

自動車部品および製造工程における収束型問題解決手法

Effective Convergence Type Problem-solving Technique for North American Automotive Products and Manufacturing Processes

マーク・マッキー ル M. MCKEEL

Automotive systems and components have shown a pattern toward increasing complexity, stricter tolerances, and shorter product cycles. To meet market requirements, excellence in automotive design and manufacturing practices must rise accordingly to ensure the reliability of such evolved mechanical systems. Product failure investigations must be fast, efficient, and exact. The increasing complexity of mechanical systems can create an attribute failure problem (i.e., damage) that is often harder to solve than a failure that comes from a continuous feature such as dimensional variation. Consequently, convergent problem-solving methods for finding the source of various failure types have been utilized effectively in North America.

Discussed in this article will be problem solving techniques that specifically address attribute failures.

Key Words: contrast, energy, strength, Concentration Chart, destructive events, malfunctions

1. はじめに

自動車部品の不具合は、自動車の快適性を失うだけでなく、場合によっては運転者の安全を脅かす可能性がある。

したがって、自動車部品の信頼性向上に対する問題解決は、正確に不具合の発生源を把握し、迅速かつ確な対策を行うことが重要である。本報では、自動車部品の複数の損傷状態を不具合の程度に応じて、正確に把握する手法について検討を行いながら示していく。

北米方式の問題解決手法では、第1ステップとして問題解決を容易にし、効率よく進めるために、さまざまな不具合品から得られる損傷状態などの応答（情報）を、下記のカテゴリーに分類することから始まる¹⁾。

- 1) 機能を保障している値（連続応答：寸法、幾何公差など）
- 2) 損傷状態：不具合（属性応答：傷、欠け、割れなど）
- 3) イベント（属性応答：市場での破損、耐久評価など）
- 4) 基本特性（連続応答：デシベル、密度、引張強度など）

第2ステップとしては、たとえば、 X が機能を保証している値または基本特性である場合、多変量管理図または散布図上に不具合要因の変数群を Y として、 X - Y

のプロットで関係を評価することである。これらの図により、隠れている不具合要因の変数群を明らかにする。この時点で不具合要因の変数群は、他の分類を用いてさらに二つ以上の変数グループに分けることにより、隠れた不具合要因を把握する。真因の変数 X が検出されるまでこの一連のグループ分けを段階的に継続する²⁾。

不具合が一つの事象であり、製品が組立てられたユニットであれば、標準的な第2ステップは、部品サーチとして知られる手法を活用できる³⁾。この手法は、組立工程の中で不具合が発生したのか、あるいは、いずれかの部品が原因なのかを明らかにできる。

調査結果からの応答が引っかけ傷、異物混入および割れなどの不具合である場合、集中線図³⁾に不具合をプロットして不具合が集中しているか否かを確認することが必要である。不具合が同一箇所に集中している場合、強度の問題や製造工程もしくは使用状態など、何らかの特定の状況と相関している。不具合がランダムに分布している場合、製造工程もしくは使用状態での何らかの突発的な破損因子の発生に起因するものと考えられる。つまり、集中した不具合は、部品の製造工程に依存している傾向があり、一方でランダムに分布した不具合は、部品の使用状態に関係する傾向がある。

2. 不具合品確認情報からの重要因子の割り出し

不具合品確認結果から得られる割れ、傷などの損傷状態およびイベントの属性応答 Y は、問題解決の早い段階で計測可能で連続的な応答 X である寸法、幾何公差に変換する (図 1)。

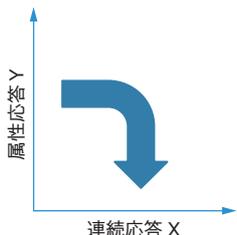


図 1 属性応答の連続応答への変換
Attribute-to-Continuous transform

属性応答 Y からの連続応答 X への変換は、損傷状態から機能を保障している値、損傷状態から基本特性など、さまざまな形で行われる。属性応答 Y からの連続応答 X への変換の一例を以下に示す。

トランスミッション用のスラスト軸受の軌道輪において、下方向に曲げ加工が施されている軌道輪の内径に微小剥離が発生していた。微小剥離は、損傷状態である属性応答として分類でき、軌道輪の内径に微小剥離の位置をプロットすることから調査を始めた (図 2)。

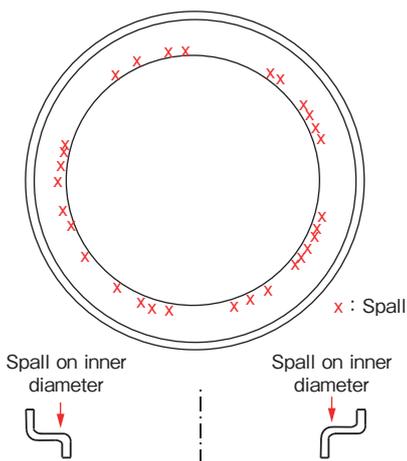


図 2 スラスト軸受軌道輪の微小剥離の集中状態
Concentration chart of spall on a thrust bearing raceway

図 2 より、微小剥離が軌道輪にランダムに発生しているのか、どこかに集中しているのかを把握することができる。この調査の段階的な確認結果は、図 3 に示すサーチツリーに整理することができる。

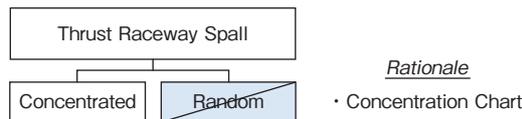


図 3 サーチツリー
Search tree

この結果より軌道輪の強度が低すぎて、トランスミッションの負荷に耐えられなかったのではないかと、材料強度に関する問題については、微小剥離した軌道輪と微小剥離のない軌道輪の差異を明確にすることで理解できる。試料 12 個の軌道輪のうち、6 個は内径に微小剥離があり (WOW 品: Worst of the Worst, 最悪品試料)、6 個は内径に微小剥離は見られなかった (BOB 品: Best of the Best, 最良品試料)。WOW 品の軌道面の傾きおよび表面仕上げの項目について、微小剥離近傍で計測を行った。整理前の基データを表 1 に示す。グループ比較による分析を実施するために、低い値から高い値に整理した結果を表 2 に示す³⁾。相互作用 (Interaction) と表記した欄に示すデータは、軌道面の傾き (Taper) および表面仕上げ (Surface Finish) の積である。

表 1 グループ比較 (整理前)
Group comparison (unsorted)

Taper	Surface Finish	Taper × Surface Finish Interaction
- 0.022	0.136	- 0.0030
- 0.026	0.111	- 0.0029
- 0.028	0.119	- 0.0034
- 0.031	0.115	- 0.0035
- 0.029	0.114	- 0.0033
- 0.027	0.112	- 0.0030
- 0.035	0.133	- 0.0046
- 0.028	0.158	- 0.0044
- 0.028	0.15	- 0.0043
- 0.032	0.141	- 0.0045
- 0.029	0.145	- 0.0042
- 0.034	0.132	- 0.0045
Original column order		

(BOB 品は緑、WOW 品は赤)

表2 グループ比較 (整理後)
Group comparison (sorted)

Taper	Surface Finish	Taper × Surface Finish Interaction
-0.035	0.111	-0.0046
-0.034	0.112	-0.0045
-0.032	0.114	-0.0045
-0.031	0.115	-0.0044
-0.029	0.119	-0.0043
-0.029	0.132	-0.0042
-0.028	0.133	-0.0035
-0.028	0.136	-0.0034
-0.028	0.141	-0.0033
-0.027	0.145	-0.0030
-0.026	0.150	-0.0030
-0.022	0.158	-0.0029
End-count = 6	End-count = 9	End-count = 12
90% Confidence	95% Confidence	99% Confidence
Each column sorted independently		

(BOB 品は緑, WOW 品は赤)

各項目のエンドカウント値により優位性を決定する。各データは、値別ではなくランク別で分析されるため、この手法は、連続データ、属性データの両方に適している。優位性の検出と効果の確認は、6個の試料 (BOB 3個, WOW 3個) で行う。エンドカウント値が大きくなるほど優位性は高くなる。その値が7~9までは、信頼水準95%であり、10~12までの信頼水準は99%、12を超える信頼水準は99.9%である。

また、エンドカウント値に基づいて、軌道面の傾きおよび表面仕上げが優位であることは明らかである。表面仕上げは、軌道面の傾きよりも損傷状態と強い関係にあることも確認できる。しかし、軌道面の傾きと表面仕上げの積である相互作用に最も強い効果がみられた。応答 (微小剥離なし = 1, 微小剥離あり = 2) に対する、軌道面の傾きおよび表面仕上げの関係を等高線として図4に示す。分散している等高線において、軌道面の傾きと表面仕上げの相互作用が明確に存在していることが確認できる。

上記までの確認結果をサーチツリーに整理すると図5となり、微小剥離の有無という属性応答 Y から、軌道面の傾き、表面仕上げ、の連続応答 X へ変換されたことが確認できる。

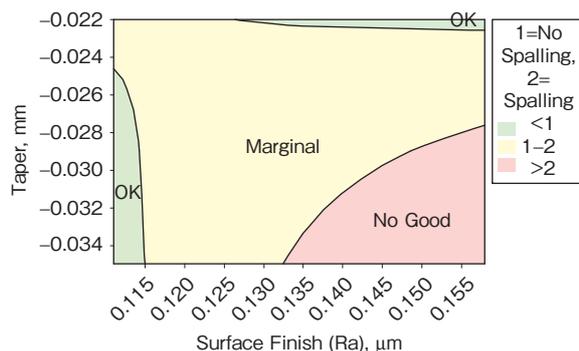


図4 軌道面の傾きおよび表面仕上げの等高線
Contour plot of taper, surface finish

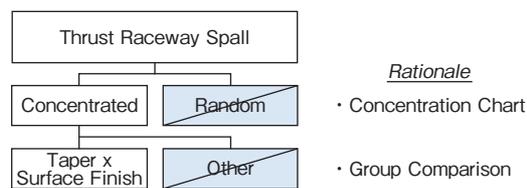


図5 サーチツリー (更新)
Search tree (updated)

属性応答を連続応答に変換した後、これらの相互作用に対して多変量管理図および散布図への手法適用が次の調査ステップである。軌道面の傾きを変数として、このばらつきが熱処理により発生したのか、あるいは熱処理の前のいずれかの工程に起因したのかを調査した。まず、プレス完了後の軌道面の傾きを計測し、その軌道輪の熱処理を実施した。熱処理後に再度軌道面の傾きを計測し、熱処理前後のデータを散布図上に示した(図6)。その相関関係より、熱処理後の軌道面の傾きの推移は、熱処理前のプレス完了品のばらつきに依存していることが確認できた。表面仕上げのデータについても同様の手法でバレル工程前後の試料の測定を実施した。

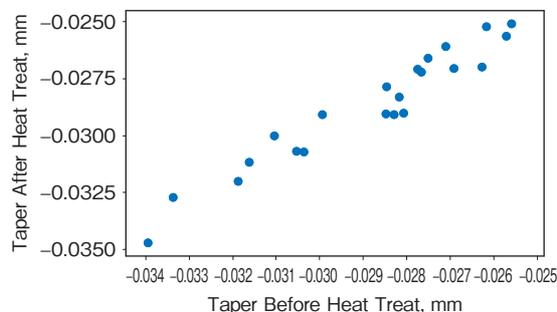


図6 散布図
Scatter diagram

もし軌道輪の表面全体に微小剥離がランダムに分布していたら、試料の運転時間と損傷状態の関係をまず整理する。車両から得られた走行距離と不具合の関係、または台上評価から得られた運転時間と不具合の関係のデータのワイブル分析により勾配 β が得られ、この勾配は、微小剥離が試料の脆弱性 $\beta < 1$ 、突発的な破損因子の発生 $\beta = 1$ 、あるいは早期摩耗 $\beta > 1$ が原因で発生したか否かを示す。もし試料の摩耗時間が設計の狙い値よりもはるかに短い場合、試料の設計が最適ではなかったか、あるいは使用荷荷が試料の設計に対して過酷すぎたことが原因と考えられる。

他の例では、スラスト軸受の軌道輪の外側面に微小剥離が発生していた。具体的には、軌道輪の板厚ばらつきに伴う盛り上がり部分に、転動体が繰り返し接触したことによる微小剥離が発生していた（図7）。属性応答から連続応答への変換により、微小剥離と軌道輪厚さとのばらつきが関連付けられた。



図7 軌道輪の微小剥離の位置
Spall location on raceway

この事例のサーチツリーを図8に示す。

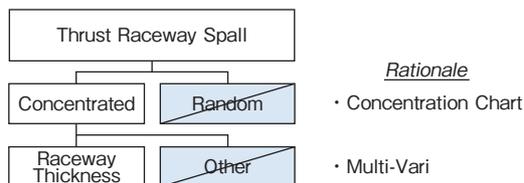


図8 サーチツリー
Search tree

次に、軌道輪の板厚のばらつきが、プレス工程前後のどこで発生しているかを調査した。プレス加工完了品と熱処理完了品のデータを散布図で相関を確認した結果、プレス加工完了時点で板厚にばらつきがあることが確認できた。この事例のサーチツリーを図9に示す。

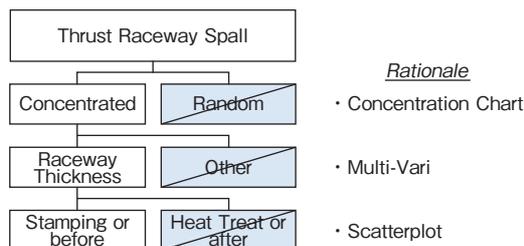


図9 サーチツリー（更新）
Search tree (updated)

さらに、七つのプレス工程全てから試料を採取した。軌道輪の板厚のばらつきは、第1工程の穴あけを含めて全ての試料に同様に確認できた。これは、素材の段階から板厚のばらつきがあることを示唆している。さらに、軌道輪の板厚の薄い部分は、素材のプレス送り方向に対して同じ側に集中していた（図10）。

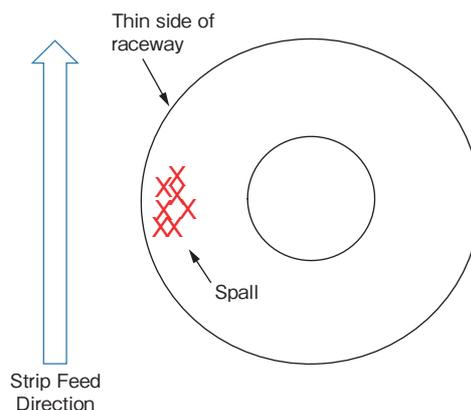


図10 軌道輪の板厚の薄い部分の位置
Concentration chart

素材と軌道輪の板厚のばらつきとの相関を調査するために、304.8cm (10ft) の長さに素材を切断し、左右反転である逆方向にしてプレス機に投入した。プレス機でプレスした軌道輪は、軌道輪の薄い部分が前回の試料とは反対側に発生することが確認できた（図11）。この確認結果により、軌道輪の板厚のばらつきが、プレス工程ではなく、素材の厚み精度に全面的に起因していることが判明した。収束型調査では、このように変数群を意図的に「移動」させて、集中部分が移動するか否かを確認することが一般的な手法である。

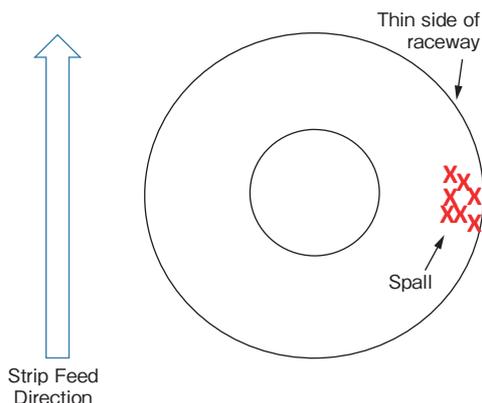


図11 素材を左右反転させた軌道輪の板厚の薄い部分の位置
Thin side shifts from left to right

上記までの調査結果は図12のようにまとめることができる。軌道輪の微小剥離（属性応答 Y）の真因はいくつかの確認を経て、素材の板厚のばらつき（連続応答 X）であるということが判明した。

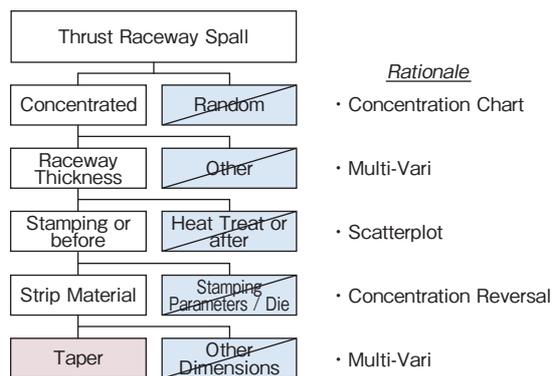


図12 最終サーチツリー
Final search tree

3. 部品強度とシステムへの負荷

部品強度がシステムへの負荷に耐えられなくなると、部品に不具合が生じる。パレートの法則は、部品の強度、システムへの負荷のどちらか一方のみが不具合の要因となることを示している。そこで、部品の不具合が、部品強度不足によるものか、あるいは過剰な負荷によるものかを判断する必要がある³⁾。この判断をする有効な手法として、部品強度と負荷の正常な関係を意図的に変更し、発生する不具合を確認することである。ある部品において不具合がランダムに発生している場合、まず不具合を発生させるのにどの程度の負荷が必要なのか、また製造工程において、どの工程がそれほどの負荷を発生させているのかを調べる必要がある。これらの手法により、迅

速に問題の発生源にたどり着くことができる。

ここで、割れが発生した座金の不具合事例を紹介する。この事例は、製造工程全体を通して部品強度と製造工程での負荷がどのように変化したのかを調査することにより解決できる。図13に示すように不具合は、割れの基点に長方形で一様にへこみがある特徴的な損傷状態であった。この座金の特徴的なへこみは、なぜ座金が割れたのかを解明する重要な手がかりである。つまり推定される要因は、同寸法のへこみを作る潜在要素を持つということである。

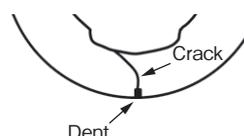


図13 特徴的なへこみ
Characteristic indentation

引張試験により複数の座金を測定し、平均ひずみエネルギー密度（応力-ひずみ曲線の下部⁵⁾）を得た。その結果、標準的な座金強度は、製造工程において生じる全ての負荷よりも高いことが判明した。このため、検証のアプローチとして、追加加工により部品強度を低下させ、部品強度と負荷の関係を意図的に変更し割れの再現を試みた。具体的には現品調査で確認した割れの基点となっていた特徴的なへこみを、プレス完了品 600 個の座金に意図的に追加した試料を作成し（図14）、残りの加工工程に再投入した。

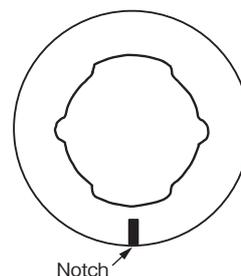


図14 特徴的なへこみを追加した座金試料
Weakened washer

熱処理・バレル研磨工程において、特徴的なへこみを追加していない座金試料では割れの発生は見られなかった。しかし、図14の特徴的なへこみを追加した座金試料では、負荷の低いバレル研磨工程においても、大半の座金試料が割れる結果となった。ただし、これらの座金試料には不具合品に見られた特徴的なへこみは発生せ

ず、他の問題解決アプローチへの切り替えが必要と判断した。負荷はタイミング、素性、位置、さらには大きさなどにより特徴的な痕跡を残す⁴⁾。そこでその特徴的な痕跡が、その位置に発生する工程を明確にする必要がある。

このため、次に製造工程の中で部品強度が低下する工程の有無について確認した。各工程完了品の強度を計測し、座金は、焼入れ後（焼き戻し前）に最も強度が低い状態になることが判明した。この結果より、焼入れ後のオイルタンクの設備を調査したところ、オイルタンク内のコンベアにおいて、**図15**の回転する部位のコンベアプレート間にすきまが発生することがわかった。さらに、このコンベアプレートの断面形状が不具合品に残っている特徴的なへこみと同じ形状であることから、この部分への挟み込みにより特徴的なへこみが発生するという推定に基づき、コンベア運転中に回転部に焼入れ後の座金を落下させることにより特徴的なへこみを座金に再現することができた。コンベアプレート間での挟み込みが座金の割れの真因であることが判明した。

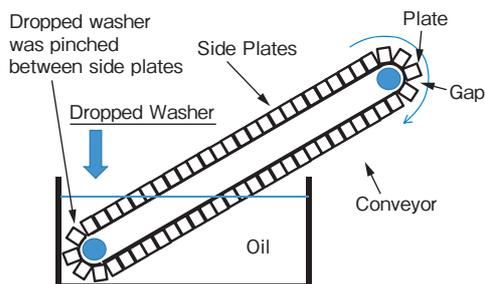


図15 コンベアプレート間のすきま
Quench tank with conveyor

この座金の不具合事例の調査結果では、脆性割れ、割れの位置（突発的な破損因子の発生を示唆）、さらにはへこみのサイズと形状など全ての特徴的な痕跡を明らかにすることができた。複雑な問題に対する解決として、部品強度と負荷の関係を把握し、不具合品への負荷の痕跡の真因を明らかにすることが迅速かつ効果的である。

4. 機能不全の不具合に対する問題解決のアプローチ

これまで調査・確認してきた全ての例は、負荷であるエネルギーが除去された後も残存する致命的な損傷状態である。もう一つの不具合は、想定していた性能を発揮できないという機能不全であり、エネルギーを除去すると解消される不具合である。

機能不全の場合、予測不能な状態で断続的に、もしくは特定の動作条件下で繰り返し不具合（過剰なノイズ、熱、振動）が発生する可能性がある。ただし、物理的損傷は引き起こさない。このような機能不全の不具合は、供給エネルギー（E1）＝運動への使用エネルギー（E2）＋エネルギー損失（E3）という熱力学第1法則（エネルギー保存則）の活用により、これら三つのエネルギーのいずれの項目に依存しているかに着目する必要がある。

エネルギーが加えられ機能不全が発生している場合、エネルギー損失（E3）のレベルに応じ、コンポーネントサーチの手法を用いて真因を突き止めることができる。機能不全の一例として、ノイズを発生するスラスト軸受と正常なスラスト軸受との間で部品の組み換え評価を行った結果を**図16**に示す。明確な差ができるように、特定の範囲内で収集したWOW品とBOB品にて評価した。

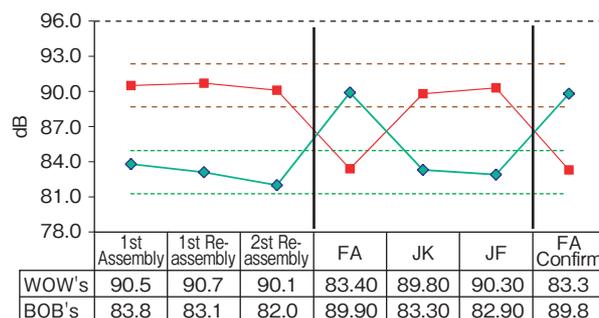


図16 コンポーネントサーチ
Component search

図16のグラフ順に三つのステージについて、以下に結果を示す。

- 1) 第1ステージ：WOW品およびBOB品をそれぞれ分解した後に再組立てした場合のノイズのばらつきを確認
- 2) 第2ステージ：部品の組み換えによりノイズの原因となっている構成部品を特定
- 3) 第3ステージ：第2ステージのノイズレベルの反転を再確認

第1ステージでは、WOW品のノイズを測定し、分解、再組立て後も含めて三つの計測を実施した。BOB品も同一の手順で計測し、合計六つの測定値が得られた。WOW品は高デシベルで悪い状態、BOB品は低デシベルで良好な状態を維持した。この結果よりノイズの原因は、再組立てによるものではなく、いずれかの構成部品

であるということが判明した。また、「正常なノイズ」のレベルも確認できた。

第2ステージでは、構成部品1を組み換えした時のみ、ノイズレベルが反転することが判明した(図16)。

第3ステージでは、構成部品1を組み換えした時のノイズレベルの反転を再確認できた。

次に、ノイズレベルの反転と関係がある構成部品1だけに絞り、WOW品とBOB品より各8セットを採集し試料とした。この構成部品1の評価を行った結果、WOW品8個全ての部品表面にのみ傷があることが確認できた。機能不全のスラスト軸受ノイズの発生真因についての最終サーチツリーを図17に示す。

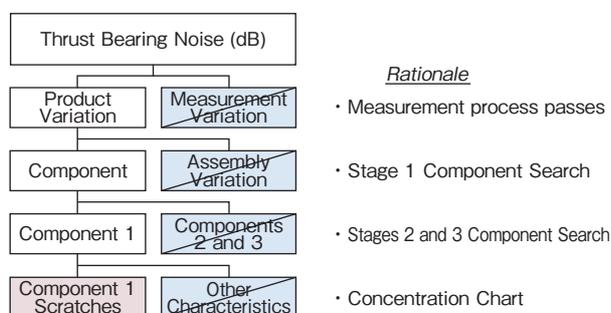


図17 機能不全のスラスト軸受ノイズの最終サーチツリー

Thrust bearing noise search tree

WOW品およびBOB品で生じている事象間の差を明らかにすることにより、機能不全の真因である構成部品を、迅速かつ効果的に抽出することができた。また、ノイズ、発熱、振動などのエネルギー損失の問題については、真因の絞込みにサーチツリーの活用が適していた。

さらに、損傷状態が機能不全ではなく機能停止となる致命的な場合は、不具合品損傷が大きく評価に適さない場合がある。この場合には評価前の試料で重要と考える項目を測定し、WOW品とBOB品の6～8個の試料でグループ比較を実施することが適切である。また他の方法としては、不具合発生から機能停止する少し前の状態までの時間の経過に対する変化点を用いて、WOW品やBOB品を設定することも可能である。

5. おわりに

近年の自動車部品および製造工程における、不具合の真因解明アプローチとして、北米での収束型問題解決手

法を紹介した。

- 1) 初期の調査の方向性を決定するために、不具合品から得られる応答(情報)の分類分け手法
 - 2) 不具合真因に収束するために、傷などの損傷状態およびイベントの属性応答から、機能を保証している値および基本特性の連続応答への変換手法
 - 3) 部品強度とシステムへの負荷に着目した不具合真因の絞込み手法
 - 4) WOW品とBOB品の構成部品の組み替えによる不具合構成部品の絞込み手法
- これらの手法を用いることにより、迅速かつ効果的な問題解決が可能となった。

参考文献

- 1) N. Reddy KM, Y. Varadarajan, R. Prasad: Quality Improvement during Camshaft Keyway Tightening Using the Shainin Approach, International Journal of Scientific and Research Publications: Vol. 4, No. 7, (2014)1-5.
- 2) P. Shainin, R. Shainin, T. Nelson: Managing Statistical Engineering, Transactions of 51st Annual Quality Congress, (1997)6.
- 3) K. Bhote: World Class Quality, 2nd ed., AMACOM, (2000)147-156, 157-193, 194-216.
- 4) M. Hicks: Problem Solving and Decision Making, 2nd ed., Thomson, (2004)93-94.
- 5) D. Roylance: Stress-Strain Curves, Department of Materials Science and Engineering, MIT, (2001)9.

筆者



マーク・マッキール*

M. MCKEEL

* KOYO BEARINGS NORTH AMERICA LLC