

汎用疲労解析プログラム **FATRUN / SPECTRUN**

高橋一比古*

Multipurpose Fatigue Analysis Program FATRUN / SPECTRUN

by

Ichihiko TAKAHASHI

Abstract

A multipurpose fatigue analysis program package, FATRUN / SPECTRUN has been developed and on sale. FATRUN is a time domain fatigue analysis application used to estimate fatigue damage and fatigue life for arbitrary stress wave data using an arbitrary $S-N$ curve and the linear cumulative damage law, complemented with various kinds of stress cycle counting methods (including two-dimensional rainflow counting) and mean stress corrections. On the one hand, SPECTRUN is a frequency domain fatigue analysis application used to perform characteristic analysis of arbitrary stress spectral data and fatigue damage estimation for the stress spectrum using an arbitrary $S-N$ curve and the linear cumulative damage law. SPECTRUN also has a function to simulate stress waves corresponding to the stress spectrum and store the stress wave data in the FATRUN format, facilitating time domain fatigue analyses of the simulated stress waves. Other fatigue analysis programs, namely, MooRUN used to time domain fatigue analysis of mooring systems, and FATCAL used to constant amplitude fatigue calculation, are also introduced briefly.

* 海洋開発系

原稿受付 平成28年1月 8日

審査日 平成28年2月22日

目 次

1. はじめに	94
2. FATRUN（時間領域疲労解析プログラム）	95
2.1 FATRUN の特徴	95
2.1.1 応力波形データファイル	95
2.1.2 オプションメニュー	95
(a) サイクルカウント法	95
(b) $S-N$ 曲線	96
(c) 平均応力補正法	96
2.2 FATRUN の構成	96
3. SPECTRUN（周波数領域疲労解析プログラム）	97
3.1 SPECTRUN の特徴	97
3.2 SPECTRUN の構成	98
4. その他の疲労解析プログラム	99
4.1 係留索用疲労解析プログラム MooRUN	99
4.2 疲労計算プログラム FATCAL	99
参考文献	99

記 号

S : 応力振幅または応力レンジ [MPa]
 N : 繰り返し数 [cycle]
 n : 応力データ数 [-]
 Δt : 応力データのサンプリング間隔 [sec]
 σ_n : n 番目の応力データ [MPa]
 D : 累積疲労損傷度 [-]
 σ_u : 引張強度 [MPa]
 σ_T : 真破断応力 [MPa]
 R : 応力比 [-]
 σ_m : 平均応力 [MPa]
 K_t : 応力集中係数 [-]
 T : 張力レンジ [kN]

1. はじめに

船舶や海洋構造物、橋梁、車両、工作機械等、各種構造物においては、構造部位や稼働状況に応じて様々な繰り返し荷重が作用し、金属疲労が問題となることが多い。

工作機械などでは、基本的に荷重サイクルが一定の定振幅繰り返し荷重と見なせる場合もあるが、多くの構造物では、荷重の増減や複数外力の重畳等により、最終的に構造部材に生じる応力の波形が複雑なランダム波形となることが多い。

一般に疲労設計の基礎となる構造材料もしくは構造部材の $S-N$ 曲線は、両対数座標または片対数座標の縦軸を応力振幅または応力レンジ S 、横軸をサイクル数で表した疲労寿命 N （破断寿命またはき裂発生寿命）として定振幅疲労試験データをプロットし、適切な統計処理を施すことによって得られる。従って、構造部材の実応力波

形が定振幅波形の場合には、平均応力の影響等は別途考慮するものの、基本的には対応する $S-N$ 曲線に応力振幅または応力レンジ S を当てはめれば直ちに疲労寿命 N が得られる。

一方、実応力波形が定振幅ではなくランダムな応力波形の場合には、そのままの形では $S-N$ 曲線に当てはめられないので、何らかの形で両者を結びつける必要がある。現状、そのような結びつけ方としては二通りの方法があり、一つは時間領域で応力波形を直接カウント（計数）する方法、もう一つはスペクトル解析を用いて両者を周波数領域で結びつける方法である。

当所では、上記の二つの方法に対応した疲労解析プログラムをそれぞれ開発し、時間領域疲労解析プログラム FATRUN および周波数領域疲労解析プログラム SPECTRUN と名付け、互いに補完し合うものとして一つのパッケージにまとめ、汎用疲労解析プログラム FATRUN / SPECTRUN として販売している。本稿では、それぞれのプログラムの機能や特徴について簡単に紹介する。

2. FATRUN（時間領域疲労解析プログラム）

時間領域疲労解析プログラム FATRUN は、テキストファイルに保存された任意の応力波形データについて、波形をグラフィック表示するとともに、数種類の波形カウント法による波形カウントを施して応力レンジの頻度分布を求め、任意の $S-N$ 曲線を用いた線形累積損傷則の適用により疲労寿命および疲労被害度を評価するプログラムである（使用言語：Visual Basic 6.0, 実行環境：Microsoft Windows を OS とする PC）。

2.1 FATRUN の特徴

2.1.1 応力波形データファイル

FATRUN 用の応力波形データファイルは1カラムのテキストファイルで、

- 1行目：データ数, n
- 2行目：サンプリング間隔, Δt (sec)
- 3行目：応力データ, σ_1 (MPa)
- 4行目：応力データ, σ_2 (MPa)
- ⋮

$n+2$ 行目：応力データ, σ_n (MPa)

という内容のみであり、計測や構造解析による応力時系列データを元にして、市販の表計算ソフト等でも容易に作成することができる。

2.1.2 オプションメニュー

FATRUN はもともと研究用のツールとして開発したプログラムなので、様々な手法を試しながら比較検討しやすいように作られており、現バージョンにおいてもその特徴は多様な波形カウント法や豊富なオプションメニューという形で引き継がれている。

(a) サイクルカウント法

前節で述べた通り、ランダムな実応力波形を時間領域で直接扱うには、いわゆるサイクルカウント（計数）を行ってランダム応力波形から個別の応力サイクルを抽出する必要がある。そのような応力サイクルカウント法として、古くは Peak 法（または Peak-Valley 法）、Level cross 法から Range 法、Rang Pair 法（または Rang Pair Mean 法）、Hysteresis Loop 法等々、疲労研究者レベルでは枚挙に暇がない程の多種多様なカウント法が提案され、一部は実際の設計に用いられもしたが、最近では国内・国外を問わず殆どすべての疲労設計分野で Rainflow 法が標準のカウント法として遍く普及しており、ランダム応力波形のカウントには Rainflow 法の使用を前提とする疲労設計規格も多い^{1,4)}。

余談になるが、多少なりとも構造物の疲労設計や疲労解析に携わったことのある人で Rainflow 法を知らないという人は希なのに対し、世界で初めて Rainflow 法を考案・命名し、その有効性を実証してみせたのが日本人の疲労研究者である^{5,6)}ということを知らない人は意外に多い。

さて、考案者自らも述べている通り、Rainflow 法は本来、任意の波形から振幅・平均値の 2 次元頻度分布を与えるアルゴリズムである⁶⁾が、実際には振幅頻度分布のみを用いて平均値の情報は捨ててしまうことが多い。一方、実構造物・機器に加わる荷重パターンとして、比較的長周期の 1 次波の上に短周期の 2 次波が重畳しているような場合は多く、例えば LNG 船のタンクでは荷役に伴う 1 次変動荷重の上に波浪やスロッシング等に起因する 2 次変動荷重が重畳することになるし、海洋開発に用いられるライザー管では上部浮体の動揺や慣性力による 1 次変動荷重に VIV (渦励振) による高周波振動が重畳する場合が多い。また、航空機の GAG (Ground-Air-Ground) 荷重と突風荷重の組み合わせは重畳ランダム荷重として代表的なものである。このような重畳ランダム荷重が作用する場合、1 次変動荷重による長周期の変動応力が 2 次変動荷重による変動応力の平均応力として作用するため、その影響を考慮するためには 2 次元 Rainflow 法を用いて応力レンジと平均応力を同時にカウントし、個々の応力レンジについて適切な平均応力補正を行う必要がある。著者らは以前、様々な重畳ランダム荷重下におけるアルミニウム合金溶接継手の疲労試験を実施し、2 次元 Rainflow 法による波形カウントおよび個々の応力レンジに対する平均応力補正を行うことにより、高精度な疲労寿命推定が可能となることを示した^{7,8)}。この流れを受けて、FATRUN においては 2 次元 Rainflow 法によるカウントを基本機能として備えているほか、1 次元 Rainflow 法、Peak 法、Range 法によるサイクルカウントも併せて行い、4 種類のカウント法各々についての疲労寿命や疲労被害度の解析結果が同時に表示されるため、カウント法によって解析結果がどのように変化するかを容易かつ定量的に把握することができる。

(b) S-N 曲線

FATRUN における累積疲労損傷度 D の算出には、Palmgren-Miner による線形累積損傷則（いわゆる Miner 則）を用いているが、その基礎となる S-N 曲線は、溶接継手を含む構造物材の疲労設計規格として代表的なもの (DNV¹⁾ および JSSC²⁾ の設計曲線) からメニュー形式で簡単に選べるようになっているほか、曲線の傾き、横軸切片、屈曲点、疲労限等の数値を直接手入力またはファイルで読み書きすることもできる。

(c) 平均応力補正法

2 次元 Rainflow 法でカウントされた個々の応力レンジに対する平均応力補正法としては、以下の 3 通りをメニューから選択することができる。

- ・引張強度 σ_u を用いた修正 Goodman 補正
- ・真破断応力 σ_T を用いた修正 Goodman 補正
- ・Gerber 補正

ここで特徴的なのは、各補正法とも、使用する S-N 曲線のデータ取得条件に応じて、応力比 $R=0$ (引張側の完全片振り) までの補正か、 $R=-1$ (完全両振り) までの補正かをオプションで選択することができるということである。もし各補正法の定義式通りに補正すると、一律に $R=-1$ まで補正することになるので、S-N 曲線の元データが $R=0$ で取得されたものである場合^{1,2)}には過安全な補正となってしまう (Fig. 1 参照)。

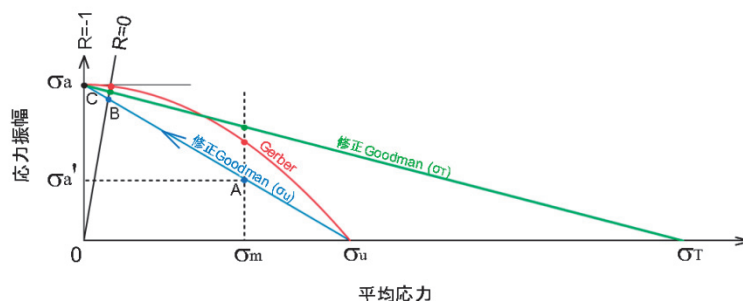


Fig. 1 Mean stress correction methods

2.2 FATRUN の構成

FATRUN の計算フォーム (プログラム画面) は一種類であり、このフォーム上ですべての操作と結果表示を行うことができる (Fig. 2)。解析の流れは以下の通りである。

- ①応力波形データの読み込みとグラフィック表示
- ②S-N曲線の設定（メニュー選択／ファイル読込，または手入力）
- ③平均応力補正を行う場合はメニューから補正法を選択，引張強度 σ_u （必要な時は真破断応力 σ_T ）の入力
- ④必要に応じて応力集中係数 K_t の入力
- ⑤RUN ボタンをクリックして解析実行 → 瞬時に解析結果を表示
- ⑥File メニューから Print または Save results を選んで解析結果を印刷または保存

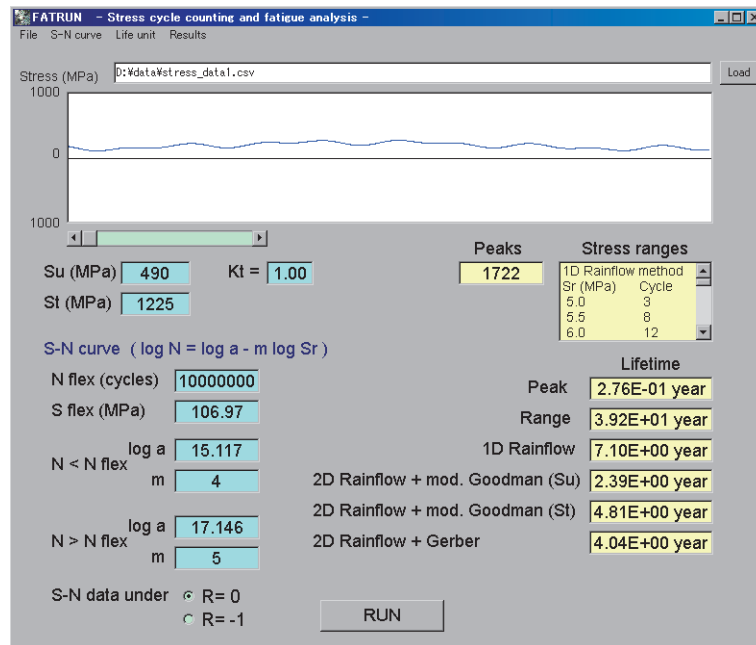


Fig. 2 Fatigue analysis form of FATRUN

3. SPECTRUN（周波数領域疲労解析プログラム）

周波数領域疲労解析プログラム SPECTRUN は，テキストファイルに保存された任意の応力スペクトルについて，スペクトル形状をグラフィック表示するとともに，周波数帯域幅パラメーター，標準偏差，ゼロクロス周期，帯域幅補正係数などの特性値を算出し，任意の S-N 曲線を用いた線形累積損傷則の適用により疲労被害度評価を行うプログラムである（使用言語：Visual Basic 6.0）。

3.1 SPECTRUN の特徴

SPECTRUN 用の応力スペクトルデータファイルも単純な 1 カラムのテキストファイルであり，作成は容易である。また，S-N 曲線も FATRUN と同様に国内外の代表的な設計規格^{1,2)}からメニュー形式で簡単に選べるようになっているほか，S-N 曲線の傾き，横軸切片，屈曲点，疲労限等の数値を直接手入力またはファイルで読み書きすることも可能である。

更に SPECTRUN には，周波数領域における疲労解析機能に加え，入力された応力スペクトルに対応した応力時系列データを，フーリエ成分波の重ね合わせによってシミュレートする機能があり，任意の長さの FATRUN 用入力データを簡単に作成できる。フーリエ成分波の位相は乱数を用いて自由にランダム化でき，多数の波形サンプルを用いることにより統計的に妥当な時刻歴解析を行うことが可能となる。

なお，波形解析および疲労解析の結果はまとめてテキストファイルに保存でき，シミュレートした応力時系列データはそのまま FATRUN の入力データ形式で保存することができる。

3.2 SPECTRUN の構成

SPECTRUN の計算フォームは疲労解析フォーム (Fig. 3) と応力波形シミュレーションフォーム (Fig. 4) の二種類であり、解析の流れは以下の通りである。

<疲労解析フォーム>

- ① 応力スペクトルデータの読み込みとグラフィック表示
- ② S-N 曲線の設定 (メニュー選択/ファイル読込, または手入力)
- ③ 必要に応じて応力集中係数 K_t の入力
- ④ FATIGUE ANALYSIS ボタンをクリックして解析実行 → 瞬時に解析結果を表示
- ⑤ File メニューから Print または Save results を選んで解析結果を印刷または保存
- ⑥ 応力波形シミュレーションを行う場合は WAVE SIMULATION ボタンをクリック

<応力波形シミュレーションフォーム>

- ① フーリエ成分波の位相設定用乱数の設定
→ 初期化後, 常に同一の乱数系列を使うか, シミュレーションを実行するごとにランダム化するかを選択
- ② シミュレーションの継続時間 (応力波形の長さ) を設定
- ③ SIMULATE ボタンをクリックしてシミュレーションを実行
→ シミュレートされた応力波形およびピーク値を表示
- ④ File メニューから, シミュレートされた応力波形データを FATRUN の入力データファイル形式で保存

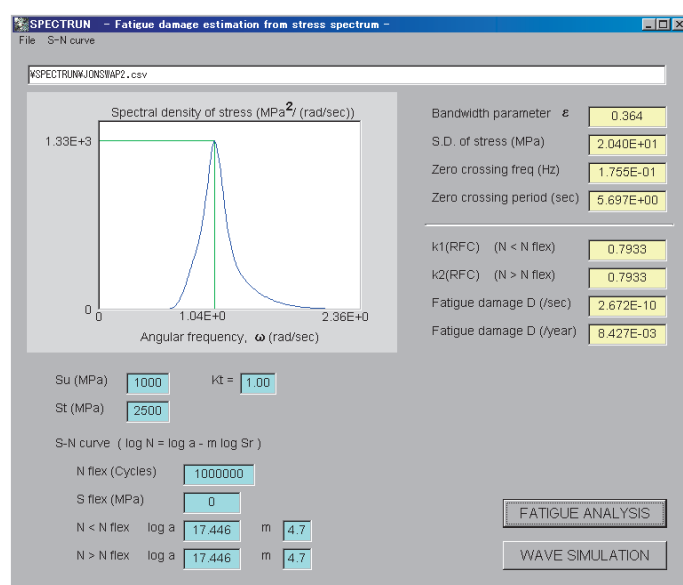


Fig. 3 Fatigue analysis form of SPECTRUN

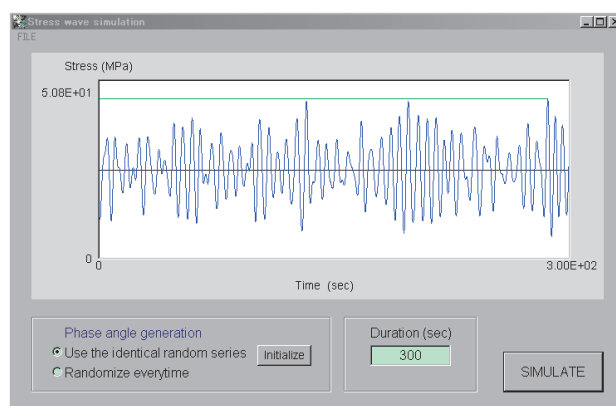


Fig. 4 Stress wave simulation form of SPECTRUN

4. その他の疲労解析プログラム

以上、汎用疲労解析プログラム FATRUN / SPECTRUN の機能や特徴、構成などについて概説したが、当所ではこれ以外にも用途に応じて種々の疲労解析プログラムを開発し外部への販売を行っているので、それらについても簡単に紹介しておく。なお、積層管の剛性・応力・疲労解析プログラム LAYCAL については本特集の他稿において詳しく解説しているので、ここでは取り上げない。

4.1 係留索用疲労解析プログラム MooRUN

チェーンやワイヤーロープなど各種の係留索に作用する任意の張力変動データをもとに、係留索の時間領域疲労解析を行うプログラムである。

テキストファイルに保存された任意の張力波形データについて、波形をグラフィック表示するとともに、Rainflow 法を始めとする4種類のサイクルカウント法による波形カウントを施して張力レンジの頻度分布を求め、対象とする係留索用の $T-N$ 曲線を用いた線形累積損傷則の適用により疲労解析を行う（言わば FATRUN の係留索版）。

$T-N$ 曲線はスタッドリンク、スタッドレスリンク、ワイヤーロープ、合成繊維索など、係留索の種類に応じて代表的なもの（ISO や API 規格の設計曲線）からメニュー形式で選択でき、数値を直接手入力することもできる。また、必要に応じて平均張力補正法も3通りの方法から選択できる（使用言語：Visual Basic 6.0）。

4.2 疲労計算プログラム FATCAL

任意の平均応力および定振幅繰り返し応力下における構造部材の疲労寿命を簡便に計算するプログラムである。基本コンセプトは「疲労電卓」であり、疲労の初心者でも短時間で容易に使いこなすことができる。

FATRUN と同様に、代表的な疲労設計規格の疲労設計曲線群から最適な $S-N$ 曲線をメニュー形式で選択してグラフィック表示するとともに、任意の平均応力補正を含む定振幅疲労寿命計算を瞬時に実行し、前記グラフ上に結果を表示することができる。また、 $S-N$ データ取得時の応力比 R を指定することにより、高精度な平均応力補正が可能である（使用言語：Visual Basic 6.0）。

参考文献

- 1) Det Norske Veritas, Recommended Practice DNV-RP-C203, Fatigue design of offshore steel structures (2010).
- 2) 社団法人 日本鋼構造協会 (JSSC) 編, 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版 (2010).
- 3) ASTM E1049-85, Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis (2011)
- 4) ISO12110-2, Metallic materials—Fatigue testing—Variable amplitude fatigue testing—Part 2: Cycle counting and related data reduction methods (2013).
- 5) 松石正典, 遠藤達雄: 変動応力を受ける金属の疲れ (第3報) —ランダム歪を受ける材料の寿命—, 日本機械学会九州支部講演会 (1968), p. 37.
- 6) 遠藤達雄: 実働疲労被害評価法の一断面 (レインフロー法の考え方を中心として), 日本機械学会論文集 (A 編), 54巻501号 (1988), pp. 869-874.
- 7) 高橋一比古, 前中 浩, 宮本 武: 重畳ランダム荷重下におけるアルミニウム合金溶接継手の疲労寿命推定—2次元レインフロー法の適用—, 日本造船学会論文集, 第174号 (1993), pp. 579-587.
- 8) 高橋一比古, 前中 浩, 高田篤志: 重畳ランダム荷重下におけるアルミニウム合金溶接継手の疲労寿命推定 (続報) —高周波成分の影響—, 日本造船学会論文集, 第179号 (1996), pp. 413-423.