

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18510138  
 研究課題名（和文） ソフトウェア・イー・メインテナンスの最適設計・評価に関する研究  
 研究課題名（英文） A Study on Optimal Design and Evaluation for Software e-Maintenance  
 研究代表者  
 尾崎 俊治（SHUNJI OSAKI）  
 南山大学・数理情報学部・教授  
 研究者番号：10034399

研究成果の概要：オープンソースに代表されるバザール形式の開発形態では、障害レポートを電子的に収集しフォールト検出・修正に伴うリビジョンアップ後にユーザへ再び電子的に配布される。このようなオンライン上の保守手続きを e-メインテナンスと呼ぶ。一般に、e-メインテナンスに対する保全性評価は従来の閉じた環境で開発されるソフトウェアに対する評価と大きく異なる。本研究では e-メインテナンスモデルの構築とその評価を行う。これは、信頼性・保全性理論における新しいパラダイムを与え、実務面から我が国のソフトウェア産業を支援する技術となる。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
総計	3,500,000	660,000	4,160,000

研究分野：システム工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学，社会システム工学・安全システム

キーワード：ソフトウェア信頼性，統計解析，ソフトウェア信頼性モデル，Java ツール，

非同次ポワソン過程，比例ハザードモデル，ベイズ推定，変分ベイズ

## 1. 研究開始当初の背景

現在、情報ネットワーク上で展開されている e-ビジネスの将来性を見据えた上で、ソフトウェアサービス工学と呼ばれる新しい学問領域が形成されつつある。ソフトウェアサービス工学には、(i) ネットワークアーキテクチャのパターン化技術，(ii) ビジネス駆動ソフトウェアサービス開発方法論，(iii) 高信頼化ソフトウェアサービス提供技術，(iv) ソフトウェア進化における連続・不連続モデルの開発などの課題が山積されており、特に、インターネット上で相互に連携するソフトウェアの開発方法論はソフトウェア工学全

般の主要な研究テーマになりつつあると言っても過言ではない。

インターネット上で相互に連携するソフトウェア群の保全を統合的に実施するためには、ユーザごとに異なる運用環境下で出現した障害内容（バグレポート）からフォールトを検出し、フォールトの修正・除去が行われた改良プログラムを各ユーザがインストールするという手続きを通じて自律的な保全がなされる。このようなネットワーク上で駆動するソフトウェアの電子的保全手続きをソフトウェア e-メインテナンスと呼ぶ。

しかしながら、オペレーティングシステムの脆弱性を補完する目的で e-メインテナン

スの利用が爆発的に普及しているにも拘わらず、またソフトウェア開発プロジェクト中における保全費用が極端に増大している現状においてさえも、ソフトウェア保全計画を予め策定するための方法論が未だに確立されていないのが現状である。換言すれば、ソフトウェア e-メンテナンスは非同期分散性を有する知的メンテナンス技術であり、遠隔モニタリングに基づく予測と診断の技術を通じて、自律的なメンテナンスを柔軟に行えるような枠組み新たに提案する必要がある。そこで本研究では、インターネット上で相互に連携するソフトウェアに対する e-メンテナンスシステムを設計するための性能評価モデルを開発し、実験結果との比較を通じて提案モデルの有効性を検証する。

## 2. 研究の目的

ソフトウェアメンテナンスは、主に IEEE Computer Society 主催の International Conference on Software Maintenance を中心に、各種ソフトウェア工学に関する国際会議や関連学術雑誌で広く研究されているが、未だに研究の中心はメトリクス計測の方法論と事例研究にとどまっている。しかしながら、異なる動作環境においてソフトウェアメトリクスデータをオンラインで計測することは不可能であり、何らかの予測モデル（確率・統計モデル）に基づいてソフトウェアの運用環境を推論しながら、逐次的にメンテナンス費用（メンテナンス作業工数や日程）の見積もり、システムダウン期間の予測を逐次行う必要がある。そのような適応的なリソース配分問題は、これまでにソフトウェアメンテナンスの分野で考えられたことはなかった。すなわち、本研究では情報ネットワーク理論における情報リソース配分の考え方をソフトウェアメンテナンスに応用し、世界に先駆けて実用的な e-メンテナンスプロトタイプを開発する。

本研究では、モデル解析、システム開発、実験評価、実証研究という4つ段階をバランスよく配置しており、信頼性・保全性理論における e-メンテナンスに関する新しいパラダイムを創造するだけでなく、ソフトウェアメンテナンスの実務に大きなブレークスルーを与えるものである。また、本研究で得られる成果の延長として、情報ネットワーク上の仮想的ソフトウェア開発工程上でソフトウェア製品のプロトタイプを開発するという、ソフトウェアの次世代開発パラダイムの実現に一步前進することがあげられる。独創的なソフトウェア開発技術に関して欧米との格差が大きいことが指摘されている我が国のソフトウェア業界において、上述の

ような新しい保全技術の開発は切に望まれており、本研究の波及効果は極めて高いものと期待している。

本研究で提案する性能評価モデルでは、運用環境におけるソフトウェア障害の発生過程を既存のソフトウェア信頼性モデル（非同次ポアソン過程、連続時間マルコフ連鎖）で記述し、2つのダイナミクスを結合することによる保全モデルを定式化する。実際のモデルパラメータを推定するためには十分なメトリクスデータが取得できないことから、マルコフ連鎖モンテカルロ法によるベイズ推定を行い、小標本データに基づいて最適なメンテナンスリソースの配分、メンテナンス警告の発信時期の決定、総期待費用の推定を行う。また、e-メンテナンスシステムのプロトタイプを実際のネットワーク上に実装した上で実験を行い、開発モデルの有効性を予測精度と計算コストの観点から評価する。

## 3. 研究の方法

本研究で実施予定の研究内容は主に3つの段階から構成される。すなわち、(A) 基本モデルの開発と計算機実験環境の整備、(B) メンテナンス計画（モデルに基づいた遠隔予測、パターン診断、モデルに基づいたメンテナンス警告の発信時期の推定、動的リソース配分問題の解法、費用見積もり進捗度予測）を策定するためのシステム開発、(C) 実際の保全実務への適用と事例研究。各段階における研究期間はそれぞれ1年とし、理論と実務のバランスを考慮して研究を推進する。また、本研究チームは2つの研究グループから構成され、各々の研究グループが相互に連携をとりながら研究目標に沿って研究を遂行する。各研究グループと研究内容は以下の通りである。

【性能評価モデルの開発】：本研究の柱となるオンライン保守アルゴリズム性能評価モデルの理論的枠組みを開発する。ユーザと開発管理者の応答関係を数学モデルで記述し、ソフトウェア信頼性モデルと結合することによって e-メンテナンスの時間的振舞いを描写する保全モデル（確率過程）を解析する。また、ネットワーク上で動作する保全モデルの妥当性について検討し、輻輳の発生など実際のソフトウェア運用形態を考慮したモデル化を実施する。パラメータ推定の問題ではベイズ推定を適用し、マルコフ連鎖モンテカルロ法あるいは変分ベイズといった計算手続きの適用を考える。特に、本研究で考えているような多くのパラメータを含むモデルでは、パラメータ推定はモデルの成否を左右する最重要課題であると言っても過言ではない。

【ネットワーク上で実機を用いた実験】：性能評価モデルの開発と並行し、ソフトウェア e-メンテナンスを実現するための計算機実験を行う。性能評価モデルは大規模かつ長系列のマルコフ連鎖モンテカルロ法を実行する。また、ネットワーク上でやりとりされるメンテナンス情報はクラスタを構成する PC を用いた分散データベースに保管される。実験的なソフトウェア e-メンテナンス環境を実現し、メンテナンスサービスの定量化を行うことが本質的な課題である。

実質的に2つの研究機関で共同研究を遂行するために、ネットワーク上で研究の進捗状況を相互に把握し、メール会議を通じて随時情報交換を行う。また、年に1回～2回は研究打合せのための会合を開催する。このような直接意見交換を行うことで研究目標に到達出来るよう調整する。

理論的研究成果に関する論文発表は、IEEE Computer Society 主催の国際会議である International Conference on Software Maintenance (ICSM), Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE), International Symposium on Empirical Software Engineering (ISESE), International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE), International Symposium on Dependable Autonomic and Secure Computing (DASC) などに投稿する予定である (いずれも採択率 30%程度の権威のある国際会議)。また、平成 18 年から 2 年間に渡る研究成果は、IEEE Transactions on Software Engineering や IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing など世界的に権威のある学術雑誌への投稿論文としてまとめる。

#### 4. 研究成果

各年度毎の研究成果を以下に記す。

##### (1) 平成 18 年度

ソフトウェア・イー・メンテナンスを実現するための、数理モデルの開発を中心としたプロジェクト運営を行った。特に、自動化にとって重要な課題となるデータからのモデル同定手法と、多種の要因を取り込むモデルの開発を行った。具体的な成果は以下の通りである。

①モデル同定手法：主として、従来からソフトウェア信頼性分野で用いられる非同次ポアソン過程に対するパラメータ手法の改良と、マルコフ過程に基づいた新たなソフトウェア信頼性モデルとそのパラメータ手法の

開発に分類できる。伝統的な非同次ポアソン過程に対する推定では、数百種類存在する既存モデルを統計的な性質に基づいて、12種類の基本モデルとそれらの派生モデルのカテゴリに分類し、正規分布、極値分布、ロジスティック分布に属するモデルに対する統計的な考察を行った。他方、ポアソン過程をマルコフ連鎖と言う観点から拡張したマルコフ変調ポアソン過程に基づいた新たなソフトウェア信頼性モデルの枠組みを考案し、EM アルゴリズムを適用した効率的なパラメータ推定手法と AIC を適用したモデル同定手法を確立した。また、同種のモデルにおいて、従来の最尤推定手法による点推定を拡張し、ベイズ推定を基礎とした区間推定の枠組みに対する検討を行った。実際に、変分ベイズと呼ばれる近似手法がソフトウェア信頼性モデルにおいて大きな期待が持てる手法であることが確認され、今後のプロジェクト発展において大きな成果を挙げた。

②環境要因を考慮したモデリング：従来の非同次ポアソン過程にモデルは単純なフォールト検出に関するデータのみに着目しているため、最終的なアウトプットである信頼度評価に対して大きな制限を与えている。そこで、フォールトデータと他のソフトウェアテスト要因 (人員やテストスキル) を有機的に取り込んだ新しいソフトウェアモデルの検討を行った。実際、解析結果において、COX 比例ハザードモデルと非同次ポアソン過程を融合したモデルが数学的に最も自然な形で環境要因を取り入れることができ、幾つかの実データを用いた実験においても高い精度の評価が行える可能性を示した。現在これらのモデルを Java を用いたツールとして開発している。

##### (2) 平成 19 年度

ソフトウェア・イー・メンテナンスの実現に向けて、数理モデルの精巧化、推定における不確かさ評価の確立、プロトタイプツールの作成を行った。

数理モデルの精巧化：先に提案したソフトウェアテストに対する環境要因を考慮した評価モデルに対して、現実的な利用目的に即した形で拡張を行った。具体的には、ソフトウェア開発で観測されるフォールトのデータ形式 (時間データおよび個数データ) に対する拡張を行った。ベースとなるモデルは前年度議論した Cox 比例ハザードモデルと非同次ポアソン過程モデルを融合したものである。また、ソフトウェアメンテナンスのスケジューリングに関する数理モデル化も合わせて行い、その最適性に関する議論も行った。これらの技術は、実際のソフトウェア評価はもちろんのこと、イー・メンテナンスにおける最適設計に応用することが可能

である。

不確かさ評価の確立：ソフトウェア信頼性評価における推定自身の不確かさを評価するための手法の確立を行った。ここではベイズ手法と事後分布評価に対する変分法の適用を行った。提案する評価アルゴリズムは従来のサンプリングに基づいた手法よりも、高速に評価を行うことが可能である。このような不確かさを考慮した評価は、本プロジェクトが対象とするオープンな開発環境における信頼性評価に大きく貢献するものと考えられる。

プロトタイプツールの作成：基礎のモデルとなる非同次ポアソン過程モデルとそれを環境要因と融合したモデルを用いて実際のデータから評価を行うツール（プロトタイプ）の開発を行った。実装は Java で行い、将来的には Web アプレットによる実装から、インターネットを介したイー・メンテナンスに対する統合アプリケーションへと発展させる。

### (3) 平成20年度

e-メンテナンスに関する数理モデルの開発とプロトタイプツールの開発を行った。特にソフトウェア障害（およびバグ情報）を利用するシステムの開発とそれを用いた評価のモデルの精巧化を行った。ソフトウェア性能評価の精巧化に関して、ソフトウェア品質には機能性、信頼性、使用性、効率性、保全性、移植性がある。特に信頼性は重要な指標であり、その評価を行うための確率モデルがいくつも提案されている。ここでは e-メンテナンスの特徴であるネットワークを介したシームレスなデータモデルを利用可能なソフトウェア信頼性評価モデルの構築を行った。つまり、類似するソフトウェアプロジェクトからの経験データを利用可能な信頼性モデルとその推定手法についての開発を行った。具体的に、混合ポアソン分布や超アーラン分布を用いてモデルの拡張性を向上させ、ベイズ推定を基礎とした変分ベイズを用いて推定手法の確立を行った。一方、ソフトウェア障害マネジメントシステムに関して、上述の信頼性評価モデルおよび手法の精巧化と同時にバグトラッキングシステムに実装可能な信頼性評価ツールの開発を行った。作成したツールは Java を基礎として、上述の超アーラン分布によるモデルを含む複数のモデルを用いた評価を実装している。また、ベイズ推定で一般的に使われるマルコフ連鎖モンテカルロ法による推定を実装するための乱数生成に関しても検討を行った。これは Java ベースのツールであるため、バグトラッキングシステムとして有名な Bugzilla や統合開発環境として知られている Eclipse などのプラグインとして発展す

ることができる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計35件)

1. K. Ohishi, H. Okamura and T. Dohi, Gompertz software reliability model: estimation algorithm and empirical validation, *Journal of Systems and Software*, 82, 535-543, 2009.
2. T. Ozaki, T. Dohi and N. Kaio, Numerical computation algorithms for sequential checkpoint placement, *Performance Evaluation*, 66, 311-326, 2009.
3. H. Okamura and T. Dohi, Software reliability modeling based on capture-recapture sampling, *IEICE Trans on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences (A)*, E92-A, 2009 (掲載決定)
4. H. Okamura, T. Dohi and K. S. Trivedi, Markovian arrival process parameter estimation with group data, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 172, 2009 (掲載決定)
5. H. Okamura and T. Dohi, Software reliability modeling based on mixed Poisson distributions, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 15(1), 9-32, 2008.
6. M. Fushimi and T. Hadano, Optimal Configurations of Cell Automata to Generate Test Stimuli for VLSI, *Lecture Notes in Operations Research*, 8, 447-450, 2008.
7. 須崎政文, 尾崎俊治, 順位付けじゃんけんの確率論的解析と近似計算, *電子情報通信学会*, J91-A, 393-398, 2008.
8. A. Suzuki, M. Fushimi and M. Nishio, Selecting Journals of University Library to Stop Subscription by OR/MS Approach, *Lecture Notes in Operations Research*, 231-247, 2008.
9. T. Dohi and S. Osaki, Estimating renewal functions: a neural network-based approach, *Proc. 2008 Asian Int. Workshop on Advanced Reliability Modeling*, 414-421, 2008.
10. Y. Yamaguchi, H. Okamura and T. Dohi, Estimating a mixture of Erlang distributions based on variational Bayes, *Proc. 2008 Asian Int. Workshop on Advanced Reliability Modeling*, 619-626, 2008.

11. T. Ishii and T. Dohi, A new paradigm for software reliability modeling – from NHPP to NHGP –, Proc. 14th Pacific Rim Int. Symp. Dependable Computing, 224-231, 2008.
12. H. Okamura and T. Dohi, Hyper-Erlang software reliability model, Proc. 14th Pacific Rim Int. Symp. Dependable Computing, 232-239, 2008.
13. K. Shibata, K. Rinsaka and T. Dohi, Dynamic software reliability modeling with discrete-test metrics; how good is it?, International Journal of Industrial Engineering, 14(4), 332-339, 2007.
14. K. Iwamoto, T. Dohi and N. Kaio, Estimating periodic software rejuvenation schedule in discrete operational circumstance, IEICE Transactions on Information & Systems (D), E91-D(1), 23-31, 2008.
15. K. Rinsaka and T. Dohi, A faster estimation algorithm for periodic preventive rejuvenation schedule maximizing system availability, Service Availability: 4th Int'l Service Availability Symp., Lecture Notes in Computer Science 4526, 94-104, 2007.
16. H. Okamura, M. Grottke, T. Dohi and K. S. Trivedi, Variational Bayesian approach for interval estimation of NHPP-based software reliability models, Proc. of 2007 Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks (DSN-2007), 698-707, 2007.
17. K. Rinsaka and T. Dohi, Non-parametric predictive inference of preventive rejuvenation schedule in operational software systems, Proc. of 18th Int'l Symp. on Software Reliability Engineering (ISSRE'07), 247-256, 2007.
18. K. Shibata, K. Rinsaka, T. Dohi and H. Okamura, Quantifying software maintainability based on a fault-detection/correction model, Proc. of 13th Pacific Rim Int'l Symp. on Dependable Computing (PRDC'07), 35-42, 2007.
19. K. Shibata, K. Rinsaka and T. Dohi, PISRAT: Proportional intensity-based software reliability assessment tool, Proc. of 13th Pacific Rim Int'l Symp. on Dependable Computing (PRDC'07), 43-52, 2007.
20. T. Dohi, N. Kaio and S. Osaki, Estimating cost-effective checking request policies, Quality Technology and Quantitative Management, 4(2), 1-13, 2007.
21. T. Dohi, N. Kaio and S. Osaki, Optimal (T, S)-policies in a discrete-time opportunity-based age replacement: an empirical study, International Journal of Industrial Engineering, 14(4), 340-347, 2007.
22. 須崎政文, 尾崎俊治, 勝ち抜きコイン投げの平均とそのオーダ, 数理解析研究所講究録, 1559, 15-21, 2007.
23. H. Okamura, A. Murayama and T. Dohi, A unified parameter estimation algorithm for discrete software reliability models, Opsearch, 42 (4), 355-377, 2006.
24. 岡村寛之, 古村仁志, 土肥正, 傾向曲線に基づいたソフトウェア信頼性モデルに対するパラメータ推定, 情報処理学会論文誌, 47 (3), 897-905, 2006.
25. 石井智隆, 土肥正, 2次元 NHPP に基づいたテスト労力依存型ソフトウェア信頼性モデル, 電子情報通信学会論文誌 (D-I), J89-D (8), 1684-1694, 2006.
26. T. Ishii, T. Fujiwara and T. Dohi, Bivariate extension of software reliability modeling with number of test cases, Proceedings of 2006 Asian International Workshop on Advanced Reliability Modeling (AIWARM 2006), 395-402, 2006.
27. H. Okamura and T. Dohi, Software reliability modeling based on mixed Poisson distributions, Proceedings of 2006 Asian International Workshop on Advanced Reliability Modeling (AIWARM 2006), 427-434, 2006.
28. K. Shibata, K. Rinsaka and T. Dohi, Incorporating dynamic software metrics data in software reliability assessment, Proceedings of 2006 Asian International Workshop on Advanced Reliability Modeling (AIWARM 2006), 451-458, 2006.
29. K. Rinsaka, K. Shibata and T. Dohi, Proportional intensity-based software reliability modeling with time-dependent metrics, Proceedings of The 30th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2006), 405-410, 2006.
30. T. Ando, H. Okamura and T. Dohi, Estimating Markov modulated software reliability models via EM algorithm,

- Proceedings of The 2nd IEEE International Symposium on Dependable Autonomic and Secure Computing (DASC' 06), 111-118, 2006.
31. K. Shibata, K. Rinsaka and T. Dohi, Metrics-based software reliability models using non-homogeneous Poisson processes, Proceedings of The 17th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE' 06), 52-61, 2006.
  32. H. Okamura, H. Furumura and T. Dohi, On the effect of fault removal in software testing -Bayesian reliability estimation approach-, Proceedings of The 17th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE' 06), 247-255, 2006.
  33. H. Okamura and T. Dohi, Building phase-type software reliability models, Proceedings of The 17th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE' 06), 289-298, 2006.
  34. H. Okamura, T. Sakoh and T. Dohi, Variational Bayesian approach for exponential software reliability model, Proceedings of 10th IASTED International Conference on Software Engineering and Applications, 82-87, 2006.
  35. T. Ishii and T. Dohi, Two-dimensional software reliability modeling, Proceedings of 12th Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC' 06), 3-10, 2006.

[学会発表] (計5件)

1. S. Osaki, A Historical Survey of Software Reliability Modeling, Asian International Workshop on Advanced Reliability Modeling (AIWARM2008), 2008年11月23-25日, Taichung, Taiwan.
2. 須崎政文, 尾崎俊治, コイン投げによる1人勝ち抜き問題の平均回数  
の漸近解析—公平なコインの場合—, 日本オペレーションズ・リサーチ学会  
秋季研究発表会, 2008年9月10-12日, 札幌コンベンションセンター.
3. 須崎政文, 尾崎俊治, コイン投げによる1人勝ち抜き問題の平均回数  
の漸近解析—公平なコインの場合—, 日本オペレーションズ・リサーチ学会  
春季研究発表

- 会, 2009年3月17-18日, 筑波大学
4. H. Okamura and T. Dohi, Confidence intervals of software release time based on Bayesian estimation, 5th International Conference on Mathematical Methods in Reliability, Methodology and Practice (MMR 2007), 2007/7/1-2007/7/4, Glasgow, UK.
  5. K. Rinsaka, K. Shibata and T. Dohi, Empirical stopping rule for testing a software - theory and application, 5th International Conference on Mathematical Methods in Reliability, Methodology and Practice (MMR 2007), 2007/7/1-2007/7/4, Glasgow, UK.

[図書] (計1件)

1. S.-H. Shu and T. Dohi (eds.), Advanced Reliability Modeling III - Global Aspect of Reliability and Maintainability, McGraw Hill, 811 pages, 2008.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

尾崎 俊治 (SHUNJI OSAKI)  
南山大学・数理情報学部・教授  
研究者番号: 10034399

### (2) 研究分担者

長谷川 利治 (TOSHIHARU HASEGAWA)  
京都情報大学院大学・応用情報技術研究科・教授  
研究者番号: 40025911  
(期間: 平成18年度~平成19年度)

伏見 正則 (MASANORI FISHIMI)  
南山大学・数理情報学部・教授  
研究者番号: 70008369

青山 幹雄 (MIKIO AOYAMA)  
南山大学・数理情報学部・教授  
研究者番号: 40278073

土肥 正 (TADASHI DOHI)  
広島大学大学院・工学研究科・教授  
研究者番号: 00243600

岡村 寛之 (HIROYUKI OKAMURA)  
広島大学大学院・工学研究科・准教授  
研究者番号: 10311812  
(期間: 平成19年度~平成20年度)