

自動車開発におけるソフトウェアテスト完了判断と

市場故障発生予測のモデルに対する検証

～オーカマモデル～

Software test completion judgment in automobile development and verify market failure prediction model.

～Okama model～

研究員：大釜 俊洋（本田技研工業株式会社）

主査：山田 淳（株式会社東芝）

副主査：田中 桂三（オムロン株式会社）

アドバイザー：中森 博晃（パナソニック株式会社）

研究概要

自動車開発では取引先に作成して頂いたソフトウェアを用い、システムテスト、ソフトウェアテストを実施する。テストでは、ソフトウェア故障（以降、故障^[4]）の残存発生数の予想が難しく、テスト完了の判断方法及び完了判断の定量的な基準が明確でなく。またソフトウェアリリース後、残存故障の市場発生予測が十分にできていないという問題がある。

本研究では、ソフトウェア信頼度成長モデルと指数関数 $R(t) = 1 - e^{-k \times t}$ ^[3] による故障累積数の予測手法、ユースケーステスト結果の追加評価、及び受入れテストでの故障が収束傾向にない場合の開発組織の原因分析・対策活動の促進状況を包括的に組み合わせて、故障の市場発生数を予想評価してテスト完了時期を判断する方法（オーカマモデル）を提案する。この複数手法を組合せたモデル中の、テスト完了判断及び市場故障発生予測に関し、双方の関係の最初の判断材料として、有用性を評価し、考察した。

Abstract

This provides approach to how to determine when software acceptance test is able to be completed with decision criteria that have rationale relating to prediction of possibilities for software failure occurrence in the market. This approach is consist of a combination of multiple activities that includes application of software reliability growth model, prediction for the possibilities of software failure occurrence in the market with the exponential function $R(t) = 1 - e^{-k \times t}$ from hardware reliability analogy, additional use case tests and, facilitative monitoring of root cause analyses activities in software development partner organizations (venders) during software development.

1. はじめに

1.1 背景

ソフトウェア信頼度成長モデルに着目して、ソフトウェアの「市場品質を満足するか否かの判断材料となる指標を研究した。自動車開発は、自動運転、電動化等車両システムの複雑化とソフトウェア規模の拡大に伴いテスト規模も爆発的に拡大している。そのため十分なテスト戦略が必要とされ、テスト品質を向上する手法の確立が急務となっている。

自動車開発でのシステムテスト、ソフトウェアテスト実施時には、テスト実施期間の経過につれて、①検出した故障の件数が収束して信頼度成長曲線で予測しやすい場合と、②残存故障の検出が困難で故障件数がなかなか収束しない場合がある。このため、市場での故障発生件数を十分に低い値として偶発的故障と同様に扱える状態になるまで故障が収束したことを確認しテスト完了を判断する方法、及びより早く故障の発生件数を収束させる対策方法が、一通りのテスト実施・完了だけでは対応できないという問題がある。ソフトウ

ウェア信頼性評価に対する様々な研究が発表されており、テスト工程から市場へのリリース時の一定期間における発生故障数の実際の事例データ(故障件数累積曲線)に対して、より適合性の良い信頼度成長曲線を計算できる信頼度成長モデルが提案されている。しかし、これらは数式モデルについての理論的検証が主流であるため、本問題の解決のためにはシステム製品の種別や開発形態、開発組織毎に合った適用法を検討する必要がある。

特に、自動車開発など、人間の操作、センサー情報と機械制御機構などとのインタフェースをもったシステムでは、設計及びテストは様々に複合した範囲に渡り、どこまで検証、テストを実施すればソフトウェアの市場品質を保証できるか明確な指標が少ない。想定していないユースケース、シナリオは、市場で偶発的故障として発生してしまうのも事実であり、解決方法が必要と考え本研究で複数手法の組合せによるテスト完了判断手法を提案した。

以下、本論文の構成を述べる。1章で研究の背景、論文全体構成、2章で問題と解決のアプローチ。3章でソフトウェア信頼度成長モデル、カーブフィッティング方法(近似計算)、ハードウェア故障数予測の指数関数 $R(t) = 1 - e^{-k \times t}$ の応用による市場故障予測手法を提案。4章で予測手法の検証と組み合わせる複数手法の提案、5章で結論と今後の展開を示す。

1.2 前提事項

本研究は、テスト戦略が整備されテストケースの網羅性が十分に高いことが前提である。

1.3 提案モデル(オーカマモデル全体)で用いる手順(論文全体構成)

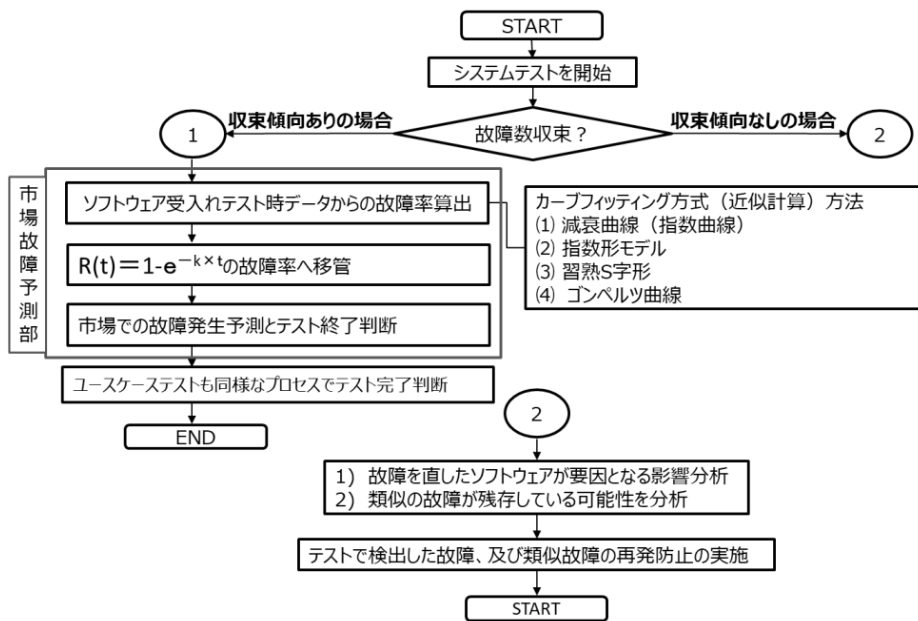


図1 ソフトウェアテスト完了判断と市場故障発生予測のモデルで用いる方法(オーカマモデル全体)の手順

2. 研究で取り組む問題と問題解決のアプローチ

2.1 研究で取り組む問題

ソフトウェア開発は、要求抽出、設計、レビュー、インスペクション、検証、テストを実施し、検出された故障を直す。ソフトウェアは開発組織(会社)である取引先から数回のマイルストーン毎に更新版が納入され、受入れテストとして回帰テスト、追加テストを実施する。すべてのテスト完了・全故障原因障害の修正後ソフトウェアをリリースする。しかし、検証、テストの実施度がソフトウェアの市場品質保証レベルとの関係が把握できていない状況でソフトウェアをリリースすることが問題である。実際にはリリース後、市場で故障が生じる場合がある。

ソフトウェアの故障残存数を予測する技法としてソフトウェア信頼度成長モデルがある。しかし算出した故障残存数の精度向上の取組みが主で、また故障が収束することを前提

としている。かつ市場での故障の発生予測まで踏み込んだ研究は確認できなかった。

2.2 問題解決のアプローチ

2.2.1 アプローチ (概要)

テストで故障発生数が収束傾向にある場合、市場での故障発生を予測してテスト終了判断し (オーカマモデル市場故障予測部), ユースケーステストも完了判断したときテストを終了して市場へ提供する。収束傾向にない場合, 取引先の開発委託組織へ戻し, 原因分析と類似故障の再発防止対策を促し, 再納品後に再度のテストを開始する (図 1)。

市場故障予測部では, テスト完了を数値で定量的に判断するために, 受入れテスト中に算出される故障の発生率 (k : 故障率) に着目し, ソフトウェア信頼度成長モデルと組合せることで, 市場での故障発生を予測しテスト完了の判断基準を明確にする。

2.2.2 オーカマモデル市場故障予測部の詳細アプローチ (具体的内容: 下記(1)~(5))

- 2.2.2(1) テスト工程の故障収束判断と故障数の経時変化をモニターする。(検証 4.1 で取組み)
- 2.2.2(2) モニターした故障数から, 故障率 k を算出する。(検証 4.2 で取組み) 算出は
①故障発生数の減衰傾向を指数関数の減衰曲線に近似させた算出, 及び
②ソフトウェア信頼度成長モデルで故障累積曲線にフィッティングして算出。
- 2.2.2(3) 算出した故障率 k を用いて, $R(t) = \alpha \times (1 - e^{-k \times t})$ の故障率 k に置き換え, 市場での故障発生予測をする (検証 4.3 で取組み)
- 2.2.2(4) 市場での実際のユーザの利用法 (市場使われ勝手) を想定したユースケーステストにおける故障発生件数の収束判断を組合せ, テスト完了を精度良く判断する。(検証 4.5 で取組み)
- 2.2.2(5) テスト工程中の故障が収束していない場合, 収束するための原因分析, 影響分析, 類似故障再発防止を開発組織へ指導する。(検証 4.6 で取組み)

3. 提案

3.1 施策の検討

問題に対して, ソフトウェア開発中の故障数からソフトウェア信頼度成長モデル ((1)減衰曲線, (2)指数形モデル, (3)習熟 S 字形, (4)ゴンベルツ曲線) を用い故障率を算出する。算出した故障率を用い $R(t) = 1 - e^{-k \times t}$ から市場での故障発生予測し保証値以内であればテスト完了と判断, 又は無故障発生期間を予測する。

3.1.1 開発期間とリリース後のソフトウェア故障率

ソフトウェアの故障数 (もしくは故障率) は, テスト時間とともに変化し, 故障を修正し回帰テストを実施しながら故障数が収束し安定する。故障数はほぼ一定の低い水準となる。その曲線を $f(t) = A \times e^{-k \times t}$ で, 一方, ソフトウェアリリース後の市場での故障発生予測を $R(t) = 1 - e^{-k \times t}$ で表せるとした (ハードウェアの故障率が一定値に安定した時期の, 故障数予測式の応用)。そして開発期間のソフトウェア故障率 k を用いて $R(t)$ を予測する。

3.1.2 減衰曲線と指数関数による表現

ソフトウェア開発期間と市場使用期間を減衰曲線と指数関数で論証する。

ソフトウェア開発期間中の故障数 (故障率) は, いわゆるテストケース及びレビューで検出された故障数, 指摘数とした。期間, 時間を各開発マイルストーンとし, そのマイルストーンにおいて, ソフトウェアの故障残数, 故障率が図 2 で示す減衰曲線に従うと仮定した場合, 右式に示す。 $f(t) = A \times e^{-k \times t}$

但し, 時間 t での故障数 $f(t)$, k は故障率, t は開発期間, e は自然対数の底, A はテストケース数, レビュー数。

ソフトウェア不良が主たる故障の原因となっ

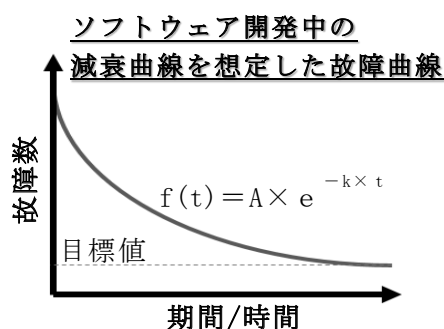


図 2 ソフトウェア開発期間

ている期間であり,故障残存数,故障率は期間,時間とともに減少する.ソフトウェア開発期間中に算出した故障率 k を用いて市場使用期間中の故障数を予測する.ソフトウェア開発期間中で算出した故障率 k を用い,市場使用期間中に生じる可能性がある故障数が保証値以内であれば開発期間中に十分な故障が検出されたといえる.市場使用期間中に生じる故障数予測を図3と下式に示す.

$$\text{保証値} > R(t) = \alpha \times (1 - e^{-k \times t})$$

但し, $R(t)$ は故障数, k は故障率, t は市場保証期間, α は生産台数

ソフトウェアは条件が揃えば必ず故障を起こすため本来は生産台数とは無関係だが.生産台数が多いと,ソフトウェア開発期間中で算出した故障率は,想定したシナリオから定義したテストケース,レビュー以外の条件の組合せが起こる可能性が高くなり,想定外のシナリオから生じる偶発的故障として観測されると仮定している(例えばテストケース設計で,2変数の条件組合せは全網羅できるが3変数以上の全網羅は組合せ数が莫大となり現実的に不可能だが,実運用で偶発的に故障が発生する).

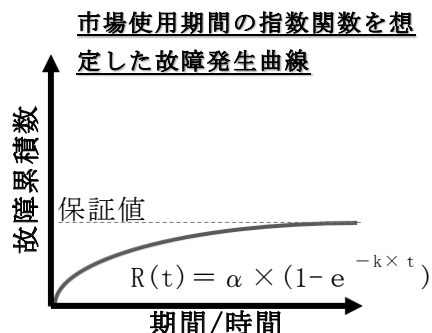
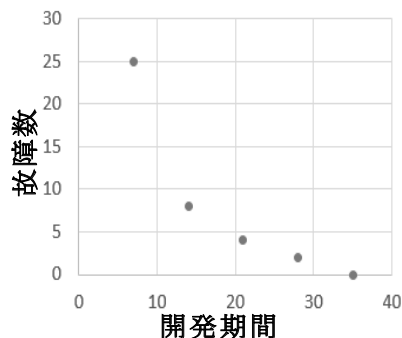


図3 市場使用期間

4. 検証

4.1 テスト工程の故障収束判断と故障数の経時変化をモニターする。(問題解決のアプローチ 2.2.2(1) に関する取組み)

故障率を算出するために,仮定として開発中の典型的な値を検証に用いた.開発期間を35か月,各マイルストーンを7か月毎に計5回,各回のテストケース100,マイルストーン毎の検出故障数を10件,3件,2件,1件,0件.レビュー数30,レビュー指摘数は15件,5件,2件,1件とし,全故障,指摘に対して対策を講じたとする.開発期間と故障数とレビュー指摘数の合計を図4に示す(全39件).また,市場保証期間を10年,市場生産台数を100万台,保証件数は1件未満とする.図4の,開発マイルストーン毎の故障数は,減衰曲線を描き収束している.



(テスト・レビュー実施期間)

図4 開発マイルストーン毎の故障数

4.2 開発期間の故障率の推定

4.2.1 故障発生数の減衰曲線を指数関数で近似して故障率推定 (問題解決のアプローチ 2.2.2(2)①)

(1)減衰曲線:4.1の検証用データの5回マイルストーンでの全テストケース数とレビュー項目を総和した件数が,5回のマイルストーンの通過中(35か月目)に計39件パスしなかった故障として, $f(t) = A \times e^{-k \times t}$ でソフトウェア開発期間の故障率 k を算出する.

$$39 = (100 \text{ 件} \times 5 \text{ 回} + 30 \text{ 件} \times 5 \text{ 回}) \times e^{-k \times 35 \text{ か月}}$$

$$\therefore k = 0.08$$

しかし,このような式だけの計算では観測した故障数を表せないことが分かった(図5).従って式でなく次の近似法で故障数の曲線を計算し,故障率 k は式中でなく曲線の傾きとした.

i)時間 t での故障発生数が減衰する傾向に指数関数

($y = a + b \times e^{-c \times t}$) にあてはめ,差分を最小二乗化するよう近似する(図6a).

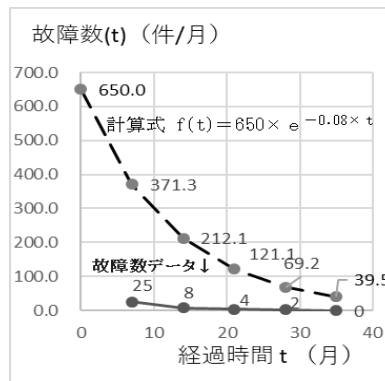


図5 計算式のずれ

関数式中の a, b, c は指数関数の定数係数を表している。

ii) 経過時間 t での傾きの変化から時間 t での故障率を計算し、テスト完了・リリース直後の故障率（及び逆数の平均故障時間 MTBF (Mean Time Between Failure) を求める。時間 t の故障率 k の対数值 = $-0.1215t + 1.9557$ の線形近似式より、テスト直後の単位時間（月）当たりの推定故障率 $k=0.08907$ （件/月）（図 6b）。

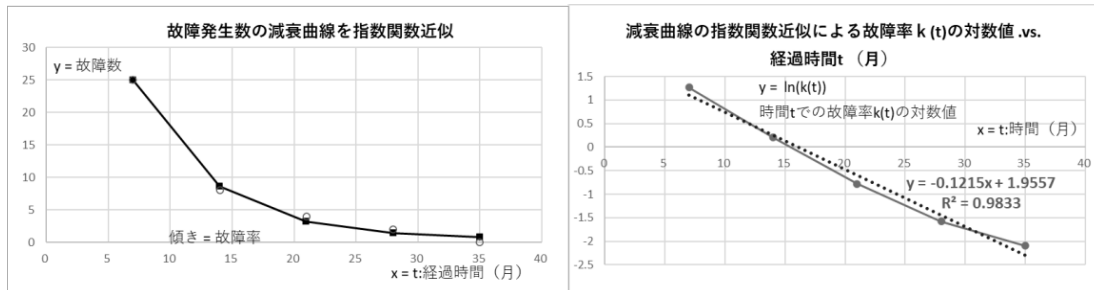


図 6 a 故障発生数の減衰曲線を指数関数近似 図 6 b 故障率 k(t) の対数值 vs 経過時間 t

4.2.2 ソフトウェア信頼度成長モデルで故障累積数曲線をカーブフィッティングした推定曲線から故障率を算出（問題解決のアプローチ 2.2.2(2)②）

ここでは 4.1 でモニターした故障累積数カーブを複数のソフトウェア信頼度成長モデル (2) 指数形, (3) 習熟 S 字形, (4) ゴンペルツ曲線でフィッティング計算を行い、計算した推定曲線式のテスト終了直後の傾きで単位時間当たりの故障率 k を算出する（図 7）。時間 t(i) での故障率 $k(t(i))$ は時間 t(i-1) から t(i) の間の単位時間の傾きである。

(2) 指数形モデル $F(t) = a \times (1 - e^{-b \times t})$ を用いた推定計算曲線（a, b, c は定数係数を表す）により、推定計算結果 $k=0.0390$ （単位：件/月）。

(3) 習熟 S 字形 $F(t) = a \times (1 - e^{-b \times t}) / (1 + c \times e^{-b \times t})$ を用いた推定計算曲線により、推定計算結果 $k=0.0390$ （単位：件/月）。S 字形モデルだが誤差最小化計算の結果、遅れ係数 $c=1E-7$ と 0 に極めて近くなり、指数形と同形状でほぼ同じ値となった。

(4) ゴンペルツ曲線 $F(t) = a \times \exp(-b \times e^{-c \times t})$ を用いた推定計算曲線により、推定計算結果 $k=0.00711$ （単位：件/月）。これも計算で S 字より指数形に近づいた。

なお各近似計算は、MS-Excel のソルバーによる差分二乗を最小化する係数計算、及びグラフの近似式計算の機能を用いている。

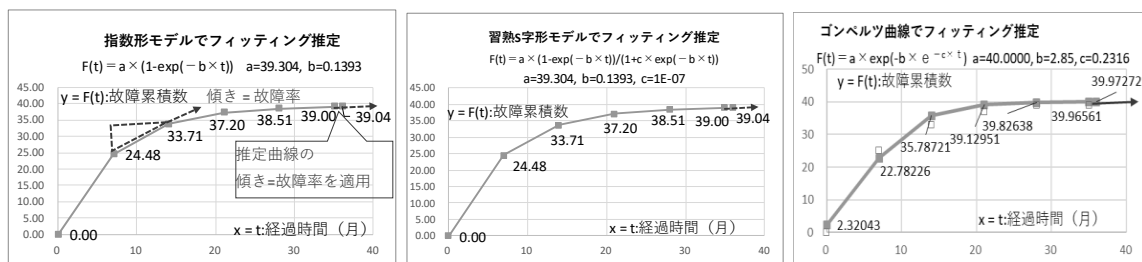


図 7 モデル別フィッティング推定曲線

a 指数形モデル

b 習熟 S 字形モデル

c ゴンペルツ曲線

4.3 市場での故障発生予測の計算

算出した故障率 k を用いて、 $R(t) = \alpha \times (1 - e^{-k \times t})$ の故障率 k に置き換え、市場での故障発生予測をする。（問題解決のアプローチ 2.2.2(3) に関する取組み）

市場での故障件数予測 $R(t) = \alpha \times (1 - e^{-k \times t})$ に、前記の各方法で求めた故障率 k を用いる。予測値と基準の保証値とを比較検討しテスト完了時期を判断する。減衰曲線 (1) から算出した故障率 k を例に用いて市場での故障発生予測をする。各算出法の計算結果を表 1 に示す。故障率 k（件/月）の違いにより、 $R(t) = \alpha \times (1 - e^{-k \times t})$ による市場保証期間内の故障累積値は図 8 のように増加しつつ発生すると予測でき、故障率 $k=0.0018$ 件/月以下程度なら保証値 20%以下に故障数を収められる。従って、テスト完了時にその直後の単位時間での推定故障率と比較すると、市場リスクが判断できる。

表 1 算出法別の故障率 k, MTBF と市場故障数予測一覧

故障率の算出方法	テスト完了直後の故障率 k(件/月)	テスト完了直後から市場保証期間10年間・100万台中の市場故障数予測(台)	同左の100万台中の無故障数予測(台)	テスト完了直後の平均故障時間(月) MTBF(Mean Time Between Failure)=1/k	その時点でのMTBF>テスト完了後の市場保証期間10年完了時(35+10 x 12=155月)となるまでの、テスト開始からの経過時間
(1)減衰曲線の指数関数近似	0.089	999,977	23	11.2	55月=4.6年 (テスト後20月=1.7年)
(2)指数形モデルフィッティング	0.039	990,710	9,290	25.7	47月=3.9年 (テスト後12月=1年)
(3)習熟S字形モデルフィッティング	0.039	990,710	9,290	25.7	47月=3.9年 (テスト後12月=1年)
(4)ゴンペルツ曲線モデルフィッティング	0.0071	573,951	656,259	140.7	36月=3年 (テスト後1月=0.08年)

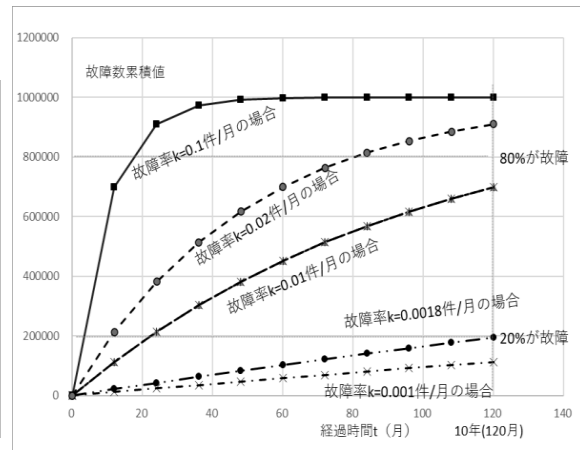


図 8 故障率 k (件/月) の違いによる市場使用期間中の故障数の累積値予測値 (故障あり台数 $R(t) = \alpha (1 - e^{-k \times t})$)

本来故障は条件が揃えば必ず起こるというシステムティックエラーで、システム要素の生産数・市場での使用台数の多少とは無関係である。

しかし、十分にテストされたソフトウェアでも、多くのソフトウェアの入ったシステムユニットが長時間使用される環境下では、テストケースで網羅されていない条件が揃う可能性が増し故障が確率的に発生する可能性がある（市場での使用が大量ランダムテスト相当と解釈）。このため $R(t) = \alpha \times (1 - e^{-k \times t})$ による市場での故障累積数予測と設定保証値との比較は、リスクを表現する手段の一つとして考えるのがよい。

4.4 考察

4.4.1 故障率に関する考察

1) 各方法で算出した故障率は、一致せず小数点以下1位から3位までの異なる値となった。またテストやレビューで検出した故障数に未検出の潜在的な故障の残存が少しでもあれば、故障率計算結果は大きく変化しやすい。このため、複数の算出法を組合せて一覽し、比較又は選択して用いるのが良いと考える。

2) ソフトウェア信頼度成長モデルに関して、故障数が、指数関数的な減衰を示す場合、S字形モデルも指数に非常に近い計算結果となる。習熟S字形とゴンペルツ曲線は2点の変曲点^[2]を有する特性のため、ソフトウェアがリリースされる毎に受入れテスト、レビューを実施して検出する故障数の表現よりも、ソフトウェア開発組織内のテスト、レビューを実施した際の故障数の時系列分析に適している可能性が高い。更にマイルストーン毎のテストの習熟度の影響は小さいと考えられる。

4.4.2 市場故障予測に関する考察

マイルストーン毎のテストで減衰曲線での収束傾向が観測できた場合、市場故障予測で、最小二乗法を用いてソフトウェア開発期間内のテスト、レビューにおける故障の曲線をフィッティングさせて前処理した後に減衰曲線の指数関数近似を適用し、故障率を計算して、観測データのばらつきに対策する方が、故障率をよりの確に算出できる可能性がある。

ハードウェア故障台数予測では用いられる出荷後の故障台数累積予測式 $R(t) = \alpha \times (1 - e^{-k \times t})$ によるソフトウェアの市場故障数予測値は、市場リスクを表現する手段の一つとして考えるのがよい。

また、市場故障予測の保証値(=1件)には達しないため、(a)保証値を達成する故障率になるまで継続してテスト、レビューを実施し、検出故障を確実に対策する、(b)テスト終了後にMTBFの期間毎に追加テストを繰り返すことで、テスト長期化を避ける、(c)ソフトウェア開発組織内のデータも含めて推定精度を上げる、などの対策が考えられる。

4.5 実際のユーザ利用法（市場使われ勝手）を想定したユースケーステスト

（問題解決のアプローチ 2.2.2(4) に関する取組み）

ユースケースは市場環境、使われ勝手を多角的に想定する。ステークホルダーからシステムとユーザの相互作用、関係を検討しテストモードを作成しテストを実施することが必要である。実際の市場使われ勝手、環境条件、いわゆるユースケーステストにおける故障数を図9に示す。ユースケース故障数曲線からモデルである減衰曲線、最小二乗法を使用できることを示唆している。目標テスト時間前に使用時間に対する故障数が0となり飽和状態になったことを確認し、先に示したソフトウェア信頼度成長モデルから故障率を算出し、指数関数を想定した故障累積数 $R(t) = \alpha \times (1 - e^{-k \times t})$ から、ソフトウェアの市場故障発生数と MTBF 予測が可能と考える。以上より、要求仕様書又は設計書から作成したテスト仕様書を基に実施するテストから算出した故障率、更に実際の市場でのユーザによる使われ勝手、環境条件によるユースケーステストから算出した故障率を各々を用いて両面から監視することで、より高精度のテスト完了判断、及び市場故障発生予測判断の参考となる。

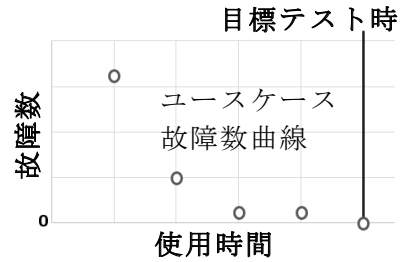


図9 実車 A を用いたユースケーステスト結果

4.6 故障数が収束していないケース

（問題解決のアプローチ 2.2.2(5) に関する取組み）

一方、テストを実施し故障数が収束していないケースを図10に示す。UNIT A は、ROM 使用量は 796K、RAM 使用量は 35K である。継続的に故障が発生し、目標テスト時間に達した時点では故障数が0になった。

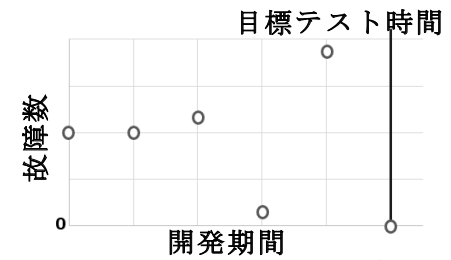


図10 UNIT A 故障数曲線

しかしソフトウェア信頼度成長曲線を用いて故障数収束判定をすると、まだソフトウェアに故障が残存している可能性が高い。その改善策を以下に記述する、

1. 故障に対策して原因を修正したソフトウェアが関連するソフトウェアへの影響分析を実施してデグレードを防ぐ。ソフトウェア間のトレーサビリティから影響分析できる。

2. 故障の原因分析を確実に実施することである。テストで発見した故障を原因コードへ置き換え原因分析することでテストシナリオ、因子、水準、ユースケースが改善し、テストでの故障をよりの確に検出することが期待できる。故障原因を修正したソフトウェアで継続してテストを実施し、故障数が0に収束することを確認しなければならない。

4.7 追加の検証

3. で提案した仮説を用いて、ソフトウェアの市場故障予測をする際は減衰曲線、最小二乗法のモデルが参考になると述べてきた。

そこで、減衰曲線、最小二乗法のモデルを用い、実際開発してきた UNIT B の累積故障数曲線からソフトウェアの市場故障予測を行う。図11に UNIT B の累積故障曲線を示す。ROM 使用量は 1477K、RAM 使用量は 194K である。実開発の UNIT B の開発変遷と市場保証期間と市場生産台数を以下に記す。開発期間を 15 か月、各マイルストーン期間を 15 か月、テストケース 3762 件故障数を 111 件。



図11 UNIT B 累積故障数曲線

全故障に対して対策を講じた。

また、市場保証期間を 10 年、市場生産台数を 1000 万台、保証件数は 1 件未満とする。各予測結果を表 2 に示す。

表 2 UNIT-B の算出法別の故障率 k, MTBF と市場故障数予測一覧

故障率の算出方法	テスト完了直後の故障率 k(件/月)	テスト完了直後から市場保証期間10年間・1000万台中の市場故障数予測(台)	同左の1000万台中の無故障数予測(台)	テスト完了直後の平均故障時間(月) MTBF(Mean Time Between Failure)=1/k	その時点で MTBF>テスト完了後の市場保証期間10年完了時(15+10 x 12=135月=580週)となるまでの、テスト開始からの経過時間
(1)減衰曲線の指数関数近似	0.08件/週 =0.344件/月	10,000,000	0	0.24年=2.9月 =12.6週	2.1年=25.6月=111週 (テスト後1.0年=11.8月=51週)
(2)指数形モデルフィッティング	0.033件/週 =0.144件/月	10,000,000	0	0.58年=7.0月 =30.2週	1.8年=21月=91週 (テスト後0.6年=7.2月=31週)
(3)習熟S字形モデルフィッティング	0.033件/週 =0.144件/月	10,000,000	0	0.58年=7.0月 =30.2週	1.8年=21月=91週 (テスト後0.6年=7.2月=31週)
(4)オンベルツ曲線モデルフィッティング	0.015件/週 =0.064件/月	9,995,539	4,461	1.3年=15.6月 =67.4週	1.5年=18月=78週 (テスト後0.3年=4.2月=18週)

これらより、市場保証期間内では全台数での故障発生を予測する結果となり、MTBF で分かる時点で数次に分けて市場故障分析、追加テストと修正などの対策活動に備えられる。

従来は、開発期間に対する累積故障数の飽和時、或いは故障に対しソフトウェア修正後のリリース時に、予測型のテスト完了の判断方法及び基準が不明確であった。しかしながらソフトウェア品質をソフトウェア信頼性モデルから故障率を算出し、指数関数を想定した $R(t) = \alpha \times (1 - e^{-k \times t})$ から、定めた市場保証期間内でソフトウェアの市場故障発生数を予測することで、保証値と比較し達成までテスト期間を延長する場合の追加期間、又は MTBF を活用してテスト完了と追加テストの時期の判断材料になることを確認した。

5. 結論

開発中の故障をソフトウェア信頼度成長モデルから故障率を算出し、市場での故障率が一定に飽和する状態を $R(t) = 1 - e^{-k \times t}$ に置換して、市場品質を予測したテストの終了・追加の判断指標の最初の段階の判断材料を得た。市場故障発生予測と関連付けて（オーカマモデル市場故障予測部）、より精度良くテスト完了・追加の判断へとつながることが期待できる。

また、MTBF より算出した平均故障時間より定期的な市場監視を推奨できる。

6. 今後の課題と展開

故障率の精度を向上させ市場故障発生予測をよりの確に求めることが引き続き課題であるが、このためにも、ソフトウェア信頼度曲線モデルの更なる追究を行う必要がある^[1]。

また開発組織の原因分析と対策活動状況及びテストケース・レビュー項目内容との関連性も含めたソフトウェア潜在故障予想及びテスト完了判断指標の策定も今後の課題である。

さらに取引先からのソフトウェア納品時に問題の少ないソフトウェアが納入されるよう、開発途中（試作時）の指針（開発途中経過での故障原因の特定と傾向分析、再発防止策の実施・伝達定着などの品質対策）の効果が検証できる取組みも必要である。

謝辞

本研究活動と論文執筆にあたり、研究コース 1 山田 淳主査、田中 桂三副主査、中森 博晃アドバイザーには、有益なご助言及びご教授賜り感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 古山恒夫 ソフトウェア信頼度成長モデルに関する統合モデルの解析的パラメータ推定法 情報処理学会論文誌, 1996
- [2] 岡野 麻子 岡田 政之 土屋 義兼 定量的プロジェクト管理におけるソフトウェア品質予測モデルの構築と適用, MSS 技報・Vol. 26, 2016
- [3] 大村 平 著 信頼性工学のはなし, 日科技連
- [4] ソフトウェア品質知識体系ガイド SQuBOK Guide V2, SQuBOK 策定部会

付録 1

論文 1. はじめに に関する前提事項の詳細.

1.2 前提事項

本研究は, テスト戦略が整備されテストケースの網羅性が十分に高いことが前提である.

1.2.1 テスト仕様書の例

テスト仕様書は, 図 1 のような「テスト手順書」と「テストケース書」で構成される. テストケース書は, 図 2 に示す通り, 要求仕様書からテスト対象の機能, シナリオ, 期待値 (判断基準), 因子, 水準を抽出し作成される. テストケースを基にテストを実施すること.

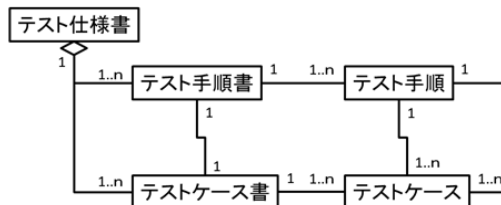


図 1 テスト仕様書構成

No	確認内容(シナリオの内容)	期待値(判断基準)	因子	水準	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	Start Stop switchを押してすぐ離れた(長押ししていない)場合のSTS信号は入力される。	STS信号は、0v/バッテリー電圧、730ms±20ms以外のこと	電圧	0v															
				5.9v (SPEC外)	○	○	○	○											
				6v					○	○	○	○							
				12v (SPEC外)											○	○	○	○	
Autoモード			ON時間	709m (SPEC外)	○				○					○					
				710ms		○				○					○				
				750ms			○				○						○		
				751ms (SPEC外)				○										○	

図 2 テストケース書例

1.2.2 テスト及びユースケーステストの対象

また, 市場使われ勝手, 使用環境, 操作等様々なユースケースを想定し, 図 3 で示す対象機能環境下におけるテストを必要十分な期間で実施すること.

両側面のテストを実施することで, ソフトウェアの品質を保証することが求められる.

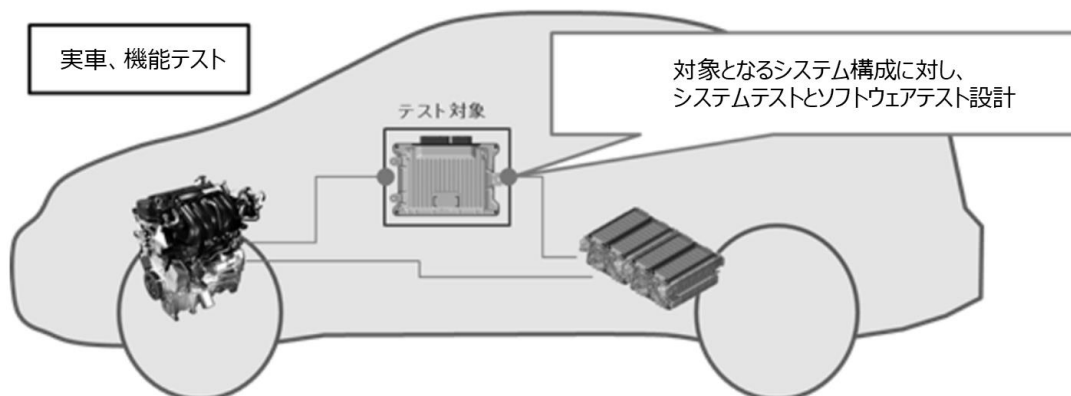


図 3 対象機能環境下におけるテストとテスト対象システム例

付録 2

論文 4.6 故障が収束していないケースで、故障原因の区分の正確さを改善する目的で用いることを検討した原因コードを以下に示す。

表 1 テスト故障原因分析

原因コード	原因コードの推定材料
要求仕様書の確認不足	① Input 情報の入手 <ol style="list-style-type: none"> 1. 確認した Input 情報バージョン 2. 確認した Input 情報の網羅性 3. 確認した Input 情報の伝達 ② 要求仕様書の一致性
要求仕様書の理解不足	① 要求仕様書の合意
関連機能の確認不足	① 利害関係者の期待事項 ② システム要求、ソフトウェア要求の構造化 ③ システム要求、ソフトウェア要求の影響 ④ システム要求、ソフトウェア要求の構造化の一致性
関連機能の理解不足	① システム要求、ソフトウェア要求の構造化の合意
テスト仕様書の確認不足	① テスト戦略 ② テスト設計書 <ol style="list-style-type: none"> 1. テスト仕様書 2. テスト手順書 3. テストケース
テスト仕様書の理解不足	① テスト設計書の合意
テスト方法習熟不足	① テスト担当者がテスト習熟しなかったことに気付いたテスト手順書があるケース
テスト仕様書の検討不足	① 上記に該当しなかった場合は、『テスト仕様書の検討不足』が原因コード

付録 3

論文 4.1 テスト工程の故障収束判断と故障数の経時変化をモニターに関して、故障累積数の曲線を図4に示す。

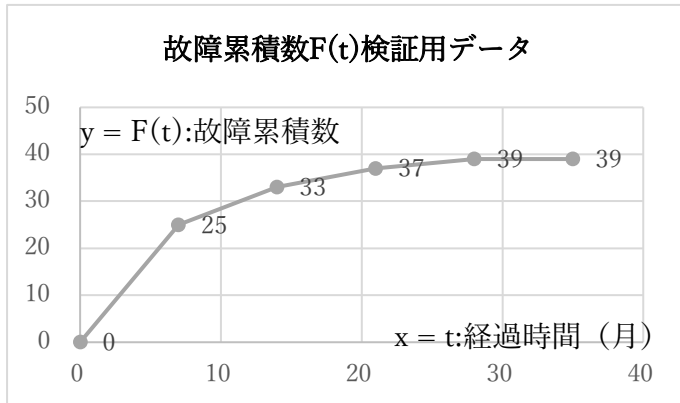


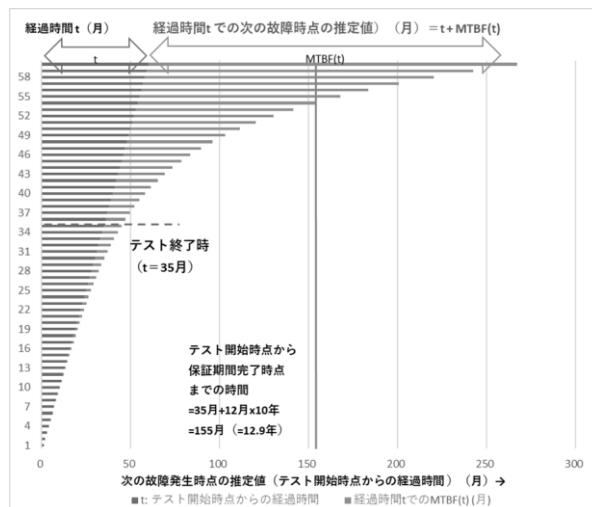
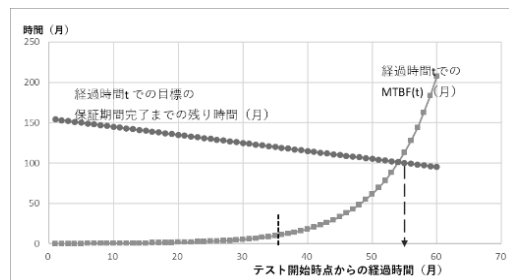
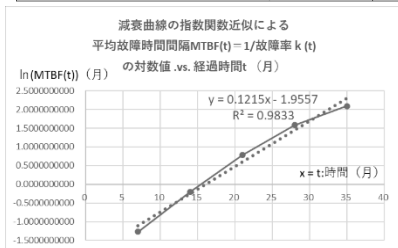
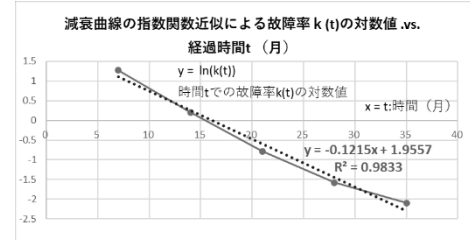
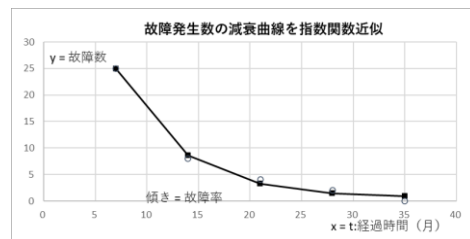
図4 故障累積数検証用データ

論文 4.2.1 故障発生数の減衰曲線を指数関数で近似させた故障率推定に関して

(1) 故障発生数の減衰曲線の指数関数近似

故障発生数の減衰曲線の指数関数近似 (35 か月データから推定) の計算資料

減衰曲線の指数関数近似による故障率 $k(t) = A + B \cdot \exp(-C \cdot t)$					
開発期間	35か月	A=	0.579655789		
マイルストーン間隔	7か月	B=	73.98748062		
		C=	0.158909309	最小二乗法で補正前処理したカーブの傾き (故障率 $k(t)$) の時変化	傾き=故障率 $k(t)$ の対数値
t(月)	故障数	指数減衰曲線推定 (最小二乗法で補正前処理)	実際と推定の差の二乗	経過時間tにおける故障率 $k(t)$ /月	$\ln(k(t))$
0					#NUM!
7	25	24.90529089	0.008969816	3.557898698	1.269170117
14	8	8.577448363	0.333446612	1.225349766	0.203226327
21	4	3.209173407	0.6254067	0.458453344	-0.779896751
28	2	1.444189701	0.308925088	0.206312814	-1.578361745
35	0	0.863897614	0.746319087	0.123413945	
			2.02306730		
			↑ Excel Solver で最小化		
			$k(t) = \exp(y)$	$y = -0.1215x + 1.9557$ (t(月))	
			0.100580186	-2.2968	35
テスト終了直後の単位時間の故障率 k (件/月)			0.08907291	-2.4183	36
テスト終了直後の単位時間のMTBF (月)			11.2267576		



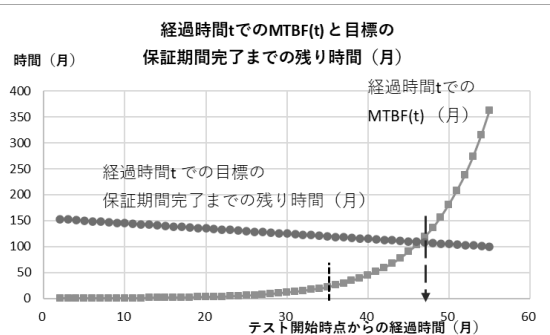
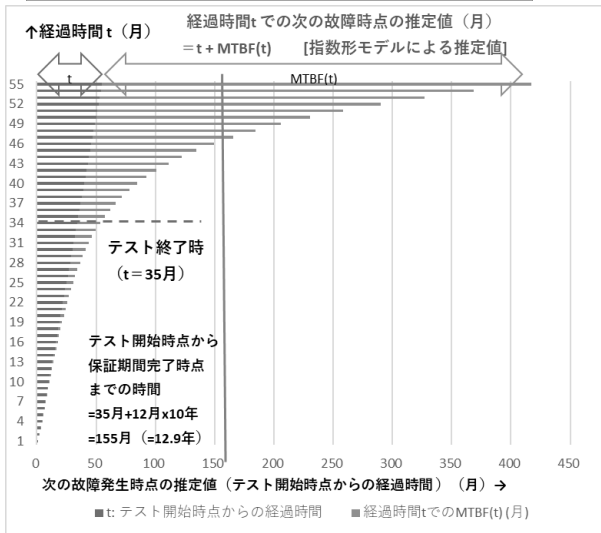
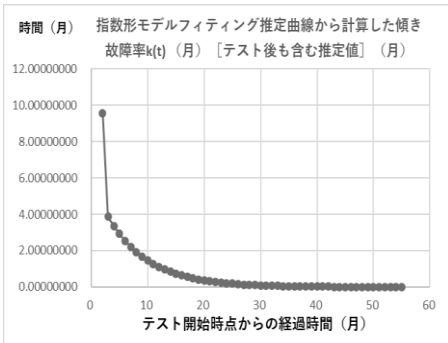
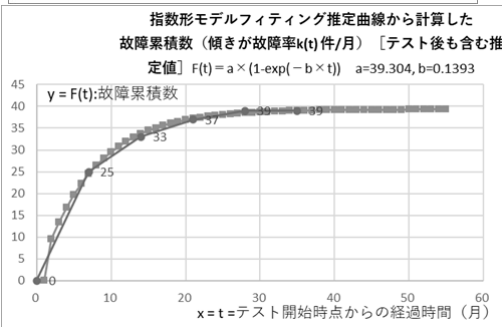
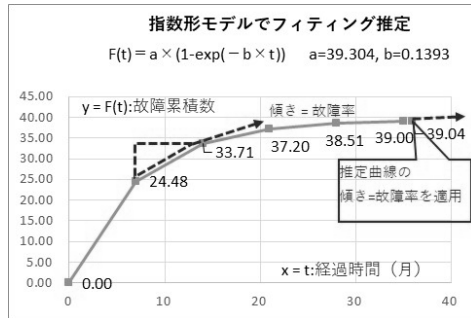
論文 4.2.2 ソフトウェア信頼度成長モデルで故障累積数曲線をカーブフィッティングした推定曲線からの故障率の算出に関して.

(2) 指数形モデル

指数形モデルで故障累積数曲線をカーブフィッティング (35 か月データから推定) の計算資料

		指数形	$F(t) = a \times (1 - \exp(-b \times t))$	
a=		39.30431945		
b=		0.13931473		
c=		なし		
t(月)	故障累積数 F(t)	指数形推定カーブ1	経過時間t(i)での故障率 (=t(i)-1)-t(i)間の故障数) 件/月	差分の二乗及び総和
0	0	0.00		0.0000
7	25	24.48	3.4974	0.2683
14	33	33.71	1.3189	0.5107
21	37	37.20	0.4974	0.0386
28	39	38.51	0.1876	0.2407
35	39	39.00	0.0707	0.0000
	↑観測値39以上		テスト直後の単位時間(月) 当たりの故障率の推定値	1.0582
36	39.04			↑excelソルバーで最小化計算

テスト終了直後の単位時間の故障率 k (1/月)	0.0389861196
テスト終了直後の単位時間のMTBF (月)	25.65015474

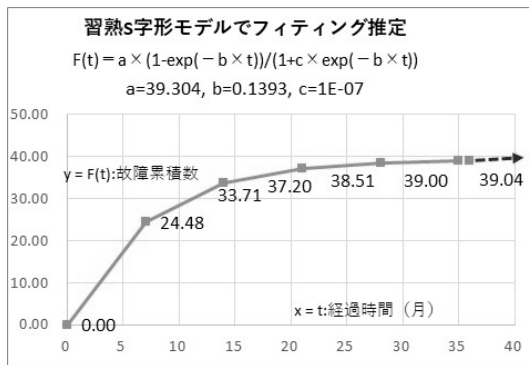


x=t: テスト開始時点からの経過時間	指数形推定カーブ1	経過時間tでの故障率 k(t)(件/月)	経過時間tでのMTBF(t) (月)	経過時間tから見て、保証期間(テスト後10年)が完了するまで、あと何か月?	保証期間(テスト後10年)
t: テスト開始時点からの経過時間				経過時間tにおける目標の保証期間完了までの残りMTBF到達目標期間(t) - (テスト終了時点の10年後) - テスト開始後経過時間 - (35+120月) - t = 155-t(月)	= (35+120月) = 155(月)
				z(t)=保証期間(テスト後10年)までの残存期間 (月)	155
46	39.2396	0.00967997	103.3061499	109	149.3
47	39.2480	0.00842113	118.7489545	108	165.7

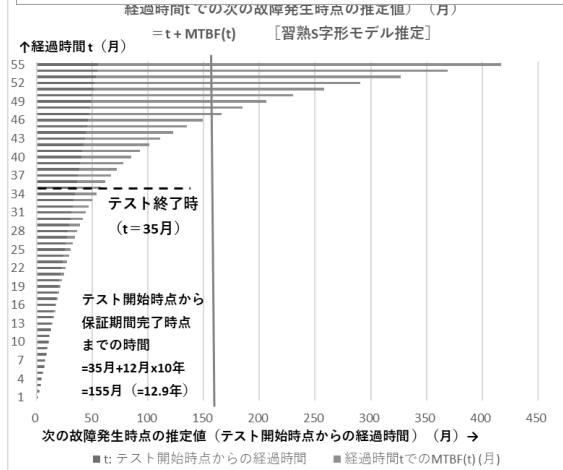
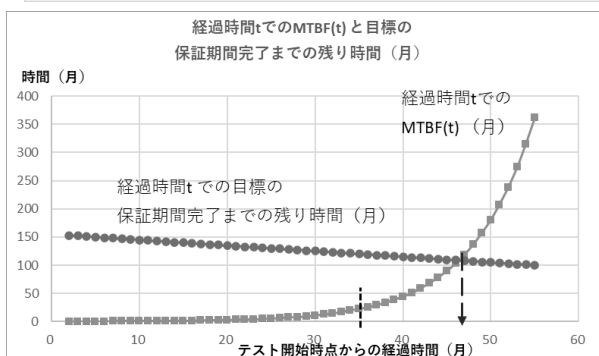
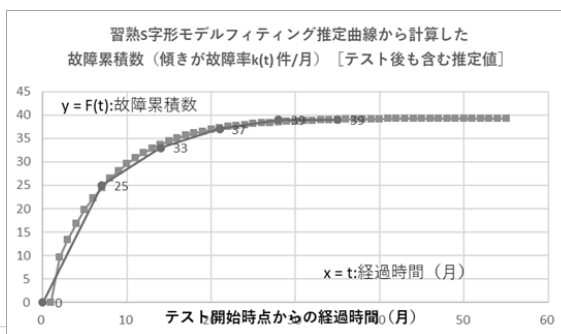
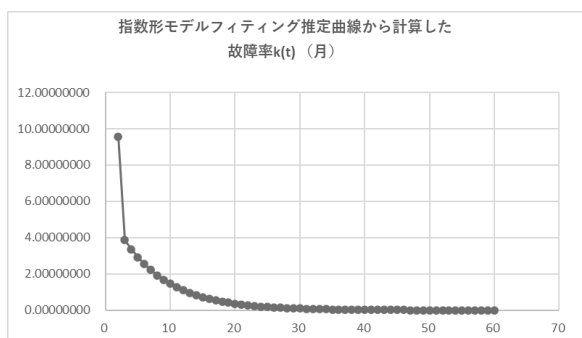
(3) 習熟 S 字形モデル

習熟 S 字形モデルで故障累積数曲線をカーブフィッティング (35 か月データから推定) の計算資料

		習熟S字形	$F(t) = a \times (1 - \exp(-b \times t)) / (1 + c \times \exp(-b \times t))$	
a=		39.30433339		
b=		0.139314753		
c=		1E-07		
t(月)	故障累積数 F(t)	習熟S字形推定カーブ1	経過時間t(i)での故障率 (=t(i-1)-t(i)間の故障数) / 件/月	差分の二乗及び総和
0	0	0.00		0.0000
7	25	24.48	3.4974	0.2683
14	33	33.71	1.3189	0.5107
21	37	37.20	0.4974	0.0386
28	39	38.51	0.1876	0.2407
35	39	39.00	0.0707	0.0000
		↑観測値39以上	テスト直後の単位時間(月)当たりの故障率の推定値↓	1.0582
36		39.04	0.0390	↑excelソルバーで最小化計算



テスト終了直後の単位時間の故障率 k (1/月)	0.0389861120
テスト終了直後の単位時間のMTBF (月)	25.65015974

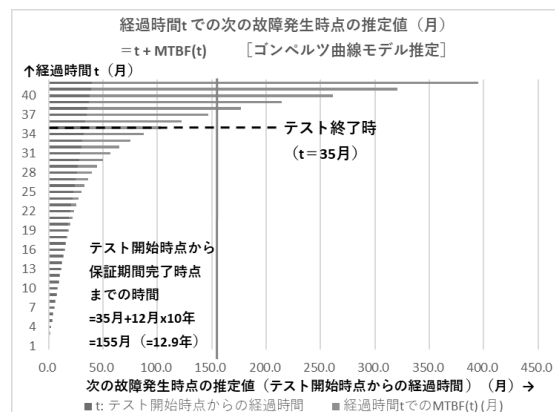
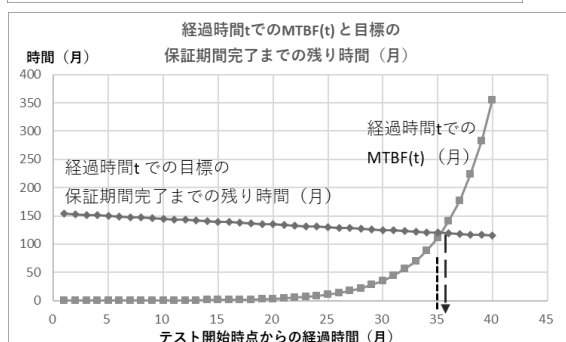
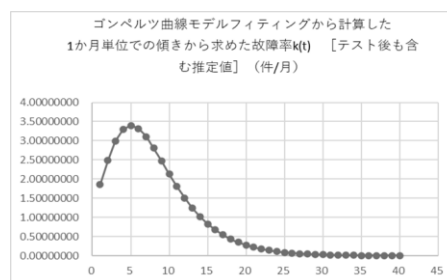
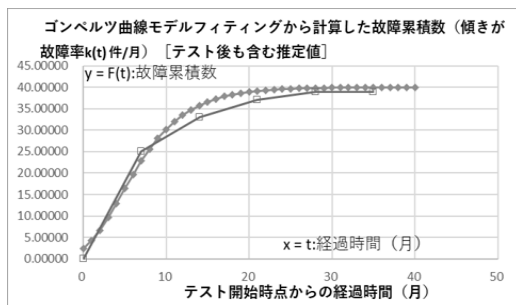
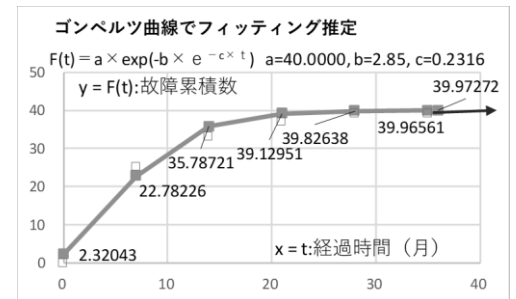


x=t: テスト開始時点からの経過時間	習熟S字形推定カーブ1	経過時間tでの故障率 k(t)(件/月)	経過時間tでの MTBF(t) (月)	経過時間tから見て、保証期間(テスト後10年)が完了するまで、あと何か月?	保証期間(テスト後10年)
t: テスト開始時点からの経過時間				経過時間tにおける目標の保証期間完了までの残りMTBF到達目標期間(t) = (テスト終了時点の10年後) - テスト開始後経過時間 = (35+120)月 - t = 155-t(月)	経過時間t + 経過時間 t におけるMTBF推定値 = 経過時間tでの次の故障発生時点の推定値 = 経過時間tからの無故障期待期間
				z(t) = 保証期間(テスト後10年)までの残存期間 (月)	経過時間tでの次の故障発生時点の推定値 (月) = t + MTBF(t)
46	39.2396	0.00967996	103.3061936	109	155
47	39.2480	0.00842112	118.7490075	108	155

(4) ゴンペルツ曲線

ゴンペルツ曲線モデルで故障累積数曲線をカーブフィッティング (35 か月データから推定) の計算資料

		ゴンペルツ曲線		$F(t) = a \times \exp(-b \times e^{-c \times t})$		
a=		40.0000000				
c=		0.231566883				
b=		2.85				
		↑ excelソルバーで係数計算		ゴンペルツ曲線推定値		
t(月)	故障累積数F(t)	$\exp(-ct)$	$=-b \times \exp(-ct)$	$\exp(-b \times \exp(-ct))$	$a \times \exp(-b \times \exp(-ct))$	差分の2乗及び総和
0	0	1.00000	-2.8471254	0.05801	2.32043	5.38441
7	25	0.19771	-0.5628972	0.56956	22.78226	4.91836
14	33	0.03909	-0.1112888	0.89468	35.78721	7.76855
21	37	0.00773	-0.0220026	0.97824	39.12951	4.53480
28	39	0.00153	-0.0043501	0.99566	39.82638	0.68290
35	39	0.00030	-0.0008600	0.99914	39.96561	0.93241
				↑ 観測値39以上		24.22143
36		0.00024	-0.0006823	0.99932	39.97272	
						↑ excelソルバーで最小化計算
					0.00711	



経過時間tから見て、保証期間 (テスト後10年) が完了するまで、あと何か月?	保証期間 (テスト後10年)
$k(t)$ tはテスト開始時点からの経過時間 $MTBF(t) = 1/k(t)$ tはテスト開始時点からの経過時間	$z(t) = \text{保証期間 (テスト後10年)}$ $z(t) = (35 + 120) - t = 155 - t$
ゴンペルツ曲線推定値 経過時間tでの故障率k(t)(件/月)	経過時間tでのMTBF(t)(月)
39.96561	111.6639013
39.97272	140.7322883
	120
	119
	146.7
	155
	176.7
	155

付録 4

付録 4.1 論文 4.3 表 1 の算出法別の市場故障数予測値算出の計算資料

		減衰曲線の指数関数近似			指数形モデルフィッティング			習熟S字形モデルフィッティング			ゴンベルツ曲線モデルフィッティング		
		故障率 k(件/月)			故障率 k(件/月)			故障率 k(件/月)			故障率 k(件/月)		
		MTBF=1/k			MTBF=1/k			MTBF=1/k			MTBF=1/k		
ソフトリリース後の動作条件組合せ市場ランダム実行全数=α=全生産台数で近似		0.0891 11.22334			0.03899 25.6476			0.03899 25.6476			0.00711 140.647		
全生産台数 α = 1000000		故障なし台数(無故障台数) $= \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数(故障件数) $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率(%)	故障なし台数(無故障台数) $= \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数(故障件数) $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率(%)	故障なし台数(無故障台数) $= \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数(故障件数) $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率(%)	故障なし台数(無故障台数) $= \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数(故障件数) $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率(%)
年	t: 月	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%
0	0	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%
1	12	343283	656717	65.67%	626328.7	373671	37.37%	626328.7	373671	37.37%	918218.4	81782	8.18%
2	24	117843.2	882157	88.22%	392287.6	607712	60.77%	392287.6	607712	60.77%	843125	156875	15.69%
3	36	40453.59	959546	95.95%	245701	754299	75.43%	245701	754299	75.43%	774172.9	225827	22.58%
4	48	13887.03	986113	98.61%	153889.6	846110	84.61%	153889.6	846110	84.61%	710859.8	289140	28.91%
5	60	4767.182	995233	99.52%	96385.45	903615	90.36%	96385.45	903615	90.36%	652724.6	347275	34.73%
6	72	1636.493	998364	99.84%	60368.97	939631	93.96%	60368.97	939631	93.96%	599343.7	400656	40.07%
7	84	561.7801	999438	99.94%	37810.82	962189	96.22%	37810.82	962189	96.22%	550328.4	449672	44.97%
8	96	192.8496	999807	99.98%	23682	976318	97.63%	23682	976318	97.63%	505321.7	494678	49.47%
9	108	66.20199	999934	99.99%	14832.72	985167	98.52%	14832.72	985167	98.52%	463995.7	536004	53.60%
10	120	22.72602	999977	100.00%	9290.155	990710	99.07%	9290.155	990710	99.07%	426049.4	573951	57.40%

故障率k=0.0646の場合の故障数累積値 (故障あり台数)
 $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$

故障数累積値

経過時間t(月)

故障率k=0.0389の場合の故障数累積値 (故障あり台数)
 $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$

故障数累積値

経過時間t(月)

故障率k=0.0389の場合の故障数累積値 (故障あり台数)
 $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$

故障数累積値

経過時間t(月)

故障率k=0.00711の場合の故障数累積値 (故障あり台数)
 $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$

故障数累積値

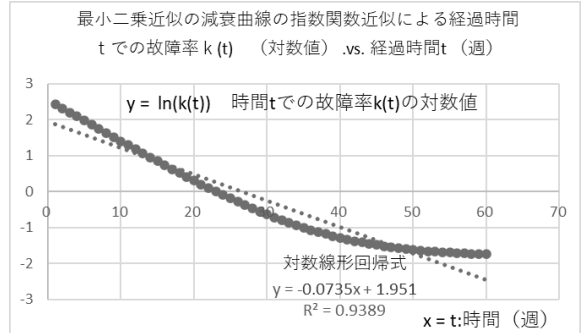
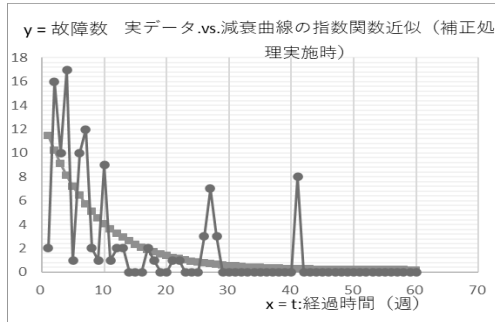
経過時間t(月)

付録 4.2 論文 4.3 図 8 故障率 k (件/月) の違いによる市場使用期間中の故障数の累積値予測値の計算資料

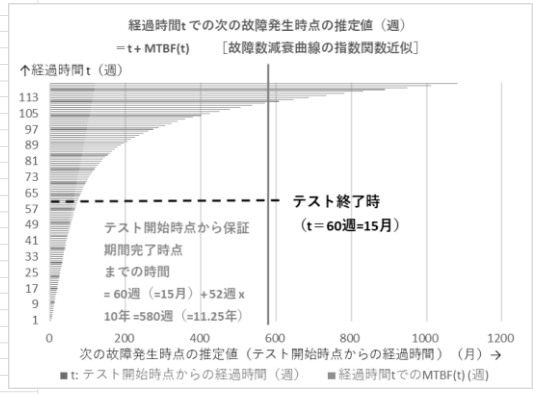
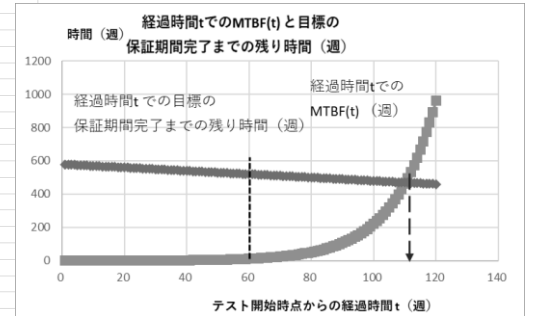
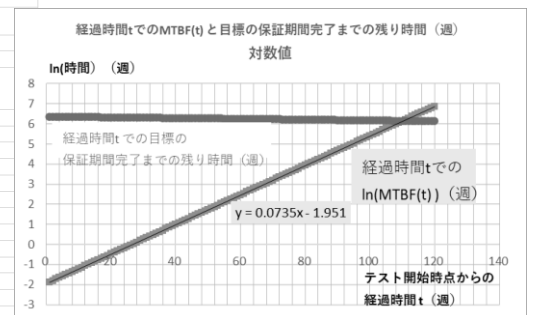
		故障率 k(件/月)			故障率 k(件/月)			故障率 k(件/月)			故障率 k(件/月)			故障率 k(件/月)		
		MTBF=1/k			MTBF=1/k			MTBF=1/k			MTBF=1/k			MTBF=1/k		
ソフトリリース後の動作条件組合せ実行全数=α=全生産台数で近似		0.1 10			0.01 100			0.001 1000			0.02 50			0.0018 555.5556		
全生産台数 α = 1000000		故障なし台数(無故障台数) $= \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数(故障件数) $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率(%)	故障なし台数(無故障台数) $= \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数(故障件数) $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率(%)	故障なし台数(無故障台数) $= \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数(故障件数) $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率(%)	故障なし台数(無故障台数) $= \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数(故障件数) $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率(%)	故障なし台数(無故障台数) $= \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数(故障件数) $= \alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率(%)
年	t: 月	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%
0	0	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%	1000000	0	0.00%
1	12	301194.21	698806	69.88%	886920.44	113080	11.31%	989071.71	11928	1.19%	786627.86	213372	21.34%	978631.61	21368	2.14%
2	24	90717.952	909282	90.93%	786627.86	213372	21.34%	976285.71	23714	2.37%	618783.39	381217	38.12%	957119.83	42280	4.23%
3	36	27323.722	972676	97.27%	697676.33	302324	30.23%	964640.29	35360	3.54%	486752.26	513248	51.32%	937254.9	62745	6.27%
4	48	8229.747	991770	99.18%	618783.39	381217	38.12%	953133.79	46866	4.69%	382892.89	617107	61.71%	917227.27	82773	8.28%
5	60	2478.7322	997521	99.75%	548811.64	451188	45.12%	941764.53	58235	5.82%	301194.21	698806	69.88%	897627.6	102372	10.24%
6	72	746.55581	999253	99.93%	486752.26	513248	51.32%	930530.9	69469	6.95%	236927.76	763072	76.31%	878446.74	121553	12.16%
7	84	224.86732	999775	99.98%	431710.52	568289	56.83%	919431.26	80569	8.06%	186373.98	813626	81.36%	859675.75	140324	14.03%
8	96	67.728736	999932	99.99%	382892.89	617107	61.71%	908464.02	91536	9.15%	146606.96	853393	85.34%	841305.86	158694	15.87%
9	108	20.399503	999980	100.00%	339595.53	660404	66.04%	897627.6	102372	10.24%	115325.12	884675	88.47%	823328.51	176671	17.67%
10	120	6.1442124	999994	100.00%	301194.21	698806	69.88%	886920.44	113080	11.31%	90717.953	909282	90.93%	805735.3	194265	19.43%

付録 5

付録 5.1 論文 4.7 表 2 の故障発生数の減衰曲線の指数関数近似 (UNIT B データの推定) の計算資料

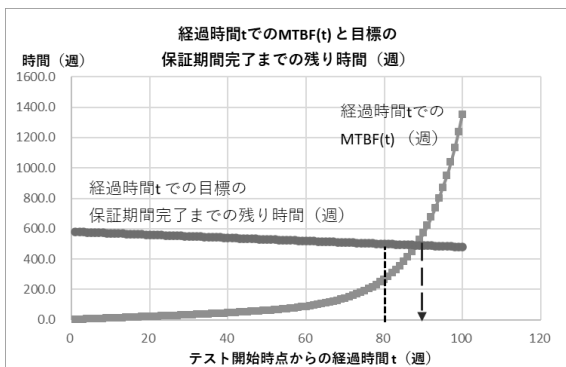
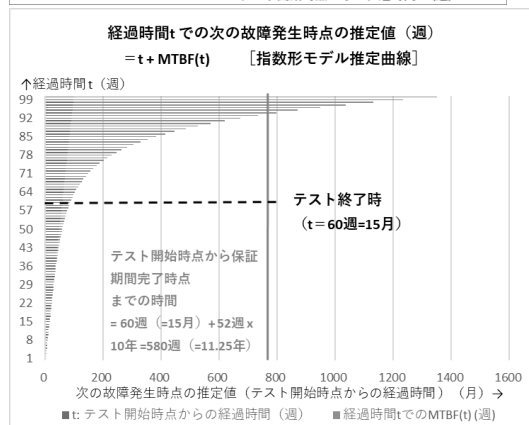
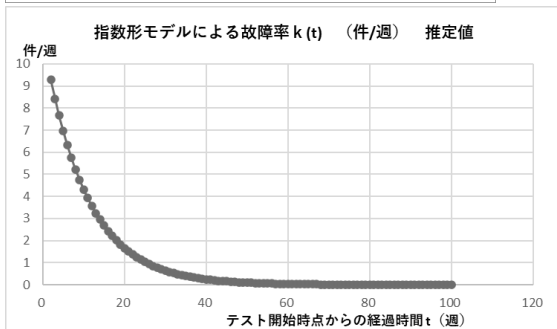
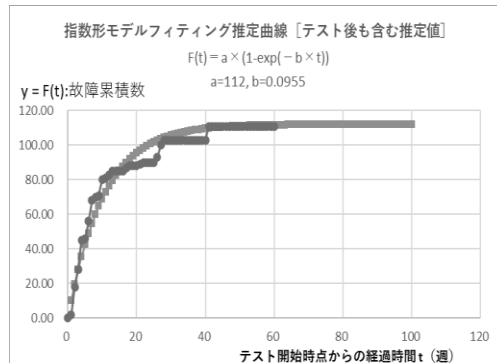
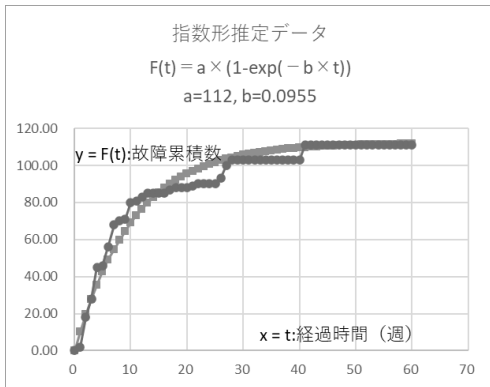


経過時間 (週)	故障数	故障率/マイルストン	指数関数近似 (補正処理)		経過時間における故障率k(t)/月	Ln(k(t))	MTBF=1/k	LN(MTBF)
			a	b				
0	0		0.163665478	12.70850995				
1	2	11.45511416			11.45511416	2.438436282	0.08729725	-2
2	18	10.1960625			10.1960625	2.32001616	0.09807708	-2
3	28	9.077401244			9.077401244	2.205787945	0.11016369	-2
4	45	8.083476183			8.083476183	2.089822001	0.12370915	-2
5	46	7.200378618			7.200378618	1.974133611	0.13888159	-2
6	56	6.415750744			6.415750744	1.858756021	0.15866408	-2
7	68	5.71861271			5.71861271	1.743726243	0.17486759	-2
8	70	5.09920897			5.09920897	1.629085424	0.19610885	-2
9	71	4.548871771			4.548871771	1.51487924	0.21934733	-2
10	80	4.059898958			4.059898958	1.401158308	0.24631149	-1
11	81	3.6254507			3.6254507	1.287978612	0.27827778	-1
12	83	3.239444744			3.239444744	1.17540194	0.30869488	-1
13	85	2.896480338			2.896480338	1.063496323	0.34524660	-1
14	86	2.591758137			2.591758137	0.952336463	0.37627377	-1
15	85	2.32101395			2.32101395	0.842004138	0.43084618	-1
16	85	2.080459061			2.080459061	0.732988572	0.48066315	-1
17	87	1.866727217			1.866727217	0.624186746	0.53969691	-1
18	88	1.676827518			1.676827518	0.516903626	0.59636426	-1
19	88	1.508102562			1.508102562	0.410852279	0.66308488	0
20	88	1.35810262			1.35810262	0.30615386	0.73627362	0
21	89	1.224989805			1.224989805	0.202937419	0.81632933	0
22	90	1.106652291			1.106652291	0.101339504	0.90362620	0
23	90	1.001504657			1.001504657	0.001039226	0.99849760	0
24	90	0.908081498			0.908081498	-0.096421109	1.1022275	0
25	90	0.829075477			0.829075477	-0.19228041	1.21210333	0
26	93	0.751329032			0.751329032	-0.289916922	1.33098187	0
27	100	0.685798122			0.685798122	-0.377171977	1.45819506	0
28	103	0.627577783			0.627577783	-0.465887659	1.59342798	0
29	103	0.575849296			0.575849296	-0.551900292	1.73956546	1
30	103	0.529888788			0.529888788	-0.635088129	1.88718845	1
31	103	0.4890551			0.4890551	-0.719234206	2.04476773	1
32	103	0.452770792			0.452770792	-0.79236926	2.20862304	1
33	103	0.420534137			0.420534137	-0.86622962	2.37792824	1
34	103	0.391892028			0.391892028	-0.936769917	2.55173225	1
35	103	0.366432653			0.366432653	-1.003910513	2.72893252	1
36	103	0.343832896			0.343832896	-1.067599506	2.90338954	1
37	103	0.323743349			0.323743349	-1.127804209	3.08886654	1
38	103	0.305893885			0.305893885	-1.184517018	3.26910752	1
39	103	0.290034723			0.290034723	-1.237754628	3.44786303	1
40	103	0.275943935			0.275943935	-1.287957367	3.62392454	1
41	111	0.263424339			0.263424339	-1.333989091	3.79619644	1
42	111	0.252300739			0.252300739	-1.377133495	3.96352387	1
43	111	0.242417474			0.242417474	-1.417093938	4.12511516	1
44	111	0.233636242			0.233636242	-1.453989893	4.28019787	1
45	111	0.22583416			0.22583416	-1.487954353	4.42802806	1
46	111	0.218902049			0.218902049	-1.519130915	4.56825327	2
47	111	0.212742901			0.212742901	-1.547670878	4.70050936	2
48	111	0.207270529			0.207270529	-1.573730436	4.82461257	2
49	111	0.202408353			0.202408353	-1.597468074	4.94050757	2
50	111	0.198088333			0.198088333	-1.619042221	5.04825289	2
51	111	0.194250017			0.194250017	-1.638609204	5.14800041	2
52	111	0.190839691			0.190839691	-1.656321517	5.24000010	2
53	111	0.187809634			0.187809634	-1.672326416	5.32454050	2
54	111	0.185117442			0.185117442	-1.686764831	5.40197610	2
55	111	0.182725444			0.182725444	-1.699770561	5.47269160	2
56	111	0.18060164			0.18060164	-1.711469728	5.53709352	2
57	111	0.178711864			0.178711864	-1.721980468	5.59599400	2
58	111	0.177034119			0.177034119	-1.731412805	5.64862868	2
59	111	0.175543405			0.175543405	-1.73986869	5.69659535	2
60	111	0.174218998			0.174218998	-1.747442162	5.73990215	2



	$\ln(\text{MTBF}(t))=y = 0.0735 t - 1.951$		経過時間tから見て、保証期間(テスト後10年)が完了するまで、あと何か月?		保証期間(テスト後10年)	
x=t: テスト開始時点からの経過時間	MTBF(t) tはテスト開始時点からの経過時間	MTBF(t)=EXP(y) 単位(週)	経過時間tにおける目標の保証期間完了までの残りMTBF到達目標期間(t)=(テスト終了時点の10年後)-テスト開始後経過時間 = (60週+10年 x 52週) - t = 580 - t(週)	経過時間t+経過時間 tにおけるMTBF推定値=経過時間tでの次の故障発生時点の推定値 = 経過時間tからの無故障期待期間	= (60週 + 52週 x 10年) = 580(週)	
t: テスト開始時点からの経過時間(週)	$\ln(\text{MTBF}(t))$	経過時間tでのMTBF(t)(週)	$\ln(z(t))$	z(t)=保証期間(テスト後10年)までの残存期間(週)	経過時間tでの次の故障発生時点の推定値(週) = t+MTBF(t)	
1	-1.8775	0.152972058	6.36130248	579	1.2	580
2	-1.804	0.164639013	6.35957387	578	2.2	580
3	-1.7305	0.17719579	6.35784227	577	3.2	580
4	-1.657	0.190710254	6.35610766	576	4.2	580
5	-1.5835	0.205255445	6.35437004	575	5.2	580
6	-1.51	0.220909978	6.3526294	574	6.2	580
7	-1.4365	0.237758459	6.35088572	573	7.2	580
8	-1.363	0.255891948	6.34913899	572	8.3	580
9	-1.2895	0.275408453	6.34738921	571	9.3	580
10	-1.216	0.296413453	6.34563636	570	10.3	580
59	2.3855	10.86449355	6.25575004	521	69.9	580
60	2.459	11.69311258	6.25382881	520	71.7	580
61	2.5325	12.58492916	6.25190388	519	73.6	580
109	6.0605	428.5896781	6.15485809	471	537.6	580
110	6.134	461.2775857	6.15273269	470	571.3	580
111	6.2075	496.4585522	6.15060277	469	607.5	580

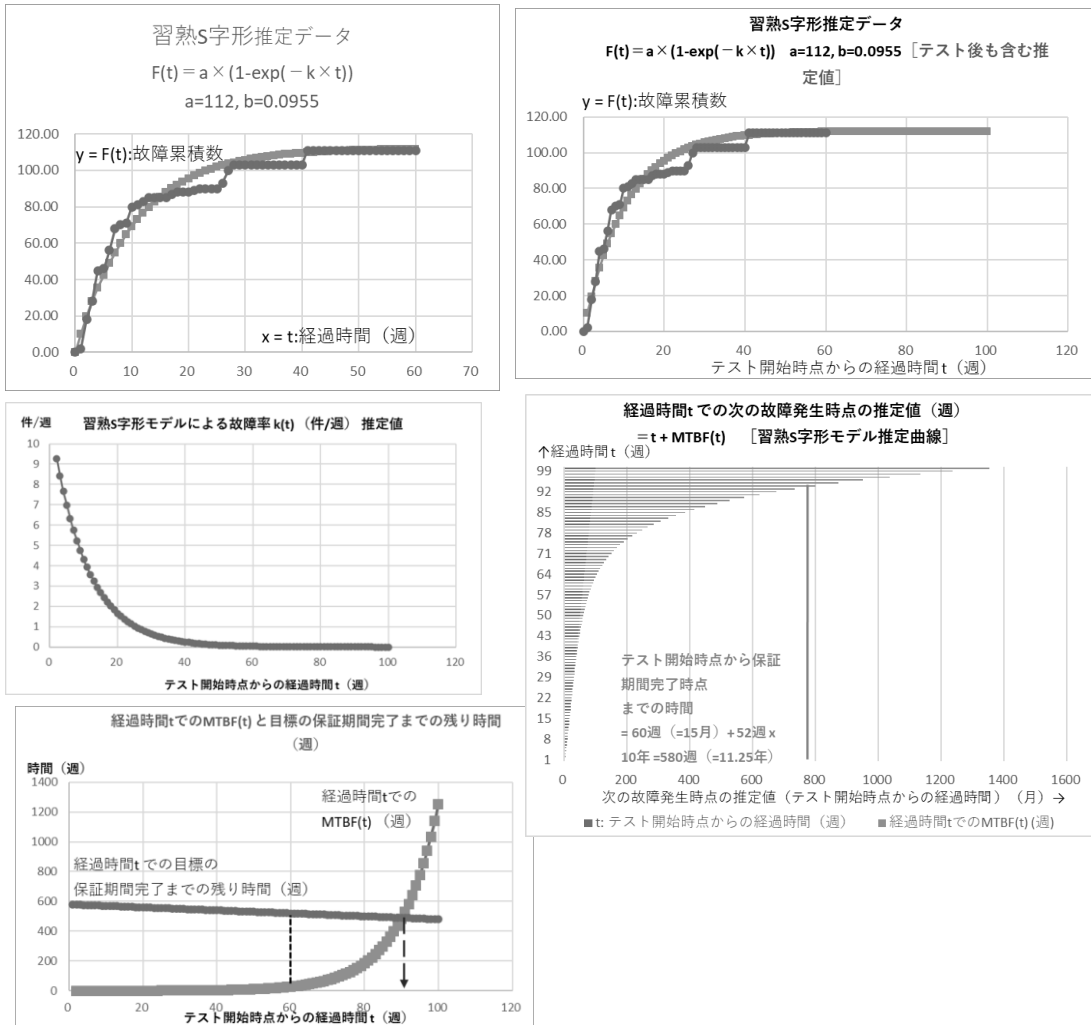
付録 5.2 論文 4.7 表 2 の指数形モデルによる故障累積数曲線フィッティング推定 (UNIT B データの推定) の計算資料



指数形モデル推定			選択
	112		
	0.095499088		
なし	指数型		
指数形推定データ2	差分の二乗	経過時間(t)での故障率 (=t(i-1)-t(i)間の故障数)	
	0.00	0.0000	
	10.20	67.2672	10.20
t(油)	19.47	2.1697	9.27
	27.90	0.0099	8.43
0	35.56	89.1084	7.66
1	42.52	12.0932	6.96
2	48.85	51.1148	6.33
3	54.60	179.4999	5.75
4	59.83	103.4274	5.23
5	64.58	41.1939	4.75
6	68.90	123.1956	4.32
7	72.83	66.8115	3.93
8	76.39	43.6372	3.57
9	79.64	28.7600	3.24
10	82.58	5.8332	2.95
11	85.26	0.0697	2.68
12	87.70	7.2851	2.44
13	89.91	8.4823	2.21
14	91.92	15.3993	2.01
15	93.75	33.0938	1.83
16	95.41	54.9777	1.66
17	96.93	62.8103	1.51
18	98.30	68.8620	1.37
19	99.55	91.1313	1.25
20	100.68	114.0746	1.13
21	101.71	137.1605	1.03
22	102.65	93.0961	0.94
23	103.50	12.2525	0.85
24	104.27	1.6244	0.77
25	104.98	3.9131	0.70
26	106.62	6.8524	0.64
27	106.20	10.2337	0.58
28	106.73	13.8933	0.53
29	107.21	17.7040	0.48
30	107.64	21.5677	0.44
31	108.04	25.4101	0.40
32	108.40	29.1756	0.36
33	108.73	32.8238	0.33
34	109.03	36.3261	0.30
35	109.30	39.6634	0.27
36	109.54	42.8239	0.25
37	109.77	1.5186	0.22
38	109.97	1.0588	0.20
39	110.16	0.7127	0.18
40	110.32	0.4573	0.17
41	110.48	0.2741	0.15
42	110.62	0.1481	0.14
43	110.74	0.0669	0.13
44	110.86	0.0207	0.11
45	110.96	0.0016	0.10
46	111.05	0.0030	0.09
47	111.14	0.0199	0.09
48	111.22	0.0481	0.08
49	111.29	0.0843	0.07
50	111.35	0.1260	0.06
51	111.41	0.1712	0.06
52	111.47	0.2182	0.05
53	111.52	0.2659	0.05
54	111.56	0.3133	0.04
55	111.60	0.3598	0.04
56	111.64	0.4049	0.04
57	F(t)=a × (1-exp(-b × t))	1801.0921	>観測値111
58			
59	111.67	↑excelのソルバーで最小化計算	0.0331254119
60	故障率k(件/年)		1.722521421
テスト終了後	故障率k(件/月)		0.143543452
61			
テスト終了直後			
テスト終了直後			

				経過時間tから見て、保証期間(テスト後10年)が完了するまで、あと何週?		保証期間(テスト後10年)
x=t: テスト開始時点からの経過時間	故障累積数	k(t) tはテスト開始時点からの経過時間	MTBF(t)=1/k(t) tはテスト開始時点からの経過時間	経過時間tにおける目標の保証期間完了までの残りMTBF到達目標期間(t)=(テスト終了時点の10年後) - テスト開始後経過時間 = (60週+10年 x 52週) - t = 580 - t(週)	経過時間t+経過時間tにおけるMTBF推定値=経過時間tでの次の故障発生時点の推定値 = 経過時間tからの無故障期待期間	= (60週 + 52週 x 10年) = 580(週)
t: テスト開始時点からの経過時間(週)	指数形推定データ2	経過時間tでの故障率k(t)(件/週)	経過時間tでのMTBF(t)(週)	z(t)=保証期間(テスト後10年)までの残存期間(週)	経過時間tでの次の故障発生時点の推定値(週) = t + MTBF(t)	580
1	10.20				579	1.0
2	19.47	9.271930702	0.107852402		578	2.1
3	27.90	8.427435749	0.118660056		577	3.1
4	35.56	7.65985808	0.130550722		576	4.1
5	42.52	6.962192006	0.143632925		575	5.1
6	48.85	6.328069923	0.158026067		574	6.2
7	54.60	5.751704193	0.173861514		573	7.2
8	59.83	5.227834319	0.191283797		572	8.2
9	64.58	4.751678938	0.210451929		571	9.2
10	68.90	4.318892175	0.231540858		570	10.2
59	111.60	0.040096895	24.93958706		521	83.9
60	111.64	0.036444837	27.43872868		520	87.4
61	111.67	0.033125412	30.18830383		519	91.2
89	111.98	0.002284909	437.6541657		491	526.7
90	111.98	0.002076798	481.5105349		490	571.5
91	111.98	0.001887641	529.7616553		489	620.8

付録 5.3 論文 4.7 表 2 の習熟 S 字形モデルによる故障累積数曲線フィッティング推定 (UNIT B データ推定) の計算資料

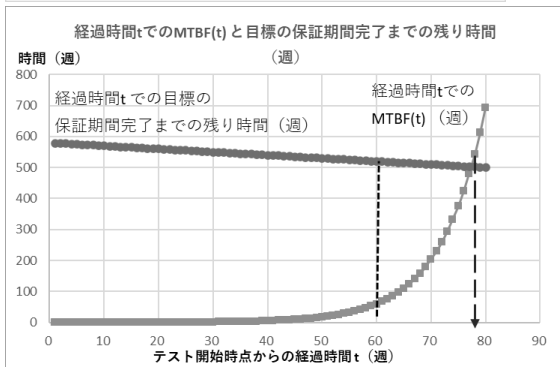
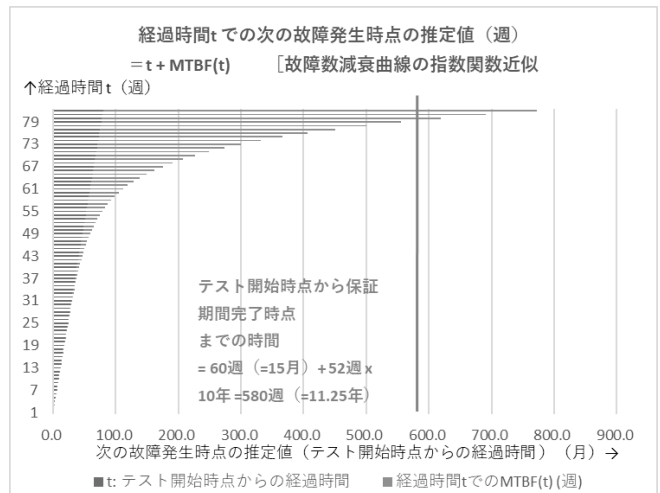
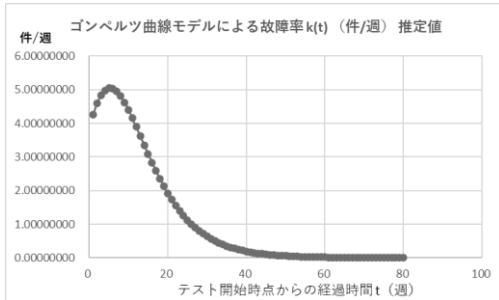
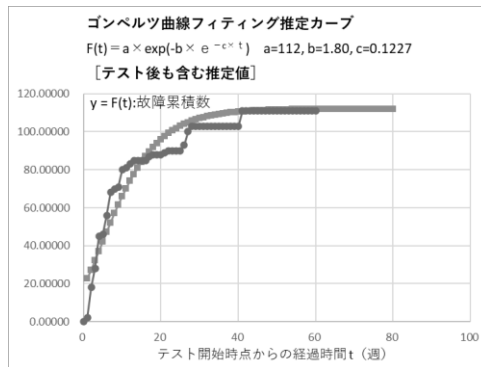
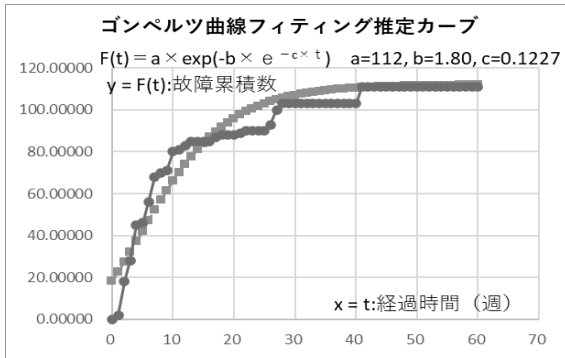


習熟S字形モデル推定		選択
112.00		
0.095502545		
1E-07		指数型
習熟S字形推定データ2	乖分の二乗	経過時間t(i)での故障率 (=t(i)-1)-t(i)間の故障数)
0	0.00	0.0000
1	10.20	67.2650
2	19.47	2.1716
3	27.90	0.0097
4	35.56	89.0885
5	42.52	12.0849
6	48.85	51.0961
7	54.60	179.4628
8	59.83	103.3981
9	64.58	41.1750
10	68.90	123.1626
11	72.83	66.7872
12	76.40	43.6177
13	79.64	28.7444
14	82.59	5.8263
15	85.27	0.0704
16	87.70	7.2924
17	89.91	8.4899
18	91.93	15.4091
19	93.75	33.1075
20	95.42	54.9947
21	96.93	62.8277
22	98.30	68.8793
23	99.55	91.1502
24	100.68	114.0946
25	101.71	137.1813
26	102.65	93.1123
27	103.50	12.2581
28	104.28	1.6263
29	104.98	3.9159
30	105.62	6.8559
31	106.20	10.2377
32	106.73	13.8977
33	107.21	17.7086
34	107.64	21.5725
35	108.04	25.4149
36	108.40	29.1805
37	108.73	32.8286
38	109.03	36.3308
39	109.30	39.6680
40	109.54	42.8283
41	109.77	45.8178
42	109.97	48.6582
43	110.16	51.3522
44	110.32	53.9069
45	110.48	56.3308
46	110.62	58.6349
47	110.74	60.8206
48	110.86	62.9007
49	110.96	64.8881
50	111.06	66.7960
51	111.14	68.6385
52	111.22	70.4206
53	111.29	72.1474
54	111.36	73.8241
55	111.41	75.4560
56	111.47	77.0483
57	111.52	78.6064
58	111.56	80.1360
59	111.60	81.6334
60	111.64	83.1050
テスト終了後	1801.0923	>観測値111
61	111.67	↑Excel Solver で最小化計算
テスト終了直後、 故障率k(件/年)		0.0331197209
テスト終了直後、 故障率k(件/月)		1.722225487
テスト終了直後、 故障率k(件/月)		0.143518791

習熟S字形推定データ2	LN(MTBF(t))
MTBF(t)=1/k(t)	
0.09802575	-2.32252512
0.10784906	-2.22702260
0.11865679	-2.13152007
0.13054758	-2.03601754
0.14362996	-1.94051501
0.15802335	-1.84501247
0.17385912	-1.74950994
0.19128183	-1.65400740
0.21045049	-1.55850487
0.23154007	-1.46300233
0.25474307	-1.36749979
0.28027129	-1.27199726
0.30835773	-1.17649472
0.33925875	-1.08099218
0.37325642	-0.98548964
0.41066105	-0.88998710
0.45181406	-0.79448456
0.49709108	-0.69898202
0.54690538	-0.60347948
0.60171165	-0.50797693
0.66201015	-0.41247439
0.72835126	-0.31697185
0.80134052	-0.22146931
0.88164415	-0.12596676
0.96999514	-0.03046422
1.06719992	0.06503832
1.17414575	0.16054086
1.29180880	0.25604341
1.42126305	0.35154595
1.56369013	0.44704849
1.72039005	0.54255104
1.89279313	0.63805358
2.08247299	0.73355613
2.29116099	0.82905867
2.52076194	0.92456121
2.77337158	1.02006376
3.05129565	1.11556630
3.35707093	1.21106885
3.69348845	1.30657139
4.06361891	1.40207393
4.47084075	1.49757648
4.91887096	1.59307902
5.41179899	1.68858157
5.95412414	1.78408411
6.55079658	1.87958666
7.20726252	1.97508920
7.92951399	2.07059175
8.72414344	2.16609429
9.59840401	2.26159684
10.56027564	2.35709938
11.61853798	2.45260192
12.78285051	2.54810447
14.06384069	2.64360701
15.47320098	2.73910956
17.02379554	2.83461210
18.72977770	2.93011465
20.60671910	3.02561719
22.67175183	3.12111974
24.94372485	3.21662228
27.44337597	3.31212483

				経過時間tから見て、保証期間(テスト後10年)が完了するまで、あと何週?	保証期間(テスト後10年)
$x=t$: テスト開始時点からの経過時間	故障累積数	$k(t)$ t はテスト開始時点からの経過時間	$MTBF(t)=1/k(t)$ t はテスト開始時点からの経過時間	経過時間tにおける目標の保証期間完了までの残りMTBF到達目標期間(t)=(テスト終了時点の10年後) - テスト開始後経過時間 = $(60週+10年 \times 52週) - t = 580 - t(週)$	$= (60週 + 52週 \times 10年) = 580(週)$
t : テスト開始時点からの経過時間(週)	習熟S字形推定データ2	経過時間tでの故障率 $k(t)$ (件/週)	経過時間tでのMTBF(t)(週)	$z(t)$ =保証期間(テスト後10年)までの残存期間(週)	経過時間tでの次の故障発生時点の推定値(週) $= t + MTBF(t)$
1	10.20			579	1.0
2	19.47	9.272217814	0.107849063	578	2.1
3	27.90	8.427667711	0.11865679	577	3.1
4	35.56	7.660042546	0.130547578	576	4.1
5	42.52	6.962335694	0.14362996	575	5.1
6	48.85	6.328178724	0.15802335	574	6.2
7	54.60	5.751783263	0.173859124	573	7.2
8	59.83	5.227888167	0.191281827	572	8.2
9	64.58	4.751711498	0.210450487	571	9.2
10	68.90	4.318906874	0.23154007	570	10.2
59	111.60	0.04090243	24.94372485	521	83.9
60	111.64	0.036438666	27.44337597	520	87.4
61	111.67	0.033119688	30.19352119	519	91.2
89	111.98	0.002284293	437.7721739	491	526.8
90	111.98	0.002076231	481.6420334	490	571.6
91	111.98	0.001887119	529.9081627	489	620.9

付録 5.4 論文 4.7 表 2 のゴンペルツ曲線モデルによる故障累積数曲線フィッティング推定 (UNIT B データ推定) の計算資料



a=	112								
c=	0.122653222								
b=	1.80								
↑excel ノル バー で係数計 算						件/週	週		
exp(-kt)	=b*exp(-kt)	exp(-b × e ^{-kt} × t)	a × exp(-b × e ^{-kt} × t)	差分の2乗	経過時間(t)での 故障率(=(t-1) × t(t)間の故障	MTBF	LN(MTBF)		
1.00000	-1.8043682	0.16458	18.43278	339.76744					
0.89457	-1.5960906	0.20269	22.70098	515.33467	4.26820	0.234290685	-1.451192691		
0.78246	-1.4118544	0.24369	27.29339	639.75541	4.59240	0.217750928	-1.5244034		
0.69215	-1.2488846	0.28682	32.12435	799.49724	4.83096	0.206998096	-1.575045683		
0.61225	-1.1047263	0.33130	37.10577	982.91511	4.98142	0.200745789	-1.6057159		
0.54158	-0.9772081	0.37636	42.15236	1199.40974	5.04659	0.198153637	-1.618712602		
0.47906	-0.8644093	0.42130	47.18564	1440.573	5.03327	0.196677872	-1.616070499		
0.42377	-0.7646309	0.46551	52.13664	1706.254	4.95101	0.201979192	-1.599590596		
0.37485	-0.6763698	0.50846	56.94746	2000.15869	4.81082	0.207864903	-1.570866914		
0.33158	-0.5982967	0.54975	61.57169	2316.03642	4.62423	0.216252151	-1.531310189		
0.29331	-0.5292355	0.58906	65.97417	2650.25894	4.40248	0.227144506	-1.482168872		
0.25945	-0.4681461	0.62616	70.13015	3006.41392	4.16598	0.240617259	-1.424547743		
0.22950	-0.4141081	0.66093	74.02410	3386.6315	3.89395	0.256808554	-1.359424396		
0.20301	-0.3663078	0.69329	77.64841	3794.63949	3.62431	0.275914609	-1.287663849		
0.17958	-0.3240250	0.72323	81.00200	4233.98399	3.36359	0.298187892	-1.210031482		
0.15885	-0.2866229	0.75079	84.08902	4700.82989	3.08701	0.323937563	-1.127204488		
0.14051	-0.2535381	0.77605	86.91762	5190.67726	2.82860	0.353531736	-1.039782021		
0.12429	-0.2247223	0.79910	89.49892	5700.24028	2.58130	0.387401299	-0.948294175		
0.10995	-0.1983846	0.82005	91.84609	6230.48458	2.34717	0.426045158	-0.853209934		
0.09726	-0.1754652	0.83905	93.97358	6780.35368	2.12749	0.470036838	-0.754944209		
0.08603	-0.1552290	0.85622	95.89654	7350.62363	1.92296	0.520032451	-0.653864064		
0.07610	-0.1373110	0.87170	97.63030	7940.74271	1.73376	0.576780079	-0.550294231		
0.06732	-0.1214612	0.88563	99.19005	8550.83704	1.56974	0.64113067	-0.44452199		
0.05954	-0.1074410	0.89813	100.59051	9180.15884	1.40046	0.714050579	-0.33680148		
0.05267	-0.0950391	0.90934	101.84739	9830.32264	1.26528	0.796635914	-0.227357525		
0.04659	-0.0840688	0.91937	102.96922	10500.20063	1.12343	0.890128886	-0.116389011		
0.04121	-0.0743647	0.92833	103.97330	11190.25308	1.00408	0.995936401	-0.004071878		
0.03646	-0.0657809	0.93634	104.86964	11900.88827	0.89634	1.11865116	0.109438235		
0.03225	-0.0581878	0.94347	105.66895	12630.13698	0.79931	1.251075581	0.224003646		
0.02853	-0.0514712	0.94983	106.38107	13380.14316	0.71212	1.40424889	0.339502562		
0.02523	-0.0455299	0.95549	107.01500	14150.12020	0.63392	1.577477802	0.455827244		
0.02232	-0.0402744	0.96063	107.57889	14940.96627	0.56390	1.77337123	0.572882385		
0.01974	-0.0356255	0.96500	108.08018	15750.80820	0.50128	1.99487956	0.690583678		
0.01747	-0.0315133	0.96898	108.52554	16580.53164	0.44537	2.24339073	0.808856544		
0.01545	-0.0278757	0.97251	108.92103	17430.05862	0.39549	2.528522181	0.927635014		
0.01367	-0.0246580	0.97564	109.27207	18300.33887	0.35104	2.848694243	1.046860729		
0.01209	-0.0218118	0.97842	109.58353	19190.34288	0.31146	3.2106778	1.166482067		
0.01069	-0.0192940	0.98089	109.85978	20100.06658	0.27625	3.619925211	1.286453366		
0.00946	-0.0170669	0.98308	110.10472	21030.47707	0.24494	4.082600773	1.40673423		
0.00837	-0.0150969	0.98502	110.32185	22000.60942	0.21712	4.60667357	1.527288928		
0.00740	-0.0133543	0.98673	110.51426	23000.46415	0.19242	5.197022441	1.648085854		
0.00655	-0.0118128	0.98826	110.68475	24030.05538	0.17049	5.865554655	1.769097048		
0.00579	-0.0104493	0.98961	110.83578	25090.02697	0.15103	6.621340074	1.890297778		
0.00512	-0.0092431	0.99080	110.96954	26180.00093	0.13377	7.475762835	2.011666166		
0.00453	-0.0081762	0.99186	111.08800	27300.00774	0.11846	8.441692821	2.13318286		
0.00401	-0.0072324	0.99279	111.19289	28450.03721	0.10489	9.533679518	2.254830742		
0.00355	-0.0063976	0.99362	111.28576	29630.08166	0.09287	10.76817116	2.376894668		
0.00314	-0.0056591	0.99436	111.36797	30840.13540	0.08221	12.1637625	2.498461245		
0.00277	-0.0050069	0.99501	111.44074	32080.19425	0.07277	13.74147489	2.620418624		
0.00245	-0.0044280	0.99558	111.50518	33350.25518	0.06441	15.52507288	2.742456322		
0.00217	-0.0039169	0.99609	111.56216	34650.31603	0.05701	17.54142226	2.86456507		
0.00192	-0.0034648	0.99654	111.61262	36000.37530	0.05045	19.82089465	2.986736666		
0.00170	-0.0030648	0.99694	111.65726	37400.43199	0.04465	22.397825	3.108963856		
0.00150	-0.0027111	0.99729	111.69677	38850.48549	0.03951	25.31102881	3.231240222		
0.00133	-0.0023981	0.99760	111.73173	40350.53543	0.03496	28.60438674	3.353560089		
0.00118	-0.0021213	0.99788	111.76266	41900.58166	0.03093	32.32750558	3.475918434		
0.00104	-0.0018765	0.99813	111.79003	43500.62415	0.02737	36.5364655	3.598310817		
0.00092	-0.0016599	0.99834	111.81425	45150.66300	0.02422	41.2946647	3.720733308		
0.00081	-0.0014683	0.99853	111.83568	46850.69835	0.02143	46.67377444	3.843182432		
0.00072	-0.0012988	0.99870	111.85463	48600.73039	0.01896	52.75481854	3.965651115		
0.00064	-0.0011489	0.99885	111.87140	50400.75934	0.01677	59.62939382	4.088148637		
			111<	3888.87741	k (件/週)				
0.00056	-0.0010162	0.99898	111.88624	↑excel ノル バー で最 小化計算	0.01484	67.40104983			

				経過時間tから見て、保証期間(テスト後10年)が完了するまで、あと何週?		保証期間(テスト後10年)
故障累積数	$k(t)$ tはテスト開始時点からの経過時間	$MTBF(t)=1/k(t)$ tはテスト開始時点からの経過時間		経過時間tにおける目標の保証期間完了までの残りMTBF到達目標期間(t) = (テスト終了時点の10年後) - テスト開始後経過時間 = (35+120週) - t = 155-t(週)	経過時間t+経過時間 tにおけるMTBF推定値=経過時間tでの次の故障発生時点の推定値 - 経過時間tからの無故障期待期間	= (60週 + 52週×10年) = 580(週)
t: テスト開始時点からの経過時間	ゴンベルツ曲線推定値	経過時間tでの故障率 $k(t)$ (件/週)	経過時間tでの $MTBF(t)$ (週)	$z(t)$ =保証期間(テスト後10年) までの残存期間 (週)	経過時間tでの次の故障発生時点の推定値 (週)	580
	$a \times \exp(-bx e^{-\alpha t})$					
0	18.43278			580	0.0	580
1	22.70098	4.26820213	0.234290685	579	1.2	580
2	27.29339	4.59240292	0.217750928	578	2.2	580
3	32.12435	4.83096231	0.206998096	577	3.2	580
4	37.10577	4.98142453	0.200745789	576	4.2	580
5	42.15236	5.04658917	0.198153637	575	5.2	580
6	47.18564	5.03327316	0.198677872	574	6.2	580
7	52.13664	4.95100505	0.201979192	573	7.2	580
8	56.94746	4.81081695	0.207864903	572	8.2	580
9	61.57169	4.62423147	0.216252151	571	9.2	580
10	65.97417	4.40248376	0.227144506	570	10.2	580
59	111.85463	0.01895561	52.75481854	521	111.8	580
60	111.87140	0.01677025	59.62939382	520	119.6	580
61	111.88624	0.01483656	67.4010498	519	128.4	580
76	111.98192	0.00235893	423.9215122	504	499.9	580
77	111.98401	0.00208668	479.2305022	503	556.2	580
78	111.98585	0.00184585	541.756891	502	619.8	580

付録 5.5 論文 4.7 表 2 算出法別の市場故障数予測値の算出 (UNIT B データ推定) の計算資料

		減衰曲線の指数関数近似			指数形モデルフィッティング			習熟S字形モデルフィッティング			ゴンペルツ曲線モデルフィッティング		
		故障率k(件/週)	MTBF(週)		故障率k(件/週)	MTBF(週)		故障率k(件/週)	MTBF(週)		故障率k(件/週)	MTBF(週)	
ソフトリリース後の動作条件組合せ市場ランダム実行全数=α=全生産台数で近似		0.0794601	12.58492916		0.0331254	30.18830383		0.0331197	30.19349114		0.0148366	67.40105	
全生産台数 α =	10000000	故障なし台数 (無故障台数) = $\alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数 (故障件数) = $\alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率 (%)	故障なし台数 (無故障台数) = $\alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数 (故障件数) = $\alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率 (%)	故障なし台数 (無故障台数) = $\alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数 (故障件数) = $\alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率 (%)	故障なし台数 (無故障台数) = $\alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数 (故障件数) = $\alpha - \alpha \times e^{-k \times t}$	故障あり台数比率 (%)
年 t: 週													
0	0	10000000	0	0.00%	10000000	0	0.00%	10000000	0	0.00%	10000000	0	0.00%
1	52	160519.279	9839481	98.39%	1786152.16	8213848	82.14%	1786680.82	8213319	82.13%	4623184.52	5376815	53.77%
2	104	2576.6439	9997423	99.97%	319033.952	9680966	96.81%	319222.834	9680777	96.81%	2137383.51	7862616	78.63%
3	156	41.3601023	9999959	100.00%	56984.3181	9943016	99.43%	57034.9313	9942965	99.43%	988151.833	9011848	90.12%
4	208	0.66390938	9999999	100.00%	10178.2663	9989822	99.90%	10190.3218	9989810	99.90%	456840.826	9543159	95.43%
5	260	0.01065703	10000000	100.00%	1817.99322	9998182	99.98%	1820.68524	9998179	99.98%	211205.943	9788794	97.89%
6	312	0.00017107	10000000	100.00%	324.721251	9999675	100.00%	325.298339	9999675	100.00%	97644.4046	9902356	99.02%
7	364	2.7459E-06	10000000	100.00%	58.0001563	9999942	100.00%	58.1204302	9999942	100.00%	45142.8099	9954857	99.55%
8	416	4.4078E-08	10000000	100.00%	10.3597104	9999990	100.00%	10.3842658	9999990	100.00%	20870.354	9979130	99.79%
9	468	7.0753E-10	10000000	100.00%	1.85040191	9999998	100.00%	1.85533684	9999998	100.00%	9648.74974	9990351	99.90%
10	520	1.1357E-11	10000000	100.00%	0.33050994	10000000	100.00%	0.33148947	10000000	100.00%	4460.79504	9995539	99.96%

故障率k	故障数累積値 (故障あり台数) = $\alpha \times (1 - e^{-k \times t})$
k=0.07946	
k=0.3312	
k=0.03312	
k=0.01484	