

写像経路に着目したソフトウェア開発プロジェクトモデルによる 工数－工期の理論式導出

榮谷昭宏^{†1} 高田眞吾^{†2} 前野隆司^{†3}

本研究では、工数と工期の経験モデルが何故累乗関数で表されるのか、そして、その乗数、指数が何故様々な値を取るのか、理論モデルを用いて明らかにし、理論的に工数と工期の関係式を導出することを目的とする。その理論モデルはプロジェクト内でやり取りされる設計情報の写像経路と、その写像の難しさを変数としたモデルを用いる。本研究の結果、乗数は写像経路数とその写像の難しさに依存した関数で規定され、指数は写像の難しさのみに依存した関数で規定されることが分かった。そして、これらの関数を元に理論的に算出した近似式と、実際のプロジェクトデータとを比較し、本理論モデルが実際のプロジェクトの工数と工期の関係を再現していることを実証検証した。以上により、理論モデルによって、工数と工期の経験式と理論式の整合性を確認し、そのメカニズムを明らかにした。

Theoretical Formula for Man-Hour and Development Time Derived from Project Model Focused on Mapping Paths

AKIHIRO SAKAEDANI^{†1} SHINGO TAKADA^{†2}
 TAKASHI MAENO^{†3}

This research develops the theoretical formula that describes the relationship between man-hour and development schedule. This study theoretically discusses why mathematical model in previous works have exponential relationships, and why their multiplier factor and exponents have various data. Our research theory is based on a project model determined by the number of mapping paths for design information, and difficulty of mapping. We show that the multiplier factor is defined by the number of mapping paths and the difficulty of mapping, and exponent is specified by the difficulty of mapping. We applied our model to actual development data, and found that our model significantly correlates with actual data.

1. はじめに

ソフトウェア開発プロジェクトの工数－工期の関係は、実証データを元にした経験モデルとして、累乗関数で表せることが知られている。しかし、その累乗関数において、乗数、指数は先行研究 [1][2][3][4][5][6][7][8][9][10][11] によって様々である (表 1)。この様々となる理由は、環境差であると言われているが[5][12]、具体的にどのような環境が影響し、乗数・指数を決めるのか、その因果関係は明らかではない。COCOMO[1][2]等では、乗数、指数の決定要因を挙げているが、諸説色々あり[5]、明らかになったとは言いがたい。一方、理論モデルとしては Putnam モデル[13]が有名であるが、プロジェクトの工数や工期に関連した研究は、他に Design Structure Matrix(DSM)[14]を応用した研究[15][16][17][18][19][20][21][22]や、System Dynamics[23]を応用した研究[24][25][26][27][28][29][30][31][32][33]などがある。しかし、それらの理論モデルは経験則にマッチしないなどの問題がある。また、経験モデルを理論的に説明することが出来ていない。つまり、理論モデルと経験モデルの

間で、整合性がとれていない。この問題を解決するには、次の三つの課題を解決する必要がある。

課題 1 として、母集団データを理論的に明らかにすることが必要である。経験モデルは、いくつかのサンプルデータを用いて構築されたが、そもそも、各モデル構築に用いられた各サンプルデータの全てを包含した母集団の分布状態・分布条件は分かっていない。どのような環境下のプロジェクトのデータは、母集団のどこに分布するのかが分からないのである。すなわち、各モデル構築に用いた異なるサンプルデータの条件の違いが明確ではない。

表 1 各経験モデルの乗数・指数

Table 1 Multiplier and Exponent of models

研究事例	乗数	指数	
COCOMO I [1]	Organic	2.5	0.38
	Semi-detached	2.5	0.35
	Embedded	2.5	0.32
COCOMO II [2]	3.67~5.25	0.28~0.34	
C. E. Walston, C. P. Felix [3]	2.47	0.35	
D. Reifer, [4]	Web-based electronic commerce	2.0	(0.32 for larger)
	Financial/trading application	2.2	
	Business-to-business application	1.5	
	Web-based portals	1.8	
Web-based information utilities	2.0		

^{†1} 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
 Graduate School of System Design and Management, Keio University
 NTT コムウェア株式会社
 NTT COMWARE CORPORATION

^{†2} 慶應義塾大学理工学部
 Faculty of Science and Technology, Keio University

^{†3} 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
 Graduate School of System Design and Management, Keio University

従って、そのサンプルデータで構築されたモデルの乗数・指数が異なる理由も、説明することは難しい。

次に課題2として、理論モデルからメタモデル ($y=ax^b$) を導出することが必要である。すなわち、何故、工数-工期の関係式が $y=ax^b$ の形式で、多くのモデルが一致するのか、説明が出来ていないのである[1]。そのため、工数-工期とその決定要因とその関係を、理論的に解明する必要がある。

最後に課題3として、理論モデルから経験モデルを導出することが必要である。Putnam モデル[13]では、1ヶ月かけて行う100人月の仕事を、2ヶ月かけて行った場合、理論的には、6.25人月で済んでしまう。他のモデルに比べて極端であるとの指摘がある[1]。また、Putnam モデルは経験論に対する説明もないとの指摘もある[34]。

以上を踏まえて本研究では、課題1より、工数と工期の母集団データを理論的に明らかにする。次に課題2より、その母集団データから、経験モデルが何故累乗関数 ($y=ax^b$) で表されるのか、また、その乗数、指数が何故様々な値を取るのか、理論的に明らかにする。そして課題3として、導出した理論モデルと経験モデルを比較検証することで、その整合性を確認することを目的とする。

理論モデルはプロジェクト内でやり取りされる設計情報の写像経路と、その写像の難しさを変数としたモデルを用いる。本研究の結果、経験モデルで示された累乗関数の乗数は写像経路とその写像の難しさに依存した関数で規定でき、またその指数は写像の難しさのみに依存した関数で規定できることを示す。そして、これらの関数を元に理論的に導出した近似式と、実際のプロジェクトデータとを比較し、本理論モデルが十分に実際のプロジェクトを説明していることを実証検証する。

本論文の構成は次の通りである。まず2章で写像経路に着目したプロジェクトモデルから、工数-工期の決定要因とその関係を明らかにする。次に3章では理論モデルを構築する。3.1節では、2章で導かれた関係を元に、プロジェクトとして生じ得る工数-工期のデータの母集団を示す。全データの母集団を元に、工数-工期のメタモデルとして、近似曲線 $y=ax^b$ を導出する。そして、近似曲線が $y=ax^b$ の形式となる理由を考察する。更に3.2節では、2章で示した工数-工期の決定要因が近似曲線の各係数 (a,b) へどのような影響を及ぼすのか明らかにし、理論モデルを構築する。その後、4章において、実際のプロジェクトデータと、3章までで導き出した理論モデルによる近似式 (累乗関数) を比較し、本研究で示した理論モデルによって、経験モデルを説明できることを検証する。最後に、5章で、本論文をまとめる。

2. 工数-工期の基礎理論

本章ではまず、先行研究における工数-工期の捉え方を説明し、次に本研究における工数-工期の捉え方を説明する。

2.1 工数-工期の決定要因とその関係

(1) 先行研究における工数と工期の捉え方

先行研究[5]において、多くのコスト要因が紹介されている。これらのコスト要因は、工数や工期に影響し、数学的に捉えるならば、工数や工期は多変数関数 (f_c, f_t) とみなすことができる。ここで、 x_i, y_i はコスト要因とする。

$$\text{工数} = f_c(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots) \quad (1)$$

$$\text{工期} = f_t(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots) \quad (2)$$

上記(1)式から分かる通り、工数は一次関数ではなく、複数の要因の影響を受ける。Boehm[35]がバリュチェーンで示したように、各要素が様々に影響して、“コスト”を構成している。そのため、工数や工期とその決定要因の関係を理解することは難しく、そのコントロールも難しいと考えられている。

(2) 本研究における工数と工期の捉え方・考え方

本研究では、工数-工期を以下のように捉え、その関係を検証する。まず、情報写像モデル[36]では、工数及び、1人あたりの平均作業日数が“複雑性”という変数と関連することを示した (詳細は下記(3)節で述べる)。

$$\text{工数} \propto \text{複雑性} \times \text{要員数} \quad (3)$$

$$1 \text{人あたりの平均作業日数} \propto \text{複雑性} \quad (4)$$

$$\text{複雑性} = \text{写像の難しさの平均} \times \text{全写像経路数} \quad (5)$$

上記をもとに、本研究では1人あたりの平均作業日数と工期の関係を明らかにし、工期が、工数と複雑性の関数 F となっていることを示す。

$$\text{工期} = F(\text{工数}, \text{複雑性}) \quad (6)$$

(3) ソフトウェア開発プロジェクトモデル[36]

本研究で用いるプロジェクトモデル、写像、複雑性などは、我々の過去の研究[36]に基づく。本小節はそれをまとめる。まず、プロジェクトモデルは、公理的設計論[37]に基づく (図1)。これによりソフトウェア開発プロジェクト

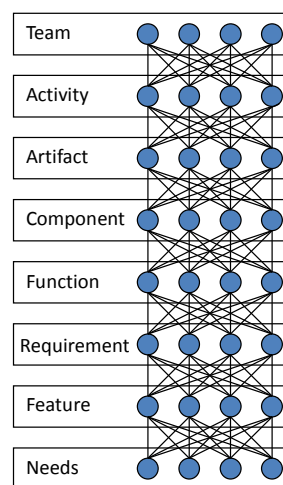
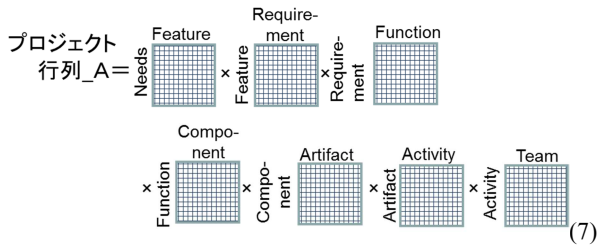


図1 本研究で用いるプロジェクトモデル

Figure 1 Software Development Project Model

内での設計情報の写像過程を表現する。本モデルでは、プロジェクトを構成する要素として、Team, Activity, Artifact, Component, Function, Requirement, Feature, Needs を抽出する (図1の丸印)。また、これら要素間を結んだ線 (図1の実線) は、設計情報の写像経路を示す。設計情報の写像過程において、写像経路が少ない程、作業の生産性は高く、また、プロジェクトを構

成する各要素の処理能力が高い程、生産性が高い。即ち、要素間の相互依存は冗長性が低く、且つ要素自体は写像が容易な特性であることが望ましい。更に、先行研究[36]では、この要素間の関係を7つの行列の積で表現する数学的モデルを示した(式(7))。



このプロジェクト行列 A により写像経路数、写像の難しさを算出する。各要素の持つ写像の難しさを 0.1 から 1.9 までで評価し (1.0 を基準とする)、その相乗平均値を成分値とした各行列の積を行列 A としたとき、プロジェクトの写像の難しさを式(8)で定義した (a_{ij} は行列 A の成分値)。

$$\text{写像の難しさ} = |A| = \Sigma a_{ij} \quad (8)$$

また、ひとつの写像経路は、図 1 に示したように、Team から Needs までの各要素を縦につなげた 1 列である。隣の列の要素と相互依存すること無く、Team, Activity, Artifact という様に、上下に 1 つずつ相互依存する。このような写像経路の数を並行経路数と呼び、

$$\text{並行経路数} = \text{行列 A の次数} \quad (9)$$

と表した。それ以外の写像経路は、

$$\text{冗長な経路数} = |A' - E| = \Sigma |a'_{ij} - e_{ij}| \quad (10)$$

(e_{ij} は単位行列 E の成分値)

として定義した。但し、行列 A' は行列 A の成分値を 0, 又は 1 (要素間の関連があれば 1, 関連がなければ 0) とした行列であり、E は単位行列である。 a'_{ij} は行列 A' の成分値を示す。

これらの写像経路数と写像の難しさという 2 つの変数により、プロジェクトの複雑性を以下の方程式で定義した。但し、式(11)の写像の難しさの平均とは、式(8)を式(9)(10)の合計本数で割った値である。

$$\text{複雑性} = \text{写像の難しさの平均} \times \text{並行経路数} \times \left(1 + \frac{\text{冗長な経路数}}{\text{並行経路数}} \right) \quad (11)$$

$$= \sum_i^{\text{全写像経路数}} \text{写像の難しさ}(i) \quad (12)$$

なお、式(5)は式(11)を変形した結果である。そして、先行研究[36]では、この複雑性をもとに式(3)(4)が成立することを実証的に示している。

2.2 本研究における工数と工期の関係式

工数と工期の関係を前節で説明した先行研究を踏まえて整理する。まず一般的に工数と工期、要員数の関係は以下のように表される。なお、プロジェクトで行われる作業項

目を Work Breakdown Structure (WBS)[38]として記述する。

$$\begin{aligned} \text{工数} &= \text{工期} \times \text{要員数} \\ &= \Sigma \{ \text{WBS}(i) \text{の作業期間} \\ &\quad \times \text{WBS}(i) \text{の要員数} \} \quad (13) \end{aligned}$$

ここで、WBS(i)を写像経路 i の写像作業と捉えたと、式(13)は次のように変形できる。

$$\text{工数} = \Sigma \{ \text{写像経路}(i) \text{の写像期間} \times \text{写像経路}(i) \text{に関わる要員数} \} \quad (14)$$

すなわち、プロジェクトの工数は、ある写像経路 1 本の写像作業を担うサブプロジェクトの工数の総和となる。写像経路 i を担うサブプロジェクトでは、式(12)より、その複雑性は、写像経路 i の写像の難しさで決まる。更に、式(4)より、その複雑性は、1 人あたりの写像経路 i の平均作業日数、すなわち、写像経路 i の写像期間に比例する。従って、式(14)は次のような比例関係で表せる。

$$\text{工数} \propto \Sigma \{ \text{写像経路}(i) \text{の複雑性} \times \text{写像経路}(i) \text{に関わる要員数} \} \quad (15)$$

前述の通り、写像経路 i の複雑性は、式(12)より、写像経路(i)の写像の難しさに等しいので、式(15)は次のように書き換えられる。

$$\text{工数} \propto \Sigma \{ \text{写像経路}(i) \text{の写像の難しさ} \times \text{写像}(i) \text{に関わる要員数} \} \quad (16)$$

写像の難しさを 1 とすれば、ある写像経路に関わる要員数の合計が工数に比例することとなる。

2.3 写像経路数・要員数・工期の組合せの整理

前節を元に、プロジェクトで存在し得る写像経路数、要員数及び工期の組合せを洗い出す。

まず、式(16)を図 2 のようにプロジェクトの各要員の割当先となる要員枠を短辺に取り、各写像作業の工期枠 (写像の難しさの平均値 $k=1$ ヶ月/人とすれば(以降では、写像の難しさは、式(4)における比例係数を含めたものとする)、1 つの工期枠は 1 ヶ月) を長辺に取った長方形のモデルを考える。写像経路 4 本の場合、要員数 2 人、工期 2 ヶ月、すなわち工数は 4 人月でプロジェクトは完遂できる。

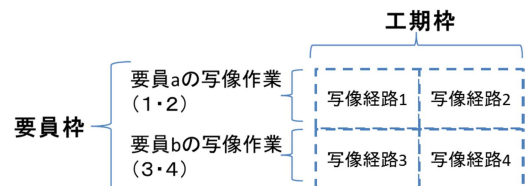


図 2 要員数・工期・写像経路数の図形的解釈

Figure 2 Diagram Analysis for Relation between Mapping Paths and Personnel, Development Schedule

更に写像経路 4 本の場合では、要員数・工期について、図 3 のようなバリエーションが考えられる (図 3 の(3)は、図 2 と同じ)。以下で、そのバリエーションを説明する。

図 3 の(1)(5)は、要員数 1 人で工期 4 ヶ月、要員数 4 人で工期 1 ヶ月、すなわち工数は 4 人月というケースを示して

No.	要員	工期	工数枠	写像経路の割当方と工数
(1)	1人	4ヶ月	工期4ヶ月 要員① 1 2 3 4	4人月 要員① a b c d
(2)	2人	3ヶ月	工期3ヶ月 要員① 1 2 3 要員② 4 5 6	4人月 5人月 6人月 要員① a b c a b c a b c 要員② d d d d b b d b b
(3)	2人	2ヶ月	工期2ヶ月 要員① 1 2 要員② 3 4	4人月 要員① a b 要員② c d
(4)	3人	2ヶ月	工期2ヶ月 要員① 1 4 要員② 2 5 要員③ 3 6	4人月 5人月 6人月 要員① a d a d a d 要員② b b b b b b 要員③ c c c c c b
(5)	4人	1ヶ月	工期1ヶ月 要員① 1 要員② 2 要員③ 3 要員④ 4	4人月 要員① a 要員② b 要員③ c 要員④ d

図3 写像経路4本の時の要員と工期の割当てのバリエーション

Figure 3 In case of 4 Mapping Paths, Variations of Developers and Development time

いる。図3の(2)は、要員数2名で工期3ヶ月というケースを示す。このケースでは、要員の1人は3本の写像作業を行ってしまえば、他の1人は1本の写像作業をするのみでプロジェクトは完遂する(工数は4人月)。また別に、1本の写像作業しか受け持っていない1人の要員に、もう1人の写像作業に加わってもらい、協働で写像作業することも考えられる。従って、写像経路4本を要員数2人で工期3ヶ月対処する場合のプロジェクトでは、工数が4人月、5人月、6人月となるケースが考えられる。上記は、要員3人で工数2ヶ月(図3の(4))も同様である。

以上のように、ある写像経路数に対して、想定される全ての要員数・工期を一覧表に整理する。そして、その写像経路の枠数を数えることで、工数を求める。このような手順で、写像経路数、工期、工数の全ての組合せを洗い出し、プロジェクトの母集団データを整理する(その結果は、3.1節でグラフ化して示す)。なお、上記では $k=1$ を前提とした。 $k \neq 1$ の場合は、式(16)により工期が k 倍(図形の長辺が k 倍)に伸びるが、長方形の枠数の考え方は変わらない。従って、上記の関係式も同様に成立する。

3. 理論モデルの構築

前章の基礎理論を元に、本章では工数工期の母集団データがどのような分布になるのかを明らかにする。それを元に、近似式(メタモデル)を導出する。そして、導出した近似式の累乗関数の乗数と指数の特性を説明する。

3.1 工数-工期の母集団データとその近似曲線

(1) 母集団データとメタモデル

前述の方法により、写像経路1本~10本、15本、20本(写像の難しさは1)の時に取り得る工数と工期を洗い出した。その結果、データの母集団は図4の通りとなり、その近似曲線は累乗関数、 $工期=2.0009 \times 工数^{0.3695}$ となった。

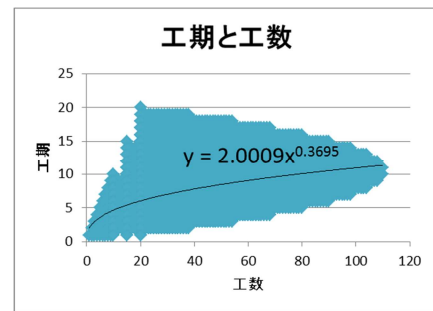


図4 工数-工期の母集団データと近似曲線

Figure 4 Population of Man-Month and Development Time Data along with its Fitted Curve

このように、母集団データによって、累乗関数のメタモデルを導出した。

(2) 累乗関数となる要因

各工数で取り得る開発期間のデータ件数の分布傾向を示す。その傾向から、累乗関数となる理由を説明する。

図5は、図4を輪切りにした状態(各工数単位に、縦軸は開発期間、横軸はデータ数としたグラフ)を示した。そのデータ分布の傾向は以下のようにまとめられる。

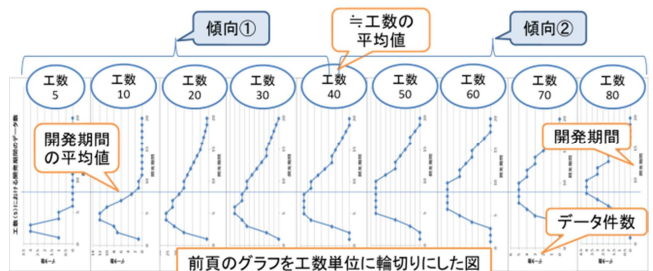


図5 データの分布傾向

Figure 5 Distribution State of Data from Figure 4

傾向①として、工数(5)~平均値(39.7)程度まででは、開発期間の平均値(8.3)よりも小さい値をピークにデータが分布しており、平均値との乖離が大きい。傾向②として、工数の平均値(39.7)を超えたあたりから、ほぼ平均値程度の値をピークとしたデータ分布をしており、平均値との乖離が小さい。このため、各データと平均値との差分に着目する最小2乗法により、母集団の近似曲線を求めると、工数・工期の関係式は、指数が1以下の累乗関数となる。なお、工数=1で工期=0ではないため、対数関数には近似されない。

3.2 メタモデルから理論モデルの導出

次に、メタモデルの性質について述べ、理論モデルを導出する。近似曲線は、プロジェクトの複雑性(写像経路数、1本平均の写像の難しさ)を変化させると、近似曲線も変化する。この性質により、各経験モデルも説明できる。

本節では、工期が下記の式(17)で表される理論モデルとなることを示す。

$$\begin{aligned} \text{工期} &= f(\text{写像経路数}, \text{写像の難しさ}) \times \text{工数}^g (\text{写像経路数}) \\ &= f(\text{複雑性}) \times \text{工数}^g (\text{写像経路数}) \end{aligned} \quad (17)$$

すなわち、経験モデルの各係数は、以下の2つステップで決まる。まずステップ①として、標本データの写像経路数によって、指数が決まる。次にステップ②では、上記①を前提として、標本データの1本平均の写像の難しさの値によって、経験モデルの乗数が決まる。

(1) 写像経路数と乗数・指数の関係

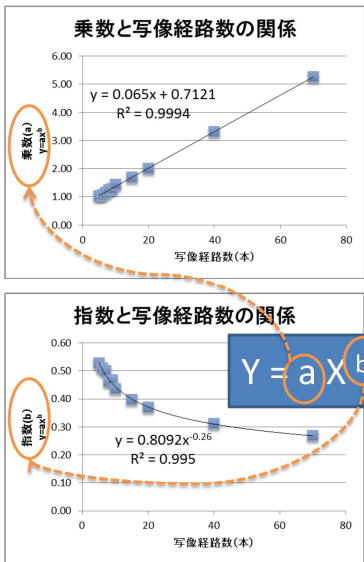


図6 写像経路数と乗数・指数の関係
 Figure 6 Relations between Number of Mapping Paths and Multiplication, Index

係にある。その関係式は、

$$Y = 0.065X + 0.7121 \quad (18)$$

で表される。その R^2 は 0.9994 であり、高い相関関係にあることがわかる。また、近似式の指数は、図6の下図のように写像経路数が増加するに従って、減少する傾向があり、

$$Y = 0.8092X^{0.26} \quad (19)$$

で表される。その R^2 は 0.995 であり、高い相関関係にあることがわかる。

(2) 写像経路数による乗数・指数の変化要因

本節では、写像経路数の増減により、何故、前節のような変化をするのか説明する。図7は、前述の図4を拡大したものである。工数を横軸に、工期（開発期間）を縦軸にとって、グラフ上の四角い点はプロジェクトで取り得る工数・工期のデータである。データを結んだ楕円の曲線はプロジェクトの写像経路数を示している。

すなわち、4本の写像経路を持ったプロジェクトでは、工数が4人月で工期が4ヶ月、または工数が6人月で工期が3ヶ月、工数が6人月で工期が2ヶ月、工数が4人月で工期が1ヶ月というプロジェクトが存在し得ることを示している。但し、この時、写像の難しさは1ヶ月/人である。

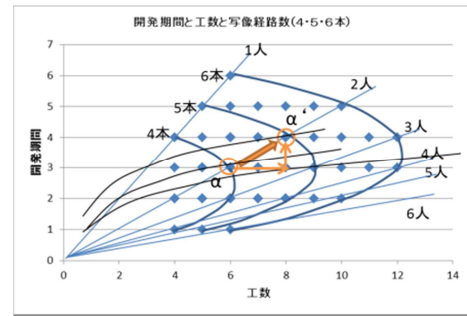


図7 写像経路数と工数・工期の関係 (図4の拡大図)
 Figure 7 Relation between Mapping Paths and Man-months, Development Schedule (Magnified Figure 4)

また、もうひとつデータを結んだ直線は、要員数を表している。すなわち工数4人月で工期4ヶ月ならば要員数は1名、また工数5人月で工期5ヶ月でも同様に要員数1名のプロジェクトである。

このようにグラフを見ると、例えば、工期3ヶ月・工数6人月のプロジェクト(α)に対し、経路を1本追加する。その際、追加した経路の写像作業分、工数が膨らむ。しかし、要員数は変わらない。そのため、α'にデータは移行する。その際、経路数が増加した場合のX軸に対する変化を説明する。経路数が増加することによって、処理すべき写像経路数が増えたために工数が追加が必要となる。そのため、近似曲線はX軸に対して伸びることとなる。即ち、近似曲線の指数が、小さい値に変化する。次に、経路数が増加した場合のY軸に対する変化を説明する。経路数が増加することにより、写像処理を行うための工期が必要となる。従って、元の経路数の時に比べて工期が延長する。即ち、近似曲線の乗数が、大きい値に変化する。

(3) 写像の難しさと乗数・指数の関係

本節では、当初1に固定していた写像の難しさを変化させた場合に、近似曲線の乗数・指数の変化を調査した。

図8より、写像の難しさが増すに従って、乗数は増加するが、指数は一定値を取ることが分かった。写像の難しさに対する乗数の変化は

$$Y = 2.0009 \times X^{0.6305} \quad (20)$$

で表される。その時の R^2 は 1 であり、非常に高い相関関係にあることが分かる。

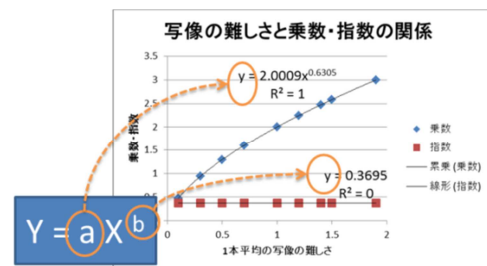


図8 写像の難しさと乗数・指数の関係
 Figure 8 Relation between Difficulty of Mapping Paths and Multiplication, Index

また、写像の難しさに対する指数の変化は

$$Y=0.3695 \quad (21)$$

で表される。R²は0であり、写像の難しさとは全く相関しないことが分かった。但し、本サンプルでは写像経路数=20本のプロジェクトを元にしてしているため、この値となっている。経路数を変えれば、上記式の定数値も変化する。詳細は次節にて説明する。

(4) 写像の難しさによる乗数・指数の変化要因

本節では、写像の難しさの変化が乗数・指数にどのように影響するのか説明する。

写像経路数が変わらないため、プロジェクトモデルの構造も変わらない。しかし、写像の難しさの平均値がk倍になれば、工数と工期はk倍される。従って、データ分布状態は変化しないため、指数は変わらず、乗数のみ変化する。

x人月の工数でyヶ月の写像作業(要員数n人)を行ったとき、乗数aとすると

$$y=a \times x^b \quad (22)$$

k倍された工数=x・k人月の作業では、工期がy・kヵ月となる(プロジェクト構造は変化しないので、要員数はn人のまま)。

$$y \cdot k = a' \times (x \cdot k)^b \quad (23)$$

上記式(23)を(22)で割り、式を整理することにより、

$$a' = a \times k^{1-b} \quad (24)$$

すなわち、20本の経路数における乗数と指数を元の定数、元の指数とすれば、

$$\text{乗数} = \text{元の乗数} \times \text{写像の難しさ}^{(1-\text{元の指数})} \quad (25)$$

として表される。

3.3 モデル粒度の規格化(補正方法)

前節までで説明した理論の正しさを検証するために、実際のプロジェクトデータと比較検証を行う。しかし、実際のプロジェクトデータを用いるためには、1点留意すべき点がある。モデル化の際、それを構成する要素の粒度は規定されていない。従って、同じプロジェクトを異なる粒度でモデル化することもある。その場合、同じプロジェクトでも写像経路数や写像の難しさが異なってしまうため、それらを補正し、規格化する必要がある。

例えば、同じプロジェクトは例えば以下の2つのようにモデル化できる。ひとつは、Team, Needsをそれぞれ1つの要素で、写像経路を1本でモデル化する。また別にTeam, Needsをそれぞれ2つの要素で、写像経路で各要素を全て繋いだ4本の写像経路でモデル化することもできる。もし、この2つのモデルが同一のプロジェクトであるならば、工期は等しくなければならない。そこで、本研究では経路数が1本、すなわちTeam, Activityなど各カテゴリの要素を1つのみのモデルを基準とする。規格化前のモデルの経路数を、この基準に換算して規格化後の経路数を算出する。以下がその算出方法である。

上記の通り、経路数1本の基準モデルは、その要素の関

係を表すプロジェクト行列(式(7))の次数が1次の行列として表現できる。その時、規格化前のモデルの次数n', また、その写像経路数m' とすると、規格化前のモデルのプロジェクト行列はn'次の行列となり、TeamとNeedsの組合せは、基準モデルのn'×n'倍となる。すなわち、n'×n'倍の細かな粒度でモデルが構成されている。従って、以下のような比例関係が成り立つ

$$\begin{aligned} 1 \text{本} : m' \text{本} = 1 \text{次行列の成分数} : n' \text{次行列の成分数} \\ = 1 \times 1 : n' \times n' \end{aligned} \quad (26)$$

式(27)は、以下の換算式が導出できる。

$$m' \div (n' \times n') = 1 \quad (27)$$

写像の難しさについても同様に考え、以下の関係式を導出した。(kは規格化後、k'は規格化前の写像の難しさ)

$$k = k' \times n' \times n' \quad (28)$$

上記の2つの式で規格化されたk, mに換算・補正する。

4. 理論検証

前章で理論的に導いた複雑性と乗数・指数の関係式を、実際のプロジェクトのデータに当てはめ、理論的に近似式を導出する。そして、実際のプロジェクトデータと比較検証を行い、本研究で説明した理論の整合性を確認する。

4.1 プロジェクトの概要

検証にあたっては、ゲームソフトウェア開発プロジェクトの開発データを用いた。対象は21プロジェクトであり、それらの工期・工数・写像経路数・写像の難しさの平均値は表2の通りである。但し、Boehm[1]と同様に、1ヶ月は19日として工数・工期を算出している。また、写像の難しさの平均値は以下のように算出した。

表2 実プロジェクトの検証用データ

Table 2 Data for Validation of Actual Software Development

プロジェクト	Projects			写像の難しさの平均値(①÷②)
	工数(人月)	工期(月)①	全写像経路数②	
1	3.187	0.83	1566	0.000528
2	3.761	0.97	1566	0.000619
3	2.850	0.74	1566	0.000474
4	3.334	0.86	1566	0.000551
5	3.008	0.78	1566	0.000499
6	2.950	0.77	1566	0.000490
7	3.342	0.70	1794	0.000392
8	2.618	0.68	1566	0.000433
9	2.861	0.74	1566	0.000471
10	2.782	0.72	1566	0.000459
11	2.834	0.73	1566	0.000467
12	3.155	0.81	1566	0.000518
13	3.303	0.85	1566	0.000542
14	3.111	0.68	1794	0.000377
15	2.442	0.63	1566	0.000402
16	2.605	0.67	1566	0.000428
17	2.337	0.60	1566	0.000385
18	2.863	0.73	1566	0.000469
19	2.495	0.64	1566	0.000410
20	2.758	0.71	1566	0.000452
21	2.621	0.57	1794	0.000317

式(3)を変形すると、

$$\text{工期} = \frac{\text{工数}}{\text{要員数}} \propto \text{複雑性} \quad (29)$$

となる。更に式(5)より、式(30)のように変形できる。

$$\text{工期} \propto \text{写像の難しさの平均} \times \text{全写像経路数} \quad (30)$$

従って、写像の難しさの平均値は式(31)によって求まる。

$$\text{写像の難しさの平均(比例係数含む)} = \frac{\text{工期}}{\text{全写像経路数}} \quad (31)$$

4.2 近似式の理論的導出

前節(3.2.)で述べた通り、以下の2つのステップで、近似式の理論モデルを策定する。

はじめに、 m は写像経路数の補正値を算出する。補正値は前述の式(27)より、以下の算出式から求める。なお、補正前の写像経路数・写像の難しさは、表2より、全21プロジェクトの平均値を算出し、理論式導出に用いた。

$$m = \frac{\text{全21プロジェクトの写像経路数平均値}}{\div \text{行列の次数} \times \text{行列の次数}} \\ = 1599 \div (18 \times 18) \quad (32)$$

この補正値 m を用いると、乗数係数と写像経路数の関係式(式(18)(19))により、乗数と指数は以下の通りとなる。

$$a_0 = 0.065 \times m + 0.7121 = 1.0329 \quad (33)$$

$$b = 0.8092 \times m^{-0.26} = 0.5343 \quad (34)$$

次に、写像経路数と同様に、写像の難しさの補正を式(28)により算出する。

$$k = \frac{\text{写像の難しさの全21プロジェクトの平均値}}{\times \text{行列の次数} \times \text{行列の次数}} \\ = 0.000461 \times 18 \times 18 \quad (35)$$

この補正値 k を用いると、指数係数と写像の難しさの関係式(式(24))より、乗数を確定する。

$$a = a_0 \times k^{1-b} = 0.4261 \quad (36)$$

となる。

以上から、工期と工数の関係式は以下のように定義される。

$$\text{工期} = 0.4261 \times \text{工数}^{0.5343} \quad (37)$$

4.3 理論値と実測値の比較検証結果

算出した近似曲線(式(37))と実測値の比較結果を示す。

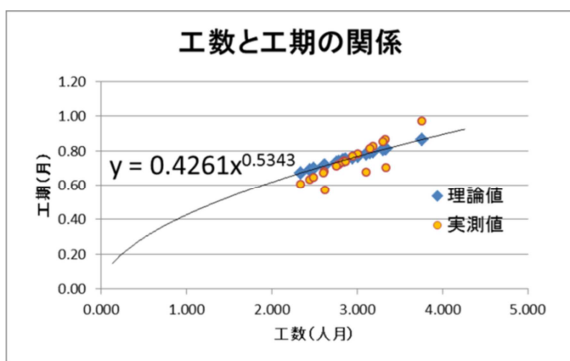


図9 理論値と実測値の比較結果

Figure 9 Comparative Results of Theory and Practice

図9の通り、理論値と実測値はほぼ重なったグラフとなっ

ている。すなわち、理論モデルにより実測値を再現できたと考える。

4.4 実測値と理論値の相関と誤差

図10のように本研究で構築したモデルは、実測値と比べて1日以下の誤差範囲であり、また先行研究に比べて分散は小さく、且つ、強い相関がみられる。すなわち、工期(実測)が10.8日~18.5日(平均13.9日)に対し、理論値との誤差は「-0.10日~0.85日」(信頼区間; 95%)である。

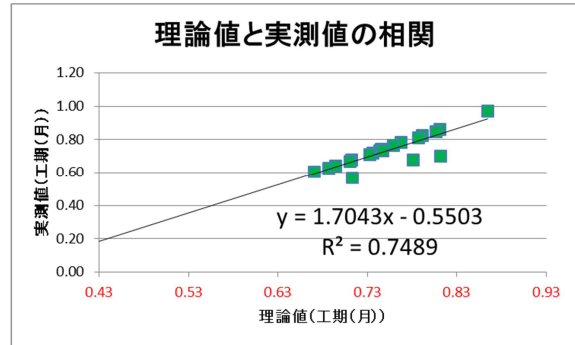


図10 相関と誤差

Figure 10 Correlations and Error

5. 結論

本研究では、工数と工期の経験モデルが何故累乗関数($Y=aX^b$)で表されるのか、そして、その乗数、指数が何故様々な値を取るのか、理論モデルを用いて明らかにした。その理論モデルはプロジェクト内でやり取りされる設計情報の写像経路と、その写像の難しさを変数としたモデルを用いた。本研究の結果、乗数は写像経路とその写像の難しさに依存した関数で規定され、指数は写像の難しさのみに依存した関数で規定されることが示した。

そして、これらの関数を元に理論的に算出した近似式と、実際のプロジェクトデータとを比較し、本理論モデルが十分に実際のプロジェクトを再現していることを実証検証した。すなわち、写像経路数、写像の難しさの値が様々なプロジェクトを元に、工数-工期のモデルを構築したため、先行研究のモデルは様々なものとなっていることが分かった。そして同時に、以下に示す通り、先行研究の課題を解決した。まず、課題1として、経験モデルのデータ分布状態を理論モデルから説明することが出来ていなかった。本研究により、理論モデルから、発生し得るデータ分布(データの母集団)を明確化した。次に、課題2として、理論モデルからメタモデルを導出することが出来ていなかった。本研究により、データの母集団から近似曲線を求め、関係式 $y=ax^b$ を導出した。最後に、課題3として、理論モデルから経験モデルを導出することが出来ていなかった。本研究により、 $y=ax^b$ の各係数値の決定要因は、写像経路数と写像の難しさであること示した。以上により、工数-工期の関係における課題を解決した。

最後に、本研究では、汎用性を考慮したプロジェクトで検証を行っている。しかし、ゲーム開発プロジェクトに閉じた検証しか出来ておらず、汎用性を十分に検証したとは言い難い。今後は、様々なプロジェクトで検証を行い、本研究成果の汎用性についても実証していきたい。

謝辞 本研究に対し、多大なご協力を頂いたイレギュラーズアンドパートナーズ株式会社代表取締役山本一郎様、チーフディレクター渡邊謙様に感謝致します。

参考文献

- 1) Boehm, B.W., Software Engineering Economics., Prentice-Hall, Engle-wood Cliffs, N.J.(1981).
- 2) Barry W. Boehm and et al, Software Cost Estimation with COCOMO II, Prentice Hall,(2000)
- 3) C. E. Walston, C. P. Felix, A method of programming measurement and estimation, IBM Systems Journal, 16 Issue 1, March , 54-73(1977)
- 4) D. Reifer, “Estimating web development costs: there are differences,” Cross talk, June (2002)
- 5) John W. Bailey, Victor R. Basili, A meta-model for software development resource expenditures, Proc. the 5th international conference on Software engineering (1981)
- 6) ソフトウェア開発 データ白書 2012-2013, 独立行政法人情報処理推進機構 (IPA) 技術本部 ソフトウェア・エンジニアリング・センター (SEC) , <http://sec.ipa.go.jp/users/publish/SEC-TN12-002.pdf> (2014/08/11 アクセス)
- 7) ユーザー企業 ソフトウェアメトリックス調査【調査報告書】 2011 年度版, 2011 年 9 月, 社団法人 日本情報システム・ユーザー協会, <http://www.juas.or.jp/servey/library/pdf/11swm.pdf> (2014/08/11 アクセス)
- 8) 経済調査研究所 研究レポート 2010 ソフトウェア開発データリポジトリの分析, 2010 年 7 月, 財団法人 経済調査会 経済調査研究所, http://www.zai-keicho.or.jp/pdf/software_metrics/pdf/ERA_Analysis_of_Software_Projects_Data_Repository_201007.pdf (2014/08/11 アクセス)
- 9) 柿元健, 門田暁人, 角田雅照, 松本健一, 菊地奈穂美, “規模・工期・要員数・工数の関係の定量的導出”, SEC journal, 14, 6-11 (2008)
- 10) 松本健一, 大岩佐和子, 押野智樹, “COCOMO II による工数見積り”, 経済調査研究レビュー, 14, 87-98,(2014)
- 11) 戸田航史, 松本健一, 押野智樹, 高橋明彦, “ソフトウェア開発における適正工期に関する分析”, 経済調査研究レビュー, 7, 37-46, (2010).
- 12) Kemerer, C. F.: “An Empirical Validation of Software Cost Estimation Models,” Communications of the Association for Computing Machinery, 30(5), 416-429(1987)
- 13) Lawrence H. Putnam, A general empirical solution to the macro software sizing and estimating problem, IEEE Transactions on Software engineering, 4(4), 345-361(1987)
- 14) Steward, D.V.: The design structure system: A method for managing the design of complex systems. IEEE Transactions on Engineering Management, 28(3), 71-74(1981).
- 15) Sosa, M.E., Eppinger, S.D. and Rowles, C.M.: Are your engineers talking to one another when they should? Harvard Business Review, 85(11), 133-142 (2007).
- 16) Eppinger, S.D.: Model-based approaches to managing concurrent engineering. Journal of Engineering Design, 2(4), 283-290 (1991).
- 17) Eppinger, S.D.: Using the design structure matrix to estimate product development time. Proc. ASME Design Engineering Technical Conferences (1998).
- 18) Eppinger, S.D.: Innovation at the speed of information. Harvard Business Review, 79(1), 149-158 (2001).
- 19) Eppinger, S.D., Salminen, V.: Patterns of product development interactions. International Conference on Engineering Design ICED 01, August 21-23(2001).
- 20) Danilovic, M., Sandkull, B.: The use of dependence structure matrix and domain mapping matrix in management uncertainty in multiple project situations. International Journal of Project Management, 23(3), 193-203(2005).
- 21) Danilovic, M., Browning, T.R.: Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. International Journal of Project Management, 25, 300-314 (2007).
- 22) Lindeman, U., Maurer, M. and Braun, T.: Structural Complexity Management-An Approach for the Field of Product Design. Springer, Berlin (2009).
- 23) J.W. Forrester, Industrial Dynamics. MIT Press, MA,(1961).
- 24) Lyneis, JM and Ford, D.N., “System Dynamics Applied to Project Management: A survey, assessment, and directions for future research” . System Dynamics Review, 23(4), 157-189.(2007).
- 25) Abdel-Hamid T. The Dynamics of Software Development Project Management, Doctoral Thesis, MIT, Cambridge, MA.(1984)
- 26) Cooper K. Naval Ship Production: A Claim Settled and a Framework Built. Interfaces 10(6).(1980)
- 27) Ford D, Sterman J. Dynamic Modeling of Product Development Processes. Working Paper 3943-97, MIT Sloan School of Management, Cambridge, MA.(1997)
- 28) Homer J, Sterman J, Greenwood B, Perkola M. Delivery time reduction in pulp and paper mill construction projects. Proc. the 1993 International System Dynamics Conference. The System Dynamics Society: Cancun, Mexico.(1993)
- 29) Alexandre Rodrigues and John Bowers. System dynamics in project management: a comparative analysis with traditional methods, System Dynamics Review 12(2), 121-139(1996).
- 30) James M. Lyneis, Kenneth G. Cooper and Sharon A. Els, Strategic management of complex projects: a case study using system dynamics, System Dynamics Review 17(3), 237-260(2001).
- 31) Moonseo Park and Feniosky Pena-Mora, Dynamic change management for construction: introducing the change cycle into model-based project management, System Dynamics Review 19(3), 213-242(2003).
- 32) Tim Taylor and David N. Ford, Tipping point failure and robustness in single development projects, System Dynamics Review 22(1), 51-71(2006).
- 33) James M. Lyneis and David N. Ford, System dynamics applied to project management: a survey, assessment, and directions for future research, System Dynamics Review 23(2/3), 157-189(2007).
- 34) Heemstra, F.J., ‘Software cost estimation’, Information & Software Technology. , 34(10), 627-639(1992).
- 35) Barry W. Boehm & Phillip N. Papaccio, Understanding and Controlling Software Costs, IEEE Transactions on software Engineering. 14(10), 1462-1477(1988).
- 36) 榮谷昭宏, 牧野泰才, 前野隆司, 設計情報の写像経路に着目したソフトウェア開発プロジェクトの複雑性指標の提案, 情報処理学会論文誌, 55(5), 1453-1470(2014)
- 37) Suh, N.P.: Axiomatic Design: Advances and Applications. Oxford University Press, New York (2001).
- 38) Project Management Institute, Inc., プロジェクトマネジメント知識体系ガイド (PMBOK ガイド) 第 4 版, Project Management Institute, Inc. (2008)