共同作業であった。出版に関与していただいた Mrs. Nathalie Jacobs と Anneke Pot 氏の、

快適で効果的な協りに感謝する。Mrs. Jolanda Karada は、本書の活字組みと図表についての手配を行い、テキストをより良くする提案をしていただいた。素晴らしい支援に感謝したい。

最後に重要なことであるが、愛する Janine は数えきれない年月を共にしてくれた。彼女なしに本書は存在しない。本書の執筆を可能にする環境を整えてくれただけでなく、私の仕事についての彼女の意見や質問は有意義であった。

## 訳者まえがき

本書は、デルフト工科大学名誉教授のスカイブ博士が著した「Fatigue of Structures and Materials」(第2版 2009年)の翻訳である。この本は金属疲労の幅広い領域を分かり易く解説したテキストとして世界的に評価が高く、2010年にはTAA(教科書 & 学術書著者協会)からその年の“Texty” Award (Textbook Excellence Award)を受賞している。著者の序文にもある通り、疲労に強い構造設計の観点からの記述が充実しており、学部生・院生や研究者のみならず、企業の設計技術者にも高く推奨できる。

著者のスカイブ博士は金属疲労の研究における世界的な権威の一人である。これも定評ある「Metal Fatigue in Engineering」(R. I. Stephens et al. 第2版 2000年)には、疲労研究の発展に貢献した21人の経歴・業績が記されているが、Wöhler、Goodman、Neuber、Peterson、Manson、Coffin、Paris、Elberらとともに博士の名前がある。記載された経歴によれば、1927年オランダ生まれ、1953年に国立航空宇宙技術研究所に入所、1973年から1992年まではデルフト工科大学航空宇宙工学科の教授として疲労にかかわる研究を主導、研究室でスカイブ教授の薫陶を受けたのは修士130人、博士17人に上るとのこと。ちなみに、ICAF(国際航空疲労委員会)は、教授の名を冠した“Jaap Schijve Award”を設け、若手研究者を顕彰している。

本書は金属疲労の教科書である。複雑な疲労メカニズムを読者が理解できるよう、数式の使用は最小限に抑えつつ、厳選された図表に基づいて丁寧な解説がなされている。よって、読者に材料力学や金属材料学の基本的な知識があれば、本書は自習も十分に可能である。

疲労の研究が過去の事故の教訓によって進化してきたことを考えると、本書の知識があれば、そのような事故の失敗の本質を理解することも容易になる。

大きな事故5件について、この場を借りて、本書の関連箇所(下線で表示)を参照しながら、疲労破壊を招いた要因について考察を加えてみたい。

## コメット機の連続墜落事故（1954年）

開発時の与圧胴体に関する強度試験に大きく2つのミスが指摘できる。試験計画の間違いと、試験結果に関する評価ミスの2つである。

まず、計画された試験は、与圧疲労試験と、耐圧強度試験（当時の法律には圧力容器としての要件が存在）の2種類。与圧疲労は飛行毎に胴体に内圧としてかかる圧力サイクルによる疲労、耐圧強度は大きな内圧に対する破壊強度である。開発陣は試験効率から2種類の試験を1個の供試体で済ませることとした。マイナー則が正しければ、内圧を負荷する厳しい試験を組合せることはより過酷で安全側の試験となる。しかし残念ながらマイナー則の仮定は成立せず、結果として不適切な試験となった。2種類の試験は個別に実施すべきであった。累積損傷の考えは荷重の相互作用効果がある場合は成り立たない（10章2節）。

実施された疲労試験のサイクルは、与圧サイクル（0～+0.56atmの繰り返し）と、与圧1000回ごとに1回の耐圧荷重（+1.12atm）とを組合せた複合サイクルである。試験の結果18000回でき裂が発生、開発陣は安全余裕十分と判断した。しかしながら、耐圧荷重のような大荷重が寿命を延伸させることは当時知られておらず、結果的に評価ミスとなった。

胴体には窓があるが、これらの開口部（特にコーナー部）は応力集中を生む切欠である（5章 図 5.9a）。胴体の外板は薄いので、内圧により外板は引張応力場となる。大荷重で引っ張られると切欠部には塑性変形が生じ、その結果、圧縮応力が残留する。この残留圧縮応力は、き裂発生を抑え疲労寿命を延ばす（4章）。また、き裂が発生した後も塑性誘起き裂閉口という現象によりき裂進展は遅延する（8章4節）。コメットの強度試験では、実際の運用では存在しない大きな耐圧荷重が負荷される毎に、窓コーナー部のき裂の発生と進展が抑えられた（11章2節）。残留応力やき裂閉口に関する当時の知見は乏しく、評価ミスを招いた。参照資料

- ・実際の設計選書 続々実際の設計 失敗に学ぶ 日刊工業 1996年 p336
- ・失敗知識データベース「ジェット旅客機コメット空中分解」  
（[www.shippai.org/fkd/cf/CB0071012.html](http://www.shippai.org/fkd/cf/CB0071012.html) 2022.6.21 閲覧）

## 日航ジャンボ機の墜落（1985年）

この悲惨な事故の根本原因は、その7年前の着陸時しりもち事故で壊れた後部圧力隔壁を修理する際のミスであるとされている。ボーイング社が修理用のスプライスプレート（継ぎ板）を間違えたため、リベットに荷重が集中し、その孔縁からき裂が発生・進展した。

事故報告書にある修理箇所の断面図から、（修理計画では2列のところ）実際にはリベット1列だけで締結された重ね継手の状況が見える。お椀形の圧力隔壁は薄いため、客室側の与圧によって隔壁に生じる応力は面内の引張応力である。まず、2列が1列になったためリベットの分担荷重は2倍となった。さらに、偏心のある重ね継手（非対称継手）では、引張応力に、その数倍にもなる2次曲げ応力が上乗せされる。なお悪いことに、修理用に挟まれたスプライスプレートが、その板厚分だけ偏心量を増やしている。このリベット1列の重ね継手の疲労特性が著しく悪かったであろうことは確実である（18章5節）。

### 参照資料

- ・航空事故報告書 62-2-JA8119 運輸省航空事故調査委員会 1987年6月19日
- ・失敗知識データベース「御巣鷹山の日航ジャンボ機の墜落」  
([www.shippai.org/fkd/cf/CB0071008.html](http://www.shippai.org/fkd/cf/CB0071008.html) 2022.6.22 閲覧)

## 大阪吹田エキスポランドジェットコースター事故（2007年）

1人死亡19人重軽傷の大惨事でありながら、公的な事故調査報告がないため（ただし、国交省の社会資本整備審議会の下に事故調査部会が設置され、エレベータは2006年以降、遊戯施設等は2010年以降、事故原因調査が実施されるようになった）、図面などの情報が乏しく事故原因については諸説ある。しかし構造強度の観点からほぼ確実に言えるのは、車輪を支えるボギーシャフトのナット締付による軸力が低く、走行時の応力振幅上昇を招き、その結果、ナット根元のシャフトねじ部から疲労破壊を起こしたであろうということである（18章4節）。

事故後の新聞報道では遊園地側の整備点検状況がクローズアップされていたが、諸情報から谷村康行氏が推定した構造組立図によると、根本的な設計不良が感じられる。当該シャフトはその中央部が車台に圧入されており、その外側にはボギーを支える1対のテーパローラベアリングが、逆の内側の端にはシャフト

を車台に固定するナットが、それぞれ取り付けられている。即ち、車輪ボギーからの負荷に対して、シャフトは中央圧入部と内側ナット締結部の2点支持である。シャフトが疲労破壊したのはそのナットの根元からである。

シャフトは車台圧入部に固定され、ナットの締込みに応じて軸力が増加するという設計でなければならない。しかし、実際には、定期的な分解点検でシャフトを脱着するなど、圧入部が摩耗し抜け出しやすくなっていた。その状態では、車輪ボギーからの負荷は圧入部で負担できないため、ナット締結部の負担が増加する。さらに、ナットを回してもシャフトに軸力は生じない。

このナットは溝付きナットであったから、整備担当者は適当な位置で割ピンを差し込み、作業完了としたのであろう。「溝付きナット+割ピン」は緩み止めとして一般的であるが、締め込みが緩くシャフト（ボルト）の軸力が不十分であれば、容易にねじ部から疲労破壊を起こす。ボルトはしっかり締付けないと壊れる。

#### 参考情報

- ・ subal こと谷村康行氏のブログ「かたちのココロ」2008年11月6日（残念ながら、谷村氏の逝去後ブログは閉鎖されている）

### 三菱ふそう前輪タイヤ脱落事故（2002年）

1992年から2004年にかけて、同社製の大型車の前輪ハブが破断しタイヤが脱落する事故が発生した。2002年には横浜で、脱落したタイヤが母子を直撃し母親が死亡するという悲惨な事故が起き、同社は世間から厳しい非難を浴びた。

ハブの破断を招いたき裂の起点は、典型的な疲労危険箇所（機械加工による隅R部）である（3章 図 3.25、14章 図 14.4 など）。スペース的な制約から当該部の形状変更（隅R緩和、厚み増大）が困難ということであれば、対策として、圧縮残留応力の付与も検討に値したと思われる（4章 2節）（14章 2節）。

ハブの材質は球状黒鉛鋳鉄（FCD）であったから、鉄鋼材料用の浸炭・窒化処理や高周波焼入れは適用できない。であれば、表面圧延やショットピーニングによる残留応力付与が選択肢になりうる。微小き裂の発生は抑制できなくても、その後のき裂進展を抑制・遅延できた可能性はある（15章 図 15.16a 参照）。

#### 参考情報

- ・ 日経ものづくり 2005年2月号「材料力学マンダラ その2 沢俊行」

## JR 西新幹線のぞみ号 台車き裂事故 (2017 年)

台車の側梁下面 (引張側) に生じた疲労き裂が進展し、破断寸前の状態で発見された。車両の脱線・転覆につながりかねない事故であった。JR の点検整備や運行管理が批判を浴びたが、疲労設計の観点からもいくつか指摘ができる。

運輸安全委員会の調査報告書によれば、き裂の起点と推定されるのは、軸ばね座を側梁下面に隅肉溶接する際に生じた内部の小さな割れである。不連続部を伴う隅肉溶接は溶接欠陥を生じやすく (19 章 3 節)、品質管理が重要であるが、出荷前に超音波探傷などの非破壊検査は行われていない。

溶接組立台車は基本的に疲労限度設計 (設計応力  $\leq$  許容応力) である。しかし、航空機が欠陥の存在を前提とする損傷許容設計で安全性を向上させたことを考えれば、新幹線への損傷許容設計の採用も検討に値する。

寿命はき裂発生期間とき裂進展期間の 2 段階の合計である (2 章 図 2.1)。初期割れが存在する場合、き裂発生期間をゼロとし、寿命 = き裂進展期間とすれば安全側の設計となる (19 章 4 節)。応力拡大係数を用いる破壊力学の進歩は著しく、き裂進展期間はある程度推定できる (8 章 6 節)。

運輸安全委員会の調査でもき裂進展シミュレーションが実施され、側梁下面の板厚と寿命の関係が評価されている。板厚 7 mm では疲労寿命は約 35 年、板厚 4.3 mm では僅か 5 年程度となる。き裂進展速度が推定できれば、より合理的な整備点検計画も策定できるはずである (20 章 図 20.3 参照)。

### 参考情報

- ・鉄道重大インシデント調査報告書 RI2019-1 運輸安全委員会 2019.3.28
- ・金属疲労の基礎と疲労強度設計への応用 中村／堀川 コロナ社 2008 年 p227

過去の事故の論考が長くなってしまったが、ページ欄外の注記について一言。[注] は著者によるもの、[訳注] は訳者による補足的なコメントである。原著に散見される細かな誤記 (引用文献の番号など) は、それに言及せず適宜修正している。

また、著者の序文に述べられている付録 CD であるが、残念ながら今回の翻訳の対象には含まれていない。ただし、原著の出版元である Springer 社のサイト (第 1 章の最後にアドレスを記載) からその内容にアクセスできるので、興味のある

方はぜひ目を通していただきたい。

訳者は疲労破壊についての専門家ではないため、あるいは著者の意図を正しく解釈できず間違った翻訳をしているかもしれない。その責はすべて訳者にある。

読者のご指摘を待ちたいと思う。

この翻訳書の出版により、構造物の疲労による事故が減少し、社会の安心・安全につながれば、一介の設計技術者としてそれに勝る喜びはない。

新 山 淳 一

# 目次

序文	iii
謝辞	v
訳者まえがき	vii
記号／略語／単位の換算	xxii

1. 構造物と材料の疲労への序論	1
参考文献	10

## **第 I 部** 一定振幅の繰返し荷重による疲労

2. 材料の疲労現象	
2.1 序論	13
2.2 疲労寿命における異なるフェーズ	14
2.3 き裂の発生	15
2.4 き裂の進展	18
2.5 疲労メカニズムの詳細	21
2.5.1 材料の結晶構造の特徴	23
2.5.2 介在物からのき裂発生	25
2.5.3 小さなき裂、き裂進展の障壁、しきい	28
2.5.4 き裂の核の数	32
2.5.5 表面効果	36
2.5.6 き裂進展とストライエーション	40
2.5.7 環境効果	45
2.5.8 繰返し引張と繰返しねじり	48

2.6	疲労破壊の特徴	50
2.6.1	微視的特徴	51
2.6.2	巨視的特徴	52
2.7	本章のメインテーマ	57
	参考文献	58

### 3. 切欠による応力集中

3.1	序論	63
3.2	応力集中係数 $K_t$ の定義	64
3.3	応力集中の解析的計算	66
3.4	応力集中係数 $K_t$ に対する切欠形状の影響	73
3.5	応力集中に係わるその他の側面	81
3.6	切欠の重ね合わせ	84
3.7	応力集中係数の決定方法	86
3.8	本章のメインテーマ	91
	参考文献	92

### 4. 残留応力

4.1	序論	95
4.2	残留応力を生む種々の要因	97
4.3	残留応力の計測、または計算	104
4.4	高荷重後の切欠における残留応力の推算	105
4.5	残留応力を除去する方法	108
4.6	本章のメインテーマ	110
	参考文献	110

### 5. き裂の応力拡大係数

5.1	序論	113
5.2	き裂の様々な種類	115
5.3	応力拡大係数 $K$ の定義	117
5.4	応力拡大係数の例	119
5.5	重ね合わせによる応力拡大係数 $K$ の求め方	130
5.6	カーブしたき裂前縁をもつき裂	133

5.7	き裂開口と応力状態	136
5.8	き裂先端塑性	140
5.9	エネルギーに関する多少の考察	143
5.10	応力拡大係数の決定方法	145
5.11	応力拡大係数 $K$ の相似概念とその適用	146
5.12	本章のメインテーマ	148
	参考文献	149

## 6. 疲労特性

6.1	序論	153
6.2	切欠無し試験片の疲労特性の記述方法	155
6.3	切欠無し試験片の疲労強度の一般的な特徴	162
6.3.1	疲労限度 ( $S_f$ ) と引張強さ ( $S_U$ ) の関係	162
6.3.2	平均応力効果	164
6.3.3	切欠無し試験片の寸法効果	167
6.3.4	荷重様式 (引張、曲げ、ねじり)	170
6.3.5	組合せ荷重	172
6.4	低サイクル疲労	175
6.5	本章のメインテーマ	181
	参考文献	182

## 7. 切欠を有する試験片の疲労強度

7.1	序論	187
7.2	切欠を有する試験片の $S_m = 0$ での疲労限度	188
7.2.1	相似則と切欠感度	188
7.2.2	切欠を有する試験片の疲労限度に対する寸法効果	191
7.3	切欠を有する試験片の $S_m > 0$ での疲労限度	197
7.4	繰返しねじりでの切欠効果	205
7.5	組合せ荷重ケースの疲労限度に対する切欠効果	207
7.6	表面仕上げの重要性	209
7.7	疲労限度予測の検討事例	212
7.8	切欠を有する試験片の S-N 曲線	219
7.9	本章のメインテーマ	224

参考文献	225
------	-----

## 8. 疲労き裂進展 解析と予測

8.1 序論	227
8.2 疲労き裂進展特性の説明	228
8.2.1 試験結果	228
8.2.2 応力拡大係数と相似則	231
8.2.3 $\Delta K$ 一定試験	234
8.3 疲労き裂進展領域	235
8.4 き裂開口	243
8.4.1 塑性誘起き裂開口と $\Delta K_{eff}$	243
8.4.2 平面ひずみ／平面応力	250
8.4.3 疲労き裂進展に対する厚さ効果	252
8.4.4 その他のき裂開口メカニズム	253
8.5 様々な材料のき裂進展データ	254
8.6 疲労き裂進展の予測	260
8.6.1 いくつかの基本的な観点	260
8.6.2 貫通き裂のき裂進展予測	264
8.6.3 部分貫通き裂のき裂進展予測	269
8.6.4 最後のコメント	273
8.7 本章のメインテーマ	274
参考文献	275

## 第Ⅱ部 荷重スペクトルと、変動振幅の繰返し荷重による疲労

## 9. 荷重スペクトル

9.1 序論	283
9.2 構造物が受ける実働荷重の種類	285
9.3 荷重履歴の記述方法	291
9.4 荷重スペクトルの決定	306
9.4.1 定性的な手法	307
9.4.2 定量的な手法	311

9.5	実働シミュレーション疲労試験と荷重スペクトル	315
9.6	本章のメインテーマ	319
	参考文献	320
<b>10. 変動振幅荷重による疲労</b>		
10.1	序論	323
10.2	マイナー則 (The Miner rule)	324
10.2.1	応力振幅が疲労限度未満である荷重サイクルの効果	326
10.2.2	切欠底塑性の効果	328
10.2.3	疲労破壊時のき裂長さ	330
10.2.4	マイナー則は基本的に何が悪いのか?	330
10.3	VA 荷重 (変動振幅荷重) による疲労試験の結果	334
10.4	VA 荷重での疲労寿命を予測する代替方法	341
10.4.1	損傷度の計算と、S-N 曲線の疲労限度未満への外挿	341
10.4.2	相対的マイナー則 (relative Miner rule)	345
10.4.3	ひずみ履歴予測モデル	346
10.4.4	実働シミュレーション疲労試験に基づく予測	348
10.5	VA 荷重での疲労寿命予測に関する議論	354
10.5.1	具体的な構造部材の寿命推定とマイナー則	354
10.5.2	設計応力レベルの影響についての考察	355
10.5.3	設計改良の様々な選択肢の比較	356
10.5.4	様々な荷重スペクトルの比較	356
10.6	本章のメインテーマ	356
	参考文献	358
<b>11. 変動振幅荷重による疲労き裂進展</b>		
11.1	序論	361
11.2	単純な VA 応力履歴によるき裂進展	362
11.3	複雑な VA 応力履歴によるき裂進展	377
11.4	VA 荷重での疲労き裂進展予測モデル	385
11.4.1	非相互作用モデル	386
11.4.2	VA 荷重による疲労き裂進展予測の相互作用モデル	387
11.5	VA 荷重履歴での疲労き裂進展予測方法の評価	396

11.6 本章のメインテーマ .....	401
参考文献.....	402

### 第Ⅲ部 疲労試験とばらつき

#### 12. 疲労とばらつき

12.1 序論 .....	411
12.2 ばらつきの原因 .....	411
12.3 ばらつきの表現方法 .....	413
12.4 ばらつきの実務上の留意点 .....	423
12.5 本章のメインテーマ .....	432
参考文献.....	433

#### 13. 疲労試験

13.1 序論 .....	435
13.2 疲労試験プログラムの目的 .....	436
13.3 試験片 .....	437
13.4 疲労試験の手順 .....	442
13.5 疲労試験結果の報告内容 .....	447
13.6 き裂進展計測の留意点 .....	449
13.7 本章のメインテーマ .....	458
参考文献.....	458

### 第Ⅳ部 特有の疲労条件

#### 14. 表面処理

14.1 序論 .....	465
14.2 表面処理の特徴 .....	465
14.3 表面処理の実務上の留意点 .....	479
14.4 本章のメインテーマのまとめ .....	480
参考文献.....	480

15. フレッシング腐食	
15.1 序論	483
15.2 フレッシング腐食のメカニズム	483
15.3 フレッシング腐食に影響を与える諸要因	486
15.4 フレッシング腐食問題を避ける方法	495
15.5 本章のテーマのまとめ	502
参考文献	502
16. 腐食疲労	
16.1 序論	505
16.2 腐食疲労の特徴	506
16.2.1 気体環境における腐食疲労	510
16.2.2 液体環境における腐食疲労	512
16.3 腐食疲労の実務上の留意点	521
16.4 事例	524
16.5 本章のテーマのまとめ	526
参考文献	527
17. 高温疲労と低温疲労	
17.1 序論	531
17.2 高温疲労の2つの事例	532
17.3 高温疲労特性	536
17.4 低温疲労	540
17.5 一般的なコメント	545
参考文献	545

## 第V部 接合部と構造物の疲労

18. 接合部の疲労	
18.1 序論	549
18.2 ラグ継手の疲労	551

18.3	ボルトやリベット列で締結された対称突合せ継手	558
18.4	引張荷重を受けるボルト	562
18.5	偏心を伴うリベット・ボルト継手	568
18.6	接着接合による継手	579
18.7	接合部の疲労特性予測に関する全般的議論	581
18.8	本章のメインテーマ	583
	参考文献	584

## 19. 溶接継手の疲労

19.1	序論	589
19.2	一般的事項	590
19.3	溶接の形状的側面	592
19.4	CA 荷重下の疲労寿命の検討	599
19.5	VA 荷重下の溶接継手の疲労耐久性	606
19.6	事例紹介 (圧力容器と海洋構造物)	607
19.7	スポット溶接継手	611
19.8	本章のメインテーマ	612
	参考文献	613

## 20. 構造物の疲労防止設計

20.1	序論	617
20.2	構造疲労問題の種類	617
20.3	疲労防止設計	620
20.4	不確実性、ばらつき、安全率	623
	20.4.1 不確実性	624
	20.4.2 ばらつきと安全率	625
20.5	事例紹介	633
	20.5.1 ショルダフィレットの改善	634
	20.5.2 非対称な孔補強がもたらす2次曲げ	635
	20.5.3 設計不良のパッチ当て修理による航空機主翼パネルのき裂	638
	20.5.4 青馬大橋のオンライン構造健全性モニタリング	640
20.6	結論のまとめ	643
	参考文献	644

## 第Ⅵ部 繊維 - 金属積層材の耐疲労特性

21. 繊維 - 金属積層材の耐疲労特性	
21.1 序論	649
21.2 繊維を含まない薄板積層材	651
21.3 繊維 - 金属積層材 Arall と Glare	655
21.3.1 繊維 - 金属積層材のコンセプト	655
21.3.2 薄板材料としての繊維 - 金属積層材	658
21.3.3 Glare におけるき裂進展	660
21.3.4 Glare 部材の疲労特性	664
21.4 Glare に関する補足説明	667
21.4.1 Glare の代表的な特性	668
21.4.2 Glare 構造物の製造と設計の側面	669
21.5 まとめのコメント	671
参考文献	673
索引	677