

## 3-6

## 溶接継手の疲労強度の基礎\*



後藤 浩二\*\*

Fatigue Strength of Welded Joints\*

by GOTOH Koji\*\*

**キーワード** 疲労, 疲労限, ホットスポット応力, マイナー則, き裂伝播解析, 低サイクル疲労

## 1. はじめに

本稿は、溶接管理技術者1級の修得を目指す読者を対象に、溶接学会編「新版 溶接・接合技術特論」(本稿でこれを引用する場合は、単にテキストと記す)における、疲労強度関連の記述を補うことを目的として記述したものである。従って、本稿を読むに先だてて上記テキストにて疲労強度関連の基礎事項を学習した後、本稿にて補足事項を修得するという手順での学習が望ましい。

疲労強度評価に関しては多数の教科書的な書籍や、最新の問題に関する研究論文が発表されているので、各自の理解度に応じてこれらも参照していただきたい。

## 2. 疲労限について

S-N 曲線に現れる疲労限以下の繰り返し応力を受ける場合、寿命が無限大であるという事に相当するが、これには二つの状態があり得ることに注意が必要である。一つは疲労き裂が発生しない状態である。一方、疲労き裂が発生するものの、最大でも数ミリ程度(「微小き裂」と称されるレベル)まで成長した後に停留してしまう状態がある。図1はS-N 曲線を模式的に示したものであるが、同図中の疲労限以下の領域には、き裂が全く発生しない領域と、一旦発生するものの微小長さの段階で停留する領域があることに注意が必要である。

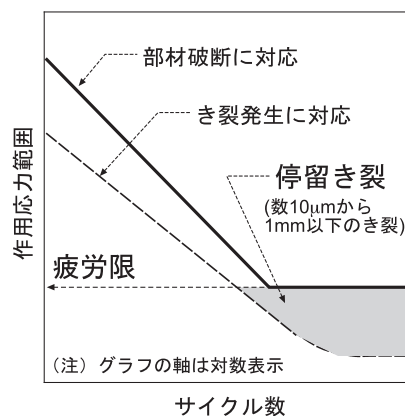


図1 S-N 曲線

## 3. 評価対象に応じた疲労寿命評価

溶接構造物の健全性評価に際して、耐疲労性能は現在においても重要な問題の一つとして認識されている。溶接構造物の多くを占める鋼製構造物では、TMCP 鋼の開発に代表される鋼材品質革新の結果、脆性破壊は大幅に減少したものの、疲労損傷事故は現在でも相変わらず多くの事例が報告されている。

疲労損傷の発生メカニズムに関しては、テキスト(3.2.2(2)項, 223ページ)や多くの教科書的な書籍において詳細に言及されているように、繰り返しの外力により部材表面近傍の結晶粒内で微視的なすべりが発生し、これが成長することで部材表面に凹凸を生じる。この凹凸を起点として、さらなる繰り返し外力を受け続けることでき裂に成長する。その後、このき裂が外力履歴に応じて成長し、最終的に脆性破壊や延性破壊を誘発する。

\*原稿受付 平成21年7月13日

\*\*正員 九州大学 Member, Kyushu University

このような疲労損傷の成長挙動を考慮すれば、疲労損傷に起因する構造物全体の健全性を評価するに当たっては、評価対象物に応じた評価方針を設けるべきであろう。例えば、一般的な機械部品について考えてみると、リガメント寸法が比較的小さいことから、一旦疲労き裂が発生すれば最終破断までの残余寿命はあまり長くないため、疲労き裂発生寿命を指標とした安全性評価が必要である。(当然ながら、評価対象物に応じた「き裂発生」の定義を行うことが必要である。)

一方、大型構造物(船舶・海洋構造物、橋梁、建築鉄骨、車両、航空機、種々のプラントなど)では、たとえ疲労き裂が発生したとしても、これが安定的に成長している間に適切な補修を行えば、構造物の健全性を担保できる。従って、

1. 最終破断に至る前の安定的な成長段階中において適切な限界指標を設定し、これを判断基準とする。例えば、それぞれの継手様式及び受ける荷重レベルに対して規定された、疲労設計線図(テキスト中の表3.10など)を用いて疲労強度評価を行う。
2. き裂長さ(表面・コーナー・埋没き裂であれば、欠陥を特徴付ける代表長さ)の成長履歴と繰り返しサイクル数の関係を定量的に推定し、これに基づいた健全性評価を行う。

という手法が考えられる。

実用的な立場、特に設計段階における疲労強度評価では、簡便に適用できる上記1.の考え方が主流である。2.の考え方は、損傷許容設計のように詳細な安全性評価が要求される場合を除き、損傷事故の原因解明という立場で利用される場合が多いが、変動荷重履歴の疲労寿命に及ぼす影響を定量的に考慮できるため、同手法の導入を拡大していくことで、損傷許容設計の適用対象構造物の拡大が期待される。

#### 4. 切欠材の疲労強度

溶接構造物の疲労破壊は溶接止端部で多数の表面き裂が発生し、合体を繰り返しながら、板厚を貫通する方向に成長することが多い。(その後、板厚貫通き裂となり、板幅方向に成長する。)板厚貫通方向に成長するき裂面に沿った応力分布は、溶接止端部を切欠底と見なした切欠材の応力分布で近似的に表現できる<sup>3)</sup>ことを考慮すれば、切欠材の疲労強度に関する知見(平滑材との相違)を理解しておくことは、溶接継手の耐疲労健全性評価に際して有用な知見を与える。

切欠材の疲労限は、応力集中効果により平滑材に比べて減少する。これを切欠効果と呼ぶ。一般に、引張強さの大きい鋼ほど切欠による疲労限の低下が大きい。低下の程度は、

$$K_f = \sigma_{ws} / \sigma_{wn}$$

で定義される係数  $K_f$  により表される。

ここで、

$\sigma_{ws}$  : 平滑材の疲労限

$\sigma_{wn}$  : 切欠材の疲労限

である。

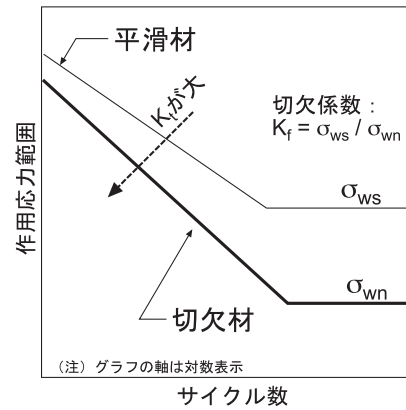


図2 切欠効果

この係数  $K_f$  は切欠係数と称されている。

図2に模式的に示すように、応力集中係数  $K_t$  が大きくなるほどS-N曲線の勾配は大きくなるが、時間強度に対する切欠係数のような定義は無い。 $K_t$  が大きくなると  $K_f$  に及ぼす  $K_t$  の影響は減少し、 $K_f$  はほぼ一定の値を取るようになる。

切欠係数と応力集中係数  $K_t$  の関連は、次式にて定義されるパラメータ  $q$  を指標とした種々の検討結果が報告されており、切欠半径  $\rho$  (溶接継手の場合は止端半径に相当) をパラメータとした次式が知られている。

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} = \frac{1}{1 + a^*/\rho} \quad (1)$$

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} = \frac{1}{1 + \sqrt{A}/\rho} \quad (2)$$

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} = \frac{1}{1 + \sqrt{A^*}/\rho} \quad (3)$$

式中の  $a^*$ ,  $A$ ,  $A^*$  は材料の強度レベルに応じた定数であり、それぞれの文献に与えられている。(1)~(3)式は微妙に式の形が異なっているが、 $q$  の値をプロットしてみると切欠半径  $\rho$  に対してほぼ同様の挙動を呈する。高強度材料になるほど、また切欠半径が小さくなるほど  $K_f$  と  $K_t$  の差は小さくなる。

#### 5. ホットスポット応力

公称応力の計算や定義が困難な継手部については、ホットスポット応力(溶接による局所的な応力集中を含まない、構造に起因する応力集中を考慮した着目部の応力)を指標とした健全性評価が行われる。図3にホットスポット応力の概念図を示す。ホットスポット応力を用いて疲労照査を行う場合は、これに対応した疲労設計曲線を用いることが必要である。(公称応力範囲を指標としている疲労設計曲線が与えられている場合が多いことに注意が必要である。)

ホットスポット応力決定法として、溶接止端から  $0.5t$  及び  $1.5t$  ( $t$ : 板厚) の位置の応力を溶接止端に直線外挿した

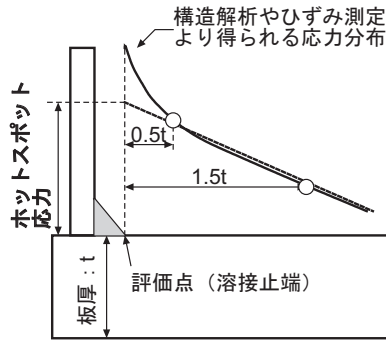


図3 ホットスポット応力

値をホットスポット応力とする方法（日本造船研究協会 202 研究部会による方法，通称 SR202 法）がよく用いられる。

## 6. 変動荷重を受ける場合の疲労寿命評価

変動荷重を受ける場合の疲労寿命評価手法としては，一定振幅荷重条件下で得られた S-N 曲線において変動荷重の各成分の頻度を考慮し，Miner 則に代表される線形累積被害則が適用される。図 4 はこれに関する説明図である。

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

ただし，

$D$ ：疲労被害度

$n_i$ ：応力範囲  $\Delta \sigma_i$  が作用した回数

$N_i$ ：疲労設計曲線における応力範囲に対する寿命

（一定繰り返し応力範囲  $\Delta \sigma_i$  が作用したときの寿命に相当する繰り返し数）

式 (4) で計算される疲労被害度  $D$  の値が 1 に等しくなると疲労破壊が発生すると考えられているが，種々の応力累積頻度分布を有するランダム荷重を負荷した疲労試験結果によれば， $D$  の値は広範に (0.1~10 のオーダー) 分布する事が知られている。従って，実際の耐疲労設計でこの手法を用いる場合は，種々の設計基準や安全率を考慮して  $D$  の値を適宜設定する必要がある。

実働環境では疲労限以下の応力が多数回作用するが，これらの応力頻度成分も疲労損傷に関与することが知られている。そこで，基本となる S-N 曲線そのものを修正して寿命推定を行うことが多い。修正方法として，例えば以下の方法が知られている。

1. 修正 Miner 則：S-N 曲線の高応力範囲部分を疲労限以下まで延長して，これを用いて疲労被害度を評価する方法。
2. Haibach の方法：疲労限以下の領域での S-N 曲線の修正を，修正 Miner 則より緩やかなものにする手法。疲労限以下の S-N 曲線の勾配を元の勾配の 1/2 とすることが多い。

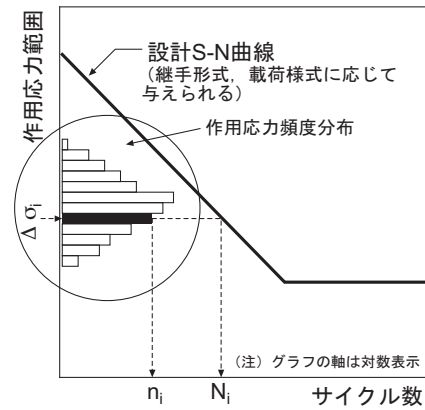


図4 S-N 曲線と累積損傷被害則に基づく疲労寿命評価

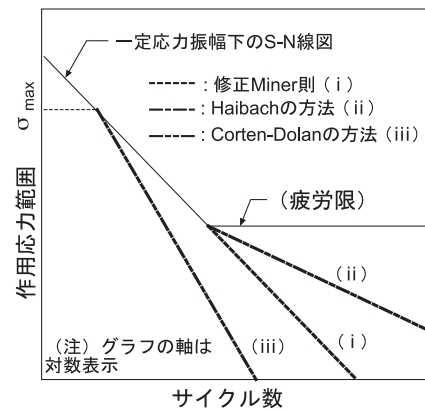


図5 変動荷重下における S-N 曲線の修正例

3. Corten-Dolan の方法：評価対象がさらされる変動荷重中の最大応力の点を基準として，S-N 曲線部の傾斜部の傾きを修正する方法。

これらの方法による S-N 曲線の修正の模式図を図 5 に示す。

一方，変動荷重が作用する場合は，各荷重成分の頻度のみならず，荷重の作用順序（荷重履歴）が疲労寿命に大きく影響を及ぼすことが知られている。ところが，S-N 曲線と線形累積被害則の組み合わせの方法では，荷重履歴の影響を考慮できないため，たとえ S-N 曲線を図 5 に示すように修正したとしても，定量的な寿命予測は困難である。すなわち，これらの手法では，過去に損傷経験を有する構造・継手の耐疲労健全性を担保することはある程度可能であるが，新規構造・継手様式の場合や，従来と大きく異なる荷重履歴に曝される場合などは無力と言えるため，荷重履歴を定量的に考慮できる疲労強度評価手法の構築が必要であろう。

## 7. 破壊力学的手法に基づく疲労寿命評価

疲労寿命評価手法の考え方の一つとして，「き裂成長履歴評価に基づく耐疲労健全性評価」があることは 3.でも述べたが，これを実施するためには，破壊力学的手法に基づく，疲労き裂伝播解析が有用である。

疲労き裂伝播解析に関しては，テキスト(3.5.2 節, 252 ページ第 2 パラグラフ)に記載されている Paris 則を用いること

が多いが、疲労き裂は「き裂開閉口現象」という特有の現象を呈し、これがき裂成長履歴に大きく影響を与える。一方、Paris 則においては、き裂開閉口現象が考慮されていない。そこで、き裂開閉口現象を考慮して応力拡大係数範囲の疲労き裂進展に寄与する割合のみを抽出した有効応力拡大係数範囲を定義し、これを Paris 則に準じた疲労き裂伝播則に適用する手法が用いられている。有効応力拡大係数範囲としては、き裂開口荷重を基準とする  $\Delta K_{eff}$  や、き裂先端における両振塑性挙動を考慮して定義された RPG 荷重を基準とする  $\Delta K_{RPG}$  等が提案されている。き裂開閉口現象を考慮した寿命評価に関しては、多くの論文・書籍<sup>9)</sup>があるので、適宜参照のこと。RPG 基準に基づく疲労き裂成長評価については、溶接学会誌第 77 巻第 4 号 (pp.273~277) において複数の事例を簡潔に紹介しているので、関心ある読者は参照していただきたい。RPG 基準に関する詳細な説明については、豊貞らの著書<sup>7)</sup>を参照頂きたい。

## 8. 低サイクル疲労

一般に、疲労寿命が  $10^6$  回以上のものを高サイクル疲労、以下のものを低サイクル疲労と称しているが、これはあくまでも便宜的な分類に過ぎず、高サイクル疲労と低サイクル疲労を、繰り返しサイクル数を指標として明確には区分けできない。低サイクル疲労が問題となる場合とは、大きな塑性変形が繰り返し加えられた結果として延性的に破断する場合や、大きな塑性変形の繰り返しで材料の靱性を低下させ、このことが脆性破断を誘発する場合などである。

低サイクル疲労の評価に際しては、繰り返しひずみ振幅とサイクル数の関係を S-N 曲線と同様の形で整理した設計曲線を用いることが多い。図 6<sup>9)</sup>にその例を示す。また、ひずみ振幅一定試験における塑性ひずみ振幅  $\Delta \epsilon_p$  と破断寿命  $N_f$  の間には、Manson-Coffin 則と呼ばれる次式が成立する事が知られている。

$$\Delta \epsilon_p \times N_f^m = C$$

式中の  $C$  は材料定数、 $m$  は材料にあまり依存しない定数

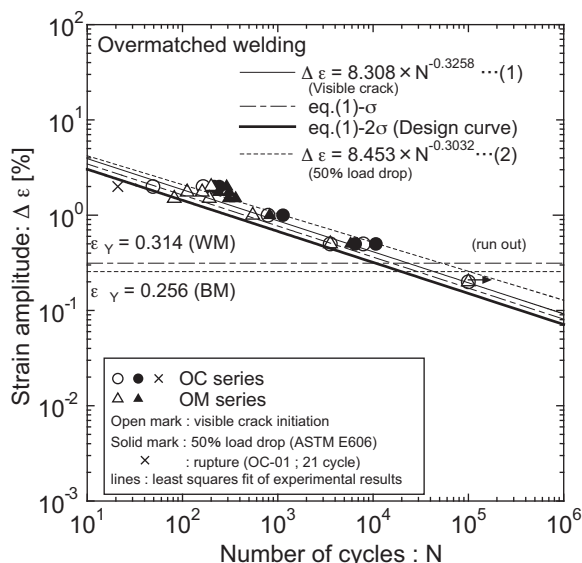


図6 低サイクル疲労挙動の評価例

であり、ほぼ 1/2 としてよい。また、平均ひずみは疲労寿命にはほとんど影響しないことが知られている。Manson-Coffin 則を高サイクル領域まで拡張した Manson と Hirschberg の方法<sup>9)</sup>もある。

## 9. 溶接部の形状と疲労強度

### 9.1 突合せ継手

溶接線に直交する繰り返し荷重が負荷される余盛付き突合せ継手では、余盛止端部で疲労破壊が発生し、余盛を削除した継手に比べて疲労強度は低下する。また、同じ余盛形状でも溶接線が荷重に対して直交している横方向引張継手において疲労強度の低下が最も大きく、溶接線が斜めになると疲労強度は次第に上昇し、荷重と平行な縦方向引張継手では疲労強度の低下は比較的少ない。

### 9.2 すみ肉継手

図 7 は前面すみ肉継手の応力分布と疲労破壊発生位置を定性的に示したものである。疲労破壊は図中①、②、③の応力集中部から生じる。すみ肉溶接継手の疲労強度の特徴を以下にまとめる。

- ・荷重伝達型前面すみ肉継手では、すみ肉のサイズが大きくなるにつれて疲労破壊の起点がルート部から止端部に移る。このとき、同一の作用応力に対する寿命は次第に長くなるが、破壊起点が止端部になると疲労寿命はもはや長ならず、設計上得策にはならない。
- ・前面すみ肉溶接止端部 (図 7 の①、②) で疲労破壊を生じる場合は、すみ肉の角度を緩くし、止端半径を大きくする事で疲労強度の改善が図れる。
- ・ルート部から破壊する十字すみ肉継手では、溶込み深さを増すと疲労強度の向上が図れる。
- ・荷重非伝達型前面すみ肉継手の疲労強度は母材に比べるとかなり低い<sup>10)</sup>。
- ・荷重伝達型側面すみ肉重ね継手では、主板と重ね板との溶接端が疲労破壊の起点となることが多いので、主板端部 (形状不連続部) に丸みを付けて溶接端の応力集中を緩和するか、側面溶接長をある程度長くすると疲労強度は改善される。また、当て板断面積が一定の場合は厚くて狭い板の方が疲労強度の観点からは有利である。
- ・主板にスティフナを連続溶接した場合と断続溶接した場合の疲労強度を比べると、スティフナが断続している場合は連続している場合に比べて疲労強度が低下し、1/2 程度になる場合もある。一般に、繰り返し引張応力を受ける部材に付加物を溶接すると、疲労強度低下の原因となる。

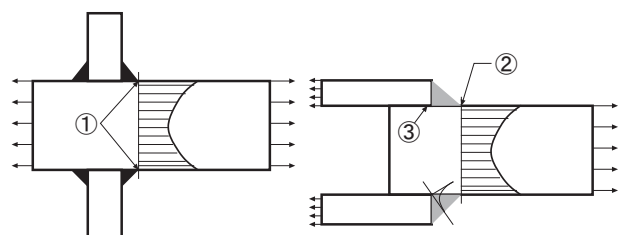


図7 前面すみ肉継手の応力分布と疲労破壊発生位置

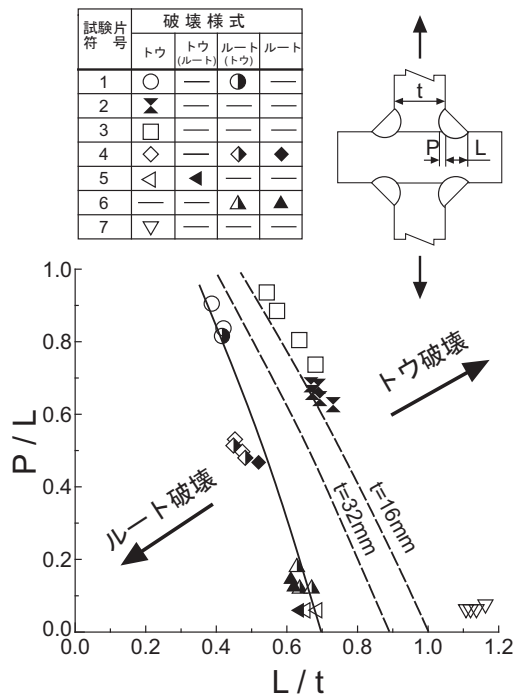


図8 疲労破壊発生位置と脚長・溶け込み寸法の関係

- ・フランジを補強するためにカバープレートを溶接することがあるが、カバープレートの幅にテーパを付けると疲労強度は改善される。カバープレートの板厚が厚い場合は、板端で厚さにもテーパを付けるとさらに改善される。
- ・すみ肉溶接のルート部から疲労き裂が発生・伝播する場合、稼働中にこれを発見する事が困難である。発見した時には既に非常に大きなき裂になっており、構造物の機能に障害を来す場合が多々ある。従って、設計者は出来る限りルート部から疲労破壊が生じないように、すみ肉の脚長を指示する必要がある（図8参照）。

## 10. 疲労破壊に関する試験片と実構造物の相関について

疲労強度評価に際しては、6.で述べたように、対象とする継手に関して得られたS-N曲線と線形累積損傷被害則を活用することが一般的であるが、疲労損傷事故が相変わらず報告され続けていることの一因として、疲労試験に用いられる試験片（継手）と実構造物の疲労損傷との相関について十分にわかっていないことも挙げられる。W. Schützによる、疲労に関する研究の歴史と展望に関するレビュー文献<sup>11)</sup>の結言で述べられている「The transferability to actual components of fatigue data obtained with specimens is completely unsolved. This problem is intentionally or unintentionally passed over in silence.」は言い過ぎのところはあるものの、従来の評価手法は決して十分とは言えないこともあり、疲労被害度Dの設定において安全率を考慮することで対応している。

この現状を克服するには、き裂成長履歴を定量的に推定して耐疲労健全性を評価することが必要であるが、疲労に

特有の複雑な現象を考慮した“疲労損傷回避の科学的手法”はいまだ開発されていない。この問題を解決することが、試験片と実構造物の疲労破壊に関する相関に気を配る必要なく、定量的な実構造物の疲労強度評価を可能とすることにつながるものと期待される。

## 11. さいごに

溶接継手の疲労強度に関し、テキストの記述を補う項目について紹介した。著者が浅学非才な事もあり、必要とされる全ての補足項目を記述したとは言い難い面もあるので、最初に述べたように、多くの教科書的書籍も参照しつつ、疲労強度評価に関する理解を深めていただければ幸いである。

溶接学会溶接疲労強度研究委員会においても、これに類する書籍の発行が計画されており、発行の際には学会誌等において紹介されると思うので、一読することをお薦めします。

## 参考文献

- 1) 例えば, Gotoh, K., Nagata, Y. And Toyosada, M.: A Simple Estimation Method of the Stress Distribution Normal to Cross Section at Weld Toe in non-load carrying welded joints, Proceedings of OMAE 2006, OMAE2006-92094, (2006).
- 2) Peterson, R.E.: Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, New York, (1974).
- 3) Kuhn, P. And Hardrath, H.F.: An engineering method for estimating notch-size effect in fatigue tests of steel, Report NACA TN 2805, (1952).
- 4) Neuber, H.: Kerbspannungslehre, Springer, Berlin, (1937) [in German].
- 5) Siebel, E. And Stieler, M.: Significance of dissimilar stress distribution for cyclic loading, Zeitschr. VDI, Vol.97, (1955), pp.146-148 [in German].
- 6) 例えば, 城野政弘, 宋智浩: 疲労き裂, 大阪大学出版会, (2005), ISBN: 4-87259-187-9.
- 7) 豊貞雅宏, 丹羽敏男; 鋼構造物の疲労寿命予測, 共立出版, (2001), ISBN: 4-320-08135-8.
- 8) Koji GOTOH and Stig BERGE; Low Cycle Fatigue Strength of X65 Pipeline Girth Welds, Proceedings of International Pipeline Conference (IPC 2004), Calgary, Canada, IPC04-0631, October, 2004.
- 9) Manson, S.S. and Hirschberg, M.H.; Fatigue behaviour in strain cycling in the low- and intermediate-cycle range, In Fatigue, An Interdisciplinary Approach, Syracuse University Press (1964), pp.33.
- 10) Wilson, et. al, Univ. Illinois Bull., Vol.38, No.27, (1941).
- 11) W. Schütz: A History of Fatigue, Eng. Fract. Mech., Vol.54, No.2, (1996), pp.263-300.

本文中で特に引用していない項目については、テキストおよび以下の書籍を参考にした。

- ・日本材料学会編：改訂 機械材料学，(2007)，ISBN: 978-4-901381-00-0
- ・Schijve, J.: Fatigue of Structural and Materials (Second Ed.), Springer, (2009), ISBN: 978-1-4020-6807-2
- ・Suresh, S.: Fatigue of Materials (Second Ed.), Cambridge University Press, (1998), ISBN: 0-521-57847-7
- ・九州大学ものづくり工学教育研究センター：溶接設計講座テキスト，(2009)