

メンテナンス工学の体系化に関する基礎的研究

Toward Systematize of the Maintenance Engineering

加藤 悟*

Satoru KATO*

ABSTRACT: The maintenance of the social infrastructure is not a new concept. The maintenance becomes highlight as resource conservation and environmental protection are important issues. As maintaining the products or machines is additional human work, so it is considered a necessary evil. But for increasing the reliability of the artifacts, the maintenance becomes a very important activity.

The maintenance is one of the reconsideration on traditional technology trends. Mass production/ mass consumption made activate the economy, but it produced much waste. The maintenance will contribute to reduce the human impact to the environment. So it is one part of "inverse manufacturing".

The maintenance do not always have good effect. In some case throwaway system is better than maintain. Especially the case that merit of scale is strong, and that technological innovation happens. The type of maintenance is different as speedy maintenance after failure or prevention failure.

Towards the aged society, the automatic maintenance technology is being developed. The maintenance contains as follows; prevent the failure, find the failure, make temporary repairs, make regular repairs, design without failure using analysis the failure pattern, recycle parts(or products).

The "Maintenance Engineering Laboratory" was established in the University of Tokyo. The systematize the maintenance technologies which various companies have is one of the way to spread the maintenance activity.

KEYWORD: Maintenance, Life Cycle Engineering, Environmental Policy, Urban Infrastructure

1. メンテナンスとは

我が国をはじめとする先進工業国においては、交通、通信、都市施設などのインフラの整備が進み、成熟社会に向かっている。もちろん情報通信に関するインフラ整備は整備途上であるし、従来のものを環境保全型のインフラへ転換することは重要な課題ではある。しかし、建設費や人件費の高騰から新規に整備していくことも困難な状況になりつつある。このような状況の下、現存するインフラの機能をいかに「維持」していくかが今後重要なテーマになると考えられる。また、インフラのような社会資本に限らず、産業用機械や民生用の製品についても、新機能の進展速度は従来に比べて遅くなり、材料等の耐久性も向上するなど、長寿命の製品デザインに向けての環境は整備されつつある。

これからのシステム設計、製品設計は、効率よく質の高いものをつくれば良いというものから、システムや製品のライフサイクル管理も含めたものが必要となる。それはシステムや製品がそのサービスを供与している期間の管理であり、本来ならば一つの産業分野として市場と雇用を創出する活動である。

このような活動をここでは広くメンテナンスと呼ぶことにする。まず、長寿命設計やメンテナンスフリーの設計

*東京大学大学院工学系研究科 Graduate School of Engineering, University of Tokyo

があげられる。メンテナンスフリーはメンテナンスと相反する概念のようだが、消耗部品などを減らしたり、故障率を減らすことは、製品のライフサイクル設計やメンテナンス思想においては、重要な概念と言える。次に、部分的に、部品の交換等を容易にするような設計（モジュラー設計）がある。ここでは、一つのシステムや製品に寿命が異なるものを包含せざるを得ない場合、部分的交換によって、全体の機能を維持するというものである。最後に、システムや製品としての寿命を終えたとき、部品としての再利用や、素材としてのマテリアルリサイクル、エネルギーとしてのサーマルリサイクルなど、適切な最終処理もメンテナンス思想の一つと位置づけている。

2. メンテナンス工学の役割

最近の環境、資源、安全に対する問題意識の高まりは、システムや製品に対する評価基準を変えつつある。現在注目されているライフサイクル分析は、システムや製品をつくる際に必要なエネルギーや資源の量、さらには、使用後に廃棄された場合の環境へのインパクトをも考慮に入れるために必要な評価ツールとなっている。このライフサイクル分析に、従来から機械工学の分野で使用されてきた信頼性の分野で使用されてきた機能やリスク、という概念を取り入れることによって、メンテナンスの評価ツールとして活用することができる。

従来から、工学の分野では、出力を入力で除して求めることのできる「効率」という概念が評価項目として用いられてきた。この効率の単位は、エネルギー変換分野ではエネルギー変換効率、物量ベースであれば資源利用効率、経済ベースであれば経済効率というように、さまざまに応用可能な指標であり、無次元化することで、さまざまな分野間での比較も可能という意味で、普遍性の高い指標といえた。しかし、この「効率」という概念は、「時間ずれ」の概念が入りにくいものであった。ある時間断面におけるインプットとアウトプットのパフォーマンスであり、系の中での滞留時間が表現されにくかった。現在世代における機能と将来世代における機能の違いや、機能を維持する活動にかかる要素を考慮しなければメンテナンス概念は確立しない。

システムや製品は人間の生活をより豊かにするものとしてつくられてきた。人間の重労働を軽減したり、人間の活動を支援したりしてきた。その結果、物的豊かさについてはかなり向上し、今度は、質的豊かさが求められる社会となってきた。システムや製品の主要な開発目的が人間の活動支援であったからこそ、人間は、システムや製品からサービスを一方的に享受する存在として独立することになった。人間の側がシステムや製品に対してサービスすることは、そのシステムや製品が未完成であるというように低く評価された。すなわち、メンテナンスについては「必要悪」と捉えられてきた。人間は何も手をかけず、故障等あれば新規に更新することが良いこととされてきた。また、安全性を確保するためにフェイルセーフ機能を付加することで、本来の寿命を短くする行為も日常的に行われている。

さらに、メンテナンス概念によって「所有」に関する概念が問い直されることになる。個人的な所有物はどこまでの範囲なのかということである。システムや製品を「所有」という行為は、システムや製品という物質を所有しているのではなく、そのシステムや製品の持つ機能を所有しているという面もある。だとすると、従来はシステム構築時や製品購入時のインシャルコストが大きくなり、その後のコストはほとんど必要のないものと考えがちであった。メンテナンスは、実はランニングコストと関係するものであり、従来の社会システムではメンテナンスにお金をかけるというのは成立しにくかった。例えば、レンタル&リースシステムにおいては、利用者はインシャルコストゼロで、サービスのみを購入することができる。リース会社は、機能を重視するためにメンテナンスを推進することになる。機能は所有しても、そのものは「借り物」という所有形態になれば、使用方法が良くなったり、不要品のリサイクルも活発になるだけでなく、メンテナンス行為に付加価値の生産という正当な価値が与えられることになる。

すなわち、メンテナンスと呼ばれる行為は、単に資源・環境問題解決に寄与するだけでなく、ストック資源に対する積極的評価、システムや製品設計の理念変更、さらには、社会の中での「所有」概念を変化させることに関係する行為と位置づけることができる。

3. メンテナンス工学の位置づけ

メンテナンス工学も、技術の見直しの動きの中の一つとして位置づけることができる。技術と社会の詳細な関係性については議論が続いているところだが、社会・経済的な要請に技術を適合させるよう努力されてきたことは間違いない。

まず、最初の技術再評価の動きは、アメリカで1966年に提唱された「テクノロジーアセスメント」である。時代背景には、技術の大規模化やブラックボックス化による人間性の疎外、生産と消費の分離、社会的不公平の表面化などがあった¹⁾。そして、この時期に「代替技術(alternative technology)」が発生し、A.ロビンスの「ソフトエネルギーパス」、E.F.シューマッハ²⁾の「適正技術(appropriate technology)」、J.E.ラヴロック³⁾の「ガイア理論」も提起された。

シューマッハの議論は、技術の大規模化による工場の都市集中現象に対して、農村や小都市にどのように雇用を確保するかということであった。そのため、仮に技術の水準を「仕事場あたりの設備費用」で定義した場合、この費用が巨額すぎず、低額すぎない適正な規模であるべきだという議論であった。

これに対して、ロビンスの議論は、非常にエネルギー集約度の高い化石燃料だけに頼るのではなく、身近なエネルギーを利用することを前提にした上で、現代文明の速度にブレーキをかけようとするものと解釈できる。

しかし、この当時の議論は、その後の工業技術の急速の進展と経済発展により、提起した問題は掻き消される形となった。その後、オイルショックや資源枯渇問題が提起されたが、これらは「効率」の向上をはかるという技術のお家芸として、省エネルギー技術や省排出技術としてクリアーしてしまい、当時の問題は解決されないままに放置されたばかりか、さらに技術は巨大化し、廃棄物処理問題や地球環境問題に発展したと言える⁴⁾。

1990年代に入って、再び技術の見直しが進められた。それらは、土木の分野ではエコシビルエンジニアリング⁵⁾、機械の分野ではインバースマニファクチャリング⁶⁾、国連大学ではゼロエミッション⁷⁾、土木研究所ではオーガニックエンジニアリングなどと呼ばれ展開されてきた。

ここで提唱する「メンテナンス工学」は、生態系まで対象を広げていないことから、いわゆるエコ技術ではない。生態系を対象からはずすことによって、より定量的で確実な制御を行うことを重視している。したがって、静脈産業の技術的核となるインバースマニファクチャリングや、産業間連携等によってある産業の廃棄物を他の産業の投入にするゼロエミッションの概念に近い。メンテナンス工学は、システムや製品の供給する機能を維持・保証するとともに、故障や寿命によってその機能を供給することを放棄した時、リサイクルや最終処分が適正に処理されることを考慮に入れて設計、生産、使用の各行為が行われていることにある。ここでは、人間が享受していたサービスレベルを極端に低下させることなく、環境インパクトを低減させることが目標となる。

「メンテナンス工学」は、いかにうまくシステムや製品を、資源・環境を最大限保全し、社会的に合意を得ながら、安全に使用していくことに重点が置かれる。システムや製品の持つ機能を享受する人間とともに取り扱うところに、メンテナンス概念の独自性があると考えている。

4. メンテナンス工学の評価軸

4. 1 システムや製品の寿命

メンテナンスにおいては、システムや製品のトータルライフサイクルを考慮するため、それらの寿命がどのように決定されるかが重要なポイントとなる。システムや製品が新規のものに更新するのは、物理的に壊れた場合（物理的寿命）だけではない。現在のシステムや製品を維持するコスト（メンテナンスコスト）よりも、新しいものの方がコストが安くなった場合（経済的寿命）や、機能が新製品に比べて古くなってしまった場合（機能的寿命）などがある。ここでは、3つの寿命に分けて寿命決定プロセスを説明する。

4. 2 経済的寿命

鉄道、電気、水道、ガス、通信などの大型社会資本に関連する分野においては、故障が発生しても、全部品の交換は多額のコストがかかることから、メンテナンス活動が進んでいる分野である。これらの分野は、システムが大

規模であること、システムの構築にかかる費用（初期投資）が巨額であること、システムが機能する期間が長期間であること、社会にある総数が少ないことなどの特徴がある。これらの分野は、システムを新規に構築するよりも、部分的更新をした方がトータル費用が安くなる分野であると言える（図1）。

逆に、初期投資が小さく、システムが機能する期間が短く、社会での総数が多いような分野では、ストック型というよりフロー型であり、メンテナンス行為によって利用し続けるよりも新規にした方がよいとされてきた。これらは消耗品といわれるもので、最近の家電や自動車にもこの傾向がみられる。

また、最近の工業技術は製造コストの削減は大きなテーマになっており、製造コストが低下した。一方メンテナンスコストは労働集約的な作業をと

もなうことから、人件費の高騰などを受けて上昇した。このこともメンテナンスから新規購入が選択されている原因の一つである。経済的寿命を延ばすためには、メンテナンスコストを低下させることが主要な課題となる。そのためには、メンテナンスの機械化・自動化などの技術開発が必要となる。

製造メーカーからすると、いかに利益率をあげるかが主要なテーマとなる。メンテナンスは労働集約的な仕事になるが、結局サポート体制から見ると人件費は固定費となり、小回りが利かないばかりか、大きな利益率を望むことはできない上、競争原理も働きにくいことがネックとなっている。消費者や利用者は、ランニングコストよりはイニシャルコストの方が敏感である。メンテナンスコストをイニシャルコストに転換しても初期価格が高いと、選択しないという行動パターンがある。そのため、寿命を長くする方に誘導するのは難しいというのが実状である。

4. 3 物理的寿命

水道設備や送電設備においては、ユーザーの必要とするサービスレベルに対して対応できる設備を持つシステムにおいては、既存設備のメンテナンスが行われる。すなわち、これらの場合の寿命は、物理的に破損したり劣化することによって決まる。

この破損や劣化が、システムの部分で発生する場合も同様であるが、この場合、一部の部品交換によって全体の寿命は延命できる場合と、一部の寿命が全体の寿命になる場合もある。例えば、ビルの窓枠が破損した場合には、窓枠のみを交換することで対処可能だが、ビルの主要な柱にヒビが入れば、もう使用することは危険である。これは、システムを構成する部分の機能の階級が存在することに起因する。

この場合において寿命を延ばすための方策は、素材の長寿命化と、短命部品の可交換性である。

4. 4 機能的寿命

機能は絶えず進化している。成熟社会に向けて、技術革新の速度は緩やかになってきたとはいえ、家電製品のエネルギー利用効率は確実に上昇し続けている。

冷蔵庫や自動車のライフサイクルエネルギー分析の結果をみると、製品一つを生産するエネルギーに比べ、使用する期間全体で使用するエネルギーの量の方がはるかに大きい⁸⁾。エネルギー効率の高い製品が開発された場合、エンジンやコンプレッサーなどをメンテナンスによってアップグレードさせられない場合には、そのまま使用するよりも新規購入の方が合理的な選択となる。

コンピューター市場もその例で、機能の進展が急速なため、メーカーの出す新製品は3か月で型落ちになり、半年すれば原価を割るとも言われている異常な市場を形成している。そのため、アップグレード補償などの試みは行われているが、技術的にも社会的にもあまり受け入れられていない。社会インフラの分野では、機能が比較的単純で機能進化のペースは鈍く、機能的な寿命は長くなり、メンテナンスの可能性が高くなる。

技術革新による新機能は、メーカーにとっては一つの付加価値であり、新製品を販売する際の重要なポイントと

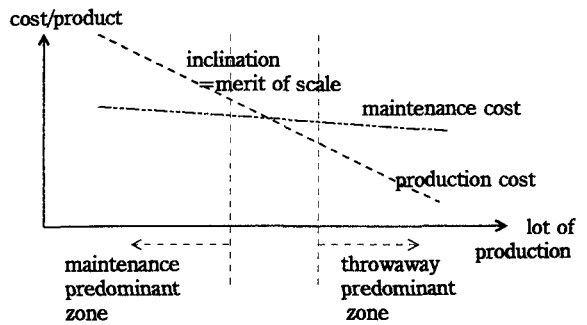


図1 費用効率性とメンテナンス

なっている。ここには、製品の本来の機能進展と、ニーズオリエンテッドでマイナーな機能進化とがある。ここには、最高性能を求める消費者という市場に対し、多額の研究開発費を投じ、それを回収すべく広告をし、さらに消費者を刺激するという循環を繰り返しているようにも見える。

この場合、ニーズオリエンテッドな機能を販売しているのであって、商品全体を販売しているわけではない。アップグレードできるようなシステム設計をすることで、企業としても利益率が確実に上げられ、その分製品価格を下げればシェア争いにも優位になる。さらに、顧客の囲い込みも可能となれば、メンテナンス社会に向けての可能性も開けてくる。

4. 5 技術革新の影響

技術革新は、メンテナンスコスト削減にとっても、環境保護にとっても、サービスレベル向上にとっても必要不可欠な要素と考えられる。地球環境問題においても、技術革新に期待されている部分は少なくない。

しかし、上記の議論より、機能的寿命は短くなる。また、コスト削減効果についても、製造コスト削減効果のみ生じれば経済的寿命も短くなる可能性がある。逆に、長寿命材料等の開発によって物理的寿命は長くなる。メンテナンス活動の技術革新が進めば経済的寿命は長くなる可能性がある。

したがってこれからの社会は、機能重視の社会になっていくことが予想される。したがってメンテナンスの役割は、機能寿命を延長させるためのモジュラー技術や、メンテナンスコストを低下させるための技術が必要となると考えられる。

最後に、システムの信頼性をどう確保するかである。対象とするものがシステムであれば、全体システムを構成するサブシステム、最終的には部品一つまで機能の分解が可能で、それぞれの部品の寿命がある。ライフライン等のシステムの場合、信頼性を確保するためには部品冗長が必要となり、バックアップのためのシステムがより大きくなる上に、バックアップシステムの信頼性の確保も必要となってくる。故障した場合のメンテナンス方法も、限られた時間、限られた方法で行うことになる。これに対して、航空機などのメンテナンスでは、「故障」自体を回避する必要がある、フェールセーフ機能を付加し、わざと軽微な故障を発生させている。

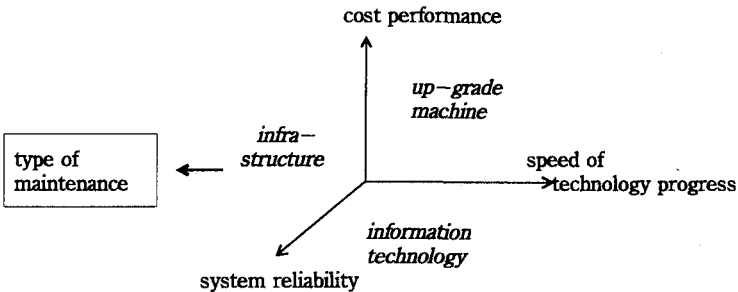


図2 メンテナンスを評価する軸

故障した場合のメンテナンス方法も、限られた時間、限られた方法で行うことになる。これに対して、航空機などのメンテナンスでは、「故障」自体を回避する必要がある、フェールセーフ機能を付加し、わざと軽微な故障を発生させている。

このように、メンテナンスは、製品の寿命を延ばすための使用管理行為、故障を未然に防ぐための行為、故障を発見するための行為、故障した場合の機能維持行為（信頼性）、修繕を容易にするシステム設計、省メンテナンスのための行為などさまざまな手段がある。そのうちどの手段を用いるかは、そのシステムの費用効率、技術革新の度合い、信頼性の容認度によって異なることがわかる（図2）。

これらの評価項目を定量的に把握し、それらの項目とメンテナンス手法の関係を見だし、システムに最適なメンテナンス手法を発見することが今後の課題となる。

5. メンテナンスの実際

メンテナンスの重要性についてはある程度理解されているものの、労働形態の変化はメンテナンスをより困難にしている。高齢化社会、少子化社会に移行し、さらに労働時間の短縮、労働嗜好の変化が発生し、労働集約的な（3K作業）労働であるメンテナンスワークは回避したいことのひとつである。東京都水道局では、職員約6,000人の平均年齢は42歳で、職員の年齢構成から推測すると今後はさらに上昇する見込みである。東日本旅客鉄道株式会社では、メンテナンスが営業経費の3分の1以上、職員の約半分を占めていると言われ、「メンテナンスの技術革新こそが鉄道の未来を変える」というスローガンもあるほど、メンテナンスフリーやメンテナンスロボットの開発に向

けての努力が行われている⁹⁾。

東京ガスでは、法定で定められた検査の他に自主的な定期検査を頻繁に行っている。例えば、導管の漏洩検査は、高圧のもので年1回の点検が法律で義務づけられているが、自主的に巡回点検を毎日行っている。東京ガスにおけるメンテナンス技術の開発テーマは、①迅速な漏洩箇所特定技術、②簡易な漏洩修理技術、③効率的な非開削工法、④正確かつ迅速な管内診断技術である。ここでは、いかに故障を未然に防ぎ、発生した故障に敏速に対応するかというセンシング技術とメンテナンスコストの削減が中心テーマになっている。

現在メンテナンスが行われているのは、社会資本を扱っている分野が多く、「機能維持のメンテナンス」という側面が強い。機能維持のためのメンテナンスの場合、大きく分けると故障に対処するプロセスと、修繕行為を適正化するプロセスがある。前者のプロセスが狭義のメンテナンスに当たり、ここでは「故障」をどう見なすかがポイントとなる。故障を未然に防ぐもしくは故障を最小限に押さえるならば点検、故障をやむなしと捉えた緊急修理、計画的に故障を予防するためにこれまでの故障経験知識ベースと連携させた計画修繕¹⁰⁾がある。リサイクルにも近い広義のメンテナンスは、故障部品交換のための分解容易な設計、リバースロジスティクスなどの取り組みもメンテナンスに含まれる(図3)。

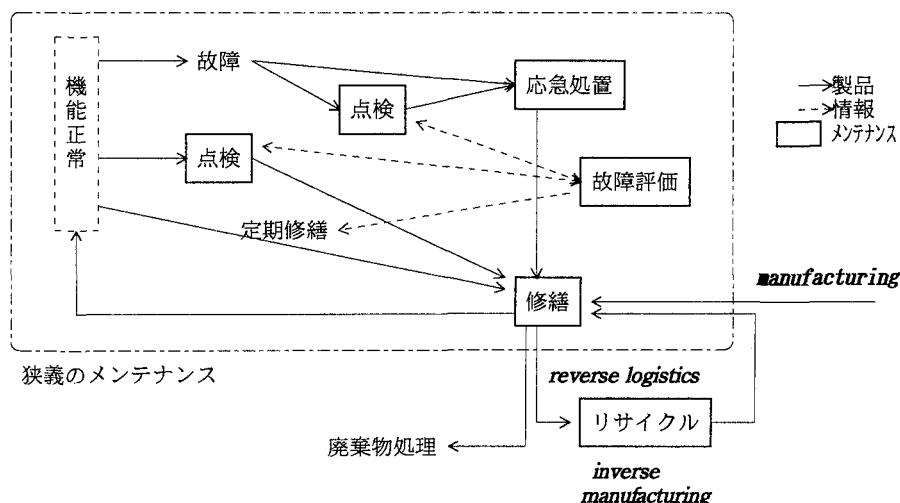


図3 メンテナンスの内容

<追記>

平成9年4月より3年の間、東京大学大学院工学系研究科に東日本旅客鉄道株式会社（JR東日本）の寄付によって「メンテナンス工学」が設立された。これは、かねてからメンテナンスの重要性を提唱した東京大学前総長である吉川弘之氏の趣旨に賛同した多くの企業のニーズに基づくものである。

メンテナンスは、一つの技術体系と捉えることができる。そのため、さまざまな企業の中にあるメンテナンス技術を収集することから始めることが重要である。その意味で、必然的に学際的色彩を持たざるを得ない。それぞれの分野で使用されている概念や言葉を整理し、情報交換を行うことが重要である。その意味で、本稿や今後の取り組みに対してもさまざまな角度からの指摘やご意見を期待してやまない。

<参考文献>

- 1) 内藤正明(1991)「人間・環境系」の新たな理念、環境科学会誌 4-1
- 2) E.F.シューマッハー(小島慶三、酒井懋訳)(1986)スモールイズビューティフル、講談社学術文庫
- 3) J.E.ラヴロック(スミ・ブレイム・ブア訳)(1979)地球生命圏、工作舎
- 4) 内藤正明(1992)エコトピア、日刊工業新聞社
- 5) 土木学会(1993)エコシビルエンジニアリング読本
- 6) 吉川弘之(1993)テクノグローブ、工業調査会
- 7) 三橋規宏(1997)ゼロエミッションと日本経済、岩波新書
- 8) 稲葉敦(1996)耐久消費財としての家電製品—冷蔵庫—(LCAセミナー資料)(社)環境情報科学センター
- 9) (社)科学技術と経済の会(1996)メンテナンスの体系化に向けて
- 10) 富山哲男(1994)Knowledge Intensive Engineeringの提案、日本機械学会第4回設計工学・システム部門講演会論文集