

ライフサイクルシミュレーションモデルを用いた施設や製品の最適寿命設定

The Optimum Lifetime of the Products Using a Life Cycle Simulation Model

加藤 悟* 木村 文彦*
Satoru Kato* Fumihiko Kimura*

In the approach of environment load reduction as zero-emission, the Life Cycle Management of the products is important. Reduce, reuse (products and parts), recycle (material recovery and energy recovery) are highlighted. Appropriate lifetime setting and appropriate lifetime control of the products is made light of relatively. Generally, as lifetime of the products, there are physical, functional and economic lifetimes.

In this study, the whole product life cycle mainly on maintenance is discussed. And the life cycle simulation model from general statistics data about physical lifetime as failure rate is established. With this simulation, a product lifetime distribution in virtual market scene is introduced. The model including parameters to be related to the functional lifetime such as performance improvement effect (failure rate and energy efficiency recovery) and the products' utility improvement effect brought by renewal to a new product and maintenance activity is built.

The corrective maintenance that is repair of fault parts and preventive maintenance such as cleaning or adjusting are distinguished. Based on this model, the life cycle simulation is executed. First, the optimum lifetime that considered performance degradation and utility degeneration is considered. Next, a life cycle strategy with an appropriate combination of corrective maintenance, preventive maintenance, renewal is considered.

Keyword: Lifecycle Simulation, Product Lifetime, Maintenance, Life Cycle Strategy

1. はじめに

ゼロエミッションをはじめとした環境負荷削減の取り組みには、製品のライフサイクル管理の考え方が重要である。3R とも言われるリデュース（使用削減）、リユース（製品や部品の再使用）、リサイクル（素材やエネルギーとしての有効利用）に注目が集まっており、相対的に使用中の施設や製品の適切な寿命設定、寿命管理が比較的軽視されている傾向にある。

製品の寿命は一般に、物理的寿命、機能的寿命、経済的寿命などがあると言われる。さらに最近は家電などのエネルギー消費効率の向上により、使い続けるよりも高性能のものに買い換えた方がよいという知見も発表されるなど「環境的寿命」なども議論され、包括的な分析が必要とされている。

本研究では、製品の使用時の維持管理を中心にライフサイクル全体を取り扱い、一般的な製品故障率などの物理的寿命に関する統計的データからライフサイクルシミュレーションモデルを構築する。これらのシミュレーションにより、仮想的な市場における製品寿命分布を導出しながら、新品への更新やメンテナンス活動による故障率改善、エネルギー効率のような性能の改善効果や、製品の持つ効用の回復効果などの機能的寿命に関係するパラメーターも組み込んだモデルを構築する。ここでは、単純な故障箇所の修理である事後保全と、修理時に行う清掃や調整などの予防保全を明確に分けて分析を行う。

これらのモデルをもとに実際にライフサイクルシミュレーションを実行し、考察を深める。本研究では、性能劣化や効用低下を考慮した最適寿命について、また、事後保全、予防保全、更新の適切な組み合わせによるライフサイクル戦略について考察する。

* 東京大学大学院 工学系研究科

School of Engineering, The University of Tokyo (satoru@cim.pe.u-tokyo.ac.jp)

2. 製品の寿命についての整理

2. 1 寿命を決定する要因

製品の寿命を決定する要因はいくつかあり、物理的寿命、機能的寿命、経済的寿命などと呼ばれている。物理的寿命とはその製品が物理的に稼働できない状態になることによって決定し、具体的には摩耗や材料劣化によるものである。機能的寿命は、物理的には稼働するがその製品に対して求める機能が十分に発揮されないことによって決定するものである。これは劣化によって機能自体が低下するものと、使用者の製品に対する要求が向上する場合、あるいは両者複合の場合とがある。経済的寿命とは、製品を使用・維持するにあたってかかる費用として、従来の製品を使用し続ける場合よりも新製品に買い替えた方が費用が小さいということで決まるものである。買い替えた場合は通常は初期投資が必要となるので初期費用がかかるため、ある期間を設定して評価することになる。経済性も製品の持つ機能の一つと解釈すれば、時間の概念を加えた機能的寿命の一つととらえることができる。

近年は製品の環境負荷評価も行われるようになり、旧型の製品を使用する際に生じる環境負荷を考慮すると新製品に交換した方が良いという議論である。これはエアコンなどがよく例として取り上げられている。これも新製品を購入することは製品の製造時に発生する環境負荷を与えているという意味で、製造時の環境負荷を運用時にどれだけ回収できるかという意味で、経済的寿命と同様の概念ととらえることができる。

このように整理すると、製品の寿命という概念は、物理的に決定される要因と、使用時間や経過時間による機能の低下と、使用者が製品に要求する機能の向上、新品に更新した場合の設定する初期投資回収の期間によって決定されることがわかる。

2. 2 長寿命化のための手法

製品を長寿命化するにはどのような方法があるかを考えてみる。物理的寿命を延ばすためには耐久性のある製品を作ることが考えられる。劣化は経過時間劣化と使用時間劣化があるため、経過時間による材料劣化が小さい材料を選択し、使用によって生じる摩耗量を削減することが課題となる。この二つの劣化の整合性を示す指標は使用強度（稼働率）となる。また、このような劣化の予防は、従来から行われてきた適切なメンテナンス活動に期待される部分である。清掃、点検、調整などによって未然に摩耗速度を低下させて、物理的寿命の延命を図っていた。

次に機能寿命を延ばすためには、機能劣化の速度を低下させることと、社会全体の機能と比較した相対的な機能低下を制御することが考えられる。相対的な機能低下については、技術革新による社会の進歩によって持たされる部分が大きくこれを否定することは得策ではない。しかし、現在の経済社会は商品の開発サイクルを故意に短くし過度に買い換えをさせる現象も見られ、適切な機能的寿命の設定により適正な利益が得られるようなビジネスモデルを確立することが求められている。また、必要な機能を付加することによる機能アップグレードやソフトウェアアップグレードなどによって機能向上させることにより、機能的寿命を長くする試みも行われている。さらに、機能がスペックとして明示できるものだけでなく、「意匠の斬新さ」や「新品としての価値」のような利用者にとっての効用を、製品の持つ機能の一部と考えると、使用者も取り込んだ機能評価をする必要があり、使用者に対する意識啓発も長寿命化の手法の一つとして位置づける必要が生じる。

経済面にせよ環境負荷の面にせよ、買い替えの時に生じる投資（初期環境負荷）を回収する時間に対する要求は、かなり短いものになっている。投資回収時間が長い場合には、新規製品の使用する期間が結果的に回収時間より短かった場合には損が生じることになるため、買い替えによるリスク（損が発生する可能性）が生じることから、投資回収時間が短い方が好ましいと言えるが、投資回収時間が短いと長寿命化させるというインセンティブが働かないという課題が生じる。

一般的に長寿命化することがよいとはいえないという批判も聞かれるが、これは機能的寿命を考慮せず物理的寿命のみを延ばすことは悪影響を生じる場合もあるという意味である。製品の持つ使用者の効用まで含めた機能的寿命を延ばすことは、製品に関する環境効率を向上させる一つの確実な手法である。

このように製品の寿命について整理してきたが、以下では、従来の物理的寿命モデルに機能的なパラメーターを組み込み、製品の1ライフサイクルではなく更新やメンテナンスも含めたライフサイクルシミュレーションモデルを構築し、製品寿命についての考察を行う。

3. ライフサイクルシミュレーション

3. 1 故障率と寿命分布

製品の物理的寿命はばらつきがあり、このばらつきは製品の初期品質や使用強度など偶然性によって支配されるものであり、信頼性工学の分野では寿命分布として統計的にこの現象を取り扱っている。この寿命分布は様々なものが提案されている。本研究では、故障率の設定から導出される分布という意味で理解しやすく、汎用性の高いワイブル分布を採用してライフサイクルシミュレーションモデルを構築する。

ワイブル分布では、時間とともに変化する故障率 $\lambda(t)$ を時間 t の n 次関数として与える。故障率とは現在稼働しているもののうち、使用開始時間を 0 として、時間 t から $t+dt$ までの間に故障する確率を表している。この故障率から、時間 t の時点で故障していない確率（信頼度） $R(t)$ と、故障している確率（故障累積確率または不信頼度） $F(t)$ ($=1-R(t)$) を算出する。信頼度 $R(t)$ を時間 t で積分したものが平均寿命 μ であり、故障累積確率 $F(t)$ （または信頼度 $R(t)$ ）を時間 t で微分したものが故障確率密度関数 $f(t)$ である。

本研究で与える変数は、故障率 $\lambda(t)$ の時間 t に対する指数の値（すなわち n 次式の n の値）と平均寿命 μ の値の二つである。この設定値から寿命分布を算出することが可能である。故障率を一定 ($N=0$) にしたときは、寿命分布は指数分布となる。一般的に故障率を時間 t の n 次式で表現する故障分布はワイブル分布と呼ばれている。

$$\begin{aligned}\lambda(t) &= \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{F'(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d(\ln R(t))}{dt} \\ \therefore R(t) &= \exp\left(-\int \lambda(t) dt\right) \\ F(t) &= 1 - R(t) \\ f(t) &= \frac{dF(x)}{dt} \\ \mu &= \int_0^\infty R(t) dt\end{aligned}$$

図1 寿命に関する数式群

3. 2 メンテナンス活動の効果

メンテナンス（保守・保全）には、故障が発生する前に保全活動を行う予防保全と、故障が発生してから保全活動を行う緊急保全とに大別される。予防保全には一定時間ごとに行う時間監視保全と、状態を見ながら適宜行う状態監視保全があるが、一般消費者が使用する製品についてはこのような予防保全を行う例は少ない。リース式のコピー機などは予防保全が導入されている例であり、リース式のメリットは初期投資の分割ということだけでなく、予防保全の実施という要素も製品のライフサイクル管理という意味で大きなメリットである。しかし、本研究では現状の製品システムを想定するので、故障が発生した時の緊急保全を考える。

故障が発生したとき、一つの考え方は新品に交換することである。新品に交換することによってすべての劣化はリセットされる。二つ目の考え方は、修理とともに調整作業を行うことである。これは故障原因の修理を行うとともに、他の部分の清掃や調整という予防保全的な保全活動を行うことを指す。これによってその製品の故障率はそれまでの故障率の半分にまで低下するものとする。これは故障発生をトリガーとする一般的な予防保全に対応する考え方である。しかし、性能やエネルギー消費量による製品指標値はそのままとする。三つ目の考え方は、故障発生時に単純に故障箇所の修理をすることである。この場合、製品を使用し続けることは可能だが、故障率や性能などの製品指標値は、修理前と変化しないものとする。これは通常の事後保全に対応する考え方である。

3. 3 エネルギーロスと性能劣化の影響

使用時間の経過に伴い、次第に機能の劣化が生じる。本研究では、スペック低下機能の指標値として出力の低下（エネルギーロスの発生）と、製品の使用者に対する効用の指標値として効用ロスの2つを取り上げる。

前者の出力の低下は、追加的エネルギーの投入により仕様値の性能を確保する代わりに、直接的かつ追加的コストが発生するとして評価する。具体的には、寿命時に一定の割合の追加コスト（直接コスト）が発生するとし、新品時との内挿補完により劣化を定義する。

後者の効用の低下は、寿命時には稼働しても経済的価値がほとんど無いという現象を示すものだが、寿命設定時に効用ゼロという考え方は不自然で、使用している時間すべてについて、低下する効用を評価する必要があるので、設定寿命時に累積で100%の効用低下が生じるものとする。効用低下曲線は時間tの平方根に比例する関数とする。この劣化は間接的なコストで通常は明示的には発生しないものである。

3. 4 ライフサイクルシミュレーション

ライフサイクルシミュレーションは、製品の1ライフサイクルだけでないことが重要である。本研究においても、新品に交換するオプションを入れている。故障の発生したものは新品に交換されるため、故障率が0となる。すると市場に存在する製品群は最初は一様の故障率を持っているが、時間の経過とともに様々な故障率を持つ製品が存在することになる。様々な前提条件を数式的に記述しても、このような現象はシミュレーション手法を用いなければ、どのように振る舞うかを調べることはできない。調整作業を行い、故障率を半分まで低下させる手法についても同様である。

本研究では、この手法を用いて様々なメンテナンス活動の特性を調査するため、現実の製品のデータではなく、仮想の製品データを入力して、得られた結果の特性を考察することにする。故障率についてはtの0次（一定、指数分布）、1次、3次の3種類とする。平均寿命は10年とし、部品価格、交換作業価格、修理調整価格、単純修理価格、機会損失価格、定格消費電力、効用価格を設定して、シミュレーションを実行した。具体的な考察は次章に述べるが、故障率が時間の一次関数、故障時には新品交換する場合のコストを表に示した。縦軸のコストは製品一個、一年間の平均コストなので、最初に製品を導入した購入コストの内訳は、横軸の使用年数に反比例している。交換コストは故障発生とともに徐々に増加し、次第に安定状態に遷移する。効用、エネルギーなどのコストも製品の世代が終了する頃が一番大きくなるが、次第に安定状態となることがわかる（図2）。

4. ライフサイクルシミュレーションから得られる考察

4. 1 最適寿命設定

故障発生時に新品に交換する場合には、どのような故障率設定の場合でも、使用年数が長くなるにつれてコストは徐々に減少しやがて安定する。これは、本研究でのシミュレーションでは最初の購入時のインシヤルが必ず生じることから生じる現象である。新品に交換する場合は、平均交換周期は平均寿命に一致している。故障率がtの3次式の場合には、故障発生が平均寿命近くに集中するため、最初はある周期で交換が発生していることがわかる。しかし、次第に市場の中で平均化されて安定状態に移行していく（図3）。

表1 シミュレーションでのパラメータ

設定寿命	10年
初期投資	1,000円／個
交換修理	4,000円／個
修理＋調整	2,500円／個
修理のみ	2,000円／個
エネルギー	15,000円／個
効用	1,500円／個

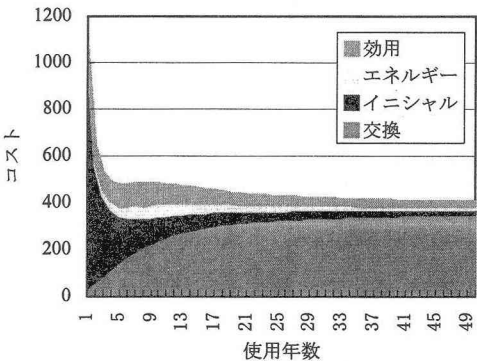


図2 故障率一次関数、新品交換時の結果

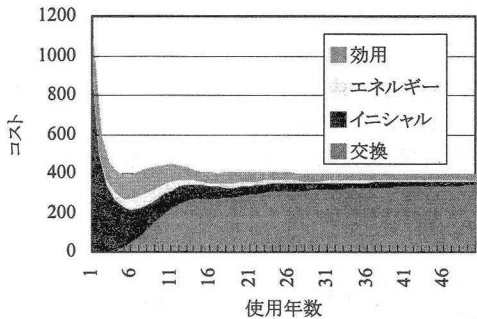


図3 故障率三次関数、新品交換時の結果

修理+調整の場合と単純修理の場合には、市場の中での製品は新品に更新されない。そのため、その製品の最適寿命についての考察が可能となる。単純修理の場合、故障率が一定の場合には修理コストも常に一定となる。最初の購入コストが使用年数にしたがって反比例するので、購入コストと修理コストだけを考慮する場合には長く使用の方がよいという結果が得られるが、性能劣化による追加的エネルギーコストや効用ロスなども考慮すると最適寿命は約7年となる（図4）。同様に、単純修理の場合の最適寿命を表2に示したが、どれも物理的平均寿命の10年よりは短いものとなっている。このことは、修理コストも考慮すると、物理的平均寿命よりも3割程度最適寿命は短いことを意味している。さらに性能や製品の効用を考慮した場合には、最適寿命はさらに短いものとなる。この事実は、故障率が一定でない限り、製品の寿命は物理的寿命より機能的寿命の方が短いということを表している。

修理時に調整も行い、故障率の改善（予防保全）を行う場合には、多少調整コストを高く設定（単純修理の25%増し）しても、単純修理の場合よりコスト的に悪くなることはほとんど無いことがわかった。これは、予防保全の効果が高いことを示している。

4. 2 新品交換と予防保全と定期点検のバランス

製品のライフサイクルで考えた場合、交換、メンテナンス、修理などのイベントをどのように組み合わせていくかということをライフサイクル戦略と呼んでいる。製品について故障特性を与えたとき、どのライフサイクル戦略が好ましいのかを判断することも重要な課題である。例えば、故障率が一次関数で表現される製品について、初期投資と交換・調整・修理などの作業のみのコストを取り上げて比較すると図5のようになる。これによると、故障が生じたときに新品に交換するよりは、修理をして使う方が好ましいということがわかる。また、その製品を平均寿命以上使用したいという場合には、同じ修理をするならば適切な調整やメンテナンス作業も同時に行った方が、好ましいことがわかる。

性能劣化や効用低下などの要素を入れて比較した結果（図6）によると、8年程度まではほとんど違いがないことがわかる。すなわち、性能劣化や効用低下が大きいものは、ほどほどの使用年数で更新していった方がよいのに対し、劣化の度合いが小さいものは適切なメンテナンスを行うことが重要であると言える。

これらのことから、本来想定されている物理寿命よりかなり早い時期に故障した場合には、初期不良的な要素が大きく故障箇所だけを単純修理することが好ましいが、ある程度の使用時間を過ぎたら、適切な予防保全を含

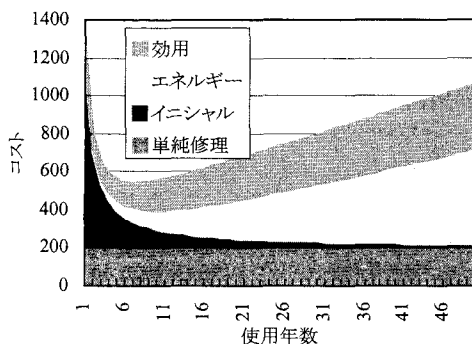


図4 故障率一定、単純修理時の結果

表2 単純修理の場合の最適寿命

故障率	最適寿命	
	製品のみ	全コスト
一定	×	約7年
一次関数	約8年	約5年
三次関数	約7年	約5年

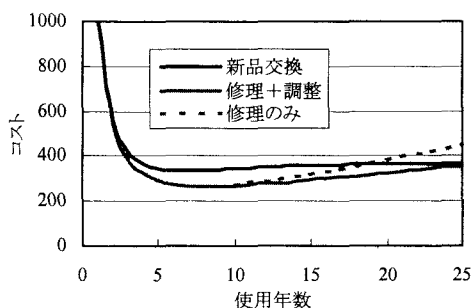


図5 故障率一次関数、製品のコスト

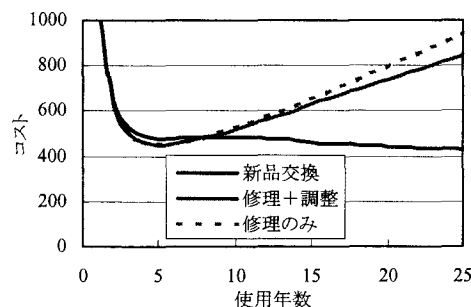


図6 故障率一次関数、すべてのコスト

む修理を行い、物理寿命の7割程度の機能寿命となったときには新品に交換することが肝要であることが明らかになった。

4. 3 ライフサイクル戦略の方向性

これまでのメンテナンス活動は、物理的な故障に対して修理を行い、故障率を低下させるという活動であった。しかし、技術進歩の早い社会の中では相対的な性能も含めた性能劣化や、意匠なども含めた効用低下などが大きく、機能的寿命の方が短いという特徴を持っている。

このような状況で必要なのは、従来の物理的な故障率の改善というメンテナンス活動から、アップグレードや再加工（リマニュファクチャリング）のような機能的なパラメーターの改善というメンテナンス活動が必要になっていることがわかる。今回の設定では機能的寿命は物理的寿命の7割程度であったが、これが5割程度となるように、物理的寿命を長くするか、機能的寿命を短くすることによって、製品や部品の再利用という戦略が明確に浮かび上がる。この場合も機能パラメーターの改善を目的とした保全活動を行う必要がある。

ライフサイクル戦略の方向性としては、性能劣化や効用低下を考慮し、故障率改善だけでなく機能改善も含めたメンテナンス活動の適切な組み合わせを行うことが必要となる。現実には、製品は複数の部品から構成されており、部品はそれぞれ性能的、物理的特性値を持っており、最適なライフサイクル戦略というのは部品の組み合わせによって様々なバリエーションがあると考えられる。これをある程度整理し、ライフサイクル管理に役立つようなロジックを明らかにする必要があるだろう。

表3 ライフサイクル戦略の方向性

	物理的寿命	機能的寿命	経済的寿命
定義	物理的に稼働できない状態になる	要求される機能が十分に発揮できない	新品に更新した方が近い将来的に経済的となる
原因	摩耗 材料劣化	要求機能の向上 機能劣化	使用・維持費用の増大 新品の価格低下
対策	耐久性材料 経過時間と使用時間の整合性	機能アップグレード ソフトウェアアップグレード	

5. 今後の課題

本研究で用いたライフサイクルモデルはまだ開発途上にある。徐々に精緻なものに仕上げていく必要があるが、前項で示したような興味深い示唆も得られた。従来の同様の分析は製品の一回のライフサイクルだけを対象とする場合が多かったが、更新プロセスを組み込むことによって、より現実的なシミュレーションを行えるようになった。今後は、修理単価などのコストパラメータについての感度解析や、複数の部品で構成された製品の場合の分析を進める必要がある。また、現実の製品データを入手し分析を行い、本モデルの妥当性を確認することも重要な課題である。

6. 参考文献

- 1) 市川昌弘「信頼性工学」裳華房、1990
- 2) 加藤悟「メンテナンス工学の体系化に関する基礎的研究」土木学会環境システム研究 25、pp491-496、1997.10
- 3) T.Hata, S.Kato, H.Sakamoto, F.Kimura, H.Suzuki "Product Life Cycle Simulation with Quality Model" CIRP 7th International Seminar on Life Cycle Engineering(投稿中)2000.11 (予定)
- 4) 加藤悟、木村文彦、鈴木宏正「製品ライフサイクル評価のためのライフサイクルコストニング」1999 エコデザインジャパン要旨集、1999.12
- 5) F.Kimura, H.Suzuki: Product Life Cycle Modeling for Inverse Manufacturing, in "Life Cycle Modeling for Innovative Products and Processes", ed.F.L.Krause & H.Jansen, Chapman & Hall, 1996, pp.80-89