

統計的データ分析に基づくソフトウェアプロセス改善と プロジェクトマネジメントに関する研究

鳥取大学・大学院工学研究科 河原 章浩 (Akihiro Kawahara)[†]
鳥取大学・大学院工学研究科 山田 茂 (Shigeru Yamada)[†]
(株) 日新システムズ・品質保証部 春日 君夫 (Kimio Kasuga)^{††}
(株) 日新システムズ・品質保証部 福島 利彦 (Toshihiko Fukushima)^{††}

[†]Graduate School of Engineering, Tottori University
^{††}Department of Quality Assurance, Nissin Systems Co., Ltd.

1 はじめに

近年、ソフトウェア開発は大規模化・複雑化・多様化しており、ソフトウェア開発プロジェクトには、開始時から多くのプロジェクトリスクが潜在している。そのため、それらのリスクに対するプロジェクトマネジメントは多岐に及び、プロジェクトマネージャは多くの課題を解決していかなければならない。課題を早期に解決し、プロジェクトを確実に成功に導くためには、プロジェクトマネジメントの有効な実施が不可欠である。しかしながら、プロジェクトマネージャに要求される役割、知識、技術、能力は多岐に及び、プロジェクトを1人で受け止めて遂行することは困難である。よって、プロジェクトを成功へと導くために、第三者によるプロジェクトにおける課題の早期発見と、その課題に対する対策状況を監視する「プロセス監視活動」[4]が行われている。本論文では、図1に示すソフトウェアマネジメントモデルの導出手順に従い、実際のプロセス監視データに多変量解析法[3]を適用し、得られたソフトウェアマネジメントモデル、すなわち品質・コスト・納期に関する予測モデルに基づいて、プロセス監視の諸要因の影響を明らかにする。その結果、明らかとなったプロジェクトに失敗を及ぼすと考えられる諸要因に対してプロジェクトマネジメントを実施し、その効果について示す。さらに、ソフトウェア信頼性評価法[2,5]を適用することで、実践的な定量的品質/信頼性評価法に関する有用性の考察を行う。

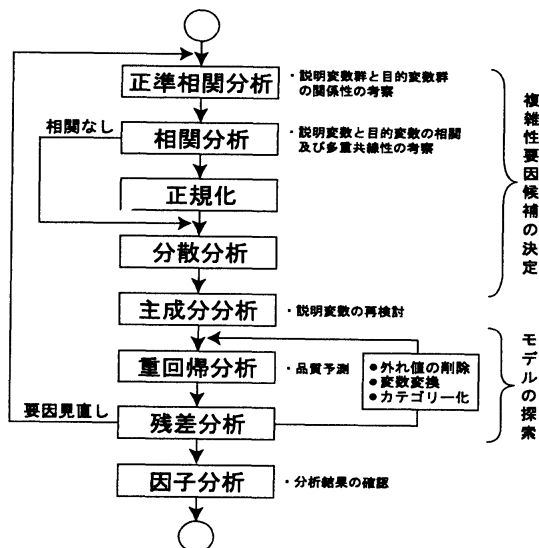


表 1: プロセス監視データ

Project No.	契約レビュー X_1	開発計画レビュー X_2	設計終了レビュー X_3	試験計画レビュー X_4	試験終了レビュー X_5	顧客受入試験の障害件数 Y_q	コスト超過率 Y_c	出荷遅延日数 Y_d
1	0.591	1.181	0.295	0.394	0.394	4	1.456	28
2	0.323	0.645	0	0.108	0.108	1	1.018	3
3	0.690	0.345	0	0.345	0	0	1.018	4
4	0.170	0.170	0	0.085	0	2	0.953	0
5	0.150	0.451	0.301	0.075	0.075	5	1.003	0
6	0.186	0.149	0	0.037	0.037	0	1.000	-8
7	0.709	0	0	0	0	2	1.119	12

図 1: ソフトウェアマネジメントモデルの導出手順

2 ソフトウェア製品品質に影響を与える要因解析

プロセス監視データからソフトウェア製品品質の予測を行う。表1は、実際に収集されたプロセス監視データである。ここで、 $X_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ は、各レビューでの検出課題数を各プロジェクトの規模で規準化したものである。

2.1 正準相関分析

まず、説明変量群と目的変量群との関連性を考察するために正準相関分析を行う。表2より、分析精度の良い軸1を採用する。また、表3より、 Y_q と特に関連しているものは、 X_3 であることがわかる。

表2：分析精度

軸	固有値	正準相関係数	自由度	P 値
1	0.928	0.963	6	0.065
2	0.736	0.858	2	0.129

表3：構造係数

	軸1
[説明変数]	
X_1 ：契約レビュー	0.416
X_3 ：設計終了レビュー	-0.944
[目的変数]	
Y_q ：顧客受入試験の障害件数	-0.899
Y_c ：コスト超過率	-0.370
Y_d ：出荷遅延日数	-0.237

2.2 相関分析

次に、予測モデルにおける5つの影響因子 $X_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ と、顧客受入試験の障害件数 (Y_q) の相関分析を行った結果、 X_2 と X_3 、 X_4 、および X_5 の間と、 X_5 と X_3 および X_4 との間に、多重共線性のある可能性があり、 Y_q と X_3 には強い相関関係があると考察できた。

2.3 単回帰分析

正準相関分析および相関分析の結果、設計終了レビュー (X_3) を説明変数、顧客受入試験の障害件数 (Y_q) を目的変数とし、単回帰分析を行う。導出された単回帰式の回帰精度および分散分析の結果を、それぞれ表4および表5に示す。これらの結果より、単回帰式のデータに対する適合性は高いといえる。

表4：回帰精度

単相関係数 R	0.894
決定係数 R^2	0.798
補正決定係数 R^2	0.758
標準誤差	0.942

表5：分散分析表

要因	自由度	変動	分散	検定統計量 F_0
回帰	1	17.565	17.565	19.8014**
残差	5	4.435	0.887	
計	6	22.000		

推定された偏回帰係数および標準偏回帰係数より、式(1)の単回帰式と、これを標準化した式(2)がそれぞれ導出される。

$$\hat{Y}_q = 11.761 \cdot X_3 + 0.998, \quad (1)$$

$$\hat{Y}_q^N = 0.894 \cdot X_3. \quad (2)$$

以上の分析より、顧客受入試験の障害件数 (Y_q) には、設計終了レビュー (X_3) が大きな影響を与えていることが分かる。

3 コストおよび納期に影響を与える要因解析

3.1 正準相関分析

2.1と同様、まず、説明変量群と目的変量群との関連性を考察するために正準相関分析を行う。表6より、分析精度の良い軸1を採用する。また、表7より、 Y_c および Y_d と特に関連しているものは、 X_1 および X_5 であることがわかる。

表 6：分析精度

軸	固有値	正準相関係数	自由度	P 値
1	0.958	0.979	6	0.053
2	0.619	0.787	2	0.230

表 7：構造係数

	軸 1
[説明変数]	
X_1 ：契約レビュー	-0.665
X_5 ：試験終了レビュー	-0.854
[目的変数]	
Y_q ：顧客受入試験の障害件数	-0.315
Y_c ：コスト超過率	-0.980
Y_d ：出荷遅延日数	-0.962

3.2 相関分析

次に、相関分析の結果、 X_2 と X_3 、 X_4 、および X_5 の間と、 X_5 と X_3 および X_4 との間に、多重共線性のある可能性があり、 Y_c および Y_d と X_5 には強い相関関係があると考察できた。

3.3 主成分分析

ここで、説明変量間の独立性を検討するため主成分分析を行う。表 8 の因子負荷量より、第 1 主成分を「総合リスク潜在プロジェクト評価尺度」、第 2 主成分をマネジメント活動要因 (X_1, X_4) および品質保証活動要因 (X_2, X_3, X_5) に識別する「活動要因判別尺度」と新たに定義する。

表 8：因子負荷量

	主成分 1	主成分 2
X_1	0.302	0.895
X_2	0.957	-0.123
X_3	0.748	-0.477
X_4	0.811	0.412
X_5	0.940	-0.139

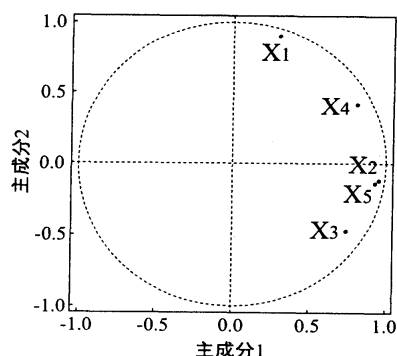


図 2：因子負荷量の散布図

図 2 より、コストおよび納期予測モデルの重要要因候補である X_1 および X_5 とは、互いに独立しているものと判定できることが分かる。

3.4 重回帰分析（コスト超過率）

正準相関分析、相関分析、および主成分分析の結果、契約レビュー (X_1) およびテスト終了レビュー (X_5) を説明変数、コスト超過率 (Y_c) を目的変数とし、重回帰分析を行う。導出された重回帰式の回帰精度および分散分析の結果を、それぞれ表 9 および表 10 に示す。これらの結果より、重回帰式のデータに対する適合性は高いといえる。

表 9：回帰精度

重相関係数 R	0.972
決定係数 R^2	0.945
補正決定係数 R^2	0.917
標準誤差	0.050

表 10：分散分析表

要因	自由度	変動	分散	検定統計量 F_0
回帰	2	0.169	0.084	34.1065**
残差	4	0.010	0.002	
計	6	0.179		

推定された偏回帰係数および標準偏回帰係数より、式 (3) の重回帰式と、これを標準化した式 (4) がそれぞれ導出される。

$$\hat{Y}_c = 0.253 \cdot X_1 + 1.020 \cdot X_5 + 0.890, \quad (3)$$

$$\hat{Y}_c^N = 0.370 \cdot X_1 + 0.835 \cdot X_5. \quad (4)$$

以上の分析より、コスト超過率 (Y_c) には、契約レビュー (X_1) およびテスト終了レビュー (X_5) が大きな影響を与えていることが分かる。

3.5 重回帰分析 (出荷遅延日数)

3.4 と同様に、契約レビュー (X_1) およびテスト終了レビュー (X_5) を説明変数、出荷遅延日数 (Y_d) を目的変数とし、重回帰分析を行う。導出された重回帰式の回帰精度および分散分析の結果を、それぞれ表 11 および表 12 に示す。これらの結果より、重回帰式のデータに対する適合性は高いといえる。

表 11：回帰精度

重相関係数 R	0.943
決定係数 R^2	0.889
補正決定係数 R^2	0.834
標準誤差	4.706

表 12：分散分析表

要因	自由度	変動	分散	検定統計量 F_0
回帰	2	711.122	355.561	16.0537*
残差	4	88.593	22.148	
計	6	799.714		

推定された偏回帰係数および標準偏回帰係数より、式 (5) の重回帰式と、これを標準化した式 (6) がそれぞれ導出される。

$$\hat{Y}_d = 24.669 \cdot X_1 + 55.786 \cdot X_5 - 9.254, \quad (5)$$

$$\hat{Y}_d^N = 0.540 \cdot X_1 + 0.683 \cdot X_5. \quad (6)$$

以上の分析より、出荷遅延日数 (Y_d) には、契約レビュー (X_1) およびテスト終了レビュー (X_5) が大きな影響を与えていることが分かる。

3.6 ソフトウェアマネジメントモデルによる考察

ソフトウェア製品品質には設計終了レビューが大きく関係しており、プロセス監視活動では設計終了レビューの結果を用いてソフトウェア製品品質を早期段階で予測することは有用である。また、コスト超過率および出荷遅延日数には契約レビューおよびテスト終了レビューが大きく関係しており、コストおよび納期はソフトウェア開発プロジェクトの早期段階で予測することが難しく、同じプロセス監視要因により予測することが可能であると考えられる。

4 解析結果の確認

ここでは、分析精度の確認を行うため、各プロセス監視要因 $X_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ と QCD 管理指標である顧客受入試験の障害件数 (Y_q)、コスト超過率 (Y_c)、および出荷遅延日数 (Y_d) を用いて因子分析を行う。因子分析ではバリマックス回転を用い、固有値および因子負荷量をそれぞれ表 13 および表 14 に示す。

表 13 より、各因子の 2 乗和はそれぞれ 1 以上であり、因子 3 までの累積寄与率も 88.12 となるため分析精度は高いと言える。表 14 より、 X_q および X_3 は共通因子をもっており、この因子は「品質」であると考えられる。また、 X_1, X_c および X_d は共通因子をもっており、この因子は「プロジェクトの制約条件」であると考えられる。

5 プロジェクトマネジメントの実施

5.1 プロセス改善の定着

重回帰分析および因子分析の結果より、契約レビューにおける課題に対してプロセス監視活動で実施したプロジェクトマネジメントの主な項目は、受注範囲の早期確定、仕様化技術の向上、スケジュールの早期確

表 13：固有値

No.	2 乗和	寄与率	累積寄与率
因子 1	2.77	34.61	34.61
因子 2	2.29	28.62	63.23
因子 3	1.99	24.88	88.12

表 14：因子負荷量

	因子 1	因子 2	因子 3
X_2	0.9163	0.3444	0.1402
X_5	0.8104	0.4515	0.2664
X_4	0.6979	-0.0095	0.4158
Y_q	0.1193	0.9633	0.0165
X_3	0.4367	0.8355	0.0017
X_1	0.1182	-0.1926	0.8322
Y_d	0.4560	0.3866	0.7972
Y_c	0.5990	0.3932	0.6315

定、進捗管理の改善、およびテスト技術の改善である。これらのプロジェクトマネジメントを実施し、プロセス改善の定着を行った結果、プロジェクトの当初に計測されるリスク度と契約レビューでの課題解決工数の関係は図 3 のようになる。ここで、プロジェクト 8 からプロジェクト 15 が改善の定着後のプロジェクトである。また、課題解決工数とは検出された課題を解決するために要した日数を開発規模で規準化したものであり、リスク度とは、リスクチェックシート [1] を用いて以下の式 (7) によって計算され、最大 100 点のプロジェクトのリスク度指標である。

$$\text{リスク度 } R = \sum_i \{ \text{リスク項目 } (i) \times \text{配点 } C(i) \}. \quad (7)$$

図 3 より、契約レビューでの重要課題に対して適切なマネジメントを行うことでリスク度の高いプロジェクトに対しても課題を早期に解決することができていることが分かる。

5.2 設計品質評価の実施

重回帰分析および因子分析の結果より、ソフトウェア製品品質に影響を及ぼす重要プロセス要因は設計終了レビューであるため、設計段階におけるプロセス改善策として、「設計品質評価」[4] の実施を行う。

設計品質評価とは、プロジェクトマネージャ、設計者、品質保証部にて「設計品質評価シート」により、以下の項目を評価し、内容により対策を行うものである。この評価から開発の次工程への移行判定を行う。

- 要求分析後に、要求仕様書について、要求がどれくらい盛り込まれているか。要求（機能要件・非機能要件）がきちんと定義されているか。
- 基本設計後に、基本設計書の記述事項について、要求（機能要件・非機能要件）が要求仕様書の要求事項から抜けなくすべて設計に引き継がれているか。
- 基本設計書について、基本設計が盛り込まれ、基本設計書として不足がないか。

設計品質評価実施後のプロジェクトについて、そのプロジェクトマネジメントの効果を図 4 に示す。図 4 より、設計品質評価後のプロジェクト 17 からは品質の向上が確認でき、またコスト超過率および出荷遅延日数も安定していることが分かる。

5.3 プロジェクトマネジメントのまとめ

プロセス改善を定着させることにより契約レビューでの課題解決工数は短くなったが、コストおよび納期を安定させるまでは至らなかった。しかし、設計品質評価の実施によってソフトウェア製品品質を向上させることにより、コストおよび納期も予定どおりにプロジェクトを進めることが可能となった。そのため品質を向上させることはプロジェクトを成功へ導くために重要な要素であると考えられる。今後もプロセス監視活動によるプロジェクトマネジメントでは、設計品質評価活動を定着させることによりプロジェクトの成功を導くソフトウェア開発を行うことが期待できる。

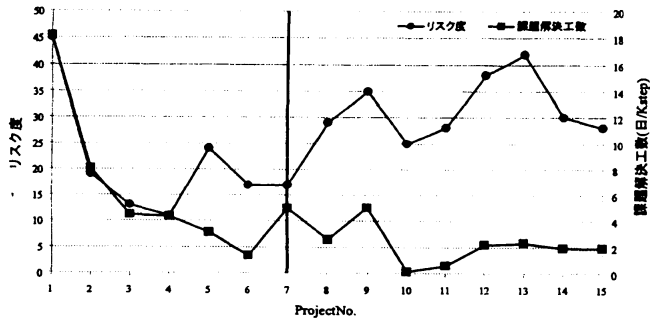


図 3: リスク度と契約課題の解決工数の推移変化

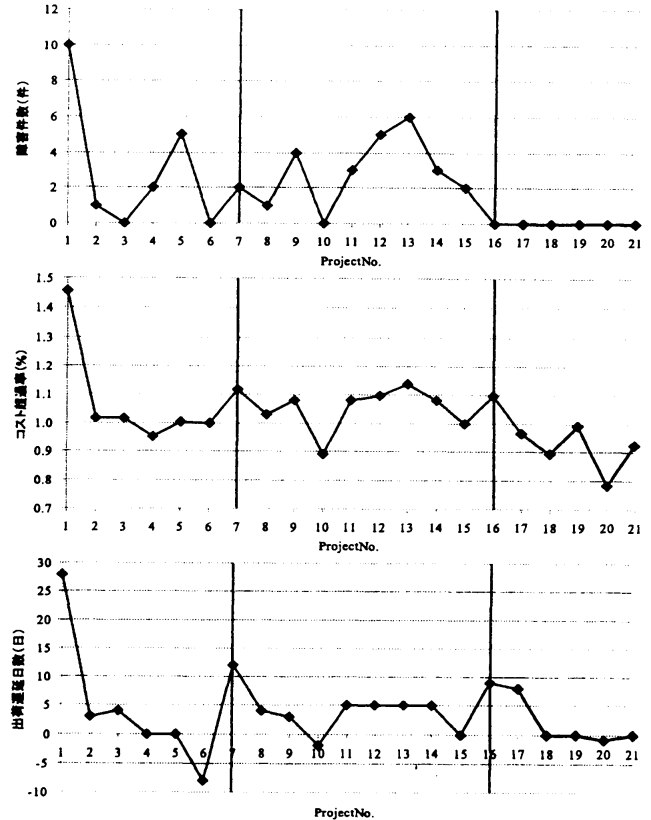


図 4: 設計品質評価後の QCD 管理指標の推移変化

6 ソフトウェア信頼性評価

本章では、プロセス監視活動において採取されたプロセス監視データを用いてソフトウェア信頼性評価を実施し、プロセス監視活動におけるソフトウェア信頼性評価法の有用性を考察する。ここで、ソフトウェア信頼度成長モデル (software reliability growth model, 以下 SRGM と略す) [2,5] を用いたソフトウェア製品品質到達レベルを評価し、工程終了判断を行うことを目的とする。プロセス監視活動におけるソフトウェア信頼度成長曲線は、各開発プロセスの検出課題の累積数とプロセス監視進捗率（各プロセスにおける対策延日数／全対策延日数）の関係を示す。本章で信頼性評価に用いる SRGM は、そのモデルの簡潔性の高さと、適用性の観点から有望視され、多くの企業でも実用されているモデルの 1 つである非同次ポアソン過程 (nonhomogeneous Poisson process, 以下 NHPP と略す) とする。ここで、実際のプロセス監視データにはメトリクスに未記録の値（欠損値）が存在しており、これらの欠損値によりソフトウェア信頼度成長モデルに用いるデータセットが少なくなっている。そのため、本論文では協調フィルタリング法 [6] を適用し、欠損値を補完した上で信頼性評価を行う。

6.1 連続型 SRGM モデルの適用

プロセス監視活動におけるソフトウェア開発プロジェクトを連続的データと捉え、テスト時間の代替メトリクスとして開発プロセスの進捗率を考え、実際のソフトウェア開発プロジェクトデータに基づいた定量的なソフトウェア信頼性評価を実施する。開発プロセス進捗率 $t(\%)$ までに発見される検出課題数の総数を表す計数過程 $\{N(t), t \geq 0\}$ が平均値関数 $H(t)$ をもつ NHPP に従うものと仮定すると、SRGM は

$$\Pr\{N(t) = n\} = \frac{\{H(t)\}^n}{n!} \exp[-H(t)] \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (8)$$

$$H(t) = \int_0^t h(x) dx, \quad (9)$$

と表現できる。ここで、 $\Pr\{A\}$ は事象 A の生起確率として定義される。式 (9) の $H(t)$ は $N(t)$ の期待値であり、開発プロセス進捗率 $t(\%)$ までに発見される総期待フォールト数を表す。まず、テスト終了レビューを従来のテスト終了時期と仮定し、検出課題数は有限であると考え、信頼性評価に用いる SRGM を指数形 SRGM [2] および遅延 S 字形 SRGM [2] とする。次に、プロセス監視活動によるソフトウェア開発において、プロセス監視が不十分な場合、最終的に検出される課題数が無限となると仮定したものが妥当なモデルとなる可能性があると考え、検出可能フォールト数が無限である場合を仮定した対数型ポアソン実行時間モデル [2] を信頼性評価に用いる SRGM に加える。以上の 3 つの連続型 NHPP モデルを信頼性評価に使用し、SRGM に対する適合性評価を行う。

6.2 適合性評価

本論文では、適合性を比較するための評価基準として、平均偏差平方和 (mean squared error, 以下 MSE と略す) および赤池情報量基準 (Akaike information criterion, 以下 AIC と略す) [5] を使用する。MSE はフォールト発見数データと推定値の誤差を直接比較するものであり、開発プロセス進捗率を計算するマイルストーンの数 n の場合、MSE は次式によって表される。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [y_k - \hat{H}(t_k)]^2. \quad (10)$$

AIC は自由パラメータ数が異なる SRGM の良し悪しを比較するために、フォールト発見数データに対する適合性の良さとモデルの単純さの兼ね合いで最適モデルを評価する基準であり、次式によって表される。

$$AIC = 2 \times (M - MLE). \quad (11)$$

ここで、 M および MLE は、それぞれ SRGM における自由パラメータ数およびモデルの最大対数尤度を表す。比較する SRGM の AIC の値の差が 1 以上ある場合、小さい値をもつ SRGM が良いモデルであると判断できる。一方、それらの差が 1 未満である場合、比較対象の SRGM に優位性は見られず、推定が容易である自由パラメータ数の少ないモデルを最適 SRGM として扱う。表 15 に、連続型 NHPP モデルにおける MSE および AIC の適合性評価結果を示す。

表 15：適合性比較結果

	Model	AIC	MSE		Model	AIC	MSE
Project1	・遅延 S 字形 SRGM	24.23	0.63	Project12	・遅延 S 字形 SRGM	23.93	1.90
	・指数形 SRGM	-	-		・指数形 SRGM	21.68	<u>0.71</u>
	・対数型ポアソン実行時間モデル	-	-		・対数型ポアソン実行時間モデル	<u>21.65</u>	<u>0.71</u>
Project5	・遅延 S 字形 SRGM	22.44	1.25	Project13	・遅延 S 字形 SRGM	25.52	2.87
	・指数形 SRGM	-	-		・指数形 SRGM	22.44	<u>1.09</u>
	・対数型ポアソン実行時間モデル	-	-		・対数型ポアソン実行時間モデル	<u>22.37</u>	1.12
Project9	・遅延 S 字形 SRGM	24.08	2.17	Project14	・遅延 S 字形 SRGM	22.06	1.11
	・指数形 SRGM	-	-		・指数形 SRGM	19.83	0.44
	・対数型ポアソン実行時間モデル	-	-		・対数型ポアソン実行時間モデル	<u>19.78</u>	<u>0.43</u>
Project10	・遅延 S 字形 SRGM	50.44	10.63	Project17	・遅延 S 字形 SRGM	33.94	3.44
	・指数形 SRGM	-	-		・指数形 SRGM	-	-
	・対数型ポアソン実行時間モデル	-	-		・対数型ポアソン実行時間モデル	-	-
Project11	・遅延 S 字形 SRGM	24.90	1.07				
	・指数形 SRGM	<u>24.84</u>	<u>0.94</u>				
	・対数型ポアソン実行時間モデル	<u>24.84</u>	<u>0.94</u>				

MSE および AIC に基づいて連続型 NHPP モデルを比較した結果、実測データにおけるプロジェクトでは、全てのデータセットに対して遅延 S 字形 SRGM に最良の適合性がみられた。また、テスト終了レビューの欠損値を補完したプロジェクトにおいては、対数ポアソン実行時間モデルに精度の良い推定結果が得られた。また、遅延 S 字形 SRGM においては、すべてのプロジェクトにおいて推定結果を得ることができ、良い適合性がみられた。そのため、プロセス監視活動におけるソフトウェア開発プロジェクトでは実測データが収集できるのであれば、遅延 S 字形 SRGM を用いた信頼性評価は有用になるものであると推察できる。

6.3 適用例

ここでは、Project1 における信頼性評価の結果を一例として示す。連続型 NHPP モデルの中で最良の適合性をみせた遅延 S 字形 SRGM の平均値関数 $H(t)$ の推定値および発見された総フォールト数の実測値を

図5に示す。図6に推定された期待残存フォールト数 $a - \hat{H}(t)$ を示す。図6より、テスト終了レビューを終えた時点で約10個のフォールトが潜在していることを表している。さらに、図7および図8に、推定された瞬間 MTBF およびソフトウェア信頼度を信頼性評価尺度として示す。

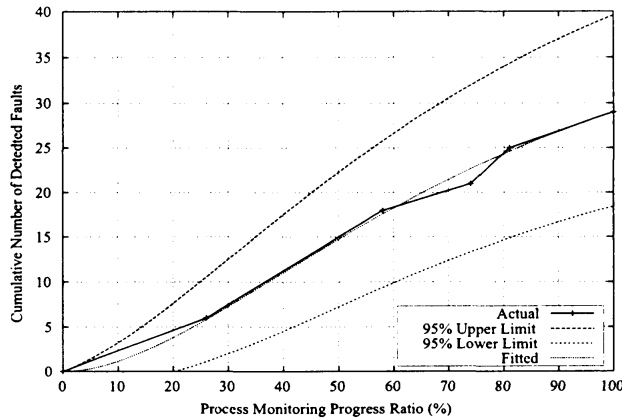


図5：推定された平均値関数 $\hat{H}(t)$

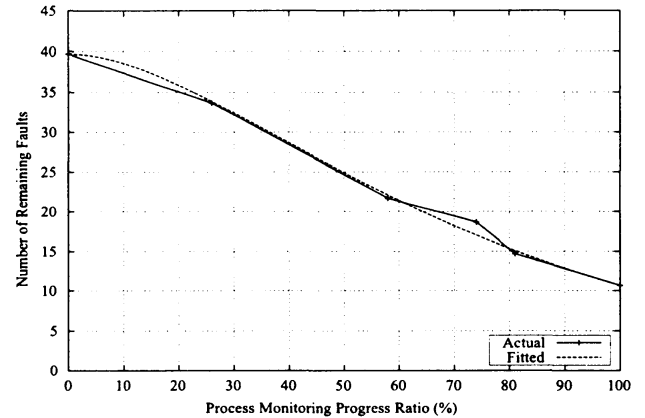


図6：推定された期待残存フォールト数 $a - \hat{H}(t)$

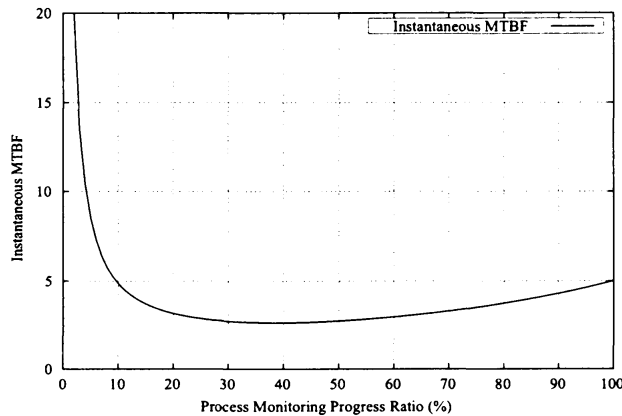


図7：推定された瞬間 MTBF

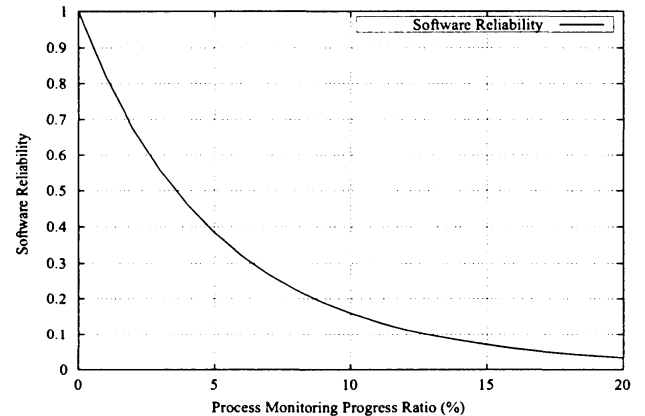


図8：推定されたソフトウェア信頼度

7 おわりに

本論文では、プロセス監視活動における実践的な定量的評価法とその結果に基づくプロジェクトマネジメントの有用性を考察した。ソフトウェアマネジメントモデルより、QCDに影響を与えている要因を推定し、その結果に基づいてプロジェクトマネジメントを行うことで、プロセス監視活動におけるソフトウェア開発プロジェクトの改善を行うことが可能となった。また、ソフトウェア信頼性評価により、プロセス監視活動におけるプロセス監視進捗率での期待残存フォールト数の推定を行うことが可能となり、ソフトウェア製品品質到達レベルを評価することが可能となった。

参考文献

- [1] 山田茂, 福島利彦:「品質指向ソフトウェアマネジメント」, 森北出版, 東京, 2007.
- [2] 山田茂:「ソフトウェア信頼性モデル—基礎と応用」, 日科技連出版社, 東京, 1994.
- [3] 永田靖, 棟近雅彦,「多変量解析法入門」, サイエンス社, 東京, 2001.
- [4] T. Fukushima and S. Yamada, "Improvement in Software Projects by Process Monitoring and Quality Evaluation Activities," *Proceedings of the 15th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design*, San Francisco, California, U.S.A., August 6–8, 2009, pp. 265–269.
- [5] 山田茂, 藤原隆次:「ソフトウェアの信頼性:モデル, ツール, マネジメント」, プロジェクトマネジメント学会 (PM 学会教育・出版シリーズ (1)), 千葉, 2004.
- [6] 独立行政法人 情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリング・センター (編):「ソフトウェア開発見残りガイドブック〜IT ユーザとベンダにおける定量的見残りの実現〜」, オーム社, 東京, 2006.