

## ライフサイクルメンテナンス

早稲田大学 創造理工学部 経営システム工学科 教授

高田 祥三

### 1. はじめに

私たちの生活は、直接間接に様々な設備に支えられています。家庭、オフィス、店舗、工場などの個々の空間を支える設備から、電力、上下水道、交通、通信などのネットワークを支える設備まで、多種多様な設備が機能する中で、日々の活動を営むことが可能になっています。いうまでもなく、そのような設備が要求された機能を発揮し続けていくためには、適切なメンテナンスが必須です。多くの設備で、ライフサイクルコスト(LCC: Life Cycle Cost)を計算してみますと取得コストより運転とメンテナンス(O&M: Operation and Maintenance)のコストの方がはるかに大きくなっています。今後、我が国がますますストック型社会になっていくことを考えると、メンテナンスをいかに効果的かつ効率的に行っていくことができるかは、社会の大きな課題と言えます。

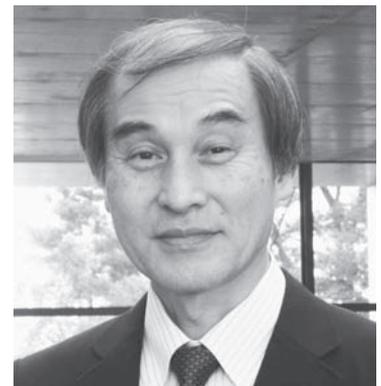
一方、資源環境問題の観点からもメンテナンスの重要性が高まっています。これまでの大量生産・大量消費・大量廃棄の生産様式が、地球温暖化や資源枯渇等を招いた原因の一つと言えますから、それを環境調和型に変革していくことは喫緊の課題です。そのためには、製造業の役割をものの提供から機能の提供に変革し、ものを循環させながら機能を更新していけるような仕組みを実現する必要があります。このような生産の姿は、循環型生産と呼ばれます。その中で最も内側の循環がメンテナンスになります。したがって、これからはいかにものを作らないで済ますかを考えるべきであり、その意味で、メンテナンスフリーではなく、プロダクションフリーを目指すべきと言えます。

これら、ストック型社会、あるいは資源環境問題への対応としてメンテナンスを考える上では、設備ライフサイクル管理の概念が重要です。すなわち、設備のライフサイクルを通じてその機能を効果的に発揮させるための手段としてメンテナンスを位置づけ、その効率化、高度化を図る必要があります。このような観点から私どもはライフサイクルメンテナンスという概念を提唱しています。以下に、その概要を紹介しますので、これからのメンテナンスのあり方を考える上での参考にしていただければ幸いです。

### 2. 設備のライフサイクルメンテナンス

#### 2.1 メンテナンス概念の発展

これまでのメンテナンス概念の発展を振り返ってみると、1950年代以降の信頼性工学の発展を基礎とした時間基準に基づく予防保全概念の確立、1970年代以降の設備診断技術の発達に基づく状態基準保全あるいは予知保全概念の確立、さらに、80年代から90年代にかけて産業界



### Profile

#### 略歴

1949年	東京都出身
1972年	東京大学工学部 精密工学科 卒業
1974年	東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専門課程 修士課程 修了
1978年	東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専門課程 博士課程 修了
1978年	東洋大学工学部 機械工学科 専任講師
1980年	東洋大学工学部 機械工学科 助教授
1980年	シュトゥットガルト大学客員研究員
1990年	大阪大学工学部 電子制御機械工学科 助教授
1992年	早稲田大学 理工学部 工業経営学科 教授
現在	早稲田大学 創造理工学部 経営システム工学科 教授

#### 主な役職

日本機械学会フェロー、精密工学会フェロー、国際生産工学会アカデミー(CIRP)理事、日本設備管理学会関東支部長、精密工学会ライフサイクル専門委員会委員長

に普及し始めたRCM (Reliability Centered Maintenance)、RBM (Risk Based Maintenance) に代表される最適保全概念の確立というように発展してきました。このような流れを踏まえて最近のメンテナンスに関する議論を見てみますと、以下の3点が重要になっていると思います。

第1点が、運転とメンテナンス (O&M) の統合です。そもそもメンテナンスの目的は、設備の運転によって作り出される価値の最大化であるべきですから、それが達成できるように運転とメンテナンスの最適化を図るべきです。運転とメンテナンスの間には、設備状態を通じた関係とスケジュール上の関係があります。前者は、運転は設備劣化状態を促進し、メンテナンスはそれを回復するという互いに逆向きの関係になります。後者は、一般的には両者を同時に行うことができないことによるスケジュール上の制約関係です。したがって、これらの関係を考慮したO&M統合計画・管理が必要になります。

第2点が、ライフサイクルの評価です。O&Mは、メンテナンス管理の視点を対象アクティビティの面から広げたとはいえますが、さらにライフサイクル軸方向にも評価の範囲を広げて最適化を図っていこうというものです。ライフサイクル視点の重要性は、1970年代にLCCの議論が盛んになって以来認識されてきました。最近、それが特に注目を集めるようになってきているのは、コストに加えて資源環境面でもライフサイクルの評価が求められるようになってきていることがあります。また、ビジネス面でも、従来の売切り型のビジネスから、メンテナンスを含めてライフサイクル全体を囲い込んだビジネスの展開が重要になっていることもあります。

第3点は、ICTの活用です。これについても、設備診断への知識工学の適用や、ネットワークを利用したりリモートメンテナンスなどはかなり以前から議論されています。しかし、これらは、必ずしも広く普及しているとは言えません。ところが、ユビキタス、あるいはクラウド時代に入って、どこでもネットワークへの常時接続性が担保されるようになってくると、それを前提とした、スマートコミュニティ、スマートファクトリ、スマートステーションなどが実現可能になり、そこに、これまでに開発されてきたICT応用のメンテナンス技術を組み込むことが容易になってくると思われれます。

## 2.2 ライフサイクルメンテナンスのフレームワーク

以上述べた、社会的、技術的背景を考えたとき、これからのメンテナンスとして重要なことは、設備ライフサイクルのすべての段階を通じてその設備が生む価値をプラス面もマイナス面も含め評価し、最適なメンテナンス管理を実現することです。このようなメンテナンスのことを我々はライフサイクルメンテナンスと呼んでいます。<sup>1)</sup>

ライフサイクルメンテナンスのポイントは、BoL (Beginning of Life)、MoL (Middle of Life)、EoL (End of Life) を総合的に考える点にありますが、メンテナンス管理という点では、PDCAを回して常に改善を図っていく通常の管理活動と大きな違いはありません。基本的なステップは、(1) 評価項目

を定める、(2) ライフサイクル戦略を定める、(3) 最適なメンテナンス計画を立案する、(4) 実績に基づいて改善を行える管理ループを確立する、の4ステップです。

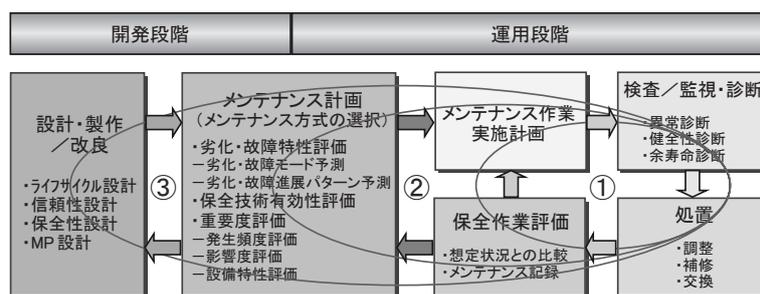
(1) の評価項目の設定とは、ライフサイクル管理の最適化のための目的関数を定めることで、前述のO&Mの視点からは、予防保全や事後保全費用だけでなく、故障や設備停止にともなうすべてのロスを含めることが重要です。例えば、生産設備であれば生産ロスや納期遅れの影響を、また、駅やビルの昇降設備であれば利用者への影響を定量評価する必要があります。また、資源環境問題の視点からは、LCA (Life Cycle Assessment) による環境影響評価を組み込むことが必要です。

(2) のライフサイクル戦略とは、寿命をどのくらいに想定するのか、EoL段階でどのような処理を想定するのかなどの、次のステップの最適メンテナンス計画立案の前提となる基本方針を定めることです。(3) の最適メンテナンス計画の立案では、まず、メンテナンスの単位となる設備の部位ごとに、運用中に受けるストレスとそれによって生じる劣化・故障を、設備の構造および動作と、運用条件、運用環境などに基づいて推定します。その結果から、やはり部位ごとに、事後保全、時間基準保全、状態基準保全、機会保全などの各種メンテナンス方式の中で技術的に意味のあるものを選択し、それらを組み合わせて最適なメンテナンス計画を立案します。技術的に意味があるかどうかというのは、例えば、偶発故障に時間基準保全は、あるいは突発故障に状態基準保全は無意味であるといったことです。RCMやRBMなどの手法はこのメンテナンス計画の立案のための手法として位置づけられます。

ただし、最適なメンテナンス計画といっても、将来発生するであろう劣化・故障の予測に基づいて計画するものですから、実際に設備を運用してみると、予測と異なったことが起きる場合が多々あります。また、設備の使用目的の変更により想定した運転条件が変わってしまうことも当然考えられます。ライフサイクルメンテナンスにおいては、このような事態に柔軟に適應できる仕組みが必要です。これが(4)の改善のための管理ループに当たります。図1がこのような管理のフレームワークを示したものです。この図には、メンテナンス計画を中心とした3つの管理ループが示されています。

最も内側のループ (図の①の矢印) が、メンテナンス作業実施のためのループです。ここでは、メンテナンス計画で設定されたメンテナンス方式に基づいて検査・監視・診断および処置などのメンテナンス作業計画が立案され実施されます。メンテナンス作業の結果は、メンテナンス計画時に想定された状況 (劣化の進展速度や故障の発生形態など) に照らして評価され、結果が想定した状況の範囲内であれば、そのまま次のメンテナンス作業計画に移り、作業の実施・評価が繰り返されます。

評価の結果、想定した劣化・故障の発生状況と実際が異なっていたり、想定外の劣化・故障が発生していたりして、設定されているメンテナンス方式が妥当でないと判断された



3つの管理ループ：①メンテナンス作業管理のループ  
②基本保全計画を含むループ  
③設備改良を含むループ

図1 ライフサイクルメンテナンスのフレームワーク

場合は、メンテナンス計画段階に戻り、運用段階で得られたデータを考慮してメンテナンス計画を改訂し、再びメンテナンス作業実施のループに戻ることになります。これが、メンテナンス管理の第2のループ(図の②の矢印)です。

一方、基本メンテナンス計画の中で、改良保全が適当と判断された場合には、左側の開発段階に戻って設備改良を行うのがメンテナンス管理の第3のループ(図の③の矢印)です。

### 2.3 ライフサイクルメンテナンスの適用例

以上のフレームワークの適用例として、研究レベルのものではありますが、ビル空調設備で冷温水流量の制御に使用されるバルブアクチュエータの例を簡単に紹介しておきます。<sup>2)</sup>バルブアクチュエータは、文字通り、流量を変化させるバルブ部とそれを駆動するアクチュエータ部からなっており、現行のメンテナンスとしては、1年周期の定期検査と15年周期の定期交換が行われています。考えられる劣化・故障モードとしては、バルブ部の異物噛みこみといった偶発型のものもありますが、大半は、モータ軸受、ポテンシオメータ、歯車、シーtring、グランドパッキンの摩耗といった劣化進展型のもので、このような劣化に対しては、例えば接触圧力と累積すべり距離から摩耗量を推定するといった劣化進展モデルを構築することが望ましいのですが、バルブアクチュエータの例では、そのためのデータが得られませんでした。そこで、このような故障物理的なアプローチではなく、確率統計的なアプローチとして、故障分布をフィールドデータから求めることにしました。具体的には、ワイブル分布を仮定し、設置日、故障日、故障理由からなるフィールドデータを用いて各故障モードに対して故障分布を推定しました。

次に、メンテナンスの有効性を評価するための評価項目を図2のように決めました。一般に、評価項目は、影響を受ける対象と影響の種類のみを組み合わせで考えることができます。この場合は、事後保全と予防保全からなるメンテナンスコストと運転費用に加えて、故障の発生によるブランド力の低下という項目を加えました。

以上のようにして求めた劣化・故障モデルと評価項目を用いて、設備ライフサイクルを通じて故障やメンテナンス作業な

どがどのように発生し、それらの影響がどのように累積していくかを評価するための、モンテカルロ法を用いたシミュレータを作成しました。これを用いて、事後保全、時間基準保全、状態基準保全のそれぞれのメンテナンス方式を採用した場合の50年間のライフサイクルコストを比較しました。この結果、バルブアクチュエータの場合は交換周期と比較して寿命(B10ライフ)が長いことから、ブランド力への影響を考慮しない場合は、LCCを抑えるには事後保全が一番よいことがわかりました。ただし、故障の発生回数は事後保全にすると明らかに増加します。これが、ブランド力の低下にどのくらい効いて、それがどのくらいの金銭的損失になるのかを的確に評価することは容易ではないですが、ここでは単純に、ビル1棟当たり40個のバルブアクチュエータが設置されており(国内のビルの平均値)、1年間に2個のバルブアクチュエータの故障が発生するとビルのオーナーは以後の購入先メーカを切り替えてしまうと仮定しました。すると、故障による売り上げ損失を考慮した場合は、現状の15年周期で交換する時間基準保全の方が事後保全よりよいという結果になりました。なお、状態基準保全については、一部の故障モードを除いては、分解せずに確実に診断する方法が現状ではないために、時間基準保全を上回る結果にはなりませんでした。

以上の評価結果から、メンテナンス方式の変更だけではライフサイクルコストの改善は困難なことがわかりましたので、次に、EoL処理を含めて考えることにしました。具体的には、15年周期の定期交換は行うとして、交換したバルブアクチュエータを図3に示すように再生処理しリユースすることを検討しました。定期交換で取り外したバルブアクチュエータは、シーtringやポテンシオメータなどの消耗品を交換することで再生

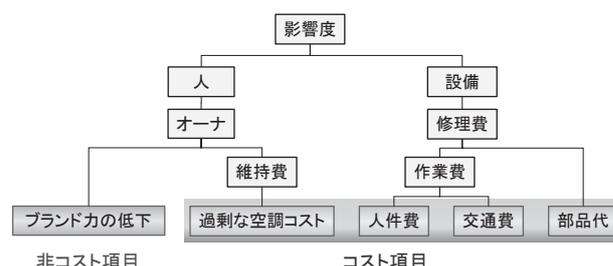


図2 評価項目の設定

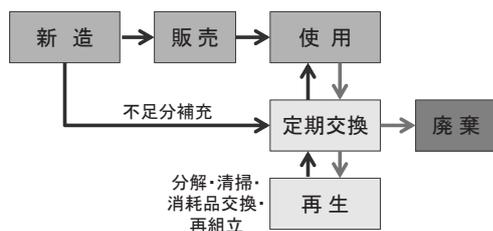


図3 リユースと組み合わせたメンテナンス

することができるし、その費用を作業時間等から見積もった結果、従来方式に比較して故障率を悪化せずにLCCを約40%改善できる可能性があることが分かりました。

さらに、リユースを採用することは環境的にもメリットが大きいため、LCAによる評価を行いました。国内のバルブアクチュエータ市場全体に対してこのような方式を適用することを考え、過去15年間に設置されたバルブアクチュエータの数を基に、今後定期交換時にリユース品を利用することを想定した場合の効果の評価しました。環境負荷は簡単のためにCO<sub>2</sub>排出量で計算しました。この結果、時間基準保全にリユースを組み合わせることで、新造品を使用する場合に比較してCO<sub>2</sub>の発生量を50%以上削減できるという結果になりました。

### 3. ライフサイクルメンテナンス技術の普及に向けて

以上、ライフサイクルメンテナンスの概要と簡単な適用例を示しました。繰り返しになりますが、その要点は以下の3点になります。

#### (1) マネジメント目標に直結する指標による評価

メンテナンス計画の立案と実行をする際に、その設備が使われている目的に直結した評価を行うことが大事です。例えば、生産設備であればO&Mを、サービス機器であればユーザへの影響なども含めた評価項目の下で総合的な評価をしないと、真に効果的、効率的なメンテナンス計画の立案とその実行は望めません。

#### (2) ライフサイクルを通じた評価

すでにLCCの提唱以来言われ続けていながら、従来、購買と運用の部署が異なるなどある意味で単純な理由で、ライフサイクルを通じた評価と最適化が行われていない場合が多くみられます。ライフサイクルコストの大半が運用段階で発生することを改めて認識し、設備管理の体制から考え直す必要があります。

#### (3) ライフサイクルオプションの一つとしてメンテナンスを考える

メンテナンスは、あくまでもライフサイクル管理の方法の一つです。設備ライフサイクルにおいて、コスト、環境負荷面の改善を図るための方策をライフサイクルオプションと呼びますが(環境負荷削減に関して代表的なのが3R: Reduce, Reuse, Recyclingです)、メンテナンスもその中の一つとして位置づけ、他のライフサイクルオプションとの適切な組み合わせによって、最適なライフサイクル管理方式を選択する必要があります。バルブアクチュエータの例でみたように、メンテナンスにリ

ユースなどの他のオプションを組み合わせることでLCCやLCAを改善することが可能になります。

これらの3点が重要であることは、従来より認識されていたと思います。しかし、様々な理由で実際にはそれがなかなか実現してこなかったわけですが、最近状況が変化しつつあるように思えます。その一つは、コンピュータの能力が上がってきて、設備ライフサイクルのシミュレーションが可能になってきたことです。少々複雑なモデルを組んでも、現実的な時間でLCCやLCAを推定できるようになってきましたし、さらにシミュレーションによる評価を使った最適化も遺伝的アルゴリズムなどのメタヒューリスティクスを用いることである程度可能になってきています。

もう一つは、ものの提供から機能の提供へというビジネスモデルの変化です。最近、ものとサービスを統合して提供するPSS (Product Service System) という概念が広がっていますが、その代表例が製品にメンテナンスサービスを合わせて提供するライフサイクル型ビジネスです。ジェットエンジンなどはこの典型例で、メンテナンスの効率化によるLCCの改善が収益向上につながります。このようなビジネス形態は欧米を中心に広まっており、今後特に効率性が追求されるB2Bビジネスにおいてはさらに拡大していくことが予想されます。

### 4. まとめ

本稿では、最近のメンテナンス技術の動向を概観した後、ライフサイクルメンテナンスの概念を簡単な例を交えて説明しました。これまで、信頼性工学に基づく保全理論、設備診断技術、RCM・RBMといったメンテナンス計画技術など、多くのメンテナンス技術が研究開発されてきました。ところが、それらが実際の場では必ずしも有効に活用されていないという現実があります。しかし、ストック型社会の進展や、資源環境問題に直面している現在、ライフサイクルメンテナンスのようなフレームワークを用い、これまでに蓄積されてきたメンテナンス技術の位置づけを明確にし有効に活用することで、合理的な設備のライフサイクル管理を実現することが重要と考えます。

#### 参考文献

- 1) 高田祥三, LCCを最適化する論理的・合理的設備管理: ライフサイクル・メンテナンス, JIPMソリューション, 2006.
- 2) Momiyama, T., Takata, S., Life cycle maintenance in combination with reuse - Application to valve actuators for reducing life cycle cost and environmental load, Proc. of 17th CIRP-LCE, 2010, 306-311.