

# エンタープライズ系ソフトウェアの 重大度別信頼性への質的影響要因の分析

古山恒夫<sup>1,a)</sup>

概要：IPA が収集したエンタープライズ系ソフトウェアプロジェクトデータを分析することにより、新規開発ソフトウェアの信頼性、具体的には稼働後不具合数に影響を与える質的要因を不具合の重大度別に明らかにした。いずれの重大度レベルでも稼働後不具合数がゼロの値をもつプロジェクトが 1/3 以上占めるため、すべての変数を対数化して線形回帰分析を行うという方法は適用できない。そこで経済学や社会学などで用いられている負の二項回帰モデルを用いて分析した。分析の結果、重大度レベルによって信頼性に与える影響要因が異なることがわかった。重大な不具合を減少させるためには、計画段階での品質目標の実行可能性の検討とユーザ担当者のシステム経験が重要な役割を果たす。中度の不具合を減少させるためには、設計支援ツールやデバッグ・テストツールの利用、ユーザ担当者による受け入れ試験への十分な関与、開発要員全員の分析・設計に関する十分な経験、スキルレベルの高いテストチーム、信頼性、移植性への高い要求レベルが重要な役割を果たす。開発要員全員の分析・設計に関する十分な経験は軽微な不具合も減少させる。金融・保険業のソフトウェアは重大な不具合と軽微な不具合が少ない。2 階層クライアント・サーバ上のソフトウェアは中度の不具合が少ない。これらの分析結果は、合計不具合数に対する分析結果と併せることにより、信頼性向上の視点からのプロセス改善に役立てることができる。

## Analysis of Qualitative Factors that Affect Reliability of Enterprise Software for each Severity Level of Failures

### 1. はじめに

これまでのソフトウェアの信頼性に関する研究を目的という観点からみると、大きく次の 4 つに分類できると考えられる。

- (a) 出荷時の製品に含まれる欠陥<sup>\*1</sup>数の予測
- (b) テスト工程時の検出欠陥数の予測
- (c) 欠陥を含む可能性の高い (fault-prone) モジュールの識別
- (d) 稼働後の信頼性に影響を与える要因の抽出

(a) に関する研究の代表的なものとして、テスト工程時の欠陥検出過程から残存欠陥数を予測する、ソフトウェア信頼度成長モデル (SRGM) がある。このモデルにより、テスト終了時期を判定したり、推定残存バグ数からリリー

ス製品の品質 (信頼性) を推定することができる。

(b) は、テスト工数を早期に把握するのに有効であり既に多くの研究が行われている。

(c) は最近の信頼性に関する研究で主流となっているものであり、現在でも多くの研究が行われている。Fault-prone モジュールを識別できれば、そこにテスト資源を集中することにより、効率よくテストを行うことができる。

(d) に関する研究は (a)~(c) までの研究と異なり、欠陥数の予測までは踏み込んでいない。この分野の研究はまだ少なく、筆者の知る限り 5 件しかない (文献 [1], [2], [3], [4], [5])。

このうち文献 [1], [2], [3] の研究は同一の指導者 H. Pham 氏によって同じ方法で実施されたという点でひとつの研究であると言える。これらの研究では、さまざまなレベルの開発担当者が 32 の“環境要因”と呼ばれる影響要因の候補に対して信頼性<sup>\*2</sup>への影響の程度を 8 レベルで評価することにより影響度を推定し、テスト網羅率やプログラム仕様の変更頻度が信頼性に影響を与えることを示し

<sup>1</sup> 東海大学  
Tokai University, Kitakaname 4-1-1, Hiratsuka City, Kanagawa, 259-1292, Japan

<sup>a)</sup> furuyama@tokai-u.jp

<sup>\*1</sup> 本論文では特に断らない限り、障害の同義語として使用する。

<sup>\*2</sup> 論文では具体的な定義は行われていない。

表 1 分析対象データの基本統計量  
 Table 1 Fundamental statistics of analyzed data

項目	重大		中度		軽微		合計 (文献 [5] より引用・追加)	
	不具合数	FP 規模	不具合数	FP 規模	不具合数	FP 規模	不具合数	FP 規模
データ件数 (A)	142 (141)		138		135		305 (304)	
ゼロデータ件数 (B)	106	0	65	0	46	0	99	0
(B/A)	0.75	0.0	0.47	0.0	0.34	0.0	0.32 (0.33)	0.0
平均	8.7 (1.7)	3.13	5.7	3.09	6.2	3.10	14.5 (11.2)	3.09 (3.08)
分散	7,081.6 (77.4)	0.21	190.5	0.19	164.0	0.20	4,086.1 (890.0)	0.21
最大	999 (86)	4.16	88	4.16	100	4.32	999 (415)	4.32
最小	0	2.05	0	2.06	0	2.06	0	1.93

(注) FP 規模の平均, 分散, 最大, 最小はいずれも常用対数変換後の値. 不具合数の括弧内は最大の不具合数 999 件をもつプロジェクトを除いた場合の値 (含めた場合と等しい場合は記載せず).

ている.

文献 [4] の研究では目的変数として 5 つの品質特性を取り上げていてその中のひとつに信頼性がある. 説明変数として, 組織的な変数を 10 個, 個人的な変数を 5 個, 技術的な変数を 9 個とりあげている. 情報部門の役員 (executives) が各変数に関する質問に対して 5 段階評価の回答を行っている. 分析の結果, 特に情報部門の管理者 (director) のランクおよびユーザからの仕様変更要求回数が信頼性に大きな影響を与える要因であることを明らかにした.

これらの研究で用いているデータは開発担当者の経験に基づいた主観的なものだけであり, 例えば稼働後に発見された欠陥数などの客観的なデータで評価しているわけではない. これに対して筆者は, 稼働後 (サービスイン後) の発生不具合数および開発プロセスに係る多くの質的変数を備えた IPA のデータリポジトリ (IPA データ) を用いて稼働後不具合数に影響を与える質的変数を明らかにした (文献 [5]). 分析対象としたプロジェクトは新規開発プロジェクトの 305 件であったが, そのうちの約 2/3 のプロジェクトでは, 稼働後の発生不具合数を, 発生した不具合による影響の大きさを考慮した重大度別に分計している. そこで今回新たに 3 つの重大度レベル (重大, 中度, 軽微) ごとに稼働後不具合数に影響を与える質的変数を明らかにした.

本論文における背景, 分析対象データおよび分析方法の枠組みは文献 [5] で記載したものを踏襲しているため, 本論文の 1 章から 3 章までは, 特に断りなく上記論文から抜粋したものを, 必要に応じて適宜修正して記述している. 以下, 2 章で分析対象データの概要を重大度別に紹介する. 3 章で分析方法の要点を述べる. 4 章で分析結果を, 5 章で分析結果に対する考察を述べ, 6 章でまとめを述べる.

## 2. 分析対象データ

### 2.1 分析対象プロジェクト

分析対象プロジェクトは, IPA で収集したエンタープライズ系ソフトウェアプロジェクト 4,067 件 (文献 [6]) のうち, 次の条件を満たすものを対象とする.

1) システム稼働後の重大度別の発生不具合数が報告されている. 重大度のレベルは次の 3 つである.

- ・ 重大: 顧客に損害を与え, 緊急対応を要する.
- ・ 中度: 顧客の損害はないが, 緊急対応を要する.
- ・ 軽微: 顧客の損害はなく, 緊急対応も不要.

2) 規模を示す FP (ファンクションポイント) の実測値 (5001\_FP 実測値\_調整前\*3) が報告されている.

3) 開発種別が新規開発である.

4) 開発 5 工程 (基本設計, 詳細設計, 製作, 結合テスト, 総合テスト (ベンダ確認)) をすべて実施しているプロジェクトである.

### 2.2 目的変数と説明変数

#### (1) 目的変数

目的変数はシステム稼働後 1 ヶ月後の重大度別発生不具合現象数 (5255\_発生不具合現象数 (重大) 1 ヶ月, 5259\_発生不具合現象数 (中度) 1 ヶ月, 5263\_発生不具合現象数 (軽微) 1 ヶ月) とする. 以下では稼働後 1 ヶ月後の発生不具合現象 (数) を重大度別にそれぞれ単に重大な不具合 (数), 中度の不具合 (数), 軽微な不具合 (数) と呼ぶ.

重大度別データおよび合計不具合 (5267\_発生不具合現象数 (合計) 1 ヶ月) の基本統計量を表 1 に示す. ただし, FP 規模の基本統計量は, 一般に FP 規模が対数正規分布に従う (文献 [7]) ため (常用) 対数変換後のものである. 重大な不具合数および合計不具合数には, 999 件という大きなものが含まれていたため, 表 1 にはそれを除いた場合の統計量も併せて記載している.

表 1 から次のことがわかる.

- 重大度別不具合のデータ件数は, いずれも合計不具合のデータ件数の 45% 程度である.
- ゼロデータ件数は重大な不具合で最も多く, 次いで中度の不具合, 軽微な不具合で最も少ない. データ件数に対する割合はそれぞれ 75% (3/4), 47% (約 1/2),

\*3 番号と名称はデータ白書 (文献 [6]) で定義されたもの. 以下, 同様.

34% (1/3) である。

- 不具合数の平均および最大の大きさは、重大 (999 件を除いた場合) < 中度 < 軽微 < 重大 (999 件を含めた場合) である。
- FP 規模は、平均、分散、最大、最小のいずれも重大度別にはよらずほぼ等しい。

### (2) 説明変数

信頼性に影響を与える可能性のある変数として、順序尺度に従う質的変数のうちから表 2 に示す 41 個、名義尺度に従う質的変数のうちから表 3 に示す 3 つの業種 (201\_業種 1 (大分類)) と 3 つのアーキテクチャ (308\_アーキテクチャ 1) を選んだ\*4。名義尺度に従う質的変数の具体的な変数名は、例えば「業種\_製造業」のように表 3 の分類と変数を結び付けたものを用いる。

名義尺度に従う質的変数のうちの業種とアーキテクチャ、順序尺度に従う質的変数のうちの要求レベルは、開発者側にとってコントロールできないため、分析結果はプロセス改善に役立てることはできないが、プロジェクトを遂行する立場から現状把握の参考となるので説明変数に加えた。

今回の分析では、1 個の質的変数に加えて、不具合数に大きな影響を与えていると考えられる FP 規模をいわゆるコントロール変数として説明変数に加える。

分析結果の頑健性を高めるために、各説明変数は次の 3 つの条件をすべて満たすものとする。表 2 と表 3 の変数は、少なくともひとつの重大度レベルでこの条件を満たす。

- 1) データ件数 (回答数) が 30 件以上ある。
- 2) 各レベルに属する回答数が 10 件以上ある。
- 3) 偏り率  $\rho$  が  $-0.7 \leq \rho \leq 0.7$  の範囲にある。

ただし、 $\rho$  は  $N_1$  を上位レベルの回答数、 $N_2$  を下位レベルの回答数としたとき、次の式で定義したものである。

$$\rho = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \quad (1)$$

$\rho$  のとり得る範囲は  $-1$  から  $1$  であり、 $N_1 = N_2$  の場合は  $\rho = 0$  となる。この条件は、回答数が上位レベルに偏る天井効果および下位レベルに偏る床効果を避けるために加えたものである。天井効果も床効果もアンケートの設計に問題がある場合に生ずるもので、これが生ずると正しい分析結果が得られない。

## 2.3 変数変換

### (1) 量的変数

FP 規模は対数正規分布に従うので対数変換をする。対数は自然対数を用いる。不具合数は変数変換を行わずそのままの値を用いる。

### (2) 順序尺度に従う質的変数

順序尺度に従う変数は  $a, b, \dots$  の値をとるが、プロジェ

\*4 開発言語については、全プロジェクトの 4 割程度が複数の開発言語をさまざまな比率で使用しているため対象外とした。

表 2 影響要因の候補 (順序尺度に従うもの)

Table 2 Candidates of effective qualitative factors subject to ordinal scale.

分類 (略称)	変数	
プロジェクト全般 (P) (9 個)	111_新技術利用, 112_役割分担_責任所在, 113_達成目標_優先度_明確度合, 1011_定量的出荷品質基準_有無, 1013_第三者レビューの有無, 5241_品質保証体制_基本設計	
	114_作業スペース, 115_プロジェクト環境_騒音	
	121_計画の評価 (品質)	
ツールの利用 (T) (9 個)	403_類似プロジェクト_有無, 404_プロジェクト管理ツール, 405_構成管理ツール, 406_設計支援ツール, 407_ドキュメント作成ツール, 408_デバッグ_テストツール, 411_コードジェネレータ, 412_開発方法論, 422_開発フレームワーク	
ユーザー側 (U) (9 個)	501_要求仕様_明確さ	
	要求仕様変更発生状況	5116_基本設計, 5118_製作
	ユーザ担当者	502_要求仕様関与, 509_受け入れ試験関与, 503_システム経験, 504_業務経験, 507_設計内容理解度
要求レベル (R) (7 個)	505_ユーザとの役割分担_責任所在_明確度合	
	512_信頼性, 513_使用性, 514_性能_効率性, 515_保守性, 516_移植性, 518_セキュリティ, 519_法的規制有無	
開発担当者 (D) (7 個)	601_PM スキル	
	要員スキル	602_業務分野経験, 603_分析・設計経験, 604_言語・ツール利用経験, 605_開発プラットフォーム使用経験
	1010_テスト体制	スキルレベル, 要員数

(注 1) 番号はデータ白書 (文献 [6]) で定義されたもの

表 3 影響要因の候補 (名義尺度に従うもの)

Table 3 Candidates of effective qualitative factors subject to nominal scale.

分類 (略称)	変数
業種 (I) (3 個)	製造業, 卸売・小売業, 金融・保険業
アーキテクチャ (A) (3 個)	2 階層クライアントサーバ, 3 階層クライアントサーバ, インタネット・イントラネット

クト全般 (略称 P, 以下同様), ツールの利用 (T), ユーザー側 (U), 開発担当者 (D) に属する変数は基本的にアルファベットの若番ほどプロセスのレベルが高い。例えば、503\_ユーザ担当者\_システム経験は、a:十分に経験, b:概ね経験, c:経験が不十分, d:未経験という値をとる。ツールの利用では、a:あり, b:なしがとりうる値である。要求レベル (R) に属する変数は、若番ほど要求レベルが高い。

3 つ以上のレベルをとりうる変数は隣り合うレベル同士を合併して全体で 2 レベルにする (2 値化する)。このときレベルの若番の方を上位レベル、老番の方を下位レベルと呼ぶ。2 値化する分割点は複数個あるが、偏り率  $\rho$  の絶対

値が最も小さくなるものを分割点（最適分割点）とする。  
本研究では下位レベルをベースになる群とみなして 0 の値を、上位レベルに 1 の値を割り当てる。上位レベルのプロセスレベルが高いので、常識的には不具合数は上位レベルの方が下位レベルより少なくなり、回帰係数はマイナスとなるはずである。

### (3) 名義尺度に従う質的変数

名義尺度に従う変数に対しては、変数ごとに次のように 2 値化する。すなわち、対象とするプロジェクトが変数名に含まれる業種に該当する場合は、該当する業種名を、該当しない場合は「それ以外の業種」という値を割り当てる。例えば、変数「業種\_製造業」の値は、「製造業」と「それ（製造業）以外の業種」の 2 つであり、前者を上位レベル、後者を下位レベルとする。業種欄が空欄（欠損値）の場合は、業種を分析する場合に限り、そのプロジェクトを分析対象から除外する。アーキテクチャの場合も同様である。

## 3. 分析方法

### 3.1 ソフトウェアプロジェクトデータの回帰モデル

ソフトウェアプロジェクトデータは一般に非負の値をとる。工数などゼロが含まれないデータは一般に対数化すると正規分布に従う。そのようなデータを目的変数とする回帰モデルは、対数化により等分散の仮定を満たすようになるため線形回帰モデルが適用でき、決定係数などの様々な統計量を求めることができる。しかし、不具合数などデータにゼロが含まれる場合は対数化することができない。

これに対処するためには大きく 2 つの方法がある。ひとつは一般化線形モデルに属する、ポアソン回帰モデルや負の二項回帰モデル（文献 [8] の 3.2 節、3.3 節）を用いる方法である。これらのモデルはゼロを含むカウントデータ（ゼロ以上の整数値からなるデータ）の回帰分析の理論的基盤を与えるが、いずれも等分散の仮定を満たさないため、形式的にはともかく意味のある決定係数を求めることはできない。

もうひとつは、与えられたデータすべてに正の定数  $c$  を加えてから対数をとる方法である。 $c$  の値は 1 が一般的であるが、その理論的根拠は不明で、対数変換しても等分散の仮定を満たすわけではない。また、 $c$  の値によって分析結果が大きく異なってしまうという問題がある（文献 [9]）。

対数変換後のデータが近似的に等分散の仮定を満たす最適な  $c$  の値を数値的に求めた研究もある（文献 [9]）。しかし、文献 [9] に示されているグラフから見る限り、対数変換前の平均値（回帰による予測値）が小さいところでは分散の変動が大きく、今回の分析対象データのようにゼロが多くを占めるデータに対しても有効であるかは疑問が残る。

いずれの方法も等分散の仮定を満たさないという問題はあるが、今回はこれまで経済学や社会学で適用例の多い負の二項回帰モデルを用いて分析することとした。

### 3.2 負の二項回帰モデルとは

負の二項回帰モデルでは、負の二項分布と呼ばれる次の式で表される確率関数を用いて回帰分析を行う。

$$f(y|\mu, \alpha) = \frac{\Gamma(y + \alpha^{-1})}{\Gamma(y + 1)\Gamma(\alpha^{-1})} \times \left(\frac{\alpha^{-1}}{\alpha^{-1} + \mu}\right)^{\alpha^{-1}} \left(\frac{\mu}{\alpha^{-1} + \mu}\right)^y, \quad \alpha \geq 0, y = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

この分布の平均は  $\mu$ 、分散は  $\mu + \alpha\mu^2$  となる。 $\alpha$  の値を変えることにより分散の大きさを変えることができる。 $\alpha \rightarrow 0$  のとき負の二項分布はポアソン分布に近づく。

一般化線形モデルでは、説明変数（群）の線形結合と目的変数の平均  $\mu$  をリンク関数で結合する。負の二項回帰モデルのリンク関数は対数関数であり、例えばプロジェクト  $i$  の説明変数の値  $x_i$  から  $\mu_i$  を推定する場合は次の式を用いる。（説明変数が複数の場合も同様の式で表すことができる）。

$$\ln \mu_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (3)$$

これを用いて  $N$  個のデータに対する尤度関数

$$L(\alpha, \beta_0, \beta_1) = \prod_{i=1}^N f(y_i|\mu_i, \alpha) \quad (4)$$

が最大になるようにパラメータ  $(\alpha, \beta_0, \beta_1)$  を定める（最尤推定法）。

今回の分析では自然対数で変換された FP 規模と、0 と 1 で 2 値化された質的変数  $x$  の 2 つの説明変数から次の式で不具合数の平均  $\mu$  を推定する。

$$\ln \mu = \beta_0 + \beta_1 \ln FP + \beta_2 x \quad (5)$$

計算は統計ツール  $R$  を用いて行う。

### 3.3 要因の選択基準

信頼性に影響を与える要因の選択は、回帰係数の  $p$  値に基づいて行う。今回は質的変数が 2 値しかとらないので回帰係数の傾きは、上位レベルと下位レベルの 2 つの群のそれぞれの平均値の差と等しい。

ソフトウェアプロジェクトデータは物理現象を扱わないため真の値からの変動が大きいと考えられる。変動が大きくなると同じデータ件数でも  $p$  値が大きくなって検出力が低下する可能性が考えられる。それを考慮して、今回は判断基準とする  $p$  値の有意水準を、統計学で標準的に使われている 5% より高い 10%（両側検定）とする<sup>\*5</sup>。

<sup>\*5</sup> 実際、合計不具合数を目的変数とする分析結果（文献 [5]）を有意水準 10% ではなく 5% として再分析すると、要因として違和感のない 113\_達成目標\_優先度\_明確度合と 504\_ユーザ担当者\_業務経験の 2 つの変数が  $p$  値がそれぞれ 9.4% と 6.1% のため要因とみなされなくなる。

表 4 重大な不具合の影響要因とみなされた質的変数

Table 4 Qualitative variables identified as factors effective to failures in severe level.

分類	変数名	データ件数		偏回帰係数	p 値 (%)
		上位レベル	下位レベル		
P	121_計画の評価 (品質)	88	23	-2.37	0.1
T	404_プロジェクト管理ツール利用	49	11	2.66	1.2
	411_コードジェネレータ利用	12	38	2.64	0.1
	422_開発フレームワーク利用	39	42	2.68	0.0
U	503_ユーザ担当者_システム経験	20	15	-2.17	0.9
D	601_PM スキル	45	30	1.90	2.0
I	業種_金融・保険業	59	83	-3.20	0.0

#### 4. 分析結果

不具合の重大度レベルごとに信頼性への影響要因として選択された変数、すなわち 2.2 節の (2) で述べたデータ件数に関する 1)~3) の条件、および 3.3 節の要因の選択基準をすべて満たす質的変数を表 4、表 5、表 6 に示す。上位および下位レベルの具体的な内容は、スペースの関係で表中では省略したが、必要に応じて本文中にその内容を記述する。なお、2.2 節の (2) で述べたように、回帰分析の説明変数は FP 規模とひとつの質的変数であることから、各表に示す質的変数の偏回帰係数は、FP 規模の影響を除去した後 (FP 規模が一定とした場合) の目的変数への影響の大きさを示していることに留意してほしい。

表 1 に示したように、「重大」な不具合数の最大値は 999 件である。2 番目に大きな不具合数は 86 件であることから、999 件という数が分析結果に与える影響が過度に大きくなっている可能性がある。そこで、文献 [5] で行ったように、このプロジェクトを除いた場合の偏回帰係数の p 値の変化を調べた。偏回帰係数の p 値が、999 件を含めた場合は 10%以下で、それを除くと 10%を超える変数は、112\_役割分担\_責任所在 (p 値は 66.2%、以下同様)、113\_達成目標\_優先度\_明確度合 (62.3%)、121\_計画の評価 (品質) (10.8%)、5241\_品質保証体制\_基本設計 (60.5%)、403\_類似プロジェクト\_有無 (45.5%)、406\_設計支援ツール利用 (20.3%)、業種\_卸売・小売業 (81.0%)、アーキテクチャ\_3 階層クライアントサーバ (84.9%)、アーキテクチャ\_インターネット・イントラネット (65.6%) の 9 個であった。これらの変数のうち、999 件を除いた場合の p 値が 10.8%の 121\_計画の評価 (品質) だけは要因に含めることとし、それ以外のは要因として選定することを保留することとした。表 4 はその結果を示している。

表 5 中度の不具合の影響要因とみなされた質的変数

Table 5 Qualitative variables identified as factors effective to failures in middle level.

分類	変数名	データ件数		偏回帰係数	p 値 (%)
		上位レベル	下位レベル		
P	114_作業スペース	30	41	1.15	1.1
T	403_類似プロジェクト_有無	28	24	-0.97	6.8
	406_設計支援ツール利用	26	35	-1.36	0.9
	408_デバッグ_テストツール利用	22	39	-1.02	7.1
	412_開発方法論利用	44	15	-1.33	1.7
	507_ユーザ担当者_設計内容理解度	38	13	-1.20	3.9
U	509_ユーザ担当者_受け入れ試験関与	40	31	-0.97	3.1
	512_信頼性	41	28	-0.87	6.6
R	514_性能・効率性	42	27	-0.98	4.1
	516_移植性	33	14	-1.14	7.1
D	603_要員スキル_分析・設計経験	16	64	-1.46	1.3
	1010_テスト体制 (スキルレベル)	29	14	-1.19	4.5
A	アーキテクチャ_2 階層クライアントサーバ	22	116	-1.26	1.1

表 6 軽微な不具合の影響要因とみなされた質的変数

Table 6 Qualitative variables identified as factors effective to failures in slight level.

分類	変数名	データ件数		偏回帰係数	p 値 (%)
		上位レベル	下位レベル		
T	408_デバッグ_テストツール利用	24	33	-1.56	0.1
	411_コードジェネレータ利用	11	41	1.12	2.9
R	516_移植性	27	14	-0.91	8.1
	518_セキュリティ	38	26	-0.68	6.1
D	603_要員スキル_分析・設計経験	16	58	-1.36	0.2
I	業種_金融・保険業	55	80	-0.83	0.2

#### 4.1 重大度の高い信頼性への影響要因

表 4 から次の場合に重大な不具合が発生しにくいことがわかる。

- 121\_計画の評価 (品質) において品質目標が明確でその実行可能性を検討済みの場合。
- 404\_プロジェクト管理ツール、411\_コードジェネレータ、422\_開発フレームワークを利用しない場合。

- 503\_ユーザ担当者にシステム経験がある場合.
- 601\_PM のスキルが低い場合.
- 金融・保険業の場合.

#### 4.2 重大度が中度の信頼性への影響要因

表 5 から次の場合に中度の不具合が発生しにくいことがわかる.

- 114\_作業スペースが狭い場合.
- 403\_類似プロジェクトがある場合, 406\_設計支援ツール, 408\_デバッグ\_テストツール, 412\_開発方法論を利用する場合.
- 507\_ユーザ担当者が設計内容を理解している場合, 509\_ユーザ担当者が受け入れ試験に十分関与する場合.
- 512\_信頼性, 514\_性能・効率性, 516\_移植性への要求レベルが高い場合.
- 603\_開発要員全員が十分な分析・設計経験をもつ場合, 1010\_テストチームのスキルレベルが高い場合.
- アーキテクチャが 2 階層クライアントサーバの場合.

#### 4.3 重大度が軽微な信頼性への影響要因

表 6 から次の場合に軽微な不具合が発生しにくいことがわかる.

- 408\_デバッグ\_テストツールを利用する場合, 411\_コードジェネレータを利用しない場合.
- 516\_移植性, 518\_セキュリティへの要求レベルが高い場合.
- 603\_開発要員全員が十分な分析・設計経験をもつ場合.
- 金融・保険業の場合.

### 5. 考察

#### 5.1 常識に反する結果と他の要因の影響分析

##### 5.1.1 常識に反する結果

2.3 節の (2) で述べたように, 常識的には偏回帰係数はすべて負の値となるはずである. しかし, 次に示す要因 (候補) は偏回帰係数が正となって, 分析結果は常識に反する.

- 重大な不具合: 404\_プロジェクト管理ツール利用, 411\_コードジェネレータ利用, 422\_開発フレームワーク利用, 601\_PM スキル.
- 中度の不具合: 114\_作業スペース.
- 軽微な不具合: 411\_コードジェネレータ利用.

これらの変数が真に信頼性低下の要因であるのか, それとも他の要因の影響によって要因のように見えているのかを明らかにするために次の分析を行った.

##### 5.1.2 影響分析の方法と条件

線形回帰分析の場合, 変数  $x_1$  が目的変数に影響を与えていない場合でも, 目的変数に影響を与えている変数  $x_2$  とその変数 ( $x_1$ ) に相関がある場合には,  $x_1$  の単回帰係数が見かけ上有意となることがある. このような場合,  $x_1$  と

$x_2$  を説明変数とした重回帰分析を行うと,  $x_1$  の偏回帰係数の絶対値は小さくなって  $x_1$  が見かけ上のあるいは間接的な影響要因であったということがわかる.

負の二項回帰分析の場合にも, 理論的な解析は難しいものの同様な可能性が考えられるので, ここまで要因 (の候補) とみられてきた変数 ( $x_1$  に相当) に対して, それと相関のある他の要因 (の候補) ( $x_2$  に相当) およびコントロール変数としての FP を加えた重回帰分析を行って,  $x_1$  の回帰係数の p 値の変化を調べた.

次のすべての条件を満たす場合には  $x_1$  を要因とすることを保留する.

- (a)  $x_1$  と  $x_2$  の共通集合においてもそれぞれの単回帰係数 (ただし, FP 規模をコントロール変数として加えるため, 厳密に言えば偏回帰係数) が有意である.
- (b-1)  $x_2$  が質的変数の場合は,  $x_1$  と  $x_2$  が独立でない. 具体的には,  $2 \times 2$  のクロス集計表の  $\phi$  係数 (スピアマンの相関係数と等しい) が有意である.
- (b-2)  $x_2$  が量的変数の場合は,  $x_1$  と  $x_2$  に相関がある. ( $x_1$  と  $x_2$  の相関係数が有意である).
- (c)  $x_1$  と  $x_2$  (と FP 規模) を説明変数とする重回帰分析を行った結果,  $x_1$  の偏回帰係数は有意でないが,  $x_2$  の偏回帰係数は有意である.

ここで各 p 値の有意水準はいずれの場合も 10% とする.

#### 5.1.3 影響分析の結果と解釈

$x_2$  が質的変数の場合の分析結果を表 7 に示す. なお,  $x_2$  が量的変数の場合には該当する組合せは存在しなかった.

表 7 から見かけ上の要因を抽出するにあたって次のことを考慮する.

- (d) 被影響要因 ( $x_1$ ) が原因, 影響要因 ( $x_2$ ) が結果とみなすことができる場合は,  $x_1$  の p 値が 10% という基準を超えていても見かけ上の要因とはみなさない.

この条件はパス解析のアナロジーに基づくものであり,  $x_1$  から直接目的変数に与える影響 ( $x_1$  の直接効果) が小さくても  $x_1$  から  $x_2$  を経由して目的変数に与える影響 (間接効果) を考慮すると  $x_1$  の目的変数への影響があるとみなせるからである.

##### (1) 重大な不具合の場合

重大な不具合では, 404\_プロジェクト管理ツール利用と 422\_開発フレームワーク利用の 2 つの変数は, 真の要因でない可能性がある. 411\_コードジェネレータを利用しているプロジェクトはほとんどの場合, 404\_プロジェクト管理ツールと 422\_開発フレームワークを利用している. そのことが, プロジェクト管理ツールや開発フレームワークが信頼性低下要因ではないにも拘わらず, 不具合数を増加させる真の要因であるコードジェネレータの影響を受けてあらかも不具合数を増加させる要因であるかのような結果が得られた大きな理由と考えられる.

以上の結果から, 重大な不具合に影響を与える要因とし

表 7 他の質的要因の影響を受けた質的要因の候補

Table 7 Candidate qualitative factors affected by other qualitative factors

重大度レベル	変数名		データ件数				回帰分析				独立性の検定		
	被影響要因 ( $x_1$ )	影響要因 ( $x_2$ )	総数	$x_1=1,$	$x_1=1,$	$x_1=0,$	$x_1=0,$	偏回帰係数		p 値 (%)		$\phi$ 係数	p 値 (%)
				$x_2=1$	$x_2=0$	$x_2=1$	$x_2=0$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$		
重大	404_プロジェクト管理ツール利用	411_コードジェネレータ利用	48	10	28	0	10	1.29	2.58	19.5	0.1	0.26	7.2
	422_開発フレームワーク利用		47	10	20	1	16	0.39	2.68	64.6	0.2	0.31	3.2
中度	404_プロジェクト管理ツール利用	404_プロジェクト管理ツール利用	48	27	4	11	6	0.89	2.00	30.2	7.0	0.26	7.5
	114_作業スペース	406_設計支援ツール利用	49	9	19	14	7	0.68	-1.30	23.2	2.2	-0.34	1.7
	412_開発方法論利用		56	25	16	1	14	-0.74	-1.01	23.4	8.1	0.48	0.1
	403_類似プロジェクト_有無	412_開発方法論利用	49	17	9	7	16	-0.40	-1.10	45.4	4.5	0.35	3.1
	507_ユーザ担当者_設計内容理解度		52	24	4	15	9	0.29	-2.19	54.9	0.0	0.27	5.4
	603_要員スキル_分析・設計経験		50	30	7	7	6	-0.45	-1.46	42.6	1.0	0.27	6.3
	514_要求レベル_性能・効率性	114_作業スペース	69	14	28	15	12	-0.53	1.01	27.0	3.0	-0.22	5.8
	509_ユーザ担当者_受け入れ試験関与	69	30	12	9	18	-0.62	-0.82	21.7	8.5	0.38	0.4	
軽微	408_デバッグ_テストツール利用	603_要員スキル_分析・設計経験	45	6	8	4	27	-0.80	-1.19	13.4	5.2	0.33	3.5
	516_要求レベル_移植性	518_要求レベル_セキュリティ	41	13	14	2	12	-0.34	-1.34	51.0	1.0	0.33	3.3
	518_要求レベル_セキュリティ	業種_金融・保険業	64	21	17	3	23	-0.40	-0.79	31.0	5.3	0.44	0.0

て、121\_計画の評価(品質)、411\_コードジェネレータ利用、503\_ユーザ担当者\_システム経験、601\_PMスキル、業種\_金融・保険業の5つを選定する。

(2) 中度の不具合の場合

中度の不具合では、114\_作業スペース、403\_類似プロジェクト\_有無、412\_開発方法論利用、507\_ユーザ担当者\_設計内容理解度、514\_要求レベル\_性能・効率性、603\_要員スキル\_分析・設計経験の6つの変数は、真の要因ではない可能性がある。114\_作業スペースは、理由は不明であるが、中度レベルの信頼性向上要因である406\_設計支援ツール利用との $\phi$ 係数が-0.34と逆相関の関係がある。すなわち、作業スペースが広いプロジェクトは設計支援ツールの利用度が低い。このことが114\_作業スペースが表面上の信頼性低下要因として選定された理由と考えられる。406\_設計支援ツールを利用しているプロジェクトはほとんどの場合412\_開発方法論も利用している。開発方法論の信頼性向上効果の大きな部分を設計支援ツールが占めているものと考えられる。

603\_要員スキル\_分析設計経験と412\_開発方法論の利用の間には因果関係があると考えられる。実際に、603\_要員スキル\_分析設計経験が豊富なプロジェクトではほとんどの場合(今回のデータではすべて)412\_開発方法論を利用

している。このことから、603\_要員スキル\_分析設計経験に対しては条件(d)が成立するので、見かけ上の要因ではなく真の要因とみなすこととする。

以上の結果から、中度の不具合に影響を与える要因として、406\_設計支援ツール利用、408\_デバッグ\_テストツール利用、509\_ユーザ担当者\_受け入れ試験関与、512\_要求レベル\_信頼性、516\_要求レベル\_移植性、603\_要員スキル\_分析設計経験、1010\_テスト体制(スキルレベル)、アーキテクチャ\_2階層クライアントサーバの8個を選定する。

(3) 軽微な不具合の場合

軽微な不具合では、408\_デバッグ\_テストツール利用、516\_要求レベル\_移植性、518\_要求レベル\_セキュリティの3つの変数は、真の要因ではない可能性がある。408\_デバッグ\_テストツール利用はp値が13.4%と有意水準の10%をわずかに超えていて、603\_要員スキル\_分析・設計経験の方が信頼性向上に寄与していることがわかる。因果関係があるとしても後者から前者であるため(d)の条件は成立しない。518\_セキュリティへの要求レベルが高いプロジェクトは、ほとんどの場合516\_移植性への要求レベルも高い。移植性への要求レベルの高さが信頼性向上に寄与しているというよりは、セキュリティへの要求レベルの高さが信頼性向上に寄与していると言える。さらに、金融・保険業の

ソフトウェアは、ほとんどの場合 518\_セキュリティへの要求レベルが高い。金融・保険業のソフトウェアは他の業種よりさまざまな面で要求レベルが高く、それを満たすために多くの技術を駆使した、レベルの高い開発プロセスでソフトウェアを開発していると考えられる。信頼性の向上はセキュリティへの要求レベルの高さもさることながら、金融・保険業のソフトウェアであることによる部分が大きいと言える。

以上の結果から、軽微な不具合に影響を与える要因として、411\_コードジェネレータ利用、603\_要員スキル\_分析設計経験、業種\_金融・保険業の3つを選定する。

## 5.2 常識に反する結果のさらなる検討

常識に反する結果として 5.1.1 でリストアップしたもののうち、411\_コードジェネレータ利用と 601\_PM スキルが依然として排除されずに残っている。これらの結果の妥当性を再度検討する。

### (1) コードジェネレータの利用

コードジェネレータの利用は、重大な不具合、軽微な不具合いずれに対しても信頼性にはマイナスの影響を与えるという結果であった。中度の不具合に対しては下位レベルのデータ件数が9件のため分析対象外としたが、偏回帰係数は -0.42、p 値は 56% (片側検定では 28%) であり、信頼性向上に寄与する傾向が見られる。<sup>\*6</sup>。コードジェネレータは、現時点では信頼性にマイナスの影響を与えるという結論であるが、最終的な結論をおろすには今後さらなるデータの蓄積と分析が必要である。

### (2) PM スキル

変数「601\_PM スキル」のレベルは a~d までであり、アルファベットの若番ほどスキルレベルが高い。変数のレベルごとの基本統計量すなわち平均不具合数と FP 規模の中央値を表 8 に示す。

レベル a の PM が開発したソフトウェアは平均 5.57 件の不具合を発生しているが、FP 規模の中央値も大きい。一方、レベル d の PM が開発したソフトウェアの FP 規模の中央値はレベル a の半分以下であるが、平均不具合数は 0.13 件で非常に少なく、FP 規模で正規化してもレベル d の方がレベル a よりも信頼性が高い。

そこで、PM スキルの a~d の各レベル同士すべての組合せに対して、対象とする 2 つのレベルのいずれかに属するプロジェクトを対象に FP 規模と 601\_PM スキルを説明変数とする (重) 回帰分析を行って、601\_PM スキルの偏回帰係数が有意であるかどうかを調べた (表 8)。ただし、いずれの組み合わせにおいても上位レベルを 1、下位レベルを 0 としている。不具合数は、常識的には  $a < b < c < d$

<sup>\*6</sup> 合計不具合数に対する分析 (文献 [5]) では、999 件を含めた場合の偏回帰係数は正で p 値は有意であったが、含めない場合の p 値が 43% あったため要因の選定は保留している。

表 8 PM スキルの基本統計量と各レベル間の信頼性の差  
 Table 8 Fundamental statistics of PM skill levels and differences of reliability between them

レベル	基本統計量			信頼性の差			
	データ件数	平均不具合数	FP 規模の中央値	a	b	c	d
a	14	5.57	3,150	-	0.05	-1.65	2.12
b	13	0.23	1,710	97.1	-	-1.80	0.50
c	18	1.17	1,160	18.1	6.6	-	2.19
d	30	0.13	1,140	7.3	54.6	1.1	-

(注) 信頼性の差の欄の右上段: 偏回帰係数, 左下段: p 値 (%)

の順が期待されるが、表 8 からは、 $d < b < a < c$  の順という結果が得られる。ただし、レベル a とレベル b の差はほとんどない (偏回帰係数は 0.05 で p 値は 97.1%)。レベル d は IT スキル標準のレベル 3 であり、定義によると「プロジェクト管理の経験なし」である。FP 規模が小さいだけでなく、恐らく、易しいプロジェクトを任されたため不具合数が少なくなったものと考えられる。レベル d のデータ件数が最も多いため、最適分割点が bc 間ではなく cd 間となったことで、PM スキルレベルが低いプロジェクトの方が信頼性が高いという結果が得られたものであり、601\_PM スキルを要因と選定するのは保留した方がよい。

## 5.3 重大度レベルによる影響要因の違い

表 9 に不具合の合計および重大度別の信頼性に関する要因を示す。合計不具合数の要因は文献 [5] に基づくものであるが、それらに対しても 5.1 節で行ったと同じように他の要因による影響分析を行った (表 10)。また、ある変数が、合計を含むある重大度レベルで要因と判定された場合は、合計およびそれ以外の重大度レベルで p 値が 10% 超 20% 以下となる変数を準要因として表 9 に加えている。これは、合計を含むある重大度レベルで要因と判断されたものは、合計あるいは他の重大度レベルでも目的変数に影響を与えている可能性が高いのではないかと考えられるからである。20% の有意水準は、5 回に 1 回以下の誤りなら分析結果は実務上の参考になるのではないかと考えて設定したものである。

表 9 を見ると、変数ごとに合計・重大・中度・軽微の (準) 要因であるか否かのパターン (要因パターン) が異なっている。その違いについて次に考察する。

### 5.3.1 合計不具合と重大度別不具合の要因の違い

合計不具合の要因と重大度レベル別不具合の要因の違いが出る主な理由としては次のようなものが考えられる。

#### (1) データ分割による影響

一般に偏回帰係数が同じ値でもデータ件数が多いほど p 値は小さくなる。したがって、データを分割するとデータ件数が減って p 値が大きくなり、全体 (合計) では要因と



表 9 不具合の合計および重大度別の信頼性に関する要因

Table 9 Factors in terms of reliability for total faults and each severity level.

分類	変数名	各不具合の(準)要因				
		合計	重大	中度	軽微	
P	113_達成目標_優先度_明確度合	○	-	-	-	
	121_計画の評価(品質)	○	○	-	-	
T	406_設計支援ツール利用	-	-	○	-	
	408_デバッグ_テストツール利用	○†	-	○	◇	
	411_コードジェネレータ利用	-	●	*	●	
U	5119_要求仕様変更発生状況_結合テスト	○	*	*	*	
	ユーザ担当者	502_要求仕様関与	○	**	-	-
		503_システム経験	◇	○	-	-
		504_業務経験	○	-	◇	-
		507_設計内容理解度	○	*	○†	-
509_受け入れ試験関与		◇	-	○	-	
R	要求レベル	512_信頼性	◇	-	○	
		515_保守性	○	-	-	◇
		516_移植性	◇	-	○	○†
D	603_要員スキル_分析・設計経験(注)	◇	◇	○	○	
	1010_テスト体制(スキルレベル)	○	◆	○	-	
I	業種_金融・保険業	○	○	-	○	
A	アーキテクチャ_2階層クライアントサーバ	*	*	○	◇	

(注) 最適分割点は、合計不具合では bc 間、それ以外は ab 間。  
 (凡例) ○: p 値が 10%以下で偏回帰係数が負。●: 同じく正。  
 ◇: p 値が 10%超 20%以下で偏回帰係数が負。◆: 同じく正。  
 -: p 値が 20%超。†: 要因とすることを保留したもの。\*: データ件数の条件を満たさない。\*\*: 計算が取束しない。

表 10 他の質的要因の影響を受けた合計不具合数に対する質的要因  
 Table 10 Qualitative factors for total faults affected by other qualitative factors

被影響要因 (x <sub>1</sub> )	影響要因 (x <sub>2</sub> )
408_デバッグ_テストツール利用	5117_要求仕様変更発生状況_詳細設計
	515_要求レベル_保守性
501_要求仕様_明確さ	121_計画の評価(品質)
	1010_テスト体制(スキルレベル)
要求仕様変更発生状況	5116_基本設計
	5117_詳細設計
	5120_総合テスト
514_要求レベル_性能・効率性	507_ユーザ担当者_設計内容理解度
	業種_金融・保険業
	515_要求レベル_保守性

みなされていたものものが、分割後には要因とはみなされなくなる場合がある。実際、113\_達成目標\_優先度\_明確度

合の合計と中度の不具合では、偏回帰係数に差は見られないものの(それぞれ -0.50 と -0.46) 中度の不具合に対する偏回帰係数の p 値は 34.2% となって有意とはならなかった。中度のデータ件数が 80 件で合計のデータ件数 160 件の半分であることが主な理由と考えられる。

(2) 有意差のないデータを加える影響

ある重大度レベルでは p 値が 10%以下であっても、これに有意差の全くない他の重大度レベルのデータを加えると、データ件数は増えるものの全体の有効性は薄れて p 値が 10%を超えることがある。509\_ユーザ担当者\_受け入れ試験関与などがその例である。

(3) データ集合の違いによる影響

合計不具合のデータ 305 件のうちには、重大度別に分計されていない 125 件(41%)のデータが含まれる。この結果生ずる分析対象データの集合の差も要因パターンに影響を与えている可能性がある。

5.3.2 重大度別不具合間の要因の違い

各重大度レベルで(準)要因は異なる。これは各重大度レベルの不具合の性質(抜け/誤り、ロジック/データなど)や作りこみ工程などに違いがあることを示している。

重大な不具合要因には要求レベルに関するものではなく、理由は不明で仮説レベルであるが、重大な不具合は要求レベルの高さと無関係に発生する可能性がある。999 件のプロジェクトを除くと重大な不具合数の平均は 1.7 件と他の重大度レベルに比べて少なく(表 1)、製作工程でほぼランダムに発生するには少なすぎる。また、要因である 121\_計画の評価(品質)や 503\_ユーザ担当者\_システム経験が与える影響は設計段階までであることから、重大な不具合の多くは製作工程ではなく設計段階で作られるものと考えられる。

中度と軽微の要因を比較すると、中度ではユーザ担当者の経験や関与に関する変数および設計支援ツールの利用が要因となっているが、軽微ではそれらは要因となっていない。ユーザ担当者の経験や関与が影響を与えるのは基本設計工程まで、設計支援ツールの利用が詳細設計工程までであることから、中度の不具合が設計段階を中心に発生するのに対して、軽微な不具合は製作工程を中心に発生するものと考えられる。

各重大度レベルの要因数は、保留したものを除くと、中度のものが 8 個で最も多く、重大と軽微なものがそれぞれ 4 個と 3 個(準要因を含めてもそれぞれ 9 個、6 個、6 個)で少ない。これは中度レベルの不具合が、本論文で対象とした質的要因(開発プロセスの要素)の影響を最も受けていることを意味する。重大な不具合は発生件数も要因も少なく、他の重大度レベルと比べて特殊なものと考えられる。軽微な不具合は発生件数は中度レベルと変わらないものの要因が少なく、製作工程においてほぼランダムに発生している可能性がある。

#### 5.4 プロセス改善に向けて

信頼性向上を目的としたプロセス改善に向けては、表9に示されている要因をすべて考慮するのが望ましい。特に、重大な不具合要因である、121\_計画の評価(品質)と503\_ユーザ担当者\_システム経験、および、複数のレベルで(準)要因と判断された、408\_デバッグ\_テストツール利用、504\_ユーザ担当者\_業務経験、509\_ユーザ担当者\_受け入れ試験関与、603\_要員スキル\_分析・設計経験、1010\_テスト体制(スキルレベル)が重要である。

#### 5.5 今後の課題

##### (1) 他の要因の影響分析方法について

他の要因の影響を考慮した分析方法は、あくまでも線形回帰モデルからの類推に基づくものであって、理論的な裏付けはない(難しい)。この根拠と適用限界を明らかにする必要はある。

##### (2) 要因とすることを保留した変数について

他の要因の影響を考慮することによって要因とすることを保留した変数の中には、合計不具合数における要求仕様変更発生状況など、やはり要因とすべきではないかと考えられるものがある。これらの分析結果の妥当性は今後さらに検証する必要がある。

##### (3) 常識外の要因について

コードジェネレータの信頼性への影響については今後さらに多くの観点からの分析が必要がある。

##### (4) 収集データの充実について

今回の分析で要因として選択したものは、ほぼ間違いなく信頼性への影響要因と考えられるが、選定されなかった変数の中にも要因とすべきものが含まれている可能性がある。これはデータ数が十分でないため第一種の過誤と第二種の過誤を同時に減らすことができない、いわゆる検出力が不足していることに起因している。要因の検出力を増すために収集データをさらに増やしていくことが望まれる。

## 6. おわりに

IPA データには、開発プロセスに関連するさまざまな質的変数のデータだけでなく信頼性の指標としてのシステム稼働後の重大度別の不具合数のデータがある。今回それに基づいて不具合の重大度別にその影響要因を調べた。

分析の結果、影響要因は不具合の重大度によって大きく異なることがわかった。重大な不具合に対しては、計画段階での品質の評価とユーザ担当者のシステム経験が、中度の不具合に対しては、設計支援ツールやデバッグ\_テストツールの利用、ユーザ担当者の受け入れ試験への関与、開発要員全員の分析・設計に関する十分な経験、高いスキルレベルのテストチームが、それぞれの不具合を減少させるのに有効である。開発要員全員の分析・設計に関する十分な経験は軽微な不具合も減少させる。信頼性と移植性への

高い要求レベルは、結果的に中度レベルの不具合を減少させる。また、金融・保険業のソフトウェアは他の業種に比べて重大および軽微な不具合が少なく、2階層クライアント・サーバ上のソフトウェアは中度の不具合が少ない。

IPA データには他の同種のデータに比べて非常に多くの変数と多くのデータが存在するが、不具合の内容や作り込み状況などの詳細情報はなため、不具合の発生メカニズムなどの分析には限界がある。今回の分析でも、重大・中度・軽微の不具合とそれらへの影響要因との関係は表面的なものとならざるを得なかった。これらの詳細な関係については、より詳細なデータをもつデータレポジトリの構築とそれを利用したデータ分析に委ねたい。

データ分析には、分析モデルと判断基準の決定、それに基づく客観的な分析、主観や推測を含めた分析結果の解釈と妥当性の検証など分析体系の整備が必要である。特にフィールドデータの分析では、「最適」な結果を与える分析体系でも少なからず予想外の結果が現れることが少なくない。この分野でのさまざまな分析体系の提案とそれに対する分析結果の積み重ね・比較が今後必要と考えられる。

謝辞 本研究は東海大学とIPA が連携して実施したものである。東海大学理学部数学科の山本義郎教授の貴重なアドバイスに感謝するとともに、IPA の山下リーダおよび五味研究員をはじめとする歴代研究員の方々のご協力に深く感謝の意を表す。

#### 参考文献

- [1] Zhang, X. and Pham, H.: An Analysis of Factors Affecting Software Reliability, *J. Sys. Softw.*, Vol.50, No.1, pp.43-56 (2000).
- [2] Zhu, M., Zhang, X. and Pham, H.: A Comparison Analysis of Environmental Factors Affecting Software Reliability, *J. Sys. Softw.*, Vol.109, pp.150-160 (2015).
- [3] Zhu, M. and Pham, H.: Environmental Factors Analysis and Comparison Affecting Software Reliability in Development of Multi-Release Software, *J. Syst. Softw.*, Vol.132 (C), pp.72-84 (2017).
- [4] Gorla, N. and Lin, S-C.: Determinants of Software Quality: A survey of Information Systems Project Managers, *Informat. Softw. Technol.*, Vol.52, No.6, pp.602-610 (2010).
- [5] 古山恒夫: エンタープライズ系ソフトウェアの信頼性に影響を与える質的要因の分析, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.11, pp.2048-2062 (2019).
- [6] 独立行政法人情報処理推進機構 (IPA) ソフトウェアエンジニアリングセンター (SEC) 監修: ソフトウェア開発データ白書 2016-2017 (2016).
- [7] 古山恒夫: ソフトウェアプロジェクトデータの量的変数に関する分析の一指針と分析事例, *SEC journal*, 第7巻, 第3号 (通巻26号), pp.105-111 (2011).
- [8] Cameron, A. C. and Trivedi, P. K.: *Regression Analysis of Count Data*, 2nd ed., Cambridge Uni. Press, p.566 (2013).
- [9] Yamamura, K.: Transforming using  $(x + 0.5)$  to stabilize the variance of populations, *Res. Popul. Ecol.*, Vol.41, pp.229-234 (1999).