

材料強度学

材料強度学



TB301
R611

社団法人 日本材料学会

TB 301
R611

材料強度学

¥ 2,500

1986

昭和61年3月31日

初版発行

昭和61年9月1日

第2版発行

編者 社団法人日本材料学会

著者の了解
により
検印廃止

京都市左京区吉田泉殿町1番地の101

発行者 社団法人日本材料学会

印刷者

京都市左京区一乗寺東閉川原町14番地

進行印刷出版株式会社

中川肇

C-00110

序

材料強度学は学際的な性格をもちつつ材料学の一分野として定着し、その内容はますます多様かつ豊富になってきている。したがって、それをできるだけ系統的、包括的に学ぶことが必要となってきた。

日本材料学会は、材料学に関する研究の進歩をはかり、学術の発展および技術の向上に寄与することを目的としているが、その使命遂行の一つとして、新しい構想のもとに「材料強度学」を刊行することとした。

本書は、機械系学生用の教科書として編集したものであるが、さらに一般自然科学系学生ならびに工業界における技術者の参考書としても有用であることを期している。

編集委員および執筆者一覧

編集委員長

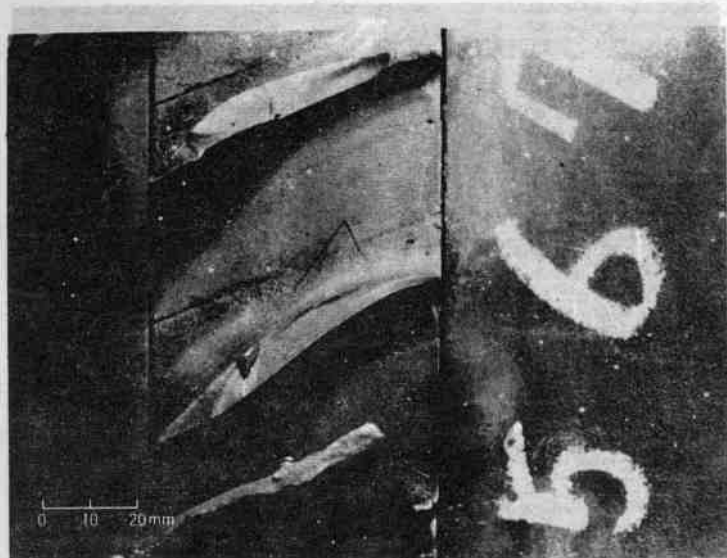
大南正瑛 立命館大学理工学部

編集委員

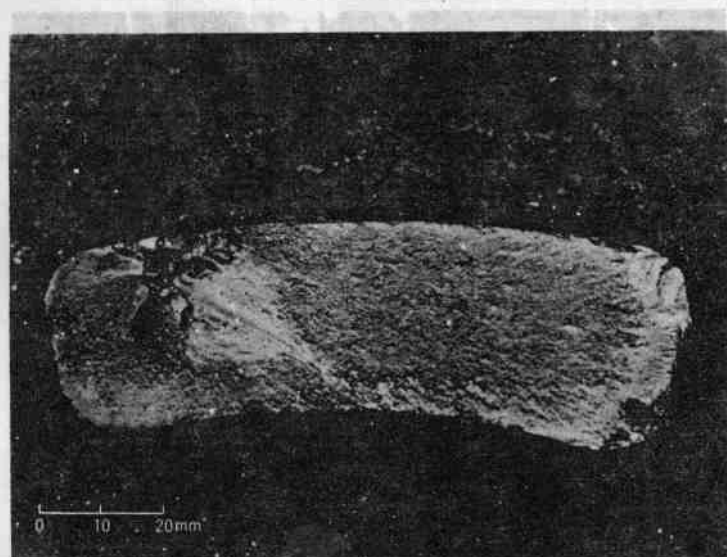
浅見克敏	武蔵工業大学工学部	城野政弘	大阪大学工学部
小倉敬二	大阪大学基礎工学部	鈴木恵	京都工芸繊維大学工学部
加藤容三	岐阜大学工学部	田村今男	京都大学工学部
金尾正雄	金属材料技術研究所	中村宏	川崎重工業株式会社
児玉昭太郎	東京都立大学工学部	中易秀敏	金沢工業大学材料システム研究所
駒井謙治郎	京都大学工学部		

執筆 者

阿部 武治	岡山大学工学部	鈴木 秀人	小山工業高等専門学校
浅見 克敏	武蔵工業大学工学部	鈴木 恵	京都工芸繊維大学工芸学部
安藤 柱	横浜国立大学工学部	城野 政弘	大阪大学工学部
市川 昌弘	電気通信大学	田中 道七	立命館大学理工学部
小倉 敬二	大阪大学基礎工学部	田村 今男	京都大学工学部
大谷 隆一	京都大学工学部	中佐啓治郎	広島大学工学部
大路 清嗣	大阪大学工学部	中村 宏	川崎重工業株式会社
大南 正瑛	立命館大学理工学部	中易 秀敏	金沢工業大学材料システム研究所
大久保勝夫	住友化学工業株式会社	西川 友三	京都工芸繊維大学工芸学部
加藤 容三	岐阜大学工学部	幡中 憲治	山口大学工学部
金尾 正雄	金属材料技術研究所	宮田 隆司	名古屋大学工学部
岸本 秀弘	豊田工業大学	武藤 陸治	長岡技術科学大学
児玉 昭太郎	東京都立大学工学部	山川 宏二	大阪府立大学工学部
駒井 謙治郎	京都大学工学部	渡辺 忠雄	東北大学工学部
後藤 徹	三菱重工業株式会社		



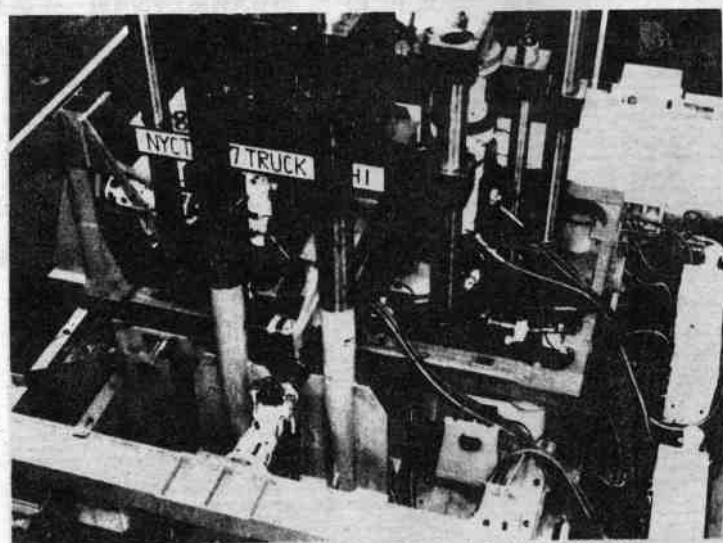
送風機動翼の疲労破面



ディーゼルエンジンピストンクラウンの疲労破面



鉄道車両用車軸の疲労破面



鉄道車両用台車枠の疲労試験装置（多点荷重実働波形）

目次

第1章 序 論

1・1 材料強度学とはどのような学問か	1
1・2 材料強度学は歴史的にどのように形成され、発展してきたか	1
参 考 書	5

第2章 固体材料の強度

2・1 変形と破壊の特徴	6
a. 塑性変形の様相 b. 破壊の形態 c. 破壊の微視的様相	
2・2 変形と破壊のメカニズム	11
a. 理想的降伏強度 b. 理想的破壊強度	
c. 強度を低下させる因子 d. 破壊モデル	
2・3 ぜい性破壊と延性破壊	21
a. ぜい性破壊と延性破壊の特徴 b. 衝撃吸収エネルギー	
c. 延性-ぜい性遷移温度	
2・4 強度と破壊の確率的性質	28
a. 材料強度とばらつき b. 欠陥から導かれる強度分布	
c. 確率過程から導かれる強度分布	
2・5 新しい強度材料	35
a. 強じん化鋼 b. 高強度高分子材料 c. 複合材料	
d. セラミック材料	
参 考 書	44
演 習 問 題	44

第3章 静的荷重下の材料強度と破壊じん性

3・1 引張強度性質	46
a. 降伏点 b. ひずみ硬化 c. 温度およびひずみ速度の影響	
3・2 多軸応力下の変形と強度	59
a. 多軸応力下の降伏強度 b. 変形拘束	
c. ぜい性破壊に及ぼす応力多軸性の影響	

2 目 次

3.3 破壊じん性.....	63
a. き裂材の破壊強度 b. き裂先端の応力場 c. 破壊じん性	
参 考 書.....	84
演 習 問 題.....	85

第4章 疲 勞 強 度

4.1 疲労破壊の様相.....	87
a. 疲労破壊の巨視的様相 b. 疲労破壊の微視的様相	
c. 疲労き裂の発生と進展	
4.2 S-N 曲線と疲労限度	92
a. S-N 曲線 b. 疲労限度 c. P-S-N 曲線	
d. 疲労限度の統計的性質	
4.3 疲労強度に及ぼす諸因子の影響.....	98
a. 応力集中と切欠き効果 b. 寸法効果	
c. 平均応力・残留応力の影響 d. 組合せ応力下の疲労強度	
e. 表面処理の影響 f. 熱処理の影響	
4.4 塑性疲労.....	109
a. 定応力試験と定ひずみ試験 b. 応力-ひずみ関係 c. 寿命式	
4.5 変動荷重下の疲労強度.....	115
a. 実働荷重と疲労強度への影響因子 b. 応力波形の計数法	
c. 累積損傷則	
4.6 疲労き裂進展.....	123
a. 疲労き裂進展速度 b. き裂開閉口現象	
c. 変動荷重下の疲労き裂進展	
4.7 非金属材料の疲労強度.....	135
a. 高分子材料の疲労強度 b. 複合材料の疲労強度	
参 考 書.....	139
演 習 問 題.....	140

第5章 高 温 強 度

5.1 高温における変形と破壊.....	142
a. 高温変形の微視的様相 b. 高温破壊の微視的様相	
5.2 高温クリープ.....	148
a. クリープ強さ b. グリー プ変形 c. クリープ破壊	

目次

5.3 高温疲労	157
a. 高温疲労強度 b. 高温疲労の特徴	
c. 熱疲労と熱ラッチェティングの特徴	
5.4 クリープ・疲労相互作用, ふん囲気効果	165
a. クリープ・疲労相互作用 b. クリープ・疲労・ふん囲気相互作用	
参考書	171
演習問題	171

第6章 環境強度

6.1 環境強度と腐食	173
a. 環境強度の特徴 b. 腐食環境 c. 腐食の形態 d. 防食法	
6.2 応力腐食割れ	182
a. 応力腐食割れの特徴 b. 材料・環境と SCC	
c. 動荷重下の SCC 強度 d. SCC 破壊の防止	
6.3 腐食疲労	191
a. 腐食疲労の特徴 b. 材料, 環境と腐食疲労強度	
c. 応力状態と腐食疲労強度 d. 腐食疲労破壊の防止	
参考書	200
演習問題	200

第7章 材料強度と設計

7.1 強度設計の基本的考え方	202
a. 設計思想 b. 統計的取扱 c. セーフライフとフェールセーフ	
7.2 強度設計の手法	211
a. 許容応力と安全率 b. 公的設計コード c. 疲労寿命設計法	
d. 余寿命推定法	
7.3 ケーススタディ	220
a. 車軸 b. ボルト c. 歯車 d. 蒸気タービンの主蒸気弁	
e. タンク f. 压力容器	
参考書	237
演習問題略解	238
索引	245

第1章 序 論

1・1 材料強度学とはどのような学問か

材料強度学 (strength and fracture of materials) は、固体材料に力が加わったときに生ずる変形や破壊といった、材料の力学的挙動 (mechanical behavior of materials) を考究する学問である。この場合の材料 (materials) とは、岩石や土壌のように自然界に存在するものも含むが、むしろ人間社会の要求を実現するためにつくり、使用するものを指すことが多い。したがって材料強度学は、われわれの要求に適した材料や、それを用いた素子、装置、機械、構造物を工学体系の中で、どのようにつくり出していくのかという工学的考えに基づいている。

今日の科学技術のめざましい発展の中で、材料強度学は、科学と技術との相互の連携を必要とする裾野の広い学問でもある。材料の強度と破壊の学問は、ミクロには、固体物理学、金属組織学、材料学などをふくみ、マクロには材料力学、連続体力学、構造強度学などを包含し、さらに設計工学、安全工学、信頼性工学と深い関係をもつ。そこでは、原子、分子の性質を出発点として材料のミクロな構造、反応、性質を理解するだけではなく、われわれの必要とするマクロな材料の性質がミクロのそれとどのように関係しているかを学ぶことになろう。また、新しい材料の開発、材料の有効な加工、材料の機械・構造物から医用に至る有効利用とその安全性をはかる立場から、材料の微細構造とその性質をどのように制御あるいは調整すればよいか、さらに機械・構造物の合理的な強度設計をどのように行えばよいかを学ぶことになろう。

今日、国の内外において、新材料の開発、装置や機械・構造物の高性能化や大形化、また過酷な環境での使用が急激にすすむ中で、材料強度とそれに裏付けられた技術の社会的ならびに経済的意義は益々高まってきている。このように材料強度学は社会的要求に応えるための工学的特徴をもつ今日的な学問である。

1・2 材料強度学は歴史的にどのように形成され発展してきたか

材料の強度と破壊の歴史は、古くはルネサンス期のレオナルド・ダ・ヴィンチ (1445～1519) までさかのぼることができるが、その実質的な研究は工学研究の始まる18世紀以

障である。今日の材料強度学は、科学の分化と総合を経て、1940～50年代に境界領域学問として形成された。わが国では、1900年初頭以来の材料強弱学（今日の材料力学に相当する）の伝統もあって、その研究は比較的長い歴史をもつと共に高い水準にあり、材料強度学に関する成書も世界に先駆けて刊行されている。

20世紀半ばになって形を整えてきた材料強度学の、そこへ至るまでの道標、その形成時の内容ならびにその後の急速な発展の足跡の要点を述べると次のようである。-

a. 18世紀、フランスを中心とする弾性固体力学の研究と応力、破壊抵抗力概念の登場

18世紀は、ニュートンの粒子説と力の遠隔作用説（万有引力の法則はその典型）の優位に終る、いわゆる機械的自然観が定着する時代であり、そこではフランスを中心として、弾性固体の個々の具体的問題を解決するために種々な仮説や手法が研究された。この時代、いわゆる応力やひずみの概念が導入され、今日の材料強度学の中で重要な役割を占めている弾性力学を準備するとともに、材料の破壊抵抗力の概念がつくられた。応力の概念は、オイラー（Leonhard Euler, 1707～1783）に始まり、19世紀のコーシー（Augustin-Louis Cauchy, 1789～1857）によって、ニュートンの質点力学の類推からオイラー・コーシーの応力原理として定式化された（1822年）。また、材料の破壊抵抗力を凝集（cohérence）と名付けたのはクーロン（Charles Augustin de Coulomb, 1736～1806）であり、脆性固体のせん断破壊の意義を初めて明らかにした（1773年）。

b. 1800～1850年代における技術的、社会的要求からくる新しい現象の発見と新しい理論の形成

19世紀前半における鉄道技術の急速な発展が材料強度研究に与えた影響は大きい。産業革命期（1750～1850年）に入ってから、科学は技術との相互作用を通して質的に新しい段階に入ることになる。また19世紀は、社会の刺激からくる新しい学問の発足の時代であり、いわば新しい現象発見の時代であった。たとえば、光弾性効果（1814～15年）、鉄鋼材料の疲労限（1870年）、鉄線のクリープ現象（1834年）などの発見、イギリスを中心とする新しい材料強度試験法や鉄橋建設に関係する構造強度試験法の開発、さらに数理弾性学の完成など新しい理論体系を生んだ。

a. 1860～1900年における境界領域分野の登場とそれと関係する新しい現象の発見

19世紀の最後の時期は、自然科学分野では力学、電磁気学、熱統計学という三つの古典物理学が一応完成すると同時に、それら三分野の学問構造の相違を生かしながら統一していこうとする境界領域の学問が登場する時期でもあった。それは、個別技術的要求から作られた各個別領域の区分が、自然の法則性、論理構造に照して、必ずしも妥当ではないことの反映でもあった。それはまた、いわゆる近代科学の崩壊の前兆でもあり、20世紀における現代科学へ向けての発展の契機をつくった。また、近代の実験方法の確立は新しい現象発見に大きく貢献した。たとえば、モールの弾性破壊則(1900年)*で代表される材料強度学の発展や鉄鋼材料のバウシinger効果(1886年)の発見などがある。

d. 1900~1930年代における金属の破壊と塑性の研究ならびに結晶転位概念の登場

20世紀初めにおける材料強度と破壊に関する学問は、金属顕微鏡やX線回折などによる金属内部組織の観測手段と精度の高い材料試験技術の進歩に支えられて、一つの大きな転換期を迎えた。

1900年初頭、イギリスにおけるニューイング((Sir James Alfred Ewing, 1855~1935))らによる金属疲労に関する初めての顕微鏡観察結果(1903年)と、ベアストウ(Sir Leonard Baird, 1880~1965)による精巧な伸び計による繰返し応力-ひずみ曲線の実測結果(1910年)は、(i) 金属の疲労破壊が初期に発生するすべり帯でのき裂とその進展によってもたらされること、(ii) 繰返し負荷中の非弾性履歴(ヒステリシス)は材料の疲労損傷の累積に密接に関係するという、今世紀の基本概念を生み出す源となった。金属疲労と並んで高温強度や環境強度の工学研究が開始されたのもこの時代である。また、材料内に潜在する微小き裂の破壊強度への関与をはじめて明らかにしたイギリスの航空工学者・材料工学者のグリフィス(Alan Arnold Griffith, 1893~1963)によるぜい性破壊理論(1920年)は、その後の、(i) 材料破壊の原子論的研究、(ii) 破壊じん性をはじめとする、いわゆる破壊力学の研究、(iii) ぜい性破壊の統計・確率的研究、へ向けて重要な契機を与えた。さらに、マクロ塑性力学における降伏条件、流れの式、加工硬化の定式化がほぼ完成し、単結晶のすべり変形から多結晶体の応力-ひずみ関係を導こうとする結晶塑性学が形成された。

一方、1930年代における結晶転位という新しい概念の導入は、その後の材料強度の研究に対してはかり知れない影響を及ぼしたといえよう。1934年に、現実の結晶の破壊強度が理論的破壊強度の $1/10 \sim 1/100$ 程度のものであることを説明するために結晶転位の概念が

* 日本では、1912(大正元年)に小野謙正(1882~1978)によって研究された。

導入され、その実在は1950年代における透過電子顕微鏡観察により確実なものとなった。しかし、結晶転位論の現状は、(i) 転位が純粋に幾何学的あるいは位相的なものであるので正確であり、ある部分は近似的ではあるが、非常に確実であるとする立場と、(ii) 近似的信頼度がはっきりしないので、理論、実験、推量のすべてに頼らざるを得ないとする立場に大別されている。

e. 1940～1950年代における境界領域学問としての材料強度学の形成とその後の展開

すでに述べたように、材料強度学は関連する諸学問をつなぐことによって、また関係諸分野の研究者の相互協力によって形成された。この時代、人間の知識のすべての分野において様々な科学的発見が行われ、それが全体としての生産技術を著しく変革した。材料強度学の形成は、以下に述べる各分野において特徴的にみられる。

この時代における材料の疲労研究の拡大はめざましいものがある。それは、すべり帯での突出し、入込みや固執すべり帯など、金属疲労機構の微視的研究、疲労破壊の確率・統計的性質の研究、それらに支えられた疲労理論あるいは疲労仮説の研究、また切欠き効果、寸法効果、低サイクル疲労、ランダム荷重を含む累積損傷則などの研究にみることが出来る。また19世紀が“石炭時代”といわれた蒸気エネルギーの時代であったのに対して、20世紀は“石油時代”とよばれる石油熱エネルギーと、原子力エネルギーの幕開けの時代となった。このことは、高温高圧下で使用される構造機器の安全性、信頼性を要求することとなり、ここにクリープ、高温疲労など多様な高温強度研究が展開されることとなった。さらに、引張応力と腐食環境との同時的かつ相互作用によって引き起こされる合金の応力腐食割れ、また水素ぜい化、液体金属ぜい化割れ、プラスチックの環境応力割れなど多彩な研究が展開された。

1940年代後半以降、降伏点が1200MPa以上のいわゆる高強度鋼が開発され、種々の機械や構造物に盛んに使用された。この種の高強度材料はき裂が発生すると、低応力のもとで破壊が生ずる危険性、とりわけぜい性破壊による事故防止の立場から、今日でいう破壊力学の研究が1940～50年代、アメリカを中心に開始された。

この破壊力学を包含して、(i) 材料破壊に関する個別的学問が相互に関連し合っているという考え方、手法によって、(ii) あらゆる材料を対象として、(iii) 降伏、ぜい性破壊、延性破壊、環境破壊、疲労、クリープなど多様な破損現象を貫いて、ミクロ研究とマクロ研究の両面を非線形的に結びつける学問分野として、破壊学（フラクトロジー）の体系化が

すすんだ。材料破壊の多様性とその空間的あるいは時間的不連続性は様々な破壊過程における“相互作用”を内容とするものであるという認識が破壊学を生み出したのは当然の成り行きでもあった。このようにして破壊学は、材料疲労、環境強度、高温強度の研究を一層豊富なものにしてきている。またその背景には、様々な新しい研究手法、たとえば高分解能電子顕微鏡法、X線回折法、エレクトロンフラクトグラフィ、コンピュータ採用マトリックス構造解析法、目的に合った材料試験法（破壊力学的手法を含む）、光学的あるいは音響的応力解析法、信頼性工学手法などが発展したことも見逃せない。

参 考 書

- 1) 日本材料学会編，“材料学の最近の進歩（日本材料学会創立30周年記念）”（1982），オーム社
- 2) 日本材料学会編，“機械材料およびその機械的性質と試験法”（1983），日本材料学会
- 3) 横堀武夫，“材料強度学—強度・破壊および疲労—”（1955），技報堂〔世界に先駆けて材料強度学と名付けられる成書が刊行され，その後同名の著作が岩波全書から刊行された〕
- 4) 大南正英編，“材料強度学総論，総合材料強度学講座，1”（1984），オーム社

第2章 固体材料の強度

2.1 変形と破壊の特徴

a. 塑性変形の機相

材料の変形が弾性範囲を越え、応力を除いても元に回復しない変形を塑性変形 (plastic deformation) と呼ぶ。塑性変形は最大せん断応力に最も近いある特定の結晶面の上下のブロックが、特定の方向へ、せん断応力によって図2.1に示すように相互にすべることによって生じる。特定の結晶面をすべり面 (slip plane), すべり方向をすべり方向 (slip direction) といい、すべり面とすべり方向の組合せをすべり系 (slip system) という。

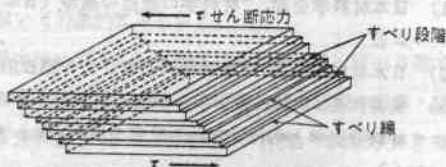


図2.1 すべり変形の模式図

すべり面を境として上下の結晶がすべり面全面にわたって同時にすべるのではなく、すべり面の一部ですべりが始まり、すべった部分が次第に広がって、遂には全面にわたるすべりとなる。すなわち、線状の格子欠陥である転位 (dislocation) がすべり面を動くことによって生じる。

表面をよく磨いた試験片を塑性変形させると表面に平行な線条すなわちすべり線 (slip line) またはすべり帯 (slip band) が現れる。すべり面に平行に段 (step) が生じたためである。1本の転位が表面を抜けた場合には僅か $2\text{\AA}$ 程度の段階を生じる程度であるが、観察されるすべり線は一つのすべり面上を数千の転位が動いたことを示している。一つのすべり系のみが活動した場合すべり線は直線的であるが、幾つかのすべり系が活動した場合はすべり線は図2.2に示すように波打ち、波状すべり (wavy glide) と呼ばれる。

面心立方 (fcc) 金属はすべり面が四つの $\{111\}$ 面、すべり方向は三つの $\langle 110 \rangle$ 方向で、すべり系は12あり、延性が大きい。稠密六方 (hcp) 金属はすべり面が底面の (0001) 面、すべり方向は $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向で、すべり系は3であり、すべり系が少いので延性が低く、か



図2.2 純鉄の (100) 面に現われた波状すべり線 (-78°C)