

大量生産部品のリコールを防止するための 極値統計による新しい品質管理法*

A New Quality Control Method Based on Statistics of Extremes for Preventing Recalls for Mass Production Products

村上 敬宜
Yukitaka MURAKAMI

町田 尚
Hisashi MACHIDA

宮川 進
Susumu MIYAKAWA

高城 壽雄
Toshio TAKAGI

Recently, recalls for mass production products such as car components have been frequently reported even for the case that the rate of defects is only of the order of ppm or less. The objective of this paper is to propose the solution to avoid the recall problem of the order of ppm for mass production products. Even if the defect rate is of the order of ppm or less, most of remaining safe products have to be recalled and be replaced by new components. Such a recall causes a great cost deficit if the very rare defect is possibly related to fatal accident. However, it is very difficult by the conventional quality control methods to find the defects of the order of ppm or less at the stage of design and production. This paper proposes a new practical quality control method to avoid the defects of the order of ppm or less for mass production products based on the statistics of extremes which has been successfully applied to fatigue strength evaluation of defective materials. First, several examples of the quality control method to avoid the troubles mainly caused by failures and damages of components will be presented. Next, it will be shown that the same approach also can be applied to other problems such as the optimum control of operational parameters and the selection of optimum materials through the index based on the statistics of extremes. It will be also shown that the same method can be applied not only mass production components but also to avoid the troubles and failure accidents for large machine components of small number production. The stress-strength model approach will be reviewed from the viewpoint of the statistics of extremes.

Key words :

Quality control, Statistics of extremes, Defects, Recalls, Fatigue, $\sqrt{\text{area}}_{\max}$ parameter model, Nonmetallic inclusions, Cast Al alloys, Bearing steels, Spring steels

1. 緒言

近年、自動車産業における競争の激化により、同一プラットフォームでの生産量が巨大化し、さらに部品・材料の共通化が進み、かつてないほどの量が同じ設計基準で生産されるようになってきている。また、過去のリコール (NANER, 2017, 消費者庁, 2017) や人命にかかわる事故発生から、消費者の品質意識も高まり、

ひとたび大きなりコールや事故を起こせば自動車会社も部品会社も企業存続の危機に直面する (事例は文献参照)。こうした状況下でも自動車技術は進化し続け、ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車、自動運転車へ変化し、さらに軽量化、小型化の要求は強くなっている。また新幹線で代表される鉄道輸送や民間航空機のような大量旅客輸送では絶対的な安全性、信頼性が要求される。このような状況下で、従来の品質保証

* (一般社団法人) 日本機械学会の了承を得て、日本機械学会論文集 Vol.83 No.853(2017) より一部加筆して転載

方式を続けていけば、必ずや大きな問題に直面することは明らかである。これらのリコール製品の不具合率は数 ppm あるいはそれ以下である。にもかかわらず、その部品が人身事故などの重大事故の原因としての可能性が否定できなければ、問題のない残りの同じ部品もリコールの対象になり、巨額の損失を招くことになる。リコールは製造物責任法で認められているが、事故を起こした製品そのものは製造物責任法の対象になる。我が国の産業界は歴史的に製品の品質管理には特別の重点をおいており、我が国の製品の品質の高さは世界的にも高く評価されている。しかしながら、過度の高い品質保証は当然製品の高コスト化につながり、競争力の低下を招く。したがって、疲労強度などに関する研究は単に S-N 曲線を求めることや組織の微視的観察に留まらず、それらの成果を産業界の実践的問題の解決にまでつなげることが期待される。

本論文で取り上げる課題は大量生産品の数 ppm オーダの不具合が原因となって、残りの大部分の製品のリコールを余儀なくされる問題をいかに解決するかということである。従来の代表的品質管理法としては、これまでよく知られた標準偏差を指標とする方法やタグチメソッド（田口，1988）、DG³法（吉村，2002，2011）などが知られている。自動車部品などでは当然新たな開発品の耐久試験を行い、試験の範囲内では不具合が起らないことを確認するのであるが、従来の方法では数 ppm オーダの極少数の不具合を確実に見出すことは困難である。従来の方法では、設計段階では、極めてまれに起こる疲労破壊などは把握しにくく、市場で起こる不具合の原因を定量的に把握することなく、最終的な品質保証を根拠が曖昧な安全率で補うという発想が根底にあるからである。そのような方法で不具合が起らなければ、一応その製品の設計は成功とみなされるが、その製品で採用した安全率の裏に可能性のある原因が隠され、同じ設計法を次の製品に適用したときにその原因が不具合の原因として現れることがある。同じ問題は、大量生産品に限らず、大型少量生産品の開発などでも経験される。

本論文では、極値統計法（Gumbel,1958，高橋，志村，2016）を大量生産部品の品質管理に適用し、市場で起こる数 ppm 程度の不具合発生を製品開発の初期

段階から防止する実践的手法を提案する。多くの不具合は部品の疲労破壊などが原因になっている。村上らは、これまで $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデル（Murakami and Endo, 1994, 村上，1993, Murakami, 2002）と極値統計法を組み合わせることで微小欠陥を有する材料の疲労強度のばらつきの下限値を予測する方法を提案してきた。本論文では、部品の強度の視点から見た不具合を防止する品質管理の方法を中心に説明するが、基本的には他の種々の使用形態の動作パラメータから見た機能評価や材料選択の指標にも利用できることを例示しながら説明する。また、ここで提案する品質管理手法は、大量生産製品だけに限らず、原理的に少量生産の大型機械の不具合または事故防止にも応用可能なものである。

2. 極値統計法とそれに基づく極値の予測の意味について

極値統計は歴史的には海洋の巨大波や河川の洪水などの予測に用いられてきた。海洋の巨大波の予測は船舶や海洋構造物が受ける荷重予測と強度設計に生かされる。河川の洪水の予測は災害を防止する堤防や橋の設計に必要である。

Fig.1 は、ミシシッピ川の 52 年間 ($N=52$) の洪水の極値統計データを示している (Gumbel, 1958)。川の水量は毎日変化するが、この図では、1 年間 365（または 366）日の間の最大水量の値を洪水（極値）と定義している。縦軸 y は基準化変数 (Reduced variate) と呼ばれる量で、同じ縦軸に再帰期間 T (Return period) の目盛りも示している。横軸は洪水を示す水量である。縦軸の基準化変数 y は直感的には捉えがたい量であるが、二重対数になっていることに注目すれば、記録的な大洪水の発生は多頻度で起こるのではなく長期間を要することが理解できる。再帰期間 T の目盛りは、どれほどの大洪水が発生するにはどれぐらいの長期間がかかるかを示している。再帰期間 T と同じ方向にとった累積確率 F (Cumulative frequency または単に確率 Probability) は

$$F = n/(N+1) \times 100(\%) \quad (1)$$

で表される。

ここで、 n は N 個の中で、極値を小さい値から大きい値に順に並べたときの n 番目の極値の番号を意味する。

すなわち、極値統計データは、これまでに経験した最大の洪水を基に堤防や橋の建設をするのではなく、将来に亘って起こりうる大洪水を考慮に入れるために有用なのである。これを大量生産部品に置き換えて考えれば、10 個や 20 個の部品の耐久試験を行い、その平均値や最弱値を基に従来どおりの設計を行っても数十万個、数百万個に達する部品の品質を保証することはできないことを意味している。従来の品質管理手法では、製品の不具合の確率には注目するが、不具合の原因となる欠陥などを同定し、それを定量的に把握する方法を見出していない。ここに最近のリコール多発の根本原因があるのである。

Fig. 1 のような極値統計解析は母集団が正規分布や指数分布のように分布の裾野 (tail) が指数関数分布を有している場合に適用可能である。すなわち、Fig. 1 の場合、母集団となるミシシッピー川の水量の分布は、縦軸に日数、横軸に水量をとったとき、Fig. 2 のように正規分布になることを仮定している。河川の洪水の場合には、地球温暖化の影響で母集団の分布に変化が起る可能性もあるが、少なくとも過去数十年のデータを拠り所にしなが、母集団の変化に注目することになるであろう。自動車部品に代表される機械部品も部品の耐久試験で得られる強度などの量は当然ばらつきを示し、そのばらつきは正規分布と仮定されることが多いが、不具合の元々の原因となる欠陥や材料中の非金属介在物などは指数分布に近いことに注意しておかねばならない。

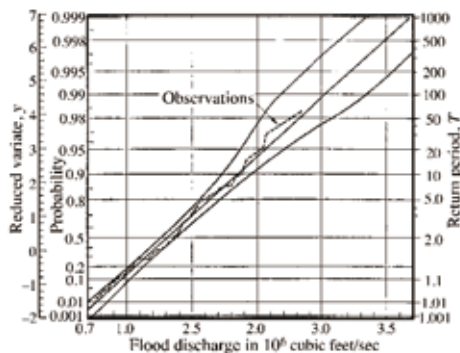


Fig. 1 Statistics of extremes analysis of 52 years flood data of Mississippi river (Modified from (Gumbel, 1958))

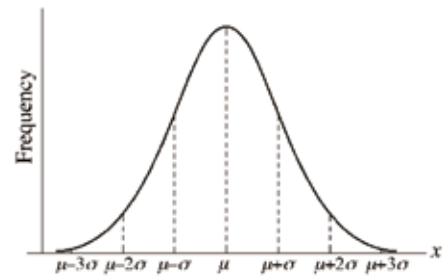


Fig. 2 Typical yearly frequency of water level

Fig. 3 は、1960 年代から 1990 年代にかけて製造された軸受の品質を介在物の極値統計の観点から評価したものである。軸受の縦断面と横断面について、基準面積 $S_0=0.384\text{mm}^2$ 当たりに観察される最大の介在物寸法を顕微鏡観察で観察し、極値統計プロットしたものである。時代とともに軸受鋼の清浄度が改善されている様子が理解できる。この方法は、時代の差だけでなくむしろ製鋼メーカーの実力差の評価に有効である。この方法 (村上, 1993, Murakami, 2002) は 2002 年に ASTM Standard (ASTM, 2002) として採用されている。我が国の介在物評価法は 1955 年に JIS 点算法が制定されたが、もはや有効性を失ったまま放置されている。Fig. 3 の例は、狭い面積の顕微鏡観察を基にしたものであるが、最近では、超音波疲労試験 (Furuya et al., 2003) や水素チャージを利用した方法 (Fujita and Murakami, 2013) が提案されている。これらの方法は 1 本の試験片や 1 つの部品の中の最大介在物を代表値として取り出すので信頼性が高い。

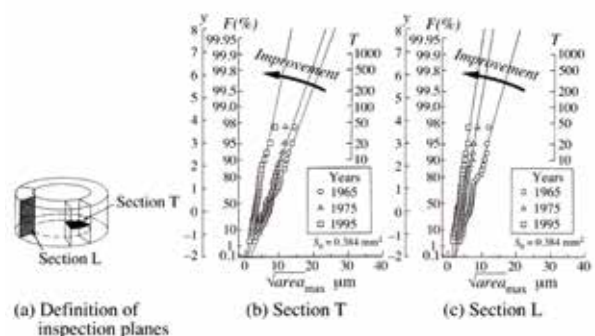


Fig. 3 Variation of cleanliness in bearing steels since 1965. Inclusion rating was made based on the statistics of extremes analysis. (Modified from (Y. Murakami, 2002))

3. リコールを防止するための方法

3.1 不具合要因の発見と極値統計解析の方法

不具合要因を見出すためには対象部品に過大負荷を与えて壊してみることが重要な糸口になる。先に述べたように、10あるいは20個程度の対象部品について設計荷重での耐久テストを行って安全性（不具合が発生しないこと）を確認する手法では市場での数ppmオーダーの不具合を発見することはできない。過大負荷によって壊すことによって、すなわち強制的に不具合を発生させることによって、数ppmオーダーの不具合の原因を見出し、さらに原因の大きさ（すなわち極値）を定量的に評価することができるのである。

この手法の手順は次のように纏めることができる。ただし、手順を実行する場合のサンプル数などは個々の場合によって適切に選ぶ必要がある。

(1) N 個（例えば、 $N=10-40$ ）の当該部品を壊す試験を行う。

Fig. 4は、疲労試験の破壊面に観察された非金属介在物の例を示す。このような非金属介在物はしばしば機械部品の破壊起点になる。ばね、軸受、歯車、車軸などはこの種の問題を抱えている。1つの部品や試験片に含まれる介在物の数は膨大で、寸法は $1\mu\text{m}$ 程度の極めて微小なものからFig. 4に示すような比較的大きなものもあり、母集団の分布はほぼ指数分布になる。部品ごとに最大の介在物（極値）の寸法が異なるので、同じ荷重または応力を負荷しても部品または試験片の疲労寿命が大きくばらつく。

(2) 試験によって破壊した箇所に観察される破壊起点の欠陥などの寸法を $d_{\max,i}$ とする。すなわち、破壊の原因にならない微小な欠陥は無数にあるが、破壊試験でこれらの中の最大のもの（代表値または極値という）を取り出すことになる。これによって N 個の代表値（極値）が得られる。例えば、Fig. 4のような介在物がその試験片の代表値である。非金属介在物形状は一般に必ずしも円形とは限らないので、疲労や破壊の分野では、き裂の応力拡大係数の最大値と相関をもつ代表寸法として、介在物の面積 $area_i$ を測定し、長さの次元を持つその平方根 $\sqrt{area_i}$ を採用する(Murakami and Endo, 1994, 村上, 1993, Murakami, 2002)。すなわち、

$d_{\max,i} = \sqrt{area_i}$ である。

(3) $d_{\max,i}$ ($i=1-N$) を小さい値から大きい値まで並べ直し、番号を小さいものから順に $d_{\max,n}$ ($n=1-N$) のようにつける。すなわち、 $d_{\max,1}$ が N 個の代表値の中で最小値で、 $d_{\max,N}$ が最大値である。

(4) $d_{\max,n}$ をFig. 5のように、極値統計グラフにプロットする。横軸の値は $d_{\max,n}$ で縦軸の値は $n/(N+1) \times 100\%$ である。プロットしたデータが極値統計グラフ上で直線を示せば、データは極値統計に従うと考えてよい。

(5) N 個以上の試験片または部品に含まれることが予想される d_{\max} ($= \sqrt{area_{\max}}$) を求めるには、その総数を N_T とすると、再帰期間 $T = N_T$ の目盛りに相当する d_{\max} ($= \sqrt{area_{\max}}$) を求めればよい。試験片でデータ取得し、試験片より大型の部材中の最大値を求めるには、試験片の体積を V_0 (基準体積, Standard volume), 生産される部品の総体積を V_T とすると、 $T = V_T / V_0$ の目盛りに相当する d_{\max} ($= \sqrt{area_{\max}}$) を求めればよい。なお、ここで体積とは高い応力（定義は付録参照）が作用し、破壊起点となることが予想される部位の体積（危険体積）であり、部品の全体積ではない。総体積とは、1部品の危険部位の体積に生産部品数を乗じた体積である。



Fig. 4 Inclusion observed at fracture origin (Murakami et al., 2000a)

3.2 不具合要因の極値統計データと設計への反映

前節の手順によって不具合を起こすことが予想される原因の極値統計データが得られれば、種々の方法でそれを設計に生かすことができる。その具体例を以下に示す。

Fig. 5は次の2つの重要な情報を与えてくれる。

(1) Fig. 5の直線を外捜することにより、試験を行っ

た N 個より多数の部品に含まれることが予想される欠陥の最大寸法 d_{\max} を予想することができる。例えば、市場に投入する部品または製品の数を 10 万個と仮定すると、試験した部品の数に比較する値として定義される再帰期間 T を $T=10^5$ で表す縦軸の位置まで直線を外捜し、その位置での横軸の値 $d_{\max, T=10^5}$ を読みとる。Fig. 5 の直線のデータが試験片によって得られたものであれば、実際の部品に応用するには、前節の (5) で述べたように試験片の体積と部品の総体積を基にした再帰期間 T を用いばよい。

(2) 別の方法または別の材料で同じ部品を製造し、同様な試験を行った結果を Fig. 5 に合わせてプロットすると前回の品質との差が一目瞭然となる。前回の試験の結果を示す直線を A とし、別の直線を B とすると、B が A より左側に位置し、しかも傾きが A より急であれば大量生産での品質は A より B が良いということになる。また、B が A より左側に位置しておれば、相対的に B の品質が良いといえるが、量が多くなれば、直線の傾きを考慮に入れなければならない。この性質は適切な材料選択や部品供給メーカーに対する技術評価にも利用できる。このような視点で Fig. 3 を見ると、軸受鋼の清浄度が年代によってどのように改善されたか一目瞭然となる。

したがって、上の 2 つの手順を設計に取り入れるには、次の手順に従えばよい。この手順をフローチャートで表現することもできるが、内容を理解しないままマニュアル的にフローチャートに従えば、問題点を見過ごす恐れもあるので、あえて文章で説明する。

(a)

(a-1) まず (1) の手順で生産量に相当する最大の欠陥寸法を推定する。その寸法を考慮して付録に示す強度計算などを行う。その計算によって品質が保証できれば一応合格である。

(a-2) しかし、不具合の可能性が見出されれば、(2) の手順による改善を行わなければならない。すなわち、まず形状・寸法または製造方法の変更を試みるのが選択肢の 1 つになる。ただし、この段階では、安全率の設定の検討は行わない。曖昧な安全率の設定はあるべき技術の追求を妨げる。環境因子などを考慮した安全率は、この手順での設計を終了した後に検討する。

(b) 次の選択肢は材料の変更である。材料の変更は必ずしも別の種類の材料へ変更することを意味しない。例えば、軸受鋼 SUJ2(SAE52100) は名前が同じでも、介在物寸法の極値統計データは Fig. 3 のようになり、世界の製鋼企業の実力には差があることが知られている。ばねのように多量生産部品では、ばね鋼について同様な問題が知られている (斉藤, 伊藤, 1985, 村上他, 1990, 村上他, 1991)。このような例では、清浄度の高い材料への変更が 1 つの有効な解決策となる。材料を異なる種類のものに変更する場合には、前節の手順に従って新たな極値データを取得することになる。熱処理を変更すれば、基地組織の強度は向上するかもしれないが、介在物の寸法は変わらないことに注意しなければならない。また、基地組織の静的強度が高くなる (硬く) になると、基地組織そのものの疲労強度は上昇するが、疲労強度は小寸法の介在物にも敏感になることにも留意しなければならない。

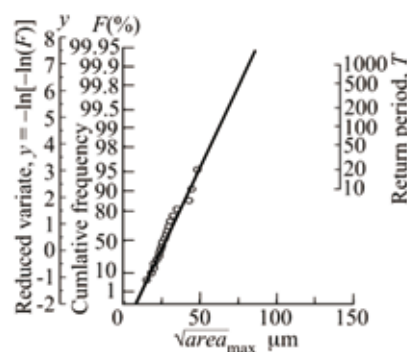


Fig. 5 Statistics of extremes of inclusions

3.3 極値統計法を利用した設計と品質保証の事例

事例 1 鋳造アルミ合金部品の疲労強度設計

Fig. 6 (a), Fig. 6 (b) は、トラックのロッカーアーム用 Al 合金の鋳造欠陥を示している (小林, 1995)。大寸法の鋳造欠陥は疲労強度に有害であり、許容応力を高く設定することは困難になる。欠陥寸法を小さくする鋳造方法で品質のよい部品を製造することが望ましいがコストの増大につながる。また、少量の検査で欠陥寸法が小さくても、大量生産の中にはばらつきによって大寸法の欠陥を含むものが出てくる可能性もあ

る。このような場合、どのような鋳造方法なら許されるかを判断する場合に、極値統計が有用なのである。

Fig. 6 (c) は、3つの鋳造方法によるAl鋳物の欠陥の極値統計を示している。3つの中から、設計者がコストを考慮して、どれを選択するかということになるが、どれほどの部品数を生産するか、その中で最大寸法の欠陥はどれほどかを定量的に判断できるから、従来の曖昧な安全率に基づく設計より、はるかに信頼性が高い。

事例2 エアコン用スクロールコンプレッサー用部品開発への適用

これまでアルミニウム合金ダイカスト材料は低い負荷の構造部品として使われていた。地球環境保護の観点から自動車部品の高性能化や小型・軽量化が求められている。このような状況で、高い負荷に耐えるエアコン用スクロールコンプレッサー用部品開発が必要になった。これまでは製品を市場に出すまでに耐久試験で疲労破壊するたびに工程改善が必要であった。耐久試験で疲労破壊が頻発すれば工程改善を繰り返さなくてはならず開発期間の長期化をまねく。そこで、次期型

製品を限られた期間で開発するにあたって、極値統計法による新しい品質保証法の提案を行った。ダイカスト法は大量生産面、コスト面および複雑形状に対応可能であるので、各種軽量化材料の中からアルミニウム合金ダイカストを選定した(山田他, 2002)。

材料中の鋳造欠陥評価に極値統計法を適用し、疲労強度評価に \sqrt{area} パラメータモデル(付録参照)を用いた(Fig. 7 (a), Fig. 7 (b))。開発過程を以下に示す。

1. 許容欠陥寸法に注目した工程開発。
2. 切削加工の影響(残留応力)、熱処理の影響(硬さ)、表面処理の影響等の評価。

このような開発を成功させるには、材料分野、処理分野、加工分野(ダイカスト部門、熱処理含)および設計分野(耐久試験、この場合FEM解析も対応)が一体となった活動が必要である。なお、疲労強度評価結果を \sqrt{area} パラメータモデルで図化したFig. 7 (c)は材料開発の指針を示すことに役立つものと思われる。鋳造欠陥に対して極値統計を適用したこの設計方法はその後の他製品の次期型製品開発にも受け継がれている。

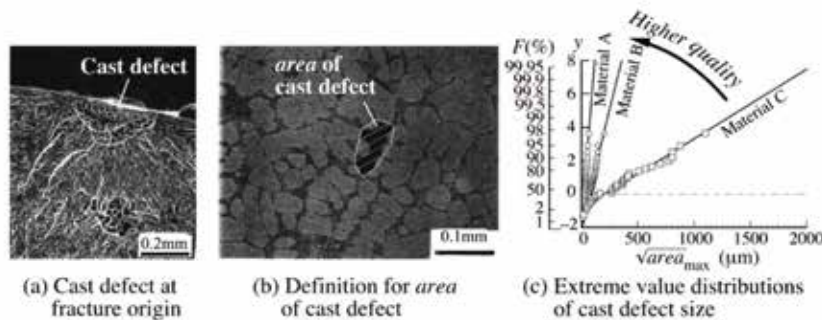


Fig. 6 Cast defects in Al alloy and analysis of cast grades based on the statistic of extremes (Modified from (Kobayashi, 1995))

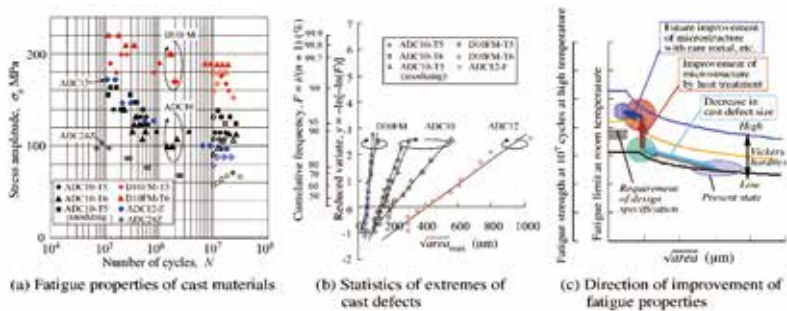


Fig. 7 Development of high fatigue strength Al alloys for car compressor based on fatigue tests, statistics of extremes analysis of cast defects and the \sqrt{area} parameter model

信頼の確立

事例3 Half Toroidal CVT の超長寿命疲労強度設計

Fig. 8 に示す Half Toroidal CVT は車両用や航空機用無段変速装置として開発された (Machida and Abe, 1996, Machida, 2005). 歯車による変速によらないので、極めてスムーズな変速が可能である。この CVT は世界で数十年にわたり開発が進められていたが、開発初期から予想された困難は潤滑特性と摩擦特性という相反する両方の機能を発揮する潤滑油の開発であった。この困難を克服して、開発は達成されたと思われた。しかし、性能確認のために行った耐久試験において新たな問題が発生した。問題はオイルだけでなく、部品の疲労破壊にあった。大きな摩擦力を発生させるためには大きな押し付け力をかける必要があり、その押し付け力により部品内部には大きな応力が発生して非金属介在物から疲労破壊を招いていた。さらに自動車のエンジン出力は数十年の間にどんどん大きくなった、そのエンジンに見合うだけの応力設計ができていなかった。この材料の問題を試験片の引張圧縮疲労試験で調査したところ、試験片でも疲労破壊の起点はすべて非金属介在物であった。さらに、疲労試験の結果は疲労限度を示さない超長寿命疲労現象 (Murakami et al., 2000a, 2000b) を示すものであった。すなわち、疲労限度を求め、それに安全率を考慮した通常の疲労限度設計は通用しないことが明らかになった。この CVT に関する疲労限度を示さない超長寿命疲労現象は水素を含むガス中での熱処理過程で介在物にトラップされた水素が関与し、介在物の寸法が大きいほど寿命が短いことが明らかにされたので、設計には最大介在物寸法と CVT の運転保証繰返し数 (疲労寿命) との関係が必要になった。介在物寸法と必要な運転保証繰返し数 (疲労寿命) から設計応力 (許容応力に相当) を決定するために \sqrt{area} パラメータモデル (Murakami, 2002, Murakami and Endo, 1994) を適用した (詳細は付録参照)。

まず調査すべきことは Half Toroidal CVT に使用される材料 (SCM435) に含まれる介在物の寸法の極値統計データである。例えば、Fig. 5 のように 10 ~ 40 本程度の試験片について引張り圧縮疲労試験を行い、破断面に観察された介在物寸法の極値統計データを得る。先に述べたように、介在物周辺には Fig. 9 のような水素

の関与によって疲労き裂成長が助長される領域 ODA (Optically Dark Area) が観察される (Murakami et al., 2000a, 2000b, Roiko and Murakami, 2012). ODA 寸法が作用応力のもとで水素の助長無しでも成長可能な疲労き裂進展下限界値 ΔK_{th} を満たす寸法にまで達すると、き裂は水素の関与無しに進展を開始する (Murakami et al., 2000a, 2000b, Yamashita and Murakami, 2016, Matsunaga et al., 2015). その限界寸法 \sqrt{area}_{ODA} (Fig. 9 の黒く観察される領域) を顕微鏡観察で測定すると、元の介在物寸法 \sqrt{area} と \sqrt{area}_{ODA} と疲労寿命との間にはほぼ 1 対 1 の関係があることが明らかになった。すなわち、疲労寿命 N_f と \sqrt{area} 、 \sqrt{area}_{ODA} の間の関係は次のように表せることが明らかになった (Roiko and Murakami, 2012, Yamashita and Murakami, 2016).

$$N_f = f(\sqrt{area}_{ODA} / \sqrt{area}) \quad (2)$$

この関係を図示すれば、Fig. 10 (b) のようになる。この場合には水素が影響することで疲労限度は存在しないので、通常の疲労限度設計ではなく、超長寿命疲労現象を考慮した寿命設計を行わなければならない。このような新たに発見された現象を知らずに製造すると、リコールを避けることはできない。仮に、市場での想定寿命 N_f を $N_f = 5 \times 10^8$ に設定すると、Fig. 10 (a) の極値統計データを利用する設計手順は次のようになる。

1. 極値統計データを求めるため行った疲労試験片の試験部の体積 V_s を計算する。
2. 介在物が疲労破壊起点となる可能性がある部品 1 個中の危険体積 V_0 を計算する。
3. 部品の生産数 N を決定する。
4. 再帰期間 T (Return period) を決定する。 $T = NV_0/V_s$
5. 極値統計グラフ (Fig. 10 (a)) の再帰期間 T に相当する予想最大介在物寸法 \sqrt{area}_{max} を推定する。
6. 予想最大介在物の寸法が \sqrt{area}_{max} から ODA を加えた寸法 \sqrt{area}_{ODA} に成長する程度 γ ($\gamma = \sqrt{area}_{ODA} / \sqrt{area}_{max}$) を設定寿命 $N_f = 5 \times 10^8$ から推定する (Fig. 10 (b)).
7. \sqrt{area}_{ODA} を \sqrt{area} パラメータモデルの疲労強度予測式 (付録参照) に代入し、許容応力を決定する。

以上説明したように、軸受鋼のような熱処理した高

強度鋼で非金属介在物を起点とした疲労破壊の可能性がある場合には、通常の疲労限度設計ではなく使用期間中に部品に繰り返される応力サイクルを考慮した超長疲労寿命設計を行うことがリコールの原因となる不具合を避ける方法になる。この方法は、曖昧な安全率を設定するのではなく、部品の生産数に対応した強度の下限値を許容応力として設定する。このように Half Toroidal CVT では、新しい品質保証の理念を導入することでこれまで一件の不具合も発生させていない。

ここで紹介した事例は大量生産部品を対象にしたものであるが、同じ手法は船用ジーゼルエンジンのクランクシャフト、歯車、タービンローター、製鉄用圧延ロールなどの大型機械製品にも適用可能である。この場合は、製品の生産数としては少ないが、破損の可能性のある部位の体積は小型の大量生産品の総体積にも匹敵するので、小寸法の試験片から得られた介在物などの欠陥に関する極値データにおける再帰期間 T は小寸法の大量生産部品と同様に極めて大きくなる。この方向の品質管理はいくつかの企業においてすでに実績が得られつつある。少量大型製品の問題は、大量生産数の中の ppm 程度の破壊または不具合による全製品のリコールではなく、一つの欠陥を起点とする大型製品の壊滅的破壊または損傷である。



Fig. 8 Half Toroidal CVT

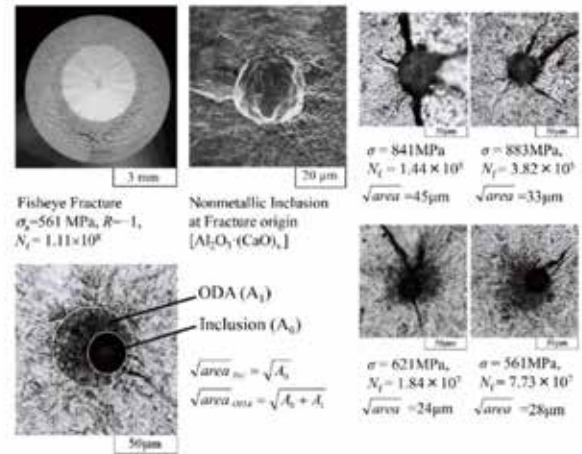


Fig. 9 Fatigue fracture origin and ODA (Optically Dark Area)

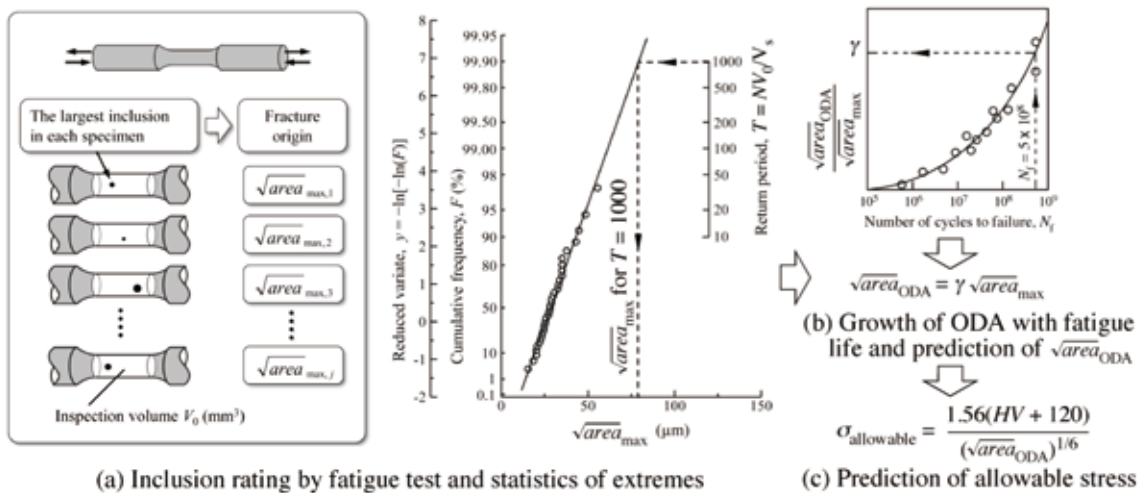


Fig. 10 Very high cycle fatigue design concept for Half Toroidal CVT based on inclusion rating, statistics of extremes and fatigue crack growth curve of hydrogen influenced area around inclusion

信頼の確立

事例4 リコールとなったエンジンバルブスプリング

自動車エンジンの弁ばね (Valve spring) は自動車部品の中でも部品数が多い要素である。弁ばねの損傷はクルマの心臓ともいべきエンジンの動作に直接影響するので、重大な事故につながる可能性が高い。弁ばねの耐久性については、当然ばねの要素試験のほかエンジンの耐久試験の中でも確認されるはずである。しかし、それでもリコールに至る損傷が起こることがある。弁ばねの材料には硬さの高い高強度鋼が使用される。ばねの疲労破壊ではしばしば非金属介在物が破壊起点になる (村上, 1993, Murakami, 2002, 齊藤, 伊藤, 1985)。そのため、介在物の寸法を小さくするたゆまない努力がなされてきた (齊藤, 伊藤, 1985)。それでも、生産部品個数が 10^5 ~ 10^6 のオーダーあるいはそれ以上の数になれば、通常の品質管理法では 1ppm オーダーの不具合の発見は困難である。

Fig. 11 (a) は、そのようなリコールの対象になった弁ばねを示す。Fig. 11 (b)、Fig. 11 (c) は、このばねに観察された非金属介在物である。非金属介在物の存在を確かめるために、同種の弁ばねに一旦焼き鈍しを施し、直線に伸ばした後、焼入れを行い硬さを高めた。次に、それに水素チャージを施し、引張り試験を行ったところ破壊面に介在物が現れた (方法については Fujita and Murakami, 2013 を参照)。このばねに限ると介在物は寸法が小さく、通常の設計で想定された使用条件では破壊の起点になる可能性はないと考えられる。

介在物寸法の統計的分布特性を考慮すると、リコールの原因となった弁ばねには Fig. 11 (c) よりかなり大寸法の非金属介在物が存在していたことが推定される。そのような大寸法の介在物は設計時には想定されず、耐久試験でも見出すことは困難である。市場で

は 10^5 ~ 10^6 のオーダーあるいはそれ以上の個数のばねの耐久試験を実施しているのと等価なのである。それでは、このようなリコールを未然に防止するにはどうしたらよいであろうか? それには、次のような方法が考えられる。ばねに加工する前の鋼線を焼入れし、硬さを高め、次に水素チャージを施した試験片を 50~100 本程度準備する。本数が多いほど予測の信頼性が高いことはもちろんである。これらの試験片を引張り試験し、破壊面に現れた非金属介在物の寸法を測定し、極値統計グラフにプロットする。市場に投入するクルマの生産台数から予想される弁ばねの個数 N_T を再帰期間 $T=N_T$ として、外捜によって、市場での最大介在物寸法を推定する。事例3と同様な手法で弁ばねのビッカース硬さ HV と最大介在物寸法を基に疲労限度を推定する。ただし、ばねに作用する応力はねじりであるから疲労限度推定にはそのことを考慮しなければならない。また、介在物を起点とする疲労破壊では、介在物がトラップする水素の影響で疲労限度が消滅する現象があるので、市場での繰返し数に応じて有効な欠陥寸法を実際より大きめに評価しなければならない (事例3と付録参照)。

この種の問題は設計技術者だけの努力で解決できるものではない。仮に、クルマメーカーが数社の製鋼メーカーに新たなばね材料の開発を要請したとしよう。このとき、1社の他は問題点を挙げて困難を指摘した場合に、受注に成功した1社が指摘された問題点を真に解決するかどうか注目しなければならない。ばねメーカーについても同様である。ばねを100個耐久試験したとする。その場合に1個だけ異状に強度が低いデータが出たとしよう。これを異常値として捨て去り、クルマメーカーに強度保証をしても、開発段階のエンジンの

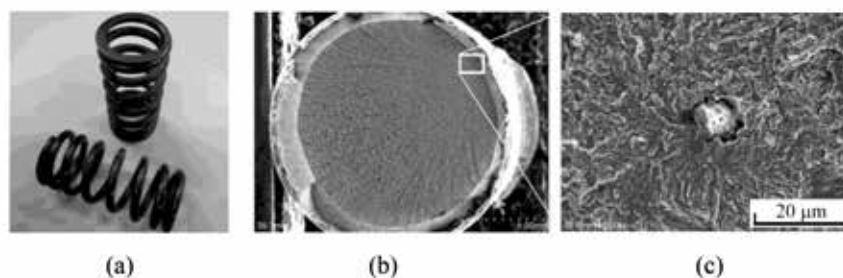


Fig. 11 (a) Valve spring (b) Tensile fracture by hydrogen embrittlement (c) Nonmetallic inclusion at fracture origin of (b)

耐久試験では、この異常値（極値）は発現しない可能性が高い。しかし、市場ではほぼ確実に不具合となって現れるのである。このような問題を避けるためには、製鋼、ばね製造、設計に関わる技術者間での情報交換による現象の共有と極値統計データに基づいた製鋼プロセス変更へのフィードバックが必要である。

事例5 機能パラメータ（作動荷重など）の極値統計評価による品質管理（疲労破壊以外の対象への適用）

1種類の部品の品質管理では通常正規分布を示すばらつきに注目するが、複数の部品を組みつけて1つの製品にする場合には構成部品の個々のばらつきが正規分布であっても全体としての機能のばらつきが正規分布になるとは限らない。このような場合には、タグチメソッドはロバストな設計として有効である。しかし、複数の構成部品からなる製品の ppm 以下の不具合を防止するにはどうしたらよいであろうか。このような事例として、一般家庭で使用されている蛇口を取り上げる（浅野間他，2017）。蛇口的主要なトラブル事例としては「水漏れ」や「レバーハンドル操作が重い」現象がある。これらトラブルの主要因子として、Fig. 12の概略図に示すセラミックディスクの表面性状およびセラミックディスク間の面圧の大きさ N に注目した。

セラミックディスク間の面圧 P が低い場合は「水漏れ」が生じ、高い場合は「レバーハンドル操作が重い」など操作力 F' の増大につながる。面圧 P の適正な管理が必要である。面圧 P は各部品の寸法および物性により決まるので、複数の部品が組みあがったバルブ部品での状態では、その値にばらつきが生じることは避けられない。したがって、量産時において、面圧のばらつきを把握し、生産量に対応した最大値及び最小値を管理することが極めて少数の不具合製品に起因する全製品のリコールを回避するために必要である。

まず、一定押し込み変位に対する面圧のばらつきを調査したところ、ばらつきは正規分布ではなく、極値分布に近いゆがんだ分布であることがわかった。そこで、開発過程において極値統計法を面圧の管理に適用することで大量生産品の品質管理を実施した。

まず、同じ生産ラインで製造したバルブ部品を 50

個抜き取り、作動テストによる面圧を極値統計グラフにプロットした。その結果を Fig. 13 に示す。データの直線性からこの製品のばらつきは極値統計に従うことが明らかになった。生産量 5000 個（再帰期間 $T=5000$ ）に対する面圧の各推定値が過去に不具合を起こした経験から得られた管理上下限值内であることを確認した。

レバーの操作感をさらに改善するためには、水漏れが生じないことを担保しつつ面圧を下げるのが求められる。そこで、さらに一部の部品の成形条件を見直し、極値分布を求めた。成形条件を見直し後、同様に 50 個抜き取り、面圧の極値統計分布を求めた。その結果を Fig. 14 (a) と Fig. 14 (b) に示す。最大面圧の推定値が成形条件見直し前後で低くなったことが確認できる。

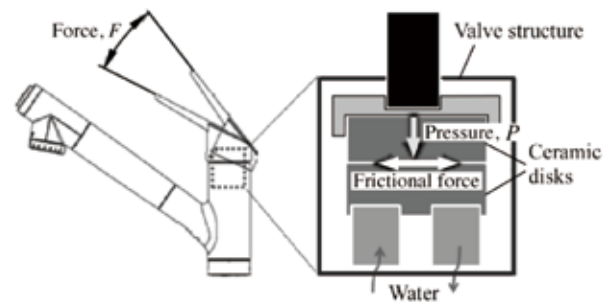


Fig. 12 Structural model of faucet system

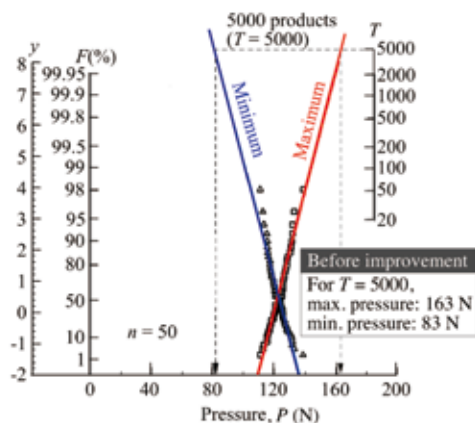


Fig. 13 Statistical property of pressure P in 50 tests

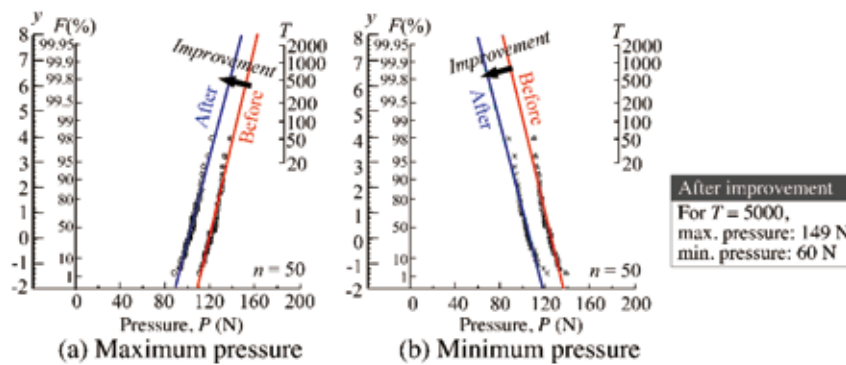


Fig. 14 Improvement of press load P by changing ceramic component processing

このように、統計的にばらつきを示す面圧を極値統計の観点から評価することにより製造条件の変更の方向を正しく決めることができる。この事例は疲労破壊などの部品の破損ではないが、統計的評価の観点からは本質的に同じ内容を持っており、同じ手法が他の同様な大量生産部品にも応用可能であることが理解できる。ここで、注目すべきことは、個々の部品間の界面の性状や接触状態は部品寸法などの主要パラメータに関する正規分布特性には現れないことである。個々の構成部品の寸法などのばらつきが正規分布であっても、組みつけた後の製品の機能のばらつきが極値統計分布を示す理由については今後理論的な研究が必要である。

4. 極値統計法を適用するための基本的考え方と指針

4.1 何をパラメータと考えるべきか

前章までに極値統計法の基本的考え方といくつかの事例について述べた。数 ppm あるいはそれ以下のオーダーの不具合に対応するためには、すでにシックスシグマ (6σ) というマネジメント手法があると考えられるかもしれない。しかし、その方法では、耐久試験での強度の分布や寿命の分布を正規分布と仮定して表現し、製品のばらつきが目標範囲内に入るように設計を行うことになる。その場合、耐久試験の数は限られるので、正規分布での表現がどれほど正確に分布の裾野の性質を捉えているかは疑問である。また、重要なことは、その正規分布のパラメータは不具合を起こす元の原因その

ものの定量的データではないことである。例えば、製品を構成する材料中の介在物や鑄造欠陥が破壊の原因の場合、介在物そのものの統計的性質ではなく、製品の強度または寿命をパラメータとしていることである。

4.2 ストレス・ストレングスモデルの再考

世界の自動車メーカーの技術者によるシンポジウムなどでの講演では、Fig. 15 のようなストレス・ストレングスモデルを使った強度設計の説明が当然のようになされる。このモデルでは負荷応力と部品の強度が正規分布であることが仮定されている。この仮定は正しいであろうか？部品の強度の分布が正規分布であることを確認できるほど数多くの試験がなされているであろうか？部品の代わりに疲労試験片を考えてみよう。疲労試験片の破壊は試験部の最弱部で起こる。1つの試験片の試験部を一定厚さに輪切りした小試験片の集合と考えれば (Fig. 16)、破壊はこの集合の中の最弱の小試験片で起こる。1つの集合 (母集団) の各小試験片の強度が正規分布に従うとすると、 N 個の試験片すなわち N 個の集合の破壊強度の代表値 (最弱値) は正規分布ではなく、極値分布に従うことになる (Freudenthal and Gumbel, 1956)。このように、現在自動車メーカーなどで当然のこととして設計の基本概念となっているストレス・ストレングスモデルについては部品ごとに根本から考え直す必要がある。特に、製品の使われ方が厳しくなっている部品から検討を始めるのが有効であろう。



Fig. 15 Stress-Strength model

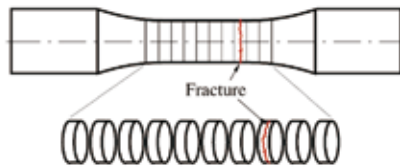


Fig. 16 Fatigue failure at the weakest section. One smooth specimen can be assumed as a set of many small disk specimens

4.3 他の未然防止法との組み合わせ

本論文で紹介した極値統計法では、製品を過大負荷で壊すことによって計画的に不具合の源を見つけ、それを定量化する。不具合の候補となる欠陥などは無数に存在するが、それらの中の極値を取り出すことによって、市場で起こることが想定されることを未然に防止する。水素が関与する疲労強度問題などは従来の設計法の枠には収まらないので、事例3のような新たな取り扱いが必要である。ロバストな設計手法として知られているタグチメソッド（田口，1988）やさらに総合的な未然防止法として提案されたGD³法（吉村，2002，2011）にここで提案する方法を組み入れることで数ppmあるいはそれ以下のオーダーの不具合に対してより定量的に対処できるものと考え、タグチメソッドによれば影響因子を動かすことで系のロバスト性の最適化を行うことができるが、それでもなお影響因子と系全体としての極値統計的性質を見出すことは困難である。これについて、吉村（吉村，2011）は、「タグチメソッドはエネルギーのようなスカラー量で表される問題は得意だが、ベクトルの問題や、組織敏感な問題（局部の形に強く影響される問題）は不得手だと理解した。」と述べている。吉村はストレス・ストレングスモデルが果たしてきた役割を評価しながらも、平均値や分散の推定が少し狂うと大きな問題が生じるなど、本論文の要点に関する問題点も指摘している。この観点からは、GD³法はGood Discussionと

いうプロセスがあるので、新しい発見を手法に取り入れながら柔軟に進化させていく性格を有している。

4.4 少量大型生産品などへの応用

ここで提案する方法は、大量生産品に限らず、少量大型生産品の開発にも応用可能である。もちろん大型少量製品では、生産量が少ないので数ppmオーダーの不具合は問題にはならない。しかし、タービンローター、圧延ロール、船用大型歯車などで、事例3で説明したような介在物が原因の疲労破壊が危惧される場合には、大型化するほど危険部位の体積が増大し、統計的には事例1～3で説明したような小寸法製品の大量生産の問題と本質的に同じ内容を持つことが理解できる。結果として、大型機械が1機破壊するか10⁶個の製品の中の1個が破壊するかの違いである。大型機械の設計では、歴史的に大容量化に伴って構造の大型化が進められてきた。一般に、大型化の際の安全率は同型で小容量の前モデルのものが採用される。その際には、本論文で紹介したような危険体積の増大を考慮した極値統計的観点の必要性は認識されず、多くの重大事故をもたらしてきた。一つの企業の得意製品には各企業内で歴史的に築かれ、伝承された安全率がある。しかし、その安全率はそれまでの寸法の製品には機能していたということだけである。企業で伝承された根拠が曖昧な安全率を使い続けるという発想は一種の思考停止である。

トライボロジー問題やその他の環境問題に由来する不具合に対しても、ここで提案した極値統計法の基本を応用することが可能である。その場合にも、過大負荷試験によって原因となる因子の極値を取り出し、定量的評価に持っていくことが重要である。設計部門が想定した市場の負荷での限られた数の試験では極値を取り出すことができないからである。

近年、本論文で紹介した極値統計手法を導入した実例も国内外で見られるようになったが、企業機密にも関係しているので、残念ながら本論文の段階では詳細を紹介できない。しかし、基本的手法は前章で紹介した事例と同じであり、応用方法は理解できるものと考えられる。

5. 結言

極値統計法を大量生産部品の品質管理に適用し、市場で起こる数 ppm あるいはそれ以下の不具合によって生じる全製品のリコールを製品開発の初期段階からいかに防止するかの方法を提案し、実践的手法を示した。結論は次のようにまとめられる。

1. 多くの不具合は製品の疲労破壊などが原因になっている。極値統計法は、これまで \sqrt{area} パラメータモデル（文献および付録参照）と組み合わせて微小欠陥を有する材料の疲労強度のばらつきや強度の下限値などの評価に有効な実績を示してきた。本論文では、その方法を部品の強度の視点から見た不具合を防止する品質管理に応用する方法を示した。関連する事例で具体的方法を説明した。
2. 提案した品質管理手法は、大量生産製品に限らず、原理的に少量生産の大型機械の不具合または事故防止にも応用可能である。
3. 提案した方法は、基本的には他の種々の使用形態の動作パラメータから見た機能評価や材料選択の指標にも利用できる。関連する事例で具体的方法を説明した。
4. トライボロジー問題やその他の環境問題に由来する不具合に対しても、提案した極値統計法の基本を応用することが可能である。その場合にも、過大負荷試験によって原因となる因子の極値を取り出し、定量的評価に持っていくことが重要である。設計部門が想定した市場の負荷での限られた数の試験では極値を取り出すことはできない。
5. 従来の品質管理法では、極めてまれに起こる疲労破壊などは設計段階では把握しにくく、市場で起こる ppm オーダの不具合の原因を定量的に把握することなく根拠が曖昧な安全率で補うという方法が採用される。そのような方法で不具合が起これなければ、一応その製品の設計は成功といえるかもしれないが、その製品で採用した安全率の裏に市場で不具合を起こす可能性のある原因が隠される危険性がある。
6. 現在世界の自動車メーカーなどで当然のこととして設計の基本概念となっているストレス・ストレングスモデルについては根本から考え直す必要がある。モデ

ルの基本となっているストレングスの分布が必ずしも正規分布ではないからである。

7. 市場で起こる数 ppm 程度の不具合は設計技術者だけでは避けることができない。製品開発に関わる異なる企業の技術者間での情報交換による現象理解の共有と極値統計データに基づいた開発変更へのフィードバックが必要である。

付録 1. 疲労強度評価のための \sqrt{area} パラメータモデル

リコールの原因となる代表的な材料欠陥である鑄造欠陥や非金属介在物を有する材料の疲労強度は次式で予測できる（村上, 1993, Murakami and Endo, 1994, Murakami, 2002）。

表面欠陥：

$$\sigma_w = 1.43(HV + 120) / (\sqrt{area})^{1/6} \quad (A1)$$

内部欠陥：

$$\sigma_w = 1.56(HV + 120) / (\sqrt{area})^{1/6} \quad (A2)$$

ここで、各量の定義と単位は、 σ_w ：疲労限度 (MPa), HV ：ビッカース硬さ (kgf/mm^2), \sqrt{area} ：欠陥を主応力作用方向に投影した面積の平方根 (μm) ($\sqrt{area} < 1000 \mu\text{m}$)。

ただし、 \sqrt{area} が極めて小さく、上式で計算した σ_w が欠陥の影響のない平滑試験片の疲労限度 $\sigma_{w0}(\sigma_{w0} = -1.6HV)$ を超える場合には、そのような欠陥は疲労限度に悪影響を及ぼさないと考えてよい。

付録 2. 高い応力が作用する危険体積の定義について

本文中で、“ここで体積とは高い応力が作用し、破壊起点となることが予想される部位の体積（危険体積）であり、部品の全体積ではない。総体積とは、1 部品の危険部位の体積に生産部品数を乗じた体積である。”と述べたが、これについて以下のように説明を補足する。

高い応力とは破壊起点の可能性のある部位に作用する応力のことであり、応力集中などで応力の勾配がある場合でも、1 点の応力を意味するものではない。FEM などで解析すれば、どの部位が高い応力が作用

する部位であるかは予測できる。そのような部位の中で、仮に、ある応力以上が作用する部分を部品1個の危険体積と定義する。ppm オーダの不具合を起こさないために部品1個の危険体積に生産個数を乗じた量を総体積 V_T と定義する。極値統計線図のデータに基づいた試験片の体積（または部品1個の危険体積）を V_0 とすると、再帰期間 $T=V_T/V_0$ から可能性のある最大の欠陥寸法 \sqrt{area}_{max} を推定できる。その欠陥寸法を \sqrt{area} パラメータモデルの式に代入すると疲労限度のばらつきの下限值 σ_{wl} が決まる。このようにして、 σ_{wl} が ppm オーダの不具合を起こさないため最初に高い応力の部位として仮定した領域内で許容できる応力となる。

高い応力が作用する部位の危険体積としては、平滑試験片の引張り圧縮疲労の場合には、単純に試験片平行部の体積とすればよいが、平滑材でも負荷が曲げやねじりの場合には応力勾配の影響を考慮する必要がある。また、砂時計型試験片の引張り圧縮についても断面の応力が一定ではないので、同様な考慮が必要である (Murakami, 2002)。これまでの多くの実験結果を総合的に考慮すると公称応力の分布から定義して最大応力の90%程度の深さまでを危険体積にとることを目安にすることを推奨する。この定義によれば、寸法が2倍になれば危険体積は8倍になる。応力集中があり応力分布が一定でない場合でも最大応力の90%か80%程度の位置までの体積を危険体積と見積もればよい。90%と80%の場合の危険体積の違い、すなわち再帰期間 T の違いは高々2倍程度であり、極値統計線図から求める最大欠陥寸法 \sqrt{area}_{max} の値は大差ないので、これによる σ_{wl} の予測値にはほとんど影響がない。それよりも生産部品数が100個であるか1000個であるか 10^6 個であるかが再帰期間 T に桁違いの大きな影響を及ぼすことを重要視しなければならない。

切欠き底に微小な欠陥が存在する場合には、切欠きによる応力分布を考慮して \sqrt{area} パラメータモデルを適用する必要がある。切欠き底のごく近傍の応力を第1近似として直線で近似し、欠陥部分での応力を一定応力部分と直線的に変化する応力部分に分けて考える。そして、それぞれの応力分布に対する応力拡大係数を計算し、和を求めて、次式の応力拡大係数で表現

される \sqrt{area} パラメータモデルで微小き裂の疲労き裂進展下限界値 ΔK_{th} に等しくなる公称応力で疲労限度を決定する。

$$\Delta K_{th}=3.3 \times 10^{-3} (HV+120) (\sqrt{area})^{1/3} \quad (A3)$$

この方法の具体的手法の説明については文献 (Åman et al., 2017) にゆずる。

ただし、このような精密な計算が面倒であれば、切欠き底の最大応力に対して \sqrt{area} パラメータモデルを適用すればよいが、応力集中係数 K_t が高い場合には過度に安全側の評価になる。なぜならば、切欠き底と同じ応力が部品全体に分布していると仮定することになるからである。次善の方法としては、切欠き底の最大応力と切欠き半径の0.1倍程度内部の応力の平均を採用して、危険体積を見積もり、 \sqrt{area} パラメータモデルを適用すればよい。この方法により、部品の寸法効果も第1近似的に考慮される。それが上記引用文献の手法の粗い近似である。

なお、特に大きな応力の集中がない場合でも、接触応力と曲げ応力などが重畳する場合には、部品の内部の応力を解析し、危険体積と想定される介在物などの最大寸法の間隔を照らし合わせながら、 \sqrt{area} パラメータモデルで許容応力を決定することができる。その事例が本文の事例3である。

いずれの場合にも、総危険体積 V_T と疲労試験片の体積 V_0 との比から \sqrt{area}_{max} を極値統計線図から推定することになる。推定においては、再帰期間 T が大きいほど予測精度が落ちるから基準となる極値データはできるだけ寸法の大い試験片で取得することが望ましい。例えば、危険体積の観点からは、直径3mmの回転曲げ試験片データは300本の試験で直径7mmの引張り圧縮試験片1本のデータにしか相当しない。

このようにして、部品の生産個数に応じた疲労限度の下限界が決まると、少なくとも欠陥や介在物が原因となる疲労破壊に対しては、安全率はほぼ1.0に近い値をとることができる。従来の疲労設計法による一定値の安全率では部品の数や寸法が大きくなるほど余裕度が下がることが考慮されていないのである。従来の安全率もある部品数までは機能するが、部品数が増えると余裕度はなくなるのである。もちろん、変動応力

など上記の極値統計問題以外の因子に対する安全率は別に考慮することが必要であることはいうまでもない。なお、紙数の制限で本論文の範囲では取り扱えなかったが、自動車部品などの変動応力による疲労も基本的には微小き裂の問題であり、本論文の考え方の拡張 (Yamashita and Murakami, 2016) による解決も可能であろう。

参考文献

- 1) Åman, M., Tanaka, Y., Murakami, Y., Remes, H. and Marquis, G., Fatigue strength evaluation of small defect at stress concentration, to be published in Proc. 3rd International Symposium on Fatigue Design and Material Defects, FDMD 2017, 19-22 September (2017), Lecco, Italy.
- 2) 浅野 問奨, 田中 章太郎, 清水 恭, 高城 壽雄, (株)タカギ技術資料 (2017).
- 3) ASTM E2283-08: Standard practice for extreme value analysis of nonmetallic inclusions in steel and other microstructural features, ASTM Standard (2002).
- 4) 消費者庁, ニチガス「卓上コンロ用カセットボンベ」(2011年12月~2017年1月製) - 返金/回収, < www.recall.go.jp/new/detail.php?rcld=00000017124 > (参照日 2017年4月1日).
- 5) Fujita, S. and Murakami, Y., A new nonmetallic inclusion rating method by positive use of hydrogen embrittlement, Metallurgical and Materials Transaction A, Vol. A (2013), pp. 303-322.
- 6) Furuya, Y., Matsuoka, S. and Abe T., A novel inclusion inspection method employing 20KHz fatigue testing, Metallurgical and Materials Transaction A, Vol. 34, No.11(2003), pp.2517-2526.
- 7) Freudenthal, A. F. and Gumbel, E.J., Physical and statistical aspect of fatigue, Advances in Applied Mechanics, Vol. IV, H.L. Dryden and T. Karman. Eds. Academic Press. New York, NN.(1956), pp. 117-158.
- 8) Gumbel, E.J., Statistics of extremes, Columbia University Press, New York (1958). 日本語訳版, 極値統計学, 河田龍夫, 岩井重久, 加瀬滋男 訳, 廣川書店 (1963).
- 9) 小林幹和, 疲労強度に及ぼすショットピーニングと表面処理の影響, 九州大学学位論文 (1995).
- 10) Machida, H. and Abe, T., Fatigue life analysis of a traction drive CVT, Proceedings of international conference of CVT, Yokohama, Japan (1996).
- 11) Machida, H., Technology of a traction drive CVT (past, present and future), Proceedings of Leeds-Lyon symposium on Tribology, Lyon, France (2005).
- 12) Matsunaga, H., Sun, C., Hong, Y. and Murakami, Y., Dominant factors for very high cycle fatigue of high strength steel and design method for components, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 38, Issue 11(2015), pp.1274-1284.
- 13) Murakami, Y., Metal Fatigue: Effects of small defects and nonmetallic inclusions, Elsevier (2002).
- 14) 村上敬宜, 金属疲労: 微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂, (1993).
- 15) Murakami, Y. and Endo, M., Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength, International Journal of Fatigue, Vol.16 (1994), pp.163-182.
- 16) 村上 敬宜, 川上 勝巳, 齊藤 誠, 自動車ばね鋼の疲労強度に及ぼす介在物の影響, ばね論文集, No.35(1990), pp.1-7.
- 17) 村上 敬宜, 小林 幹和, 牧野 泰三, 鳥山 寿之, 栗原 義昭, 高崎 惣一, 江原 隆一郎, ばね鋼の疲労強度に影響を及ぼす諸因子の定量的評価 (介在物, ショットピーニング, 脱炭層, 微小表面ピットの影響), 日本機械学会論文集 A, Vol.57, No.542(1991), pp.2305-2313.
- 18) Murakami, Y., Nomoto, T., Ueda, T. and Murakami, Y., On the mechanisms of fatigue failure in the superlong life regime ($N > 10^7$ cycles), Part I: Influence of hydrogen trapped by inclusions, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 23, No.11(2000), pp. 893-902.
- 19) Murakami, Y., Nomoto, T., Ueda, T. and Murakami, Y., On the mechanisms of fatigue failure in the superlong life regime ($N > 10^7$ cycles), Part II: A fractographic investigation, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 23, No.11(2000), pp. 903-910.
- 20) Murakami, Y., Material defects as the basis of fatigue design, International Journal of Fatigue, Vol.41 (2012), pp.2-10.
- 21) NANER, どこまで増えるタカタ製エアバッグのリコール, <<https://matome.naver.jp/odai/2140430384133725101>> (参照日 2017年4月1日).
- 22) 田口玄一, 開発・設計段階の品質工学, 品質工学講座 1, 日本規格協会 (1988).
- 23) 高橋 倫也, 志村 隆彰, 極値統計学, ISM シリーズ: 進化する統計数理 5, 統計数理研究所編, 近代科学社 (2016).
- 24) Roiko, A. and Murakami, Y., A design approach for components in ultralong life with step loading, International Journal of Fatigue, Vol.41(2012), pp.141-149.
- 25) 齊藤 誠, 伊藤 幸生, 超清浄鋼の特性について, ばね論文集, No.30(1985), pp.11-19.
- 26) 山田 耕二, 宮川 進, 吉川 澄, アルミ合金ダイカストの疲労強度に及ぼす鑄造欠陥の影響, デンソーテクニカルレビュー, Vol.7, No.2(2002), pp.76-82.
- 27) Yamashita, Y. and Murakami, Y., Small crack growth model from low to very high cycle fatigue regime for internal fatigue failure of high strength steel, International Journal of Fatigue, 93(2016), pp.406-414.
- 28) 吉村 達彦, トヨタ式未然防止法・DG³, 日科技連出版社 (2002).
- 29) 吉村 達彦, 想定外を想定する未然防止手法・DG³, 日科技連出版社 (2011).

著者



村上 敬宜

むらかみ ゆきたか

2005 まで、九州大学教授、工学部長、理事・副学長など
 2010 九州大学名誉教授
 2016 Aalto University (Finland), 名誉博士
 2017 INSA Lyon (France), 名誉博士
 2018 フランス金属材料学会名誉員
 金属疲労、材料強度、品質管理に関する技術相談に従事



町田 尚

まちだ ひさし

1999 ハーフトイダルCVTの製品化に成功(日本精工株式会社)
 2007 取締役 代表執行役副社長・技術開発本部長
 2009 特別顧問 NSKインスティテュート・オブ・テクノロジー理事長
 2011 日本精工顧問(2014.6.25まで)
 日立金属社外取締役(2016.6.23まで)
 東京大学生産技術研究所研究顧問(2018.3.31まで)
 2012 芝浦工業大学大学院工学マネジメント研究科教授、客員教授(2019.3まで)
 東京大学生産技術研究所次世代育成オフィス諮問委員
 技術経営アドバイザーに従事



宮川 進

みやかわ すすむ

株式会社デンソー 材料技術部 担当次長
 認定プロフェッショナル・技師 博士(工学)
 材料強度基礎・応用研究にて自動車部品の信頼性向上に従事



高城 壽雄

たかぎ としお

株式会社タカギ 代表取締役 会長 博士(経営法)
 最高経営責任者に従事