

論文・解説

26

ATユニット異音評価方法の開発

Approaches to Repress AT's "Squeak and Rattle"

下垣内 誠*¹
Makoto Shimokakiuchi

要 約

オートマチック・トランスミッション（以下ATユニット）の品質向上のため、完成検査時ATユニットが発する振動を検出し、異常音の元となる振動の有無を自動判定する方法の開発に取り組んだ。従来、異常音は一意に特定できない等の理由で検出が困難であった。今回、品質工学のマハラノビス・タグチ・システム（以下MTシステム）とシフト不変ウェーブレットの各手法を用いて異常音を異常振動として検出できる条件を見出し、量産導入を行った。これによりギヤの打痕等による異常音の流出防止を図ることができ、ひいてはATユニットの製造品質向上に一助をなした。ここではそのプロセスを中心に紹介する。

Summary

To improve production quality of Automatic Transmission(AT), we developed a method to automatically check extraordinary vibrations that is the cause of "squeak and rattle", detecting vibrations in Automatic Transmission with final assembly check machine. Conventionally, identifying the cause of "squeak and rattle" wasn't easy due to the plural factors. The use of "Mahalanobis Taguchi System(MT system)" in the Quality Engineering and "Wavelet Transform" enabled us to find conditions to detect "squeak and rattle" as extraordinary vibrations. This helped repress "squeak and rattle" as well as improve the production quality of AT. We incorporated this approach into the actual production. This paper introduces our approaches focusing on the process improvement.

1. はじめに

エンジンのトルクを駆動輪に伝えるATユニットはその品質が車両の商品品質に直接影響を与える機能部品である。ATユニットの製造においてその品質保証方法は後追いの不具合対策から不具合の起きない製品形状、工程設定へと改善を進めている。特に開発初期段階からの開発、生産技術、製造の三位一体となったコンカレントな商品開発や各種シミュレーションによる挙動解析の結果、ATユニットは不具合の発生しない部品形状、よりロバストな構造へとその内容が進化してきている。また、製造領域でも各種の品質改善を続けてきた。こうした取り組みの中で、従来検出が困難とされていた異音についてその検出の一手法を開発し、この仕組みを量産ラインに適用した。ここでは

そのプロセスを中心に紹介する。

2. 現状の問題

2.1 異音とは

異音とは異常な音の発生を伴う不具合で、ATユニットでは異音を以下のように捉えている。

- ① ギヤ並びにベアリングの打痕に起因するカタカタ等の打音
 - ② 回転体へのコンタミネーション（部品の加工時あるいは組立時等に発生する挟雑物。以下コンタミ）付着に起因するシュルシュル等の摺動音
- などとし、ギヤノイズのヒューン音、キーン音、あるいは油圧機器からのオイルドレイン時発生するジー音、チリチリ音とは区別して扱っている。

*1 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

2.2 異音への取り組み

ATユニットでは異音の原因となるギヤの打痕並びにコンタミの噛み込みに対しギヤの搬送ルート上での相互干渉回避、異物の混入防止等を行ってきた。しかし、ATユニット車載後の完成車検査で異音不具合は発生している。

ATユニットの完成検査は無人の自動工程であり、万一、異音の発生があっても流出防止ができない構成であった。

2.3 異音検出の阻害要因

ATユニットでは以下の理由で異音検出が困難であった。

① 騒音が車載状態に比べ大きい

異音が完成検査装置本体、あるいは周辺環境に起因する暗騒音に埋もれるため、車載状態では聴こえる異音が完成検査状態では聴き分けられない。

② 音の種類が無数にある

ATユニットには異音の原因となるギヤ、ベアリング等回転部品が多様で、打痕あるいはコンタミ等不具合状態並びに負荷状態を勘案すると異常音はその種類が無数にある。このため、特定の音を狙ってそのレベルの高さを評価する手法が適応できない。

よって異音の保証には決め手を欠いてきた。

3. 異音検出のプロセス

3.1 ハード構成

異音検出システムはFig.1に示すように、現有のギヤノイズ判別システムを一部改造し、このシステムから得られる振動波形を評価するものとした。ギヤノイズ判別システムはエンジンの代用として入力軸にモータ、車両慣性の代用としてハーフシャフト軸に発電機を配し、運転中のATユニット振動をトランスミッションケース表面に照射したレーザドップラで検出する構成であり、振動を検出するには実績のあるシステムである。本来、レーザドップラ振動計は速度出力であるが、打痕有無ユニットを用いた予備実験の結果、加速度波形には目視で明らかな波形形状差が認められたものの、速度波形では差が認められなかったため、加速度波形を評価の対象とした。

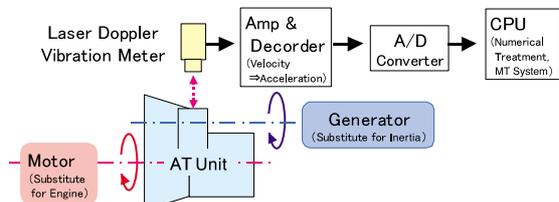


Fig.1 Abnormal Noise Detective Device Construction

3.2 振動波形

ATユニットの完成検査で得られるトランスミッションケース表面の振動波形の例をFig.2に示す。実車で異音を確認できるレベルの打痕を付けたATユニットの振動の内、例え

ば、Dレンジ4速ロックアップ状態の振動を拡大するとFig.3となり、良品との間に波形形状の差が認められる。異音を検出するにはこの振動を抽出すれば良いことになる。

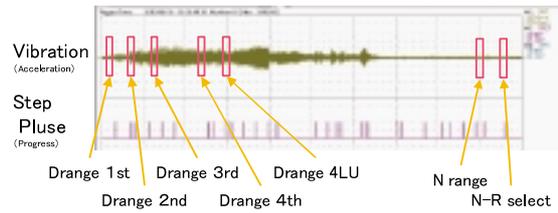


Fig.2 Vibration at Inspecting Completed AT

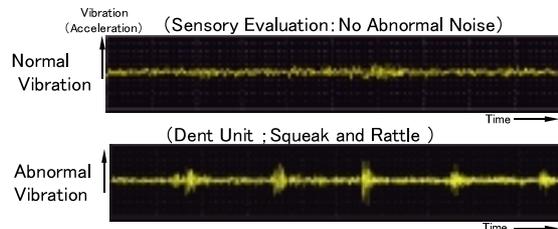


Fig.3 Enlarged View of Vibration Waveform

3.3 MTシステムによる波形形状差判別

波形の形状差を見出すには種々のパターン認識方法があるが、①異常の程度が一意に求まる、②測定精度の評価が容易に得られる、等の理由から今回、品質工学のMTシステムを用いた。MTシステムとはマハラノビス・タグチ・システムのことで、良品群からの乖離状態を多変量解析で使われるマハラノビス距離で定量的に表現するものと解釈できる。

MTシステムによる良否判定概念はFig.4である。

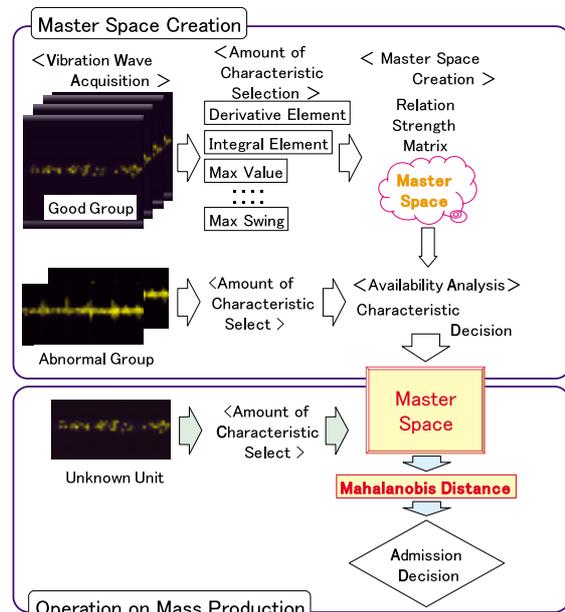


Fig.4 MT System Process

<基準空間を定義する>

- (1) 良品群, 異常品群各々の振動波形を収集する。
- (2) 収集した振動波形からこの波形を表現する特徴量を抽出する。
- (3) 良品群の特徴量と異常品群の特徴量から両者の差を最大にする特徴量を選択する(有効性解析)。
- (4) 選択された特徴量で基準空間を作成する。
- (5) 基準空間の精度を評価する。

<基準空間を用いた良否判定>

- (6) 良否が未知であるATユニットについて, 振動波形を取得する。
- (7) 収集した振動波形から(3)で選択された特徴量を抽出する。
- (8) (4)で作成した基準空間と(7)のデータ列を用いてマハラノビス距離を算出する。
- (9) マハラノビス距離に対する良否判定基準に照らし, 未知ATユニットの良否判定を行う。

4. MTシステムの実施

4.1 波形データの収集

良品, 異常品をそれぞれTable 1のように準備し, 振動データの収集を行った。データセットを2つに分け, 一方を基準空間作成用とし, 他方を基準空間の検証用とした。現時点では異音の大きさの程度を定量的に評価する手法がないため, 良品との違いが大きければ大きい程, 望ましい判別ができるとして望大特性を適用した。

Table 1 Waveform Data of MT System

・MTS Objective Units

Object Category		for Master Space	for Validation
Good		27	26
Abnormal	Dent on Sec. Gear	1	1
	Dent on Final Gear	1	1
Total		29	28

・Standing ; Thirst for Difference

4.2 特徴量抽出

検出波形を特定するため次のように特徴量を抽出した。

- ①微分成分, ②積分成分, ③最大値, ④面積 他。

ここで, 微分成分とは対象波形に等高線を引き, ある等高線が対象波形を横切った回数と定義する。Fig.5の例ではY軸0から0.4までを0.05刻みの等高線9本で区切っている。この時, 微分成分はTable 2の上表となる。

積分成分とは微分成分で使用した等高線が対象波形を下回っている横軸長の合計と定義する。Fig.5の例ではその積分成分はTable 2の下表となる。

これらFig.5の例では2種類の特徴量で一波形あたり18個の特徴量を得ることになる。

同様の方法で今回は1波形あたり103個(微分成分: 49, 積分成分: 49, その他面積等の特性: 5)の特徴量を抽出した(Table 3)。

4.3 特徴量選択(有効性解析)

103個の特徴量の内, 異常品をより鮮明に異常と表現するために使用するべき特徴量を選択した。103個の特徴量各々に対し, (その特徴量を用いた場合のSN比の平均) - (その特徴量を用いない場合のSN比の平均)を算出し, 結果の大きいものから順に並べるとFig.6となる。この値が

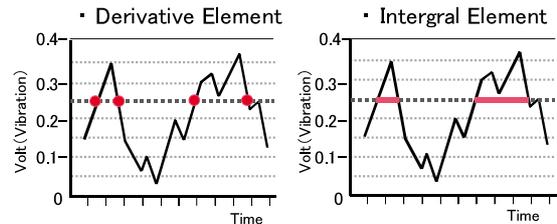


Fig.5 Image of Feature Amount

Table 2 Counted Value

Contour Value	Derivative Element								
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
Count	0	2	4	5	6	4	6	2	0

Contour Value	Integral Element								
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
Count	10.0	9.8	8.5	7.5	6.8	5.5	3.8	0.3	0.0

Table 3 Image of Feature Amount

Character Name& No.	← Derivative Element →					
	1	2	3	~	48	49
Good 1	0	0	0		0	0
Good 2	0	0	0		0	0
Good 3	0	0	0		0	0
..						
Good 53	0	0	0		0	0

Character Name& No.	← Integral Element →				
	50	51	~	97	98
Good 1	24999	24999		0	0
Good 2	24999	24999		0	0
Good 3	24999	24999		0	0
..					
Good 53	24999	24999		0	0

Character Name& No.	Ave.	Area	Swing	Max.	Slope
	99	100	101	102	103
Good 1	0.0178	0.0446	0.101	0.0448	0.0193
Good 2	0.0223	0.0557	0.161	0.0787	0.0182
Good 3	0.0234	0.0586	0.202	0.065	0.019
..					
Good 53	0.0351	0.0879	0.198	0.129	0.0199

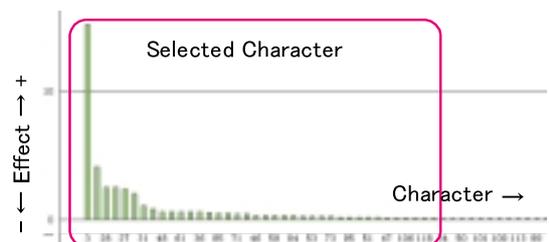


Fig.6 Feature Amount in Order of Effects

大きい特徴量程，効果が大きいことを現している。ここでは効果が+の特徴量全てを選択使用した。この結果，使用する特徴量は103個から38個へと削減された。

4.4 判別率確認

Table 1で収集した振動波形に対し，これまでのプロセスで得られた基準空間を用いてマハラノビス距離を算出した。良否判定すると，Table 4のように有効性解析に用いなかった良品波形群に誤判定があることが確認された（判定基準距離：4，誤判定率：42%）。

Table 4 Misjudgment Rate

	for Master Space	for Validation
	Waves used in Availability Analysis	Waves Not used in Availability Analysis
Abnormal	0%	0%
Good	0%	42%

5. 誤判定率改善

5.1 誤判定率改善

サンプル増しによる基準空間の信頼性向上を図るために良品群のサンプル数をそれまでの27個から60個および89個へと増加させ，同様の誤判定率を求めた。しかし，Fig.7のように誤判定率の改善は見られなかった。

収集された振動波形から抽出する特徴量の分解能を上げる目的で波形から微分成分，積分成分を抽出する際の等高線の刻み幅を0.05から0.0025（V）へと細分化した。しかし，この場合も誤判定率改善は見られなかった。

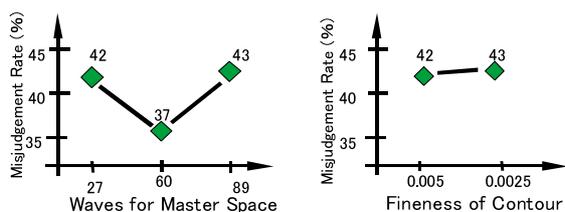


Fig.7 Changes in Misjudgment Rate

5.2 誤判定の要因

誤判定率を改善するために要因分析を行ったところ，誤判定された良品波形から次の2つの要因が出てきた。

- (1) 波形に雑音が見ることがある
- (2) 良品にも関わらず振動の大きいATユニットがある
- (1) 波形に現れる雑音

誤判定された波形にはFig.8左側のようにインパルス状の雑音が見られた。このインパルス状の雑音は周期性こそないもののパルス幅，振動周期が異常パルスに似ているため，特徴量中の微分成分を押し上げ，良品を異常品と誤判定したものと推定できる。しかし，この雑音は異常振動時のパルスと周波数帯が近い物理的なフィルタで除去す

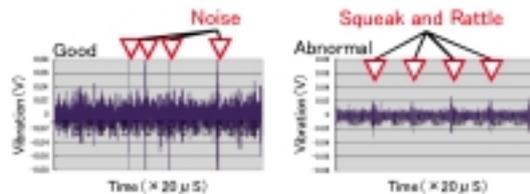


Fig.8 Impulse Noise & Abnormal Noise Waveform

ることが困難であることも判明した。

(2) 振動レベルの高い良品

良品群の振幅の中には異常品のパルス振幅以上の振幅を維持している（すなわち，良品の振幅の方が異常品のパルス振幅より大きい）波形があることも確認された（Fig.9）。この波形は常時異音品と同等のパルスが発生していると等価であり，微分成分，積分成分ともに押し上げられ，異常品と誤判定したものと考えられる。

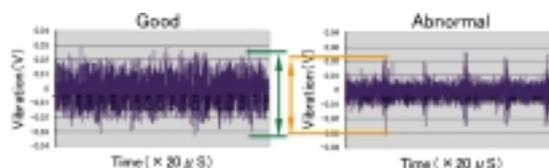


Fig.9 Good Parts with High Vibration Level & Waveform of Abnormal Noise of Failure Parts

5.3 雑音除去

インパルス状雑音の除去が可能で，周期的に発生する異音品のパルスが抽出可能であること，および波形の特徴量として積分成分の抽出が可能であること，の2つの要件を満足するためには時間軸が保全されるフィルタが必要と考え，シフト不変ウェーブレット変換を用いた。

雑音を含む振動波形と雑音のない波形各々のスケーログラム（シフト不変ウェーブレット変換結果）をFig.10に示す。雑音有無の差が最も大きく現れるスケーログラムとしてDの波形を選択した。

スケーログラムを用いたインパルス状の雑音除去手順は以下である。

- (1) 元波形をシフト不変ウェーブレット変換し，Dスケーログラムを抽出する。
- (2) このスケーログラム上で一定レベル0.1（V）以上の出力を雑音と判定し，この雑音発生点を時間軸上で特定する。
- (3) 元波形の同一時刻データを近傍の平均値で置換する（Fig.11）

異音品のDスケーログラムにはFig.12に示すように異音に起因するパルスの立ち上がりは見られない。よってDス

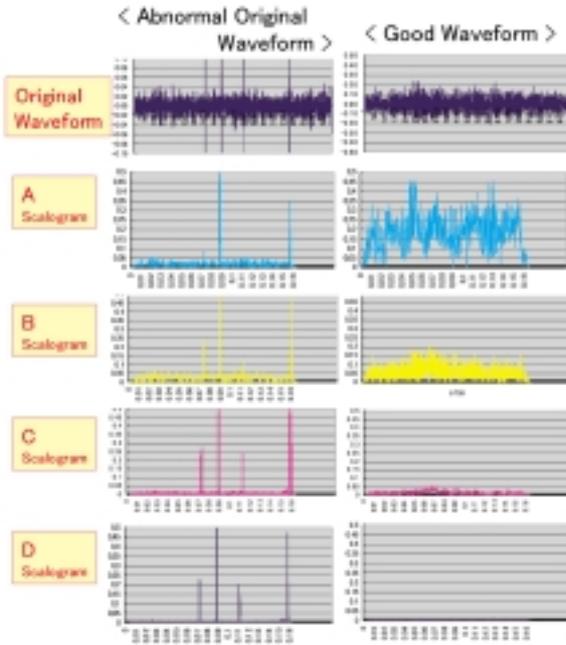


Fig.10 Scalogram of Vibration Waveform

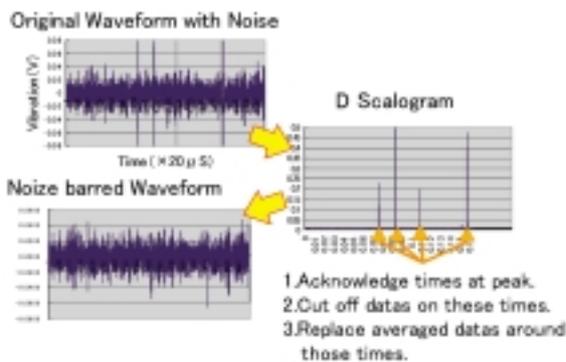


Fig.11 Noise Removal

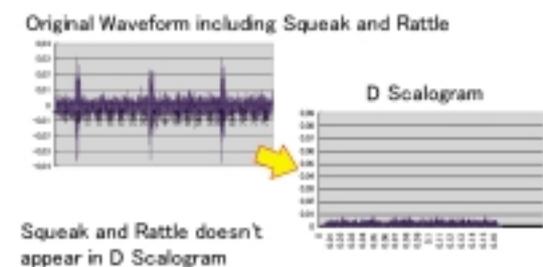


Fig.12 Not efficient to Abnormal Vibration

ケーログラムを用いても異音によるパルスを除去しないことの確認もできた。これらプロセスで誤検出の原因であったインパルス状雑音のみを元波形から除去した加工波形が得られるようになった。

このようにして雑音を除去した加工波形を改めてシフト

不変ウェーブレット変換し、良品の最大値と異音品の異音パルス最低値との差が最大となる変換結果としてAスケログラムを得た (Fig.13)

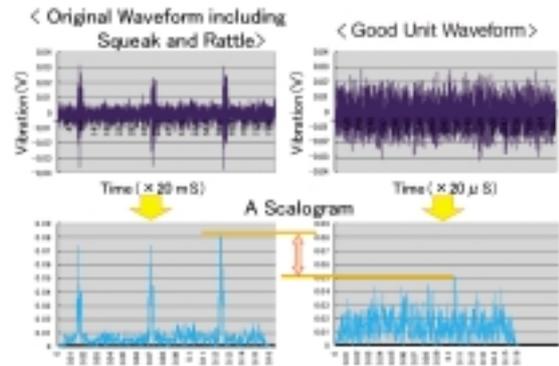


Fig.13 Emphasis of Abnormal Noise

5.4 振動レベルの高い良品への対応

Fig.13のAスケログラム上にあつては異音のパルスが強調されているため、生波形で見られた振動レベルの最大値が異音品のパルス最大値より大きいという誤判定の要因も除外されていることがわかる。

6. MTシステムの再実施

6.1 雑音除去を含むMTシステムのプロセス

雑音を含む生波形に代えて、雑音を除去し異音パルスを抽出したスケログラムに対しMTシステムを実施するためのプロセスはこれまでのテストをまとめて以下となる。

<雑音除去>

- (1) 良品群の振動波形をシフト不変ウェーブレット変換し、雑音成分のみのスケログラム抽出。
- (2) スケログラム上でスレッシュドライン以上のパルスを探しその時刻を特定。
- (3) 振動波形上の当該時刻データを補間値で置換。

<評価対象のスケログラム抽出>

- (4) (3)で求めた加工波形をシフト不変ウェーブレット変換し、異音パルスを強調するスケログラムを抽出。

<基準空間定義> , <良否判定>

- (5) (4)で抽出したスケログラムに対し3.3節で示した手順(2)~(9)実施。

6.2 MTシステムの再実施

異なるロットの良品を加え、Table 5のように良品の波形データ数を161に増やして有効性解析を行い、有効な特徴量をFig.14のように0.1db以上の32個に絞り込んだ。

6.3 基準空間の評価

こうして作成した基準空間でTable 5のデータを評価するとそのマハラノビス距離の分布はFig.15のようになる。この時、良否判別の限界値は良品群のマハラノビス距離平均+4 で4と設定した。ファイナルギヤとセカンダリギヤ

打痕の異常品はそのマハラノビス距離がそれぞれ37および50となり、良品分布から一桁離れた値を示した。

更に今回の基準空間では確認用良品を異常品とする誤判定もなくなった。

このようにして求めた基準空間の精度評価のために望大特性のSN比を求めると32.5dbとなり、当初の24.6db（誤判定率42%時）から7.9dbの改善を得た。

量産導入後のマハラノビス距離の分布はFig.16となっており、量産導入後も実験に使用したレベルの異音は確実に判別できる状態にある。

7. まとめ

今回の活動でギヤ打痕に代表される異音の判定が量産ラインで可能になった。また、異常振動の検出を目指したことで、打痕に留まらずこれまで検出不能であった一部部品の組付不良までも異常振動として検出が可能であることが確認できた。この新たな検出特性を活用し、シュルシュル等、異常な摺動音の検出はもちろんのこと、ATユニット製造品質の更なる向上を目指す予定である。工程での品質作り込みに加え、上述の流出防止を着実に進めることで、お客様の満足度向上に貢献してゆく。

最後に、このシステムの量産化に、多大なるご協力を頂いた関係各位に深く感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 田口玄一：MTシステムにおける技術開発，日本規格協会，P.83-92（2002）

著者



下垣内誠

Table 5 Datum Space Data after Noise Removal

・Parts to be Studied

Object Category		for Master Space	for Validation
Good		161	16
Abnormal	Dent on Sec. Gear	1	1
	Dent on Final Gear	1	1
Total		163	18

・Standing ; Thirst for Difference

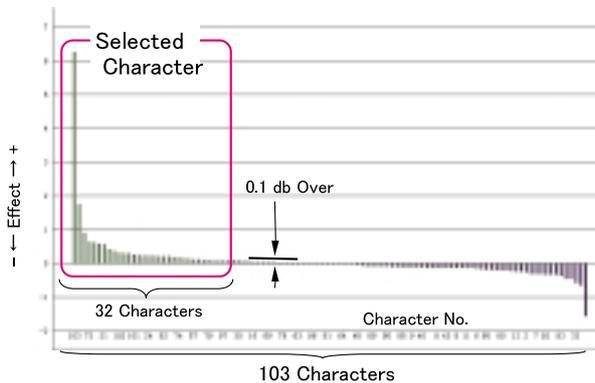


Fig.14 Selection of Feature Amount

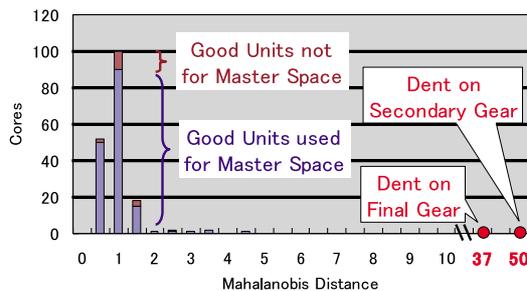


Fig.15 Distribution of Mahalanobis Distance

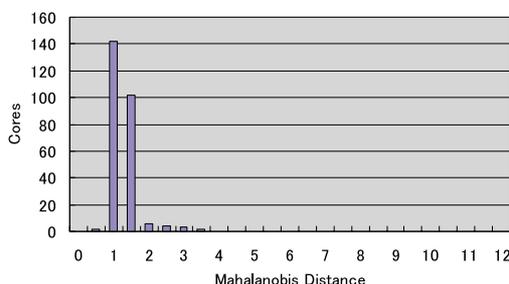


Fig.16 After Introduction into Mass-Production