

氏名	水上 祐 治
学位(専攻分野)	博士 (経営管理)
学位記番号	博国サ甲 第6号
学位授与の日付	2013年 9月28日
学位授与の要件	学位規則 (昭和28年 4月 1日 文部省令第9号) 第4条第1項該当
学位論文題目	車載組込みソフトウェア開発のコンカレント・エンジニアリング —プロセス変更の柔軟性と製品品質への影響—
論文審査委員	主 査 教 授 井 田 昌 之 副 査 教 授 高 橋 文 郎 副 査 教 授 牛 島 辰 男 副 査 教 授 岩 井 千 明 副 査 教 授 細 田 高 道 副 査 法政大学イノベーション・マネジメント研究科教授 村 上 健 一 郎

論 文 の 内 容 の 要 旨

水 上 祐 治

1. 研究の背景

日本の自動車産業では、効率化と最新の商品をタイムリーに市場投入する目的で、デザイン決定から生産開始までの期間、すなわち開発期間を短縮する活動が活発である。特に、機構設計における三次元 CAD 化、デジタルシミュレーション導入、デジタルデータの再利用は、数多く研究されている。そして、この開発期間短縮活動は、確実に成果を挙げており、1980年代、平均30ヶ月であった新規の開発期間は、その後、1990年代に24ヶ月、2000年代前半に20ヶ月に短縮された。そして、2000年代後半、例えば、日産自動車の「Note」の開発期間は、10.5ヶ月にまで短縮された。

一方、日本の自動車産業では、1980年代以降、自動車制御の高度で複雑な機能の要求が高まり、自動車の制御手法が、従来の機械制御から、電子制御ユニット (Electric Control Unit, 以下 ECU) を使った電子制御へと置き換わっている。そして、さらにそ

れら ECU は、車両内に張り巡らされた車載ネットワークを介して連携し、高度な機能を実現している。その結果、ECU の搭載数は、増加の一途を辿り、2005年、一部の高級車は、ECU の搭載数が100を超えている。

しかし、これら開発期間短縮、および高機能化に伴う ECU 搭載数増加の結果、1997年以降、国産車のリコール件数が急増しており、国産車の品質低下が顕著化している。特に、リコール件数の多くは、組込みソフトウェア開発に原因があるとされ、組込みソフトウェア開発の質低下が主要原因となっている。

2. 研究の目的

本論文は、日本の自動車開発における、品質低下問題について、その背景を整理し、問題点の主要原因を分類にすると共に、その解決策を工学的なモデルと手法で理論的に定義し、有効性について適用事例を示して実証的に研究するものである。最初に、日本の自動車開発における品質低下は、その主要原因が組込みソフトウェア開発の質低下にあることを指摘し、さらに、その要因が組込みソフトウェアを搭載した ECU の急増と開発期間短縮、およびそれらに伴うソフトウェア技術者の負担増と疲弊にあることに言及する。次に、この要因の解決策として、車両レベル機能（複数の部品の協調動作により実現可能となる機能）の検証に重点を置く、コンカレント型ソフトウェア開発プロセスを定義する。なお、コンカレント型ソフトウェア開発プロセスの定義には、ソフトウェア・クリーンルーム理論、クラインのチェーン・リンクド・モデル、そしてエクストリーム・プログラミングを適用した。その後、コンカレント型ソフトウェア開発プロセスの事例への適用を通じて、その有用性を確認した。したがって、「コンカレント型ソフトウェア開発プロセスの導入は、開発期間短縮への対応と製品品質の向上に貢献する」というのが本論文の主張であり、本研究の目的はこれを明らかにすることである。

3. 研究の方法

本論文は、文献サーベイ・モデル構築・適用事例研究から構成されている。まず、先行研究をサーベイし、問題を設定する。本論文では、自動車部品開発における開発期間短縮と組込みソフトウェアの品質低下について考察するため「開発期間短縮」、「組込みソフトウェア開発」、「品質管理」に関する先行研究を中心に調査し、その結果を踏まえ、本論文の問題を設定する。次に、問題を解決するためのソフトウェア開

発プロセスモデルを構築する。モデル構築には、イノベーションモデルを適用した。具体的には、ソフトウェアクリーンルーム理論、クラインのチェーンリンクドモデル、エクストリーム・プログラミングを適用し、ソフトウェア開発工程のコンカレント化を実現するモデルを構築した。そして、次にモデルの検証を行った。本論文では、AMRD社の6年分30プロジェクトのデータを使用した。AMRD社のプロジェクトデータは、本論文で提示するソフトウェア開発プロセスモデルに関し、その導入前後のデータをどちらも含んでいる。プロセス改善前のデータは、2003年1月から2005年12月までの3年間の16プロジェクト、そして、プロセス改善後のデータは、2006年1月から2008年12月までの3年間の14プロジェクトである。分析では、7つの独立変数を用い、6つの従属変数に関する重回帰分析を2つのモデルにて行い、プロセス改善に伴う正負の効果を明らかにした。なお、事例企業名は仮称を使用する。

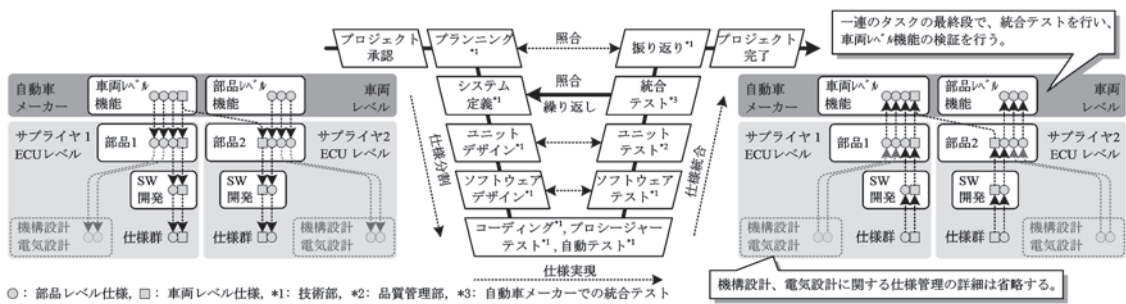
4. 論文の構成

本研究は、六つの工程を経て、日本の自動車部品開発の車載組込みソフトウェア開発という領域において、継続的な開発期間短縮要請と品質低下問題を統合的に扱い、それら要求を高次元でバランスし解決するコンカレント型ソフトウェア開発プロセスという新しい方法論を提示した。

第一に、問題点の背景として、自動車業界における、自動車開発手法とサプライヤー組織構造、そして、その歴史的背景を示した。次に、車載組込みソフトウェア開発プロジェクトにおける開発プロセスとプロジェクトマネジメントの変遷を示した。

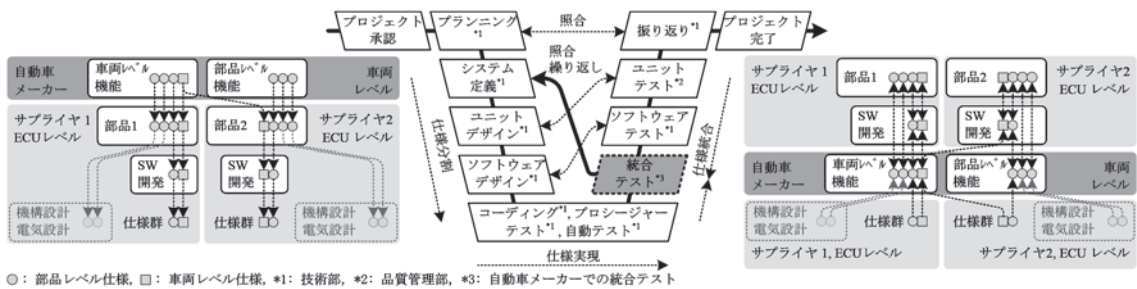
第二に、問題定義として、継続的な開発期間短縮要請と品質低下問題、そして、その問題を取り巻く要因について分析し、継続的な開発期間短縮要請と品質低下問題の主な要因が車載組込みソフトウェア開発とその周辺環境にあるとの結論を得た。

第三に、車載組込みソフトウェア開発の現況を整理し、トラディショナル・イタレーティブ・Vモデル (TIVモデル)としてまとめ、顧客要求機能に関する仕様分解・統合工程とVモデルの結びつきを明確に示した。TIVモデルは、プロセス反復繰り返しだが、Vモデル後段の統合テスト後になることを示し、プロセス反復繰り返しに時間を要する課題、統合テスト後のソフトウェア修正時間確保が困難である課題をプロセスの観点から明確に示したモデルである。



トラディショナル・イタレーティブ・Vモデル (TIVモデル)

さらに、それらTIVモデルの課題を解決するモデルとして、コンカレント型ソフトウェア開発プロセスのチェーンリンクド・イタレーティブ・Vモデル (CLIVモデル) を示した。CLIVモデルは、統合テストをテスト前段で行う改良が施されており、この改善が、既存理論からの発展の突破口となった。



チェーンリンクド・イタレーティブ・Vモデル (CLIVモデル)

第四に、自動車開発における顧客仕様とソフトウェア開発プロセスの関連と処理の関連性を把握するために、ソフトウェア開発プロセスの詳細な動作メカニズムを自動車開発の仕様分解・統合工程との結びつきにて詳細に分類した。さらに複数部品で実現する車両レベルでの機能を示し、統合テストの重要性をプロセスの観点で示した。そして、CLIVモデルの時間短縮効果の源泉をプロセスフローを用い示した。すなわち、本論文のCLIVモデルは、TIVモデルのプロセス反復繰り返しに時間を要する課題、統合テスト後のソフトウェア修正時間確保が困難である課題を解決するプロセスであることをメカニズムと共に示した。

第五に、実際の車載組み込みソフトウェア開発に、コンカレント型ソフトウェア開発プロセスを導入し、複数年に渡りその効果を分析した。その結果、コンカレント型ソフトウェア開発プロセスの導入が、開発期間短縮要請と品質低下問題を同時に解決す

るモデルであることを実証した。さらに、コンカレント型ソフトウェア開発プロセス導入直後に、一時的な生産性低下するなど、考慮すべき負の効果も実証し、導入時に考慮すべき事項を示した。

そして、第六に、本研究で提唱する「コンカレント型車載組込みソフトウェア開発プロセス」の理論とモデルの補強を目的とした、新見積り手法の「変動要因参照型 CoBRA 法」を提唱し補足分析を行った。その結果、新見積り手法の変動要因参照型 CoBRA 法が、見積り対象プロジェクトの見積り作成において、PM 間の見積り結果のばらつきを押さえる効果を実証した。コンカレント型車載組込みソフトウェア開発プロセスでは、複数フェーズ間で一部タスクを平行処理する。そのため、以前のプロセスに比べ、プロジェクトの工数見積りの難易度が高くなる可能性がある。新見積り手法の「変動要因参照型 CoBRA 法」は、この短所を補強することを示した。

5. 各章の要旨

第1章 問題の背景と研究対象領域

本章では、問題の背景、研究の目的と方法、研究対象領域、既存研究および既存事例、関連する規格、本論文の構成と発表論文について述べる。まず、自動車開発の現状について確認し、次に本論文の研究目的と研究の方法を示し、研究の対象領域である車載組込みソフトウェア開発の基本的な性質について論述する。続けて、関連する約50の既存研究と既存事例について整理・分析を行い、問題点の指摘と評価を行う。1章の最後では論文全体の構成と関連する既発表論文について記す。

第2章 問題提起

本章では、対象領域の特徴と現状の課題について示す。車載組込みソフトウェア開発の負担増加問題では、主な原因として、自動車のエレクトロニクス化と車載組込みソフトウェアの肥大化、開発期間短縮とソフトウェア開発の負担増加について述べる。そして、その問題の影響と考えられる車載組込みソフトウェアの品質低下問題では、急増する自動車のリコール問題と要因について述べる。次に、それら問題に対する既存の対応策として、自動車業界全体での標準化の取り組み、企業内での標準化と再利用化の取り組み、車載組込ソフトウェア開発におけるモデルベース開発の取り組みについて述べる。しかし、これら既存の対応策を施しても今なお解決が必要な課題として、車載組込みソフトウェアの品質低下問題、継続的な自動車開発短縮と組込み

ソフトウェア開発への負担増加，商品性向上を目的とした仕様変更増加への対応遅れについて述べる．最後に，それら現状をもとに，本論文のリサーチクエッションを示して，問題提起する．

第3章 コンカレント型車載組込みソフトウェア開発プロセス

本章では，対象領域の課題を解決する新プロセスを提示する．まず，現状把握のために，自動車開発の仕様管理方法と組込みソフトウェア開発プロセスについて詳しく述べ，一般的な車載組込みソフトウェア開発プロセスを TIV モデルとしてまとめる．次に，プロセス改善のために適用するソフトウェア・クリーンルーム理論，クラインのチェーン・リンクド・モデル，エクストリームプログラミングの詳細を示し，その改善のポイントを述べる．その後，日本の自動車開発の開発期間短縮要求と早期の統合テスト実施要求への対応を目指し，本論文が新たに定義するコンカレント型組込みソフトウェア開発プロセスの CLIV モデルとしてまとめ，その詳細を述べる．CLIV を以下に示す．CLIV は，以前のプロセスに比べ，工数見積りの精度要求が高くなる可能性が見えてきた．この要求に対し，本論文では，見積り手順の簡易化が必要との立場に立ち，本論文が定義する「コンカレント型車載組込みソフトウェア開発プロセス」の理論とモデルの補強を目的とし，プロジェクト工数見積りの見積り精度を高める改良型手法の「変動要因参照型 CoBRA 法」の理論構築を行い，その詳細を述べる．

第4章 実施例と評価

本章では，適用事例として AMRD 社のケースを取り上げる．AMRD 社は，関東を拠点に，日本の自動車メーカー三社の一次サプライヤーとして業務活動を行う外資系自動車部品メーカーである．最初に，コンカレント型車載組込みソフトウェア開発プロセスの有用性を評価するために CLIV の実施例とその評価を示した．CLIV の実施例では，6年間の30プロジェクト（16プロジェクトが従来型，14プロジェクトが CLIV）のデータを解析し，CLIV モデルの有効性を定量的に検証した．次に，見積り手法改善の有用性を評価するために変動要因参照型 CoBRA 法の実施例とその評価を示した．14名のプロジェクトマネージャの3プロジェクト（適用企業における大規模，中規模，小規模の3プロジェクト）における新規工数見積もりを実施を行い，その有効性を定量的に検証している．

第5章 結論

本章は、論文の成果と結論、そして、今後の課題を示す。まず、論文の成果と結論であるが、本論文のリサーチクエスチョンに対し、本論文では、日本の自動車部品開発の車載組込みソフトウェア開発という領域において、継続的な開発期間短縮要請と品質低下問題を統合的に扱い、それら要求を高次元でバランスし解決するコンカレント型ソフトウェア開発プロセスという新しい方法論を提示し、その有効性を示した。

次に、本論文で用いた理論、手法、モデル、本論文が提示する理論とモデルの関連性をプロセス・フローとしてまとめた。

今後の課題であるが、「実証研究の深化の可能性」、「理論的な発展可能性」、「他の産業への適用可能性」の3つの方向性を示し結びとした。

審査の結果の要旨

1. 論文の背景と着眼点

本論文は、車載組込みソフトウェア開発を対象領域とし、その領域におけるプロセス改善とプロジェクトマネジメントの二つの側面について取り組んだ研究に関するものである。工学的なモデルと手法を案出し、同時に、その経営管理上の意義に取り組むという背景の、学術的貢献を意図した実践的研究である。

本論文では、研究対象が持つ課題を統合的に解決するために、ユニット単位のテストと統合テストの順序を変更し、並列性・コンカレント化を与えることに注目する、ユニークな着眼から出発している。その着眼点に基づいてシステム化し、その管理方法を構築し、実務に適用し、その効果を分析し、これらによって一連の手法を理論化しようというねらいによっている。

2. 論文の構成と概要

本研究は、文献サーベイ、モデル構築、適用事例研究から構成されている。それを、次の5章から成る論文としてまとめている。

第1章 研究の対象領域と問題の背景

第2章 問題提起

第3章 コンカレント型組込みソフトウェア開発プロセス

第4章 実施例と評価

第5章 結論

第1章では、本研究の目的と、問題の背景について述べている。日本の自動車開発における品質低下問題解決を目的とし、その問題点の主要原因の背景分析とその解決の方向を、約50の先行研究の整理・分析を含めて示し、実証的に研究することを記している。

第2章では、まず、自動車の品質問題は端的にリコール数とその要因という形で現れ、その原因として担当者の業務過多による疲弊があり、その根本的な課題として、組込みソフトウェアの肥大化と開発期間短縮の要求とそれによる品質低下があることを示した。そこで、「開発期間短縮要求への対応」と「品質低下問題の解決」という問題を提起した。これら2点の解決のために、コンカレント化を基本原理とした工学的な方法論の開発とそれによる品質維持の追求を研究の主題とした。

第3章では、第2章で提起された問題に対して、プロセス改善の観点から、早期の統合テスト実施要求に対応すること、次の反復プロセスを早期に開始すること、統合テスト後の改善時間を長く確保できることを要件として、ソフトウェア・クリーンルーム理論、クラインのチェーンリンクドモデル、エクストリームプログラミング理論をそれぞれ背景として、コンカレント化原理に基づく CLIV と称するモデルを構築し、これに関わる本論文の中核をなす理論形成を述べている。CLIV モデル (Chain Linked Iterative V Model) の確立にあたっては、当該領域に絞った先行理論のレビューを行い、自論の有効性・有用性・新規性を確認している。さらに、実際のプロジェクトに適用し、実測データを得て、それに対する統計的検証を行う方針を定めた。CLIV モデルによるプロセスに従来型の工数見積もり法を適用すると、難易度が高くなる可能性が浮かび、CLIV モデルに最適化した工数見積もり手法の開発へと進み、CoBRA 法の改良に着目し、変動要因参照型 CoBRA 法と呼ぶ手法を案出し、その実現の仕組みとその評価方法について、次に論述した。それらの適用の実際については次章に詳細が述べられる。ここで構築された理論の適用によって、本研究の主眼であるプロセス変更の柔軟性と製品品質への影響について成果が期待できることを明らかにしようとしている。

第4章では、CLIV モデルの有効性を検証するために、ある自動車メーカーでの、6年間の実30プロジェクト（うち16プロジェクトが従来型、14プロジェクトが CLIV）のデータを解析し、CLIV モデルの有効性を定量的に検証している。また、変動要因参照型 CoBRA 法に関して、3プロジェクトにおける新規工数見積もりの実施を行っ

て、その有効性を定量的に検証している。

第5章では、結論として、本研究の成果であるコンカレント化のための、CLIV モデルならびに変動要因参照型 CoBRA 法の効果について総括し、この成果をもとに、今後の課題と展望についてまとめている。

3. 論文の成果と評価

本研究は、車載組込みソフトウェア開発を対象に、工学的的方法論と経営管理上の方法論が交差するこの対象領域において、実務上の要請を分析し、開発期間短縮要請と品質低下問題という課題が根本課題であることを指摘し、これらを統合して扱い、解決しようとし、それに成果をあげている。ソフトウェア開発上の実務的・工学的効果を意図して開発プロセスの改善を提示し、その効果をあげている。あわせて、従来の工数見積り手法を改善し、複数組織から構成される製造プロセスを持つ開発プロジェクトのプロジェクトマネジメントの改善の効果を、社会科学的な統計的定量分析によって示している。

まず総論として、開発期間短縮要請と品質低下問題を同時に解決するために、それらを統合的に扱い、同時に解決するコンカレント型ソフトウェア開発プロセスを案出し、その構成方法を示し、実際に適用し、評価した。このことは、ソフトウェア工学に貢献するものである。また、それに加えて、そのプロセスによる製造工程についての工数見積り手法を開発し、一連の製造プロセスのプロジェクトマネジメントに関して統計的分析を行っていることは、経営管理分野における実証研究として貢献するものでもある。したがって、本研究は、CLIV モデルと変動要因参照型 CoBRA 法の二つによって、ソフトウェア工学ならびに開発プロセスに関する経営管理上の研究に貢献しており、その当初の目的の複合分野において、その通りに研究がなされ、それぞれ成果を導いているスケールの大きさのある研究である。このことは、プロジェクトマネジメント学会での発表からはじめ、情報処理学会の当該分野のシンポジウムにおいて全文審査の上で、その基本的な開発プロセスモデルの発表が選ばれ、IEEE 関連国際会議および経営マネジメント学会での発表、そして、情報ディレクトリ学会での研究論文が採択された過程にも認めることができる。

次に、成果の各論に移る。

第一に、背景として、自動車業界における、自動車開発手法とサプライヤー組織構造とその歴史的背景を示し、次に、車載ソフトウェア開発プロジェクトにおける開発

プロセスとプロジェクトマネジメントの変遷とそこでの課題を指摘した。

第二に、問題提起として、継続的な開発期間短縮要請と品質低下問題を根本課題として定義した。そして、その問題を取り巻く要因について定性分析し、主な要因は車載ソフトウェア開発プロセスそのものとその周辺環境にあるとの認識を指摘した。

第三に、車載ソフトウェア開発の現況を整理し、顧客要求機能に関する仕様分解・統合工程とVモデルの結びつきを明確に示し、既存のVモデルでの、プロセス反復繰り返しでの課題、統合テスト後のソフトウェア修正時間確保が困難である課題の2つを示した。この観察に基づき、それら課題を解決するモデルとして、コンカレント型プロセスのCLIVモデルを構築した。CLIVモデルは、統合テストをテスト前段で行う改良が施されており、この改善が、既存理論からの発展の突破口となった。

第四に、自動車開発におけるソフトウェア開発プロセスの詳細なメカニズムを分析し、複数部品で実現する車両レベルでの機能評価プロセスを示し、顧客要求仕様と車載ソフトウェア開発プロセスとの関連性を活かすように統合テストを改良した。また、時間短縮効果を示した。CLIVモデルは、プロセス反復繰り返しに時間を要する課題、統合テスト後のソフトウェア修正時間確保の課題を解決するプロセスであることをメカニズムと共に示した。

第五に、実際の開発にCLIVモデルを適用し、複数年に渡りその効果を分析した。その結果、CLIVモデルの導入が、開発期間短縮要請と品質低下問題を同時に解決するモデルであることを実証した。得られたデータに対して、品質については統合テストの欠陥密度・ユニットテストの欠陥密度・出荷後の欠陥密度の3つ、および、生産性、デリバリー、コストを加えて合計6つの従属変数に関する重回帰分析を行い、プロセス改善の効果について、明らかにした。さらに、CLIVモデル導入直後に、一時的に生産性が低下するなどの事象の発生についても触れ、導入時に考慮すべき事項を示した。組織間コミュニケーションの課題としてこれらは将来とりあげるべきことを示した。

そして、第六に、複数フェーズ間で一部タスクを並行処理するコンカレント型プロセスに対して、プロジェクトの工数見積りを最適化するために、新見積り手法として変動要因参照型CoBRA法を構築し、補足分析を行った。この変動要因参照型CoBRA法は、CLIVモデルを導入したプロセスを採用したプロジェクトの見積り作成において、見積り結果のばらつきを押さえる効果を実証した。CLIVモデルの導入障壁を低くすることが出来た。

これらの一連の研究の経過にかかわる成果は、当該分野が今後成熟していく上で、先駆的貢献があるものと評価できる。コンカレント型ソフトウェア開発プロセスの導入は、開発期間短縮への対応と製品品質の向上に貢献する。特に、コンカレント化の具体的な手法とその定量分析手法を示したことは、当該分野の将来に大きな影響を与えるものと推理される。工学と経営管理の共通領域では、その性質上、一般に理念的な側面にとどまりがちであるが、その枠組みを超えて橋渡しをし、プロセス改善と工数見積もりについてのさらなる実践的な枠組みの構築をも行った。定量的分析への道を開き、経営管理上のさらなる貢献も期待できる。実用化に関してはさらに対象の広がりが観察できる。本論文の成果をもとに、一層の研究の深化と継続を期待するものである。

4. 結論

以上の理由から、審査委員会は、氏の博士論文を総合評価した結果、本論文の独創性、新分野への挑戦と新しい知見の創出及びこの分野への貢献を確認し、全員一致して、本論文を優れた学問的業績と判断し、課程博士を申請するに十分な経緯と過程と実績を持つと認める。よって博士（経営管理）の学位を授けるのに値するものと結論する。