

UDC 539.43:  
519.28:  
620.178.3:  
669.1:  
669.715

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-581

S-N 曲線による疲労寿命分布推定

下河利行・浜口泰正

1979年8月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# S-N 曲線による疲労寿命分布推定\*

下河利行\*\* 浜口泰正\*\*

## Estimation of Fatigue Life Distribution from S-N Curve

By

Toshiyuki SHIMOKAWA and Yasumasa HAMAGUCHI

### ABSTRACT

The relationship between the S- $\tilde{N}$  curve, where  $\tilde{N}$  is the median fatigue life, and empirical fatigue life distributions from samples of fairly large sizes has been analyzed using two groups of data, i.e., five data for steels and seven data for aluminum alloys collected from published papers and books. The distribution shape of fatigue life is found to be related to the shape of the S- $\tilde{N}$  curve in the neighborhood of the test stress level. To compare the quantitative relationship between the scatter of fatigue life and the slope of the S- $\tilde{N}$  curve in various test data, test stress levels were standardized by the median fatigue strength at  $10^5$  cycles in each data, and standardized S- $\tilde{N}$  curves, where “standardized” means the use of such standardized stress levels, were drawn. The standard deviation of log-life in either steels or aluminum alloys has an obvious linear relation on double logarithmic graph paper with the slope of the standardized S- $\tilde{N}$  curve at the test stress level. The distribution of the median fatigue strength corresponding to each fatigue life obtained at one stress level is normal in shape and its standard deviation is nearly constant regardless of the test stress level in each data.

On the basis of these results, a method for estimating fatigue life distribution is developed when the available information is limited either to a simple S-N curve only or to the original fatigue life data for the construction of such an S-N curve.

### 1. 緒 言

最近の機械や構造物の強度設計においては、十分な安全性および信頼性を確保しながらも、性能の向上、軽量化、省エネルギー、あるいは経済性等が強く要求されている。こうした要求を満たすためのひとつの手段は信頼性工学的手法または確率設計<sup>1),2)</sup>と呼ばれる方法を導入して、強度の不足を補うとともに不必要なぜい肉を落とすことである。機械や構造物における故障や事故の材料強度的原因としては疲労破壊によることが多い。したがって、疲労は信頼性工学的手法あるいは確率設計におけ

る大きな問題である。

こうした手法を疲労設計に応用するためには、疲労強度の統計的データが必要である。しかしながら、多数の試験片を使用して、広い応力範囲で疲労寿命（以下の文章中では単に寿命と呼ぶ）分布を求めた例は比較的少ない。また、こうしたデータを集積することは費用および時間がかかることから容易ではない。一方、正確な確率設計が必要とされる場合には、正確な統計的疲労データが不可欠であろうが、非常に正確でなくとも、寿命分布を知る必要のある場合はかなり多いと思われる。このような場合には、簡便でかつ合理的な寿命分布推定法が望まれる。

著者ら<sup>3)~7)</sup>は S-N 曲線と寿命分布との間に強い関係のあることを著者らの実験結果により指摘している。

\* 昭和54年5月28日受付

\*\* 機体第二部

そこで本報では、S-N曲線のみ知られている場合の寿命分布を合理的に推定することを目的として、著者らの結果をも含めて、すでに報告されている比較的大標本による寿命分布データにより、S-N曲線と寿命分布の関係を調べる。さらに著者ら<sup>7)</sup>の提案している誤差モデルを応用した寿命分布推定法、およびS-N曲線を描くために求めた寿命データによる寿命分布推定法等について検討する。

## 2. 疲労寿命のばらつきの原因と影響因子

寿命のばらつきの原因としては非常に多くの因子が考えられ、これらは大まかに次の3種類に分類できる。

1) 試験条件に起因するもの i) 試験片については、加工精度、表面あらさ、および試験片の汚れ等、ii) 試験機に関しては、荷重安定度や2台以上の試験機を使用するときはその不揃い等、iii) 実験者の技術レベルとしては、寸法測定誤差、試験片を試験機に取付ける際のクランプの不揃い、および荷重設定誤差等、iv) その他、試験環境の変動等が考えられる。

2) 材料の処女状態における相違 熱処理の不均一、組織状態の不均一、局部的残留応力分布の不均一、および欠陥の分布等が考えられる。

3) 疲労損傷進行の確率過程論的性格<sup>8)</sup> き裂の発生、進展、およびある長さに達したき裂が破断するよりの現象は確率過程論にもとづく現象で、寿命全体として現れるばらつきは確率過程論的性格に支配されるとする考え方である。

以上の因子のうち、実験室内で得られた寿命のばらつきに対し、どれが有力であるかはまだ充分明らかでなく、またこれらを分離して論じることが困難である。さらに、それぞれの因子は試験応力レベル、あるいは寿命の長さによっても寿命のばらつきに与える影響は異なるであろう。

一方、寿命のばらつきの直接の原因ではないが、原因とともに作用して、ばらつきに大きな影響を与える因子を考慮することができる。これを仮に影響因子と呼ぶことにする。影響因子としては、例えば試験片形状、使用試験片数やその抽出方法、試験機の型式や使用台数、材料のロットの相違、材種の相違、材料製造過程の品質管理状況、およびS-N曲線の形状や勾配等が考えられる。

以上の点を考えると、通常得られている寿命分布データは人為的誤差も含めて材料の疲労特性と称しているように思われる。しかし、ばらつきの原因および影響因子がどのような関連を持って、個々の場合に寿命のばらつきを発生させるかを定量的に示すことは、限られた一部

の因子の場合<sup>9)</sup>以外困難である。著者らによる試験条件を極力揃えることに努めた疲労試験の結果<sup>4)~7)</sup>では、影響因子としてのS-N曲線が寿命分布と強い関係を示した。そこで、以下ではS-N曲線以外のばらつきの原因や影響因子について論じることは棚上げとし、S-N曲線と寿命分布の関係についてのみ議論する。したがって、上記の各種因子の効果は両者の関係に集積して含まれることになる。

## 3. S-N曲線と疲労寿命分布の関係

本報で論じるS-N曲線は通常の片対数グラフ上に描いたものとし、統計的には中央S-N曲線、すなわち、50%破壊確率に対応するS-N曲線を指すことにする。以後、中央寿命を $\tilde{N}$ で示し、中央S-N曲線をS- $\tilde{N}$ 曲線と表示する。したがって、通常のS-N曲線はS- $\tilde{N}$ 曲線の近似であると解釈する。S-NまたはS- $\tilde{N}$ 曲線の傾きは負か0の値のみであるから、以下ではこれらの傾きの絶対値のことを単にS-NまたはS- $\tilde{N}$ 曲線の勾配と称する。また、寿命のばらつきは寿命の変動係数、対数寿命の標準偏差、あるいは2パラメータWeibull分布を仮定して、形状パラメータ等で表示されるが、ここでは過去の報告で比較的容易に得られる対数寿命の標準偏差を採用する。

### 3.1 定性的関係

比較的多数の試験片を使って得られた疲労試験結果から、S- $\tilde{N}$ 曲線と寿命分布との関係を定性的にまとめてみると、図1(a),(b)に示すような関係がある。i) 図1(a)の領域Bのように、実験応力近傍でS- $\tilde{N}$ 曲線の形状が直線とみなせる場合、寿命の分布形状は図1(b)に示すように対数正規分布にあてはまる。こうした傾向を示す多くの実験例がある。<sup>3)~7),10),12)~16)</sup> また、Bastenaire<sup>14),15)</sup>も高応力領域で同様のことを指摘している。さらに、アルミニウム合金の場合には図1(a)の領域Cより低い応力の長寿命域で再びS- $\tilde{N}$ 曲線に直線部が現れるが、寿命分布もこれに対応して対数正規に近い分布形が再び現れる。<sup>5),6)</sup> ii) 図1(a)の領域Cのように、実験応力近傍でS- $\tilde{N}$ 曲線の形状が応力の低下とともに直線から下に凸の曲線に大きく変化する場合は、寿命の分布形状は図1(b)に示すように短寿命側で対数正規分布、長寿命側で対数正規分布から離れ、より長寿命側に尾をひく。このような傾向は低応力、長寿命域に現れ、多くの実験例がある。<sup>3)~7),12),14)~18)</sup> 鉄鋼材料のようにS- $\tilde{N}$ 曲線の折れ点が比較的明瞭に現れる場合には、寿命分布は対数正規確率紙上で2本の直線により近似され

る傾向がある。<sup>15),17)</sup> iii) 図1(a)の領域Aのように、実験応力近傍でS- $\tilde{N}$ 曲線が応力レベルの低下とともに、上に凸の曲線から直線に大きく変化する場合には、寿命分布は図1(b)に示すように、短寿命側で対数正規分布から離れ、より短寿命側に尾を引き、長寿命側では対数正規分布にあてはまる。このような傾向は高応力、短寿命域に現れると考えられるが、この領域の挙動は実用的に重要でないためか実験例はほとんどなく、著者らの知る限りでは、Bastenaireら<sup>14)</sup>の結果のみがこの傾向にあてはまると思われる。iv) 実験応力近傍でのS- $\tilde{N}$ 曲線の勾配は寿命のばらつきの大きさに関係がある。すなわち、図1(a)の領域B内のようにS- $\tilde{N}$ 曲線の勾配がほぼ等しい応力範囲では、図1(b)に示すように寿命のばらつきもほぼ等しく、S- $\tilde{N}$ 曲線の勾配がゆるい程、寿命のばらつきは大きくなる。これらの関係は次節で詳しく調べる。

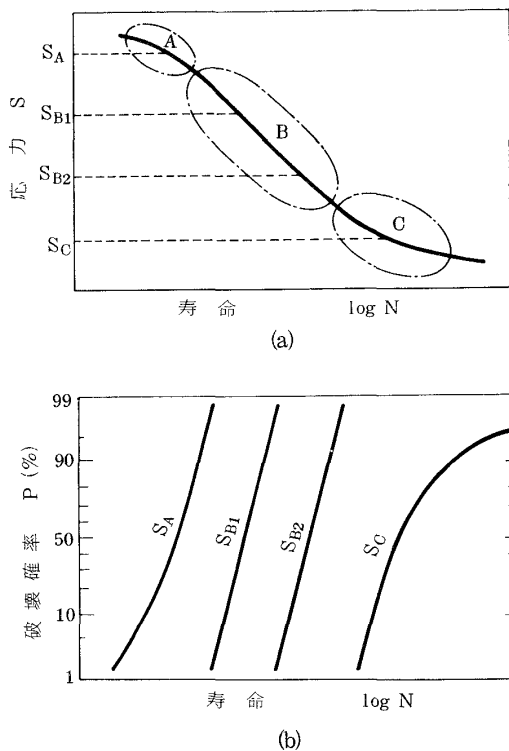


図1 S- $\tilde{N}$ 曲線と疲労寿命分布の定性的関係

### 3.2 定量的関係

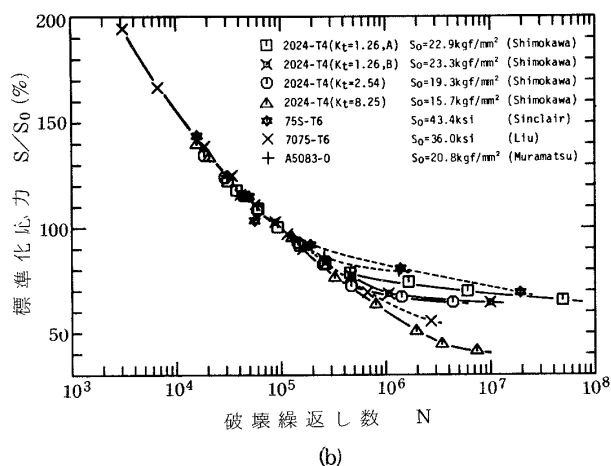
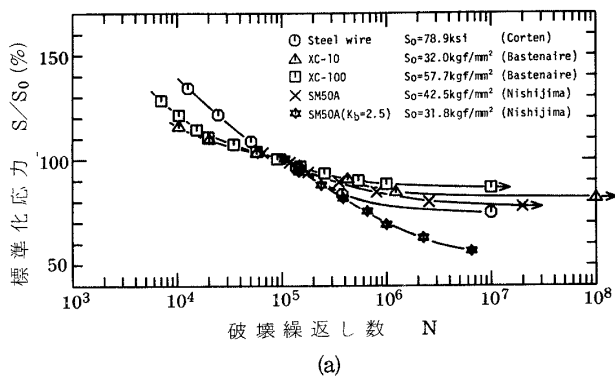
S- $\tilde{N}$ 曲線の形状と寿命の分布形状の関係を定量的に表示するパラメータは現在のところ適当なものが見当たらないので、以下ではS- $\tilde{N}$ 曲線の勾配と寿命のばらつきの定量的関係についてのみ、過去のデータにより検討する。

#### 3.2.1 解析に使用する実験結果

解析に使用する寿命分布データは以下の条件を設けて選択した。i) 材種としては多くのデータが必要であるので、鉄鋼材料とアルミニウム合金の2系統に限る。ii) 余りにも古いデータは除く。iii) 広い応力範囲での実験が為されており、後述する整理の都合で $10^5$ に対応する中央時間強度、すなわち、50%破壊確率に対応する時間強度を内挿範囲として推定できること。iv) 1応力レベルに使用した試験片の数は寿命のばらつきの信頼区間の広さに関係するので、小標本と大標本それぞれによる結果を同列に論じることはできない。ここでは、過半数の応力レベルで19本以上の試験片を使用した場合を採用する。v) 実験は両振り荷重を使用していること。vi) S- $\tilde{N}$ 曲線と対数寿命の標準偏差を知るために、寿命分布が対数正規確率紙にプロットされているか、あるいは表に中央寿命と対数寿命の標準偏差が与えられていること。以上のような条件をもとに、鉄鋼材料で5種類、文献13)~16)、アルミニウム合金で7種類、文献3)~7)、10)~12)、のデータを採用した。これらのうち、文献16)の切欠き材は $10^5$ 中央寿命が内挿に入らないが、これに非常に近い実験点があるので採用した。また、文献11)は対数寿命の平均値が表にあるが、中央寿命の近似として使えろと考え採用した。

#### 3.2.2 標準化S- $\tilde{N}$ 曲線

前記のように同一ロットの材料では、実験応力近傍でのS- $\tilde{N}$ 曲線の勾配と寿命のばらつきの大きさに関係がある。ここでは、異種材料間で比較しても、このような関係が存在するかどうかを調べるため、およびS-N曲線のみが既知である材料にこうした関係を導入して寿命分布を推定するために、S- $\tilde{N}$ 曲線を標準化して示す必要がある。鉄鋼材料等では、引張強度により標準化することが良く行われている。しかしながら、引張強度にはばらつきがあり、また引用した報告は必ずしもこの値を与えておらず、さらに疲労領域の議論には疲労の特性値で標準化の方が妥当であろうと考え、本報では比較的決定の容易な $10^5$ に対応する中央時間強度 $S_0$ を標準応力に採用した。 $\tilde{N} = 10^5$ はほとんどの場合、S- $\tilde{N}$ 曲線の直線傾斜部に存在する。応力の標準応力に対する比を標準化応力 $S/S_0$ と称し、この比を $\phi$ で示す。このように応力側を標準化して描いたS- $\tilde{N}$ 曲線を標準化S- $\tilde{N}$ 曲線と称し、鉄鋼材料とアルミニウム合金に分けて図2(a)、(b)に示す。図中には材料名、切欠きのあるものには引張の応力集中係数 $K_t$ あるいは曲げの応力集中係数 $K_b$ 、 $10^5$ に対応する中央時間強度 $S_0$ 値、および

図2 標準化  $S-\tilde{N}$  曲線

引用した報告の筆頭著者名を示した。このうち、2024-T4 ( $K_t = 1.26$ ) の場合は2種類あり、実験室内の温度と湿度を一定に制御した場合を ( $K_t = 1.26, A$ )、通常の実験室内における結果を ( $K_t = 1.26, B$ ) として区別した。なお、図2(a), (b)上の実験別を示す記号は以下の図面でも統一して使用した。図2(b)で明らかなように、アルミニウム合金では本報のように標準化すると  $10^5$  以下の寿命ではほぼ一本の曲線で表されることがわかる。

### 3.2.3 標準化 $S-\tilde{N}$ 曲線の勾配と寿命のばらつきとの関係

標準化  $S-\tilde{N}$  曲線の勾配  $a_n$  は、著者らの実験の場合は  $S-\tilde{N}$  曲線の近似式から計算したが、これ以外の場合は作図により求めた。また、寿命のばらつき、すなわち、対数寿命の標準偏差  $\sigma_L$  は表に与えられている場合はそれを使い、与えられていない場合は、対数正規確率紙上にプロットされている寿命分布を図上で近似直線を引くことにより求めた。したがって、対数正規分布から大きくはずれるような場合は、作図により寿命のばらつきを求めることは無理であるので除いた。

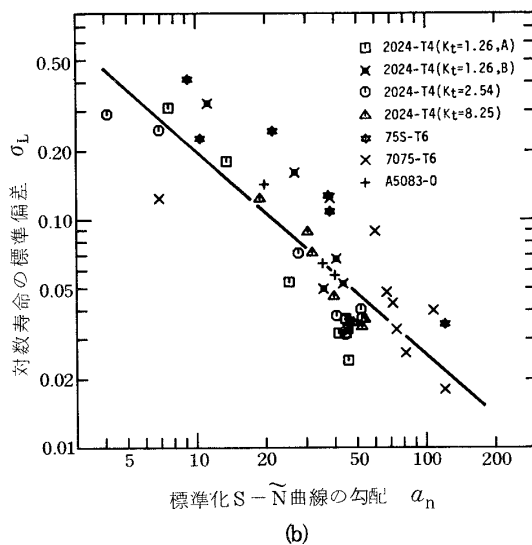
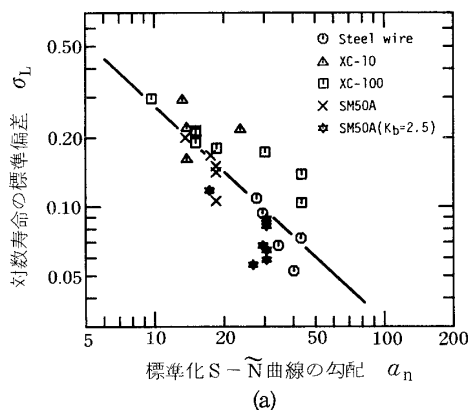
$a_n$  と  $\sigma_L$  との関係を一対数グラフ上にプロットして、図3(a), (b)に示す。プロットした点はかなり広い範囲に

ちらばっているが、巨視的に見れば負の勾配を持った直線状の帯とみなすことができる。一対数グラフ上における  $a_n$  と  $\sigma_L$  の相関係数  $r$  を計算したところ、鉄鋼材料では  $r = -0.78$ 、アルミニウム合金では  $r = -0.85$  が得られた。以上から、 $\log a_n$  と  $\log \sigma_L$  には強い相関のあることがわかる。一対数グラフ上での直線関係を(1)式のようにおく。

$$\log \sigma_L = -A \log a_n + B \quad (1)$$

ここで、 $A$  および  $B$  はパラメータである。最小二乗法によって  $A$  と  $B$  を決め、(1)式による直線を図上に示した。 $A$  の値は鉄鋼材料の場合で  $0.94$ 、アルミニウム合金の場合は  $0.90$  であり、それぞれ  $1.0$  に近く、両者の相違も小さい。図3(a), (b)の関係は  $a_n$  に実験応力での値を使用しているため、実験応力近傍で  $a_n$  が余り大きく変化しない場合に有効である。

以上から、 $S-N$  曲線のみ知られている材料に対しては、図1(a), (b)と図3(a), (b)を参照することにより、寿命の分布形状およびばらつきのおおよその値を推定することができる。

図3 疲労寿命のばらつきと標準化  $S-\tilde{N}$  曲線の勾配との関係

4. 誤差モデルの応用について

著者ら<sup>7)</sup>は前述したようなS-N曲線と寿命分布との間の定性的および定量的関係を説明するために、Matolcsy<sup>19)</sup>の指摘した概念を拡張して寿命分布に対する誤差モデルを提案した。

4.1 誤差モデル

これは寿命のばらつきの原因と考えられる因子の効果を総合して応力側の誤差に見積り、この誤差と疲労試験のために設定した応力との和を換算応力  $S_r$  と定義する。この換算応力分布を入力、S-N曲線を一種の伝達関数、および寿命分布を出力とする考え方である。さて、ばらつきの原因の多くはS-N曲線と関係を持って寿命のばらつきを発生させると考えられるが、S-N曲線と無関係に寿命のばらつきを発生させる原因も考えられる。厳密には、後者の関係までを換算応力に含んだ誤差モデルを考えることは不適当である。しかし、現実には両者の効果を分離することは困難である。また、換算応力分布を実験前に知ることは不可能である。このため、換算応力分布は実験で得られた寿命分布とS-N曲線とから、図4のようにして推定する。すなわち、このように推定される換算応力分布は各寿命に対応する中央時間強度の分布である。そこで、実験結果から計算された換算応力分布が、例えば、分布形は正規で標準偏差あるいは変動係数が応力レベルによらず一定である等の誤差の持つ性質を示せば、この誤差モデルは有効であると判断する。

以下では、誤差モデルの成否を検討し、S-N曲線のみあるいはS-N曲線を描くために求めた寿命データが既知である場合に対し、このモデルを応用した寿命分布推定法を述べる。

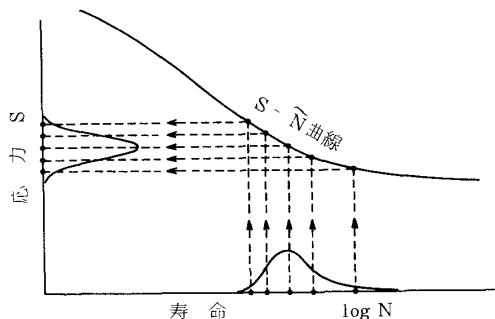


図4 換算応力分布の求め方

4.2 標準化換算応力分布

標準応力  $S_0$  で標準化した換算応力  $S_r$  を標準化換算応力  $S_r/S_0$  と呼ぶ。ここで、標準化換算応力分布は厳

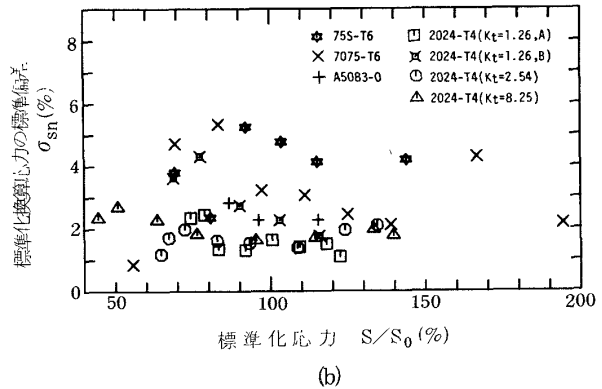
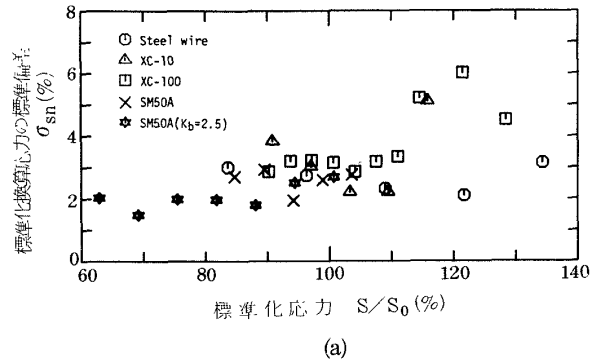


図5 標準化換算応力の標準偏差

密には図4のように実験で得られた寿命分布データから求める必要がある。しかし、寿命の数値データが明らかでなければこのように求めることはできない。一方、使用した寿命分布データの多くは対数正規分布で良く近似でき、標準化S-N曲線も、図2(a), (b)で対数寿命の標準偏差  $\sigma_L$  が得られている実験応力近傍では、多くの場合近似的に直線とみなせたので、標準化換算応力の分布形は多くの場合正規分布とみなせる。そこで、実験応力における標準化S-N曲線の勾配  $a_n$  と  $\sigma_L$  から標準化換算応力  $S_r/S_0$  の標準偏差  $\sigma_{sn}$  を(2)式のように近似的に求めることができる。

$$\sigma_{sn} = \sigma_L \cdot a_n \tag{2}$$

得られた  $\sigma_{sn}$  と  $S/S_0$  の関係を図5(a), (b)に示す。鉄鋼材料の場合、Bastenaireらの実験における高応力側のXC-10, 1応力とXC-100, 3応力では、 $\sigma_{sn}$  が他の場合に比べて特に高いが、高応力レベルでは、試験片の発熱を示唆する記述<sup>14)</sup>があるので、これらの実験点を除いて考えると、各材種、切欠きの有無により幾分相違があるが、巨視的には  $\sigma_{sn}$  は応力によらずほぼ一定という傾向が認められる。アルミニウム合金の場合、著者らの環境を制御していない通常の実験室内における2024-T4 ( $K_t = 1.26, B$ )では、応力の低い程  $\sigma_{sn}$  は大という傾向があるが、これ以外は各実験それぞれに差があるとしても、個別に巨視的には  $\sigma_{sn}$  は応力

によらずほぼ一定という傾向がある。以上から、上記の例外を除けば、個別に換算応力の分布形が正規で標準偏差が一定という誤差モデルがほぼ成立していると考えられる。

### 4.3 誤差モデルを利用したS-N曲線による寿命分布推定

#### 4.3.1 S-N曲線のみ既知である場合

この場合は次のように上記の関係を利用して寿命分布を推定する。まず、S-N曲線を $10^5$ に対応する応力 $S_z(10^5)$ で標準化する。換算応力の分布形は正規であり、標準偏差は応力によらないとし、設定応力を換算

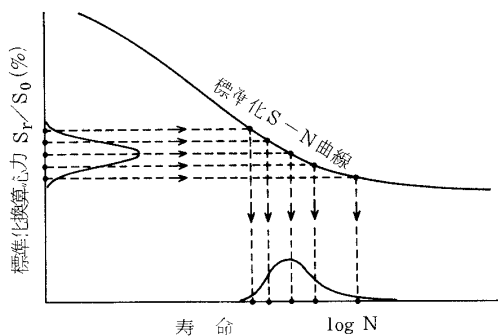


図6 誤差モデルによる寿命分布の推定

応力の平均値におき、図5(a), (b)において、同種あるいは類似の材料による $\sigma_{sn}$ のデータから平均値、信頼限界等を決め、標準化S-N曲線から図6のようにして寿命分布を導く。標準化S-N曲線が設定応力近傍でほぼ直線とみなせる範囲における寿命のばらつきは、

$$\sigma_L = \sigma_{sn} / a_z \quad (3)$$

で与えられる。ただし、 $a_z$ は設定応力における標準化S-N曲線の勾配である。

さて、S-N曲線の代わりにS- $\tilde{N}$ 曲線を考え、(3)式の $a_z$ を $a_n$ において、両辺の対数を取ると、

$$\log \sigma_L = -\log a_n + \log \sigma_{sn} \quad (4)$$

が得られる。これは(1)式において、 $A=1$ 、 $B=\log \sigma_{sn}$ とおいたものに相当する。すなわち、S- $\tilde{N}$ 曲線が設定応力近傍でほぼ直線とみなせる範囲では、換算応力の分布形が正規であり、標準偏差一定の誤差モデルは(4)式の関係を与える。したがって、前節で示したように $\sigma_{sn}$ はほとんどの場合、実験毎に応力によらず一定とみなせたので、この誤差モデルは図3(a), (b)の関係において、-1.0の傾きを持つ直線群を与える。これは最小二乗法によって得られたAの値、鉄鋼材料の0.94、およびアルミニウム合金の0.90に近い値であり、実験の傾向に理論的基準を与えるものである。

#### 4.3.2 S-Nデータも既知の場合

S-N曲線を描くために求めた寿命データをS-Nデータと仮に呼ぶ。S-N曲線以外にS-Nデータも使用できる場合は、前記のように換算応力の分布形は正規で、個別に巨視的には応力によらず $\sigma_{sn}$ は一定であるという結果があてはまるとみなして、図7のように各寿命点 $N_i$ におけるS-N曲線からの応力側の偏差 $\Delta S_i$ 、

$$\Delta S_i = S_z(N_i) - S_{ti} \quad (5)$$

を求める。ここで、 $S_{ti}$ は $N_i$ を得た実験応力、 $S_z(N_i)$ は $N_i$ に対応するS-N曲線上の時間強度、および $i$ は任意の寿命に割当てた順序番号である。 $\Delta S_i$ の標準偏差を計算し、これを換算応力の標準偏差 $\sigma_s$ の推定値として使用する。この場合、S-N曲線を描くために減少する自由度に注意する必要がある。また、 $S_z(10^5)$ で $\Delta S_i$ の標準偏差を標準化して、図5(a), (b)における同種あるいは類似の材料により得られている $\sigma_{sn}$ 値と比較して、 $\sigma_{sn}$ 値の範囲に入るか、あるいは分散の形で $\sigma_{sn}^2$ の平均値との等分散検定等をあてはめ、妥当か否かの判定を加える。後者の場合、大まかな見当をつける程度に考えれば、図5(a), (b)における実験点1個あたりの自由度は18とすれば良い。場合によっては、さらに補正を考えるなどして誤差モデルを使い寿命分布を推定する。

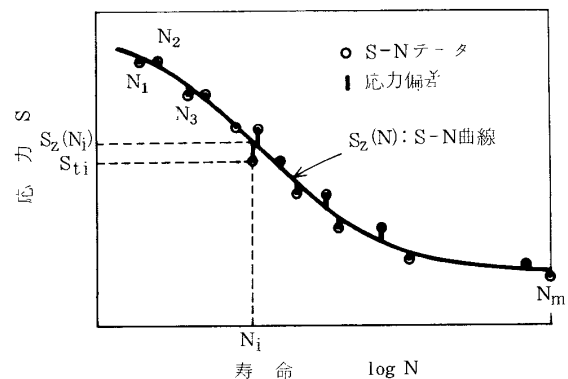


図7 S-Nデータによる換算応力分布の推定

## 5. 考 察

まず、換算応力分布と時間強度分布の関係について触れる。換算応力分布は図4のように導かれたものであり、時間強度分布はP-S-N曲線上でNを一定として得られるP-S関係であるので、両者の物理的に意味する内容は異なる。しかし、両者とも正規分布にあてはまることが知られており、換算応力あるいは時間強度の標準偏差が応力によらず一定である場合には、S- $\tilde{N}$ 曲線の形状と無関係に両者は形式的に一致する。このような場合は、図5で示したように広く見出されている。

さて、本報における解析では、図5(a), (b)に示したように、換算応力の標準偏差が応力によらない場合がほとんどであった。例外として、通常の実験室内における2024-T4 ( $K_t = 1.26$ , B)では応力が低下する程、換算応力の標準偏差が大きくなる傾向を示した。一方、西島らは短寿命程、時間強度のばらつきが大きくなる場合<sup>20)</sup>を見出しており、統計量として $-\Delta S_j/S_z(N_j)$ を採用し、これが応力によらず正規分布で標準偏差が一定であるとみなして、S-NデータからP-S-N曲線を推定している。<sup>21)</sup> 上述のような応力側における傾向の相違は寿命のばらつきの原因、あるいは影響因子等に関係すると思われ、あらゆる場合に共通の傾向が得られるという保証はない。著者らによる2024-T4の $K_t = 1.26$ , Aと $K_t = 1.26$ , Bにおける相違は主として、実験室内の温度と湿度の相違によるものと思われるが、今後、どのような条件下でどのような傾向が現われるかを解明することが必要である。

## 6. 結 言

過去報告された統計的疲労試験結果から、寿命分布とS-N曲線(中央S-N曲線)との関係を解析した。この結果を基にして、S-N曲線のみ、あるいはS-N曲線を描くために求めた寿命データも既知である場合の寿命分布推定法について検討した。なお、種々のデータは応力を $10^5$ に対応する中央時間強度で標準化して解析した。得られた結果の主なものを列挙する。

(1) S-N曲線の形状と寿命分布の定性的関係を図式的に示した。

(2) S-N曲線の勾配と寿命のばらつきには強い相関があり、標準化S-N曲線の勾配を横軸にとり、対数寿命の標準偏差を縦軸に表わした両対数グラフ上でほぼ傾きが-1の直線関係にあった。

(3) 上記の(1), (2)の結果を使用すれば、S-N曲線のみ知られている場合の寿命分布推定が可能である。

(4) 標準化換算応力、すなわち実験で得られた各寿命に対応する標準化中央時間強度、の分布形は広い範囲で正規分布にあてはまり、標準偏差は例外を除けば応力によらないことを示した。

(5) S-N曲線のみ知られている場合、上記(4)の結果を使い、著者らの提案した誤差モデルを応用して寿命分布を推定する方法を示した。

(6) S-N曲線の他に、S-N曲線を描くために求めた寿命データも使用できる場合の寿命分布推定法を示した。

本研究の遂行にあたり、有益な御意見、御助言をいただきました電気通信大学の田中英教授、運輸省航空機事故調査委員会の上山忠夫委員、および航空宇宙技術研究所の中井暎一機体第二部長に厚く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) E. B. Haugen, Probabilistic Approach to Design, (1968), John Wiley & Sons, Inc.
- 2) E. B. Haugen and P. H. Wirsching, "Probabilistic Design, Part 1 to 5," Machine Design, April 17 through June 12, (1975).
- 3) 下河・浜口, "航空機用アルミニウム合金2024-T4板材における疲れ寿命のばらつきとS-N曲線との関係," 日本材料強度学会誌, Vol. 9, No. 3 (1974), pp. 1-12, あるいは航空宇宙技術研究所報告, TR-360 (1974).
- 4) 下河・浜口, "航空機用アルミニウム合金2024-T4切欠き材 ( $K_t = 8.25$ )における疲れ寿命のばらつきとS-N曲線との関係," 日本材料強度学会誌, Vol. 10, No. 2 (1975), pp. 46-60, あるいは航空宇宙技術研究所報告, TR-412 (1975), TR-412T (英文版) (1977).
- 5) 下河・浜口, "航空機用アルミニウム合金2024-T4円孔切欠き材における疲れ寿命のばらつきとS-N曲線との関係," 日本材料強度学会誌, Vol. 10, No. 4 (1976), pp. 179-192, あるいは航空宇宙技術研究所報告, TR-431 (1975).
- 6) 下河・浜口, "航空機用アルミニウム合金2024-T4板材における疲れ寿命分布, 形状係数, およびS-N曲線との関係," 日本機械学会第55期通常総会講演会講演論文集, No. 780-4 (1978), pp. 125-127.
- 7) T. Shimokawa and Y. Hamaguchi, "Relationship Between Fatigue Life Distributions and S-N Curve of Sharply Notched Specimens of 2024-T4 Aluminum Alloy," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 21, No. 54 (1979), pp. 225-237.
- 8) 横堀, 材料強度学, (1955), 技報堂.
- 9) 下河, "材料の疲労強度信頼性について," 品質, Vol. 9, No. 2 (1979), pp. 44-49.



- 10) G. M. Sinclair and T. J. Doran, "Effect of Stress Amplitude on Statistical Variability in Fatigue Life of 75S-T6 Aluminum Alloy," *Trans. ASME*, Vol. 75 (1953), pp. 867-872.
- 11) H. W. Liu and H. T. Corten, データは D. B. Kececioglu, R. E. Smith, and E. A. Felsted, "Distributions of Strength in Simple Fatigue and the Associated Reliabilities," *Annals of Assurance Sciences*, Vol. 3, No. 2 (1970), pp. 659-672.
- 12) 村松・田中・竹内, "A 5083-OおよびA7 N01-T6合金のP-S-N線図について," *軽金属*, Vol. 23, No. 7 (1973), pp. 317-426.
- 13) H. T. Corten and G. M. Sinclair, "A Wire Fatigue Machine for Investigation of the Influence of Complex Stress Histories," *Proc. ASTM*, Vol. 56 (1956), pp. 1124-1137.
- 14) F. A. Bastenaire, "New Method for the Statistical Evaluation of Constant Stress Amplitude Fatigue-Test Results," *Probabilistic Aspects of Fatigue*, ASTM STP 511 (1972), pp. 3-28.
- 15) F. A. Bastenaire, G. Pomey, and P. Rabbe, *金属の疲れ* (舟久保・西島訳), (1973), p. 95, 丸善.
- 16) 西島・竹内, "溶接構造用SM-50A鋼の確率疲労特性," *材料*, Vol. 27, No. 300 (1978), pp. 884-889.
- 17) A. Bender and A. Hamm, "The Application of Probability Paper to Life or Fatigue Testing," *Delco Remy Division, General Motors Corp.* (1957).
- 18) N. T. Bloomer and T. F. Roylance, "A Large Scale Fatigue Test of Aluminum Specimens," *Aeronautical Quarterly*, Vol. 16, No. 4 (1965), pp. 307-322.
- 19) M. Matolcsy, "Logarithmic Rule of Fatigue Life Scatters," *Materialprüfung*, Vol. 11, No. 6 (1969), pp. 196-200.
- 20) 西島, "0.25%炭素鋼における回転曲げ疲れ強さのばらつき," *金属材料技術研究所報告*, Vol. 15, No. 4 (1972), pp. 202-209.
- 21) 西島・阿部・石井・住吉・金尾, "JIS機械構造用炭素鋼の確率疲労特性," *日本材料学会第12回疲労シンポジウム前刷集*, (1978), pp. 109-113.

---

## 航空宇宙技術研究所報告 581号

昭和54年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社実業公報社  
東京都千代田区九段南4-2-12

---