

検出バグ数の推移から見た統合モデルとその意味付け

古山 恒夫

東海大学 開発工学部¹⁾

概要：ソフトウェア信頼度成長曲線に関する統合モデルは、これまで提案された多くのモデルをカバーできるだけでなく、これまでモデル化されていなかった領域もカバーする。そのため、このモデルを用いれば既存のSRGMより高い精度で残存バグ数を推定することができる。しかしながら、従来の統合モデルを表す微分方程式に含まれるパラメータの物理的な意味付けは必ずしも明確ではなかった。

本論文では、統合モデルをバグ検出の進捗過程の視点から見直し、ある時点のバグ検出率 dy/dt をその時刻までのバグ検出数 y のみの関数として表すことができることを示す。また、新しい形式の統合モデルには従来の統合モデルがカバーしていなかった解析解をもつこと、さらに従来の統合モデルの解と追加された解析的以外には解析解が存在しないことを示す。

A new manifold growth model represented with the number of detected faults

Tsuneo Furuyama

Tokai University, School of High Technology for Human Welfare

Abstract: A manifold growth model that unifies representative existing software reliability growth models can cover wide area that can't be covered so far. Therefore, prediction of remaining faults is possible to be improved by using this model. However, the physical meaning of the original manifold growth model that is defined as first order non-linear differential equation which includes an exponential function of time t is not clear.

This paper shows that a new manifold growth model can be represented as first order non-linear differential equation not with an exponential function of time t but only with the function of the number of detected faults. Besides, the new equation has a new analytical solution as well as general solutions so far. Finally, there are no analytical solutions of a new manifold growth model except for these general solutions.

1. はじめに

信頼性の高いソフトウェアを予定期間内に開発するためには、残存バグ数を高い精度で推定することが不可欠である。この課題を解決するために、これまで多くの方法が提案されてきたが、最も広く利用されているのは、試験工程で検出されるバグの累積値の傾向から残存バグ数を推定する方法である。すなわち、時間対検出バグ累積数の特性をもとにしたソフトウェア信

頼度成長モデル(SRGM)を利用する方法である。SRGMはすでに Jelinski & Moranda^[1], Musa^[2], Littlewood^[3], Goel & Okumoto^[4], Yamada & et al.^[5], Ohba^[6], Tohma & et al.^[7], Kanoun & et al.^[8], Karunanithi & et al.^[9] など多くの研究者によって論じられている。代表的な SRGM としては、指数型モデル、超指数型モデル、遅延 S 字型モデル、習熟 S 字モデルなどがある。また曲線の形状が累積バグ数の増加傾向に似ているとして利用されているものにゴンペルツ曲

¹⁾〒410-0395 沼津市西野 317

線やロジスティック曲線がある（図1）。しかし、これまで論じられているモデルは、指数形やS字形などの各モデル固有の定型的な特性を持った曲線をもとにしたものであり、利用できる範囲もそれぞれ限られている。そのため、あるモデルを固定的に使用すると、対象データの特性によっては残存バグ数の推定精度が低くなることがある。それを避けるために、これまでの代表的なSRGMを順次累積バグデータに適用して、最も誤差の少ないモデルを採用する方法も提案されている。

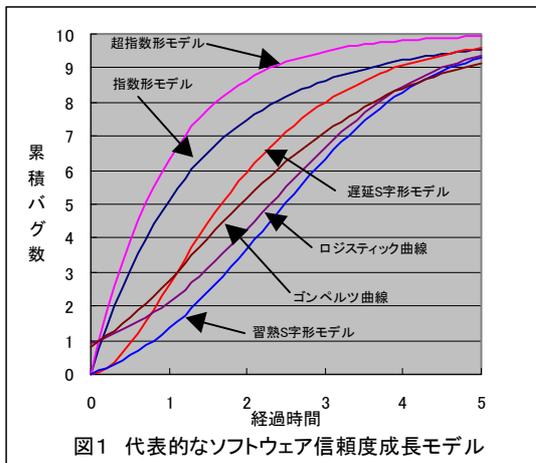


図1 代表的なソフトウェア信頼度成長モデル

統合モデル^{[10], [11]}は、これまで提案された多くのモデルをカバーできるだけでなく、これまでモデル化されていなかった領域もカバーする。そのため、このモデルを用いれば、対象とする累積バグデータに既存のSRGMをそれぞれ適用して結果を比較することなしに、より高い精度で残存バグ数を推定することができる。しかしながら、従来の統合モデル（以下、旧統合モデルと呼ぶ）を表す1階の非線形微分方程式は、ある時刻tのバグ検出率 dy/dt をその時刻のバグ検出数 y のべき乗と t の指数関数の積で表わしたものであり、その物理的な意味付けは必ずしも明確ではなかった。

本論文では、統合モデルをバグ検出の進捗過程の視点から見直し、ある時点のバグ検出率 dy/dt をその時刻までのバグ検出数 y のみの関

数として表すことができることを示す。また、新しい形式の統合モデル（以下、新統合モデルと呼ぶ）には旧統合モデルではカバーされなかった解析解があること、さらに旧統合モデルの解と追加された解析的以外には解析解が存在しないことを示す。第2章でこれまでの統合モデルの概要を紹介し、第3章で新統合モデルとその一般解を示す。第4章で新統合モデルの位置付けを旧統合モデルと比較しながら考察する。

2. 従来の統合モデルの概要^{[10][11]}

2.1 微分方程式

時刻 t における累積バグ数を y とする。統合モデルは次の微分方程式として定義される：

$$\frac{d(y + \delta)}{dt} \cdot (y + \delta)^{(\gamma-1)} = \alpha \cdot e^{-\beta t} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $\gamma > 0$ である。 δ は y 軸に関するスケールファクタ、 β は t 軸に関するスケールファクタである。 γ はこの微分方程式の解となる関数の y 軸方向の平行移動量を示すパラメータである。このパラメータは主として習熟S字形モデルをカバーするために導入されたものであり、このモデル以外は $\gamma = 0$ の微分方程式でカバーできる。

2.2 一般解

式(1)の一般解は次のようになる。

(A) $\gamma > 0$, $\beta > 0$ の場合

$$y = N(1 - a \cdot e^{-\beta t})^{\frac{1}{\gamma}} - \delta \quad (2)$$

ただし、 y_0 を $t = 0$ のときの y の値とすると、

$$N = \left\{ \frac{\alpha \cdot \gamma + \beta(y_0 + \delta)^\gamma}{\beta} \right\}^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3)$$

$$a = \frac{\alpha \cdot \gamma}{\alpha \cdot \gamma + \beta(y_0 + \delta)^\gamma} \quad (4)$$

である。ここで、 N は定数分 ($a=1$ の場合は 0) を差し引いて試験開始時点に含まれるバグ総数、

はバグの検出速度を規定するパラメータ、 a と ψ は成長曲線の形状（たわみ）を決定するプロジェクトごとのバグ検出特性と解釈できる。なお、 $\psi < 0$ の場合は $a < 0$ となり、式(2)は次のように表される。

$$y = \frac{N}{(1 + \psi \cdot e^{-\beta t})^{\frac{1}{(-\gamma)}}} \quad (5)$$

ここで $\gamma = -a > 0$ である。

(B) $\psi > 0$, $\gamma = 0$ の場合

$$y = N \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{\beta} \cdot \exp(\beta t)\right) - \delta \quad (6)$$

ただし、

$$N = (y_0 + \delta) \exp\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \quad (7)$$

である。

旧統合モデルは、これまでの代表的な SRGM をカバーできるものの、微分方程式（式(1)）における ψ と e^{-t} 、および一般解（式(2)）における a の物理的意味が必ずしも明確ではなかった。

3 . 新しい統合モデル

この章で提案する新統合モデルは、ある時刻のバグの検出率とその時刻における検出バグ数にのみ依存するものである。

3 . 1 微分方程式

新統合モデルを次の微分方程式で表す。

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\beta}{\gamma} N \left(\frac{y}{N}\right)^\eta \left\{1 - \left(\frac{y}{N}\right)^\gamma\right\} \quad (8)$$

ここで、 N はソフトウェアに含まれる総バグ数、 y は時刻 t までの累積検出バグ数、 β はバグ検出速度を表すパラメータである。 γ と η はそれぞれある時点までに検出したバグの総バグに対する比率 (y / N : 以下バグ検出比率と

呼ぶ) のべき乗を示すパラメータで、その意味は次節で述べる。ただし、 $\beta, \gamma, \eta, y, N > 0$ とする。

3 . 2 微分方程式の意味

式(8)は、ある時刻での単位時間当たりのバグ検出数 dy/dt は、それまでのバグ検出比率 y/N の η 乗と、1 からそれまでのバグ検出比率の乗を引いた値に比例することを表わしている。これらはそれぞれ単位時間当たりのバグの検出率 (dy/dt) を増加させるプラス要因と、バグ検出が進むにつれて dy/dt を減少させるマイナス要因とみなすことができる。

一般的なプラス要因としては、

- (a) 重層化したバグにおける深層バグの表面化：バグが重層構造をしている場合、試験の進捗に伴ってそれまで他のバグの陰に隠れていたバグが表面に現れて検出可能なバグ数が増える
 - (b) 要員の増加：沢山 TP を流せる条件が整う
 - (c) 習熟性の向上：試験要員のバグ検出の習熟度が向上してバグ発見能力が高まる
- ことなどがあげられる。

一方、マイナス要因としては、

- (d) 残存バグ数の減少
- (e) 検出容易なバグの減少：検出しやすいバグが先に発見されて、難しいバグ(複雑な組み合わせ条件で発生するバグ)しか残らなくなる

などがあげられる。

要員数が一定で試験要員の習熟性が飽和している場合には、プラス要因はバグの重層構造が主なものになると考えられる。バグの重層構造とは、あるバグが検出され修正されて始めて発見できるようなバグが存在する場合のことを意味する。パラメータ η はこのバグの階層化の程度を表わしている。例えば、 $\eta = 0$ の場合は階層構造がない、すなわち、すべてのバグが一様

に見つかる可能性を持っているということの意味する。実際にバグが発見されるかどうかはその時点で流すテストプログラムに依存するわけであるが、すべてのバグはある適当なテストプログラムを流すことによって発見できる可能性を常に持っていると言える。が0でない場合、ある時点では「見えるバグ」と「見えないバグ」がある。例えば $\beta = 1$ の場合は、検出バグ数 y あるいはバグ検出比率 y / N に比例したバグしか見えない。つまりその時点で「見えるバグ」は試験が進むに従って比例して増えていくことを意味している。

y / N の β 乗を1から引いた項は、基本的には残存バグ比率に依存して単位時間当たりのバグ検出数が定まることを表わしている（バグ総数 N との積で考えると残存バグ数に依存することになる）。ところで、バグには「発見しやすいバグ」と「発見しにくいバグ」があり、試験では一般に発見しやすいバグから発見されていき、次第に発見するのが難しいバグが残ると考えられる。パラメータ β は「発見しやすいバグ」と「発見しにくいバグ」の比率の程度を表している。例えば、 $\beta = 1$ の場合は発見の困難度に差がないことを表している。ちなみに、地雷モデルといわれる指数型モデルは $\beta = 0$ 、 $\beta = 1$ の場合である。が1より小さくなれば、 y / N の β 乗を1から引いた項は下に垂れ下がるような曲線になり、残存バグ比率（残存バグ数）に比べてバグが発見しにくくなっている - - 発見困難なバグが残っている - - ことに対応する。逆に、 β が1より大きい場合は比較的発見しやすいバグが多くを占めることを表している。

β は、バグ検出速度を表すパラメータで、例えば単位時間当たりに流すテストプログラムの量などが該当する。

3.3 一般解

式(8)の微分方程式に対して、

$$y = Nx \tag{9}$$

$$t = \frac{\tau}{\beta} \tag{10}$$

という変数変換を行うと、式(8)は次のようになる。

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{1}{\gamma} x^\eta (1 - x^\gamma) \tag{11}$$

ただし、 $1 < \eta < 0$ 、 $\gamma > 0$ である。式(11)は変数分離形にして解くことができるが、パラメータ η と γ の値によって解析的に解ける場合が限られる。 x に関する不定積分を解析的に求めることができ、 η の値が x の解析関数 $f(x)$ により $\int f(x) dx$ で与えることができる場合、式(11)の微分方程式に「弱解析解が存在する」と呼ぶことにする。さらに、 $f(x)$ に解析的な逆関数が存在して、 $x = g(\cdot)$ と解析的に表すことができる場合、式(11)の微分方程式に「解析解が存在する」と呼ぶことにする。

式(11)を変数分離形にして解くと次のようになる。

$$\begin{aligned} \tau - \tau_0 &= \gamma \int \frac{dx}{x^\eta (1 - x^\gamma)} = \int \frac{dz}{z^{\frac{\eta+\gamma-1}{\gamma}} (1-z)} \\ &= m \int \frac{ds}{s^{n-m+1} (1-s^m)} \\ &= m \int \frac{ds}{s^l (1-s^m)} \end{aligned} \tag{12}$$

ただし、以下の変数変換を行っている。

$$x^\gamma = z \tag{13}$$

$$\therefore \gamma x^{\gamma-1} dx = dz \tag{14}$$

$$\frac{\eta + \gamma - 1}{\gamma} = \frac{n}{m} \quad (m, n \text{ は整数}) \tag{15}$$

$$\frac{1}{z^m} = s \tag{16}$$

$$\therefore \frac{1}{m} z^{\frac{1-m}{m}} dz = ds \tag{17}$$

$$n - m + 1 = l \tag{18}$$

式(14)の条件が成り立つ場合、式(12)の1とmは整数となり、式(11)が弱解析解を持つことは容易にわかる。

解析解が求まる場合は以下に示す特殊な場合だけである。

(A) $l = -(m-1) \Rightarrow n = 0 \Rightarrow \eta = 1 - \gamma$ の場合、式(11)は次の形となる。

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{1}{\gamma} x^{1-\gamma} (1 - x^\gamma) = \frac{1}{\gamma} x(x^{-\gamma} - 1) \quad (19)$$

xに関する積分形(式(12)の右辺)は次のようになる。

$$\begin{aligned} m \int \frac{ds}{s^l(1-s^m)} &= m \int \frac{s^{m-1}}{1-s^m} ds \\ &= -\log(1-s^m) = -\log(1-x^\gamma) \end{aligned} \quad (20)$$

一般解は次のようになる。

$$x = (1 - e^{-(\tau-\tau_0)})^{\frac{1}{\gamma}} \quad (21)$$

ただし、0で意味を持つためには、0 > 0 でなければならない。

(A) $l = 0, m = 1, (n = 0) \Rightarrow \eta = 1 - \gamma$ の場合

この場合は(A)の場合に帰着する。

(B) $l = 1, m = 1, \Rightarrow n = 1 \Rightarrow \eta = 1$ の場合、微分方程式(11)は次の形となる。

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{1}{\gamma} x(1 - x^\gamma) \quad (22)$$

xに関する積分形(式(12)の右辺)は次のようになる。

$$\begin{aligned} m \int \frac{ds}{s^l(1-s^m)} &= m \int \frac{ds}{s(1-s)} \\ &= \log \frac{s}{1-s} = \log \frac{x^\gamma}{1-x^\gamma} \end{aligned} \quad (23)$$

一般解は次のようになる。

$$x = \left(\frac{1}{1 + e^{-(\tau-\tau_0)}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (24)$$

(B) $l = 1, m = 2, \Rightarrow n = 1 \Rightarrow \eta = 1$ の場合

xに関する積分形(式(12)の右辺)は次のようになる。

$$\begin{aligned} m \int \frac{ds}{s^l(1-s^m)} &= 2 \int \frac{ds}{s(1-s^2)} \\ &= \log \frac{s^2}{1-s^2} = \log \frac{x^\gamma}{1-x^\gamma} \end{aligned} \quad (25)$$

この場合は(B)の場合に帰着する。

(C) $l = 0, m = 2 \Rightarrow n = 1 \Rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{2}\gamma$

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= \frac{1}{\gamma} x^{\left(1-\frac{\gamma}{2}\right)} (1 - x^\gamma) = \frac{1}{\gamma} x \left(x^{-\frac{\gamma}{2}} - x^{\frac{\gamma}{2}} \right) \\ & \quad (26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m \int \frac{ds}{s^l(1-s^m)} &= 2 \int \frac{ds}{1-s^2} \\ &= \log \frac{1+s}{1-s} = \log \frac{1+x^{\frac{\gamma}{2}}}{1-x^{\frac{\gamma}{2}}} \end{aligned} \quad (27)$$

一般解は次のようになる。

$$x = \left(\frac{1 - e^{-(\tau-\tau_0)}}{1 + e^{-(\tau-\tau_0)}} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \quad (28)$$

3.4 微分方程式の特殊な場合

式(11)において 0 とすると次のようになる。

$$\frac{dx}{d\tau} = x^\eta \log x \quad (29)$$

ただし $x > 0$ である。

式(29)は $\eta = 1$ の場合のみ次のようなxに関する解析解が得られる。

$$\tau - \tau_0 = \int \frac{dx}{x \log x} = \log(-\log x) \quad (30)$$

$$x = \exp(-\exp(\tau - \tau_0)) \quad (31)$$

図2に解析解が存在する場合の η と γ の範囲を示す。 η と γ がともに有理数の場合は弱解析解が存在する。そのような点は図2に示す -

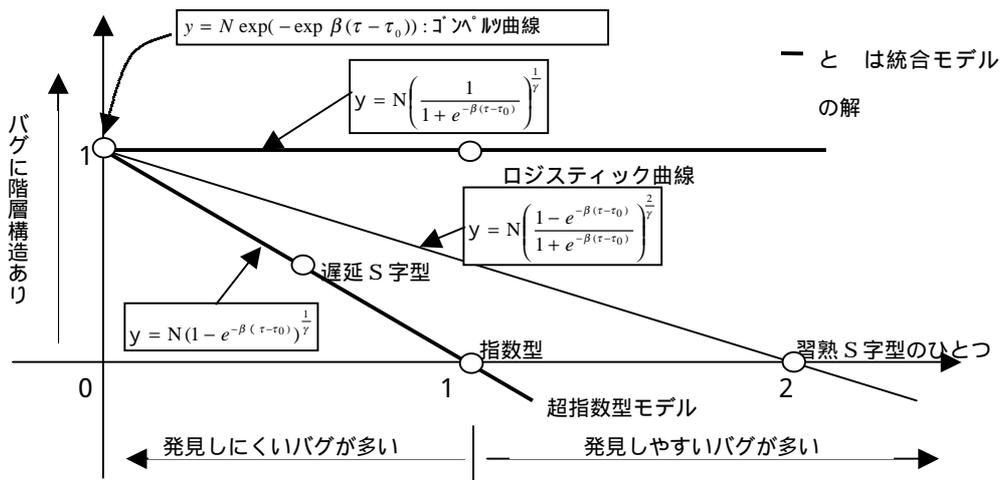


図2 解析解の存在範囲と既存のSRGMの位置づけ

平面上に無数にある。

t に関して平行移動したものであり、物理的意味付けは a よりも明確である。

4. 考察

4.1 新旧の統合モデルの対比

新統合モデルの微分方程式である式(11)と式(29)それぞれの一般解すなわち式(21)、式(24)、式(28)、式(31)を、変数変換前の式(8)の微分方程式の解に直したものは以下ようになる。

$$y = N(1 - e^{-\beta(t-t_0)})^{\frac{1}{\gamma}} \quad (32)$$

$$y = N \left(\frac{1}{1 + e^{-\beta(t-t_0)}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (33)$$

$$y = N \left(\frac{1 - e^{-\beta(t-t_0)}}{1 + e^{-\beta(t-t_0)}} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \quad (34)$$

$$y = N \exp(-\exp \beta(\tau - \tau_0)) \quad (35)$$

式(32)と式(33)は旧統合モデルの一般解である式(2)の $a=0$ の場合に、式(35)は旧統合モデルの解である式(5)の $a=0$ の場合にそれぞれ対応している。このように、新統合モデルは旧統合モデルの $a=0$ の場合にカバーしていた解をすべてカバーする。

旧統合モデルの一般解の a は新統合モデルによれば e^{-t_0} と等しいことがわかる。 e^{-t_0} は時刻

新旧統合モデルの一般解の対比を表 1 に示す。

4.2 習熟 S 字形モデルの微分方程式

式(8)の新統合モデルでは、習熟 S 字形モデルの一部しか表すことができない。習熟 S 字形モデル全体を表す微分方程式は次のようなものとなる。

$$\frac{dy}{dt} = \beta N \left\{ p + (1-p) \frac{y}{N} \right\} \left(1 - \frac{y}{N} \right) \quad (36)$$

ここで N と β は式(8)の場合と同様の意味を持ち、 $1 > p > 0$ である。一般解は次の式で与えられる。

$$y = N \cdot \frac{1 - e^{-\beta t}}{1 + e^{-\beta(t-t_0)}} \quad (37)$$

ここで式(9)と式(10)の変数変換を行うと式(36)は

$$\frac{dx}{d\tau} = \{ p + (1-p)x \} (1-x) \quad (38)$$

となる。右辺の第 1 項がある時点におけるバグ検出率がバグ検出比率 y/N の増加と共に増大するプラス要因に対応し、第 2 項がマイナス要因に対応する。 $p = 1/2$ の場合が式(7)の特殊な場合に相当する。

表1 新旧統合モデルの比較

新統合モデル		旧統合モデル		
微分方程式	$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{\gamma} \beta N \left(\frac{y}{N} \right)^\eta \left\{ 1 - \left(\frac{y}{N} \right)^\gamma \right\}$	微分方程式	$\frac{d(y+\delta)}{dt} \cdot (y+\delta)^{(\gamma-1)} = \alpha e^{-\beta t}$	
一般解	$\eta = 1 - \gamma$ の場合	$y = N \left(1 - e^{-\beta(t-t_0)} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$	$\gamma > 0, \delta = 0$ の場合	$y = N \left(1 - a e^{-\beta t} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$
	$\eta = 1$ の場合	$y = N \left(\frac{1}{1 + e^{-\beta(t-t_0)}} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$	$\gamma < 0, \delta = 0$ の場合	$y = N \left(\frac{1}{1 + \psi e^{-\beta t}} \right)^{\frac{1}{(-\gamma)}}$
	$\eta = 1 - \frac{1}{2} \gamma$ の場合	$y = N \left(\frac{1 - e^{-\beta(t-t_0)}}{1 + e^{-\beta(t-t_0)}} \right)^{\frac{2}{\gamma}}$	$\gamma < 0, \delta > 0, y_0 = 0$ の場合	$y = N \left(\frac{1 - e^{-\beta t}}{1 + \psi e^{-\beta t}} \right)^{\frac{1}{(-\gamma)}}$
	$\gamma \rightarrow 0$ の場合	$y = N \exp(-\exp \beta(t-t_0))$	$\gamma \rightarrow 0, \delta = 0$ の場合	$y = N \exp\left(-\frac{\alpha}{\beta} \exp \beta t\right)$

4.3 類似の微分方程式とその一般解

式(11)に類似の微分方程式として次の式がある。

$$\frac{dx}{d\tau} = x^\eta (1-x)^\xi \quad (39)$$

が整数で η が有理数、あるいは ξ が有理数で η が整数の場合は式(13)のような変数変換によって容易に弱解析解を求めることができる。

解析解については次の2つの場合がある。

(1) $\eta = 1$ の場合は式(11)の $\eta = 1$ の場合に帰着する。図2より、 $\xi = 0, 1/2, 1$ の場合のみ解析解が存在する。

(2) $\eta = 0$ かつ $\xi = 1$ の場合は式(39)は

$$\frac{dx}{d\tau} = (1-x)^\xi \quad (40)$$

となつて次のように容易に解析解が求まる。

$$\frac{1}{(\xi-1)(1-x)^{\xi-1}} = \tau - \tau_0 \quad (41)$$

$$x = 1 - \left\{ \frac{1}{(\xi-1)(\tau - \tau_0)} \right\}^{\frac{1}{\xi-1}} \quad (42)$$

ここで曲線が原点を通る場合は

$$x = 1 - \frac{1}{\{1 + (\xi-1)\tau\}^{\frac{1}{\xi-1}}} \quad (43)$$

となる。ただし、 $1 > \xi > 0$ の場合は

$$\tau = \frac{1}{1-\xi} \quad (44)$$

で $x = 1$ となり、それより大きい x の値で x は減少に転ずるため、SRGM の解とはなりえない。したがって $\xi > 1$ である必要がある。

このように式(39)で表される微分方程式の一般解は既存の代表的な SRGM および旧統合モデルと直接の関係はない。しかし、式(43)で表される解を無視する必要はないので、必要に応じてこの解を適用することを考慮してもよいものと思われる。

5. おわりに

ある時刻のバグ検出率を検出バグ数(あるいは検出バグ比率)の推移のみからなる関数としてとらえた新しい統合モデルを提案した。このモデルの特徴を以下に示す。

(1) 旧統合モデルとその一般解ではパラメータの物理的意味付けが必ずしも明確でなかったが、

新統合モデルではそれが明確である。

(2) 旧統合モデルでパラメータ θ が 0 の場合の一般解をカバーするだけでなく、旧統合モデルには存在しなかった解も含む。

(3) 新統合モデルを表す微分方程式から求まる解はパラメータがある特殊な値をとるときだけ解析解を持つ。

今後は、実際のデバッグ過程で対象プログラムのバグの階層構造やバグの難易度を分析することにより、本論文で示したパラメータの意味付けの妥当性を明らかにしていきたい。

< 参考文献 >

- [1] Jelinski, Z. and Moranda, P.: Software Reliability Research, *Statistical Computer Performance Evaluation*, Freiberger, W. (Ed.), pp. 465-484, Academic Press, New York (1972).
- [2] Musa, J.D.: A Theory of Software Reliability and Its Application, *IEEE Trans. Software. Eng.*, Vol. SE-1, No. 3, pp. 312-327 (1975).
- [3] Littlewood, B.: Theories of Software Reliability: How Good Are They and How Can They Be Improved?, *IEEE Trans. Software. Eng.*, Vol. SE-6, No. 5, pp. 489-500 (1980).
- [4] Goel, A.L. and Okumoto, K.: Time-Dependent Error-Detection Rate Model for Software Reliability and Other Performance Measures, *IEEE Trans. Rel.*, Vol. R-28, No. 3, pp. 206-211 (1979).
- [5] Yamada, S., Ohba, M. and Osaki, S.: S-Shaped Reliability Growth Modeling for Software Error Detection, *IEEE Trans. Rel.*, Vol. R-32, No. 5, pp. 475-478 (1983).
- [6] Ohba, M.: Software Reliability Analysis Modeles, *IBM J. Res. Dev.*, Vol. 28, No. 4, pp. 428-443 (1984).
- [7] Tohma, M., Tokunaga, K., Nagase, S. and Murata, Y.: Structural Approach to the Estimation of the Number of Residual Software Faults Based on the Hyper-geometric Distribution, *IEEE Trans. Software. Eng.*, Vol. SE-15, No. 3, pp. 345-355 (1989).
- [8] Kanoun, K., Martini, M.R.B. and Souza, J.M.: A Method for Software Reliability Analysis and Prediction Application to the TROPICO-R Switching System, *IEEE Trans. Software. Eng.*, Vol. SE-17, No. 4, pp. 334-344 (1991).
- [9] Karunanithi, N., Whitly, D. and Malaiya, Y.K.: Prediction of Software Reliability Using Connectionist Models, *IEEE Trans. Software. Eng.*, Vol. SE-18, No. 7, pp. 563-574 (1992).
- [10] 古山恒夫、中川 豊: ソフトウェア信頼度成長曲線に関する統合モデルと有効性の検証、情報処理学会ソフトウェア工学研究会、Vol. 97-10, pp. 73-80 (1994).
- [11] Furuyama, T. and Nakagawa, Y.: A Manifold Growth Model that Unifies Software Reliability Growth Models, *Int. J. of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 161-184 (1994).