

設計疲労線図の開発状況

Status of Development for Design Fatigue Curves

三菱重工業(株)	朝田 誠治	Seiji ASADA	Corporate Member
(一財)電力中央研究所	樋口 洵	Makoto HIGUCHI	
三菱重工業(株)	金崎 宏	Hiroshi KANASAKI	
関西電力(株)	瀬良 健彦	Takehiko SERA	Member

In order to develop and propose new design fatigue curves for austenitic stainless steels, carbon steels and low alloy steels that are rational and have clear design basis, Design Fatigue Curve (DFC) subcommittee was established in the Atomic Energy Research Committee in the Japan Welding Engineering Society and the study on design fatigue curves are going on. The fatigue curves are proposed as a function of their tensile strength based on large number of fatigue data tested in air from room temperature to high temperature. The status of development for the design fatigue curves is introduced.

Keywords: Fatigue Curve, Design, Fatigue Life, Tensile Strength

1. 諸 言

日本溶接協会の原子力研究委員会 DFC 小委員会（設計疲労図の策定に係る調査）にてオーステナイト系ステンレス鋼、炭素鋼及び低合金鋼の新しい設計疲労線図の開発を行っている。本論文ではその設計疲労線図の研究計画及び開発状況¹⁻³⁾を紹介する。

2. 研究計画

2.1 目 的

DFC 小委員会の目的は、技術根拠が明確で合理的なオーステナイト系ステンレス鋼（SS: austenitic Stainless Steels）、炭素鋼（CS: Carbon Steels）及び低合金鋼（LAS: Low Alloy Steels）の設計疲労線図を提案することである。新しい設計疲労線図を開発するために、軽水炉で使用されるオーステナイト系ステンレス鋼、炭素鋼及び低合金鋼の有効な疲労データベースを構築する。そのデータベースに対して引張強さをパラメータとした最適疲労線図（BFC: Best Fit Curve）を設定する。また、データのばらつき、表面仕上げ、サイズ効果及び平均応力効果についても検討を行う。さらに、現状の疲労設計手法の調査及び大型疲労試験に関する文献調査も行う。

以上の検討結果に基づき、オーステナイト系ステンレ

ス鋼、炭素鋼及び低合金鋼の設計疲労線図を策定する。その他、開発した設計疲労線図を検証するための大型疲労試験の計画についても検討する。

2.2 検討内容

以下について検討を行う。図 1 に本小委員会での検討のスケジュールを示す。

(1) 小型疲労試験関連

国内外の小型疲労試験データを収集し、データベースを構築する。構築したデータベースに対して統計解析を行い、最適曲線及び標準偏差を求める。また、最適曲線の式については引張強さをパラメータとした評価式を検討する。

(2) 大型疲労試験関連

国内外の大型疲労試験に関する文献を調査し、設計係数の検討等の内容を評価する。

(3) 既存疲労設計手法の調査

疲労評価を規定している国内外の設計規格を調査し、疲労評価手法、設計係数の扱い等を調べる。

(4) 平均応力効果の検討

ASME B&PV Code Section III⁴⁾の設計疲労線図では平均応力効果については修正 Goodman 線図を採用しているとされているが、それ以外にも Smith-Watson-Topper 法等の平均応力効果の評価式はある。それらを調査し、妥当な評価方法を検討する。

(5) 設計係数の検討

連絡先：朝田誠治、〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1、三菱重工業(株)原子力事業本部原子力機器設計部 E-mail: seiji_asada@mhi.co.jp

ASME B&PV Code Section III の設計疲労線図には設計係数として寸法効果、表面粗さ、雰囲気等が考慮されているとされている。これらの設計係数について調査し、妥当な係数の設定及び評価方法を検討する。

(6) 疲労設計手法の検討

以上で検討した最適線図、設計係数等について考え方をまとめ、設計規格としての疲労設計手法を策定する。また、疲労寿命と Flaw Tolerance 手法との関係についても検討を行う。

(7) 大型疲労試験による検証

本小委員会とは別のプロジェクトで大型疲労試験を計画しており、大型疲労試験で得られた成果を用いて策定した疲労設計手法の妥当性を確認する。

(8) 現行の疲労解析・評価手法の調査

現在実施されている疲労解析・評価手法を調査し、疲労評価手法の策定の参考とする。

2.3 研究体制

本小委員会（主査：小林英男東京工業大学名誉教授）は疲労試験検討ワーキンググループ（リーダー：青山学院大学・小川武史教授）と設計手法検討ワーキンググループ（リーダー：広島大学・菅田淳教授）からなり、前者のグループは小型疲労試験データによる平均曲線の検討、小型試験、大型試験と設計疲労線図の比較、平均応力効果の影響調査の定量化、設計係数の影響調査・定量化等、後者のグループは既存疲労設計手法の調査、設計係数の取り込みの検討、平均応力等の影響因子の補正方法の検討、設計疲労線図・評価方法の策定、疲労寿命と Flaw Tolerance の検討等を行う。

3. 設計疲労線図の開発状況

3.1 疲労データベース

原子力材料の疲労データを集めたデータベース FADAL、それにその後のデータを追加した JNUFAD、(独)物質・材料研究機構疲労データシート、疲労データ集など^[5-7]からひずみ制御疲労データだけでなく、高サイクル領域用に荷重制御疲労データも収集した。

小型疲労試験データのデータベースは以下を対象にした。

- 温度については、炭素鋼及び低合金鋼に対しては 400°C 以下、オーステナイト系ステンレス鋼に対しては 430°C 以下を対象とした。

- 引張強さは 1200MPa を対象とした。
- 2% 荷重低下及び 0.1~0.5mm のき裂長さの疲労寿命の定義のデータは対象外とした。25% 荷重低下、目視によるき裂発生、試験片の破断等の疲労寿命の定義の試験データを対象とした。
- 疲労寿命は 10 回以上を対象とした。
- 他のデータと明らかに異なる疲労寿命のデータは対象外とした。

3.2 炭素鋼・低合金鋼の疲労線図

まず疲労寿命に与える温度の効果を調べる。200°C 以下の影響は無視できると考えられ、200°C 以下の約 2000 個のデータを用いて疲労寿命式を検討した。

炭素鋼及び低合金鋼のデータに対して、参照縦弾性係数として 207GPa をひずみ振幅に乗じて仮想的な応力振幅とし、データを 100 MPa 毎に区分けする。例えば、引張強さ(TS)が $300 \leq TS < 400$ MPa のデータは 350 MPa で代表し、各応力振幅は(1)式を用いて TS の関数である f_1 及び f_2 、疲労寿命 N_f から当該のデータの応力振幅 S_{aTS} を等価応力振幅 S_{a350} に換算する。ここで、係数 f_1 及び f_2 は最初は予備解析で求めた値を用いて検討し、最終的に本研究の成果として得られたものが(1)式である。

$$\left. \begin{aligned} S_{a350} &= S_{aTS} \frac{f_1(350)N_f^{-0.58} + f_2(350)}{f_1(TS)N_f^{-0.58} + f_2(TS)} \quad (\text{MPa}) \\ f_1(TS) &= -28TS + 1.2 \times 10^5 \\ f_2(TS) &= 0.45TS + 36 \end{aligned} \right\} (1)$$

350~1150 MPa の各グループに対して疲労寿命式を設定した。ここで、2種類の疲労寿命式について検討を行い、一つは(2)式で表される応力振幅 S_a の関数の式であり、もう一つは弾性と塑性ひずみ振幅で表される疲労寿命式である。

$$S_a = AN_f^{-B} + C \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

検討の結果、2種類の疲労寿命式の差は小さく、本研究では(2)式を採用することとした。(2)式中の係数 B は、ASME B&PV Code や EN 規格^[8]では 0.5 を用いているが、その値では適切にフィッティングできなかつた。統計処理の結果、 B は概ね一定であるので平均値である 0.58 を採用することとした。 B を 0.58 で固定して再解析を行い、TS に対する A と C の関係を整理した結果を図 2 に示す。図 2 より、次式が得られた。

$$A = 1.2 \times 10^5 - 28TS \quad (3)$$

$$C = 0.45TS + 36 \quad (4)$$

(2)、(3)及び(4)式より、200°C 以下の炭素鋼及び低合金

鋼の最適疲労寿命式として次式が得られる。

$$S_a = (1.2 \times 10^5 - 28TS)N_f^{-0.58} + 0.45TS + 36 \quad (5)$$

(5)式による種々の引張強さに対する最適疲労線図を ASME B& PV Code Section III の最適疲労線図⁹⁾と比較した結果を図 3 に示す。開発した最適疲労線図は 2~3000 サイクル付近で交差し、長寿命側では高強度材が高く、短寿命側では逆に低強度材が高くなる。ASME 規格の最適疲労線図との比較に対しては、ASME 規格の低合金鋼のカーブは $TS = 550$ MPa の線図に近く、炭素鋼の線図は $TS = 350$ MPa の線図よりやや低くなっている。ASME はこれらの線図をまとめて 1 本の設計線図としており、平均応力効果の補正はあるが、炭素鋼の線図に影響されて、過度に保守側の設計曲線となっている可能性がある。

代表的な例として、 $TS = 550$ MPa に対する疲労データと最適疲労線図の比較を図 4 に示す。

3.3 オーステナイト系ステンレス鋼の疲労線図

オーステナイト系ステンレス鋼に対しても 200°C 以下の疲労データを対象に検討を行った。データ数は約 750 個であり、鋳鋼材及び冷間加工材のデータも含んでいる。

TS の範囲は 10 グループに分けたが、炭素鋼及び低合金鋼に比べると一つのグループの TS の範囲は狭くなったので、炭素鋼及び低合金鋼で採用した等価応力振幅の換算は実施しなかった。

疲労寿命式は次式のひずみ振幅で整理した。

$$\varepsilon_a = AN_f^{-B} + C \quad (\%) \quad (6)$$

統計処理の結果に基づき A 、 B 及び C と TS との関係を図 5 に示す。図 5 より、 A 及び B は一定とし、 C は TS の関数として、(6)式に参照縦弾性係数として 195GPa を乗じることで次式の最適疲労線図を設定した。

$$\varepsilon_a = 26.1N_f^{-0.485} + \frac{0.488}{E_0}TS \quad (7)$$

$$S_a = 5.09 \times 10^4 N_f^{-0.485} + 0.488TS \quad (8)$$

(7)式による種々の引張強さに対する最適疲労線図を NUREG/CR-6909 のオーステナイト系ステンレス鋼の最適疲労線図¹⁰⁾と比較した結果を図 6 に示す。NUREG/CR-6909 の最適疲労線図は開発した線図の $TS = 500$ MPa と同等であり、高サイクル領域の疲労強度は TS が高くなるにしたがって上昇した。

3.4 応力及び疲労寿命に対する標準偏差

開発した最適疲労線図に対する標準偏差を検討する。

応力振幅の比率 (Stress Amplitude Ratio: SAR) 及び疲労

寿命の比率 (Fatigue Life Ratio: FLR) を次式で定義する。

$$SAR = S_a/S_{cal} \quad (9)$$

$$FLR = N_f/N_{cal} \quad (10)$$

ここで、 S_{cal} 及び N_{cal} は開発した最適疲労線図より求められた値である。

炭素鋼及び低合金鋼の疲労データを(1)式を用いて $TS = 550$ MPa ベースに換算して評価を行った。 SAR 及び FLR に対して正規分布と対数正規分布を比較した結果、特に寿命比では明らかに対数正規分布の直線性が良いことから、これらの比は対数正規分布するとして以後の分散解析を行った。

疲労データの寿命比は長寿命側で分散が大きくなることが知られている。そこで寿命範囲を分けて SAR 及び FLR の評価を行った。寿命範囲を 1×10^6 及び 4×10^6 サイクル寿命に区切り、その範囲にあるデータの BFC に対する SAR と FLR の標準偏差を計算し、その値を寿命に対してプロットした結果を図 7 に示す。 SAR の標準偏差は 10^4 サイクル以上で安定した値を示し、ほぼ 0.1 であった。 FLR の標準偏差は逆に 10^4 サイクル以下で安定的な値を示した。設計疲労曲線は短寿命側では寿命の係数が支配し、長寿命側では応力の係数が支配する。したがって、疲労データの分散評価も短寿命側は寿命比 (FLR) の標準偏差で、長寿命側は応力比 (SAR) の標準偏差で評価することが妥当と考えられる。そこで短寿命側は $10 \sim 4 \times 10^4$ サイクルの範囲、長寿命側は $10^4 \sim 10^8$ サイクルの範囲として、応力比 (SAR) と寿命比 (FLR) の対数標準偏差、 2σ と 3σ の真数を計算し、平均することで以下が得られた。

$$SAR: 2\sigma = 1.213, 3\sigma = 1.336$$

$$FLR: 2\sigma = 2.154, 3\sigma = 3.161$$

$TS = 550$ MPa の最適疲労線図とデータの例を図 8 に示す。

同様に、オーステナイト系ステンレス鋼に対しても標準偏差を求めた結果、各グループで平均することで以下が得られた。

$$SAR: 2\sigma = 1.332, 3\sigma = 1.538$$

$$FLR: 2\sigma = 2.487, 3\sigma = 3.923$$

$TS = 600 \sim 619$ MPa の最適疲労線図とデータの例を図 9 に示す。

3.5 高温での炭素鋼・低合金鋼の疲労線図

炭素鋼及び低合金鋼の高温での疲労線図について、温度が 200~400°C の約 300 個の疲労データを用いて検討を行った。

室温と高温の引張強さの関係を図 10 に示す。室温で TS

が低い場合で 300~350°C の TS が室温より高いのは動的ひずみ時効の影響である。400°C での TS はいずれも室温より低いが、中強度材料は高温での TS のばらつきが認められる。以上から、室温と高温の TS の関係を設定するのは困難であることがわかった。

200~400°C の疲労データに対して、 TS を 100MPa ピッチで分類して 450、550、650 及び 750MPa で等価な応力振幅で整理した。550MPa に対する例を図 11 に示す。

動的ひずみ時効等の影響で疲労挙動に及ぼす温度の影響は複雑なため、疲労強度が常温のカーブより高くなることは無視して、低くなる部分だけを補うことを考える。そこで、高温の影響の補正は振幅が大きな領域で寿命が低下する現象を補うため、寿命に乗ずる係数を大きくすることが適切と判断した。

高温データを含めると寿命比がどの程度短寿命側にずれるか評価するために、 $TS=450、550$ 及び 650 MPa の 3 グループについて、 $10\sim 4\times 10^4$ サイクルまでの疲労データの FLR の平均値を求めた結果、 FLR の全体の平均値は 0.721 であった。この値を考慮することにより 200~350°C の炭素鋼及び低合金鋼の疲労寿命式は以下となる。

$$S_a = (1.2 \times 10^5 - 28TS)(N_f/0.712)^{-0.58} + 0.45TS + 36 \\ = 0.827(1.2 \times 10^5 - 28TS)N_f^{-0.58} + 0.45TS + 36 \quad (11)$$

ここで、上式の線図も図 11 に合わせて示している。上式の 350°C を超える温度への適用についてはさらなる検討が必要である。

3.6 高温でのオーステナイト系ステンレス鋼の疲労線図

オーステナイト系ステンレス鋼の高温での疲労線図について、温度が 200~430°C の約 100 個の疲労データを用いて検討を行った。

オーステナイト系ステンレス鋼は動的ひずみ時効のような現象がないので、(7)式に対して高温での TS を適用して SAR と FLR を整理した結果を図 12 に示す。高温での TS を用いて計算した SAR 及び FLR の平均値は室温の場合に比べても 1.0 に近く、ステンレス鋼の高温における疲労強度は(7)式に高温の引張強さを適用することで推定可能と判断される。

4. 結 言

日本溶接協会の原子力研究委員会に DFC 小委員会を設置し、設計疲労線図の開発を進めている。炭素鋼及び低

合金鋼並びにオーステナイト系ステンレス鋼を対象に、高サイクル領域も含めて最新の大気中疲労試験データを幅広く収集することで広範なデータベースを構築し、疲労線図を開発した。

引き続き、大型疲労試験で得られたデータ等も反映して設計係数等も検討し、汎用性の高い大気中設計疲労線図を策定する。

謝 辞

本報は、日本溶接協会に設置された DFC 小委員会での成果です。ここに関係者各位に深く御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Asada, S., et al., "Plan and Status of Development of Design Fatigue Curves (Phase 1)", ASME, Pressure Vessels & Division Conference, PVP2013- 97767, 2013.
- [2] Kanasaki, H., et al., "Proposal of Fatigue Life Equations for Carbon & Low-Alloy Steels and Austenitic Stainless Steels as a function of Tensile Strength", ASME, Pressure Vessels & Division Conference, PVP2013- 97770, 2013.
- [3] 朝田誠治他、"設計疲労線図の開発の計画及び検討状況"、日本材料学会、第 31 回疲労シンポジウム講演論文集、pp.71-74.
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Division 1, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, ASME.
- [5] NIMS Material Database MatNavi, <http://mits.nims.go.jp>
- [6] C. Boller and T. Seeger, "Materials data for cyclic loading Part A, B, C, D, E", Material Science Monographs, 42A, 42B, 42C, 42D, 42E, Elsevier, 1987
- [7] A. Gaumel Jr. and T. Seeger, "Materials data for cyclic loading: Supplement", Material Science Monographs, 61, Elsevier, 1990
- [8] European Standard EN 13445, "Unfired Pressure Vessel"
- [9] "Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Sections III and VIII, Division 2", ASME, New York, 1969.
- [10] Copra, O. K., et al., "Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials", NRC, NUREG/CR-6909 ANL-06/08, 2007.

(平成 25 年 6 月 21 日)

	Items	Phase I (Aug. '11-Mar. '13)	Phase II (Apr. '13-Mar. '16)
1	Data Analysis on the Existing Fatigue Data for Small Specimens	████████████████████	
2	Data Analysis on the Existing Fatigue Data for Large-Scale Tests	████████████████████	████████████████████
3	Investigation of the Relevant Fatigue Evaluation Codes	████████████████████	
4	Study on Effect of Mean Stress	████████████████████	
5	Study on Design Factors	████████████████████	████████████████████
6	Development of Design Fatigue Curves	████████████████████	████████████████████
7	Large-Scale Tests (Planning, Evaluation)[*]	████████████████████	████████████████████
8	Investigation of Current Fatigue Analysis & Evaluation	████████████████████	████████████████████
9	Proposal of New Fatigue Evaluation Method	[First Report] ▼	[Second Report] ▼

[*] The large-scale tests will be conducted as a Japanese utility project

Fig.1 Schedule of DFC Subcommittee

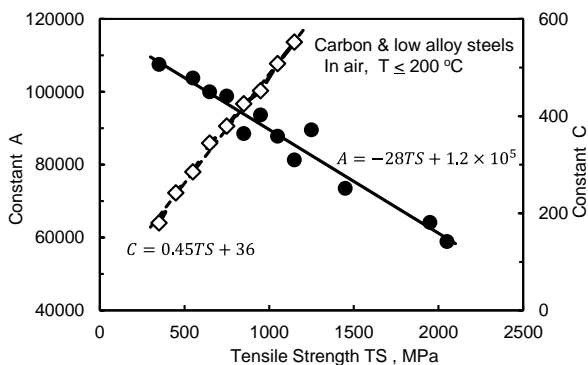


Fig. 2 Constant and Exponent in Fatigue Life Equation for CS & LAS under $B=0.58$

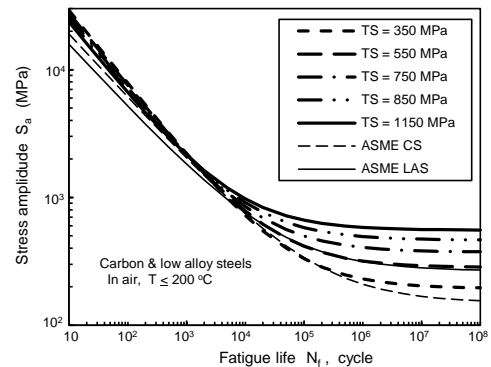


Fig. 3 Comparison of Best Fit Curves for CS & LAS with different TS and ASME BFCs

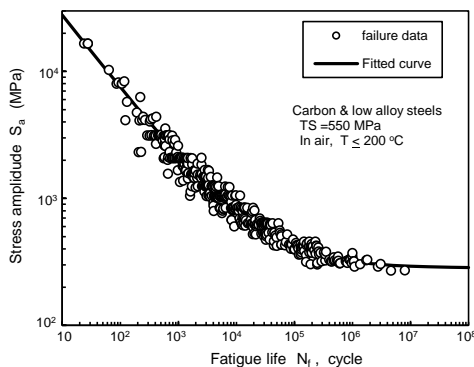


Fig. 4 Fatigue Data and the Best Fit Curve for CS & LAS of TS = 550 MPa

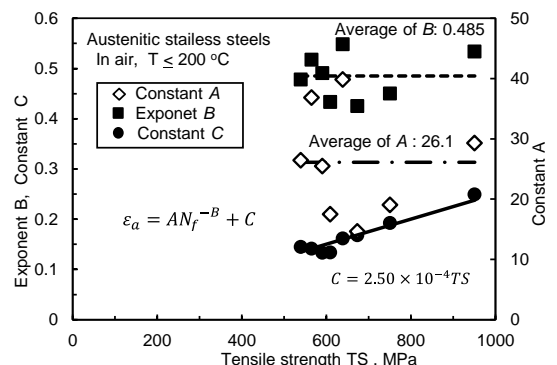


Fig. 5 Relationships between Parameters A, B & C and TS for SS

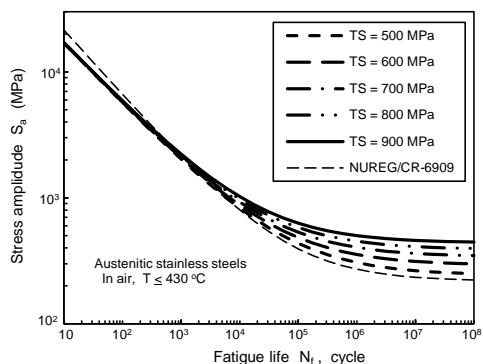


Fig. 6 Comparison of Best Fit Curves for SS with different TS and NUREG/CR-6909 BFC

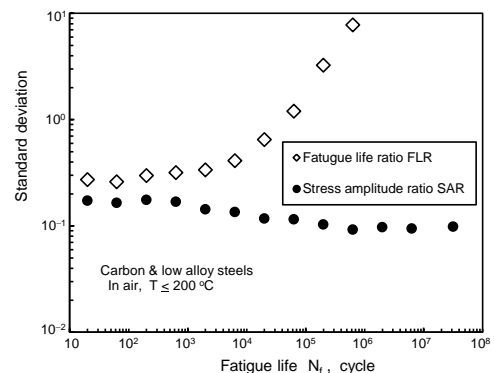


Fig. 7 Relation of Standard Deviations on SAR and FLR to Fatigue Life for All Fatigue Data of CS & LAS

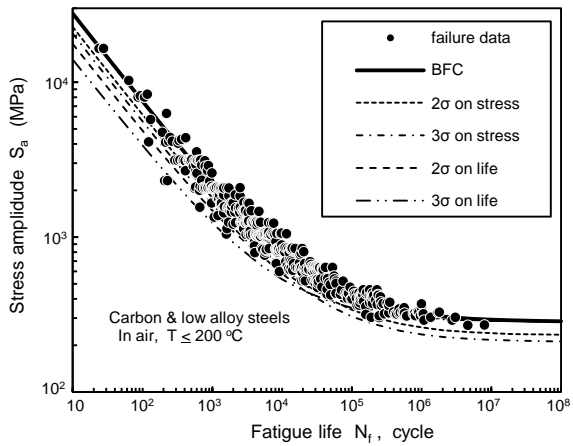


Fig. 8 Fatigue Data, BFC and Curves of -2σ and -3σ for CS & LAS of $TS = 550$ MPa

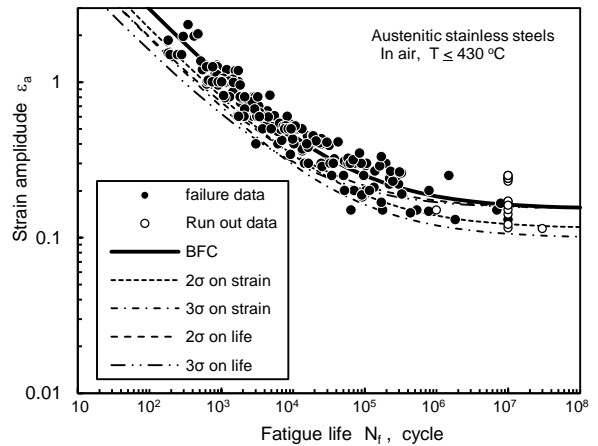


Fig. 9 Fatigue Data, BFC and Curves of -2σ and -3σ for SS of $TS = 660 - 619$ MPa

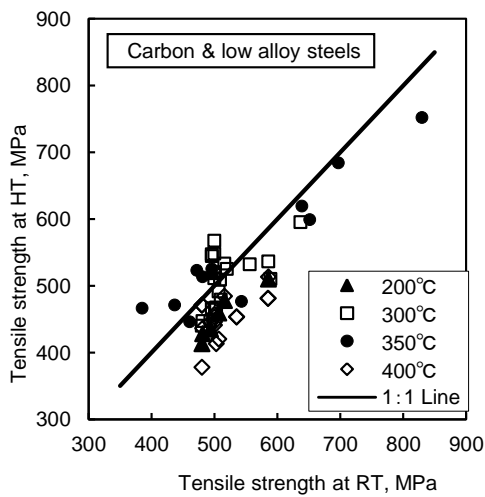


Fig. 10 Relation between TS at High and Room Temperature for CS & LAS

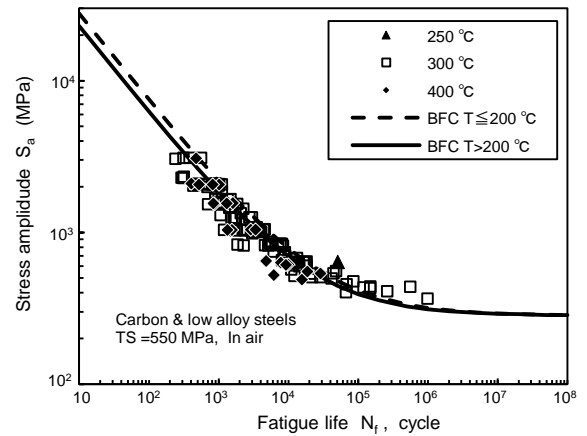


Fig. 11 Fatigue Data at High Temperature and BFC for CS & LAS of $TS = 550$ MPa

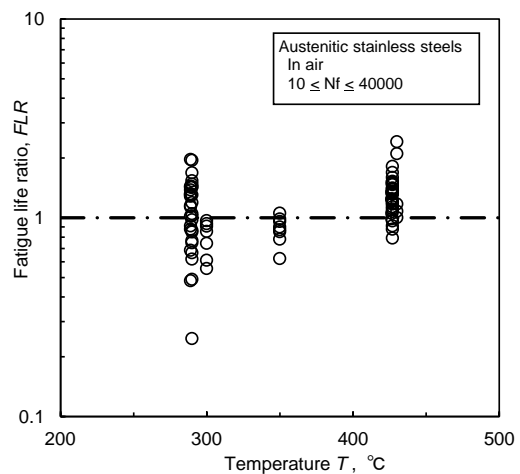
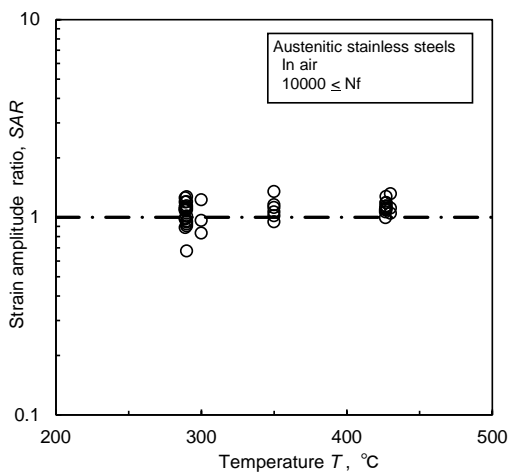


Fig. 12 SAR and FLR of BFC to Fatigue Data of Austenitic Stainless Steels Obtained at High Temperature