

CIRJE-J-1

フロント・ローディング型問題解決による
製品開発期間の短縮

Stefan Thomke
Harvard University

東京大学大学院経済学研究科
藤本隆宏

1998年4月

このディスカッション・ペーパーは、内部での討論に資するための未定稿の段階にある論文草稿である。著者の承諾なしに引用・複写することは差し控えられる。

SHORTENING PRODUCT DEVELOPMENT TIME THROUGH "FRONT-LOADING" PROBLEM-SOLVING

ABSTRACT

Shorter development lead times, other things being equal, contribute to competitive advantages in many of today's industries where market needs and available technologies are difficult to predict, rapidly changing or diversified, where novelty is highly valued in the market, and where competition through new products and technologies are intense. In this paper, we focus on the early identification and solving of design problems - a concept that we define as *front-loading* - as a way to reduce development time. With the aid of a conceptual model and some evidence from automotive development practice, we develop a problem-solving methodology that leverages new technologies and methods such as advanced computer modeling, simulation and rapid prototyping.

フロント・ローディング型問題解決による製品開発期間の短縮

(日本語訳版・草稿)

Stefan Thomke (ハーバード大学助教授) 藤本隆宏 (東京大学助教授)

要約

市場ニーズや技術の予測が難しく、変化が速く多様性が高く、新奇性が高く評価され、また新製品競争、技術競争が激しいような今日の産業の多くにおいては、(他の条件を一定とすれば)製品開発期間の短縮化は、競争優位に貢献する。本論文において、我々は開発期間短縮の一方策として、設計問題の早期特定・早期解決、すなわち我々が「フロント・ローディング」と呼ぶ概念に焦点を当てることにする。概念的なモデルおよび自動車製品開発の実態に関する若干のデータにもとづいて、我々は、先端的コンピュータ・モデリング、シミュレーション、ラピッド・プロトタイプといった新技術・新手法を開発パフォーマンスに結びつける方法を考えていくことにする。(キーワード - 早期問題解決、フロント・ローディング、製品開発プロセス、設計技術)

1. はじめに

多くの企業、とりわけ時間が製品開発の正否を左右する要因となるような競争の激しい産業においては、開発期間の短縮が明確な目標として位置づけられるようになってきた。多くの既存文献が、開発期間短縮の重要性を指摘している。例えば、時間の戦略的価値 (Stalk and Hout, 1990)、期間短縮のための手法・テクニック (Smith and Reinertsen, 1998, Wheelwright & Clark, 1992) などについてである。

期間短縮の方法としては、開発要員を増やすこと (Brooks, 1982)、クリティカル・パスの発見と対策集中、開発ステージのオーバーラップ化 (Clark and Fujimoto, 1991, Krishnan and Eppinger, 1997, Terwiesch and Lorch, 1996)、コンカレント・エンジニアリング (Clausing, 1993)、共用部品・共用プラットフォームの利用 (Clark and Fujimoto 1991, Nobeoka and Cusumano 1995, Meyer and Lehnerd 1997) などが挙げられる。

とはいえ、これらの中で、近年製品開発の基本的な活動として注目されつつある「問題解決」というパースペクティブを採用したものは少い。しかしながら、実際の製品開発プロジェクトの担当者は、通常、どうやったら問題発見ができるか、ということに大変気をつけている。問題解決は、開発プロジェクトが進行し、資金が投下されていくにつれて、コストも時間もかかるものとなっていくからである。コンピュータ支援エンジニアリング (CAE) やラピッド・プロトタイプなど、問題解決の迅速化を助ける新しい技術が登場するにつれて、開発に取り組む実務家が開発プロセスを改変して、問題発見・問題解決を時間軸に沿って「前出し」するのは自然なことともいえる。本論文で、我々は簡単な概念モデルと開発プロセスに関する実態資料を示すことにより、急速に脚光をあびつつあるこうした開発手法のコンセプトの背後にある基本原則を浮き彫りにしようとする。

我々の議論は、製品開発に関する「問題解決パースペクティブ」に基づいている。我々

は、製品開発プロジェクトを、相互に連結した問題解決サイクルの束として記述・分析する。個々のサイクルには、コンピュータあるいは実物試作車に関するモデル作りや試験評価が中核的活動として含まれる。このパースペクティブからみれば、迅速で効率的な製品開発とは、「所与の開発タスクに結びついた問題発見・問題解決を早期に行うこと」に他ならない。実際に「フロント・ローディング」的要素は数多くの産業で観察されているのだが、ここでは、現在この手法が開発プロセス変革および期間の短縮に活用されつつある分野として、自動車産業の事例を紹介することにする。我々の実証データはケース・スタディにもとづくものだが、開発活動改善にとって重要な方法が出現しつつあることを指摘するには十分と考える。

本論文の構成は以下の通りである。まず第2節では、開発期間短縮のもたらす効用について簡単に論じる。第3節では、製品開発に関する問題解決パースペクティブを示し、これを自動車開発の事例に適用してみる。第4節では、フロント・ローディングの基本原則を説明し、産業界での事例を紹介し、次に第5節でトヨタ自動車におけるフロント・ローディングの事例を示す。第6節では、結論として、実務家および研究者にとっての意義を論じることにする。

2. 開発期間短縮の競争力促進効果

開発期間の短縮は、（他の条件を一定とすれば）、市場ニーズや技術が予想しにくく、変化が激しく、あるいは多様化しているような産業、あるいは製品の新奇性を顧客が重視するような産業、新製品や技術を通じた競争が激しい、今日多くみられるような産業において、競争優位に貢献する。

迅速な開発は、直接的・間接的な競争力効果を持つ。まず、開発期間の短縮化は、次のような形で直接的に新製品開発の成功をもたらす：（i）市場の成長率が高く、また市場ニーズや技術の変化が激しいために製品の寿命が短いような状況では、発売時期を早めることに

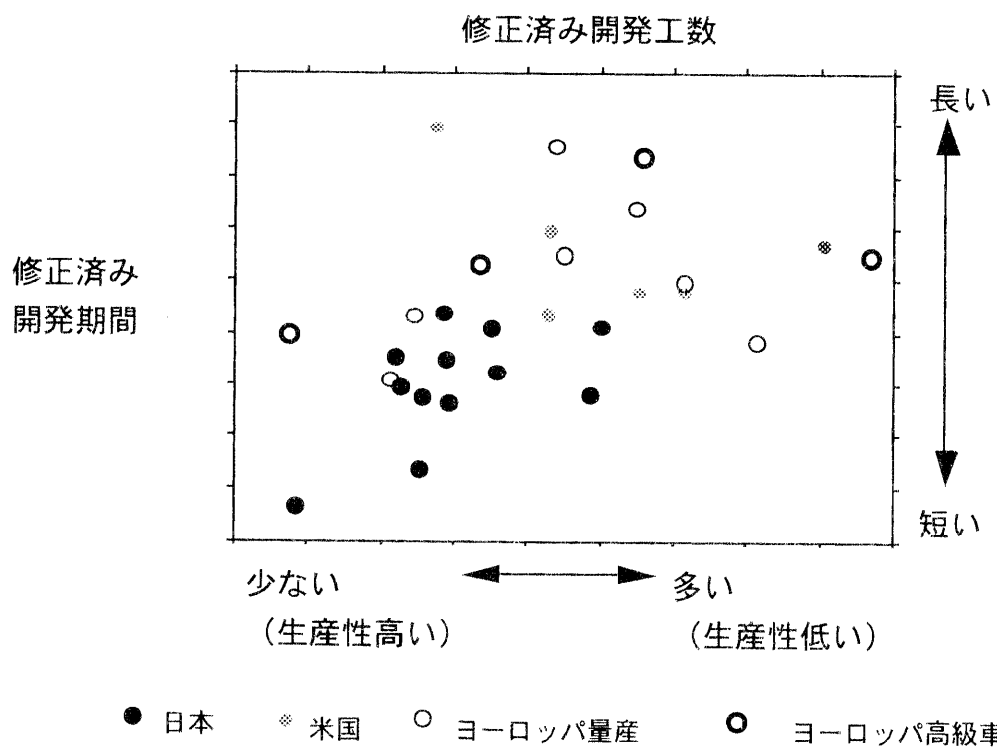
よって追加的な利益を得ることができる (Reinertsen 1983)^{注1} ; (ii) 新製品を最初に市場導入できた企業は、消費者がその新しさに対して高いお金を払う気がある場合、その分の独占レント (地代) を享受することができる (Kamien and Schwarz, 1982) ; (iii) 開発期間が短縮化できれば、新製品のプランナーはそれだけ、将来の市場ニーズを正確に予測して製品コンセプトを創出することができるようになる (Wheelwright and Clark, 1992) 。つまり、他の条件を一定とすれば、コンセプト決定から発売までの期間を短縮化できれば、市場ニーズの予測精度が高まり、ニーズに適合した製品コンセプトが作りやすくなるのだ。

開発期間の短縮はまた、組織能力の向上ということを媒介として、深い意味で間接的な競争力効果をもたらす。第一に、開発担当者は往々にして開発期間と開発コストとの間にトレード・オフ関係があると暗に仮定しがちだが、最近のいくつかの実証研究によれば、まさにその逆の結果になっている。例えば自動車の製品開発に関する国際比較研究によれば、開発期間短縮をもたらすような組織能力は、また開発効率の向上 (開発コストの低減) にも資するところがあったのである (Clark and Fujimoto, 1991 ; 図1参照) 。第二に、迅速な製品開発は、より効果的な組織学習を可能にする。なぜなら、開発管理のアクションに対するフィードバックが迅速かつ明瞭になり (Senge, 1990) 、また業界でベストとされるやり方や環境の変化に対してより迅速に適応できるようになるからである。

もちろん、開発スピードが速くなることに伴うリスクもある。開発スピードばかりにあまりこだわりすぎると、開発担当者が製品品質をないがしろにする結果にもなりかねない。また、企業が開発期間の短縮を利用して新製品の投入頻度を高め、製品寿命を短くしすぎれば、将来の累計の売上高がかえって減少してしまうかもしれない。

^{注1} Reinertsen(1983)は、有名な論文の中で、開発スピードの重要性を論証している。製品開発と商業化に関するごく簡単な経済モデルを使って、彼は、高成長市場か低成長市場かにかかわらず、開発コストが50%オーバーしても税引前利益の減少は4%未満であることを見出した。しかし、市場の高成長と製品寿命の短さを仮定した場合、驚くべきことに、新製品出荷開始が6ヶ月遅れることによって累計の利益は33%も減少してしまうのである。一方、このようなことは、低成長・長製品寿命の市場では起こらない。同様の発売遅れがこの場合には7%の利益減少しかもたらさないのである。

図1. プロジェクト内容修正済の開発パフォーマンス（開発期間と工数）：
1980年代のデータ（Clark & Fujimoto, 1991より）



注：製品の複雑さなどに関して原データを補正するため、各プロジェクトに関して回帰分析モデルの残差項をとり、水平方向は1区間50万人・時、垂直方向は1区間5ヶ月として表示した。

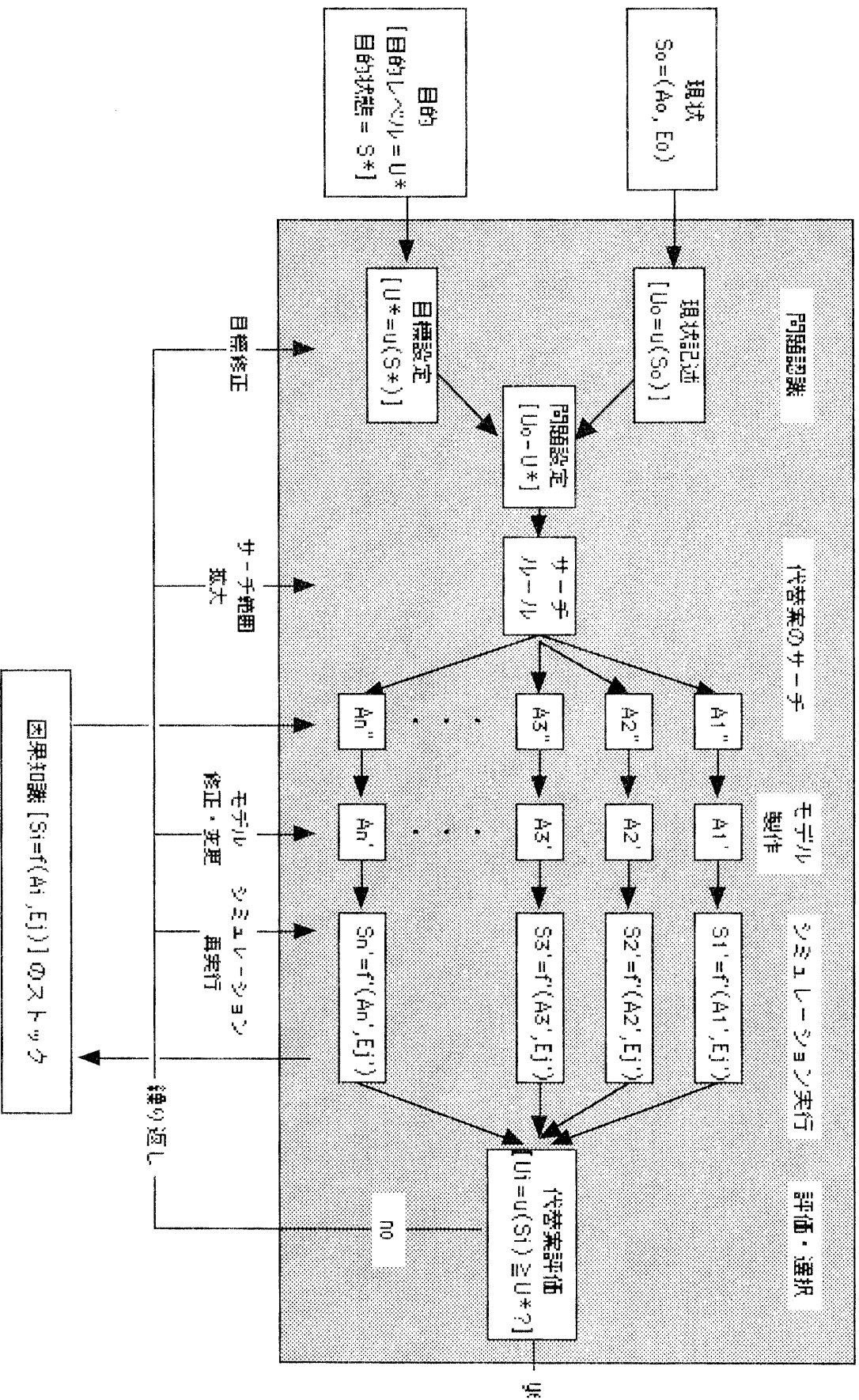
資料：Clark and Fujimoto, Product Development Performance. 1991.

3. 製品開発における問題解決パースペクティブ

イノベーション管理やR&D管理の初期の文献には、基本的な設計活動を「問題解決」とみなすものが少なくなかったが (Marples, 1961, Allen, 1966, Simon, 1981)、新製品開発に関する研究で「問題解決」が議論されるようになったのは比較的近年のことである

(Clark and Fujimoto 1988, Wheelwright and Clark 1992, Krishnan and Eppinger 1997, Thomke 1997, 1998)。我々は、問題解決を、その背後にある因果関係に関する知識によって導かれた試行錯誤や実験が推進する、ある種のくり返しプロセスだとみる (図2参照)。

図2 標準的な(H.Simon型の)問題解決サイクル



資料：藤本[1993]を修正。図中において、U=効用、S=状態、A=人工物、E=環境、f=因果関係、を表わす。

問題解決は、問題の認知と目標設定に始まり、代替案の検索（サーチ）、さらにそれらの設計（ステップ1）・試作（ステップ2）を含む4ステップのサイクルである。しかし、これらの代替案の中に最適のものが含まれている保障はないし、それを知る手だてもない。そこで、ステップ3（実験の実施）で、所与の要件と制約条件を前提としてそれぞれの代替案が実験される。実験の結果はステップ4（実験結果の分析・評価）で分析され、その結果を用いて暫定的な解の改訂・熟成が行われ、結果が合格となるまでこれがくり返される^{注2}。

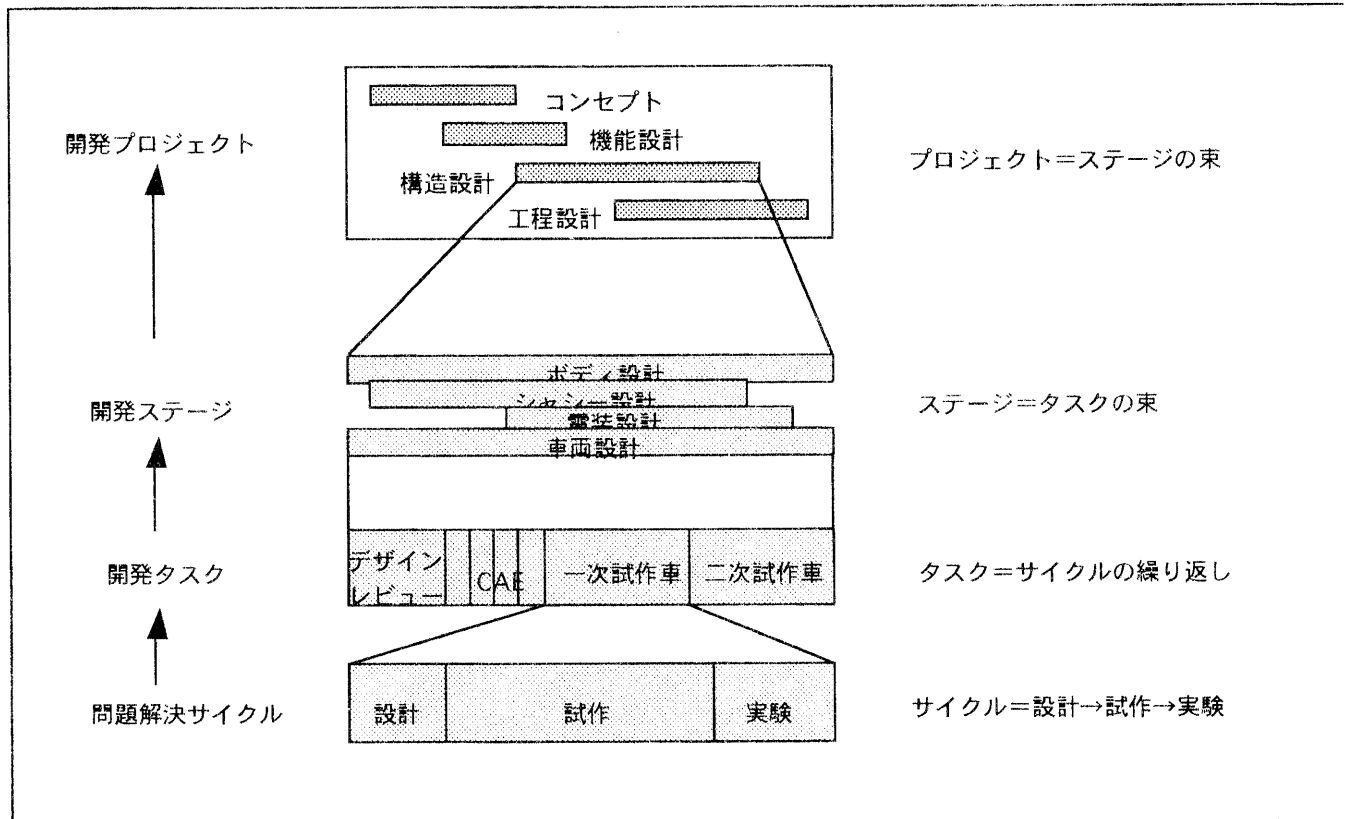
例えば、技術者は、より展開性能のよい新型エアバッグの設計を思い立つかもしれない（ステップ1）。そして、その主な要素を折り込んだ試作品を作り、またその展開性能をテストするのに必要な専用器具なども製作する（ステップ2）。次に実際の展開スピードを測定するため実験を行なう（ステップ3）。最後に実験結果を分析する（ステップ4）。もしもこの最初の実験で満足な結果が出れば、ステップ4までで終了となる。しかし、たいていの場合、分析をしてみると1回目の実験の結果は目標を満たさないものであり、その場合は実験を修正して「やり直し」を行う必要がある。こうした修正は、実験方法のデザイン、実験の条件、実験状況の現実適合性(fidelity)、望ましい解決案の内容、等々について行われる。こうした問題解決サイクルが設計者にもたらす新しい情報とは、失敗結果（エラー）を得る前には知らなかった、あるいは予想・予測できなかったような結果の属性のことである。

こうした問題解決パースペクティブを自動車の製品開発に適用してみるならば、1つのプロジェクトは多数の問題解決サイクルの束からなっていることが分かる。そして、各サイクルは設計→試作→実験→分析という活動の連鎖となっている。こうした問題解決サイクルは、設計者一人だけで行うもの（例えば個人ベースの思考実験）かもしれないし、あるいは幾つかの開発部署を巻き込む大きなもの（例えば大きな試作を含むサイクル）かもしれない。いずれにせよ、プロジェクトが進行するにつれて、各設計案が製品機能や部品干渉や製造性に与える影響を実験する際の精度（fidelity）は高まっていく傾向がある（例えば、思考実験→コンピュータ・シミュレーション→実物開発試作→量産試作）。また、問題解決サイ

^{注2} 製品設計・開発プロセスを分析する。これと似たような概念は、従来の研究においても用いられてきた。例えばSimon(1981, 5章)は、設計を「創成-実験(generator-test)のサイクル」として分析した。Clark and FujimotoやWheelwright and Clark(1992, 9章,10章)は、製品開発における問題解決のための分析枠組として「設計-試作-実験(design-build-test)サイクル」を用いた。我々は、この「実験」のステップを実験の実行(run)と実験結果の分析(analyze)およびそこから学習とを、2つのステップとして明示的に分けて考えたのである。

クルは、階層的に構築することができる。問題解決サイクルをくり返すことによって、各部品に関する解を作り出す「タスク」が完了する。そして、そうしたタスクをまとめることによって、開発の主要ステージ（例えば製品エンジニアリングや工程エンジニアリングのステージ）が構成されるのである。

図3：問題解決・サイクル、タスク・ステージとしてみた自動車製品開発



(図式化のため、一部を単純化して記述してある)

4. 「フロント・ローディング」を通じた早期問題解決

効果的な製品開発にとって重要な要素の一つは、試作品（プロトタイプ）を出すタイミングとその精度（fidelity）である。試作品は、設計問題や製造問題の発見・解決ということに関して、統合的な役割を果たす。もしも、試作品のテストが遅すぎると、発見した設計問題等の解決に膨大なコストと時間がかかってしまう。他方、非常に早い段階で精度の低い試作品でテストを行った場合、多くの問題点が見過ごされてしまう恐れがある。とはいえ、早期の問題発見がもたらす便益は非常に大きいと言える。例えば、幾つかの大規模ソフトウェア開発プロジェクトを研究したBoehm（1981）は、ソフトウェアの誤りを修正する（設計変更をする）ための相対的なコストは、そうした修正・変更を行う段階が遅くなるにつれて上昇することを発見した。Boehmによれば、ソフトウェア・スペック作成の早期段階で修正されるソフトウェア要件の間違いは、要件スペックをアップグレードするだけのことで済む。これに対して、非常に後期の「メンテナンス段階」における修正は、はるかに広範なスペック、コード、ユーザーマニュアル、メンテナンスマニュアル、トレーニングマニュアル、そして無論再テストなどを巻き込むことになるのである。平均すれば、メンテナンス段階での変更はスペック段階の変更に比べて、（間接的なオペレーションの問題を勘定に入れなくても）ざっと100倍コストがかかることを彼は見出した。確かに近年は、開発プロセスのフレキシブル化もかなり進展したが（Iansiti, 1997, Thomke, 1997）、問題の発見とそれに対する設計変更が遅れることが、コストや期間に与える影響は、依然として大きいのである。例えば自動車開発の場合も、遅い時期になつての設計変更は数百万ドルのコストと数週間あるいは数ヶ月の遅れを生じることがある。特に、治工具・金型への、後戻りのできぬ投資の増加がこうした影響をもたらすのである。

4.1 フロント・ローディングとは何か？

試作品の製作と試験に要する時間とコストは、問題解決のスピードに影響を与える。例えば、衝突実験のための試作車を製作するには何ヶ月もかかり、したがってその間、衝突安全性に関する問題の発見率は低く抑えられてしまう。しかしながら、試作車製作のコストと所要期間はまた、試作車の精度（fidelity）の関数でもある。精度が低ければ、試作車のコストや製作期間も（他の条件を一定とすれば）小さくなる。したがって、精度の低い試作品では発見できる問題の範囲に限りがあるが、その範囲内の問題は迅速に発見できるのである。効果的な試作車戦略とは、こうした試作車の期間と精度との間の根本的なトレード・オフ関係をよく見極めつつ、所与の精度の試作品のコストや時間を低減してくれるような新技術に投資をしていくことに他ならない。かくして、「フロント・ローディング」とは「設計問題をできるだけ早期に発見・解決することによって総体的な開発期間やコストの低減をめざす戦略」と定義することもできよう。

4.2. 問題解決のフロント・ローディング：用語と簡単なモデル

一般に、問題解決を行うためには、その問題に関連した情報が創出され、利用可能な形にされ、また問題解決を行う者によって認知されねばならない。問題発見プロセスに関する研究によれば、問題に関連した情報は以下の2つの方法のいずれかによって、開発担当者にとって利用可能な形になる：（1）すでに以前のプロジェクトでとてもよく似た問題が発見・解決済である、という意味で、その情報がすでに存在している場合；（2）その情報が、問題解決のやり直しという形で、開発プロセスを通じて新たに創出される場合（von Hippel and Tyre, 1993）。

まず、（1）の「既に存在する問題関連情報」についていえば、当該プロジェクトがスタ

ートする前に問題特定化が可能となるような、ある種のプロセスが確立している必要がある。しかしながら、企業は往々にして、プロジェクトからプロジェクトへの学習や情報移転を軽視する傾向があり、その結果、古い問題が新しいプロジェクトの中で「再発見」されることになりがちである。あるいは単に、開発担当者が大きなプロジェクトの持つ複雑さに対処しきれなくなる、ということもある。つまり、情報はあるのだが、設計問題を引きおこす因果連鎖は微妙なものであることが多く、開発担当者が予想できる範囲を超えてしまうのである。実際、2台の新しい生産機械に関連する27の現場での問題を分析したvon HippelとTyreによれば、機械が故障した後にはじめて見つかった22の問題のうち15は、実は機械の設置以前から存在していた情報を伴っていた。またこの15の問題のうち10は、問題関連情報が設計技術者間で移転されなかった問題であり、残り5つは、設計技術者は確かに情報を入手していたのだが、それをうまく使いこなせなかったケースである。

次に(2)の、問題解決の一環として創出される問題関連情報に関していうと、言うまでもなく、そうした情報はできるだけ早くに創出されることが望ましい。このためには少なくとも、人員やテスト予算を増やして開発プロジェクトの早い段階に配置するための資源を用意する必要がある。ところが、実際にはそのようにはなっていないのが普通である。つまり、プロジェクトが進行するにつれて、資源は徐々に増やされていくため、問題解決やそれに関連する情報創造の方もゆっくりとしか進行しない。このため、問題発見はプロジェクトの遅い段階に押しやられてしまうのである。本論文の目的は、このような状況を反転させ、問題発見と問題解決を「前出し」するための一つのアプローチとして、「フロント・ローディング」を提示することにあるのである。

そこで、フロント・ローディングを簡単なモデルを用いて概念化するため、前述の設計－製作－試験－分析サイクルに従って問題発見・問題解決がくり返され収束に向う、というよ

うな開発プロセスを想定してみよう。まず、一種類の高精度型のプロトタイプしか存在しない、という状況で開発を行うケース（図4の(a)）を考えてみよう。設計問題は、ある一定の速度 a_2 で発見・解決されていくものとする。この速度は、設計—製作—試験—分析サイクルのスピードによって決まってくる。この場合、総開発期間 T を短くするためには、 a_2 を高めること、たとえば試作品製作のスピードアップしかない。しかしながら、もしもこれに比べて精度は低いが問題解決スピード a_1 は高いような第2の試作モードが存在するならば（図4の(b)のケース）、開発担当者はまずそうした低精度型プロトタイプをまず使って、 m_1 のところまでを迅速に問題解決し、次に高精度型プロトタイプに切替えて残りの問題（ m_2 ）を片付けることができる。その効果はとりあえず、図4の (b) で示すように、総開発期間 T の短縮化である。効果的な開発戦略は、それぞれ精度の異なる様々なプロトタイプの数（ミックス）を最適化することによって、総開発期間を最小化するのである。沢山のプロトタイプを作ることに伴うコストとしては、異なるタイプのプロトタイプを開発・使用するコスト（すなわち、仮に1タイプのプロトタイプだけを作ればいいのならば得られるであろうスケール・エコノミー）を考える必要がある。

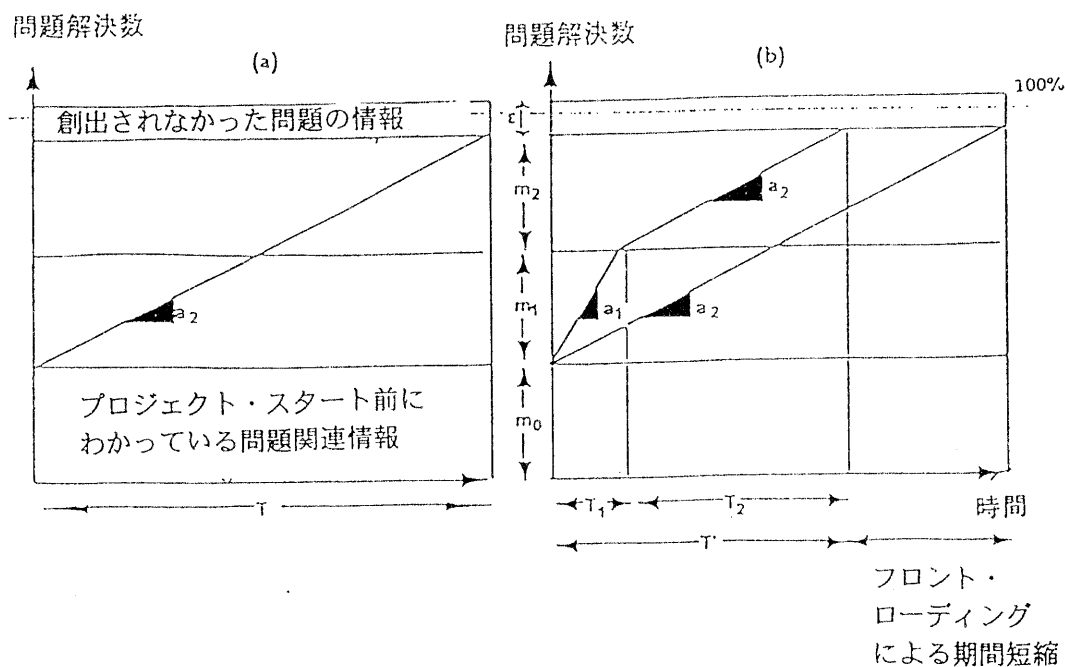


図4. (a) 1タイプのプロトタイプの場合と、(b) 2タイプ並用の場合の比較：

(a)の場合、フロント・ローディング効果が生じるのは、プロジェクト・スタート時に既に解決済みである問題の数 (m_0) が増える場合、あるいはこのプロトタイプによる問題解決スピード (a_2) 自体が上昇する場合、この2つのみである。(b)の場合、精度は低い（したがって m_1 の範囲の問題しか解決できない）が問題解決のスピード (a_1) は速い第2のモードのプロトタイプが存在するため、これを利用して開発期間が短縮できる。いずれにせよ、企業間の知識・情報移転のやり方を改善することによって、プロジェクト開始時に既に情報が利用可能なケースが増える。

コンピュータ・シミュレーション、3次元CAD、ラピッド・プロトタイプなどの先進技術がもたらす可能性というものは、いまや明らかであろう：それらは、実物試作ほどには精度が高くないかもしれないが、それでもかなりの割合の問題を、従来型の高精度型プロトタイプよりはかなり速いスピードで発見・特定できるのである。従来型の実物プロトタイプと組み合わせることによって、こうした新しい技術によるプロトタイプは、問題発見の早期間

を通じて、開発期間の大幅な短縮をもたらすのだ。

4.3 部品干渉問題と性能向上問題のフロント・ローディング：産業界の実例

新しい技術や開発プロセスの改善が問題解決におよぼす影響を明らかにするために、2つの実例を紹介しよう。

4.3.1 デジタル・モックアップによる部品干渉問題の早期発見

3次元空間において異なる部品やサブシステムが同じ座標に居座ると、部品間で押し合いが生じる。つまりフィットしなくなる。「部品干渉」と呼ばれるこうした問題は、複雑な製品をまとめ上げる際にきわめて頻繁に起こる。設計技術者はしばしばこうした部品干渉の問題に気がつかないし、3次元の物体デザインを2次元の図面の組合せとして写し取る、という伝統的なやり方は、部品干渉問題を発見する助けにはあまりならない。3次元空間で潜在的には干渉の可能性のある数百数千の部品がひしめき合うような製品では、設計技術者間の相互調整もあまり役に立たないし、そもそもそうした製品では技術者同志お互いに面識がないということも多い。

ボーイング社が新型の777旅客機を開発した時、同社は問題発見と修正のための新しい開発プロセスも作り出したと言われる (Sabbagh, 1996)^{注3}。彼らの経験によれば、実物試作モデル (モックアップ) の精度を上げていけば、たしかにたいていの設計問題を見つけ出すことはできるが、しかし、すべての問題というわけにはいかず、また、開発プロセスの終わり近くになってようやく見つかる問題も多い。ボーイングの場合、特に部品の相互干渉の問題を心配していた。777のチーフ・エンジニアは次の様に語っている。

^{注3} 以下、ボーイングの開発方式の説明は、777プロジェクトを詳細に説明したSabbagh(1996)による。

「この飛行機を設計するエンジニアは5000人もいます。彼らにとっては、2次元の図面でお互いの調整を行うことはとても難しいのです。例えばエアコンのダクトを設計している技術者が機体の構造を設計している技術者のところにやってきて、『これが私の設計したダクトだけど、そっちの構造とマッチしてますか』というような場合、2次元の図面での相互調整はとても難しいのです。そこで、結局は実物のモックアップをつくるか、あるいは正直なところ最終組立ラインまで使って、調整・統合の詰めを行うのです。これはとても高くつきます。結局、とても作りにくい飛行機を設計することになってしまう。部品がはじめて全部集まるのは組立ラインですが、そこではじめて、部品が互いにフィットしないことが分かる。そこで最初の2、3機にもものすごい金をかけて手直しを行い、部品が相互干渉しないようにするのです (Sabbagh, 1996) 。」

ボーイング社の経営陣は、部品干渉問題の発見・修正を777開発プロジェクトの早い時点で「フロント・ロード」(前出し)できるようなプロセスを望んでいた。そこで彼らは、3次元コンピュータ支援設計(CAD)であるCATIAを活用し、これに、部品干渉チェックのために仮想の「デジタルモックアップ」を組立ててテストすることのできる自社製ソフトウェアを結合したのである。部品間のフィットの問題を見つけるために製作される実物のモックアップの場合と同様、デジタル・モックアップでも、適当なソフトウェアを使えば、コンピュータの仮想環境内で製品を組立て、部品干渉を自動チェックすることができる。こうした干渉チェックが開発過程を通じて何度でもできる、ということだけではない。デジタル・モックアップは技術者が相互にやりとりする方法も変えていったのである。設計技術者は、この新しいコンピュータ技術を使って設計変更し、他の人々に頼る形で変更の追跡調査を行うようになった。ボーイングは、こうした問題解決プロセスに規律を与

え、構造化するために、「設計期間」と「安定化期間」の2つに分割される開発プロセスを制度化した。「設計期間」においては、技術者は設計を変えることができる。「安定化期間」の間は、ソフトウェアが部品干渉をテックし、それが解決するまでは次の「設計期間」に入ることはできない。こうした部品干渉問題が決してささいなことではない、ということ、777の翼のフラップ部分の20部品に対する早期干渉テストをみてもわかる。ソフトウェアは20万7601ヶ所のチェックを行い、その結果251ヶ所の部品干渉を発見したのである。最終組立段階まで行ってからこれらの問題を見つけて修正していたのでは、莫大なコストと時間がかかったはずである。

また、技術者達は、これまでにない効率的なやり方で協働するようになった。例えば、777のエンジニアリング・ディレクターであるAlan Mulallyは、ある機体構造の技術者が油圧機器の技術者を探して建物中を歩き回った時の傑作な話を披露している。この技術者は自分が担当するフロア・ビームにブラケットを付けたいと思ったのだが、彼と油圧設計技術者の間で、どこにどんなサイズのブラケットを付けるか折り合いがつかず、またそれが部品干渉を引き起こすかもわかっていなかったのである。非常に頭に來たその技術者は、Mulallyを呼び止めて「そいつら（油圧技術者）はどんな格好をしているんだ？ポケットにパイプでもついているのか？頭からパイプでもはえているのか？」と聞いたものである。こういった、ちょっと普通でないやりとりがあったのは、コンピュータ・ソフトウェアによる部品干渉テストのおかげで、技術者同志で早くから話し合っただけで部品統合の問題を解決することを余儀なくされるようになったからである。このように、ボーイングは、新しい設計技術と新しい開発プロセスを組み合わせることによって、問題解決をフロント・ロードし、問題の発見・解決にまだそれほどお金も時間もかからない時期にまで「前出し」することができたのである。

4.3.2 シミュレーションによる性能問題の早期発見

問題解決サイクル加速化の一例として、製品開発におけるコンピュータ・シミュレーションの急速な普及について考えてみよう。比較的最近まで、「仮想」実験といえば、思考実験でもできるようなことや、実質的に手計算でもできるようなことに限定されていた。こうした方法では困難あるいは不可能な類の実験は、何らかの現物を使って行われていたのである。しかしながら、汎用コンピュータの急速な発達にともない、コンピュータ・シミュレーションによる問題解決が経済的にも成り立つようなものがどんどん増えてきたのである。

現物試作からコンピュータ・モデル（シミュレーション）に切替えることのメリットは大きい。例えば、実車を使った衝突実験で車体構造を解析するのはお金も時間もかかる。これに対して、バーチャルな衝突実験は、一旦セットアップすれば1回あたり非常に安い追加コストで、条件を変えながら何度でも行うことができる。さらに、実車での衝突実験は非常に速いスピードで起こることを考えてみよう。あまり速いため、高速カメラと精巧な実車および衝突実験用ダミー人形を使ったとしても、実験担当者が細部まで立入って観察することは難しい。これに対して、バーチャルな衝突実験であれば、コンピュータを操作することにより、いくらでもゆっくりと行うことができるし、車のどの部分でも（あるいは部品の細部であっても）細かく見たいところを拡大して見ることができるし、また、衝突中にその部分にかかる力やそれに対する反応を観察することができる。このように、もしもコンピュータ・シミュレーションが正確であれば、それは実験サイクルのコストと時間を低減するだけでなく、分析の深さや質を向上させることも可能にするのだ。そして実際、シミュレーションの精度は今でも幾つかの側面で進化を続けているのである。

自動車製品開発に関する最近の研究で、Thomke(1998)は、衝突安全性という極めて重要な領域で、コンピュータ・シミュレーションがすでに劇的な影響を与えつつあり、他の重要

な領域においても急速な変化をもたらしつつあることを見出した。この研究によると、設計の繰り返しサイクルをスピードアップし、かつコストを低減することによって、開発担当者は繰り返しの頻度を高め、また開発プロセス全体の期間短縮とコスト低減ができるようになった。ドイツのBMWにおける先行開発における、衝突シミュレーションによる91回の設計繰り返しを詳細に調べた結果、開発担当者はサイド方向の衝突安全性を約30%向上させることができたことがわかった。2~3回の実車プロトタイプでの繰り返しでは不可能だったと思われる成果である。

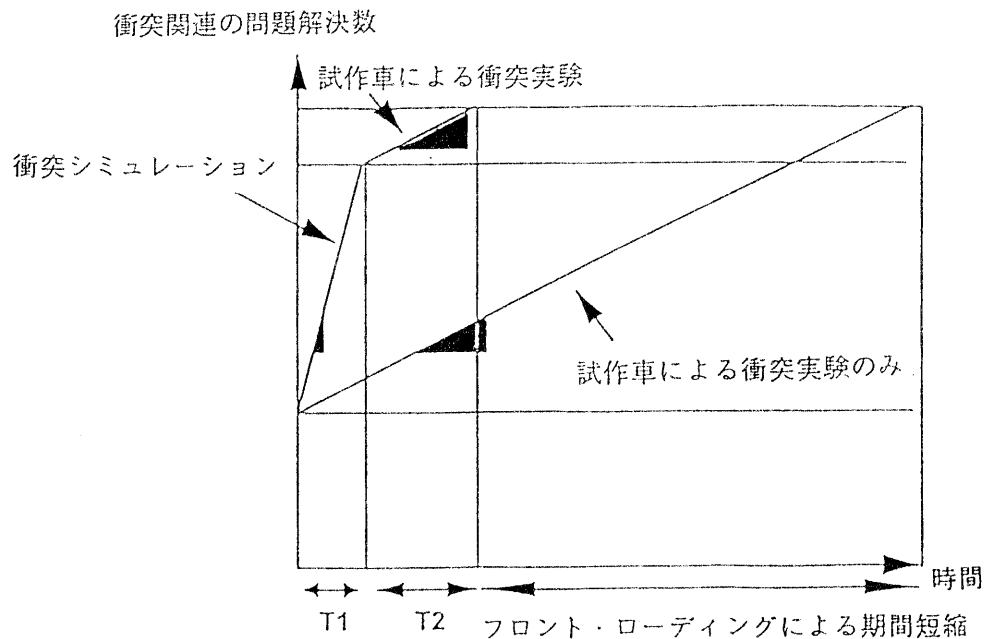


図5.衝突シミュレーションにより、繰り返しがより迅速にできるようになり、このため問題発見・問題解決のスピードが高まる。こうしたシミュレーションと実車プロトタイプによる衝突実験を組み合わせることによって、期間短縮が可能になるのである。

自動車の衝突安全性は重要なことなので、衝突シミュレーションによる設計改善は、91回のシミュレーション完了後に作られた2台の試作車によって検証された。興味深いこと

に、2台の試作車を作り、衝突させ、結果を分析するには数十万ドルのコスト（これに対して衝突シミュレーションは1回2～3000ドル）がかかり、しかもシミュレーションによる先行開発の期間全体よりも長い時間を要したのである。

もちろん、すべての衝突実験がシミュレーションで出来るわけではない。複雑なダイナミックスゆえに、すべての性能上の問題を発見できるためには、非常に精度の高いモデルを作成する必要があるからである。とはいえ、衝突に関連した設計問題のかなりの部分をまずシミュレーションで迅速に片付け、それから実物プロトタイプに切替えるというやり方は、すでにみたような理由で、非常に効率的な戦略だといえるのである（図5を見よ）。

5. 事例研究：トヨタ自動車におけるフロント・ローディング型問題解決

1990年代前半、トヨタ自動車は、他の多くの自動車メーカーと同様に、製品開発をさらに迅速化する努力を強化してきた。同店の目標は、外観デザインの決定・トップ承認から生産開始までの期間を短縮化することにより、新製品コンセプトが急速に変化していく市場ニーズに適応する枠を高めていくことであった。製品コンセプト創出段階から製造部門が開発により積極的に関与するなど、この目標に向けた多くの施策が試みられる中で、トヨタは、開発プロセスの早い段階で設計上の問題を発見する手段として、コンピュータ支援、設計・エンジニアリング（CAD/CAE）およびラピッド・プロトタイプに対してかなり投資を行うことを決定した。こうした開発効率化のための施策は、同社では公式にはSE（サイマルテニアス・エンジニアリング）と呼ばれた。以下に示すデータは、製品開発における問題解決のパターンに関するトヨタ自体の調査の一環として用意されたものである。機密保持の必要上、今回は、同社がある公開フォーラムで発表したデータのみを示すことにしよう。

こうした施策は、外観デザイン承認後の設計がらみの問題発見・問題解決を早期化することを目的としていた。その効果を測定するため、複数のプロジェクトから個々の設計問題に関するデータが収集され、その調査が行われた。その結果、フロント・ローディングの度合いが高まりつつあること、すなわち、CADやCAEやラップド・プロトタイプ、さらに生産技術者の設計活動への早期参加の度合いが高まっていることがわかったのである。

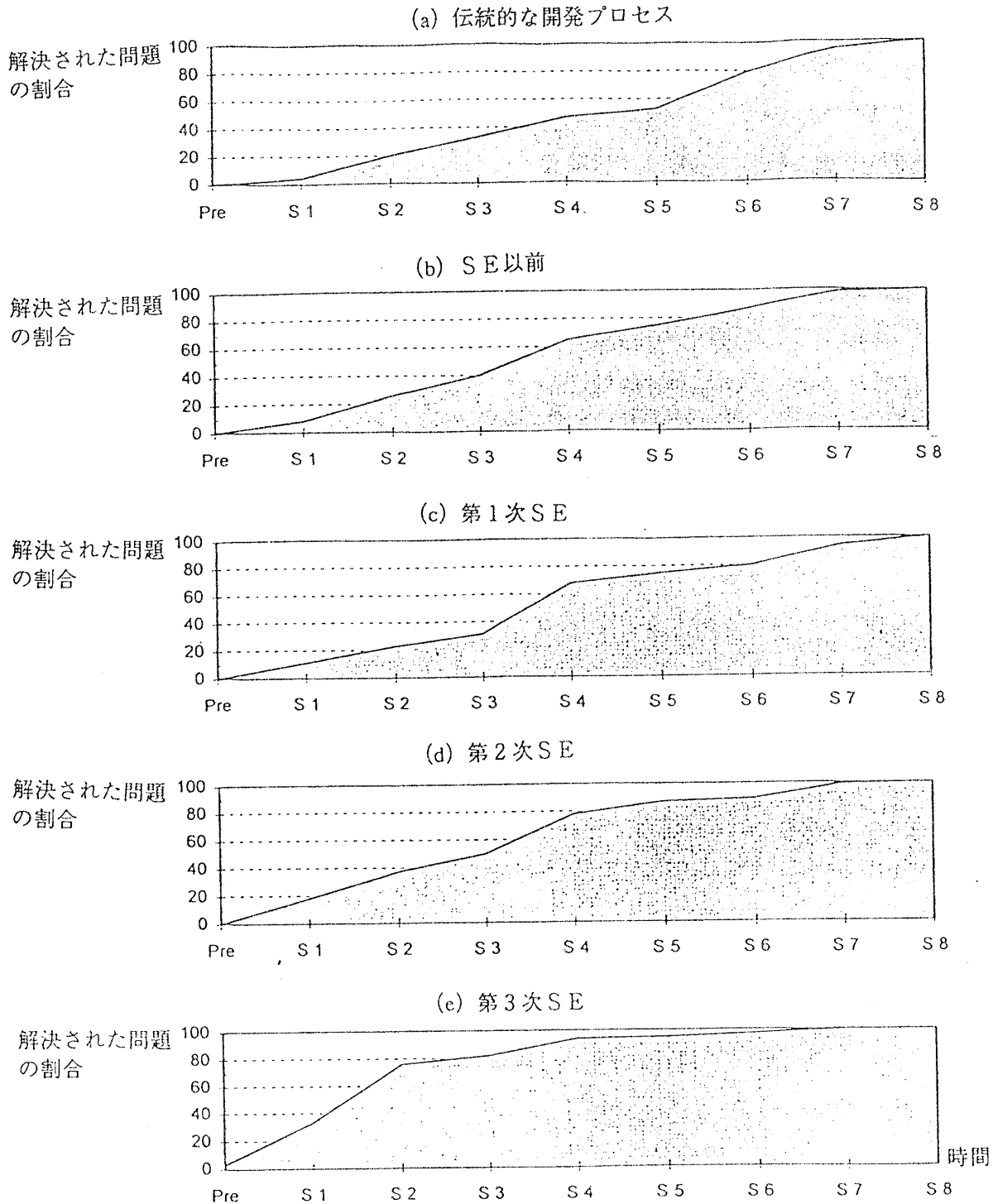


図6. (a) - (e) .製品開発段階別の問題解決軌道（累計曲線）とフロント・ローディング

この社内調査は、主として、生産開始の時期に近づくにつれて解決に要するコストや時間が特におおきくなるタイプの問題、すなわち生産用の治工具等の変更が必要となるようなものに焦点を当てた。ここでの事実発見は、予想された通りのものだった。問題発見・問題解決は、製品開発のずっと早期の段階で行われるようになったのである。

問題発見・問題解決の早期化が実際に開発の効率化や期間短縮につながっているかどうかを確認するため、トヨタは開発コスト、本格開発試作車数、および開発リードタイムを、設計問題の場合と同じ領域で調査した。それによれば、開発コストも試作車数も、フロント・ローディングのレベルが高まるにつれて、大幅に削減されていったのである。

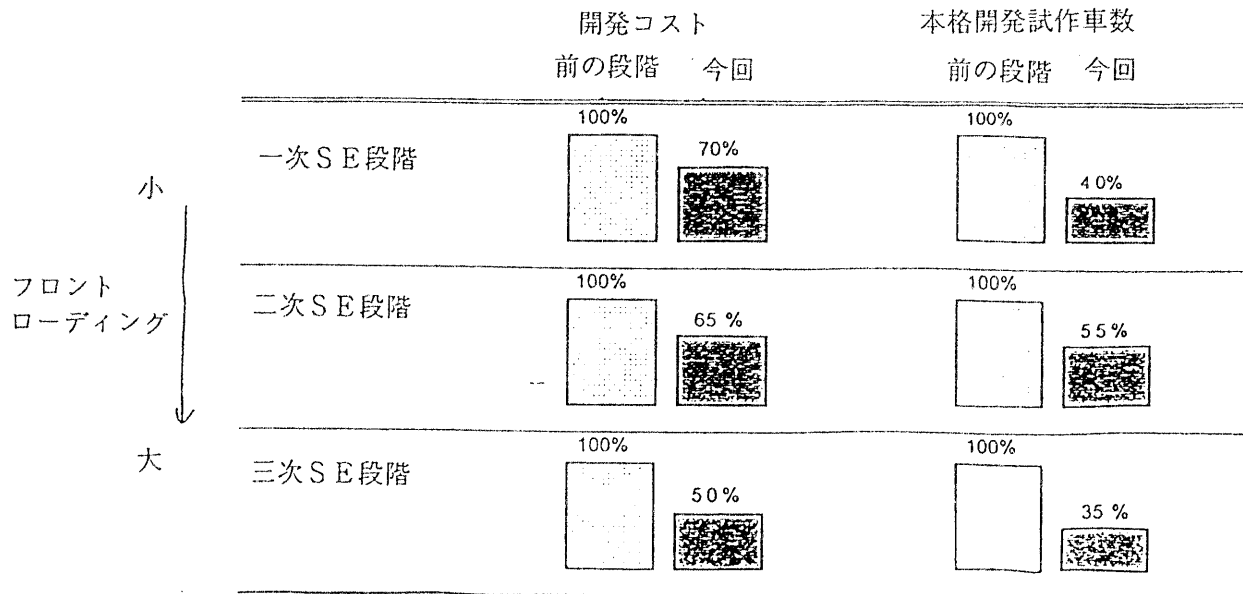


表1. SE活動にともなう開発パフォーマンスの向上

以上のデータは社内調査の結果であり、学術調査としての厳密性が確保されているかどうかは確認できないが、少なくとも、フロント・ローディングが開発期間短縮・効率向上のための重要な手法であることを示す、興味深い実態資料だといえよう。トヨタ自動車によれば、こうした開発パフォーマンス向上は、大部分、効果的かつ早期のコンピュータ活用、およびラピッド・プロトタイプ技術応用の成果である。トヨタの開発担当者は現在、これらの取組から学んだ教訓を他の開発領域にも応用しつつ、コンセプト段階にまで遡った潜在的開発・生産問題の早期発見を徹底することをめざしているのである。

6. ディスカッション

本論文では、製品開発期間を短縮する一方策として、フロント・ローディング型問題解決という方法を探究した。我々は特に、比較的到高スピード・低精度型のシミュレーションを設計－試作－試験－分析サイクルの早い段階に実施することによって、全体のプロジェクト期間が短縮化できる、というようなケースに焦点を当てた。経営者はこうした新技術・新手法の出現にそれとなく気づき、それへの投資を増やしてきたのだが、研究者は、ようやくその基本原理を明確な形で分析しはじめたところである。3次元CAD、先端的CAE、ラピッド・プロトタイプといった新技術の出現により、我々はこのフロント・ローディングという方法が開発期間短縮の重要なルーツだとはっきり認識するようになったのである。

本稿では、まず製品開発を問題解決サイクルの束として表すところから議論をスタートした。この見方から直ちに導かれることは、リードタイムの短縮化のためには問題に関連した情報を早期に創出する必要があること（特に、クリティカル・パス上の活動に関連した問題の場合）である。このような情報は、過去のプロジェクトや、その他すでに存在する製品開発知識のストックから得られることもあるし、またそうした情報が存在しない場合は、新た

な問題解決サイクルを通じて得られることもある。本稿で注目したのは後者のケース、すなわちフロント・ローディング型の問題解決である。簡単な概念モデルと実態調査によって、我々は、早い段階で高速・低精度型のシミュレーション（例えばデジタル・モックアップ）をまず行い、次に従来型の低速型の繰り返しサイクル（例えば現物試作）を行うことによって、全体の開発期間を短縮化できるかもしれないことを示した。

また、フロント・ローディングの成功は、組織能力、例えば迅速な問題解決サイクルを可能とするような統合メカニズムと結びついていることに注目すべきである。コンピュータ・シミュレーションのような新技術は、確かに迅速な問題解決を支援するものであるが、それ自体が製品開発に対する万能薬ではない。例えば、仮に開発担当者がものの2、3日で衝突シミュレーションを完了することができたとしても、組織内での調整のまずさ故に重要な設計上の意思決定が何週間も遅れたとすれば、せっかくの先進技術の効果も、ほとんど追加的価値を生まないことになってしまう。実際、我々の実態調査によれば、開発期間短縮化において世界の最先端レベルにいる企業が、先進技術の利用という点では必ずしも世界最先端ではなかったのである。そうした企業は、知識を統合化し、問題解決サイクルからのフィードバックに迅速に反応するという点において、開発プロセスを最適化することに成功しているのである。往々にして先進技術の導入・普及は組織や組織プロセスの変革よりは早く進む傾向があることを考え合わせるならば、そうした技術のみに頼った競争優位というものは長続きはしない、ということかもしれないのである。

References

- Argyris, C., 1982, *Reasoning, Learning, and Action* (Jossey-Bass Publishers, San Francisco).
- Allen, T.J., 1966, Studies of the problem-solving process in engineering design, *IEEE Transactions on Engineering Management* EM-13, no. 2, 72-83.
- Baba, Y. and K. Nobeoka, 1996, The influence of new 3-D CAD systems on knowledge creation in product development, *Conference on the International Study of Knowledge Creation*, Hawaii.
- Boehm, B., 1981, *Software Engineering Economics* (Prentice Hall, Englewood Cliffs).
- Bohn, R., 1995, Noise and learning in semiconductor manufacturing, *Management Science* 41, 31-42.
- Brooks, F. P., 1982, *The Mythical Man-Month* (Addison-Wesley, Reading, Massachusetts).
- Clark, K. and T. Fujimoto, 1988, Lead time in automobile development: explaining the Japanese advantage, *Working Paper*, Harvard Business School.
- Clark, K. and T. Fujimoto, 1991, *Product Development Performance* (Harvard Business School Press, Boston).
- Clausing, D., 1993, *Total Quality Development* (ASME Press, New York).
- Eisenhardt, K., and B. Tabrizi, 1995, Accelerating adaptive processes: product innovation in the global computer industry, *Administrative Science Quarterly* 40, 84-110.
- Hayes, R., S. Wheelwright and K. Clark, 1988, *Dynamic Manufacturing: Creating the Learning Organization* (The Free Press, New York).
- Iansiti, M., 1997, *Technology Integration: Making Critical Choices in a Turbulent World* (Harvard Business School Press, Boston).
- Jagawa, T., 1995, Frontloading: shortening development time at Toyota through intensive upfront effort, *IBEC 95* (Detroit, Michigan).
- Kamien, M.I. and Schwartz, N.L., 1982, *Market Structure and Innovation* (Cambridge University Press, Cambridge).

- Krishnan, V., S.Eppinger and D. Whitney, 1997, A model-based framework to overlap product development activities, *Management Science*, vol. 43 no. 4.
- Marples, D.L., 1961, The decision of engineering design, *IRE Transactions on Engineering Management* 2, June, 55-71.
- Meyer, M.H. and A. Lehnerd, 1997, *The Power of Product Platforms* (The Free Press, New York).
- Nobeoka, K. and Cusumano, M., 1995, Multiproject strategy, design transfer, and project performance: a survey of automobile development projects in the US and Japan, *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 42 no. 4.
- Petroski, H., 1992, *To Engineer Is Human* (Vintage Books, New York).
- Pisano, G., 1996, *The Development Factory* (Harvard Business School Press, Boston).
- Reinertsen, D., 1983, Whodunit? The search for new-product killers, *Electronic Business*, July, 62-66.
- Sabbagh, K., 1996, *Twenty-First Century Jet: The Making and Marketing of the Boeing 777* (Scribner, New York).
- Senge, P., 1990, *The Fifth Discipline: The Art and Practice of The Learning Organization* (Doubleday, New York).
- Simon, H.A., 1981, *The Sciences of the Artificial, Second Edition* (MIT Press, Cambridge).
- Smith, P. and D. Reinertsen, 1998, *Developing Products in Half the Time: New Rules, New Tools* (Van Nostrand Reinhold, New York).
- Stalk, George Jr. and Thomas Hout, 1990, *Competing Against Time* (The Free Press, New York).
- Terwiesch, C. and C. Loch, 1996, The role of uncertainty reduction in concurrent engineering: an analytical model and an empirical test, Working Paper No. 96/17/TM, INSEAD.
- Thomke, S., 1997a, Managing experimentation in the design of new products, Working Paper No. 96-037, Harvard Business School (in press *Management Science*).

- Thomke, S., 1997b, The role of flexibility in the development of new products: an empirical study, *Research Policy* 26.
- Thomke, S., 1998, Simulation, Learning and R&D Performance: evidence from automotive development, Working Paper No. 97-089, Harvard Business School (in press *Research Policy*).
- Ulrich, K. and S. Eppinger, 1994, *Product Design and Development* (McGraw-Hill, New York).
- Verganti, Robert, 1997, Leveraging on systemic learning to manage the early phase of product innovation projects, *R&D Management*.
- von Hippel, E. and M. Tyre, 1994, How "learning by doing" is done: problem identification in novel process equipment, *Research Policy* 19, 1-12.
- von Braun, Christoph, 1990, The acceleration trap, *Sloan Management Review*, vol. 32 no. 1, 49-58.
- Wheelwright, S. and K. Clark, 1992, *Revolutionizing Product Development* (The Free Press, New York).