閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

（電子試読版）

Strength Design Handbook for Failure Prevention of Products

# 破壊力学大系

## ―壊れない製品設計へ向けて―

編集代表　服部　敏雄

編集委員（50音順）
川田　宏之
田川　哲哉
東郷敬一郎
中井　善一
三浦　英生

New Technology New Science
（電子試読版）

NTS

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

**サンプルデータでは、一部のページのみを
ご覧いただけます。**

制限つきPDFで全ページをご覧いただけます。
（制限内容：閲覧期間の設定、コピーやプリントの禁止など）

・PDFの閲覧
「パスワード」と「専用のビューア」（無料）が必要です。
費用は一切かかりません。
※WindowsのPCでのみご覧いただけます。予めご了承ください。

・パスワード　※電子試読ページよりお申込みください
https://www.nts-book.com/ntsの電子試読
ページ下部にお申込みフォームがあります。

右のQRコードからも
電子試読ページにアクセス
いただけます。

・ビューアのダウンロード
PDFは、株式会社スカイコムのSkyPDF Viewer（無償のPDFビューア）をダウンロードしてご覧いただけます。
※Adobe Acrobat Readerなど他のPDF閲覧アプリケーションではご覧になれません。

SkyPDF Viewer 無償ダウンロード：
https://www.skycom.jp/free/

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

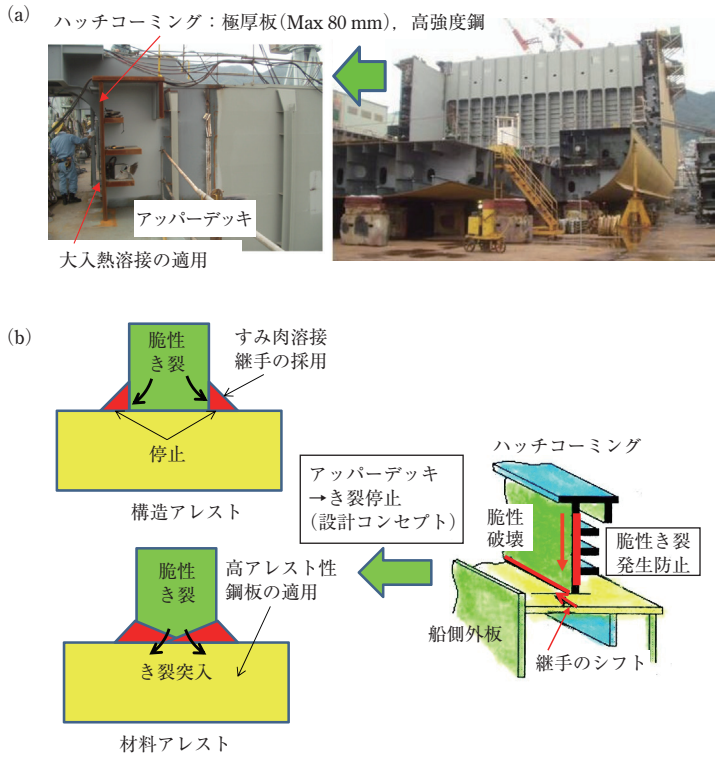
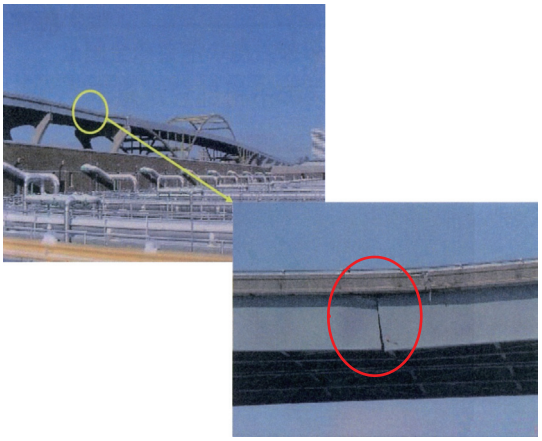



**図 6　大型コンテナ船の構造と安全性確保のコンセプト**(50 頁参照)
(a)コンテナ船の構造，(b)脆性き裂停止のコンセプト


溶接割れ→脆性破壊(2000 年)

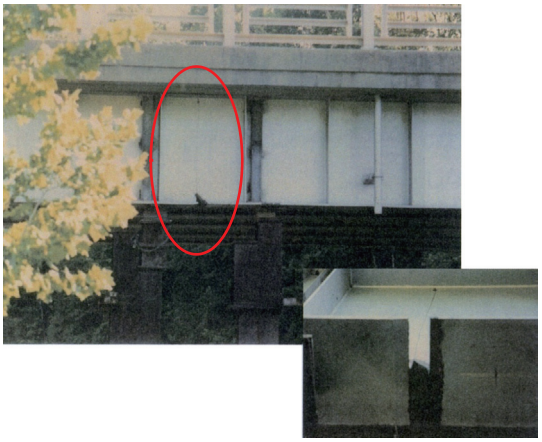

フランジ：疲労き裂→ウェブ：脆性破壊へ進展

**図 14　最近の米国における橋梁の脆性破壊**(55 頁参照)

口絵 ❶

New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

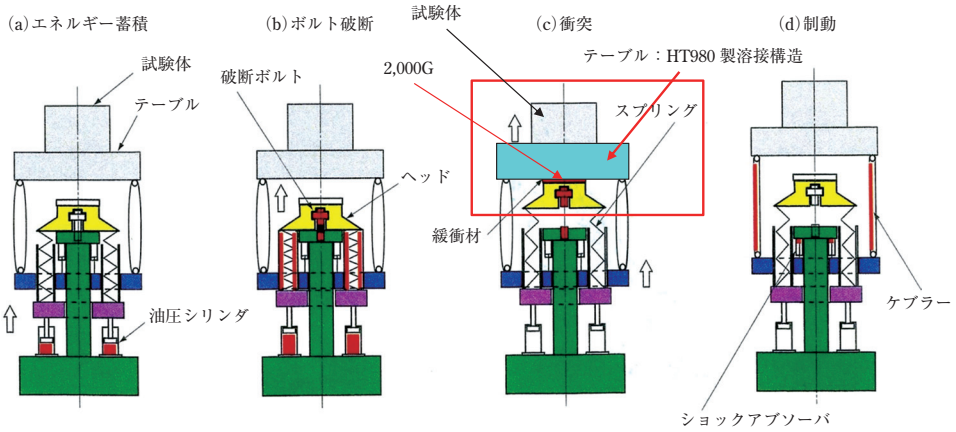



**図 18　衝撃試験装置（2001 年）**（57 頁参照）

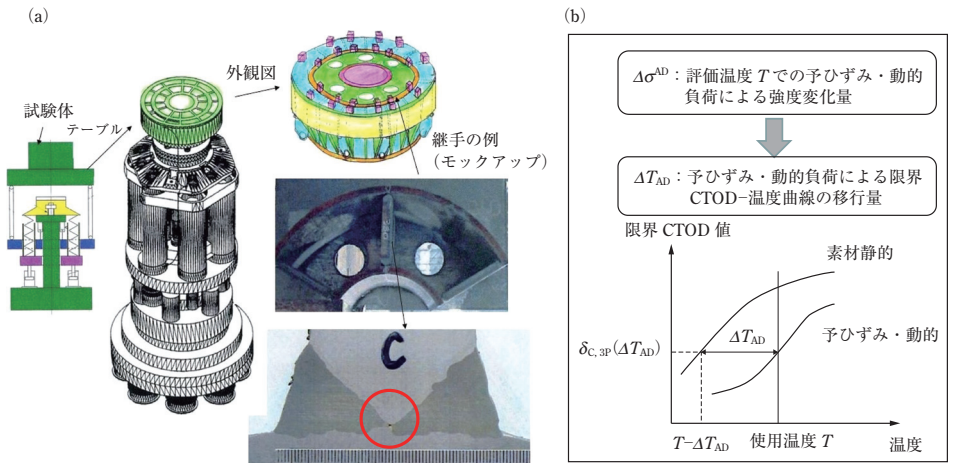



**図 19　衝撃試験装置のテーブルの構造と溶接継手設計**（58 頁参照）
(a)テーブルの構造，(b)溶接継手設計

口絵 2

New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

（電子試読版）New Technology New Science

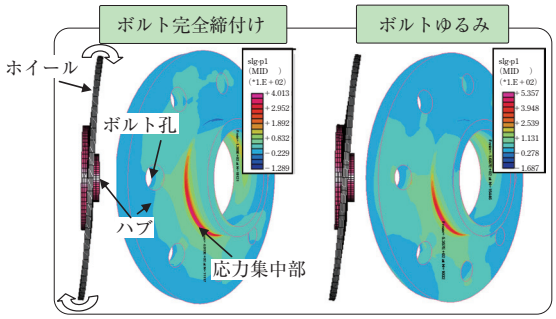
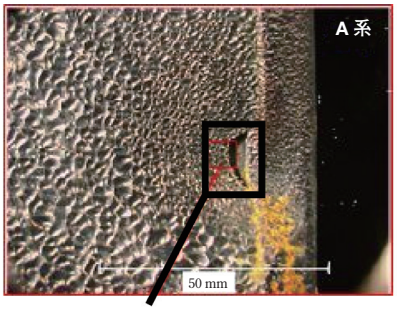



**図 4　ハブ締付けボルトの締付け力と，ハブ最大応力のモデル計算結果**（113 頁参照）




キャビテーション壊食
により配管貫通

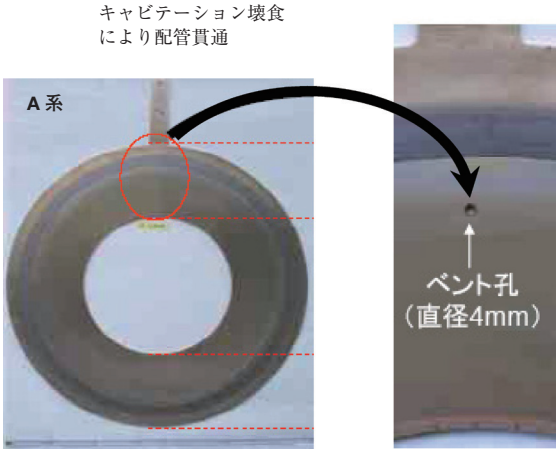
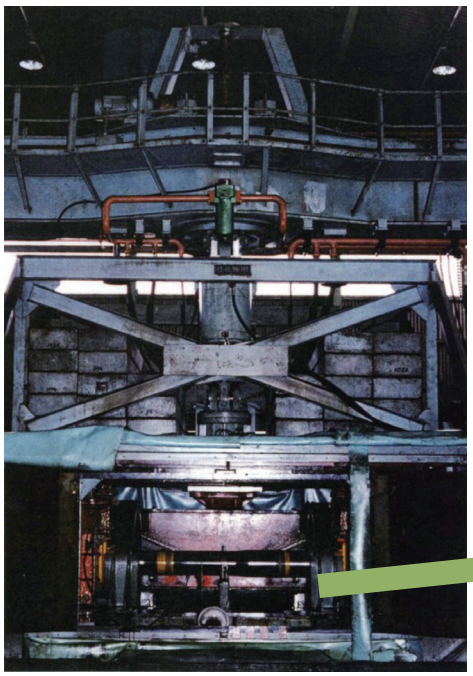
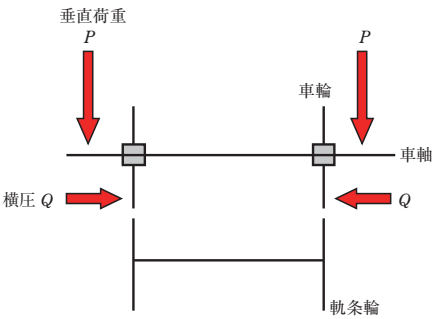



**図 4　オリフィスのベント孔下流に生じたキャビテーション壊食** [13]（103 頁参照）





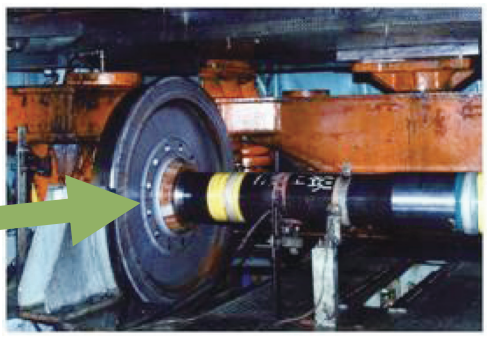



**図 4　輪軸疲労試験装置**（125 頁参照）

口絵 ❸

New Technology New Science （電子試読版）

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

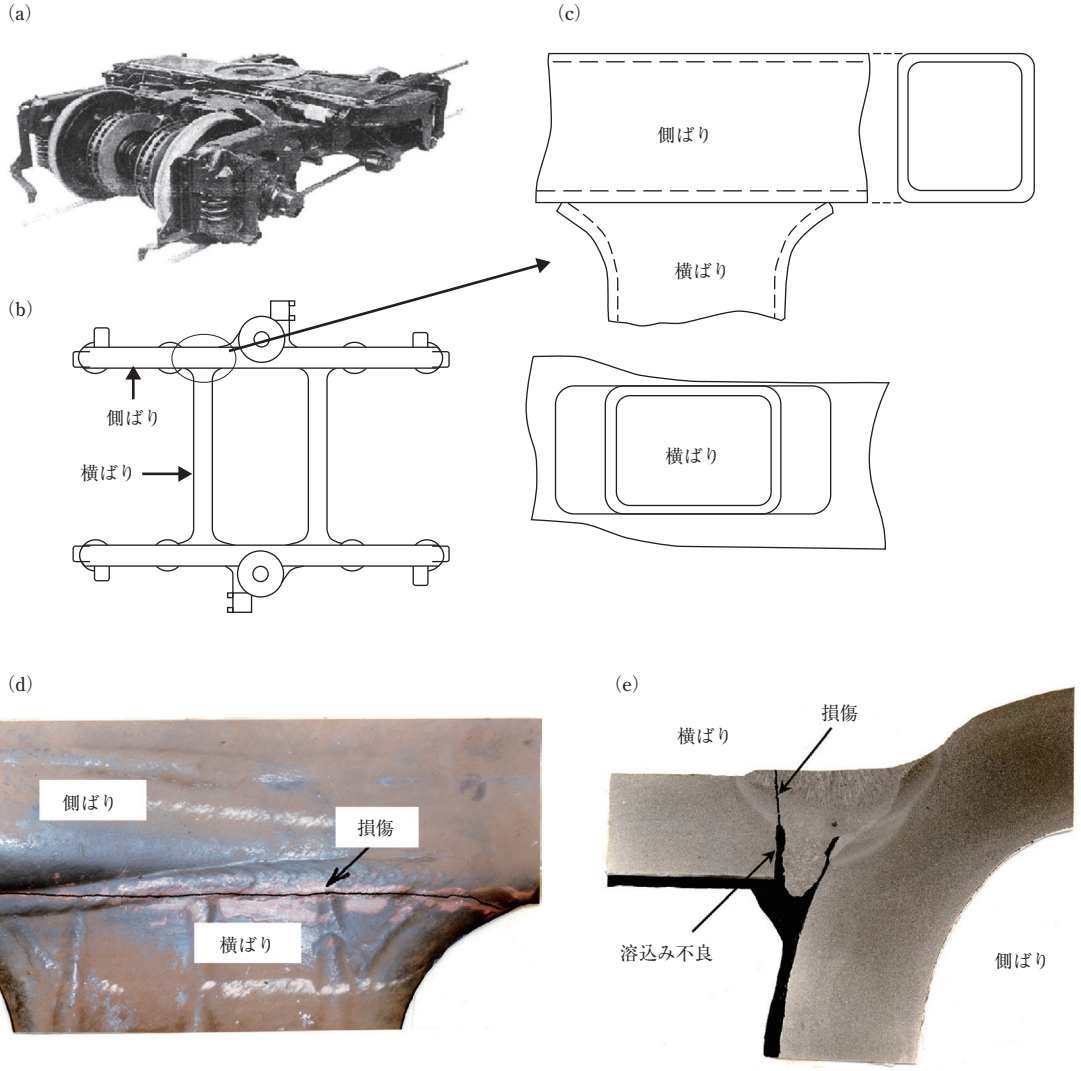



**図 1　台車枠の損傷状況**（117 頁参照）
(a)類似台車の外観，(b)台車枠，(c)台車枠損傷部詳細，(d)損傷外観，(e)損傷溶接部断面

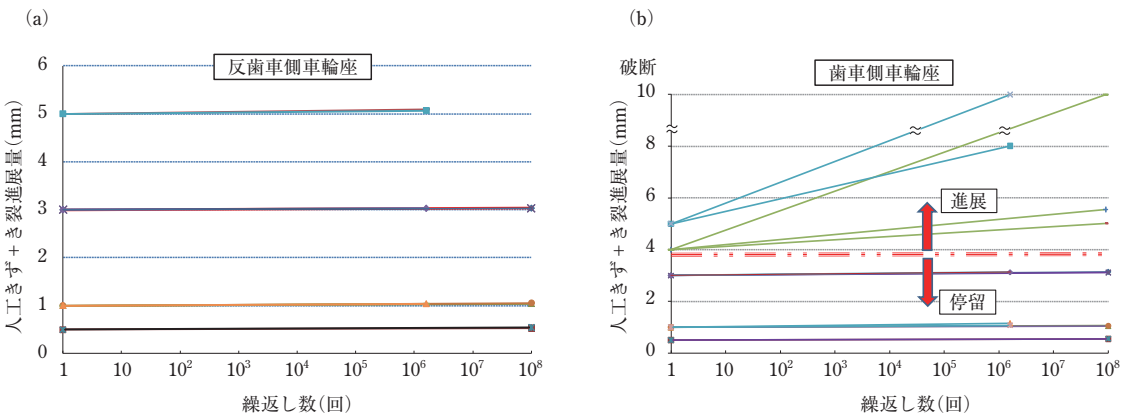



**図 7　各人工きず先端からのき裂進展**（126 頁参照）
(a)反歯車側車輪座，(b)歯車側車輪座

## 口絵 4

New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

（電子試読版）New Technology New Science

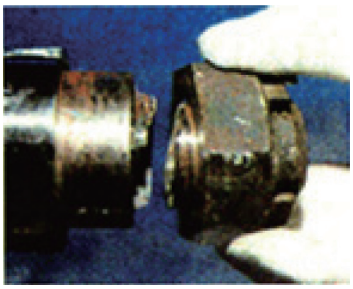


**図 4　折れた車軸のねじ部**（139 頁参照）

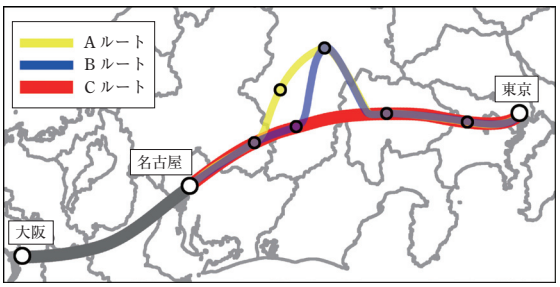



**図 1　中央リニアの概略ルート**（152 頁参照）

**図 2　山梨実験線で走行実験中の超電導リニアモータカー**（152 頁参照）

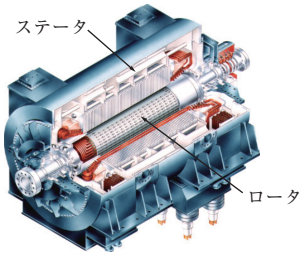



**図 2　タービン発電機**（170 頁参照）

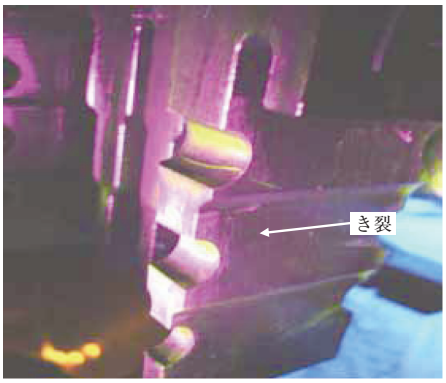



**図 4　北陸電力㈱志賀原子力発電所第 2 号機低圧タービン（B）の第 12 段動翼取付部のき裂**（183 頁参照）

口絵 5

New Technology New Science （電子試読版）

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

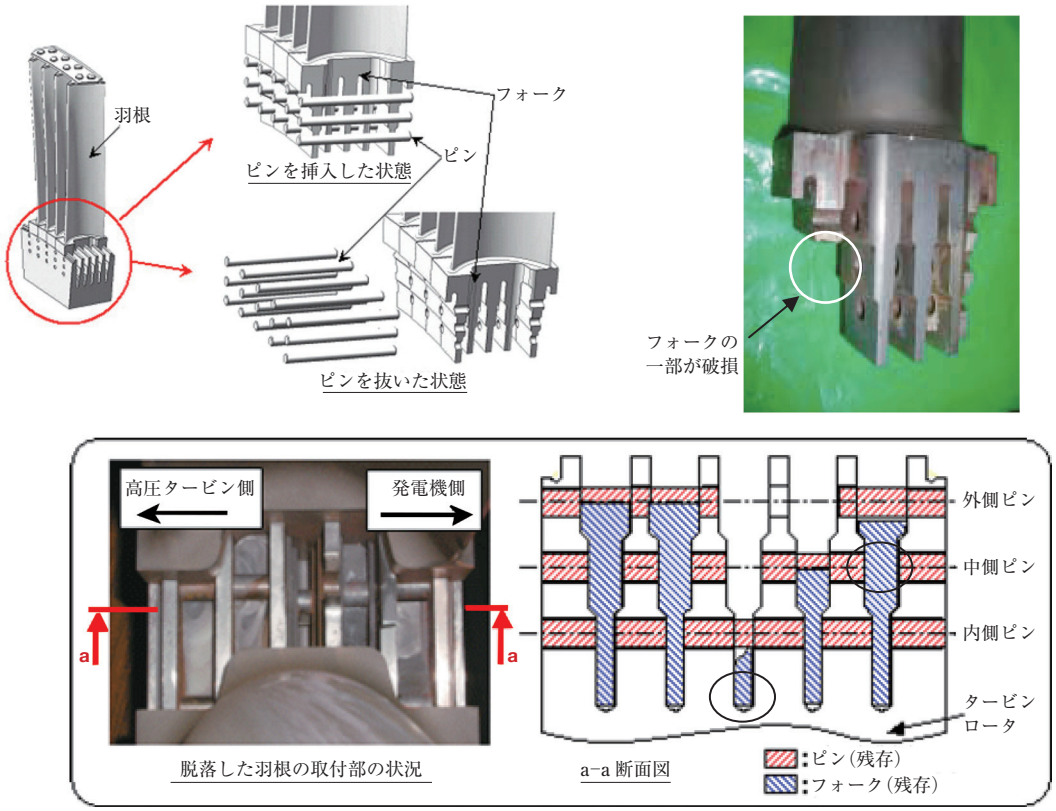



**図３　動翼取付部のフォーク／ピン構造と，折損，き裂の状況**（183 頁参照）

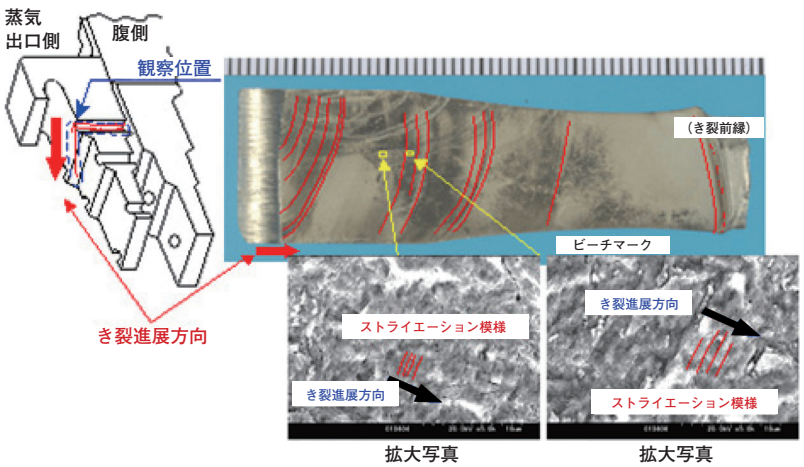



**図９　動翼取付部のフォークの折損，き裂の状況（ミクロ破面解析）**（185 頁参照）

口絵 6

New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

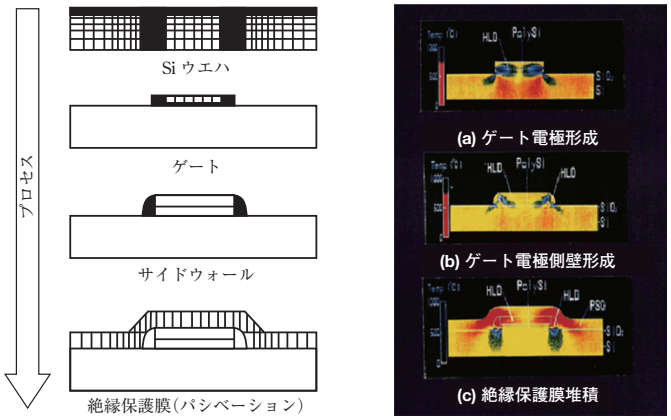



**図 2　薄膜トランジスタプロセスの有限要素法解析事例**（206 頁参照）

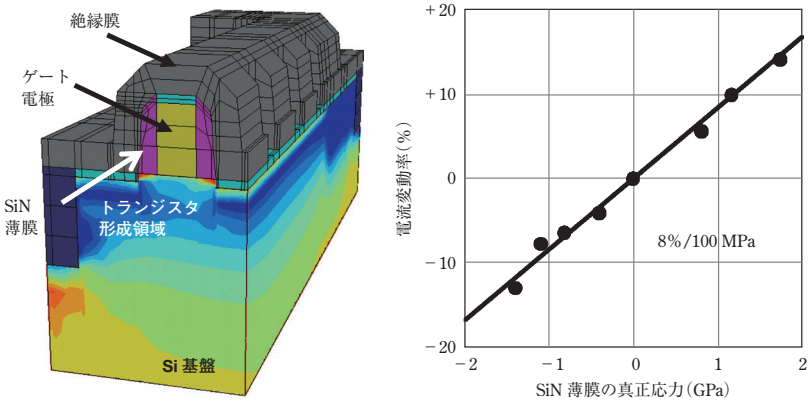



**図 10　トランジスタ特性の薄膜プロセス依存性解析例**（210 頁参照）

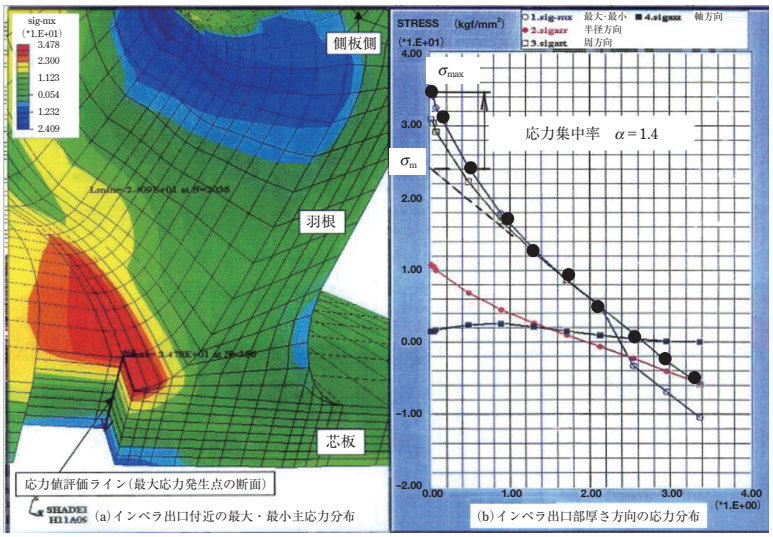



**図 5　インペラ付け根応力集中部の応力解析と強度評価**（226 頁参照）

口絵 ❼

New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

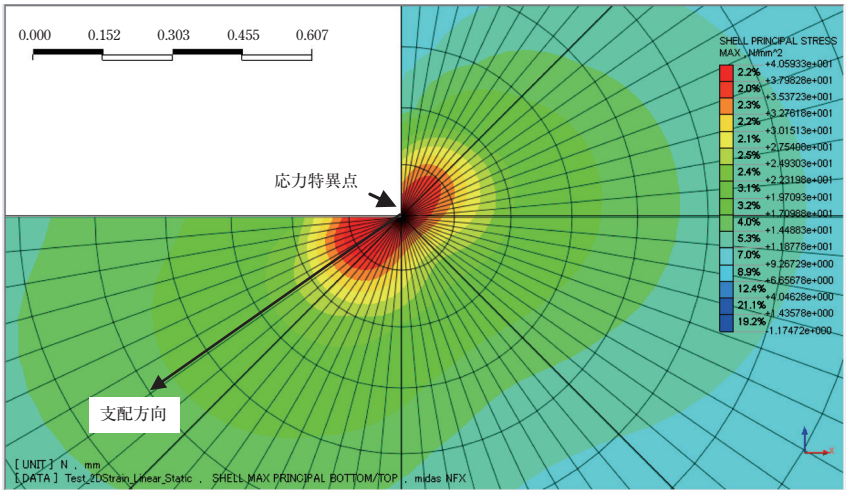



**図 6　応力特異点近傍最大主応力分布（最大値 40.6 MPa）拡大図**（227 頁参照）

**図 10　鉄道車両への適用例**（251 頁参照）
（a）接合構造；溶接長：約 1 km／車輌，（b）FSW で製造した鉄道車両；英国納め Class395 高速車両

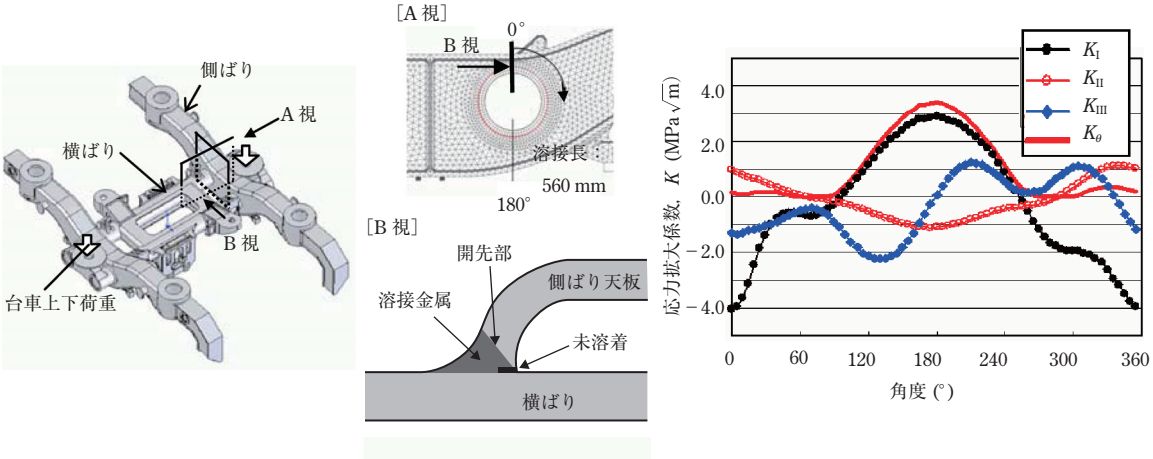



**図 6　台車枠の側ばり−横ばり接合部の応力拡大係数算出例**[11]（256 頁参照）

口絵 8

New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

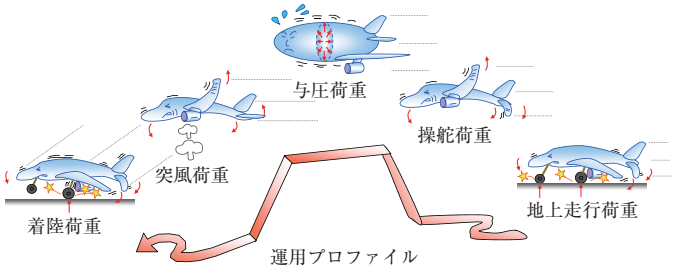



**図 3　代表的な荷重**（259 頁参照）

**図 10　全機静強度試験**[3]（261 頁参照）

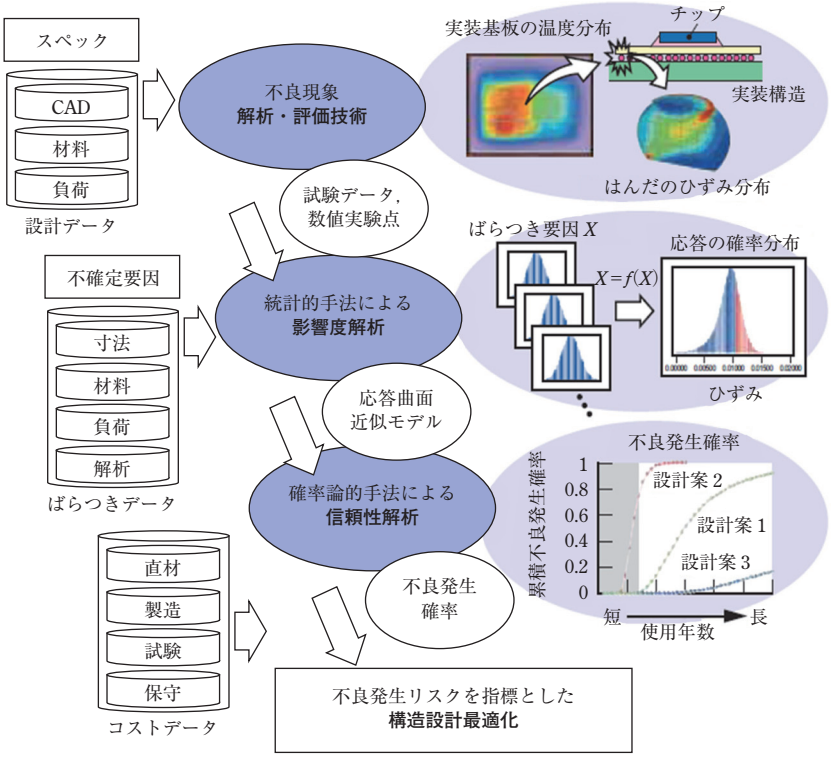



**図 2　応答曲面法に基づく構造信頼性設計最適化**（270 頁参照）

## 口絵 9

New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

**図 4　全機有限要素法解析モデル**[1]（259 頁参照）

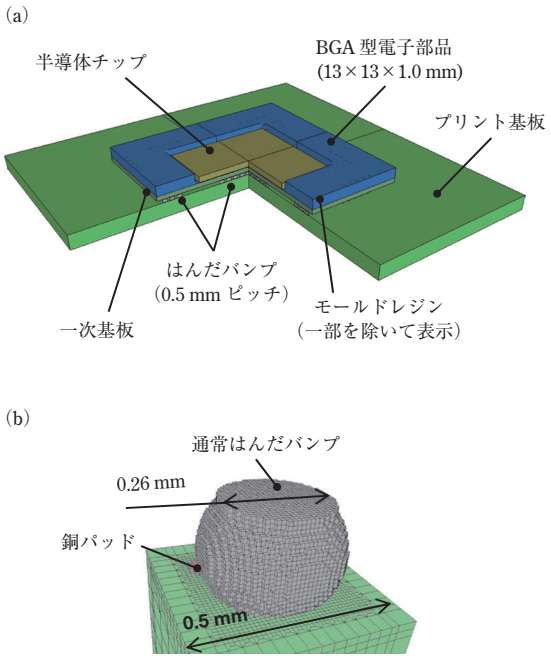



**図 3　解析対象の電子部品**（265 頁参照）
(a)プリント基板に実装された電子部品，(b)はんだバンプ拡大図

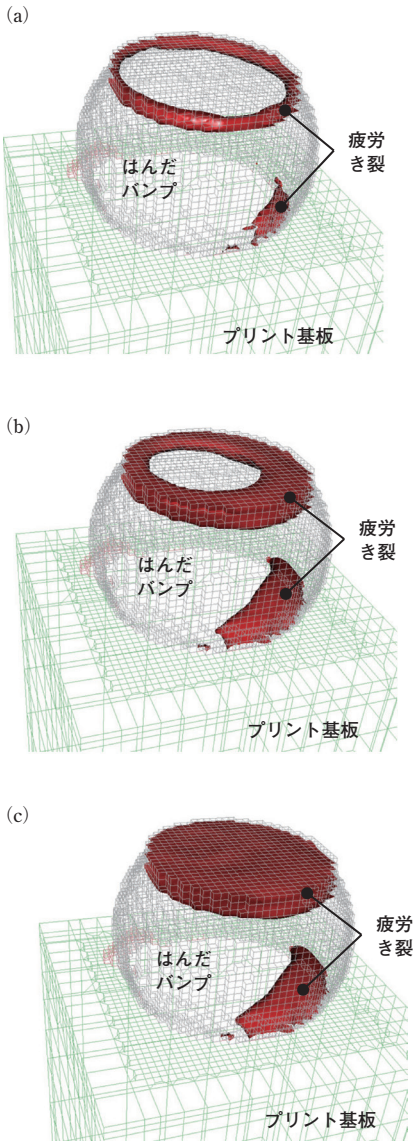


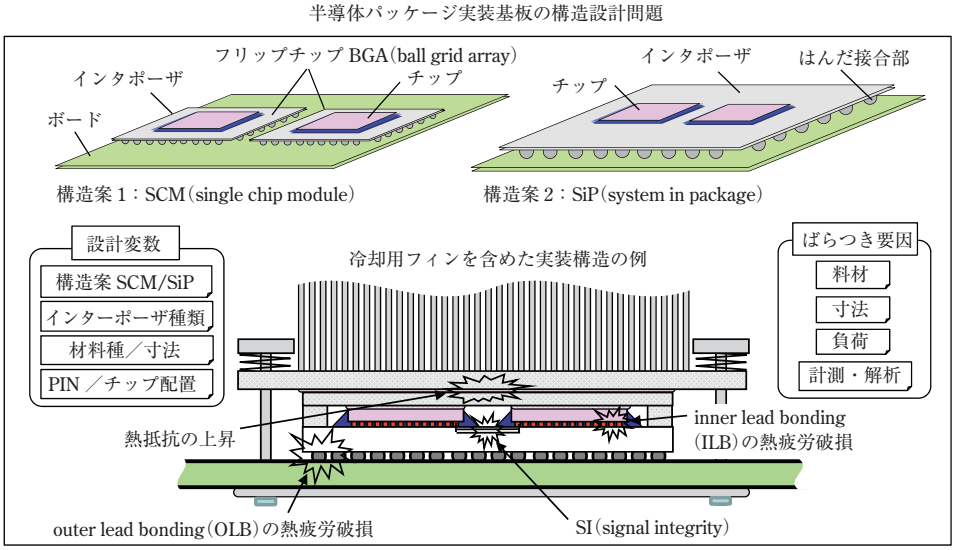

**図 4　解析で求まるはんだき裂**（266 頁参照）
(a)510 サイクル後，(b)1,350 サイクル後，(c)2,070 サイクル後

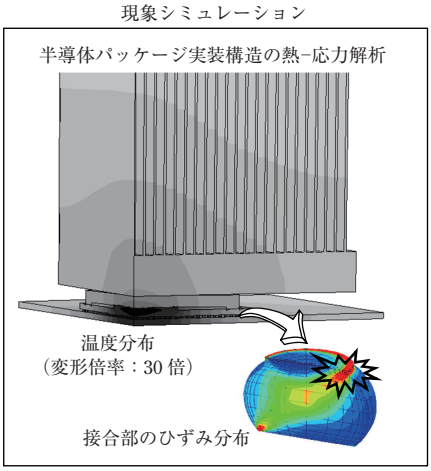


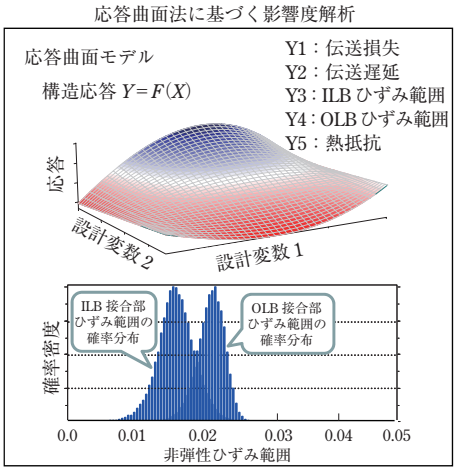

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

（電子試読版）New Technology New Science



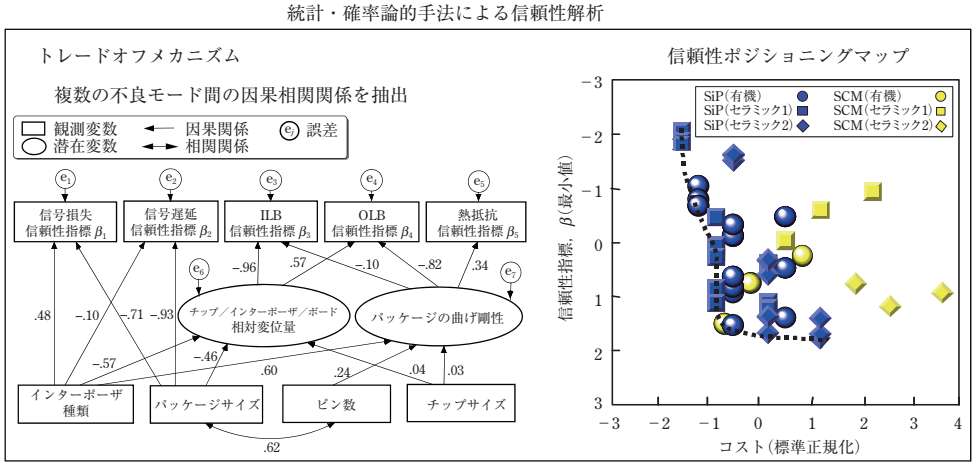




**図 4　半導体パッケージの構造設計問題への適用例**（272 頁参照）

口絵 11

New Technology New Science （電子試読版）

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

**図 1　人工股関節の製品例（コンポーネント名と材質）**[3]（279 頁参照）

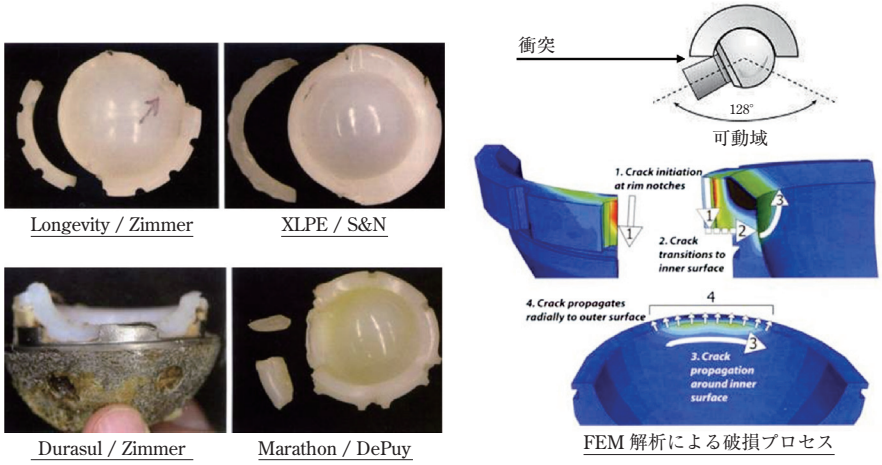



**図 4　超高分子量ポリエチレンライナーの破損例**[10]（283 頁参照）

口絵 12

New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

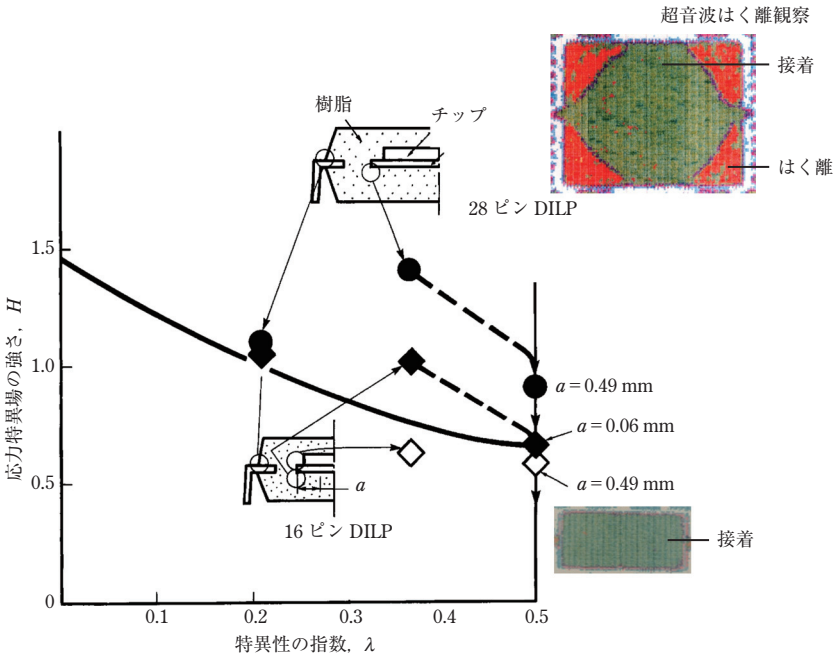



**図 14　応力特異場パラメータ $H$ と $\lambda$ を用いた，実際の IC プラスチックパッケージのはく離評価**（362 頁参照）

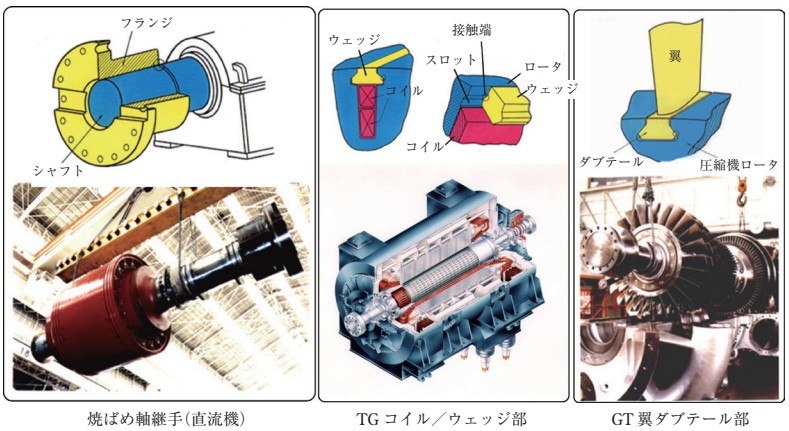



**図 31　フレッティング疲労の損傷・事故例**（367 頁参照）

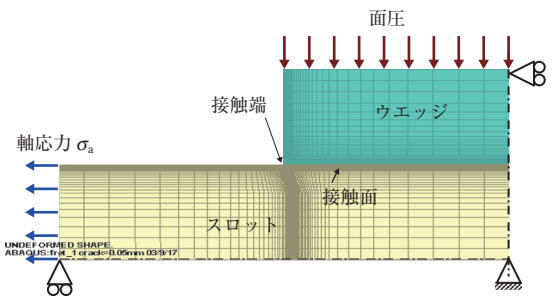



**図 41　フレッティング疲労き裂発生評価用接触体モデル**
（369 頁参照）

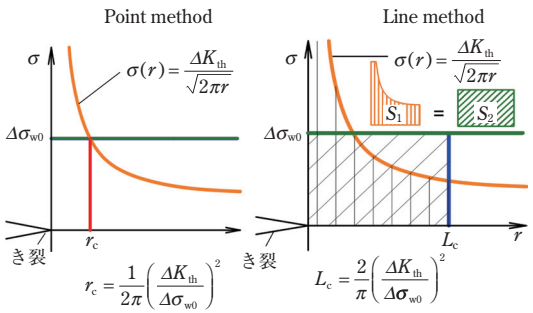



**図 28　特定位置 $r_P$ と $r_L$ の導出**（418 頁参照）

口絵 ⓭

New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

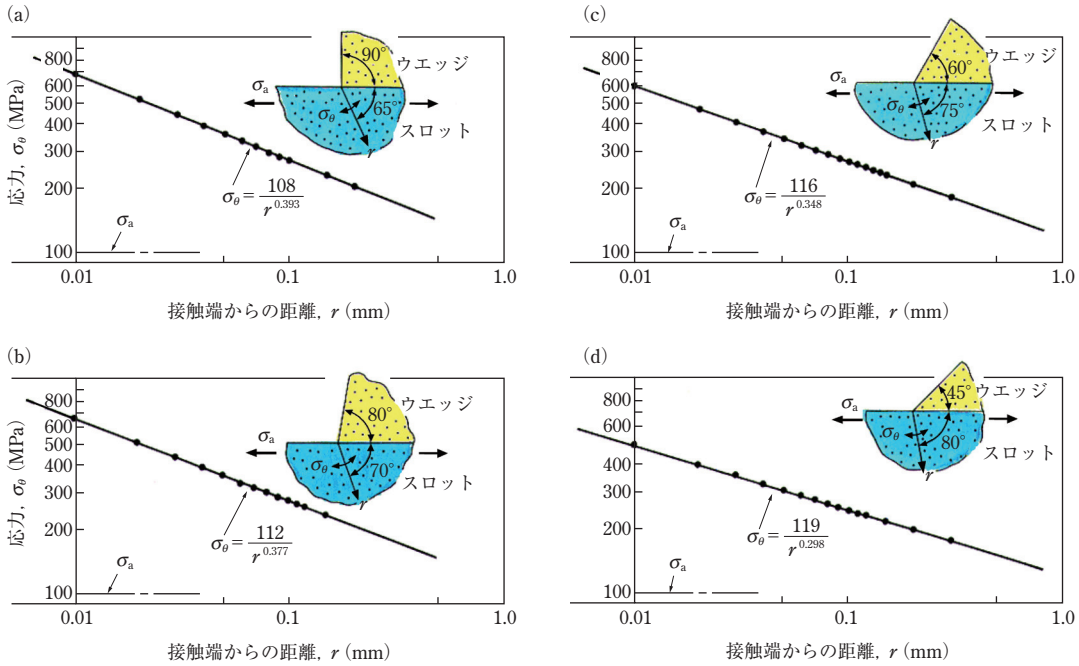



**図 42　接触端近傍の応力分布の解析結果**（370 頁参照）
接触端角度(a)90°，(b)80°，(c)60°，(d)45°

**図 10　接触端部の応力分布**（412 頁参照）
接触端角度(a)90°，(b)80°，(c)60°，(d)45°

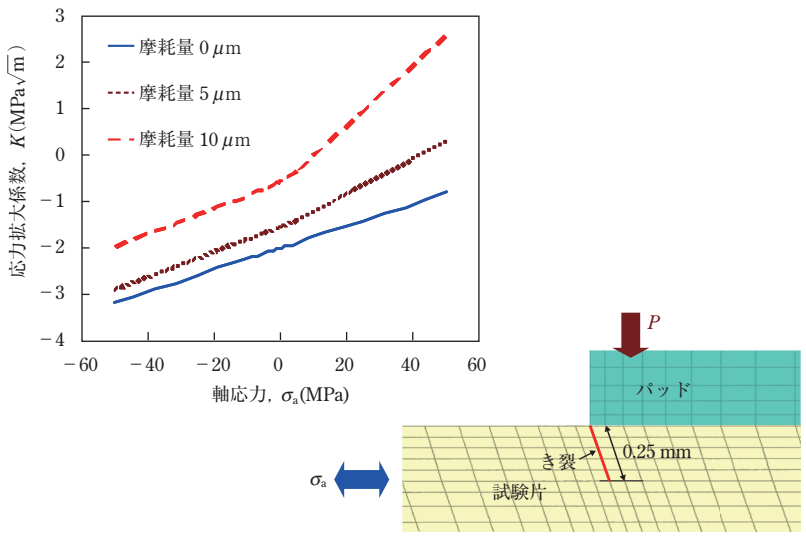



**図 22　各摩耗量での応力拡大係数解析結果**（416 頁参照）

## 口絵 14

New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

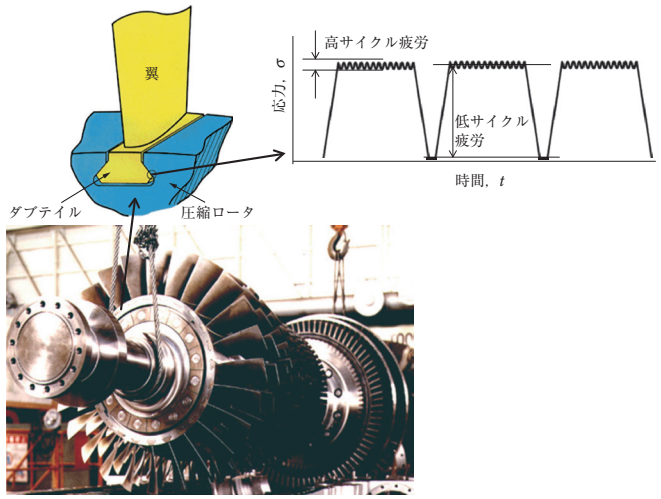



**図 27　ガスタービンロータの動翼取付構造と負荷サイクル**（417 頁参照）

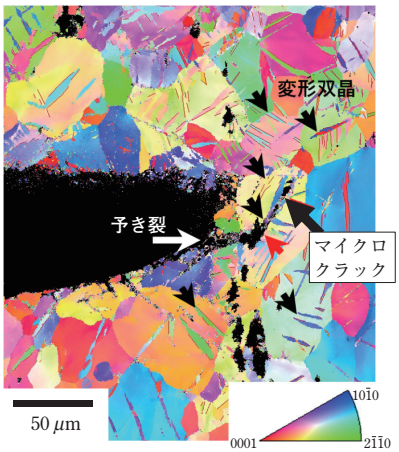



**図 3　三点曲げによる平面破壊靱性試験の過程で，母相とバンド状の変形双晶との界面近傍を進展するマイクロクラック**[4]（455 頁参照）

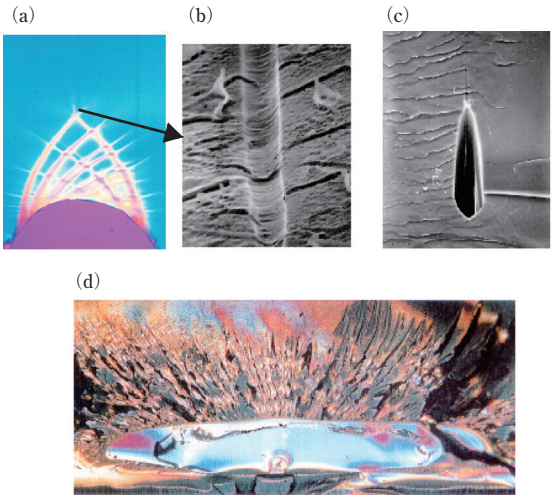



**図 8　U 字形切欠の先端に形成された塑性領域（a），クレイズ（b），クラツク（c），破壊面（d）**（465 頁参照）

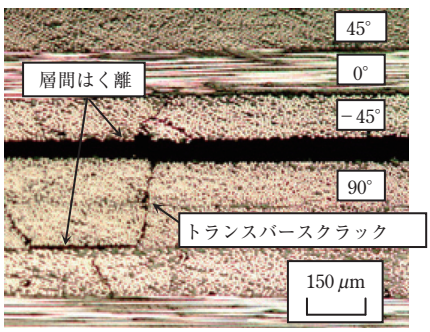



**図 9　擬似等方積層板の断面観察写真**（481 頁参照）

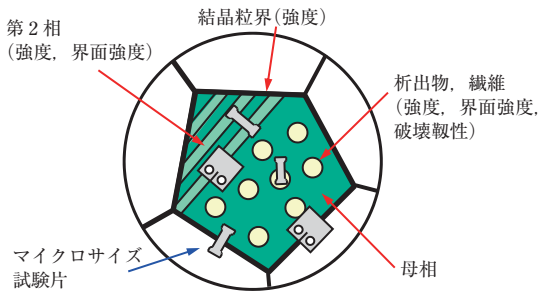



**図 8　材料微視組織とマイクロサイズ試験片の切り出しの模式図**（487 頁参照）

このような試験片とマイクロ材料試験装置を用いることにより析出物や第 2 相の強度，破壊靱性，界面や粒界強度などの機械的性質の評価が可能となる。

口絵 15

New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

# 発刊にあたって

「絆」が 2011 年の漢字に選ばれた。2011 年 3 月 11 日の東日本大震災・大津波・原発崩壊……と，北関東・東北地区の苦難を全日本で支援したいという熱い思いを反映した素晴らしい一字だと思う。しかし，技術者と社会とのかかわりの側面から見ると，種々問題が露呈した年でもあった。21 世紀に入り，科学技術はより一層進歩し，ますます高度化，複雑化しており，技術的なことが原因での不祥事が多くなることは致し方ない面もある。しかし事故に対する対応において，企業技術者は自己防衛に注力し隠ぺいに走る，大学等の中立研究者は，狭い専門分野からのみの偏った分析にとどまる，これでは一般市民は技術不信に陥る。近年，輸送機器ハブの破損事故，ジェットコースター車軸破損事故……等社会に多大の被害を与えた強度・信頼性がらみのトラブルは多い。筆者もこれらの事故に関わらせていただいたが，上記障害で，最重要の真の原因・最適な対策がゆがめられ，挙句の果ては不公平な司法判断が下される危険性を大いに感じた。この時だからこそ技術者は，社会からより一層の倫理・モラル・責任が求められている。この背景のもと本書「**破壊力学大系―壊れない製品設計へ向けて―**」の企画が進められた。従って本書の構成も，まず技術者倫理・企業倫理から俯瞰できるよう第 1 編「事故例」，次にそれらの対策に基づいての第 2 編「強度設計技術」，さらにはこれらを支える汎用基礎技術として第 3 編「材料力学・破壊力学」，第 4 編「各種材料」とさせていただいた。通常の教科書とは順序が逆と思われるかもしれないが，現在企業技術者として第一線で活躍しておられる方々には最も適した構成と信じている。ものづくり企業の開発設計・生産技術・品質保証・保全すべての現場技術者，企業技術の実態を知る必要のある大学研究者・学生，事故に対して公正な評価の責任にある司法界の方々に是非読んでいただきたい。

最後に，本書発刊にあたり，ここに至る経過と関係者の方々へのお礼を述べ，我々編集に携わった立場からの思いを記させていただく。まず，御執筆いただいた先生方，技術者の中には，東日本大震災で研究室，実験室が崩壊された中で，あるいは，バンコク大浸水で関連工場閉鎖の受難の中でも，執筆・校閲・校正を遂行頂いたその責任感に対して感謝申しあげる。また，企画・出版頂いた株式会社エヌ・ティー・エスの吉田社長，森顧問におかれては，まさにこの厳しい時期だからこそ日本のものづくり企業復興に協力したいとの熱い思いをいただいた。これら志は一にしながらも企画・執筆・編集・印刷個々の方々のこだわりから激しい議論もあったが，その調整の中心で大車輪のご活躍をされたオフィス MA の蘆田女史の奮闘に感謝する。

ご購読いただく方々には，我々のこの熱い思いを，本書の行間の合い間合い間に感じていただければ幸甚である。

Make Japanese Revival Success with Young Engineer's Sense of Responsibility!
平成 24 年 2 月吉日

**編集代表　服部　敏雄**
岐阜大学

New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


# 執筆者一覧


【編集代表】

**服部　敏雄**　岐阜大学 工学部機械システム工学科 教授

【編集委員】（50 音順）

**川田　宏之**　早稲田大学 理工学術院 機械科学・航空学科 教授

**田川　哲哉**　大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 准教授

**東郷敬一郎**　静岡大学 工学部長・機械工学科 教授

**中井　善一**　神戸大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授

**三浦　英生**　東北大学 大学院工学研究科 教授／
東北大学附属エネルギー安全科学国際研究センター センター長

【執筆者】（掲載順）

**服部　敏雄**　岐阜大学 工学部機械システム工学科 教授

**田中　正清**　元 厚生労働省 産業安全研究所 機械システム安全研究部

**宮川　　進**　株式会社デンソー 材料技術部 担当次長

**野口　　徹**　室蘭工業大学 理事・副学長

**小熊　規泰**　富山大学 大学院理工学研究部 教授

**中西　保正**　株式会社 IHI フェロー・技術開発本部 技監

**宇佐美三郎**　株式会社日立製作所 日立研究所 材料研究センタ エネルギー材料研究部 PM2 ユニット

**宮下　幸雄**　長岡技術科学大学 機械系 准教授

**中込　忠男**　信州大学 工学部建築学科 教授

**伊藤　寛之**　信州大学 大学院工学系研究科

**大塚　尚武**　株式会社ミュー 代表取締役／龍谷大学 名誉教授

**伊藤　義康**　株式会社東芝 電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 首席技監

**足立　幸志**　東北大学 大学院工学研究科 ナノメカニクス専攻 ナノ界面制御工学研究室 教授／
東北大学機械系 トライボベーストデザイン研究センター センター長

**祖山　　均**　東北大学 大学院工学研究科 ナノメカニクス専攻 教授

**山辺純一郎**　九州大学 水素エネルギー国際研究センター 水素安全学研究部門 准教授

**小林　幹和**　三菱ふそうトラック・バス株式会社 開発本部 スペシャリスト

**石塚　弘道**　公益財団法人鉄道総合技術研究所 車両構造技術研究部 主管研究員

**織田　安朝**　株式会社テス 技術本部 試作部 部長

**中島　睦夫**　航空技術コンサルタント・航安塾メンバー




New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

| | |
|---|---|
| **青山　博** | 株式会社日立製作所 日立研究所 機械研究センタ 第三部 主任研究員／金沢工業大学 大学院工学研究科 高信頼ものづくり専攻 客員教授 |
| **三浦　英生** | 東北大学 大学院工学研究科 教授／東北大学附属エネルギー安全科学国際研究センター センター長 |
| **西村　朝雄** | 株式会社実装パートナーズ |
| **北野　誠** | 株式会社日立製作所 日立研究所 主管研究長 |
| **指熊　裕史** | 川崎重工業株式会社 航空宇宙カンパニー 技術本部 研究部 基幹職 |
| **北村　隆行** | 京都大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 教授 |
| **佐藤　一雄** | 名古屋大学 大学院工学研究科 マイクロ・ナノシステム工学専攻 教授 |
| **土屋　智由** | 京都大学 大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻 准教授 |
| **福岡　俊道** | 神戸大学 大学院海事科学研究科 教授 |
| **成瀬　友博** | 株式会社日立製作所 日立研究所 機械研究センタ 第三部 ユニットリーダ主任研究員 |
| **平野　聡** | 株式会社日立製作所 日立研究所 材料研究センタ エネルギー材料研究部 PM5 ユニット主任研究員 |
| **牧野　泰三** | 住友金属工業株式会社 総合技術研究所 先進デザイン研究開発部 グループ長 主任研究員 |
| **谷江　尚史** | 株式会社日立製作所 日立研究所 機械研究センタ 第三部 主任研究員 |
| **寺崎　健** | 株式会社日立製作所 日立研究所 機械研究センタ 高度設計シミュレーション研究部 主任研究員 |
| **廣畑　賢治** | 株式会社東芝 研究開発センター 機械・システムラボラトリー 主任研究員 |
| **久森　紀之** | 上智大学 理工学部 機能創造理工学科 准教授 |
| **大森　健一** | 東京工業大学 大学院理工学研究科 材料工学専攻 田中研究室 特別顧問 |
| **西川　出** | 大阪工業大学 工学部 機械工学科 教授 |
| **坂本　英俊** | 熊本大学 大学院自然科学研究科 産業創造工学専攻 機械システム部門 教授 |
| **冨田　佳宏** | 福井工業大学 工学部 機械工学科 教授／神戸大学 名誉教授 |
| **東郷敬一郎** | 静岡大学 工学部長・機械工学科 教授 |
| **菊池　正紀** | 東京理科大学 理工学部 機械工学科 教授 |
| **井岡　誠司** | 大阪電気通信大学 工学部 機械工学科 准教授 |
| **久保　司郎** | 大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授 |
| **田川　哲哉** | 大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 准教授 |
| **中井　善一** | 神戸大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授 |
| **菅田　淳** | 広島大学 大学院工学研究科 機械物理工学専攻 教授 |
| **藤本　慎司** | 大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 教授 |
| **江原隆一郎** | 福岡大学 産学官連携研究機関 材料技術研究所 客員教授 |
| **木村　一弘** | 独立行政法人物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット長 |
| **藤山　一成** | 名城大学 理工学部 機械システム工学科 教授 |
| **丸山　典夫** | 独立行政法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 ナノバイオ分野 生体機能材料ユニット バイオメタルグループ MANA 研究者 |






閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


**向井　敏司**　神戸大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授
**石川　　優**　山形大学 名誉教授
**上野　　明**　立命館大学 工学部 マイクロ機械システム工学科 教授
**川田　宏之**　早稲田大学 理工学術院 機械科学・航空学科 教授
**細井　厚志**　名古屋大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 巨陽研究室 助教
**高島　和希**　熊本大学 大学院自然科学研究科 副研究科長・産業創造工学専攻 教授



閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


# 目　次

# CONTENTS

●口絵
●発刊にあたって
●執筆者一覧

## 序

### 第１章　はしがき

…… ＜服部　敏雄＞　3

1　経済活動とものづくり企業／2　技術支配ものづくり産業の復活／3　統合型技術者の必要性／4　事故例からの勉強

## 第１編　破壊事例と解析

### 第１章　事故解析

…… ＜服部　敏雄＞　7

1　事故解析の重要性／2　事故解析の手順／3　破面解析（フラクトグラフィ）

### 第２章　機械要素

**1節　クレーン用の IWRC ワイヤロープの破損事例－内部断線損傷の問題を中心に－**

…… ＜田中　正清＞　18

1　IWRC ワイヤロープの破断による事故例／2　事故例から推定される IWRC ワイヤロープの損傷特性と問題点／3　曲げ疲労条件での確認試験／4　IWRC ワイヤロープの破断事故防止対策／5　おわりに

**2節　鋳造欠陥を起点とした疲労**…… ＜宮川　　進＞　23

1　破壊状況／2　破壊検討／3　対策技術



New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

**3節　シャフト（回転軸），物揚げ機**…… **＜野口　徹＞**　27
1　トラックハンドルコラムシャフトの破壊／2　船用発電機ロータシャフトの破壊／3　水圧鉄管溶接治具シャフトの破壊／4　メカニカルブレーキシャフトブッシュの破壊／5　50 tf ジブクレーンの倒壊／6　パイルハンマ用クレーンブームの倒壊／7　モータブロックチェーンリンクの破壊

**4節　転がり軸受** …… **＜小熊　規泰＞**　43
1　機能と特性／2　転がり寿命／3　潤滑寿命／4　早期故障

## 第３章　溶接構造

**1節　溶接構造全般の損傷事例および損傷防止と破壊力学** …… **＜中西　保正＞**　48
1　船舶／2　貯槽／3　土木構造物／4　その他の鋼構造物／5　おわりに

**2節　機械・構造物溶接部の疲労破壊解析** …… **＜宇佐美三郎＞**　59
1　余盛止端部からの破壊／2　不溶着ルート部からの破壊／3　溶接欠陥からの破壊

**3節　異材溶接**…… **＜宮下　幸雄＞**　71
1　概要／2　異種金属接合の例－ SPCC/A5052 接合－／3　プラスチック／金属異材接合の例－ PET/A5052, C1222, SUS304 接合－／4　溶接部形状と強度／5　まとめ

**4節　鋼構造建築物の柱梁溶接接合部における破壊**…… **＜中込　忠男／伊藤　寛之＞**　78
1　はじめに／2　スカラップに起因する破壊／3　現場溶接接合形式と工場溶接接合形式における破壊の比較／4　スチールタブと固形エンドタブに起因する破壊／5　鋼材の力学的性質と塑性変形能力／6　まとめ

## 第４章　圧力容器

**1節　プラント関連** …… **＜大塚　尚武＞**　85
1　反応塔の脆性破壊事故の解析例／2　ベローの疲労破壊／3　脱硫リアクターのノズル取付け溶接部の融合不良

## 第５章　表面損傷

**1節　耐熱コーティング** …… **＜伊藤　義康＞**　91
1　高温耐食コーティングを施した Ni 基超合金の組織／2　高温耐食コーティング部材のクリープ寿命／3　高温耐食コーティング部材の高温疲労寿命／4　高温耐食コーティング部材の疲労き裂発生・進展機構と改善策について


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

**2節　トライボロジー：精密位置決めステージ用摩擦駆動システムにおけるセラミックスの脆性破壊型摩耗**
…… ＜足立　幸志＞　96
1　不具合状況／2　原因究明／3　対策技術：セラミックスの脆性破壊型摩耗抑制のための設計指針

**3節　キャビテーション損傷** …… ＜祖山　均＞　100
1　キャビテーション損傷例／2　原因究明／3　キャビテーション損傷の予測／4　対策

## 第6章　自動車

**1節　トラック・バス部品の疲労強度評価** …… ＜山辺純一郎／小林　幹和＞　106
1　鋳肌を有する球状黒鉛鋳鉄の疲労強度／2　ショックアブソーバブラケットの疲労強度

**2節　トレーラハブ，ゆりかもめハブの疲労** …… ＜服部　敏雄＞　111
1　事故状況／2　原因究明

## 第7章　鉄道

**1節　台車枠および車輪の損傷事例（国鉄時代）** …… ＜石塚　弘道／織田　安朝＞　116
1　台車枠の損傷事例／2　車輪の損傷事例／3　おわりに

**2節　高周波焼入れ車軸のき裂進展性評価** …… ＜石塚　弘道＞　123
1　実物大車軸による疲労試験／2　試験結果／3　き裂の進展性評価／4　まとめ

**3節　ジェットコースタ車軸ボルト疲労（1）** …… ＜服部　敏雄＞　130
1　事故状況／2　原因究明／3　ねじ疲労破断対策設計技術

**4節　ジェットコースタ車軸ボルト疲労（2）** …… ＜服部　敏雄＞　138
1　事故状況／2　原因究明／3　対策技術

**5節　超電導リニア用地上コイルの締結（開発上）** …… ＜服部　敏雄＞　152
1　開発状況／2　設計の壁と対応技術／3　設計事例（限界すべり量の計算例）

## 第8章　航空・宇宙

**1節　JAL機事故事例とその教訓** …… ＜中島　睦夫＞　158
1　事故の状況／2　事故の原因／3　事故後の対策／4　事故から得られた教訓と今後の課題



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

**2節　H Ⅱロケット LE7 エンジン水素ターボポンプ** ····· **＜服部　敏雄＞**　163
1　事故状況／2　原因究明(基礎技術，流体振動)／3　対策技術(基礎技術，流体振動)

## 第９章　重電・産業機械

**1節　タービン発電機ロータのフレッティング疲労** ····· **＜服部　敏雄＞**　169
1　事故状況／2　原因究明／3　対策技術

**2節　複合材料のヘルスモニタリング** ····· **＜青山　　博＞**　174
1　引張試験片および試験方法／2　アコースティックエミッション(AE)法／3　光ファイバ・ブラッグ・グレーティング(FBG)センサ／4　FRP 透過光を利用した損傷検出法／5　アルミナ FRP の損傷と曲げ剛性の関係／6　FRP の損傷と剛性変化／7　透過光波長測定システムの開発／8　透過光強度と剛性の関係／9　まとめ

**3節　蒸気タービン長翼取付のフレッティング疲労** ····· **＜服部　敏雄＞**　182
1　事故状況／2　原因究明

## 第 10 章　電子部品・光学部品

**1節　封止樹脂の疲労破壊事例** ····· **＜三浦　英生／西村　朝雄＞**　186
1　はじめに／2　封止樹脂の疲労き裂進展挙動と解析モデル／3　電子パッケージ内のき裂進展評価事例／4　おわりに

**2節　はんだ** ····· **＜北野　　誠＞**　191
1　はじめに／2　はんだ接合部の破壊要因／3　熱疲労破壊／4　機械的疲労破壊／5　衝撃破壊／6　おわりに

## 第 11 章　複合材料

**1節　航空機** ····· **＜指熊　裕史＞**　196
1　複合材構造の継ぎ手／2　A300 の垂直尾翼継ぎ手部の破壊

## 第 12 章　マイクロマテリアル・MEMS

**1節　マイクロ部品の破壊** ····· **＜北村　隆行＞**　200
1　自動車鋼板スポット溶接部の疲労破壊／2　多層デバイスの接合／3　ナノ部材の破壊




閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


**2節　薄膜デバイスの信頼性設計**…… **＜三浦　英生＞**　205
1　はじめに／2　薄膜デバイス内部の残留応力解析手法／3　デバイス信頼性設計への適用事例／4　おわりに

**3節　シリコンの破壊と疲労**…… **＜佐藤　一雄／土屋　智由＞**　211
1　シリコンの破壊と疲労／2　破壊の寸法効果／3　破壊モードの温度依存性／4　シリコンの疲労破壊現象／5　湿度環境下での疲労破壊のメカニズム／6　高信頼なシリコン構造実現のために

## 第2編　強度・寿命設計技術

### 第1章　CAEを用いた強度・寿命設計技術

…… **＜服部　敏雄＞**　223
1　はじめに／2　IT偏重に流されないものづくり技術者の育成／3　強度・寿命設計と材料力学・FEM解析

### 第2章　機械要素

**1節　ねじ**…… **＜福岡　俊道＞**　232
1　ねじの静的強度／2　ねじの疲労強度／3　ねじのゆるみとへたり現象

**2節　ねじ締結構造**…… **＜成瀬　友博＞**　238
1　ねじと被締結体の剛性／2　ねじと被締結体剛性を用いた締結体の簡易モデル化手法／3　ねじ締結体簡易モデルに対する強度評価法／4　ねじ締結体簡易モデルの適用例

### 第3章　運輸機器

**1節　FSW**…… **＜平野　聡＞**　247
1　はじめに／2　摩擦撹拌接合の特徴／3　FSW施工の特徴と課題／4　接合可能な材料と接合部特性／5　適用例／6　おわりに

**2節　鉄道台車**…… **＜牧野　泰三＞**　253
1　はじめに／2　鉄道台車枠の強度設計の現状／3　溶接ルート部の強度設計への破壊力学の適用


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

**3節　航空機構造** ……＜指熊　裕史＞　257
1　はじめに／2　航空機の開発作業の流れと航空機の設計運用寿命／3　航空機の構造と荷重／4　強度／5　荷重，強度実証試験／6　運用フェイズの整備，管理／7　まとめ

## 第4章　電子部品関連

**1節　はんだ接合部の寿命設計** ……＜谷江　尚史／寺崎　健＞　263
1　はじめに／2　はんだ接合部の疲労寿命予測

**2節　電子部品における構造信頼性の設計最適化** ……＜廣畑　賢治＞　268
1　電子部品の構造設計と設計最適化／2　構造信頼性に基づく設計最適化手法／3　適用例／4　まとめ

## 第5章　先端材料―今後の強度設計

**1節　生体材料**……＜久森　紀之＞　274

**2節　整形外科インプラント材料**……＜大森　健一＞　279
1　医療機器の市場／2　人工股関節の適用材料と破損状況／3　大腿骨ステムの疲労強度評価／4　セラミックヘッドの衝撃強度評価／5　超高分子量ポリエチレン臼蓋ライナーの破損／6　不具合情報の有効活用

**3節　歯科材料**……＜西川　出＞　284
1　はじめに／2　金銀パラジウム合金における疲労き裂進展挙動／3　コンポジットレジンの疲労強度

# 第3編　材料力学と破壊力学

## 第1章　材料力学の基礎

**1節　応力とひずみ** ……＜坂本　英俊＞　291
1　はじめに／2　応力とひずみ

**2節　引張および圧縮** ……＜坂本　英俊＞　294

**3節　ねじり**……＜坂本　英俊＞　295
1　丸棒のねじり




閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


**4節　はりの曲げ** ……＜坂本　英俊＞　297
1　はりの定義と種類／2　せん断力と曲げモーメント／3　はりの応力／4　はりのたわみ

**5節　組合せ応力** ……＜坂本　英俊＞　302
1　はじめに／2　平面応力／3　曲げとねじりが作用する組合せ応力

**6節　ひずみエネルギー** ……＜坂本　英俊＞　304
1　はじめに／2　棒の単軸引張／3　はりの曲げ／4　棒のねじり

**7節　長柱の座屈** ……＜坂本　英俊＞　306
1　オイラーの座屈荷重／2　各種端末条件における長柱の座屈

**8節　円筒** ……＜坂本　英俊＞　308
1　薄肉円筒／2　厚肉円筒

## 第2章　有限要素法の基礎

……＜冨田　佳宏＞　310
1　はじめに／2　線形弾性問題の有限要素法／3　各種材料の構成モデル／4　弾塑性有限要素法／5　おわりに

## 第3章　破壊力学の基礎

**1節　線形破壊力学** ……＜東郷敬一郎＞　318
1　はじめに／2　グリフィスき裂／3　変形モードと応力拡大係数／4　エネルギー解放率／5　小規模降伏条件

**2節　弾塑性破壊力学** ……＜菊池　正紀＞　330
1　はじめに／2　$J$積分の定義／3　$J$積分の経路独立性の条件／4　HRR場と$J$積分／5　き裂先端開口変位と$J$積分／6　$J$積分の実験的評価法について／7　拘束効果と$J$積分

## 第4章　破壊力学の展開

**1節　異種接合界面端特異応力場**

**1　異種接合界面端特異応力場** ……＜井岡　誠司／久保　司郎＞　340
1　はじめに／2　界面端の特異応力場

**2　熱応力負荷下の界面端特異応力場** ……＜井岡　誠司／久保　司郎＞　344
1　はじめに／2　熱応力に関する定数項／3　接合界面上の応力分布解析



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


**3** 直交異方性異種接合界面端特異応力場 …… ＜井岡　誠司／久保　司郎＞　348
1　はじめに／2　接合界面端の特異応力場／3　熱応力負荷下の特異応力場
**4** 中間層を有する異種接合界面端特異応力場 …… ＜井岡　誠司／久保　司郎＞　353
1　はじめに／2　中間層挿入による界面端特異応力場の消失／3　接合界面上の応力分布解析

**2節　応力特異場パラメータの強度設計への適用** …… ＜服部　敏雄＞　357
1　はじめに／2　接着界面／3　接触界面／4　まとめ

## 第4編　各種材料と破壊特性

### 第1章　金属材料

**1節　静的**
**1** 引張強度特性と破壊形態 …… ＜田川　哲哉＞　375
1　引張試験／2　切欠試験片の降伏挙動／3　切欠試験片の破壊挙動／4　引張強度特性の温度，ひずみ速度依存性
**2** 破壊靱性 …… ＜田川　哲哉＞　382
1　シャルピー衝撃試験／2　破壊力学に基づく破壊靱性／3　各種破壊靱性試験方法

**2節　疲労**
**1** 疲労の基礎 …… ＜中井　善一＞　394
1　疲労強度の定義と特徴／2　平滑材の疲労強度／3　切欠材の疲労強度／4　疲労破壊のメカニズム／5　疲労き裂の伝播の破壊力学
**2** 変動振幅下の疲労寿命予測 …… ＜菅田　　淳＞　403
1　変動応力波形ならびに波形計数法／2　疲労寿命評価法
**3** フレッティング疲労 …… ＜服部　敏雄＞　408
1　はじめに／2　フレッティング疲労の力学条件／3　フレッティング疲労のメカニズム／4　応力特異場パラメータを用いたき裂発生評価／5　摩耗を考慮したき裂進展評価(高サイクル疲労)／6　特定位置応力を用いた疲労強度・寿命評価(低サイクル疲労)／7　まとめ―力学的視点からの耐フレッティング設計法―

**3節　環境**
**1** 応力腐食割れ …… ＜藤本　慎司＞　423
1　はじめに／2　応力腐食割れの分類／3　応力腐食割れの機構／4　代表的な金属材料の応力腐食割れ
**2** 腐食疲労 …… ＜江原隆一郎＞　429
1　腐食疲労現象／2　腐食疲労の機構と特徴／3　腐食疲労強度，腐食疲労き裂進展速度に及


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


ぼす影響因子／4　腐食疲労防止対策

**4節　高温**

**1　クリープ** ····· **＜木村　一弘＞**　436

1　はじめに／2　高温機器の設計基準／3　クリープ変形と破壊／4　クリープ寿命予測／5　まとめ

**2　高温疲労** ····· **＜藤山　一成＞**　443

1　高温疲労の定義と分類／2　一定温度下での高温高サイクル疲労／3　高温低サイクル疲労と熱疲労／4　クリープ疲労／5　高温疲労き裂進展特性

**5節　先端金属材料** ····· **＜丸山　典夫／向井　敏司＞**　454

1　はじめに／2　マグネシウム合金の変形機構と破壊靱性／3　マグネシウム合金の疲労特性／4　マグネシウム合金の疲労強度に及ぼす湿度の影響／5　金属ガラス（アモルファス合金）のフレッティング疲労特性／6　金属ガラスのフレッティング疲労強度に及ぼす力学的因子の影響／7　各種先端金属材料の疲労特性に及ぼす環境の影響

## 第2章　非金属材料と破壊

**1節　高分子材料の脆性破壊とタフニング** ····· **＜石川　優＞**　463

1　はじめに／2　プラスチックの破壊／3　プラスチックのタフニング

**2節　セラミックス** ····· **＜上野　明＞**　471

1　はじめに／2　セラミックスの強度評価方法と破壊特性／3　強度特性値のばらつき／4　強度・靱性向上メカニズム

**3節　複合材料** ····· **＜川田　宏之／細井　厚志＞**　478

1　層間破壊靱性の理論と実際／2　トランスバースクラックの破壊力学的検討

**4節　マイクロ材料** ····· **＜高島　和希＞**　483

1　はじめに／2　機械的性質に及ぼす寸法の効果／3　マイクロ材料の疲労／4　マイクロ材料の破壊／5　材料の階層的微視組織から切り出したマイクロ材料の破壊／6　マイクロ材料の破壊・疲労評価に関する規格化動向／7　おわりに

●索引




閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

# 序

1 | はしがき .....3



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


# 第１章　はしがき

近年，ものづくり企業と社会との関わりは変化，複雑化しており，そのものづくり企業の技術者もその局面，局面で利便性等社会への貢献，安全・安心社等の社会的責任，…等に対応しながら製品開発，製造，品質保証，保全の業務を進める必要がある。最近目につく事象，対応について以下に記させていただく。

## 1 経済活動とものづくり企業

リーマンショック，ドバイショック，ギリシャショックと，近年世界は金融・財政破綻の不祥事に振り回されている。この反省から我々技術者集団としては，やはり社会は金融界には任せられない，ものづくり産業立国であらねばと再認識しておられると思う。しかしこれらの流れは，すでに数年前からあり，金融工学がもてはやされ，工学部学生の銀行への就職者の増大，さらには工学部進学希望学生の減少と，我々には厳しい問題が投げかけられていた。

## 2 技術支配ものづくり産業の復活

しかしものづくり産業界自体においても，これら社会の偏った流れに真正面から対抗してきたかは疑問である。上記手っ取り早い金もうけ主義に流されて，過度の消費者意欲依存型経営の反省はないか，地震・津波・原発事故の大惨事でも，ものづくり技術者としてこれからの日本の再興のための使命と責任を大きく感じる節目となった。最先端科学，IT…と，一見口に甘い分野への技術者の誘惑が現場技術を衰退させ，このような災害時にはオロオロした科学者の脆弱さを露呈することにもなった。日本再興のためには，やはり金融界，最先端科学者には任せられない，ものづくり産業立国であらねばと再確認された方も多いのではないだろうか。今こそ技術支配ものづくり産業復権が求められているのではないか，との認識も出始めている。

## 3 統合型技術者の必要性

これらの流れの原因として，これまでの技術者は細かい範囲の高度専門家として育てられてきたこともあると思われる。例えば本書に関係する強度・信頼性技術者を例にとっても，CAE を駆使する応力解析技術者，材料工学技術者，検査・品証技術者等別個に育てられてきており，統合的に責任をとる風潮がなかった。安全・安心トータルで社会に責任を感じるためには，少なくとも**図 1** のような材料，構造解析，強度評価，検査技術すべてを身につけた統合型強度・信頼性技術者の育成が必要となる。

## 4 事故例からの勉強

これらのことを考慮に入れて，これからのものづくり企業の技術者，強度・信頼性技術者，あるいは

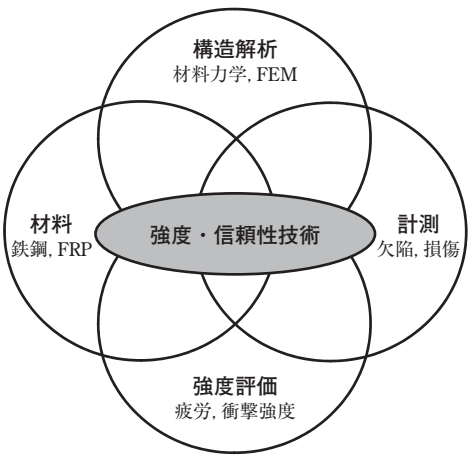



**図 1　統合型強度・信頼性技術者の育成**


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science



将来これらの分野を志す学生に対する教科書をここに試みた。従来のこの種の参考書・便覧・教科書は，まず第1章は材料力学，破壊力学，FEM等の力学解析の勉強，第2章は，疲労，高温強度などの破損現象の勉強，第3章はこれらを用いた設計事例の順となっているが，実務で多忙中の技術者にとって，これら新しい知識を順番にお勉強している余裕はない。そもそも人間は自分の経験したことと新しい知識を統合しながら自分自身の知恵としてまとめていくものであり，経験の乏しい若い技術者にとってはこの方法は効率が悪い。そこで本書では，まずは読者の方々が新聞等マスコミで見聞きした事故例，設計例を羅列し，それらを自分の体験のように振り返りながら，上記力学，材料特性，破損現象と事故の関わりに入り込んでいただき，その一件一件の事故例を見終えた段階で自然に強度設計技術を一段ずつ身につけていただく方針でまとめた。したがって必ずしも最初の事故事例から読み始めていただく必要はなく，まずは自分の製品に関わりそうな，あるいは興味のある事故例から読み始めていただき，その興味の膨らみに応じて力学，破損現象等基礎技術の深みに浸っていただき，自身の知恵として身につけていってほしい。

ただ，個々の基礎技術ごとに勉強したい技術者にとっても可能なように，基礎技術別の目次も付けさせていただいたので，ご活用願いたい。

このまとめ方は，最近の「失敗に学ぶ」という風潮を大いに参考にさせていただいている。日本人はそもそも武士道から来ているものか，失敗は恥じであり，失敗した場合は黙して責任をとるという習慣があり，欧米の真実を語ることによる免責，司法取引の習慣からみると，なかなか真実が報道されづらい現実もある。著者なりの視点も入れた事故例報告になっている可能性もあり，関連技術者から見て，少々気になる点もあるかもしれないが，まずは教育のための参考例として使わせていただいたことをお許し願いたい。読者の技術者の方々もこのような失敗に学ぶ風潮を身につけていただき，企業風土の変化等，オープンな技術研鑽を旨とする社会実現に向けて協力願いたい。また，社会影響の大きい事故に関しては，司法の場に持ち込まれる場合も多いが，そのような場に関わる人，一般社会の人々にも読んでいただき，正当な評価に活用願いたい。

**＜服部　敏雄＞**



New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

# 第１編
# 破壊事例と解析


1 事故解析 ..... 7
2 機械要素 ..... 18
3 溶接構造 ..... 48
4 圧力容器 ..... 85
5 表面損傷 ..... 91
6 自動車 ..... 106
7 鉄道 ..... 116
8 航空・宇宙 ..... 158
9 重電・産業機械 ..... 169
10 電子部品・光学部品 ..... 186
11 複合材料 ..... 196
12 マイクロマテリアル・MEMS ..... 200




（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。



# 第１章　事故解析

## 1 事故解析の重要性

ものづくり企業は，社会に役立ついろいろな機能を有する製品を提供し顧客に満足していただき，その対価として利益を得ている。しかし，同時に提供した製品が事故等で顧客・社会に迷惑をかけないという社会的使命をも担っている。企業の技術者の業務はこの両者をうまく両立させることに重きを置いてきた（**図 1**）。最近は製造物責任法（PL 法）制定により後者の責任が重くなってきている（**図 2**）。しかし現実には，原子炉メルトダウン，トレーラハブの疲労破損，原子炉シュラウドの応力腐食割れ，エレベータ暴走，航空機スラットボルト脱落による火災事故，蒸気タービン翼破損，ジェットコースタ車軸破損，湯沸かし器はんだ部断線……と絶え間なく起こる事故は社会問題となってきている。

この問題の原因は大きく分けて二つあると考えられる。一つは，手っ取り早く利益を得られる新製品の開発には予算を出すが，利益換算の難しい安心・安全には予算を出しづらい経営幹部の風潮である。これについてはリスクマネジメント的経営の導入，技術者の地位向上等健全な企業コンセプト確立を待つしかない。二つめは，事故・トラブルは恥であり，隠そうとする，とくに日本企業の風潮である。最近は「失敗に学ぶ」という主張から失敗事例を社内で公開，蓄積し，再発を防ぐ機運も高まってきている。本著はまさにこの後者の推進のためになされたもので，事故製品の破面にはさまざまな情報が集約されており，最大の物的証拠であり，これをいかに正しく，有効に見通せるかによって原因究明・対策の成否が決まる。安全社会実現に向けて，技術者の責任とも思って理解し，身につけていただきたい。

また最近日本も訴訟社会に入り，技術者はもちろん，これらの事故責任を裁く，司法界，一般社会人もこのような技術知識の習得が不可欠になってきている。本書の事例を活用し，勉強願いたい。

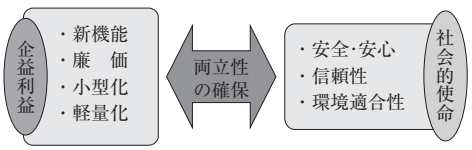



**図 1　企業技術者の両立性（利益確保と安全）**

「PL 法」と「民法」の違い

民法では製品が原因で事故が発生した瑞合，民法第 709 条によりメーカーの不法行為責任を問う場合が多いが，被害者である訴える側が立証する負担が非常に重く，従来からメーカーの過失を立証することは難しいといわれて，これまではそれがほとんど不可能になってきていた。そこで「PL 法」では，「過失」を「欠陥」に置き換えることにより立証負担の軽減がはかられた。

| 「民法第 709 条」 | 「PL 法」 |
|---|---|
| ①損害<br>②加害者の「過失」<br>③損害と「過失」の因果関係 | ①損害<br>②加害者の「欠陥」<br>③損害と「欠陥」の因果関係 |

**図 2　製造物責任法（PL 法）の概要**

## 2 事故解析の手順

製品，機器の種類，規模等により事故解析の手順は異なるが，基本的には**図 3** のような手順で行われる。

（ⅰ）事故現場；まずは事故現場に赴き，事故品の稼働していた状況，事故の状況，壊れた部品の状況を調べる。破面解析（フラクトグラフィ）を行う。

（ⅱ）設計・製造現場；設計・製造現場に赴き設計ドキュメントから負荷形態の推定，負荷量の定量化を行う。

（ⅲ）原因究明；これらの結果と破壊力学等を駆使して，破損起点と破損応力を推定する。

（ⅳ）再現試験；場合によっては再現試験で究明結果の妥当性を確認する。

（ⅴ）対策；以上の結果を総合して対策法を決定する。



New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science



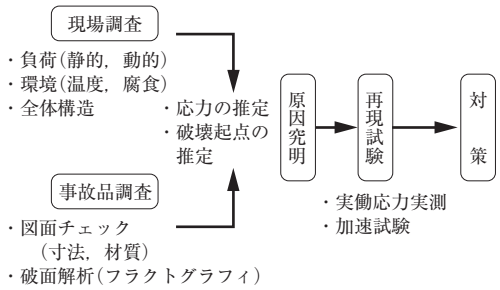



**図3　事故解析の手順とフラクトグラフィの位置づけ**

これらのプロセスの中で，フラクトグラフィと破壊力学は原因究明に不可欠な車の両輪であり，以下に概略説明する。

## 3 破面解析（フラクトグラフィ）

フラクトグラフィ（fractography）は，破面をレプリカ法によって透過電子顕微鏡で観察したり，走査型電子顕微鏡で直接観察したりして，破面の形態から，破壊が何に起因して生じたのか，あるいは，どのような応力で破壊が生じたのかを解析するものである。フラクトグラフィは破面に残された痕跡の解析でもあるので，そのすべてが証拠として残されているわけではない。したがって，破壊事故の原因究明に適用する場合には，部材の製造履歴や使用条件などとあわせて総合的に検討することが重要である。とくに事故品の場合には破面の損傷程度や保存状態に大きく依存するため，破面観察にあたっては，その取扱いに十分配慮するとともに，破面に残されている情報だけでなく，破面近傍の表面状態など，周辺の情報も最大限利用することが大切である。

**図4**にフラクトグラフィにおけるフローチャートを，**表1**に破面の着眼点と破壊様式の分類を示す。初めに，破面とその周辺の巨視的な観察である，マクロフラクトグラフィを行って，破壊様式の概略を把握する。次に，走査型電子顕微鏡（scanning electron microscope；SEM）などで観察できるように破損部材からサンプルを作製し，破面の汚れを落とすために洗浄する。そして，SEMを用いた微視的な破面観察であるミクロフラクトグラフィを行う。このとき，観察倍率を数十倍とした比較的低い倍率であらましを把握するための観察と，観察倍率を10,000倍程度まで上げた0.01 $\mu$m以下の分解能での詳細な観察とを使い分けることが重要である。破壊の原因には金属組織に絡んだ内容が含まれることも多いので，エネルギー分散X線回折法（energy dispersion diffraction；EDX）による化学分析も有効である。また，最近では，X線回折法を用いて，破面あるいは破面直下の観察を行って塑性域寸法などを測定して解析するX線フラクトグラフィも行われるようになっている。とくに，腐食環境に曝されていた破面は微細な破面形態が腐食によって消失してしまうことがあるが，そうした場合に有効と考えられている。以上の種々な手法による破面観察結果と

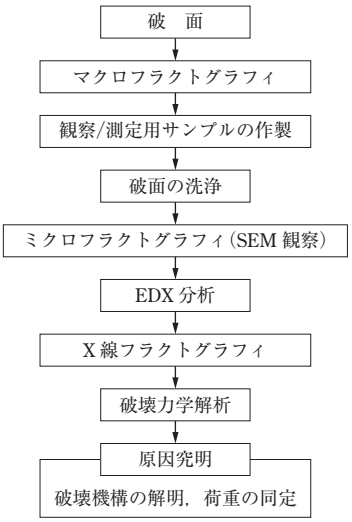



**図4　破面解析（フラクトグラフィ）のフローチャート**

**表1　破面の着眼点と破壊様式**

| 着眼点 | 破壊様式 | | |
|---|---|---|---|
| | 延性破壊 | 脆性破壊 | 疲労破壊 |
| 破面の特徴 | | シェブロンパターン | ビーチマーク |
| 破面の粗さ | 比較的平坦 | 粗い | 平滑 |
| 色彩 | 金属光沢または灰色 | きらきらした金属光沢 | 白または黒褐色 |
| 角度 | 45° | 90° | 90° |
| 欠陥の現れ方 | 菊目状の平坦面 | | 起点および き裂進展経路とも明瞭 |


New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science


あわせて，破壊力学的な解析を行い，定性的には破壊機構を解明し，定量的には負荷応力を推定して，破壊原因を究明する。以下にこれら破壊機構解明，負荷応力推定，破壊起点推定等について，それぞれマクロフラクトグラフィ，ミクロフラクトグラフィに分けて解説する。

### 3.1　マクロフラクトグラフィ

破壊事故を起こした機械構造部品の破壊解析にあたっては，まず，巨視的な破壊形態を分析する。これをマクロフラクトグラフィという。破面は破壊した直後に自然光の下で，肉眼またはルーペなどを用いて，破面の特徴，粗さ，色彩，角度，および，欠陥の現われ方などに着目し，詳細に観察することが必要である。とくに，起点部では，破壊だけでなく，部材の側面の観察が重要である。腐食痕や，傷，切欠，介在物などの表面状態，ならびに，周辺の部品との位置関係なども確認する必要がある。マクロフラクトグラフィの一例を**図5**に示す。マクロ破面の特徴は，大きく分けると二つの模様がある。一つは実線で示した模様で，起点から放射状に広がっている。これは，脆性破壊のように，き裂が急速に進展して破壊した破面に見られるシェブロンパターン（chevron pattern）と呼ばれるものである。一方，点線で示した模様はビーチマーク（beach mark）と呼ばれるもので，荷重変動を受けながら，段階的に徐々にき裂が進展する疲労破壊に特徴的な模様である。

巨視的な疲労破面形態を**図6**に示す。図では，応力振幅の高低，応力集中の度合い（平滑材，鈍い切欠材，鋭い切欠材），荷重の状態（引張および引張圧縮，一方向曲げ，両振曲げ，回転曲げ，繰返しねじり）によって分類してある。図中，矢印は実線で示したビーチマークの形から推定したき裂の進展方向を示し，ハッチングを施した部分は最終破断面を示している。最終破断面の全体の破面に占める面積割合から応力振幅の高低が推定でき，形状と位置から荷重様式を評価することが可能である。例えば，最終破面の大きさが小さいものは低応力負荷だったことが，周りから均等に破壊が発生進展したものは高応力負荷だったことなどが推定される。

### 3.2　ミクロフラクトグラフィ

ミクロフラクトグラフィは，走査型電子顕微鏡（SEM）写真を用いた破面観察で，延性破面ディンプル（**図7**，**図8**参照），疲労破面ストライエーション（**図9**参照），粒内ファセットなど，さまざまな破壊形態を最も効率的に解析できる手法で，多くの事故解析で中心となる手段である。ここでは事故現象として最も多い疲労破面ストライエーションの形成メカニズムについて説明する。

疲労破壊は疲労き裂の発生とそれに引き続く進展によって生じる。**図10**は単軸応力状態における典型的な疲労過程を模式図で示したものである。疲労き裂は，一般にはその材料表面結晶粒内ですべりが繰り返され，**図11**に示すように表面に突出し（extrusion）や入込み（intrusion）とよばれる凹凸が発達して微小き裂になる（第Ⅰ段階）。さらにき裂が成長すると，最大主応力軸に垂直な第Ⅱ段階のき裂進展に遷移する。この間の遷移領域では，き裂先端における応力が十分大きくなり，複数のすべり系ですべりが駆動するようになり，き裂はすべり面を変更しながらすべり面に沿って進展する。このようなき裂

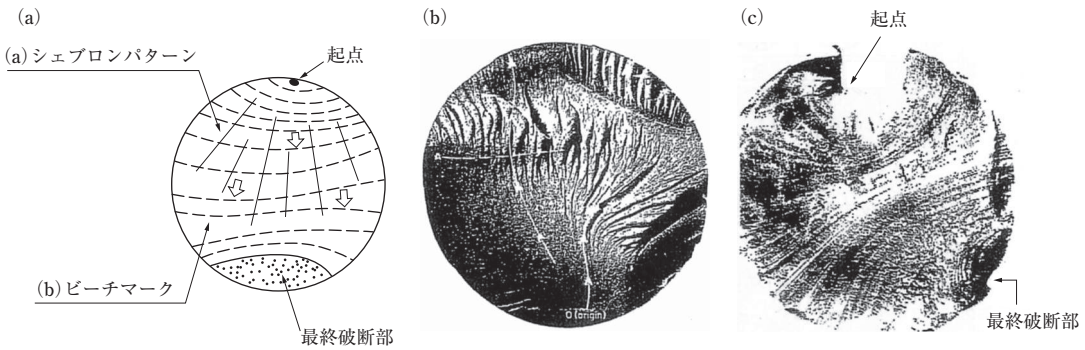



**図5　代表的なマクロ破面**
(a) マクロな破面形態，(b) シェブロンパターン，(c) ビーチマーク


New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science



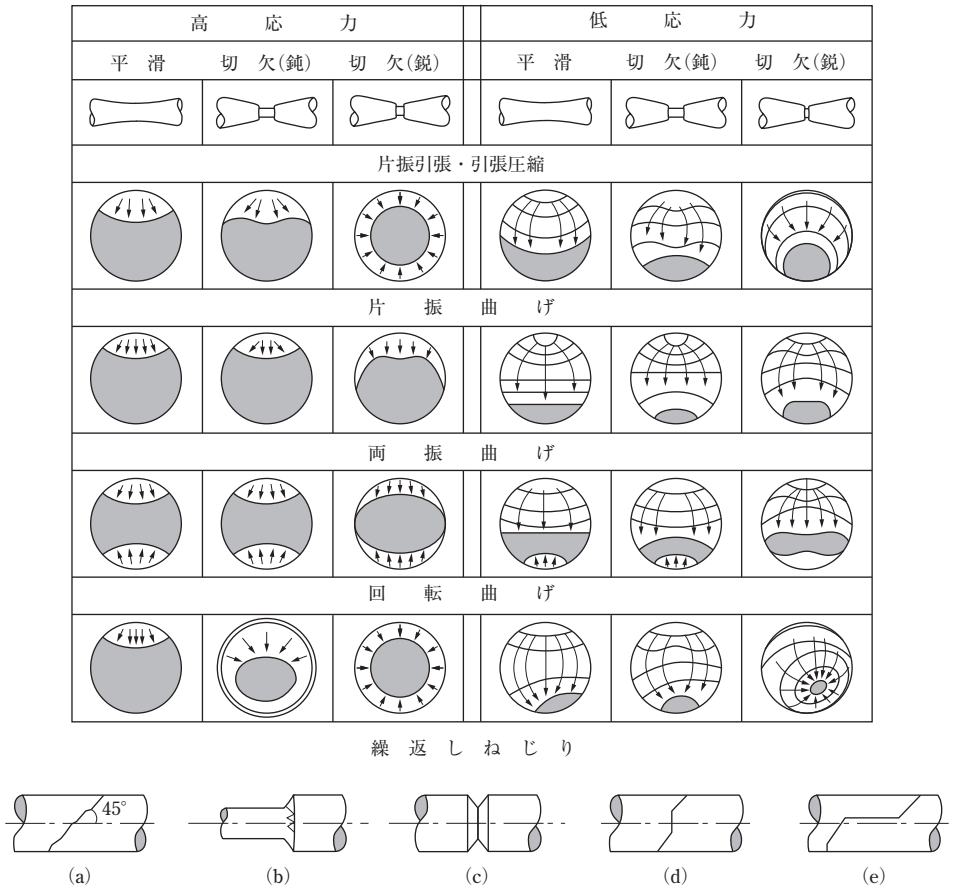



**図 6　負荷・応力状態とマクロ破面形態**

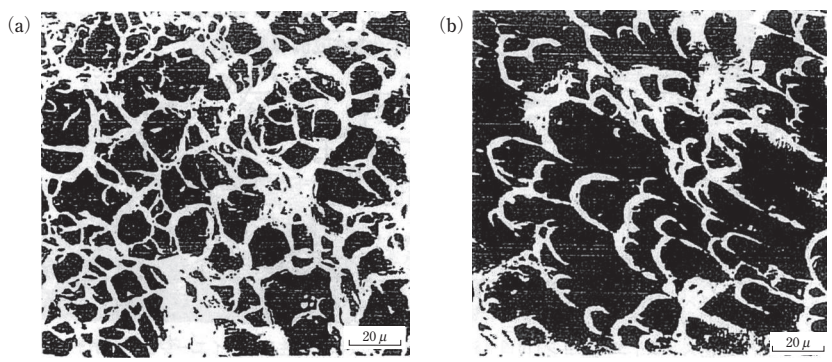



**図 7　アルミニウム合金における延性破面のディンプル**
(a)等軸ディンプル，(b)伸長ディンプル

進展領域において，ストライエーションが破面に観察されることが多い。ストライエーション形成機構としては，**図 12** に模式的に示すモデルがある。図中の破線は，新たな応力サイクル開始時のき裂(図 12(a))の先端位置を示している。いま，新たな応力繰返しの 1 サイクルにおける負荷過程で図 12(b)に示すようにき裂先端領域における結晶粒群がそれぞれ局所的に大きなすべり変形を生じ，さらに



New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

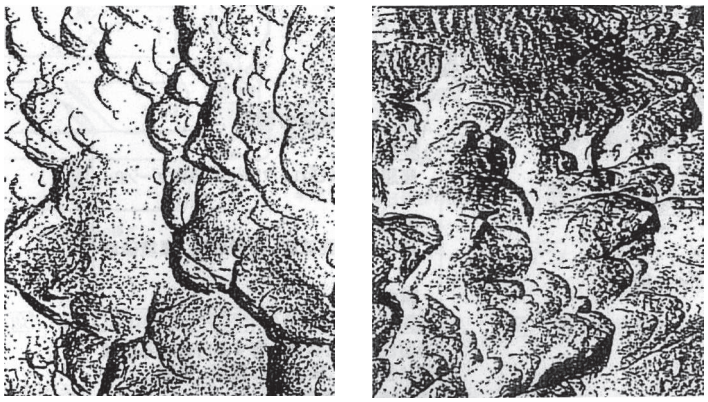


**図８　コバルト基合金における延性破面のディンプル**

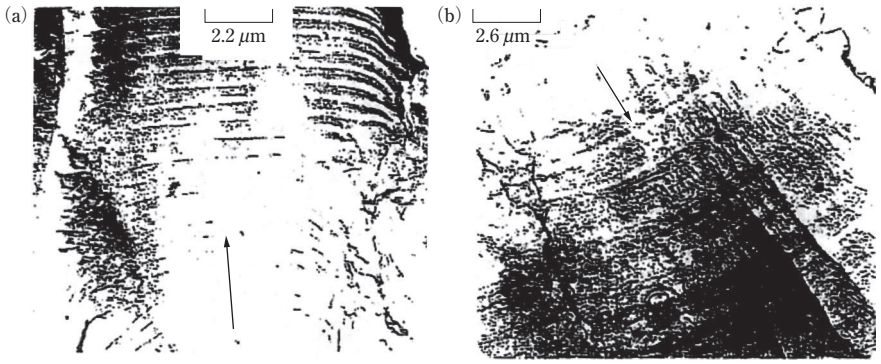



**図９　アルミニウム合金における疲労破面ストライエーション**
(a)延性ストライエーション(7079−T651)，脆性ストライエーション(7075−T6)

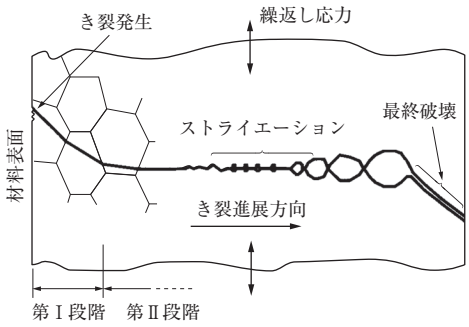



**図 10　疲労き裂発生と進展過程**

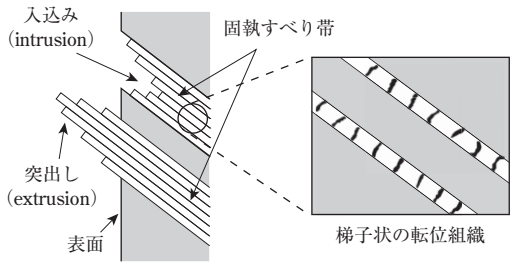



**図 11　疲労き裂発生とすべり挙動**

負荷が増して最大応力に達すると，図 12(c)に示すようにき裂先端において鈍化(blunting)を生じるとともにき裂長さも長くなる。最大応力到達後の除荷過程では，鈍化したき裂先端部分は図 3(d)に示すように折り込まれ，その先端の上下両側に突起状の変形が誘起される。このような変形過程を経て，最小応力に達したときのき裂先端では図 3(e)に示すような再鈍化(re-sharpening)を生じる。このような機構でき裂が進展することにより，き裂が通過した後の破面には応力繰返しの１サイクルに対応したストライエーションが残存する。


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）



### 3.3　破壊起点の推定

事故の場合には一次破壊，二次破壊……と結果的に多くの破面が生ずるが，事故解析のうえで一番重要なことは，この多くの破面の中から基本的には１点しかない破壊起点を見いだすことである。どこの破面から最初に破壊が起こったかはまずはマクロフラクトグラフィによって推定するが，その破面のどこが破壊の起点かは，破片を持ち帰ってミクロフラクトグラフィを必要とする場合もある。これらの推定プロセスの中で，以下のような特徴を知っておくと，破壊起点の推定に大いに参考になる。

（ｉ）破片を互いにつぎ合わせることができる場合は，例えば**図 13** のように，破面の形は合うが隙間ができるときは，一番口が開いているＡの破面で破壊が最初に起こったと推定される。これは，一つの構造物がいくつかの破片で破壊した場合，破壊起点となる破面には，塑性変形が小さく，この一次破壊によって応力分布の再配分が起こり，二次破壊以降の領域には多大な応力が加わり塑性変形を伴った延性破壊で壊れることが多いからである。

（ⅱ）板状構造物破面が**図 14**(a)のようにＴ字形

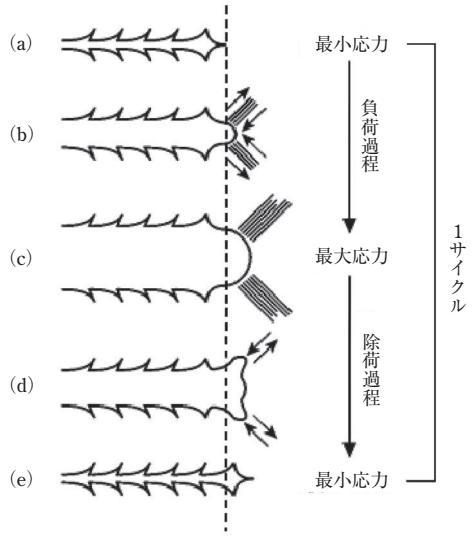



**図 12　ストライエーション形成機構の模式図**

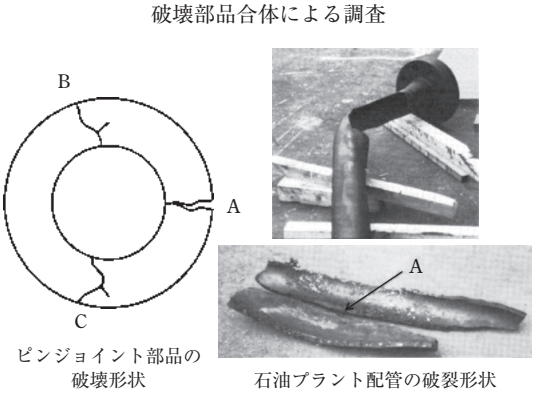



**図 13　部品合体による破壊起点調査**

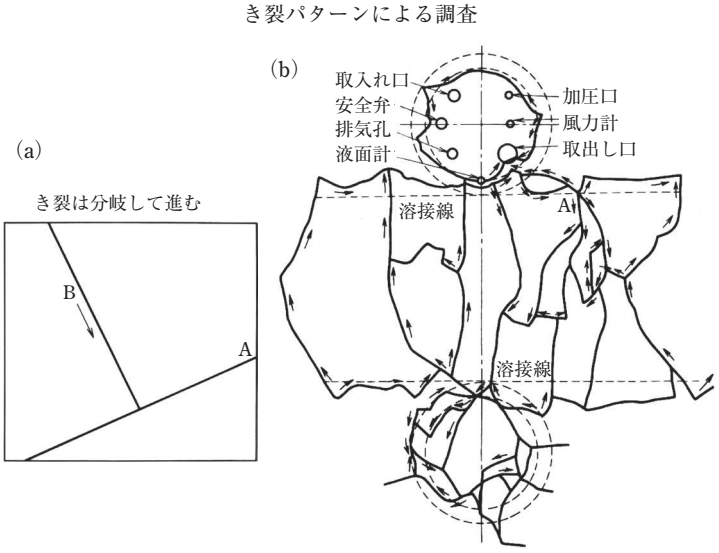



**図 14　Ｔ字分岐の原則**



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


に交差しているときは，破壊Aが先行したことを示している。この原則をつなぎ合わせていけば，図14(b)のような複雑な破壊プロセスで壊れたものでも，破壊起点を推定できる。

（iii）マクロフラクトグラフィで，**図15**のように放射状マーク，あるいはV字形パターンが見られる場合には，放射状の集まるところ，V字の頂点方向が破壊の起点となる。

（iv）ミクロフラクトグラフィで，**図16**のようなリバーパターン（river pattern）が見られる場合には，破壊の起点は，この川の上流側になる。上記（iii）と逆となるので注意を要する。

### 3.4　実働応力・寿命の推定

事故解析で最も重要なことは，その機械・機器の稼働中の応力履歴を知ることである。ここで事故現象として最も多い疲労破壊を考えると，この疲労損傷進行中の破面にストライエーションというすじ状

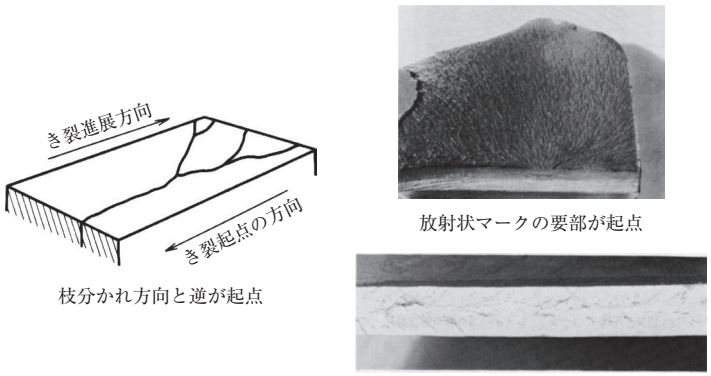



**図15　放射状マーク，V字形パターン破面の破壊起点（マクロフラクトグラフィ）**

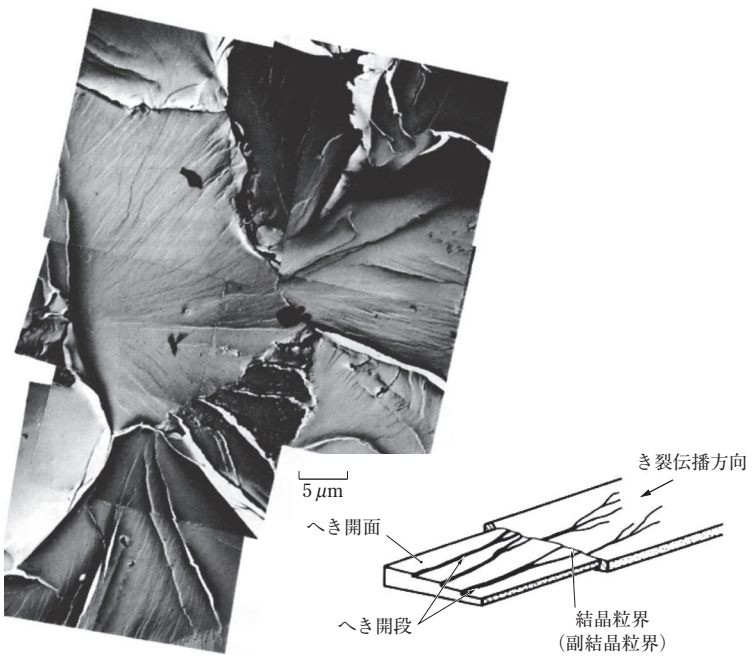



**図16　リバーパターン破面の破壊起点（ミクロフラクトグラフィ）**


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）



模様が残ることを前項で説明したが，このストライエーションの間隔（幅）こそが，繰返し応力が一回ずつかかったときのき裂の進展量となる。したがってこのき裂の進展量（今後き裂進展速度を $da/dN$ と表示する）と，稼働応力の関係がわかればいいことになる。この関係づけに著しい貢献をしたのが破壊力学（fracture mechanics）である。破壊力学はき裂を含む部材あるいは構造物の応力解析での弱点である応力特異性（き裂先端で応力が無限大となること）に対処するため，応力に代わる新しいパラメータ（応力拡大係数，$K$）を提供することができる。これにより強度評価の技術を従来の設計のみから，品質保証・予防保全・事故解析の広い範囲にわたる技術にまで進めることができた。またこの応力特異場の取扱いはき裂，欠陥以外の一般の鋭いコーナ角部，接着端部，接触端部にも見られ，これらも広義の破壊力学ととらえられ，応力特異場パラメータを用いて強度評価する手法に展開されている。それについては，接着強度，フレッティング疲労強度の項で説明させていただく。

### 3.4.1　破壊力学と応力拡大係数

現在通常の部材，構造物の強度設計に使われている，材料力学的強度評価は**図 17** 左に示すように構造物の局所応力，例えば応力集中部における最大応力 $\sigma_{max}$ を応力解析により求め，これと材料試験により得られた材料強度データ，例えば降伏応力 $\sigma_y$，破断応力 $\sigma_B$，疲労限 $\sigma_W$ 等との比較から強度評価を行うが，き裂がある場合は，図 17 右に示すようにき裂先端で応力が無限大となる応力特異場となっているため，最大応力 $\sigma_{max}$ の代わりにこの応力特異場の応力分布を支配している次式

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \tag{1}$$

のパラメータ $K$（応力拡大係数）を用いて強度評価しようというのが破壊力学の立場である。

それではこの応力拡大係数 $K$ はどのようにして求めるかというと，FEM（有限要素法）で応力解析をする場合には，ソフトによってはその一環でもとめることができるが，き裂近傍の要素分割を細かくする必要があるなどの欠点もあり，基本的な構造に対して弾性論，FEM 等を用いてすでに解析されデータブック化されている[1)]ので，それらを参考に願いたい。最も基本的な例を**表 2** に示す。基本的には，

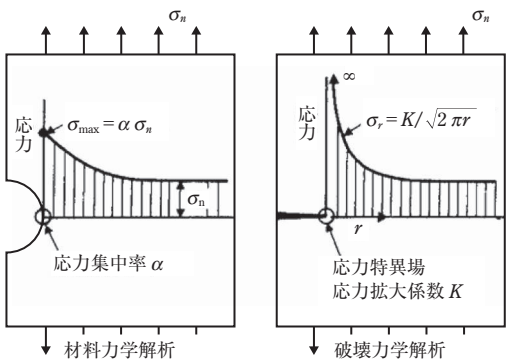
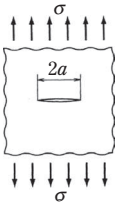
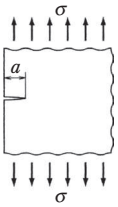
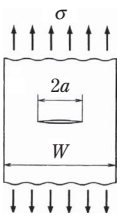
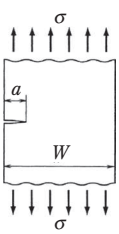



**図 17　材料力学的強度評価と，破壊力学的強度評価**

**表 2　応力拡大係数の代表例**

| き裂と荷重の種類 | 応力拡大係数 $K$ |
|---|---|
|  | 一様引張応力を受ける無限平板中のき裂<br>$K = \sigma\sqrt{\pi a}$ |
|  | 一様引張応力を受ける半無限平板中の片側き裂<br>$K = \sigma\sqrt{\pi a}\cdot F$<br>$F = 1.125$ |
|  | 一様引張応力を受ける有限平板中の中央き裂<br>$K = \sigma\sqrt{\pi a}\cdot F(\alpha)$<br>$\alpha = a/W$<br>$F(\alpha) = (1 - 0.025\alpha^2 + 0.06\alpha^4)\sqrt{\sec\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)}$ |
|  | 一様引張応力を受ける有限平板中の片側き裂<br>$K = \sigma\sqrt{\pi a}\cdot F(\alpha)$<br>$\alpha = a/W$<br>$F(\alpha) = 1.12 - 0.231\alpha + 10.55\alpha^2$<br>$-21.72\alpha^3 + 30.39\alpha^4$ |



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science



き裂深さ $a$，応力 $\sigma$，補正係数 $F$ を用いて次式のごとく求められる。

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}\cdot F(a/W) \qquad (2)$$

### 3.4.2　破壊力学を用いた実働応力の推定と残存寿命の推定

上述の破壊力学パラメータである応力拡大係数 $K$ は，き裂先端部の厳しさを評価する汎用パラメータとなり，例えば繰返し負荷中のき裂の進展特性は，**図 18** のように表わされる。これは横軸に応力拡大係数範囲 $\Delta K$ の対数，縦軸にその負荷サイクル1回でのき裂の進展速度 $da/dN$ の対数で表示したものである。ほとんどの材料ではこの模式図からわかるように，き裂の進展しない限界応力拡大係数範囲（threshold stress intensity factor range $\Delta K_{th}$）と，1回の負荷で破断する破壊靱性値（fracture toughness $K_{IC}$）の間では，パリス則[2]といわれる，次式の関係が成立する。

$$\frac{da}{dN} = C\cdot\Delta K^m \qquad (3)$$

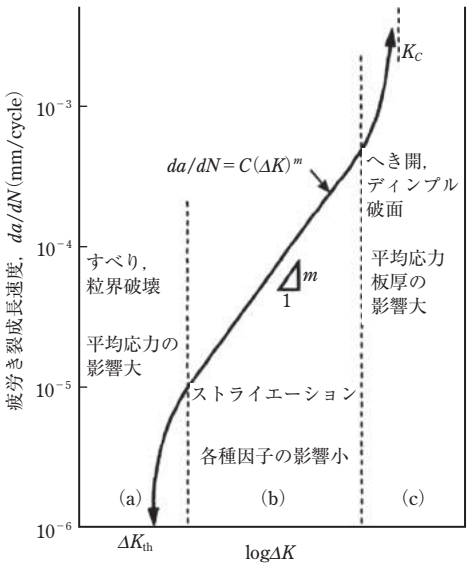



**図 18　疲労き裂の進展特性**

ここで，例えば**図 19**(a)のようにある部品が，繰返し面外曲げ負荷を受け，疲労き裂が発生し進展，破断したとする。その破断面の種々のき裂深さ（$a_1$, $a_2$, $a_3$）位置での電子顕微鏡（SEM）写真から各位置でのストライエーション間隔（$S_1$, $S_2$, $S_3$）を，図 19(b)のごとく測定すれば，これを図 18 の縦軸き裂進展速度 $da/dN$ に当てはめると，図 19(c)のごとく，各位置での応力拡大係数範囲 $\Delta K$ が求まる。これら $a$, $S$, $\Delta K$ が求まれば，実働応力は，(2)式より推定できる。稼働中の応力振幅がそれほど変化しないと予想される場合でも，測定誤差，ばらつき等から，それぞれのき裂位置から推定した応力がそれぞれ一致しないこともあるが，このような場合には平均して推定応力とする。

また，保全業務の側からみると，ある定期検査で，部材にある深さ $a_0$ のき裂が観察されたとして，この部材があとどれ位の寿命 $N_C$ があるかの推定が必要になる場合がある。この場合には，既知の実働応力あるいは上記推定で求めた実働応力振幅 $\Delta\sigma$ と，破壊靱性値 $K_{IC}$ を(2)式に入れ，限界き裂長さ $a_C$ を

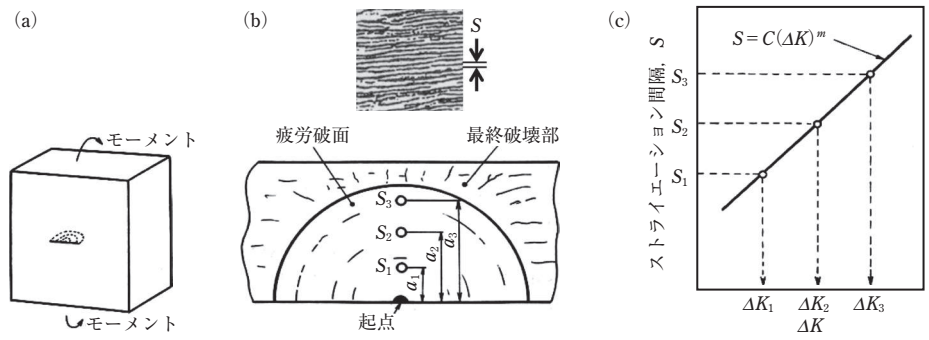



**図 19　実機疲労破面のストライエーション間隔から実働応力の推定**

(a)面外曲げを受ける半だ円き裂を有する板，(b)破面上におけるストライエーション間隔の測定位置，(c)実機のストライエーション間隔から $\Delta K$ を推定する方法



New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）



以下の式から求め，

$$K_{IC} = \sigma\sqrt{\pi a_C}\cdot F(a_C / W) \qquad (4)$$

(3)式を積分して以下のごとく求められる。

$$dN = \frac{da}{\Delta K^m} = \frac{da}{\left\{\Delta\sigma\sqrt{\pi a}\cdot F(a/W)\right\}^m}$$

$$N_C = \int dN = \int_{a_0}^{a_C} \frac{da}{\left\{\Delta\sigma\sqrt{\pi a}\cdot F(a/W)\right\}^m} \qquad (5)$$

**演習問題**

Daily-Start-Stop 回転体の，**図 20** のような繰返し一様引張負荷を受ける部材(Ni−Mo−V 鋼)に，定期検査で深さ 35 mm のき裂が発見された。破面観察した結果，き裂深さ 30 mm の位置で，ストライエーション間隔 0.5 μm が観察された。稼働中の応力状態を予測せよ。

また，定期検査以後この応力状態がそのまま続いているとしたら後何回(日)ぐらいの繰返し負荷を受け，き裂深さがどこまで進むと，終局破断に至るか。

なお，Ni−Mo−V 鋼のき裂進展特性は，**図 21** とせよ。

・実働応力の推定

(3)式より，

$$da/dN = S = C\Delta K^m$$

$$\Delta K = \sqrt[3.1]{\frac{S}{C}} = \sqrt[3.1]{\frac{0.5\times10^{-6}}{2.4\times10^{-12}}} = 52(\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}})$$

表 2 より，

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}\cdot F(\alpha)$$
$$\alpha = a/W$$
$$F(\alpha) = 1.12 - 0.231\alpha + 10.55\alpha^2 - 21.72\alpha^3 + 30.39\alpha^4$$

$$\alpha = a/W = 30/50 = 0.6$$
$$F(\alpha) = 4.03$$
$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{\pi a}\cdot F(\alpha)} = \frac{52}{\sqrt{\pi\times0.03}\times4.03} = 42(\mathrm{MPa})$$

・残留寿命の推定

(4)式 $K_{IC} = \sigma\sqrt{\pi a_C}\cdot F(a_C/W)$ に，

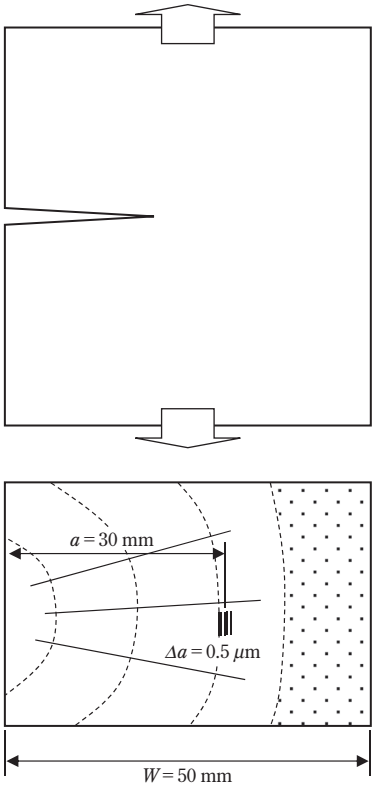



**図 20　一様引張負荷部材のき裂破面**

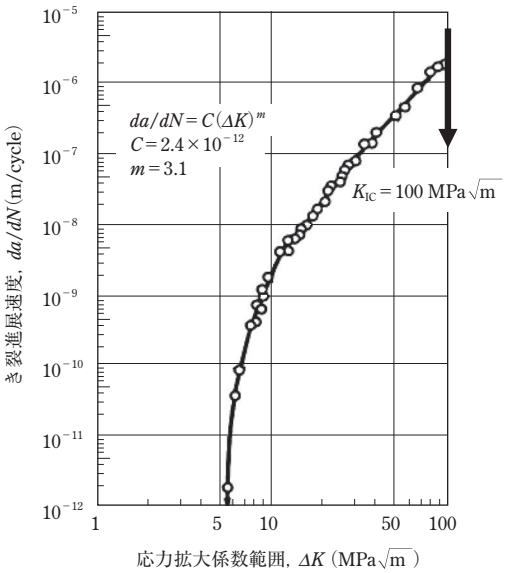



**図 21　Ni−Mo−V 鋼のき裂進展特性**



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。



$K_{IC} = 100(\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}})$　$\sigma = 42(\mathrm{MPa})$ を入れると，

$a_C = 37(\mathrm{mm})$ と求まる。

(5)式

$$N_C = \int dN = \int_{a_0}^{a_C} \frac{da}{\left\{\Delta\sigma\sqrt{\pi a}\cdot F(a/W)\right\}^m}$$ より，

残存寿命

$$N_C = \int dN = \int_{0.035}^{0.037_C} \frac{da}{\left\{42\sqrt{\pi a}\cdot F(a/W)\right\}^{3.1}} \approx 700\text{回（日）}$$

と求まる。

**【引用・参考文献】**

1）Y. Murakami（ed.-in-chief）：Stress Intensity Factors Handbook, Vol. 1, 2（1987）, 3（1992）, 4, 5（2001）, Pergamon, Soc. Materials Sci., Japan.
2）ASTM E647-00：Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates（2001）.

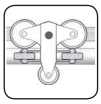
**＜服部　敏雄＞**



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science





# 3節　ジェットコースタ車軸ボルト疲労（1）

▶現　象　［第２編 2-1］［第２編 2-2］

▶原　因　設計（力学・評価）　品質保証

2003年の三重県ナガシマスパーランドジェットコースタの車軸破損事故に続いて，2007年大阪エキスポランドジェットコースタで同じく車軸破損事故が起こった。いずれも車軸ねじ締結部の疲労破損である。前者は本稿で述べるが，ねじ締結体の力学の基本つまり内力係数に基づいた強度・寿命設計の欠如に起因する。この強度設計の欠陥を，保全技術でしのぎ対応してきたが，やはり当初の設計ミスをカバーできずに事故につながった。本事故は現在設計の責任か，保全の責任かで裁判中であるが，これに関わる人，社会の人々が正当な評価ができるためにも，もちろん技術者が，わかりやすく解説できるようにするためにも，本稿のねじ締結の力学が広く理解されることを願う。この主旨は他の事例でも同様であり，活用・展開願いたい。

## 1 事故状況

2003年8月23日，三重県桑名市のナガシマスパーランドのジェットコースタ「スチールドラゴン2000」が，一周2,479 mの走路（**図1**）を約1,800 m走行して，らせん状の走路の左カーブにさしかかった地点で，先頭車両の前車軸右側ホイールキャリア（**図2**，**図3**）を固定していた12本のアクスルボルトが破断した。その12本の破断ボルトのうちの2本の外観写真を**図4**に，その上のボルトの破面を

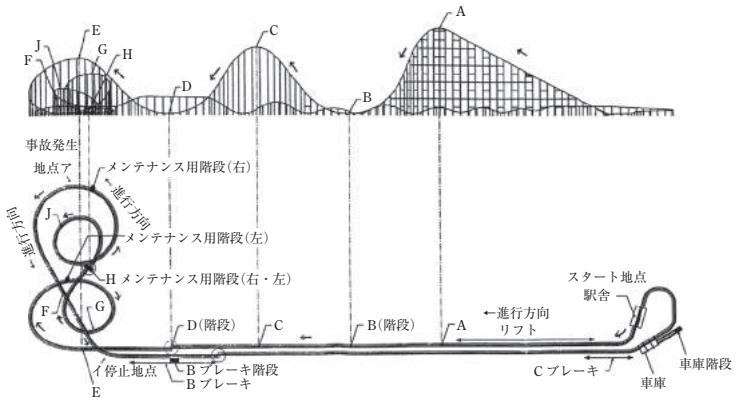



**図1　スチールドラゴンの走路概形**

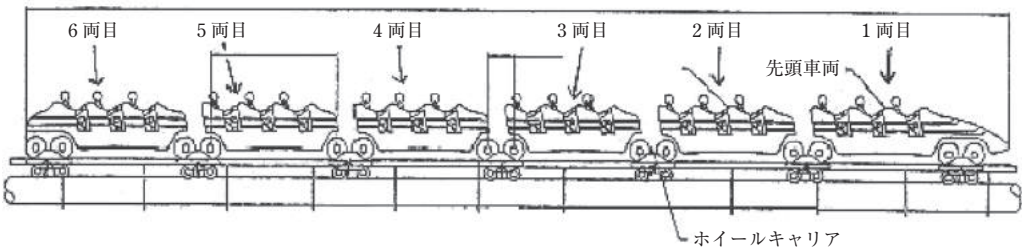



**図2　スチールドラゴン車両の概形**



New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。



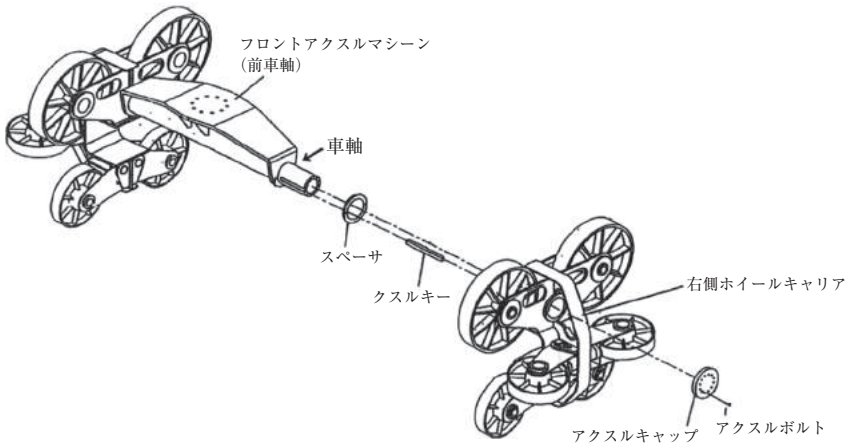



**図3　スチールドラゴン先頭車両前車軸右側ホイールキャリアの概形**

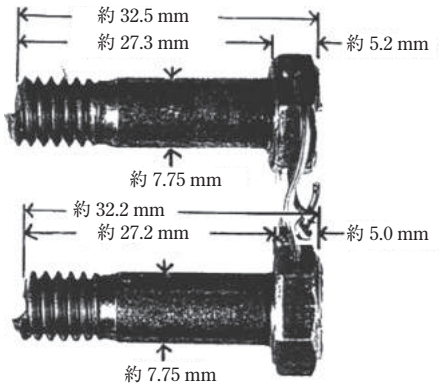



**図4　アクスルボルト破断状況**

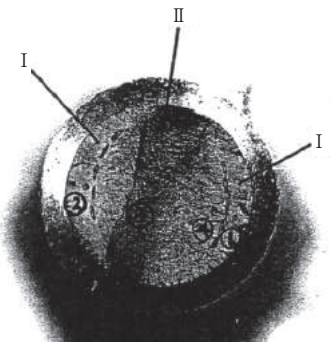



**図5　アクスルボルトの破面写真**

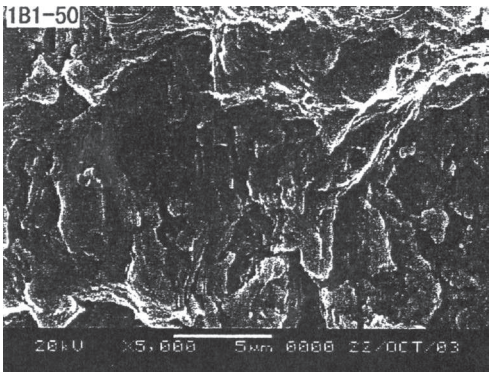



**図6　アクスルボルト破面Ⅰ部のSEM写真(ストライエーション)**

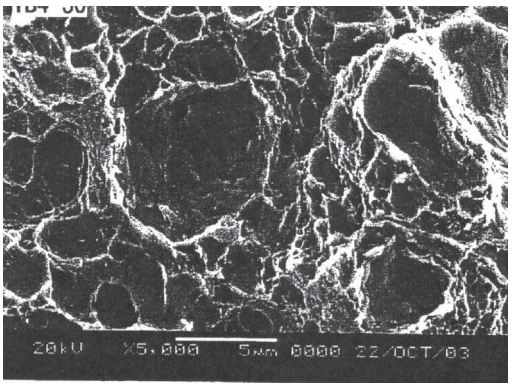



**図7　アクスルボルト破面Ⅱ部のSEM写真(ディンプル)**

**図5**に示す。この破面のⅠ部はビーチマークが観察され，電子顕微鏡(SEM)写真では，**図6**に示すようなストライエーションが観察され，疲労破面であることが推察された。また中心部Ⅱ部のSEM写真では，**図7**に示すようなディンプル破面が観察され，この領域が最終的な静的破面領域であったこ



New Technology New Science (電子試読版)
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。




とが推察された。

## 2 原因究明

この事故に対する製造元，検証部署の説明は，**図 8** のマスコミ報道に見られるように，本来キャリアとアクスルキャップとの間にはすきまを設けて，キャリアにかかる負荷が直接アクスルボルトに加わらないように設計されたもの（**図 9**(a)参照）が，保守のプロセスで，図 9(b)のごとくスペーサを挿入して遊びをなくしたためにアクスルボルトへの負担が増大してアクスルボルトの疲労破壊につながったという論調であった。しかしねじ締結体の強度設計の基本の視点からは少々納得しづらい点もあり，これら両構造をねじ締結体の強度設計上の教材例として取り上げ，以下比較評価を行う。

2005年1月29日（土）　中日新聞

車軸不要部品が主因

ナガシマ事故　単純ミスの可能性

三重県桑名市のナガシマスパーランドで二〇〇三年八月、ジェットコースター「スチールドラゴン2000」の車輪が脱落し、乗客ら二人が重傷を負った事故の主因は、最初に脱落した先頭車両の車軸に不要な金属部品が装着されていたことであることが、警察庁科学警察研究所（千葉県）が三重県警に提出した鑑定結果で分かった。

この部品は装着が必要な車両もあり、三重県警捜査一課と桑名署は、整備か点検段階での単純ミスだった可能性が高いとみて、業務上過失傷害容疑での立件を急ぐ。

鑑定結果によると、車輪六個で構成されるユニットと車軸の間に厚さ三ミリの金属部品「ワッシャー」が誤って装着されていた。

このため、ユニットと車軸の間にすき間が生まれ、ユニットと車軸をつなぐ十二本のボルトにかかる負担が大きくなり連続して折れ、次々と車輪が脱落した可能性が高いという。

**図 8　ジェットコースタ事故の報道**
（中日新聞社の許諾を得て転載）

### 2.1　荷重の種類と大きさ

事故のあった，アクスルシャフト，キャリア周りにかかる荷重は以下のように分けることができる（**図 10**）。ここで注意すべきことは，モーメント B および揺動振動については，ヒッチボールの効果で，静的に加わるものではなく，ヒッチボールより末端のアクスルシャフト，キャリア，側輪等の質量と瞬間の加速度によって生じる動的なものに限られることである。それに対してモーメント A は，図 1 に示した軌道走行時の遠心力に対応する基本的な荷重となり，動的以外にも，準静的な荷重として加わることである。

#### 2.1.1　モーメント A

列車が曲率半径 40 m の軌道を，速度 60 km/h で走行すると，各車両には，6.9 m/s$^2$(0.7g)（程度の加速度が加わる。1 台の車両に 6 人の乗客が乗っていると車両との総質量 3,146 kg となり，これにかかる遠心力は，

$$F_C = 3{,}146 \times 6.9 = 21{,}800\ \mathrm{N}$$

となり，モーメント A は，

$$M_A = 21{,}800\ \mathrm{N} \times 220.7\ \mathrm{mm} = 4.81\ \mathrm{kN\text{-}m}$$

となる。

#### 2.1.2　モーメント B

これは軌道の不整等による振動負荷であり予測は難しいが，実測により，5.04 kN-m と確認されている。

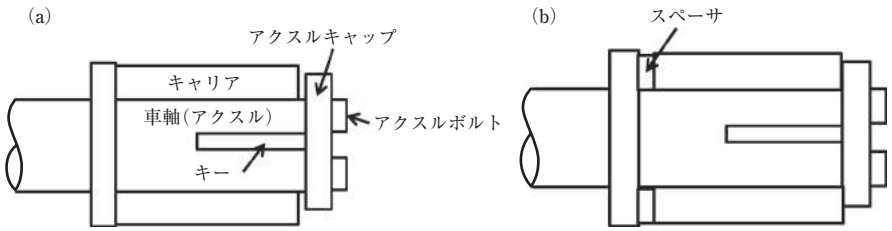



**図 9　車軸周りのねじ締結構造**
(a)遊びのある締結構造，(b)遊びのない締結構造



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

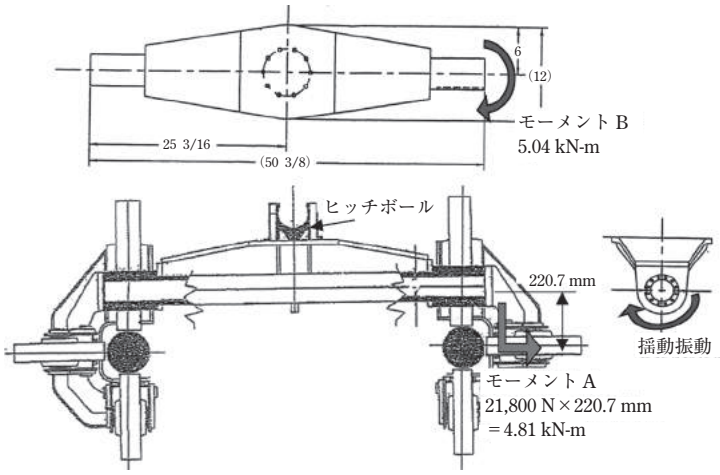




**図 10　車軸周りに加わる荷重の種類と大きさ**

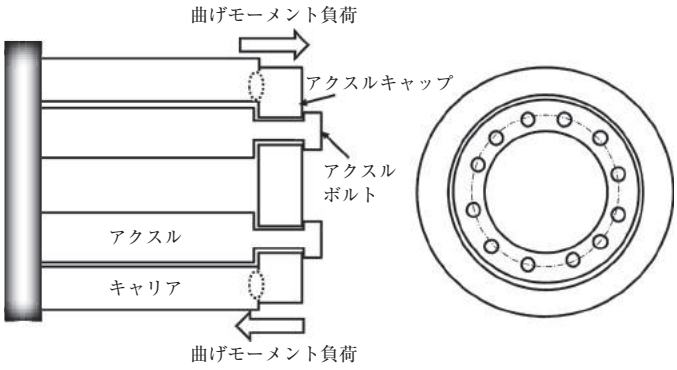



**図 11　車軸周り締結部の一体化モデル**

#### 2.1.3　揺動振動（回転トルク）

これも基本的には，軌道の不整等による振動負荷であり予測は難しいが，実測により 7.18 kN-m と確認されている。

### 2.2　強度評価

#### 2.2.1　モーメント A（遊びなし）

一般に動的負荷の加わる締結部の設計では，ガタを許容しないのが通常である。これは図 9(a) の遊びのある構造では，ガタが摩耗，へたりを促進し十分な締結寿命を維持できないからである。したがって一般のボルト締結では，図 9(b) の構造のごとく，ボルトによって一体化し，その強度設計は内力係数（全荷重に対する，ボルト負担荷重の割合）を使って行うのが基本となる。このことは第 2 編 2−1，2−2 でも述べているので，そこも参考に願いたい。

したがって，まず最初にこの 12 本のアクスルボルトでの初期締め付け力

$$P_0 = 16.9\ \text{kN} \times 12\ \text{本} = 202.7\ \text{kN}$$

で締めつけられた場合のキャリアとアクスルキャップの接触面（**図 11** ⋯ 部）の面圧，

$$p_0 = P_0/A = 202.7\ \text{kN}/7{,}283\ \text{mm}^2 = 27.8\ \text{MPa}$$

が，遠心力負荷（モーメント A）に対して口が開かないか（一体を保てるか）の評価が必要となる。遠心負荷軸力 $F_a = 3{,}240$ kgf に対して面圧は一様に以下の $p_a$，すなわち


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science



$p_a = 21.8\ \text{kN}/7{,}283\ \text{mm}^2 = 2.9\ \text{MPa}$

増加する。また遠心負荷モーメント $M_A = 21.8\ \text{kN} \times 220.7\ \text{mm} = 4.81\ \text{kN-m}$ に対しては以下の $p_m$，すなわち

$$p_m = \pm M_A/Z = \pm 4.81\ \text{kN-m}/198{,}289\ \text{mm}^3 = \pm 24.2\ \text{MPa}$$

増減する。したがって口が開く側の面圧は，24.2－2.9＝21.3 MPa 低下することとなり，上記初期締付け面圧 $p_0 = 27.8$ MPa より小さく口開きに対して十分余裕があり，一体モデルとしての強度解析が可能となる。

この締結体が一体として確保されていれば，問題のボルトに加わる負荷は，内力係数[1)2)]を簡易的にボルト12本全体の断面二次モーメント $I_{b12} = 330{,}714\ \text{mm}^4$（**図 12**），被締結体の断面二次モーメント $I_{c2} = 13{,}376{,}176\ \text{mm}^4$（**図 13**）より

内力係数　$\Phi = 330{,}714/13{,}376{,}176 = 0.025$

となり，ボルト負荷応力 $\sigma_b$ は

$$\sigma_b = \Phi M_A/Z_{b12} = 0.025 \times 4.81\ \text{kN-m}/7{,}716\ \text{mm}^3 = 15.5\ \text{MPa}$$

となる。ここで，ボルトは，サイズ U5/16（M8 相当），強度は，10.9 相当ということより，**表 1** より，ボルトの疲れ強さ推定値 $\sigma_w = 72$ MPa より，安全率 $S_f$ は，

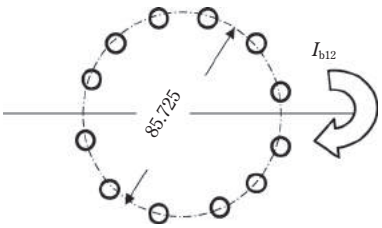



**図 12　ボルト 12 本全体の断面二次モーメント**

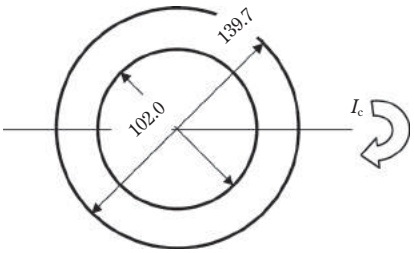



**図 13　被締結体の断面二次モーメント**

**表 1　大滝−吉本によるボルト・ナット用メートルねじの疲れ強さの推定値 $\sigma_{wk}(A_3)$ および $\sigma_{wk}(A_s)$**

（単位：MPa）

| ピッチ系列 | ねじの呼び | $\sigma_{wk}(A_3)$ 強度区分 | | | | | $\sigma_{wk}(A_s)$ 強度区分 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 4.8 | 6.8 | 8.8 | 10.9 | 12.9 | 4.8 | 6.8 | 8.8 | 10.9 | 12.9 |
| メートル並目ねじ | M 6 | 81 | 56 | 64 | 78 | 81 | 72 | 50 | 57 | 70 | 72 |
| | M 8 | 61 | 49 | 59 | 72 | 76 | 55 | 44 | 52 | 65 | 68 |
| | M10 | 52 | 45 | 55 | 69 | 72 | 47 | 41 | 50 | 62 | 65 |
| | M12 | 48 | 43 | 53 | 67 | 71 | 43 | 39 | 48 | 61 | 64 |
| | M16 | 42 | 39 | 49 | 62 | 66 | 39 | 36 | 45 | 57 | 61 |
| | M20 | 39 | 37 | 46 | 61 | 65 | 36 | 34 | 43 | 56 | 59 |
| | M24 | 37 | 36 | 45 | 59 | 63 | 34 | 33 | 41 | 54 | 58 |
| | M30 | 34 | 34 | 43 | 57 | 61 | 32 | 32 | 40 | 52 | 56 |
| メートル細目ねじ | M 8×1 | 74 | 51 | 59 | 71 | 74 | 68 | 47 | 54 | 66 | 68 |
| | M10×1.25 | 57 | 46 | 54 | 67 | 71 | 52 | 42 | 50 | 62 | 65 |
| | M12×1.25 | 54 | 44 | 52 | 64 | 68 | 51 | 41 | 49 | 60 | 63 |
| | M16×1.5 | 45 | 39 | 48 | 60 | 63 | 43 | 37 | 45 | 56 | 59 |
| | M20×1.5 | 42 | 37 | 44 | 56 | 59 | 40 | 35 | 42 | 53 | 56 |
| | M24×2 | 37 | 35 | 42 | 55 | 58 | 35 | 33 | 40 | 52 | 55 |



New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


$S_f = 72\ \text{MPa}/(15.5\ \text{MPa}/2) = 9.3$

となり，十分安全であることがわかる。

### 2.2.2　モーメントA（遊びあり）

逆にここで，事故調査側で推奨している，図9(a)の遊びのある場合についてボルトの強度解析を試みる。この場合には隙間の状況によって，以下の二つの負荷モードが考えられる

**(1)キャリアがスラストスペーサと全く当たらない場合**

この場合側車輪からの遠心力21,800 Nが**図14**のアクスルキャップの端面に当たるため，ボルトの最大負担応力 $\sigma_b'$ は，

$$\sigma_b' = \Phi_1 F_a / A_b \pm \Phi_2 F_a \times h / Z_{b12}$$

ここで，

$$\Phi_1 = A_b/(A_b + A_c) = 360\ \text{mm}^2/4{,}273\ \text{mm}^2 = 0.084$$

$$\Phi_2 = I_b/(I_b + I_c) = 330{,}714\ \text{mm}^4/4{,}059{,}940\ \text{mm}^4 = 0.081$$

$$\sigma_b' = 0.084 \times 21.8\ \text{kN}/360\ \text{mm}^2 + 0.081 \times 21.8\ \text{kN} \times 70\ \text{mm}/7{,}716\ \text{mm}^3 = 21.1\ \text{MPa}$$

となり，安全率 $S_f'$ は

$$S_f' = 72\ \text{MPa}/(21.1\ \text{MPa}/2) = 6.8$$

となる。

**(2)キャリアがスラストスペーサと当たる場合**

この場合は側車輪からの遠心力21,800 Nは，腕の長さ220.7 mm＋70 mm＝290.7 mmとのモーメントとなり，このモーメントが腕の長さ2×70 mm＝140 mmでアクスルキャップを押すことになるため，その力はてこの原理で以下のように2.1倍に倍加される（**図15**）。

$$F_a' = 21.8\ \text{kN} \times 290.7\ \text{mm}/140\ \text{mm} = 45.3\ \text{kN}$$

したがってボルトの負担応力は，44.3 MPa，安全率は3.2程度となる。

これらの結果はいずれも，安全率が1以上で一見安全なように見受けられるが，このようなガタ系の場合には，第9(b)図のような一体系と違い遠心力が衝撃的に当たることになり，衝撃倍加係数を2～3と見込むとほとんど余裕がないことがわかる。

### 2.2.3　モーメントB（遊びなし）

まずは，モーメントAと同様，図9(b)の遊びのない構造に対してボルトの強度解析を行う。

この場合の締結部の力学モデルは，図11をちょうど90°回転したものと同様となり，力学解析は先述の曲げモーメントAと同様となるため詳細は省略し，結果のみ示すと，ボルト負担応力 $\sigma_b$ は，

$$\sigma_b = 16.2\ \text{MPa}$$

安全率 $S_f$ は

$$S_f = 72\ \text{MPa}/(16.2\ \text{MPa}/2) = 8.8$$

となり，十分安全であることがわかる。

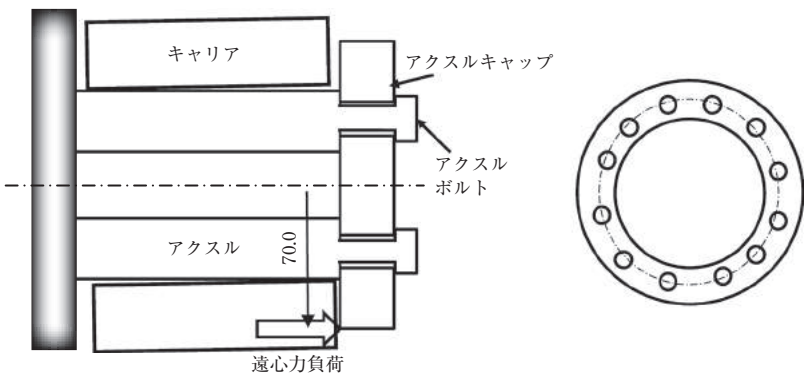



**図14　スペーサのない場合の締結部の力学モデル**
キャリアがスラストスペーサと当たらない場合


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）



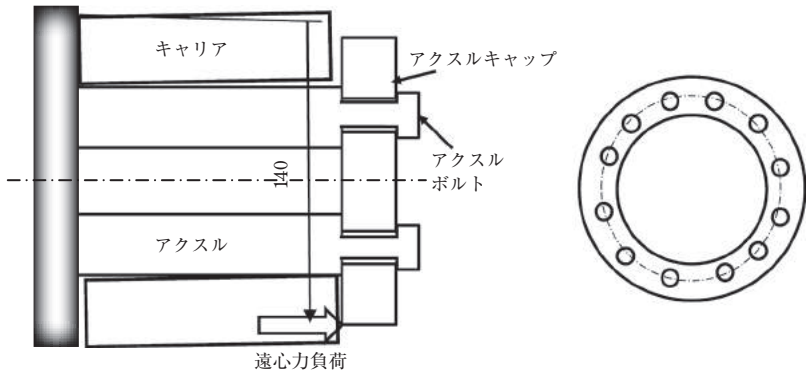



**図 15　スペーサのない場合の締結部の力学モデル**
キャリアがスラストスペーサと当たる場合

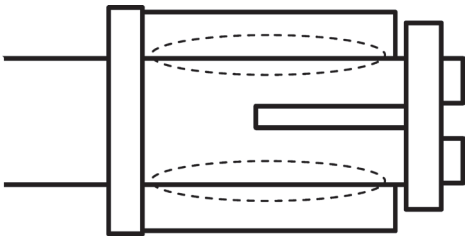


**図 16　遊びのある構造での曲げモーメント負担部位**

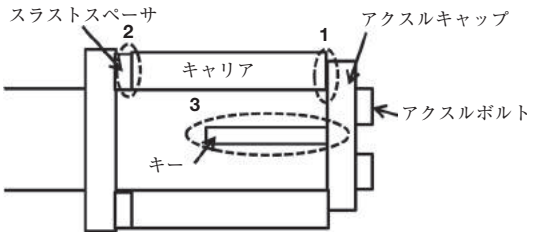



**図 17　遊びなし締結構造での揺動振動負担部位**

### 2.2.4　モーメント B（遊びあり）

モーメント A と同様にここでも，図 9(a) の遊びのある場合についてボルトの強度解析を試みる。

この場合には，遠心力が全く働いていなくて，曲げモーメント B のすべてが**図 16** の ⬭ の部分で負担することとなり，ボルトには負荷が加わらないことになるが，上述のように頻繁に遠心力が衝撃的にかかる状況では，やはり上述のモーメント A（遊びあり）と全く同じ負荷が 90° 回転してかかったことと同一となり，キャリアがスラストスペーサと全く当たらない場合の安全率は 6.8，キャリアがスラストスペーサと当たる場合の安全率は 3.2 程度となり，衝撃倍加係数を 2 ～ 3 と見込むとほとんど余裕がないことがわかる。

### 2.2.5　揺動振動（遊びなし）

**図 17** のごとく，キャリアとアクスルキャップが，ボルト締付け力 202 kN で締結されている場合，二つの接触面（①キャリアとアクスルキャップ間と，②キャリアとスペーサ間）と，③キーで揺動振動負荷を負担する。それぞれの負担できる回転トルク $T_a$ は，摩擦係数を 0.2，キー材 AISI1018 の許容面圧 77 MPa とすると，

①キャリアとアクスルキャップ間と，②キャリアとスペーサ間の負担できるトルクは，

$$T_{a1,2} = 202\ \text{kN} \times 0.2 \times (102\ \text{mm} + 140\ \text{mm})/4 = 2.44\ \text{kN-m}$$

③キーの負担できるトルクは，

$$T_{a3} = 77\ \text{MPa} \times (12.7\ \text{mm} \times 150\ \text{mm})/2 \times 102\ \text{mm}/2 = 3.74\ \text{kN-m}$$

負担可能トルク $T_a$ は，

$$T_a = T_{a1} + T_{a2} + T_{a3} = 2.44\ \text{kN-m} \times 2 + 3.74\ \text{kN-m} = 8.62\ \text{kN-m}$$

となり，実測トルク 7.18 kN-m に対して，安全率 $S_f$ は，

$$S_f = 8.62\ \text{kN-m}/7.18\ \text{kN-m} = 1.2$$

となり，安全であることがわかる。



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

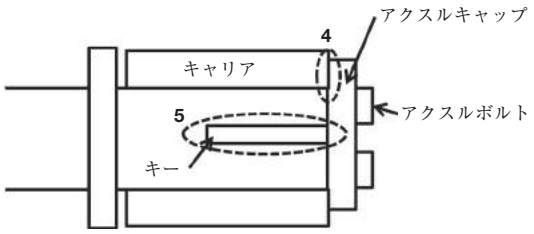




**図 18　遊びあり締結構造での揺動振動負担部位**

#### 2.2.6　揺動振動（遊びあり）

ここでも，事故調査側で推奨している，**図 18** の遊びのある場合について強度解析を試みる。

この場合にはまずこの遠心力 21.8 kN がかかっている場合には，揺動振動負荷は④キャリアとアクスルキャップ間の摩擦と，⑤キー―で負うこととなり，それぞれは，

$$T_{a4} = 21.8\ \text{kN} \times 0.2 \times (102\ \text{mm} + 140\ \text{mm})/4 = 0.26\text{kN-m}$$

$$T_{a5} = 77\ \text{MPa} \times (12.7\ \text{mm} \times 150\ \text{mm})/2 \times 102\ \text{mm}/2 = 3.74\ \text{kN-m}$$

となり負担可能トルク $T_a$ は，

$$T_a = T_{a4} + T_{a5} = 0.26\ \text{kN} + 3.74\ \text{kN-m} = 4.0\ \text{kN-m}$$

となり，実測トルク 7.18 kN-m に対して，安全率 $S_f$ は，

$$S_f = 4.0\ \text{kN-m}/7.18\ \text{kN-m} = 0.56$$

となりきわめて危険であることがことがわかる。

さらに遠心力がかかっていない場合には，揺動振動負荷はすべてキーで負担することなり，負担可能トルクは，

$$T_a = T_{a5} = 3.74\ \text{kN-m}$$

となり，実測トルク 7.18 kN-m に対して安全率 $S_f$ は，

$$S_f = 3.74\ \text{kN-m}/7.18\ \text{kN-m} = 0.52$$

となり，さらに危険となることがことがわかる。

### 2.3　事故原因まとめ

事故調査関係者側から報告されている「そもそもキャリア，アクスルキャップ間には遊びが必要で，保守の過程でスペーサを入れるたことによるボルト負担応力の増大」には大いに矛盾があり，そもそも最初から遊びのない締結構造であったならば，モーメント A，モーメント B，揺動振動いずれに対しても安全率 1 以上確保されたものが，最初遊びを入れた構造としたため，揺動振動負荷に対して安全率 1 を下回り，

・まずは，キーのへたり，摩耗が発生
　↓
・そもそも軸方向の遊びに加えて周方向にもガタが生じることになり，衝撃負荷の増大
　↓
・アクスルボルトのゆるみ，疲労破壊

と至ったものと推察される。このことは，事故の発生以前から，キーのへたりが見受けられていたこと，ボルトの疲労破面が，図 5 に見られるように，両振り曲げモードでありかつ，疲労がピッチサークルの周方向から起こっていることから，上述の強度評価で危険の最も高い揺動振動によるボルト疲労破壊の推定とも一致する。

## 3　ねじ疲労破断対策設計技術

ねじ締結体設計の基本は，十分な締付けに基づく，口開き，すべりの防止が基本であり，この条件が満足されていれば，ボルトで負担する荷重は内力係数で大いに軽減される効果が享受できる。このことの詳細は第 2 編 2−1，2−2 を参考に願いたい。

**【引用・参考文献】**

1）鯉渕興二，小久保邦雄，初田俊雄，服部敏雄，三浦英生：事例でわかる製品開発のための材料力学と疲労設計入門，p. 92，日刊工業新聞社（2009）.
2）丸山一男，賀勢晋司，澤俊行訳：VDI2230 高強度ねじ結合の体系的計算法，日本ねじ研究協会（1949）.

**＜服部　敏雄＞**


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）



# 第３編
# 材料力学と破壊力学


1 材料力学の基礎 ..... 291
2 有限要素法の基礎 ..... 310
3 破壊力学の基礎 ..... 318
4 破壊力学の展開 ..... 340


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


# 2 節　応力特異場パラメータの強度設計への適用

## 1 はじめに

ほとんどの機械・機器はその生産性，メインテナンス性などから多くの締結，結合部を有している。しかしこれら機械・機器の強度，信頼性上のトラブルの多くはこの締結・結合部で起こることに注意する必要がある。古くは鉄道車軸焼ばめ部のフレッティング疲労，航空機リベット締結部の疲労，宇宙往還機熱遮蔽タイルの接着はく離，電子部品封止材のはく離などである。この原因はそもそもこれら締結・結合部での力の流れが複雑かつ，接触条件など関連因子が多く応力解析，強度評価がめんどうなため，詳細な力学解析よりもむしろ従来からの経験に頼りすぎていたこともあると思われる。ここでは，これら締結・結合部の最大の弱点部位となる界面端部(接着端, 接触端)の強度評価法について概説する。ここでの強度評価法は，界面端部の応力分布を表す二つの応力特異場パラメータを用いるものであるが，これは広い意味での破壊力学の範疇に入るものであり，工学的，工業的にさらに広い分野への展開の可能性も高い。本論に入る前に接着端, 接触端(フレッティング)への力学的視点の注意点について説明する。接着継手，焼ばめ継手等の実構造の機械屋の書く図面は接合，締結前の部品図の組合わせとしての表現を主に考えるため，例えば**図 1** に示すごとく, 界面を実線(外形線)で書く習慣になっている。そうするとこの界面を通しての力の出入りに鈍感になり，接着面積あるいは平滑材断面積で荷重を割った平均応力，それにせいぜい接着端，接触端での応力集中を加味した単純な材料力学モデルしか頭に浮かばなくなる。しかし接着界面では寸分たるずれも許容できない，また一般に車軸の焼ばめ等では，平均面圧でも 200 MPa 以上の高面圧の場合が多く，これらのような場合には，接着界面，接触界面の存在を無視して，両者が一体となった図右のミクロモデル構造の疲労現象と考えた方が近い。そう考えると，非常に危険な構造を設計しようとしていることが認識され，接着端，接触端での応力特異場に着目せざるを得ない心境になっていただけると思う。

## 2 接着界面

### 2.1　接着界面損傷の事例

最近の接着剤の利用は目覚しく，例えば軽量化設計が要望されている航空機や自動車においては，構造用接着剤による強度部材の接合が各部で採用されるようになってきている。また，電子・光学機器の組立て，電子部品の封止(パッケージ)などの分野でも，精密固定，無応力締結あるいは工程上の容易さなどの利点から接着剤利用の拡大は著しい。

しかしこのような現状にもかかわらず，接着接合部の強度評価が難しいこともあり，トラブル事例は数多くある。ここでは，電子機器の封止を例に取り上げ，そのトラブルと，対応としての新しい強度評価法の提案について述べる。

**図 2** に代表的な IC 樹脂封止(プラスチックパッケージ)の構造を示す。このパッケージの組立てにあたっては，まずシリコンウエハから切り出した個々のチップを接着剤や Au−Si 共晶接合などに

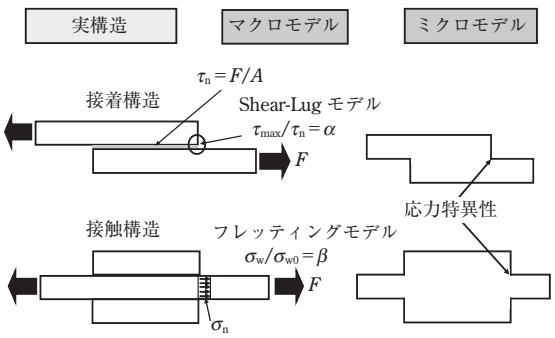



**図 1　接着・接触継手端部のミクロモデル**


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science



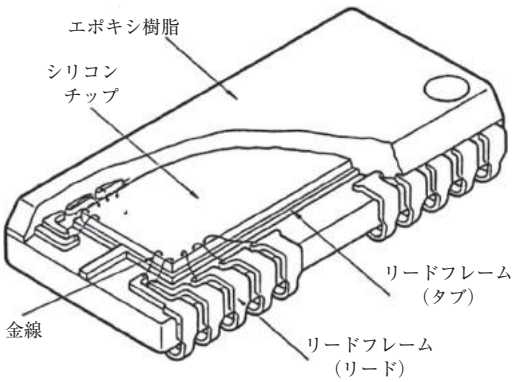



**図2　ICプラスチックパッケージの構造例**

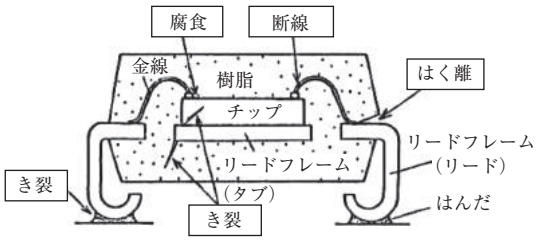



**図3　ICプラスチックパッケージの破損モード**

よって金属製リードフレームのタブ部に固定する。次にチップとリードフレームを金線によって電気接続し，これらの周囲をエポキシ樹脂によってモールドする。

パッケージの主要な損傷モードを**図3**に示す。チップ，リードフレーム，樹脂などは互いに線膨張係数が異なるため，モールド温度(170℃前後)からの冷却や，信頼性試験のための温度サイクル試験などでは，パッケージ内部に熱応力が発生する。この熱応力が原因となって，チップや樹脂，接着界面などに種々の損傷が発生する。また組立てプロセスなどの外力や，はんだ付け加熱時のパッケージ内部の蒸気圧などによっても同様な損傷が発生することがある。これら損傷モードの多くには，界面のはく離が関与しており，もし界面はく離を完全に防止できるならば，パッケージの信頼性は飛躍的に向上する。以下に界面のはく離が関与したいくつかの損傷モードの例について述べる。

#### 2.1.1　アルミ配線腐食

チップ／樹脂界面のはく離あるいは樹脂中のボイドなどによって，チップ表面にすきまが存在すると，この部分で水分が結露して水膜を形成し，チップ表面の微細Al配線を腐食させる。またリードや金属と樹脂の界面がはく離すると，外部の水分が容易にチップ表面に到達するようになり，腐食寿命を低下させる。

#### 2.1.2　チップ割れ[1)]

チップ割れは多くの場合，チップをタブに固定するダイボンディング工程で発生する。リードフレーム材(42アロイなどのFe−Ni合金またはCu合金)の線膨張係数はシリコンより大きいため，ダイボンディング後の冷却過程で熱応力が発生する。チップタブの曲げ剛性が低い場合には，反りによる引張応力がチップ表面に作用して垂直型のチップ割れが生じ，剛性が高い場合にはチップ端部から水平型の割れが生じることがある。チップ／タブ間に部分的な接着あるいは接合不良がある場合には，チップに座屈状の変形が発生し，樹脂モールド後でもチップ割れを生じることがある。

#### 2.1.3　温度サイクル時の樹脂割れ[2)]

温度サイクル時の樹脂割れはタブ，リードなどの端部から発生し，これには通常何らかの界面はく離が関与している。代表的なリードフレーム材である42アロイとCu合金の場合について，樹脂割れの発生メカニズムを**図4**に示す。42アロイではタブ／樹脂間，Cu合金ではチップ／タブ間の熱膨張差が，界面はく離によってタブ下端部に応力を集中させる。

#### 2.1.4　リフローはんだ付け時の樹脂割れ

パッケージに使用する樹脂には，わずかではあるが吸湿する性質がある。現在，電子部品の基板への実装法として，基板全体を電子部品とともに加熱するリフローはんだ付けが一般となっている。この実装法ではパッケージ自体が200℃以上の高温に曝されるため，樹脂が吸湿している場合，水分が気化してタブ／樹脂などの界面に高い蒸気圧が作用する。この蒸気圧は**図5**に示すように界面をはく離させ，さらに樹脂の割れを引き起こすことがある[3)]。**図6**はパッケージ加熱開始後の蒸気圧の変化を，水分拡散・変形シミュレーションによって求めた例[3)]である。40秒後のパッケージ温度は約210℃であり，こ


New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

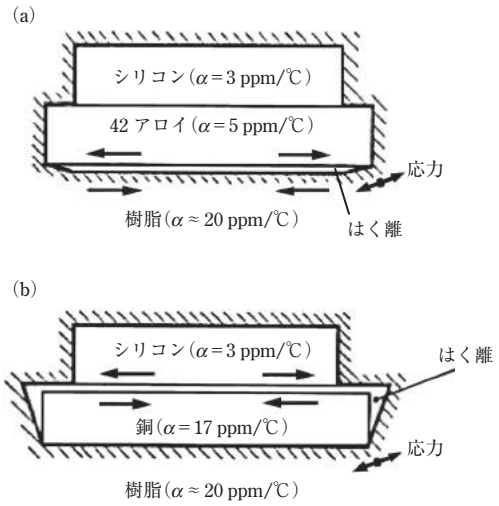




**図 4　樹脂割れのメカニズム**
(a)42 アロイリードフレーム，(b)銅リードフレーム
α；熱膨張率

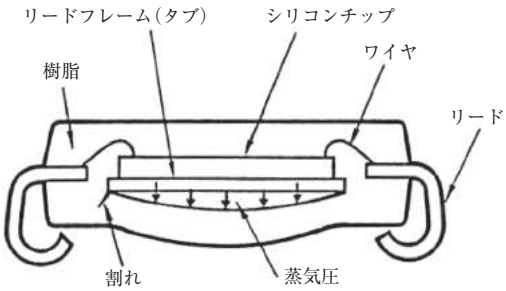



**図 5　蒸気圧による樹脂割れ**

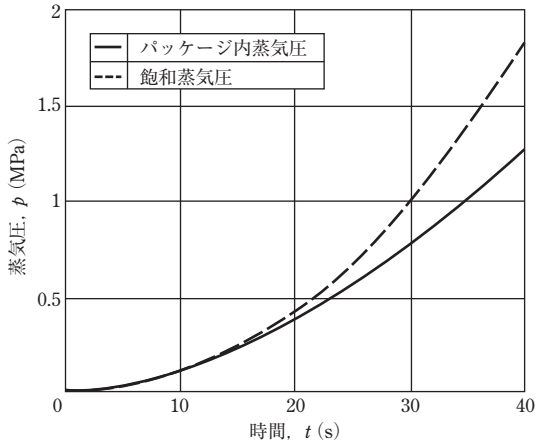



**図 6　はんだリフロー時の蒸気圧の変化**

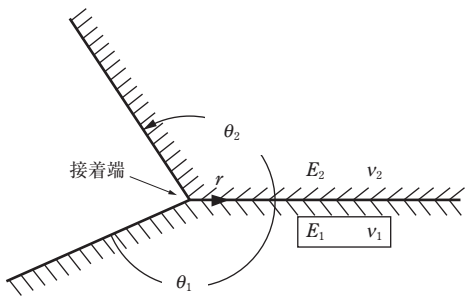



**図 7　接着端部の形状，材料定数**

のときの圧力は約 1.3 MPa にも達している。これらのトラブルを防止するためには各接着界面のはく離強度の正確な評価が不可欠である。

そこで，以下にこの接着端からのはく離発生の評価およびはく離進展挙動を，接着端およびはく離端の応力特異場パラメータで評価する方法を紹介する。

## 2.2　接着端応力特異場パラメータおよびはく離発生評価

一般的な接着端の形状を**図 7** に示すが，このような接着端は形状および材料定数が急変していることから，ここでは厳密には応力が無限大となる応力特異場[4)~10)]となっており，有限要素法あるいは境界要素法などの応力解析のみでは汎用的な評価ができない。そこでこの応力特異場の応力分布が近似的に

$$\tau(r) = H/r^{\lambda} \qquad (1)$$

$\tau(r)$；応力（MPa）
$r$；特異点からの距離（mm）
$H$；応力特異場の強さ
$\lambda$；特異性の指数

で示されることに着目し，この $H$ と $\lambda$ によって接着構造の強度を評価する方法を提案し，種々適用が行われている[10)]。

ここで各接着界面のデータベースとしてのはく離発生基準，つまり接着端にはく離が発生するときの応力特異場パラメータ $H$ と $\lambda$ の関係を，**図 8** に示す種々の特異性の指数 $\lambda$ を有する接着試験片を用いて求める[10)]。試験片の樹脂および 42 アロイの材


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）



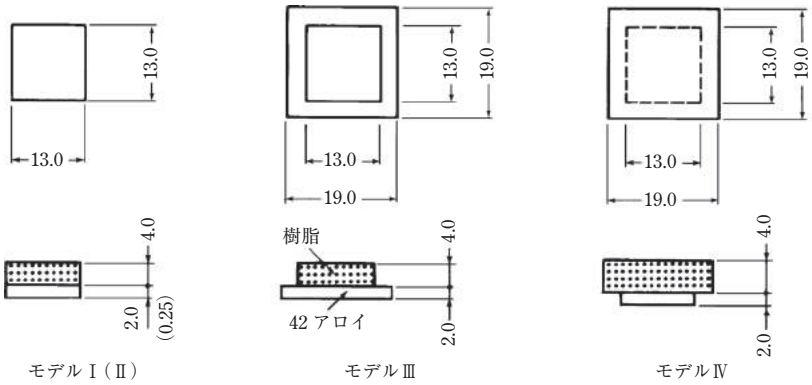



**図 8　接着試験片の形状**

**表 1　接着試験片の材料定数**

| 材料 | ヤング率 $E$(GPa) | ポアソン比 $\nu$ | 熱膨張率 $\alpha(10^{-6}/℃)$ | 引張強さ $\sigma_B$(MPa) | 疲労限界 $\Delta\sigma_{wo}$(MPa) | 破壊靱性値 $K_{IC}$(MPa $\sqrt{m}$) | き裂進展限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th}$(MPa $\sqrt{m}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 樹脂 | 14.7 | 0.25 | 19.0 | 130 | 85 | 2.0 | 1.0 |
| 42 アロイ（Fe−Ni 合金） | 148 | 0.3 | 5.0 | — | — | — | — |

料定数を**表 1** に示す。

これらの材料を 170℃で接着およびキュアリングを行い，降温中に発生する熱応力によるはく離点を，試験片の上下面に貼った歪ゲージで測定する。そこで，このはく離点での熱応力および応力特異場パラメータを有限要素法応力解析により求める。**図 9**，**図 10** に降温量 $\Delta T=100$℃でのそれぞれ熱変形および熱応力分布を示す。**図 11** にこの熱応力（せん断応力）の接着端近傍での対数表示分布を示す。この応力分布に式(1)をベストフィットさせることによって $H$ 値を求めることができる（$\lambda$ は接着端形状，材料定数によって決まる[10]）。このようにして各試験片（各 $\lambda$）に対して求めたはく離発生応力特異場の強さ $H_c$ を求めた結果を**図 12** にプロットで示す。はく離発生基準は，これらの実測点をつなぐことによって求められるわけであるが，この応力特異場パラメータを用いたはく離発生基準曲線を何らかの関係をもとに定式化できないかを検討する。ここではまず，接着端からある特定の距離の応力が限界値に達するとはく離するという条件で求めてみる。例えば**図 13** に示すように，接着端から距離 0.11 mm でのせん断応力が 16.5 MPa という条件ではく離すると仮定すると，はく離発生基準曲線は図 12 の実線のごとくかなり実測点に合ったものとなる。これを定式化すると

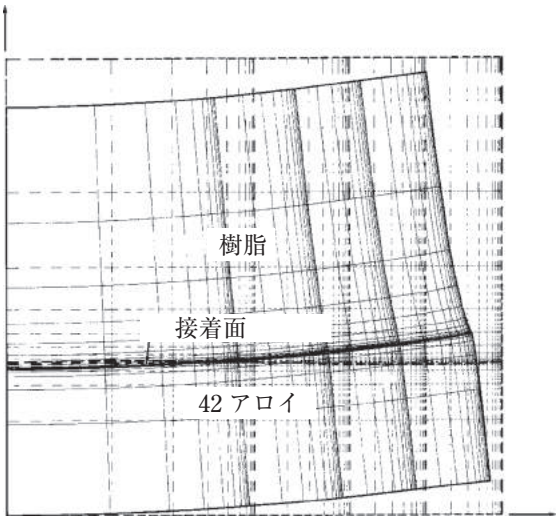



**図 9　モデルⅠ試験片の要素分割および変形図**
$\Delta T=100$℃

$$H_c=16.5\times0.11^{\lambda} \tag{2}$$



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

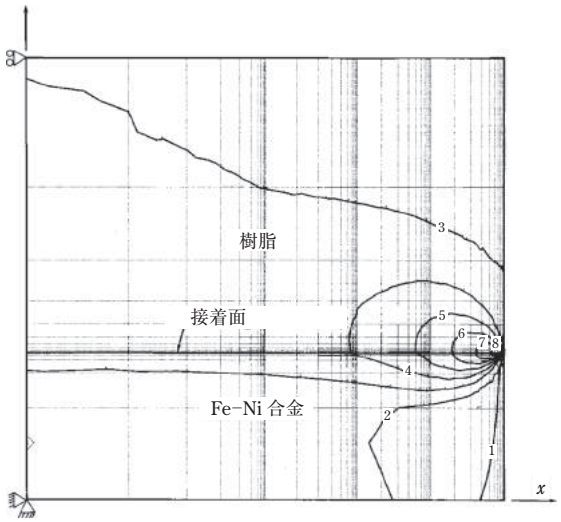




**図 10　モデル I 試験片の要素分割および応力分布図**
$\Delta T = 100$℃

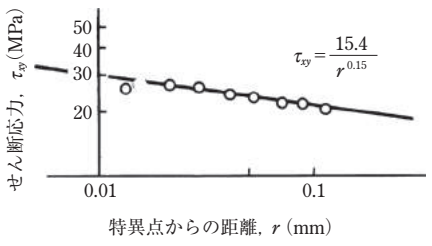



**図 11　モデル I 試験片の接着界面せん断応力の分布**
$\Delta T = 100$℃

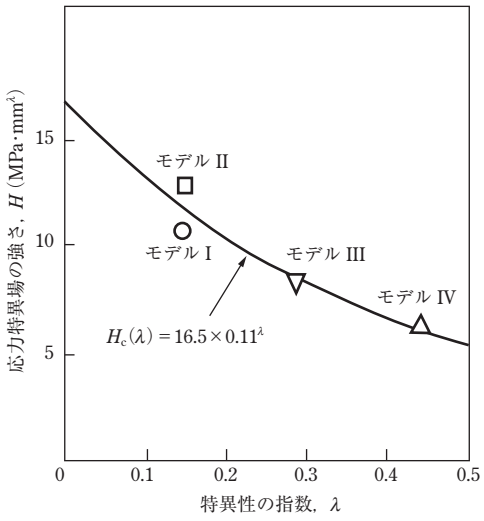



**図 12　応力特異場パラメータ $H$，$\lambda$ を用いた，はく離基準**

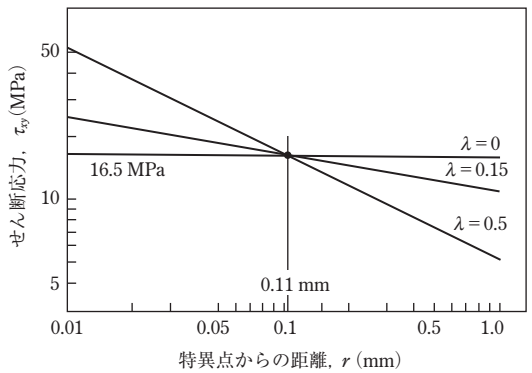



**図 13　はく離基準条件でのせん断応力分布**

となる。

この方法を実際の IC プラスチックパッケージに適用した例を示す。**図 14** は 16 ピンおよび 28 ピンのパッケージのモールド後の降温過程でのはく離発生を予測した結果を示す。16 ピンおよび 28 ピンのいずれのパッケージでも，タブ下面の接着端にはく離が発生する。しかしこのはく離は，16 ピンパッケージの場合，はく離はほとんど進展しないで停止すると予測されるが，26 ピンの場合かなりの領域まではく離が進展すると予測される。これらの予測結果は，同図の超音波はく離観察の結果ともよく一致しており，この評価法の妥当性が確認できる。

## 2.3　単純重ね継手の接着強度評価への適用[11)]

**図 15** に示す単純重ね継手への，上述の応力特異場パラメータを用いたはく離発生評価の適用例を示す。**図 16** にラップ長さ $l$ がそれぞれ 5 mm，15 mm，30 mm の場合の要素分割およびせん断応力分布の図を示す。荷重はいずれも平均せん断応力換算で 50 MPa とした。被着体および接着剤の厚さ $s$，$t$ はそれぞれ 5 mm，0.1 mm であり，それぞれの材料定数を表 1 に示す。**図 17** に有限要素法による接着端近傍のせん断応力分布を示す。これらの荷重（平均せん断応力換算で 50 MPa）のもとでの応力特異場パラメータ $H$ の算出結果（$l = 5$ mm で $H = 31.0$，$l = 15$ mm で $H = 85.0$）を，図 12 のはく離発生基準と比較することによって，種々のラップ長さの単純重ね継手試験片の破断荷重（$F_B$），破断せん断応力（$\tau_B$）を予測すると，**図 18** のごとくなる。**図 19**，**図 20** はそれぞれ被着体の厚さ $s = 5$ mm，


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science



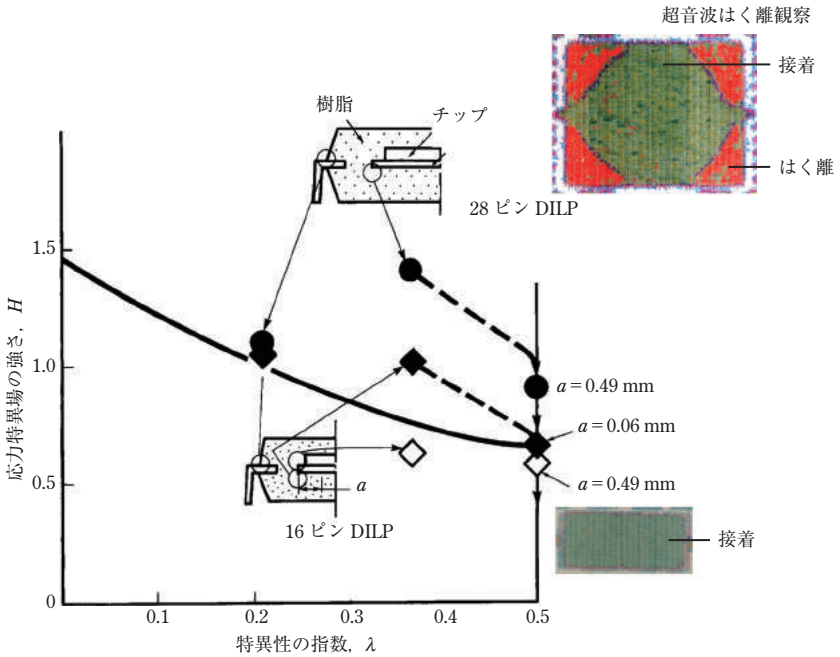



**図 14　応力特異場パラメータ $H$ と $\lambda$ を用いた，実際の IC プラスチックパッケージのはく離評価**（口絵⓭参照）

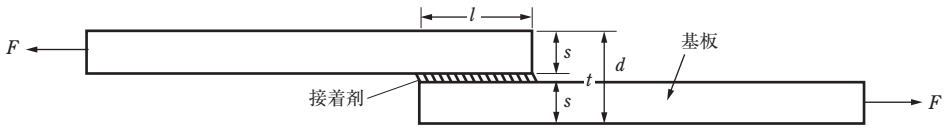
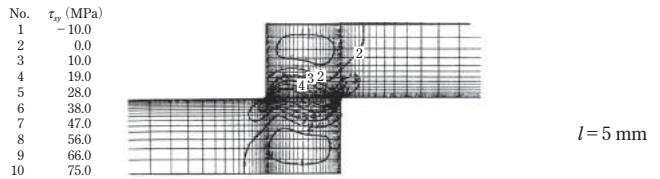
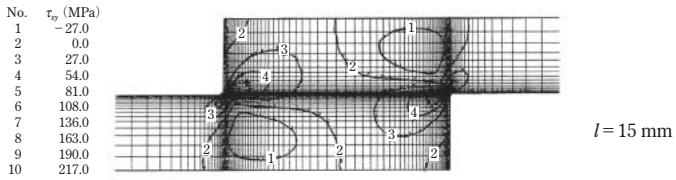



**図 15　単純重ね継手の基本構造と，寸法パラメータ**



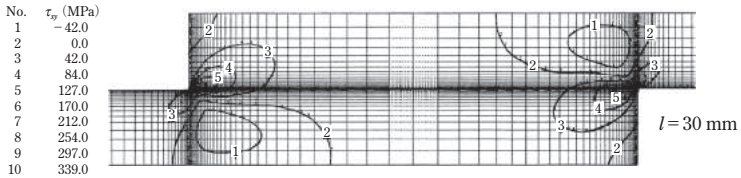




**図 16　単純重ね継手の要素分割モデルとせん断応力分布**

$s = 5$ mm，$t = 0.1$ mm



New Technology New Science（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

（電子試読版）New Technology New Science



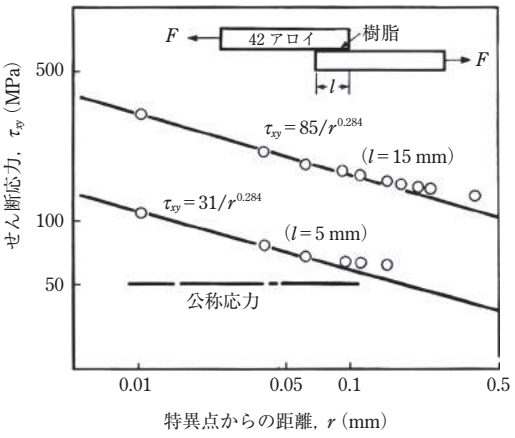



**図 17　接着端近傍でのせん断応力分布**
$s$＝5 mm，$t$＝0.1 mm

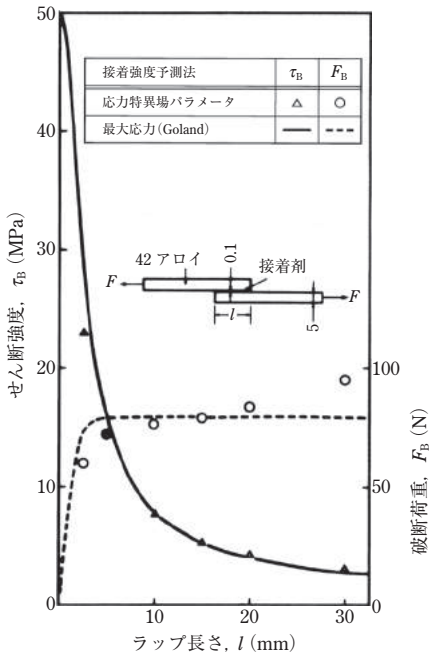



**図 18　ラップ長さと，接着せん断強度の関係**
$s$＝5 mm，$t$＝0.1 mm

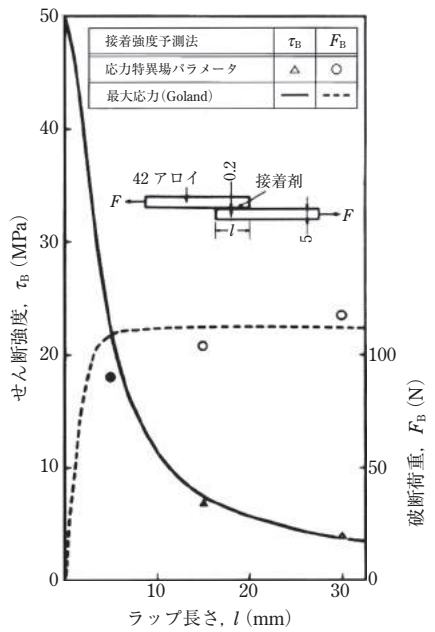



**図 19　ラップ長さと，接着せん断強度の関係**
$s$＝5 mm，$t$＝0.2 mm

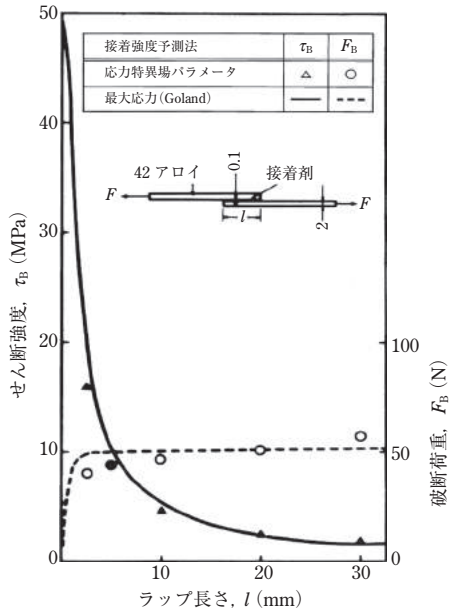



**図 20　ラップ長さと，接着せん断強度の関係**
$s$＝2 mm，$t$＝0.1 mm

2 mm，接着層の厚さ $t$ ＝0.2 mm，0.1 mm の場合の同様な接着強度予測結果である。これらの予測結果はいずれも図中に示す Goland ら[12]の簡便的な最大応力基準の予測結果と比較的よく一致している。ラップ長さが被着体の厚さ以上になると継手の破断荷重がさほど向上しなくなる傾向は，他の実測結



New Technology New Science （電子試読版）

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。



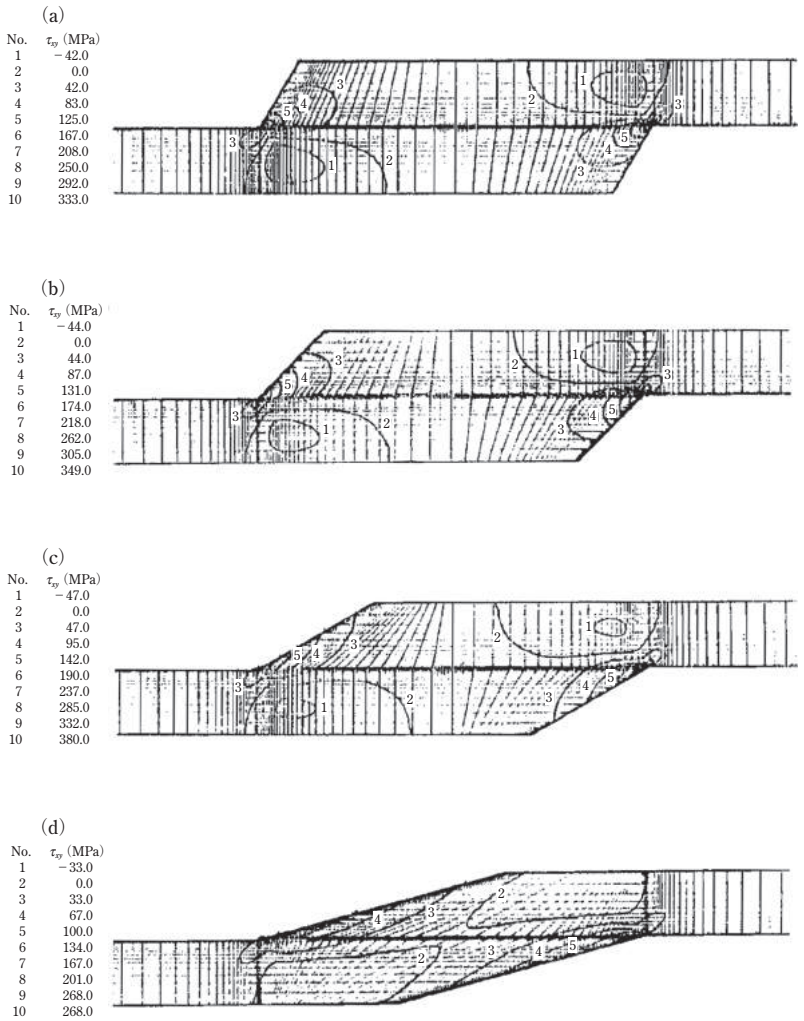



**図 21　テーパ接着継手の要素分割図とせん断応力分布**
接着端角度(a)$\pi/3$，(b)$\pi/4$，(c)$\pi/6$，(d)$\pi/12$
$s=5$ mm，$t=0.1$ mm，$l=30$ mm

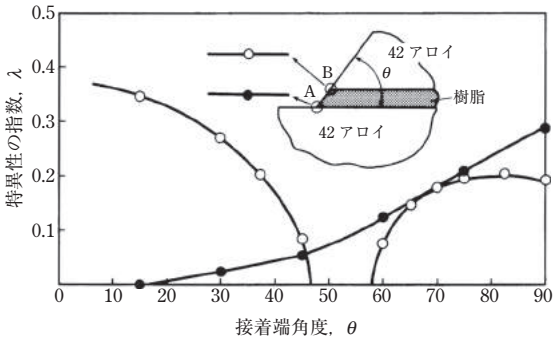



**図 22　接着端角度と，特異性の指数λの関係**

果[13)〜15)]をよく説明している。

次に**図 21** に示すラップ長さ $l=30$ mm でかつ，接着端角度 $\theta$ がそれぞれ $\pi/3$，$\pi/4$，$\pi/6$，$\pi/12$ の場合のテーパ継手の接着強度評価結果を示す。まず特異性の指数 $\lambda$ については**図 22** に示すごとく下部接着端 A 部と上部接着端 B 部とで異なり，接着端角度により各々の大小関係は異なる。平均せん断応力換算で 50 MPa 負荷した場合の接着端角度 $\theta$ が $\pi/3$ および $\pi/2$ の特異場の強さ $H$ の値を**図 23** の図中に示す。これらの特異場パラメータの算出結果を，図 12 に示したはく離発生基準と比較することによって，種々の接着端角度の接着継手の接着せん



閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

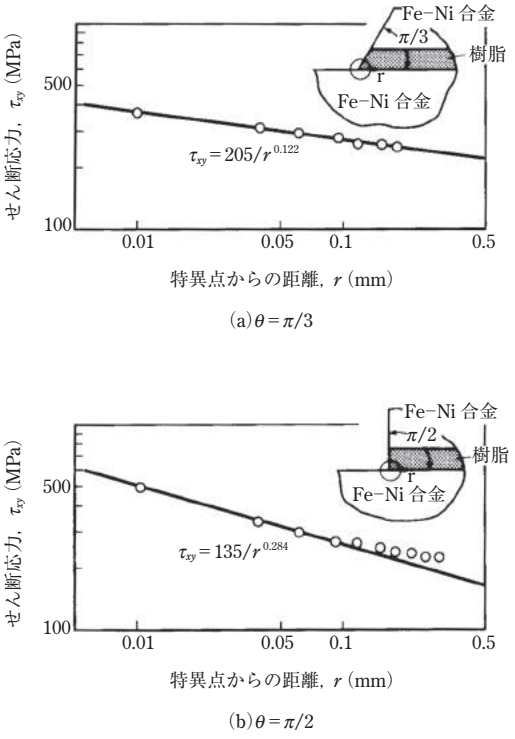




**図 23　接着端部のせん断応力分布**
$s=5$ mm，$t=0.1$ mm，$l=30$ mm

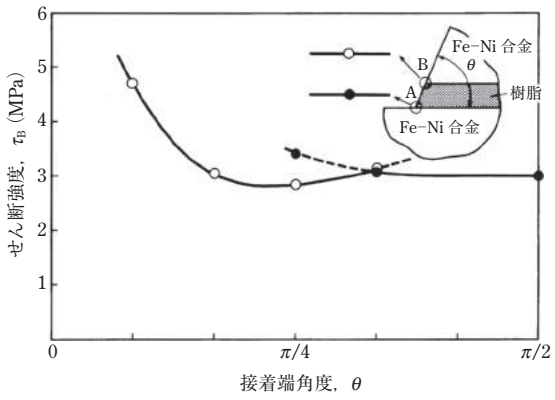



**図 24　接着端角度と継手せん断強度の関係**
$s=5$ mm，$t$ - 0.1 mm，$l=30$ mm

断強度($\tau_B$)を予測すると**図 24** のごとくなる。この図 24 は，下部接着端 A 部および上部接着端 B 部それぞれのせん断強度を示すが，接着端角度 $\theta$ が $\pi/3$ 以下では上部接着端 B 部から破断し，$\pi/3$ 以上では下部接着端 A 部から破断することがわかる。また

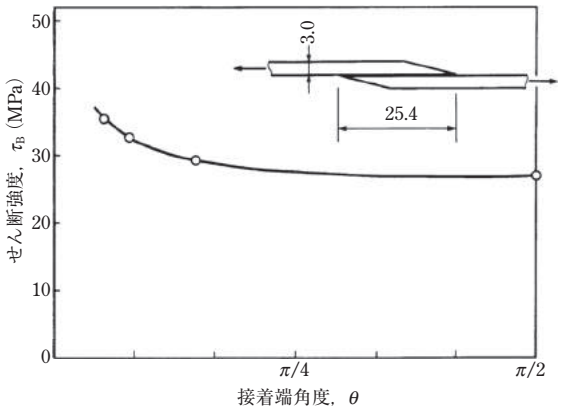



**図 25　接着端角度と継手せん断強度の関係**[15]

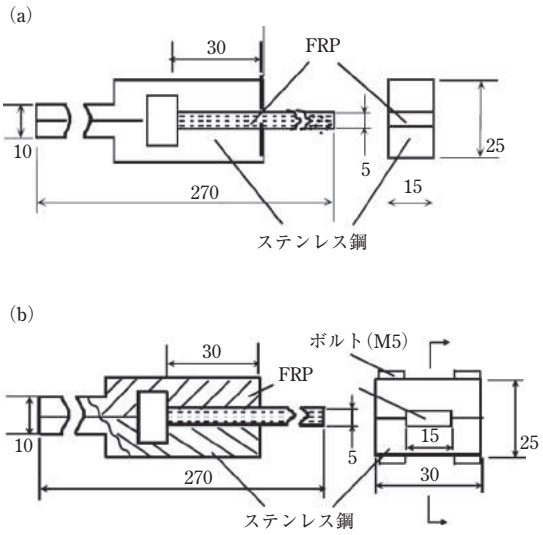



**図 26　接着継手の形状と寸法**
(a)二重重ね合わせ継手，(b)埋込み継手

接着端角度を $\pi/6$ 以下にすることによって接着強度が大きく向上することが予測される。この傾向は**図 25** に示す Holton らの実測結果[15]と比較的よい一致を示した。

## 2.4　はく離端の応力特異場パラメータを用いたはく離進展評価への適用[16]

**図 26** にはく離進展評価に用いたアルミナ繊維・エポキシ樹脂 FRP／ステンレス鋼接着継手を示す。(a)は二重重ね合わせ継手，(b)は埋込み継手である。応力解析は継手の対称性を考慮して 1/4 モデルで行い，FRP の機械的特性の異方性も考慮した。


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）



接着剤はエポキシ系接着剤とし，接着層厚さは50 μmとした。外力負荷は接着面の平均せん断応力2.9 MPaとなるように与えた。はく離進展挙動を評価するためにFRP／ステンレス鋼接着界面に，はく離長さ1 mm，5 mm，10 mm，15 mm，20 mmとして応力解析を行った。

**図27**にはく離が5 mmのときの二重重ね合わせ継手の応力解析結果を示す。はく離端近傍の応力分布は(1)式で表され，継手中央部(B断面)よりコーナ部(A断面)の方が応力状態は厳しい。このようにして求めたはく離端の応力特異場解析結果を**図28**に示す。二重重ね合わせ継手の応力特異場の強さ$H$は，はく離長さ$a$とともに大きくなるが，埋込み継手の応力特異場の強さ$H$は，はく離長さとともに10 mmまではわずかに低下し，その後はほぼ一定となることがわかる。したがって，二重重ね合わせ継手と埋込み継手では，はく離進展挙動が大きく異なることが予想される。

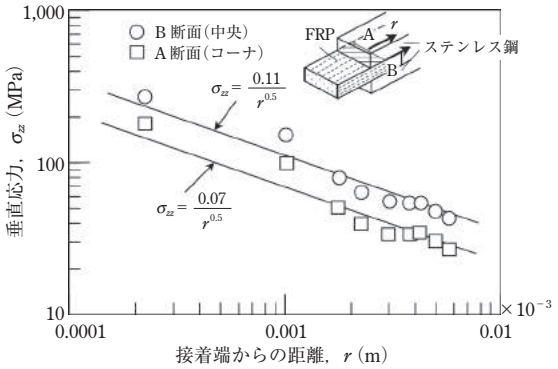



**図27　接着端の位置と応力分布**
はく離長さ5 mm

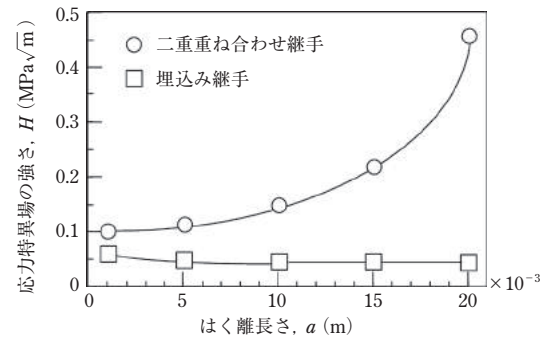



**図28　はく離長さと応力特異場の強さ$H$の関係**

2種類の継手の疲労試験結果を**図29**に示す。ここで，せん断応力振幅$\tau_a$は荷重を全接着面積で除したものである。図より疲労強度は二重重ね合わせ継手より埋込み継手の方が高いことがわかる。次に，二重重ね合わせ継手の両側にクラックゲージを貼って疲労試験を行い，はく離進展挙動を観察した。はく離は疲労試験のかなり早期から発生し，疲労寿命ははく離進展過程が支配していた。そこで，はく離進展速度を評価するために，はく離進展速度$da/dN$

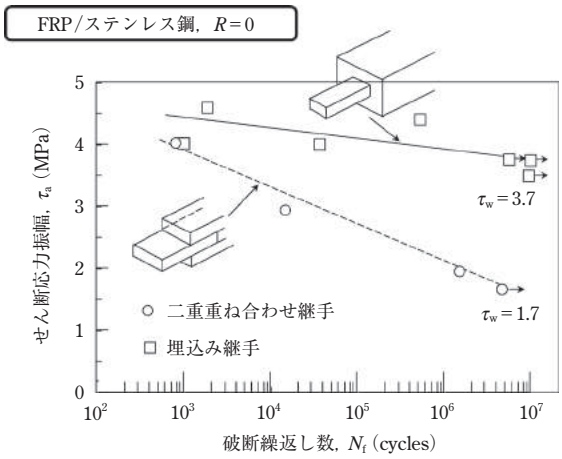



**図29　接着継手の疲労試験結果**

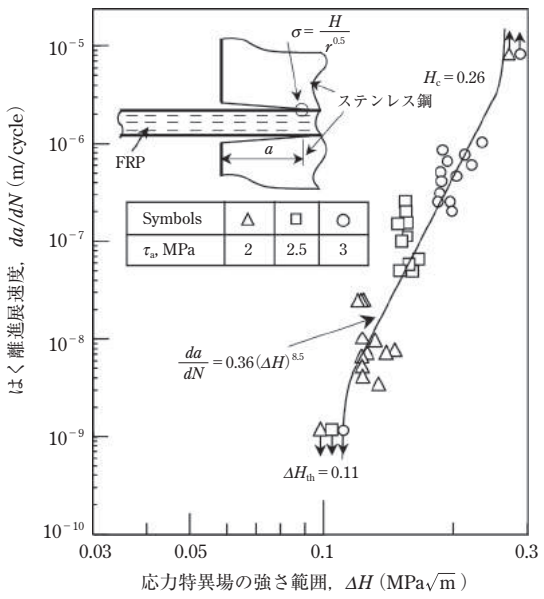



**図30　応力特異場の強さ範囲$\Delta H$と，はく離進展速度$da/dN$の関係**



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science



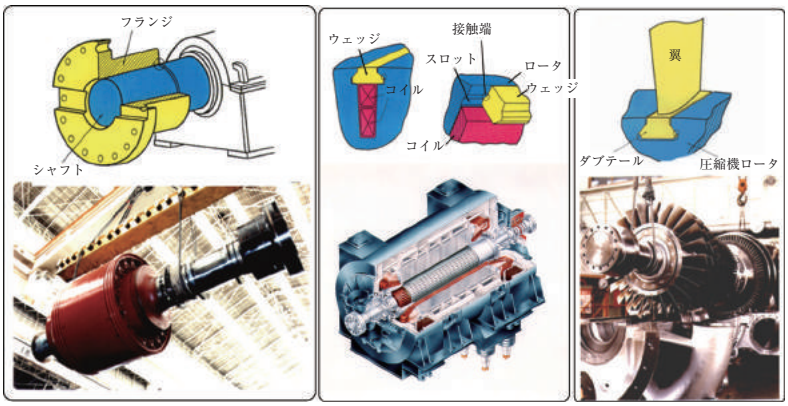



**図 31　フレッティング疲労の損傷・事故例**（口絵⓭参照）

と接着面の垂直応力の特異場の強さ範囲 $\Delta H$ の関係を求めた結果を**図 30** に示す。図 30 には疲労限での応力特異場の強さ範囲 $\Delta H_{th}$ と，破断時の応力特異場の強さ $H_c$ もあわせて示した。図より，$\Delta H_{th}$ と $H_c$ の間で，$da/dN$ と $\Delta H$ の関係は両対数グラフでほぼ一本の直線で表されることがわかる。この二重重ね合わせ継手の疲労限での応力特異場の強さ範囲 $\Delta H_{th}$ と図 26 に示した埋込み継手の応力特異場の強さ $H$ より埋込み継手の疲労限を予測すると $\tau_w$ = 3.5 MPa となり実験値とほぼ一致した。これにより，図 30 のはく離進展速度データは，任意の形状の接着構造のはく離進展評価に適用できることがわかる。

## 3 接触界面

### 3.1　フレッティング疲労損傷の事例

接触端部も接着端部と同様応力特異場となっており，非常に低い応力の繰返しで，接触端に微小き裂が発生することがある。これをフレッティング疲労と呼び，過去解析的・実験的な研究が種々行われてきた[17)~31)]。例えば，**図 31** に示すような，焼ばめ軸継手，タービン発電機コイルウエッジ部，ターボ機械動翼はめ込部などである。ここではタービン発電機コイルウエッジ部のトラブルをとりあげ，その状況と対応について示す[21)]。

タービン発電機は**図 32** に示すごとく，ロータとステータより成り，ロータの断面は，**図 33** のごとく多数のスロットが形成されており，ここにコイルを入れて電極を構成している。ここでこのスロット内でコイルが遠心力で飛び出ないようにウエッジで押さえられている。この場合ウエッジは軸方向に多数に分断され，スロットは軸方向に一体となっているため，必ず**図 34** のように接触端，ギャップが存在し，ロータが自重で撓んだ状態で回転すると，ロータの 1 回転ごとにこの接触端で相対的なすべりおよびせん断力の集中が発生することになる。

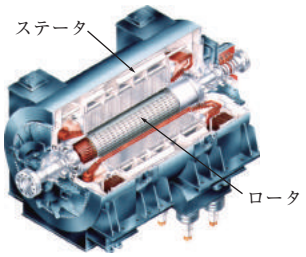



**図 32　タービン発電機のロータ**

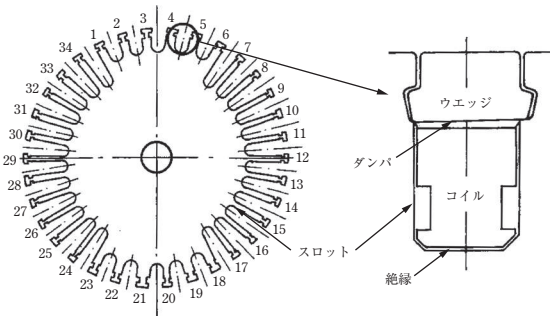



**図 33　タービン発電機ロータの断面図**[21)]



New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。



近年タービン発電機の大容量化に伴いロータ長が伸びると，この相対すべり，せん断力の集中も増大し，上記フレッティング疲労により，ロータが破断するという事故が1976年英国で起こった。破面は**図35**，**図36**に示すように，ダミースロットの接触端部に微小き裂が発生し，最初非常にゆっくりと長い時間をかけて進展し破断に至るというフレッティング特有の経過を示している。

この種のフレッティング誘起疲労損傷を考慮した強度設計には，この微小き裂の発生，進展の予測が不可欠である。従来は，この接触条件下の応力解析が困難であったこと，フレッティング疲労強度の低下は単に応力のみでなく，酸化などの金属学的，化学的な因子が重要視されていたため，近似モデルを用いた疲労試験データに基づいて強度設計されてきたが，最近では，接触条件下の応力解析技術の進歩[22]，破壊力学解析，応力特異場解析の進歩[24)29)~31)]によって，応力のみから相当精度よく強度予測できるようになった。ここではこれらフレッティング疲労の全プロセスを考慮した強度評価法について述べる。**図37**にそのモデルを示すが，そもそも接触端は応力が集中して，き裂は発生しやすいが，この発生した微小き裂はこの接触端に働く高い接触面圧のために開口しづらく進展しないままある程度の寿命を費やすことになる。しかし，この接触端部にフレッティング摩耗が進展してくるとこの高い面圧集中が緩和され，この微小き裂も開口しやすくなり，いよいよ進展し始めることになる。

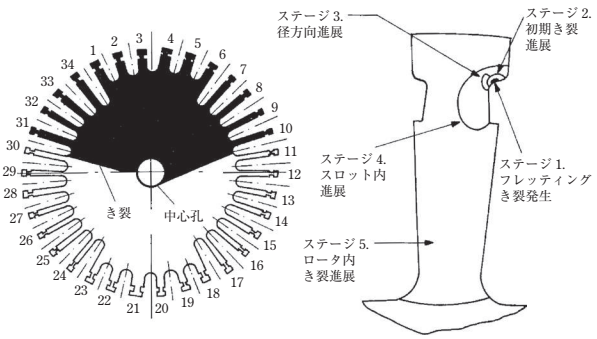



**図36　タービン発電機ロータのフレッティング疲労き裂進展プロセス**

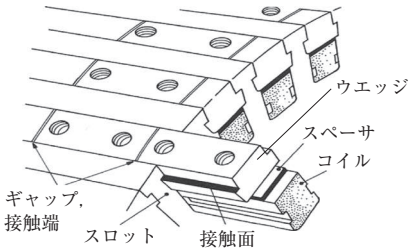



**図34　スロットとウエッジの接触界面およびウエッジギャップと接触端**[21)]

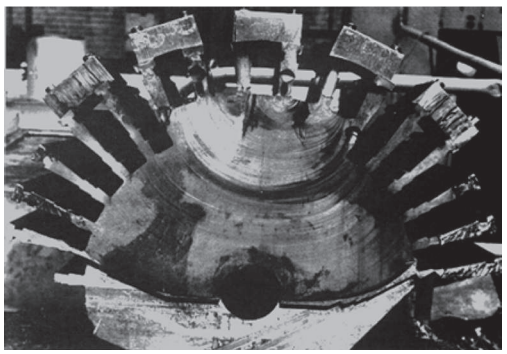


**図35　タービン発電機ロータの破面**[21)]

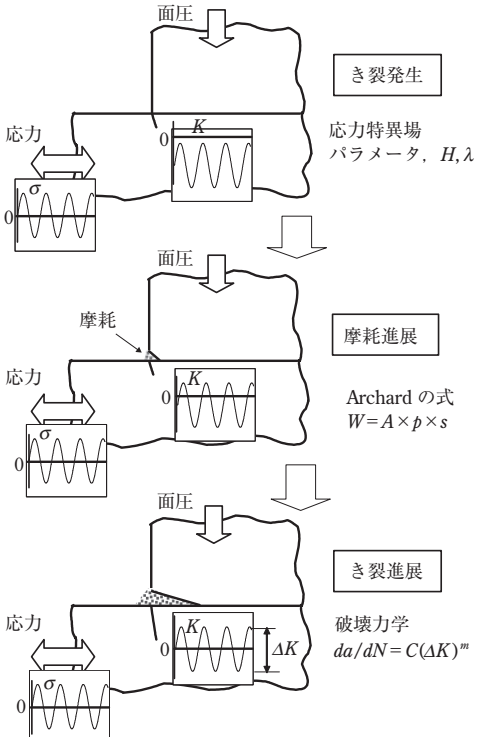



**図37　フレッティング疲労のプロセス**



閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）


そこで以下では，応力特異場パラメータを用いたフレッティング微小き裂の発生予測，それを用いた接触端部構造の最適化について述べる。

### 3.2　接触端の応力特異場パラメータを用いたフレッティング疲労き裂発生評価

接触端近傍の応力分布は，**図 38** に示すごとく接着端と同様な応力特異場を呈し，応力分布も同じく二つの応力特異場パラメータを用いて式(1)で示される[24)25)]。特異性の指数 $\lambda$ は**図 39** に示す相互に接触する二つの物体 1，2 の接触角度 $\theta_1$，$\theta_2$，ヤング率 $E_1$，$E_2$，ポアソン比 $\nu_1$，$\nu_2$，接触面の摩擦係数 $\mu$ より解析的に求まる[24)25)]，しかし，ここでは，接触端近傍の応力分布の数値計算結果を式(1)にあてはめることによって求める。応力分布は，有限要素法か，境界要素法によって計算される。応力特異場の強さ $H$ もまた，接触端近傍の応力分布の数値計算結果を式(1)にあてはめることによって求める。このように計算された $H$ と $\lambda$ を，き裂発生限界応力特異場の強さ $H_c$ と比較することにより，任意の接触条件におけるフレッティングき裂発生を予測することができる。このき裂発生限界応力特異場の強さ $H_c$ は，接着でのはく離発生基準と同様，接触端からある特定の距離の応力が限界値に達すると疲労き裂が発生するという条件で求めてみると，対象とした Ni−Mo−V 鋼材平滑疲労限 $\sigma_{w0}$，き裂進展限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th}$ をもとに次式および**図 40** のごとく求まる。

$$H_c = 360 \times 0.012^{\lambda} \qquad (3)$$

これらの関係は，木原ら[28)]の鋭敏な切欠モデルでの実験結果にもよく合うことを確認している[29)]。次にこの評価法を**図 41** のフレッティングモデルに適用した例を示す。このモデルにおいて，ウエッジの上部に一定接触面圧 $P_0$(196 MPa)が与えられ，繰返し軸応力 $\sigma_0$(±98 MPa)が試験片の端面に与えられる。接触面の摩擦係数はフレッティング疲労中の実測摩擦係数 0.7[30)31)] を用いている。**図 42** に接触端角度をそれぞれ 90°，80°，60°，および 45° の場合の周方向応力範囲($\Delta\sigma_\theta$)の分布を示す。これらの周方向応力範囲分布から接触端応力特異場パラメータ $\lambda$ および $H$ を求める。

それぞれの接触端角度 $\theta$ に対する $\lambda$ の計算結果

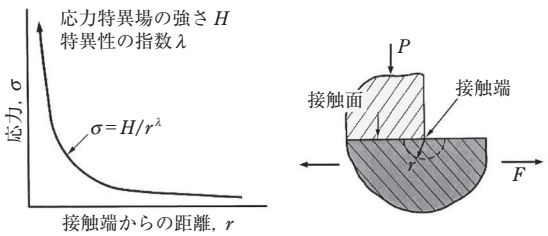



**図 38　接触端部での応力分布**

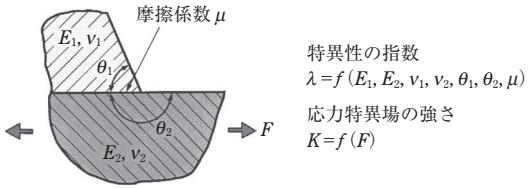



**図 39　接触端部の形状と応力特異場パラメータ**

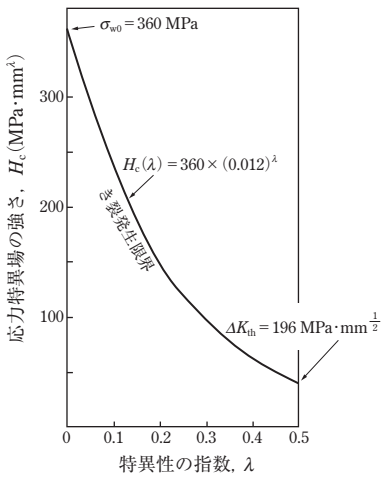



**図 40　応力特異場パラメータを用いた，フレッティング疲労き裂発生基準**

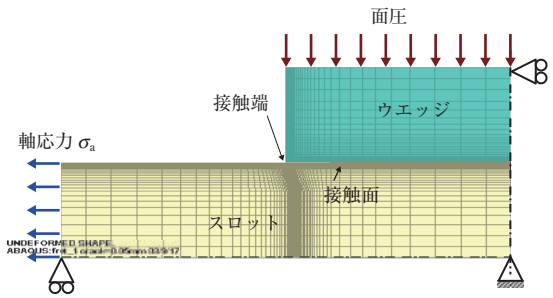



**図 41　フレッティング疲労き裂発生評価用接触体モデル**
（口絵⓭参照）


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science



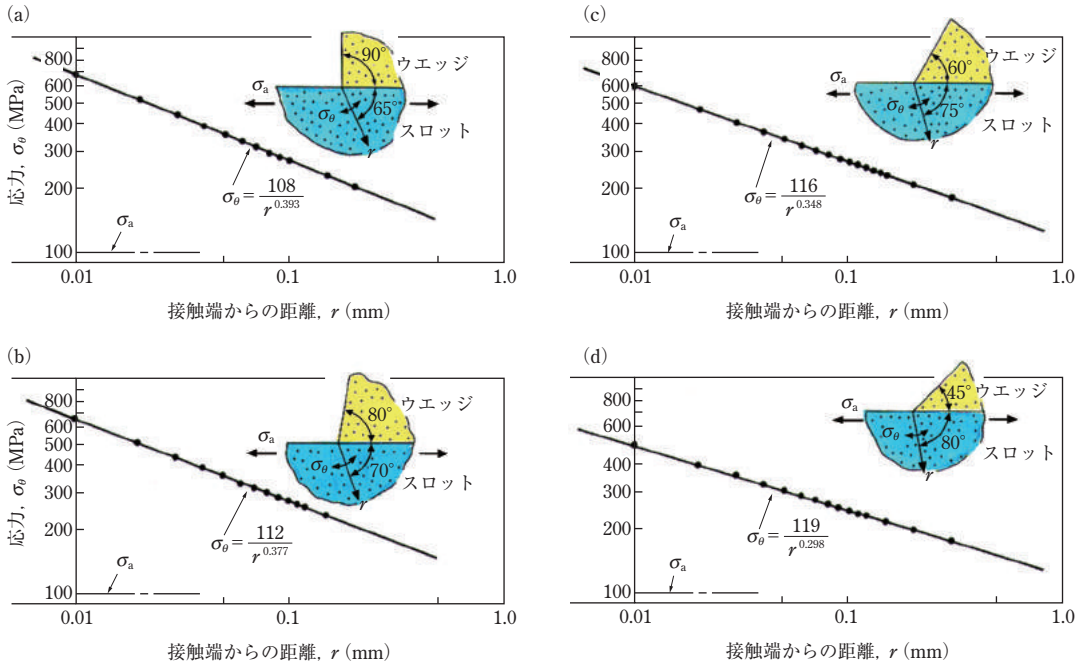



**図 42　接触端近傍の応力分布の解析結果**（口絵⓮参照）
接触端角度(a)90°，(b)80°，(c)60°，(d)45°

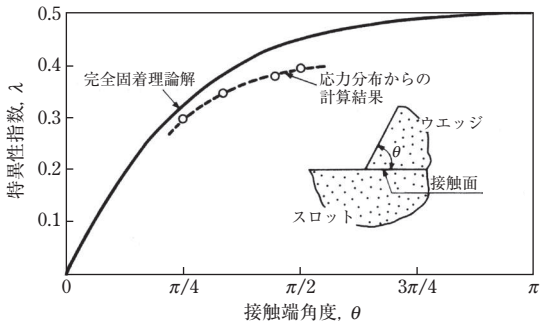



**図 43　接触端角度 $\theta$ と特異性の指数 $\lambda$ の関係**

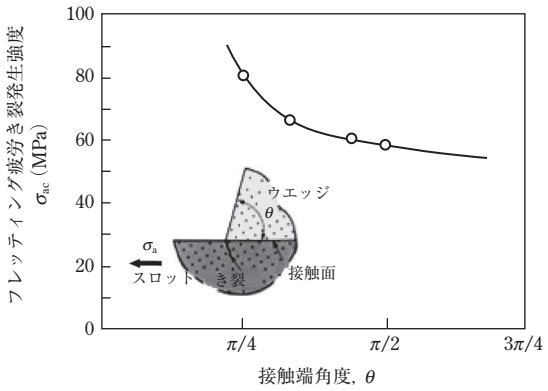



**図 44　接触端角度 $\theta$ と，フレッティング疲労き裂発生強度 $\sigma_{ac}$ の関係**

を**図 43** に示す。この図における実線は，接触面が完全に固着されているとした場合の理論解[5]である。接触条件下では，接触端での微小すべりによって，この完全固着の場合より少し低くなっていることがわかる。各々の接触端角度に対するフレッティング疲労き裂発生応力 $\sigma_{ac}$ は，この計算した $\Delta H$ を，図 40 の $H_c$ と比較することによって求められる。**図 44** にこのようにして求めたフレッティング疲労き裂発生応力振幅 $\sigma_{ac}$ を示す。この図から，接触端角度 $\theta$ を $\pi/3$ 以下にするとフレッティング疲労き裂発生強度を高めることができることがわかる。したがってフレッティング疲労強度の観点からいえば，接触端の形状は**図 45** の左側の形状よりも右側の形状が適切であることがわかる。

次にこの接触端応力特異場パラメータを用いて，ウエッジの剛性がフレッティング疲労強度に与える影響を予測する。ウエッジ材として**表 2** に示す鋼，アルミニウム，SiC の 3 種類を選び，図 41 のモデル，



New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

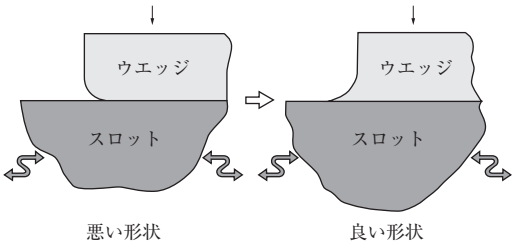




**図 45　接触端形状の推奨**

**表 2　材料の弾性率**

| | 鋼ウエッジ | アルミウエッジ | SiC ウエッジ |
|---|---|---|---|
| ヤング率 | 206 GPa | 71 GPa | 410 GPa |
| ポアソン比 | 0.30 | 0.34 | 0.15 |

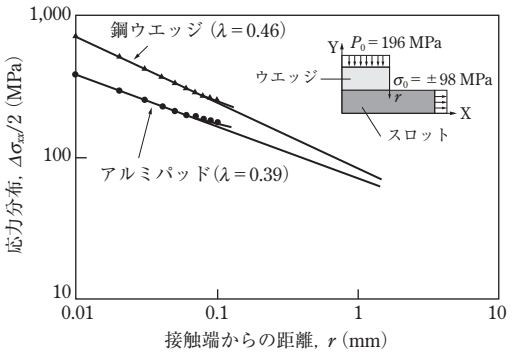



**図 46　各々のパッド材料における接触端近傍の応力分布**

荷重条件を同様に用いて解析した。接触端近傍応力分布の解析例を図 46 に示す。このようにして計算された応力特異場の強さ範囲 $\Delta H$ を，図 40 の $H_c$ と比較することによって，フレッティング疲労き裂発生応力振幅 $\sigma_{ac}$ が**図 47** のごとく求まる。この結果より，低剛性のウエッジを用いることによりフレッティング疲労き裂発生強度を大きく向上できることがわかる。

## 4 まとめ

接着端・はく離端および接触端の応力特異場パラメータを用いたはく離発生・進展およびフレッティング疲労き裂発生評価法とそれぞれの適用例を述べた。以下にそのまとめを示す。

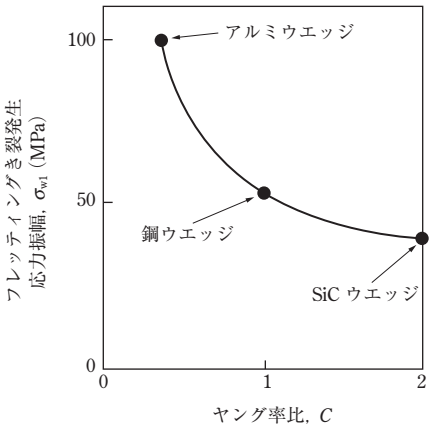



**図 47　各々のパッド材料におけるフレッティング疲労き裂発生強度**

(1)応力特異場パラメータを用いたはく離発生基準，フレッティング疲労き裂発生基準は，接着端からある特定の距離の応力値が一定値になる条件から求めることができる。この基準は実験結果とよく一致している。

(2)種々の寸法，接着端角度の単純重ね継手の接着強度評価にも適用したが，実験結果とよく一致している。

(3)二重重ね合わせ継手のはく離進展結果からはく離進展速度データベースを求め，この結果を基に埋込み継手の疲労限を予測した結果，実験結果とよく一致ししている。

(4)フレッティング疲労き裂は，フレッティング疲労限よりもかなり低い応力で発生するが，接触端角度を $\pi/3$ 以下にすることによりこの発生応力をかなり向上できる。

(5)フレッティング疲労き裂発生応力は，パッド（ウエッジ）材の剛性を下げることにより向上できる。

これらの結果，応力特異場パラメータを用いてはく離の発生・進展およびフレッティング疲労き裂発生の予測に有効であると判断できる。ぜひ実製品の強度設計等に適用願いたい。


（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）



**【引用・参考文献】**


1）C.G.M. VanKessel : *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol.*, CHMT-6, 414（1983）.
2）A. Nishimura : *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol.*, **12**, 639（1989）.
3）I. Fukuzawa : Proc. 23rd Int. Reliability Physics Symp., p. 192（1985）.
4）D.B. Bogy : *J. Appl. Mech.*, **38**, 377（1971）.
5）V.L. Hein and F. Erdogan : *Int. J. Fract. Mech.*, **7**（3）, 317（1971）.
6）P.S. Theocaris : *Int. J. Eng. Sci.*, **12**, 107（1974）.
7）W.C. Carpenter and C. Byers : *Int. J. Fracture*, **35**, 245（1987）.
8）笠野英秋，松本浩之：日本接着協会誌，**21**（9）, 373（1985）.
9）H.L. Groth : *Int. J. Adhesion and Adhesives*, **5**（1）, 19（1985）.
10）服部敏雄，坂田荘司，初田俊雄，村上元：日本機械学会論文集A，**54**（499）, 597（1988）.
11）服部敏雄：日本機械学会論文集A，**56**（523）, 618（1990）.
12）M. Goland and F. Reissner : *J. Appl. Mech.*, **2**, A−17（1944）.
13）杉林俊雄，池上皓三：日本機械学会論文集C，**50**（499）, 17（1984）.
14）Y. Lee, S. Wang and W. Chin : *J. Appl. Poly. Sci.*, **32**, 6329（1986）.
15）W.H. Holton and C.C. Rogers : USAVLABS Tech. Report, 70−23（AD875736）,（1970）.
16）T. Hattori and M. Iwasa : ASME Book No. 00999, DE-Vol. 83, 81（1995）.
17）Y. Mutoh : *JSME Int. J.*, **38**（2）, 405（1995）.
18）J.-Q. Xu, Y. Mutoh, S. Shirai and K. Kondoh : *J. Jpn. Soc. Mater. Sci.*, **52**（1）, 69−74（2003）.
19）K. Hirakawa and M. Kubota : Proceeding of Instantaneous Mechanical Engineers, 215-F, pp. 73−82（2001）.
20）Y. Kondoh : *J. Jpn. Soc. Mater. Sci.*, **51**（9）, 1017−1022（2002）.
21）S. Suresh : Fatigue of Materials, 2nd ed., Cambridge Univ. Press（1998）.
22）N. Okamoto and M. Nakazawa : *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, **14**, 377（1979）.
23）T. Hattori : *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series A（in Japanese）, **53**（492）, 1500−1507（1987）.
24）T. Hattori and M. Nakamura : Fretting Fatigue Evaluation Using Stress Singularity Parameters at Contact Edges, Fretting Fatigue, Vol. 18, pp. 453−460, ESIS Publication（1994）.
25）T. Hattori, M. Nakamura and T. Watanabe : Fretting Fatigue Life Simulation Using Stress Singularity Parameters and Fracture Mechanics, Developments in Fracture Mechanics for the New Century ASMS, pp. 110−117（2001）.
26）服部敏雄：日本舶用機関学会誌，**33**（3）, 203（1998）.
27）J.P. Dempsy and G.B. Sinclair : *J. Elasticity*, **11**（3）, 317（1981）.
28）木原茂文，吉井明彦：日本機械学会論文集A，**56**（524）, 903（1990）.
29）服部敏雄：日本機械学会講演論文集，No. 904−3, 37（1990）.
30）服部敏雄，河合末男，岡本紀明，園部正：日本機械学会論文集A，**47**（415）, 264（1981）.
31）T. Hattori, S. Kawai, N. Okamoto and T. Sonobe : *Bull. JSME*, **24**（197）, 1893（1981）.


**＜服部　敏雄＞**



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

# 索　引

# INDEX

## 英数・アルファベット順


2 母数ワイブル分布 …… 474
3 母数ワイブル分布 …… 474

### A

ABS……23
APC…… 424
Archard の式 …… 413
ASME 規格 ……89
AZ31 押出材 …… 456, 457, 458
AZ31 マグネシウム合金 …… 461
AZ61 押出材 …… 461
A 種……55

### B

Basquin 則 …… 445
Bis−GMA …… 286
BMD …… 298
BSI 規格……89

### C

CAD（computer aided design）…… 225
CAE（computer aided engineering） …… 223
characteristic distance モデル…… 387
Coffin−Manson 則 …… 263, 406, 445
Corten−Dolan の方法 …… 405
CT（compact tension）試験片 …… 388
CTOD 試験 …… 391
CTOD 理論 ……49
CT 試験片 …… 336

### D

Daily Start-Stop …… 415
DCB（double cantilever beam）試験 …… 478
DT 試験 ……52
Dundurs のコンポジットパラメータ …… 341

### E

ECAE 材…… 456
ELID 研削 …… 277
ENF（end notched flexure）試験 …… 478
ESSO 試験 …… 386
Euler 法 …… 317

### F

FAD ……51
FBG（fiber bragg grating）センサ …… 175
FEM 解析 …… 224, 255
FIB 加工…… 214
FORM（first order reliability method） …… 270
friction stir welding …… 247
FRP 透過光 …… 176
FSW …… 247

### G

Gauss の積分法…… 314, 316
glide set 転位…… 215

### H

H Ⅱロケット …… 163
Haibach の修正…… 405
HAZ…… 248, 426
Hertz 接触 ……44
HIC …… 428
Hooke の法則 …… 311, 315
HRR（Hutchinson−Rice−Rosengren）
　特異場理論…… 264
HRR 場 …… 332

### I

IEC 規格…… 489
IF 法 …… 472
IGSCC…… 424
in-phase，out-of-phase，diamond 波形 …… 447




（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

in-phase 波形 …… 447
Interaction Damage Rule …… 450
IT（information technology）…… 223
IWRC ワイヤロープ ……18

## J

*J*−*R* 曲線…… 336
$J_2$−flow theory …… 315
$J_{Ic}$ 試験 …… 390
JIS T 0308「人工股関節用セラミック骨頭の衝撃試験方法」…… 282
*J* 積分 …… 330
*J* 積分の経路独立性 …… 331
*J* 積分評価式 …… 336

## K

$K_{ca}$ 値 ……49
$K_{Ic}$ 試験 …… 388
*K* 理論……49

## L

LE7 …… 163
LE7 エンジン…… 163
Life Fraction Rule（Linear Damage Rule） …… 450
line method …… 227, 416
LNG タンクの爆発事故例 ……51

## M

Manson−Coffin 則 …… 397, 445
MCrAlY 合金……91
MCrAlY コーティング……91
mean normal technique …… 317
MEMS …… 211, 483
Mg−Zn−Y 合金押出材 …… 456
Miner（マイナー）則 …… 398, 404
Mises の塑性ポテンシャル…… 315
MMB（mix mode bending）試験 …… 478
m 乗則 …… 400

## N

Neuber 則 ……61
Newman Raju…… 167
Ni 基超合金 ……91

## P

Palmgren−Miner 則 …… 404
Paris−Erdogan 則…… 400
Paris 則 …… 216
Pb/Sn はんだ …… 191
Pb フリーはんだ …… 191
PET/A5052 ……75
PET/C1220 ……75
PET/SUS304 ……75
PL 法 …… 7
PMMA …… 467
point method …… 227, 416
PWHT……55

## Q

*Q* ファクター…… 338

## R

Rapid straining 法 …… 451
rate-temperature パラメータ *R* …… 380
reduced integration …… 316
R 曲線…… 385, 475

## S

*S*−*N* 曲線 …… 394, 429, 443
*S*−*N* 線図 …… 474
*S*−*t* 線図…… 474
SCC…… 423, 473
selective reduced integration …… 317
SEM ……19, 130
SEM 写真 …… 163
SEPB 法 …… 472
SFD…… 298
shuffle set 転位 …… 215
SOI（silicon on insulator） …… 214
SSCC …… 428
Stage I…… 400
Stage II …… 400
survivability …… 161
SUS304 と A5052 の異材接合体 ……74

## T

TGSCC …… 424
The 10% Rule …… 446



New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

Ti−6Al−4V 合金 …… 276
TMAZ …… 248
TR …… 424
T 字型溶接継手 …… 255
T 継手 …… 65

## U

UDMA …… 286
Universal slope 法 …… 446
Updated Lagrange FEM …… 316

## V

VDI …… 237
VDI 2230 …… 238
V 字形パターン …… 13
V ノッチ …… 230

## W

Weibull 理論 …… 45
WES2805 …… 49
WES2808 …… 55
WES3003 …… 48

## Z

Zr 基バルクアモルファス合金 …… 459
Zr 基バルク金属ガラス …… 460

## 五十音順

## あ

アーチファクト（artifact） …… 280
アイソタクチックポリプロピレン（i−PP） …… 463
アイソパラメトリック要素 …… 313
アクスルボルト …… 130, 131
アコースティックエミッション（AE）法 …… 174
遊び …… 135
圧子圧入法 …… 472
厚肉円筒 …… 308
圧縮降伏 …… 126
圧縮降伏域 …… 128
圧縮降伏強度 …… 306
圧縮残留応力 …… 67
孔空きフランジ工法 …… 81
孔空きフランジ方式 …… 81
アモルファス …… 208
アモルファス合金 …… 459
アルミナ …… 471
アルミナ FRP …… 174
アルミニウム合金ダイカスト …… 23
安全寿命解析 …… 260
安全寿命設計 …… 259
安全率 …… 134
アンダカット …… 69
安定き裂成長 …… 473
安定破壊 …… 336

## い

異種金属接合 …… 71
異種接合材料 …… 340
異常黒鉛 …… 108
鋳砂 …… 108
板厚依存性 …… 66
移動支持 …… 297
移動ロープ …… 20
鋳肌 …… 106
異方性材料 …… 348
異方性弾性体の特性方程式 …… 348
入込み …… 9
インデューサ …… 165
インヒビター …… 434
インプラント（implant） …… 274, 279

## う

植え込みボルト …… 233
ウエッジ …… 169, 368
ウォータージェットピーニング …… 103
内力係数 …… 141
裏曲げ …… 250
運転すきま …… 47
運動エネルギー …… 304
運用プロファイル …… 257

## え

影響因子 …… 431
鋭敏化 …… 426
液体水素 …… 163
エタノール …… 428
エネルギー解放率 …… 321, 322, 323
エネルギー遷移温度 …… 383



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


エネルギー遷移曲線…… 383
エレクトロガス溶接……49
エレベータ…… 7
エロージョン…… 100
塩化物イオン…… 425
円孔…… 228
円周応力…… 308
延性−脆性遷移曲線 …… 383
延性−脆性遷移挙動 …… 382
延性消耗則…… 449
延性破壊……34, 163, 376
延性破面ディンプル…… 9

## お

オイラーの座屈荷重…… 306
横弾性係数…… 293
応答曲面法…… 269
応力−ひずみヒステリシスループ …… 445
応力解析…… 3
応力拡大係数……14, 49, 86, 116, 187, 321, 323, 473
応力拡大係数の塑性域補正…… 326
応力拡大係数幅…… 285
応力拡大係数範囲 $\Delta K$ ……94, 187, 400, 414
応力繰返し……51
応力限界線図…… 253
応力三軸度…… 378
応力集中……27
応力集中係数…… 399, 432
応力集中場…… 188
応力集中率…… 167, 225
応力振幅……93, 236, 443
応力成分…… 302
応力特異場……14, 225, 408
応力特異場解析…… 170
応力特異場の強さ…… 227, 359
応力特異場の強さ範囲…… 366
応力特異場パラメータ……59, 227, 408, 411
応力比…… 218, 254, 401
応力腐食割れ…… 7, 423, 473
応力分布……74
応力保持波…… 447
応力リラクセーション…… 449
大入熱溶接……49
遅れ破壊…… 424, 427, 428
押出材…… 455
押し付け力…… 409
表曲げ…… 250
重み関数法…… 127
親要素…… 312
オレンジピール模様……33
温度サイクル…… 188, 358
温度サイクル試験…… 192, 265

## か

貝殻模様…… 394
外観検査……21
介在物…… 396
壊食…… 100, 101
改造……39
外挿…… 439
回転支持…… 297
回転曲げ疲労……31
回転ゆるみ…… 236
外部摩耗……19
界面欠陥……95
界面端特異応力場…… 340
界面端部…… 357
改良型スカラップ……79
外力のつり合条件…… 314
カウント法…… 403
鉤型き裂…… 119
拡散クリープ…… 437
撹拌部…… 248
殻理論……89
下限界応力拡大係数範囲…… 254, 401
重ね接合……71
可視断線……21
ガスタービン……91
ガスタービン動翼…… 445
カスタムメイドインプラント…… 276
仮想仕事の原理…… 311
加速試験…… 192
過大入熱……51
片側重ね継手……66
片側分離（口開き）…… 148
硬さ…… 250, 396
片持はり …… 298
活性化エネルギー…… 440
活性経路腐食型応力腐食割れ…… 424, 425
角変形……51



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

角変形付広幅引張試験……51
下部棚エネルギー…… 383
過巻き防止……41
環境助長割れ…… 423
環境誘起割れ…… 423
完全性の条件…… 311
カンチレバー試験片…… 204

## き

キー…… 136
機械的継ぎ手…… 196
機械的疲労試験…… 194
幾何学的等方性…… 312
季節割れ…… 423
基礎技術…… 4
気泡……76
基本定格寿命……45
客室与圧…… 161
客観性を有する応力速度…… 315
キャビテーション…… 100, 101, 105, 168
キャビテーション壊食…… 104
キャビテーション壊食試験法…… 105
キャビテーション数…… 103
キャビテーション損傷…… 104, 105
キャビテーションピーニング…… 103
球形タンクの脆性破壊例……51
吸収エネルギー……83, 383
球状黒鉛鋳鉄…… 106
境界値問題…… 310
共振……29, 168
強度・寿命評価…… 230
強度・信頼性技術者…… 3
強度設計技術…… 4
強度評価…… 224
共役性…… 291
橋梁の脆性破壊事故……52
極限環境…… 431
極値統計…… 108
極値統計分布……25
局部すべり領域…… 409
曲率半径…… 299, 300
鋸歯状波…… 448
許容応力…… 437
許容応力拡大係数…… 255
許容き裂……90
許容鋳造欠陥寸法……23
切欠感受性……61
切欠係数…… 172, 225, 235, 399
き裂…… 116, 193
き裂開口変位（crack opening displacement；COD）
…… 328, 334, 479
き裂開閉口…… 401
き裂遮蔽効果…… 488
き裂遮蔽の応力拡大係数…… 329
き裂進展…… 188
き裂進展下限界値 $\Delta K_{th,s}$ ……95
き裂進展曲線……95
き裂進展限界応力拡大係数範囲…… 369, 414
き裂進展速度…… 14, 95, 187, 285
き裂成長…… 473
き裂成長速度…… 473
き裂先端開口変位
（crack tip opening displacement；CTOD）… 333
き裂端…… 225
き裂伝播寿命…… 402
き裂伝播停止特性……50
き裂発生寿命…… 264
き裂閉口…… 286
均一伸び…… 376
金銀パラジウム合金…… 284
金属間化合物…… 72, 73
金属材料の高強度化…… 454
金属積層造形法…… 276
金属的切欠……28

## く

くさび形切欠……59
くびれ…… 376
クラック…… 465
グリース寿命……46
クリープ…… 436
クリープ $J$ 積分 …… 451
クリープき裂……92
クリープ損傷…… 449
クリープ破壊機構領域図…… 438
クリープ破断強度…… 436
クリープ破断寿命……92
クリープ疲労…… 443
クリープ疲労限界損傷線図…… 449
クリープ疲労寿命…… 447



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

クリープ疲労寿命則…… 448
クリープ変形…… 436
クリープボイド…… 438
繰返し硬化…… 397
繰返し周波数…… 443
繰返し数…… 443
繰返し速度修正疲労寿命則…… 446
繰返し塑性域……61
繰返し軟化…… 397
繰返しねじり……27
繰返し疲労…… 473
繰返し曲げ……27
グリフィスの破壊条件…… 318
クレイズ…… 464, 465
クレイズ強度…… 467
クレーン用……18
軍用機の機体管理…… 261

## け

形状関数…… 312
欠陥寸法……69
結合力モデル…… 327
結晶化反応…… 209
結晶化反応誘起応力…… 207
結晶格子不整合…… 207
結晶粒径…… 438
結晶粒微細化…… 456
減圧プラズマ溶射法……91
原因究明…… 7
限界 CTOD …… 384
限界すべり…… 225
原厚試験…… 392
検査・品証…… 3
原子間力顕微鏡…… 203
原子炉シュラウド…… 7
減衰率…… 224
現場溶接接合形式……78, 80, 81

## こ

高温高サイクル熱疲労…… 443
高温高サイクル疲労…… 443
高温低サイクル熱疲労…… 443
高温低サイクル疲労…… 443
高温疲労…… 443
高温疲労き裂進展…… 451
高架橋型超高分子量ポリエチレン…… 282
高強度アルミニウム合金…… 426
高強度低合金鋼…… 427
合金層…… 194
航空機構造…… 257
航空機スラットボルト…… 7
高サイクル疲労……27
鋼材の力学的性質……82
格子拡散係数…… 438
公称応力–公称ひずみ線図 …… 375
工場溶接接合形式……78, 80, 81
鋼心入りワイヤロープ……18
鋼製溶接構造…… 116
剛性率…… 293
構造剛性方程式…… 314
構造信頼性…… 269
構造の剛性マトリックス…… 314
構造方程式モデリング…… 273
構造保全管理…… 257
拘束効果…… 337
後部圧力隔壁…… 158
降伏強度…… 375
降伏強度の温度依存性…… 379
降伏点……32
降伏点伸び…… 375
高分子材料…… 463
合モーメント…… 291
合力…… 291
コーキシング（coaxing）効果 …… 398
極厚板ハッチコーミング……49
国際標準規格…… 489
国際溶接協会…… 255
固形エンドタブ……82
固着状態…… 409
骨折固定材…… 274
固定支持…… 297
固有関数展開…… 340, 348
固有値…… 341, 349
コロージョン…… 100
転がり寿命……44
混成 ESSO 試験 ……50
コンプライアンス…… 145, 238, 321, 323
コンポジットレジン…… 284



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

## さ


再現試験…… 7
最弱リンク概念…… 388
最弱リンク説…… 474
最小ポテンシャルエネルギー原理…… 311
最大主応力……44
最大主応力拡大係数……63
最大せん断応力…… 296
載荷能力……37
材料強度試験…… 203
材料欠陥……69
材料工学…… 3
座屈……36, 306
座屈荷重…… 306
座面陥没…… 244
サルベージ…… 163
三角形要素…… 312
酸素…… 429
残存寿命の推定……15
三点曲げ…… 471
三点曲げ試験片…… 336, 388
残留応力…… 107, 205
残留応力分布…… 127
残留強度…… 158
残留グリッド……94
残留ひずみ…… 205


## し


シアリップ…… 376
ジェットコースタ…… 7
シェブロンパターン…… 9
時間…… 433
時間−温度パラメータ法 …… 439
軸応力…… 308
軸直角方向負荷……14, 153
軸方向負荷…… 138, 140
事故解析…… 7
事故例報告…… 4
自然座標…… 312
自然酸化膜…… 218
湿度…… 429
実働応力の推定……15
湿度環境…… 217
失敗に学ぶ…… 4
自動車鋼板…… 200
自動超音波探傷装置……54
締め代……46
締め付け線図…… 234
締付けトルク…… 141
写像関数…… 313
車輪座…… 123
車輪座内ボス端…… 125
車輪踏面…… 117
シャルピー衝撃試験…… 382
シャルピー衝撃値……48
終極荷重…… 259
十字継手……62
修正 Goodman 線図 …… 395
修正 Miner 則 …… 398, 405
修正係数…… 239
集束イオンビーム（FIB）加工 …… 484
縦弾性係数…… 375
集中荷重…… 297
従来型スカラップ……79
修理ミス…… 161
主応力…… 303
主応力面…… 303
樹脂…… 358
主軸…… 303
樹脂割れ…… 358
寿命評価式…… 441
蒸気タービン…… 7
蒸気タービンロータ…… 445
小規模降伏…… 328, 390, 486
小規模降伏条件…… 324
衝撃荷重…… 192
衝撃強度…… 469
衝撃試験装置……55
衝撃倍加係数…… 136
衝撃負荷…… 137
上昇運動…… 438
冗長性…… 160, 161
小標本ステアケース法……24
上部棚エネルギー…… 383
初期応力拡大係数…… 254
初期締付け力…… 140
ショットピーニング…… 106, 396
ショットブラスト…… 106
シリコン…… 211




（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

シリコーンアクリルモディファイヤー…… 469
ジルコニア…… 471
真空スクイズダイカスト技術……26
人工関節…… 274
人工関節摺動面…… 277
真性応力…… 206
伸長ディンプル……10, 376
振動応力…… 168
信頼性指標…… 271
信頼性設計…… 202

## す

水圧鉄管……54
水素…… 432
水素脆化…… 423, 424, 425, 426, 427
水素ターボポンプ…… 165
水素誘起割れ…… 428
垂直応力…… 291
垂直破壊（fibrous fracture） …… 388
垂直尾翼…… 198
数平均分子量…… 466, 467
スカラップ……78
スカラップ工法…… 79, 80
スキッド…… 119
図心…… 299
スターゾーン…… 248
スチールタブ……82
ステンレス鋼…… 425
ストライエーション……9, 87, 131, 164, 193, 394
ストライエーション間隔……15
ストライエーション幅…… 168
ストライエーション領域…… 166
ストランド……18
ストレッチゾーン…… 384
すべり…… 244
すべり運動…… 438
スポット溶接部…… 200
スラグ…… 108
スラストスペーサ…… 135
鋭いコーナー部……14, 225
スロット…… 169, 368
寸法効果…… 212, 229, 388, 395, 483

## せ

制限荷重…… 259
静水圧引張…… 378
静水圧成分…… 377
脆性・延性遷移温度（BDTT） …… 212
脆性ストライエーション…… 432
脆性破壊…… 96, 97, 463, 466
脆性破壊型摩耗……98
脆性破面部……31
製造物責任法…… 7
生体材料…… 274, 459
生体用金属材料…… 461
静定はり…… 297
静定問題…… 294
静的陰解法…… 317
静的強度評価…… 243
静的せん断応力……44
静的破壊…… 185
静的破面…… 131
静的膜応力…… 165
青熱脆性温度…… 395
整備プログラム…… 161
静疲労…… 473
設計基準…… 436
設計係数…… 437
設計最適化…… 268
設計終極荷重…… 198
設計ツール…… 225
接合界面…… 340
接合熱残留応力…… 344
接合部…… 201
接触端……14, 114, 184, 225, 357, 410
接触端形状…… 171, 420
接触面熱伝導率…… 225
接触問題…… 224
接線力…… 409
接着端……14, 225, 357
接着継ぎ手…… 196
節点…… 310
セラミックス……96, 471
全$J$積分範囲 …… 451
繊維強化プラスチック（FRP） …… 478
繊維状破壊…… 376
旋回キャビテーション…… 168
全機静強度試験…… 260
全機疲労強度試験…… 260
全機有限要素法解析…… 257



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

線形破壊力学…… 62, 98, 318
線形累積損傷則…… 265, 398, 404, 406
戦時標準船……48
船体構造用高張力鋼板……49
せん断応力…… 291
せん断破壊…… 197, 376
せん断破面（shear lip）…… 388
せん断力線図…… 298
全ひずみ範囲…… 445
線膨張係数…… 191
全面降伏…… 466
全面分離…… 149

## そ

層間破壊靱性値 $G_{Ic}$ …… 479
層間はく離強度…… 480
早期故障……46
走査型電子顕微鏡…… 8
相対すべり域…… 127, 128
想定き裂長さ……49
相当応力…… 377
塑性域…… 325, 486, 487
塑性域締付け法…… 146
塑性域寸法…… 325, 328
塑性拘束…… 378
塑性降伏域…… 128
塑性接線係数…… 315
塑性ひずみ…… 406
塑性ひずみ幅…… 397
塑性ひずみ範囲…… 445
塑性ヒンジ…… 392
塑性変形……31, 234, 375
素線断線……18
ソフトニング…… 470
ソルバー…… 224
損傷…… 100, 101
損傷許容性解析…… 260
損傷許容設計…… 259

## た

タービン発電機…… 169
第１ねじ谷底…… 232
耐圧特性…… 209
ダイカスト法……23
耐空性改善命令…… 199
対策…… 7
耐酸化性……91
台車枠…… 253
耐食性……91
対数関数型の特異性…… 344, 350
体積ひずみ…… 292
耐力…… 376
楕円孔…… 228
タクチシチー…… 468
ダグデイルモデル…… 328
多層デバイス…… 201
ダッチロール運動…… 158
縦弾性係数…… 293
縦ひずみ…… 292
タフニング…… 469
ダブルナット…… 156
多変量解析手法…… 273
多目的最適化…… 268
たわみ…… 301
たわみ角…… 300, 301
単一試験法…… 390
炭化ケイ素…… 471
段差部…… 421
単純重ね継手…… 361
単純支持…… 297
弾性体…… 304
弾性特異応力場…… 324
弾性ひずみ速度…… 315
弾性ひずみ範囲…… 445
弾性不安定……37
弾性変形…… 304, 375
弾塑性応力解析…… 265
弾塑性材料…… 315
弾塑性の破壊条件…… 332
弾塑性破壊力学……62, 318, 330
弾塑性問題…… 224
断熱性スリーブ潤滑剤と潤滑装置……26
断面係数…… 300
断面二次極モーメント…… 296, 303
断面二次モーメント…… 134, 300

## ち

力の境界条件…… 311
地上コイル…… 153
窒化ケイ素…… 471



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

チップ…… 358
チップ割れ…… 358
中央リニア…… 152
中間層…… 353
中間層挿入による界面端特異応力場の消失…… 353
中間層を有する異種接合材…… 353
中空丸棒…… 296
鋳造欠陥……23, 34, 94, 106
中立軸…… 299
中立面…… 299
超音波探傷…… 177
超音波モータ……96
超高分子量ポリエチレン（ultra high molecular weight polyethylene；UHMWPE）…… 280
長時間クリープ強度予測…… 440
重畳…… 420
超弾性材料…… 315
長柱座屈……36
超長寿命疲労…… 396
超電導磁気浮上リニア…… 152
直交異方性異種接合材…… 348
直交多項式…… 269

## つ

突合せ溶接継手…… 254
ツール…… 247
ツール荷重…… 248
突出し…… 9
継手強度……73

## て

締結，結合部…… 357
締結・接合部…… 410
低サイクル疲労…… 229, 263, 397
低サイクル疲労試験……93
停留き裂…… 108, 399
ディンプル……40, 131, 163
ディンプル破面…… 185
ディンプル領域…… 166
データベース…… 224
テーパねじ…… 233
適合性の条件…… 311
デザインレビュー…… 268
鉄道橋……54
鉄道車軸…… 113, 173
鉄道車両…… 251
鉄道車両用台車枠…… 116
鉄道台車…… 253
テレメトリデータ…… 163
転位…… 208
転位クリープ…… 437
電気防食…… 433
電子顕微鏡…… 130
電子パッケージ…… 186
転動体……43
伝播停止破壊靱性…… 385

## と

等温クリープ破断曲線…… 439
等価圧縮体…… 238
透過光強度…… 179
等価剛性…… 224
透過光波長…… 179
等価座面領域…… 241
透過電子顕微鏡…… 8
等価な節点力…… 314
等価ビーム要素…… 240
動クリープ…… 443
統計的結晶粒分布…… 202
統合型技術者…… 3
等軸ディンプル……10, 376
動的せん断応力……44
動的破壊靱性…… 385
動的陽解法…… 317
等分布荷重…… 299
等方性弾性体…… 340
踏面きず…… 120
踏面はく離…… 121
特異応力場の発生・消失の遷移条件…… 349
特異性の有無の判別法…… 353
特異性の指数…… 227, 340, 341, 349, 359
特異性の強さ…… 340
特異性の発生・消失の遷移条件…… 341
特異場…… 187
特性方程式…… 340, 348
特定位置応力…… 415
特定位置応力法…… 227
溶込部……76
溶込部形状……76
溶込み不足…… 116



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

と食…… 117, 120
止端割れ……51
トライボロジー…… 409
トラス格点疲労……54
トランジスタ…… 205
トランスバースクラック…… 481
トルク…… 295
トルク係数…… 141
トレードオフ…… 268
トレーラ…… 111
トレーラハブ…… 7
鈍化直線…… 336, 391

## な

内圧…… 308
内部エネルギー…… 304
内部欠陥……94, 249
内部すきま……46
内部断線……18
内部摩耗……19
内部未溶着…… 254
内力係数…… 133, 134, 223, 225, 235, 239
流れ法則…… 315
ナノスケール…… 203
ナノ部材…… 202
ナノワイヤ…… 213
並目ねじ…… 233

## に

二次被害……31
二重引張試験…… 386
二相ステンレス鋼…… 426
日本鋼構造協会…… 255

## ね

ねじはめあい部長さ…… 155
ねじ山荷重分担率…… 232
ねじり角…… 295
ねじりの断面係数…… 296
ねじりモーメント…… 295
熱影響部…… 248
熱応力…… 186, 206
熱応力に関する定数項…… 344, 350
熱応力負荷下の界面端特異応力場…… 344, 350
熱加工影響部…… 248
熱機械（的）疲労…… 443
ネッキング…… 463
熱伝達率…… 225
熱伝導解析……72
熱ひずみ速度…… 315
熱疲労……61, 447
熱疲労破壊…… 192
粘性ひずみ速度…… 315
粘性率…… 225
粘弾性…… 207

## の

ノズル……88
伸びボルト…… 146, 236
ノンスカラップ工法……78, 79, 80

## は

バーレンブラットモデル…… 328
バイオマテリアル…… 274
配管…… 101
配向硬化…… 463, 470
ハイドロキシアパタイト（hydroxyapatite） …… 280
破壊…… 484
破壊確率…… 255
破壊起点……9, 12
破壊寿命…… 189
破壊靱性（fracture toughness）
……86, 279, 472, 485, 487
破壊靱性値…… 166, 332, 385
破壊力学……8, 14, 253, 318, 413
破壊力学解析…… 170
鋼／アルミニウム合金……71
白色層…… 118
薄肉円筒…… 308
薄膜…… 205, 483
舶用機械……30
はく離……43, 117
はく離進展…… 365
はく離進展速度…… 366
波形計数法…… 403
柱梁溶接接合部……78
破損起点…… 7
破損繰返し数…… 445
破損現象…… 4
破断延性…… 440



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

破断繰返し数……93
破断寿命…… 264
破断チル層……26
破断伸び…… 376
歯付き座金…… 156
パッケージ…… 357
ばね座金…… 156
はめあい……46
破面…… 192
破面解析…… 7
破面遷移温度…… 48, 85, 383
破面遷移曲線…… 383
はり…… 297
パリス則……15
はりの初等理論…… 305
はりの曲げ剛性…… 300
破裂事故……85
半径応力…… 308
はんだ接合部…… 191, 263
半導体デバイス…… 205
半導体パッケージ…… 191
半導体微細加工技術…… 211
バンド幅…… 314
反応塔……85

## ひ

非圧縮性…… 316
ビーチマーク…… 9, 138, 394
ヒート・チェック…… 120
ピール応力…… 197
非回転ゆるみ…… 236
ひけ巣…… 108
非拘束数…… 317
微細金属組織変化…… 440
微小き裂…… 402
微小空洞合体型破壊…… 378
非晶性ガラス状高分子のクレイズ強度…… 467
ひずみ−節点変位マトリックス …… 313
ひずみ−変位関係 …… 311
ひずみエネルギー…… 304
ひずみゲージ…… 253
ひずみ硬化…… 375
ひずみ Si 技術 …… 209
ひずみ速度……55
ひずみの拘束…… 464
ひずみ範囲分割法…… 449
ひずみ保持台形波…… 447
ひずみ保持波形…… 449
非線形問題…… 224
非線形破壊力学…… 264
ビッカース硬さ……92
ピッチ修正法…… 233
引張応力……98
引張強さ……34, 376
引張変形双晶…… 455
被締結体の剛性…… 142
比ねじり角…… 295
非破壊検査…… 402
比摩耗量……97
ヒューマンファクター…… 162
表面エネルギー…… 318
表面改質…… 277
表面傷……69
表面き裂長さ…… 452
表面欠陥…… 249
表面処理…… 396, 434
疲労…… 473, 484
疲労 $J$ 積分 …… 451
疲労 $J$ 積分範囲 …… 451
疲労強度…… 485
疲労強度試験法（ISO 7206−4：2010） …… 281
疲労強度設計…… 253
疲労強度低下率…… 167, 225
疲労強度評価…… 243
疲労曲線…… 443
疲労き裂…… 43, 94, 158, 160, 388
疲労き裂進展下限界値……63
疲労き裂進展特性…… 167
疲労き裂伝播…… 484
疲労き裂の発生…… 114
疲労き裂発生繰返し数……61
疲労限度……23, 27, 60, 394
疲労限度線図…… 395, 444
疲労限度の消失…… 405
疲労試験…… 200
疲労寿命……93
疲労寿命モデル…… 218
疲労損傷…… 449
疲労特性…… 161
疲労破壊……87, 137, 192, 216, 234, 263



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）New Technology New Science

疲労破壊靱性…… 400
疲労破断面……19
疲労破面…… 9, 131
疲労微視き裂……19
ピン…… 183
ピン／フォーク取付部…… 184
ピンホール…… 108

## ふ

不安定破壊…… 337
不安定問題…… 317
フィブリル…… 465
フィラーハイブリッド…… 286
封止…… 357
封止樹脂…… 186
フェイルセーフ性…… 160
フェイルセーフ構造…… 260
フェイルセーフ設計…… 259
フォーク…… 183
フォーク／ピン構造…… 183
負荷応力比……66
負荷形式……76
複数試験法…… 390
フゴイド運動…… 158
腐食…… 100
腐食ピット…… 430, 458
腐食疲労……29
腐食疲労き裂進展…… 430
腐食疲労き裂発生…… 430
不静定はり…… 297
不静定問題…… 294
フックの法則…… 294
不働態皮膜…… 424
不溶着ルート……62
フラクトグラフィ…… 7
プラスチックと金属のレーザスポット異材接合…74
プラスチックパッケージ…… 357
フラッシュバック振動…… 182
フラットはく離…… 118, 119
フランジ付きナット…… 156
不良発生確率…… 269
プリント基板…… 191
フレッティング…… 408
フレッティング損傷…… 184
フレッティング損傷部…… 460
フレッティング疲労…… 170, 184, 367, 459
フレッティング疲労強度…… 408, 460
フレッティング疲労き裂…… 123
フレッティング疲労き裂発生基準…… 369
フレッティング疲労試験…… 461
フレッティング腐食疲労試験…… 459
フレッティング摩耗…… 170
プロセスゾーン…… 335
分岐点…… 399
分子量分布の幅…… 467
分布荷重…… 297

## へ

平均応力…… 377, 444
平均半径…… 296
平衡方程式…… 311
米国 FDA DB（Manufacturer and User Facility Device Experience Database）…… 281
平面応力…… 302, 311
平面応力状態…… 302
平面ひずみ…… 128, 311
平面ひずみ破壊靱性値 $K_{Ic}$ …… 389, 455
へき開型破壊…… 379
べき関数型の特異性…… 342, 344, 349
壁面座屈（横座屈）……36
へたり…… 133, 137, 236, 244
へたり係数…… 237
ベロー……87
変位関数…… 312
変位の境界条件…… 311
変位の適合条件…… 314
変形双晶…… 455
変形メカニズムマップ…… 438
変形モード…… 319
変形履歴…… 315, 317
変形履歴依存性…… 317
変色皮膜破壊機構…… 424, 427
偏心外力…… 147
ペンストック……54
変動応力…… 403
変動曲げ応力…… 165
変分原理…… 310

## ほ

ポアソン収縮…… 463



New Technology New Science （電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。
（電子試読版）

ポアソン数…… 292
ポアソン比…… 292
ホイールハブ…… 111
ボイド…… 376, 464
ボイドシート…… 376
放射状マーク……13
ポーラス体…… 276
星状破面……28
細目ねじ…… 233
ホットスタート……89
ポテンシャルエネルギー…… 322
ポリ塩化ビニル…… 469
ポリカーボネイト…… 465
ポリメチルペンテン…… 465
ボルト初期締付け力…… 155
ボルトの剛性…… 142
ボルトの断面二次モーメント…… 155

## ま

マグネシウム…… 454
マグネシウム押出材…… 456
マグネシウム合金…… 454
マグネシウム合金の比強度…… 455
マグネシウム合金の疲労特性…… 457
マクロフラクトグラフィ…… 9
曲げ応力…… 299
曲げ強度…… 471
曲げ剛性…… 306
曲げコンプライアンス…… 238
曲げ破壊……31
曲げ疲労試験機……20
曲げモーメント線図…… 298
摩擦撹拌接合…… 247
摩擦係数……97
摩擦力…… 120
増し締め…… 113
摩耗…… 96, 97, 133, 137, 408
摩耗係数…… 413
摩耗の進行…… 114
摩耗粉…… 113, 418
摩耗マップ……99
マルチサイトクラック…… 160

## み

ミーゼス応力…… 232
ミーゼスの降伏条件…… 377
ミクロフラクトグラフィ…… 9
民間旅客機の定期整備…… 261
民法…… 7

## む

無次元疲労き裂進展速度……61

## め

メタノール…… 428
メッシュ分割…… 230
面圧の影響…… 419
面圧破壊…… 197
面積座標…… 312

## も

モータ負荷…… 249
モードⅠ…… 320
モードⅠ層間破壊靱性…… 479
モードⅡ…… 320
モードⅡ層間破壊靱性…… 480
モードⅢ…… 320
モーメント荷重…… 297
モデリング…… 225
モデル化…… 224
モデル作成…… 230
モンテカルロ法…… 270

## や

焼戻し温度…… 433
焼戻しパラメータ…… 440
冶金的ひずみ集中……69
焼ばめ軸継手…… 410
ヤング率…… 293, 375

## ゆ

有限要素法…… 206, 310
有効応力拡大係数範囲…… 401
有効断面積の直径…… 232
有効幅理論……37
ゆりかもめ…… 111
ゆるみ…… 137
ゆるみ限界すべり量…… 155
湯沸かし器…… 7



（電子試読版）
閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。


## よ

溶接欠陥…… 69, 82
溶接構造物の脆性破壊……48
溶接残留応力……88
溶接止端…… 225
溶接低温割れ……51
溶接熱影響部…… 426
溶接ルート…… 116
溶接ルート部…… 254
要素剛性方程式…… 314
要素剛性マトリックス…… 314
要素分割…… 225
予き裂導入破壊試験法…… 472
横ひずみ…… 292
予測損傷速度…… 104
予ひずみ……55
余盛角度……60
余盛止端……59
四点曲げ…… 471

## ら

落重試験……52
ラグ破壊…… 198
ラジアルマーク……40
ラダー操舵…… 199
ラチェットマーク……27
ランソン・ミラー（Larson−Miller）パラメータ …91
ランダム振動…… 182

## り

リードフレーム…… 358
リエントラントフィレット…… 145
力学的ポテンシャルエネルギー…… 318
理想き裂…… 126
リッジ……40
立体規則構造…… 468
リバーパターン……13, 379
リフロー…… 358
リベット・ボルト継手…… 410
粒界応力腐食割れ…… 424
粒界拡散係数…… 438
粒界破壊……98, 438
硫化物応力腐食割れ…… 428
粒子架橋…… 475
流体加振力…… 182
流体機械…… 101
粒内応力腐食割れ…… 424
粒内破壊…… 438
粒内ファセット…… 9
領域区分法…… 441
領域分割解析法…… 441
両端支持はり…… 298
輪軸疲労試験装置…… 123

## る

累積損傷則…… 449
累積損傷値…… 406
累積損傷モデル…… 264
$\sqrt{area}$ パラメータモデル ……23, 108

## れ

冷間曲げ加工……55
レインフロー法…… 403
連鎖則…… 314
レンジペア法…… 403

## ろ

ローカルアプローチ…… 338
ロータ…… 169

## わ

ワイブル分布…… 212, 474
ワイヤロープ……18
ワイヤロープテスター……21




閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。

（電子試読版）New Technology New Science

# 破壊力学大系
## ―壊れない製品設計へ向けて―


| | |
|---|---|
| 発行日 | 2012 年 2 月 14 日　初版第一刷発行 |
| 編集代表 | 服部　敏雄 |
| 発行者 | 吉田　隆 |
| 発行所 | 株式会社 エヌ・ティー・エス<br>〒 113−0034　東京都文京区湯島 2−16−16<br>TEL：03(3814)9151　http://www.nts-book.co.jp/ |
| 編　集 | オフィス MA |
| 印　刷 | 株式会社 双文社印刷 |
| 製　本 | 牧製本印刷 株式会社 |


© 2012　服部 敏雄，他　ISBN978-4-86469-001-0

落丁・乱丁本はお取り替えいたします。無断複写・転写を禁じます。
定価はケースに表示してあります。
本書の内容に関し追加・訂正情報が生じた場合は，㈱エヌ・ティー・エス
ホームページにて掲載いたします。
※ホームページを閲覧する環境のない方は当社営業部（フリーダイヤル
0120−198−110）へお問い合わせください。

New Technology New Science （電子試読版）

閲覧期間内における二次的利用は著作権法で定める場合を除いて禁じます。