

第19回R&Dシンポジウム 基調講演

「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 氏

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。工学博士、東洋大学工学部機械工学科助教授、シュトゥットガルト大学客員研究員、大阪大学工学部電子制御機械工学科助教授を経て、1992年より早稲田大学理工学部工業経営学科（現創造理工学部経営システム工学科）教授。環境調和型生産を支えるライフサイクル工学、メンテナンス工学等の研究に取り組んでいる。



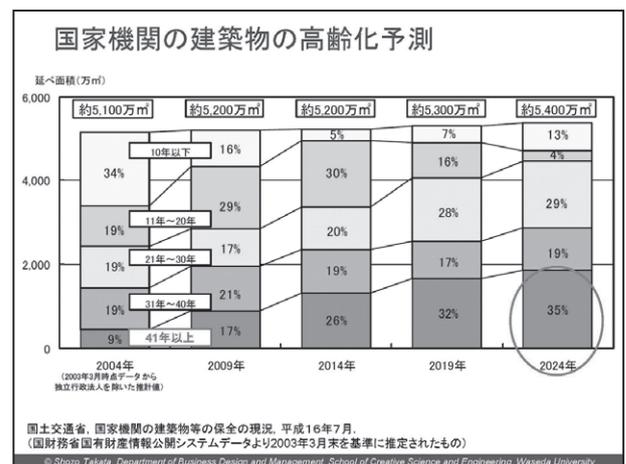
1. はじめに

今日は、「ライフサイクルメンテナンス」というタイトルでお話をさせていただきたいと思います。まずはメンテナンスが改めて注目されているということを説明させていただいたあと、メンテナンスの基本的な考え方と、メンテナンスの考え方が少し幅を広げつつあるということをお話し、最後に事例を紹介して、まとめさせていただきたいと思います。

ご存じのように世の中には、さまざまな設備が存在します。社会資本ストックだけで、約460兆円とも言われています。

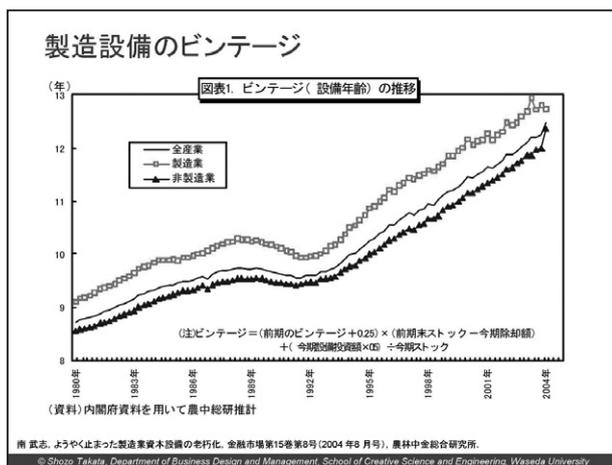
さらにさまざまな企業においても設備が使われています。民間企業の資本ストックの有形固定資産総額が約1,250兆円と言われておりまして、社会資本と合わせて約1,700兆円ということになります。設備のメンテナンス費用というのは、取得額の数%と言われています。1%としても17兆円ということになりますから、かなりの額になっていることがおわかりになると思います。

さらにそのような設備がだんだん高齢化しております。これは、国家機関の建物の例ですが、築41年以上たつたものが2024年には35%になるなど、着実に高齢化が進んでいます。



国土交通省, 国家機関の建築物等の保全の現況, 平成16年7月. より引用

これも少し古いデータですが、製造設備のビンテージ（設備年齢）というものをプロットしたグラフです。年とともに、平均設備年齢が上がっているということがわかります。もちろんストックが大きくなれば、だんだん平均年齢が上がってくるということは、仕方がないのですが、では、これをどのようにメンテナンスしていくのかということは、大きな課題になっています。



南 武志, ようやく止まった製造業資本設備の老朽化, 金融市場第15巻第8号 (2004年8月号), 農林中金総合研究所. 4より引用

このように、いかにメンテナンスを効率化できるか、質を高められるかということは、これからの社会を維持していくためには、大きな課題であると考えられます。

さらに、ご存じのように資源環境問題ということも大事な課題になっており、その中で、例えば循環型社会への移行ということが求められています。そのためには、ものを大事に使い、ものの寿命を延ばすとともに、それを使い切ることで、資源を節約しながら世の中に適切な機能を提供していくことが必要となりますから、そのような面でのメンテナンスの役割も大きくなります。

もちろん安全安心ということも大事で、多くの設備、あるいは人工物の中で、我々が安心して暮らしていくようにしていくためには、当然、メンテナンスが大事になります。

メンテナンスの重要性

- **ストック型社会への移行**
 - 社会における人工物の蓄積
 - 自動化, 情報化による設備依存度の増大
⇒ 効率的メンテナンスによる維持・改善コストの低減
- **循環型社会への移行**
 - モノの更新から機能の更新
 - モノの寿命を延ばす／使い切る
⇒ メンテナンス重視型ライフサイクル管理
- **安全・安心社会の追及**
 - 社会の高度化による事故・火災等の危険性と影響の増大
⇒ 合理的メンテナンスによるリスクの低減

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

このように、重要性が高まっているメンテナンスを考えるうえで、最初にメンテナンスの基本概念についておさらいをさせていただきたいと思います。

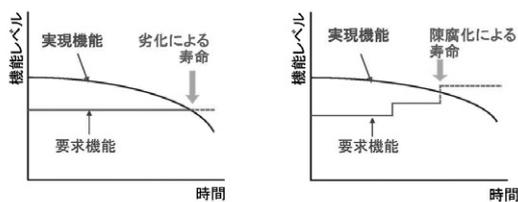
2. メンテナンスの基本的な考え方

そもそも、なぜメンテナンスが必要なのかというと、基本的には設備には寿命があり、設備の実現してくれる機能レベルが要求を下回ってしまうことがあるからです。これには2つの理由があります。一つは設備の劣化によって実現機能がだんだん低下し、そのことによって要求機能を下回ってしまうということ、もう一つは、要求機能の方が上がってしまい設備が陳腐化するということです。

設備の機能と寿命

設備が満たすべき条件:

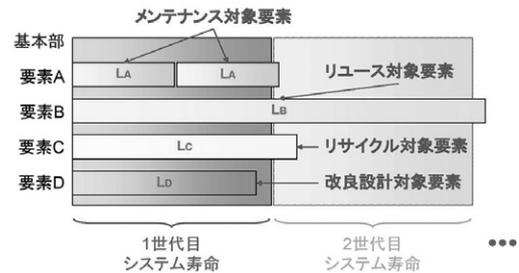
要求機能レベル < 実現機能レベル



© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

これだけですと話は比較的に簡単に見えますが、実は設備にはいろいろな要素が存在し、その要素ごとに寿命が異なります。また、その寿命の低下の仕方、機能の低下の仕方というのも要素ごとによって変わってきますから、そういうものを全体としてうまく管理してあげないと、効率的なメンテナンスができないということになります。

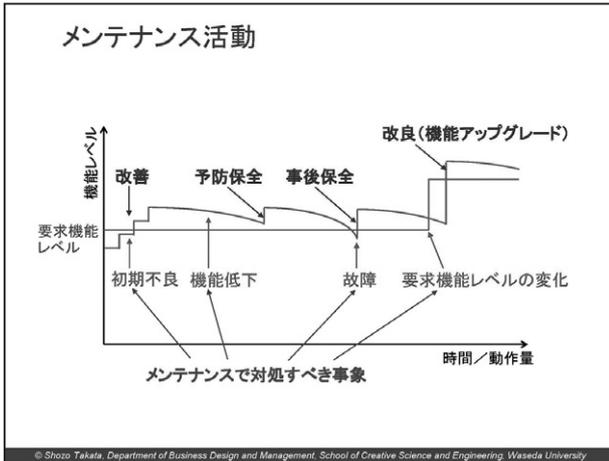
構成要素の寿命とEOL (End of Life) 処理



© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

よく、メンテナンスフリーということをいいます。これはすべての設備構成要素を同じ寿命に揃えることで、ある時点で構成要素がみんな同時にバサッと駄目になるようにして、その間は何もメンテナンスしなくてもよいようにするという考え方です。しかし、これは技術的に見て難しい場合がありますし、必ずしもそれが経済的ではないということもあります。したがって、基本的には、これらの複数の寿命をいかに効率的に管理するのか、ということを考えていかなければいけないということになります。

次に、メンテナンス活動を、縦軸を機能のレベル、横軸を時間という座標で考えてみます。設備の初期段階ではいろいろな初期不良があるので、それを改善しなければいけません。また、設備を使っていくと、だんだん機能が低下していきます。この機能低下が要求機能レベルを下回る前に手を加えるというのが予防保全です。一方、機能低下が要求機能レベルを超えてしまって、故障が起きてから何かをするというのが事後保全です。さらに要求機能レベルが上がるのに対して、設備を改良、あるいはアップグレードをするということも必要となります。これらのさまざまなことに対応していくのが、メンテナンス活動ということになります。



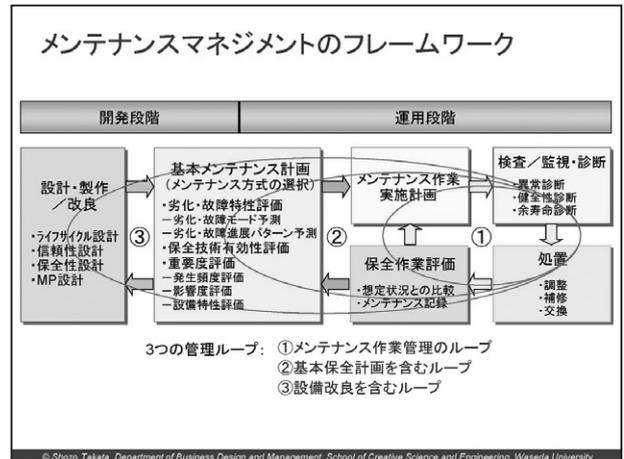
では、このようなメンテナンスをどのように管理していくべきかということですが、これは別にメンテナンスだから特別な管理方法が必要だということではありません。基本的にはPDCA (Plan, Do, Check, Action) を回していくということが必要になります。そのためには、まず将来起きる可能性のある劣化や故障を予測し、その予測に基づいて適切なメンテナンスの方策を考えます。将来何が起るかわからないのに、何かを考えなさいと言っても、それは無理ですから、精度の問題はあるにしても、まずは予測をし、計画し、それを実施した結果を評価して、このループを回していくということになります。

メンテナンスマネジメントのありかた

- 予測ベース:
 - 将来起きる可能性のある事態を予測できて、はじめて対応策が検討できる
- 計画主導:
 - あらかじめメンテナンス方式が設定されて、はじめてメンテナンス作業が実施できる
- 実績のフィードバック:
 - 予測と実績の比較が、次の予測に役立つ



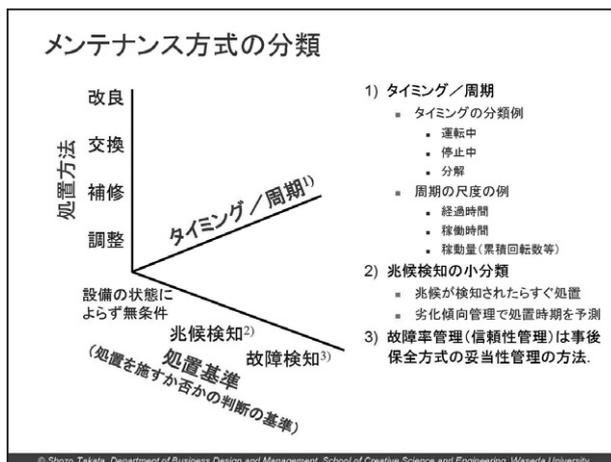
このような意味で、私どもはそのメンテナンスのマネジメントのフレームワークとして、3つの管理のループというものを考えています。



最初のループは、メンテナンス作業管理のループになります。これは、例えば、点検や交換などの作業のスケジュールを決めて、実際に検査や監視、診断、あるいは処置を行って、その結果を評価して、次の計画にフィードバックしていくという、現場で行われているメンテナンス作業を管理するループです。ただ、ここでどこをメンテナンスするか、どこを点検するか、あるいはどの部品を交換するかということは、どこかで決めておく必要があります。それを決めるのが、基本メンテナンス計画です。ここでさまざまな劣化や故障を仮定し、それに基づいてどのような作業をしたらよいかをあらかじめ定めておき、それに基づいてメンテナンス作業管理のループを回すということになります。しかし、実際にメンテナンス作業をやってみると、思っていたように劣化が進行しない、無駄な検査になっているといったことや、思ってもいなかったところで故障が発生するということがあります。当然そのような場合にはメンテナンス計画を改訂しなければならないということになります。これが第2のループです。さらには、そもそも設計自体があまり良くなかったということもあります。どこかで計算を間違えている、材料選定を間違えている

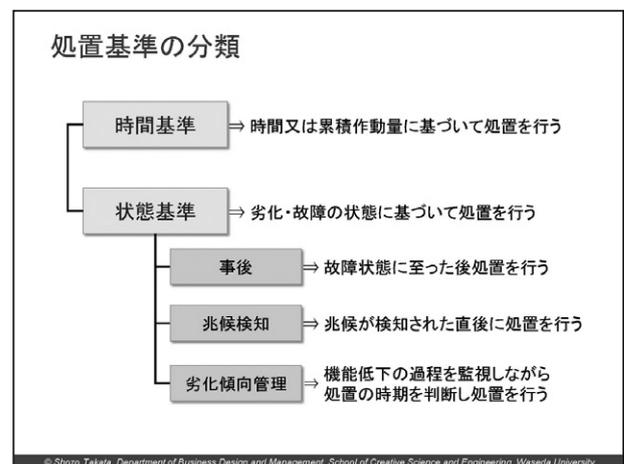
というようなこともあり得る話で、その場合には、設備の改善、改良ということが必要になってきます。これが第3のループになります。これらのループを適宜回せるような仕組みを常に作っておくということが、合理的なメンテナンスを実施するうえで重要になります。

次に、このようなメンテナンスのやり方をどのように決めるべきなのかということですが、その話の前に、メンテナンスをどのように分類するかについて確認をさせていただきたいと思います。私どもはメンテナンス方式を処置の基準、タイミング・周期、処置方法という3軸で分類しています。



処置の基準というのは、例えば補修をする、交換するなどの、設備の状態に手を加える処置の実施を何によって判断するかということで、これは大きく時間基準と状態基準に分類できます。時間基準というのは、時間（例えば1年おきなど）、あるいは累積の作動量（例えば何万km走ったらといったようなもの）に基づいて処置をするというものです。それに対して、状態基準というのは、個々の設備の状態を把握し、それに基づいて何らかの処置を取っていくというものです。

事後保全も故障したら直すという点では、広い意味での状態基準保全に入りますが、普通は故障が発生する前に、何らかの兆候を検知し、それに基づいて予防保全をするということになります。また、例えば摩耗のようなものと、摩耗し出したからすぐ交換するのではなくて、その後どのように状態が推移するかを見ながら判断をしていくという場合があります。これを劣化傾向管理といいます。



それからタイミング・周期というのは、例えば運転中に処置ができるか、停止しなければ処置ができないのか、分解しなければ処置ができないのかといったことを判断することで、これによってメンテナンス作業を実施する際にさまざまな制約がかってきます。また、周期は、時間基準であれば交換周期を、状態基準であれば検査の周期を意味します。

なお、状態基準保全は、必ずしも常時監視を必要とするものではなく、その定義から言えば、ある周期で（必ずしも一定である必要もありません）、点検・検査・診断をして、それに基づいて処置を行うメンテナンス方式です。

タイミング・周期

■ タイミング

- 設備がどのような状態にあるときに検査,あるいは処置を行うかを示す
- タイミングの分類
 - ・ 運転時⇒設備が稼動したまま行う
 - ・ 停止時⇒設備が停止しているとき,分解せずに行う
 - ・ 分解時⇒設備が停止しているとき,分解して行う

■ 周期

- 時間基準における処置周期
- 状態基準における検査周期

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

処置方法とは、具体的に設備に手を加える方法ということなのですが、これは、劣化を回復するような処置、劣化要因を軽減するような処置（例えば給油、清掃）、それから劣化要因を除去する処置（例えば材料を腐食しないようなものに変えてしまう）という3つのカテゴリーに分けられます。

処置方法

■ 劣化の回復

- 補修
- 交換
- 調整
- etc.

■ 劣化要因の軽減

- 清掃, 給油
- 運転条件の改善
- etc.

■ 劣化要因の除去(改良)

- 材料の変更
- 構造の変更
- etc.

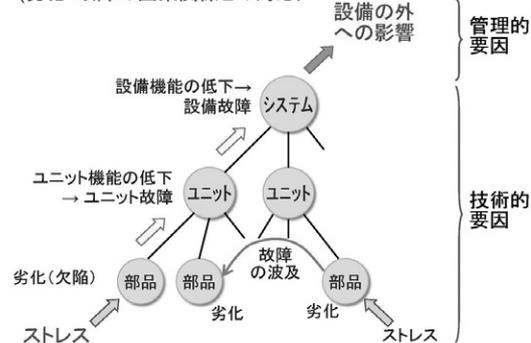
© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

さて、このように分類した、メンテナンス方式をどのように決めるかということですが、これには2つの要因を考える必要があります。

一つは技術的な要因になります。これは、そもそも設備がどのように劣化し、故障が発生するのかというメカニズム、あるいは発生のパターンを調べて、それに基づいてメンテナンスの方法を考えるということです。もう一つは管理的な要因で、設備機能の低下や設備故障が起こってしまったらどのくらいの影響が出るのかということによってメンテナンスの方法を考えるということです。大して影響が出ないのであれば、あまりお金のかからない事後保全でよいですし、大きな影響があるのであれば、リスクですから、そこは少々お金をかけても、状態基準保全を採用するといった判断が必要になります。

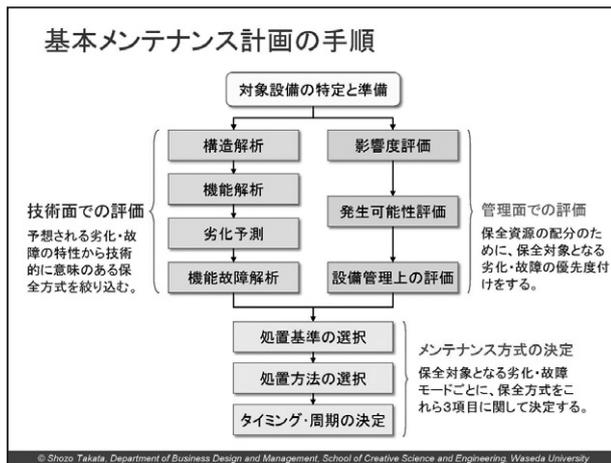
メンテナンス方式の決定要因

(劣化・故障の因果関係との対応)

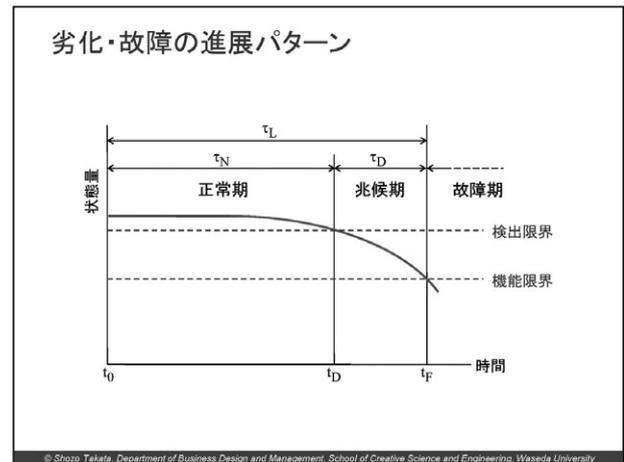


© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

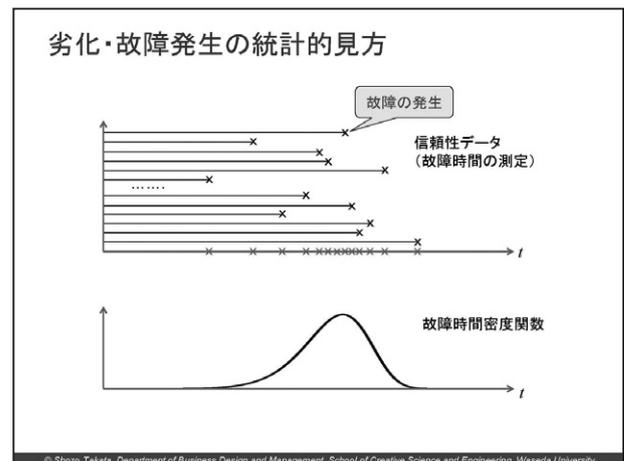
技術的要因の評価では、技術的に見て意味のあるメンテナンスの方式を選び、管理的要因の評価では、限られた保全の資源（人、お金、物）をどこに集中すべきか、どこを重点的にメンテナンスすべきかを、故障が起きたときの影響度で評価します。これら2つの評価結果に基づいて、メンテナンス方式、すなわち処置の基準、処置方法、タイミング・周期を決めていきます。



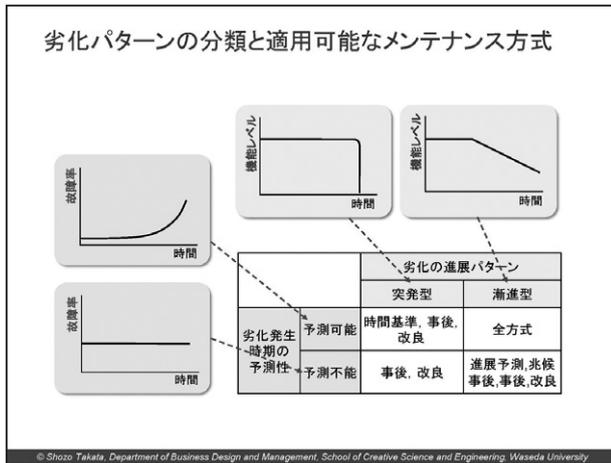
技術的な評価というのは、どのように故障が起こるかを解析することです。このためには、どのように設備の劣化状態が推移をしていくのかを調べます。設備の状態は、最初は正常期にあります。異常の進行が検出されることで兆候期に移ります。兆候期は、設備がまだ使える状態ですが、これがどのくらいの長さなのかということが問題になります。兆候期が短い突発的に起こる故障では、今朝検査して問題なくてもその日の昼には壊れてしまうということが起こり得ますから、検査はほとんど意味がないことになります。このように、劣化故障がどのようなパターンで発生するのかを調べるのが大事なポイントになります。



ただ、すべての部位に対して、このようなパターンが求められるとは限りません。故障の発生の有無だけのデータしか得られない場合がよくあります。その場合には、この図のように、それぞれの設備について、この時点で壊れた、ここまでは使えた、というようなデータを集めると、どうもこの辺でよく壊れるということが分かってきます。これを表現したものが故障時間密度分布です。このように、統計的に見たときに、どのくらいの寿命があるか、いつ頃になると壊れやすいのか、あるいは偶発的な故障で時間に関係なく故障が起きているのかといったことを把握することでメンテナンスの方法を考えていくことになります。



以下の図は、劣化故障の発生パターンを分類し、それぞれの場合に適用可能な保全方式を示したものです。劣化や故障が突発的に起こる場合には、状態基準保全は使えず、漸進的に進行する場合にのみ適用できます。一方、故障発生率の分布で言えば、故障率が時間とともに増加していくものについては、定期的な時間基準保全は意味がありますけれども、若い設備であろうとベテランになった設備であろうと故障率が同じであるのなら、定期的な交換は意味がありません。このような形で、技術的に意味のあるメンテナンスを考えていくことができます。



もう一つのメンテナンス方式の決定要因である管理面に関しては、劣化故障の影響を評価します。劣化故障による影響はさまざまなものがありますので、その項目を全部挙げて、それぞれに重みをつけて劣化故障モードごとに計算をすると、どの劣化故障モードが一番影響が大きいか分かります。

影響評価

影響項目	影響項目 I	影響項目 II	影響項目 III	...	影響度
影響項目の重み	α_1	α_2	α_3	...	
劣化・故障モードA	e_{A1}	e_{A2}	e_{A3}	...	E_A
劣化・故障モードB	e_{B1}	e_{B2}	e_{B3}	...	E_B
劣化・故障モードC	e_{C1}	e_{C2}	e_{C3}	...	E_C

劣化モードAの影響度

$$E_A = \alpha_1 \cdot e_{A1} + \alpha_2 \cdot e_{A2} + \alpha_3 \cdot e_{A3} + \dots$$

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

これはFMEAなどで通常行っている手法と基本的に同じですが、影響項目を考える際には、設備に関するすべての影響項目を考慮し、ライフサイクルを通して影響を積算する必要があります。また、必ずしも定量的でない影響も列挙し、なるべく定量化するようにしてその影響を評価に組み込むようにします。

影響評価－影響項目の抽出

- 影響項目抽出の留意点
 - 設備に関するすべての影響を考慮する
 - ライフサイクルを通じた影響を積算する
 - 定量的でない影響も列挙し、定量化を検討する
- 影響の例
 - 設備自身への影響
 - ・ メンテナンスコスト(予防保全コスト、事後保全コストとも)
 - 設備が生む価値への影響
 - ・ 生産損失(生産設備のような場合)
 - ・ サービス提供の停止(旅客輸送のような場合)
 - ・ ブランドイメージの低下
 - その他への影響
 - ・ 環境汚染
 - ・ 周辺住民への危険

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

影響項目の例としては、メンテナンスコスト、設備が生む価値への影響である生産やサービスが停止することによる損失、あるいは企業のブランドイメージの低下などが挙げられます。このほかにも、環境汚染や、周辺住民への影響なども考えなければならない場合があります。例えば、生産設備ならば、影響を受ける対象を人、物、設備、環境などに分類し、対象ごとに、QCD(Quality:品質、Cost:コスト、Delivery time:納期)の観点から以下のようなマトリックスで整理し、影響項目を考えていけばよいと思います。

生産設備に関する影響項目の抽出方法

- 影響を受ける対象を、人、モノ、設備、環境から整理する
- 影響内容を、Q、C、Dの観点から検討する

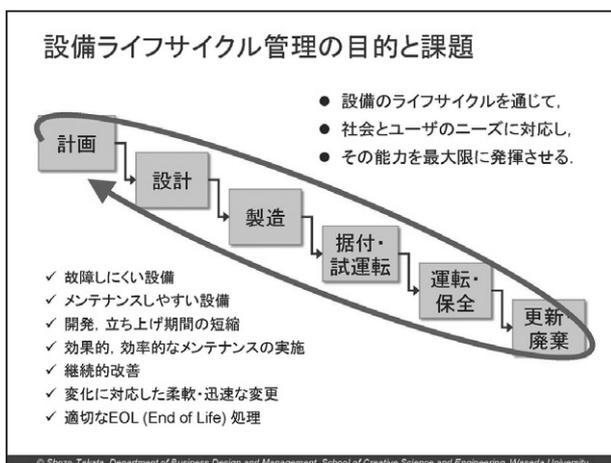
	人	製品	設備	環境
安全／品質	人身事故	歩留低下 クレーム リコール		環境汚染
時間	待ち時間	納期遅れ	検査時間 修復時間	
費用	賠償	生産損失	検査費用 修復費用	除染費用 賠償金

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

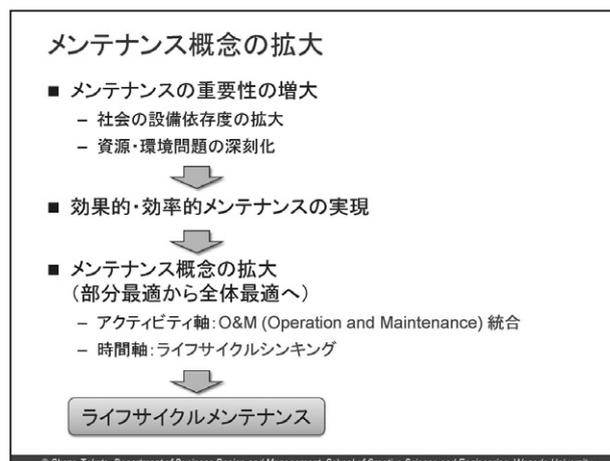
以上、メンテナンス管理の基本として申し上げたかったことは、メンテナンスを考えるうえでは、技術面での評価と管理面での評価をうまく組み合わせ、適切な処置基準あるいは処置方法を選択し、タイミングや周期を決めるという基本メンテナンス計画が重要であり、これが決まると初めて実際の点検や交換などの作業スケジュールが決まってくるということです。

3. メンテナンス概念の拡大 ーライフサイクルメンテナンスー

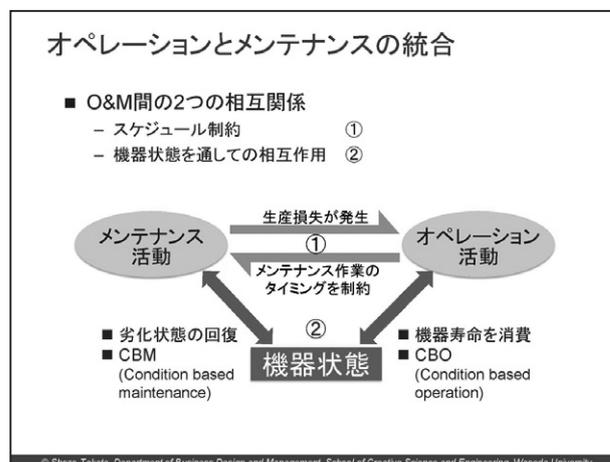
これまでメンテナンスをどのようにして合理的に行うかという話でしたが、そもそもメンテナンスはその設備が生む価値を最大にするために行うものですから、メンテナンスのためにメンテナンスを行うわけではありません。であるとすれば、設備ライフサイクルの中でその設備を運用することによって得られる価値がメンテナンスを行うことによってどれだけ上がるかということが、メンテナンスの効果であるといえます。そのような観点からすると、メンテナンス方式を決める際には、単にメンテナンスの枠の中で物事を考えるのではなく、もう少し考え方を広げる必要があります。



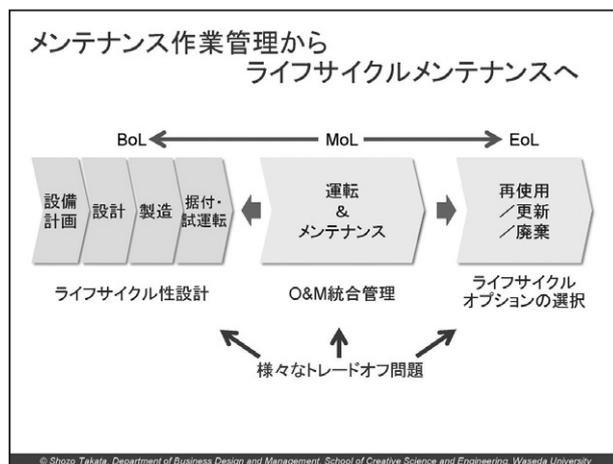
その広げ方の一つに運転とメンテナンスがあります。これに関しては、O&M (Operation and Maintenance) という言い方をします。これは、メンテナンスだけが問題ではなく、運転することが本来の目的ですから、両者を合わせて考えることが必要であるということです。



運転とメンテナンスの関係としては、メンテナンスを一生懸命行くと、運転の時間が削られてしまい、一方、運転を一生懸命やっているとメンテナンスの時間が削られる、あるいはタイミングを失う場合があるといったようなスケジュール上の制約があります。また、メンテナンスをすれば、機器の状態を良くすることができますが、一方で運転をすることによって機器の劣化状態が進行するという関係があります。ですから、これらの関係をよく考慮して計画をしないと、あまり運転していないものを一生懸命メンテナンスしても意味がないということが起こり得ます。



メンテナンス概念の拡大に関しては、O&Mの観点に加えて、時間軸上での拡大があります。O&Mは、運用中の問題であり、ライフサイクルエンジニアリングの分野では、MoL (Middle of Life) という言葉を使います。メンテナンスでは、設備の開発段階、あるいはその製造・設置段階にあたるBoL (Beginning of Life)、さらに、設備の更新あるいは廃棄段階であるEoL (End of Life) も考慮する必要があります。設計段階でライフサイクルを考えることをライフサイクル設計といいますし、EoL段階で廃棄の方法、リユース、リサイクルなどを考えることをライフサイクルオプションの選択と言います。メンテナンスとこれらのライフサイクル段階の間には、さまざまな関係がありますから、それらを考慮してメンテナンスの計画・管理をする必要があります。このような観点からメンテナンスを考えることを、我々はライフサイクルメンテナンスと呼んでいます。



要は、メンテナンス概念の拡大とは、メンテナンスのただで最適化をするのではなく、運転も含めたところでメンテナンス方式を最適化する、あるいはライフサイクル全体を考える中で最適化することが必要だということです。その場合、さまざまなトレードオフの問題が発生します。例えば、O&Mについては、稼働率を高めようとするとメンテナンスが圧迫される、納期を確保しようとするとメンテナンスのタイミングを失する、一方メンテナンスを確実に行わなければ品質が確保できないといった、さまざまな問題が存在します。また、BoLについては、取得コストと運用コストの兼ね合い、例えば、部品寿命をどのくらいに設定すべきか、高度な材料を使って、部品の寿命を延ばしたほうがよいのか、安価な材料を使って頻繁に交換したほうがかえってコスト減になるのかなどといったことが問題となります。

また、信頼性設計、保全性設計をしようと思えば、それなりにコストがかかりますから、どの位かけるのが意味があるのか、という問題も発生します。

今回のシンポジウムのテーマでもあるCBM (Condition Based Maintenance) を行うには、センサなどを導入して監視、診断などを行う必要があります。その場合、導入のメリットと、メンテナンスコストがどのような関係にあるのかを考える必要があります。

また、EoLについては、更新をした方がよいのか、メンテナンスをもう少しやって寿命を延ばして使った方がよいのか、あるいは更新をするのではなく一部をアップグレードする方がよいのかといった問題も出てくると思います。

ライフサイクルの各段階におけるメンテナンスの課題

■ O&M

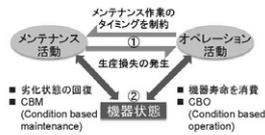
- 運転とメンテナンス
 - ・ 処理量(稼働率)の確保とメンテナンス
 - ・ 処理速度(納期)の確保とメンテナンス
 - ・ 品質の確保とメンテナンス
- メンテナンス方式(TBM/CBM/BM)
- 予備品とメンテナンス

■ BoL

- 取得コストと運用コスト
 - ・ 部品寿命と交換コスト
 - ・ 信頼性設計・保安性設計とメンテナンスコスト
 - ・ 検査・監視装置コストとメンテナンスコスト

■ EoL

- EoLオプションとメンテナンス
 - ・ 更新とメンテナンス
 - ・ 更新とアップグレード
 - ・ リユース



© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

設備ライフサイクル管理の指標

■ コスト有効度

$$\frac{\text{システム有効度}}{\text{ライフサイクルコスト}} = \frac{SE}{LCC}$$

SE=capability × availability

■ 環境効率

$$\frac{\text{システム有効度}}{\text{環境負荷}} = \frac{SE}{LCA}$$

LCC=AC+OC+EoLC
AC: acquisition cost
OC: operating cost
EoLC: end of life cost

LCAによる評価

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

このような問題に対して、どれがよいのかを何らかの方法で決めなければならないのですが、これにはさまざまな要因の考慮が必要です。しかも時間的なスパンが長い問題を扱わなければなりません。これら进行评估する際に考慮すべき基本的な指標は2つあります。一つは、ライフサイクルコストとシステム有効度により決まるコスト有効度です。

ここで、ライフサイクルコストとは、取得コスト、運用コストとEoLコストの合計であり、システム有効度SE (System Effectiveness) とは、その設備を運用したことによって、どれだけ価値が得られたかを示す指標です。要は、ライフサイクルを通じたコストパフォーマンスを示す指標です。

もう一つは環境効率であり、得られた価値に対して、どれだけ環境負荷をかけたのかを評価する指標です。環境負荷というのは、コストのようなもので、減らさなければならないものですがゼロにはなりません。これを、環境効率という指標で考えることが必要になります。

しかし、これらをどのように評価するのかということは難しい問題です。これに対しては、まだ研究段階ではありますが、設備の一生にかかわるさまざまな出来事をコンピュータ上でシミュレーションして、そこで起きた事象の影響を積み上げることによって、どの方法が一番よいのかを決定する手法があります。このような手法をライフサイクルシミュレーションと呼んでいます。

ライフサイクルシミュレーションによる評価

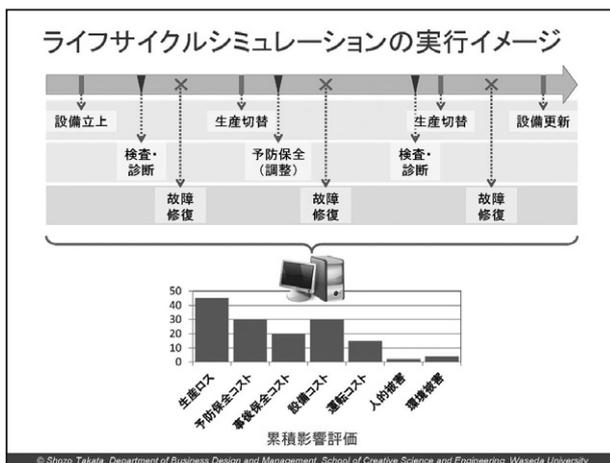


ライフサイクルシミュレーション

- ・ ライフサイクルシナリオに沿った事象の発生
- ・ 事象の発生にともなう処理の実行
- ・ 事象発生の影響(費用、ロスなど)の計算
- ・ 評価期間中のLCCとLCAの計算

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

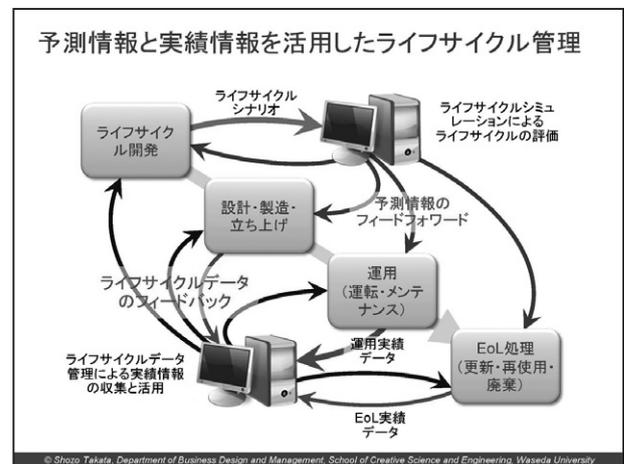
ライフサイクルシミュレーションでは、設備の一生の中で起こるさまざまな事象を確率分布に基づき発生させます。我々の場合は、モンテカルロシミュレーションと呼ばれる、言ってみれば、何回もサイコロを振って出る目の数の平均を求めるといったタイプのシミュレーションを行っています。この方法を用いることで、生産にかかわる出来事、予防保全や事後保全に関わる出来事などが、設備ライフサイクルの中で、どのように生じるかが計算されます。これらの事象によるコスト、あるいはロスを積み上げることによって、ライフサイクル全体でのパフォーマンスが評価できます。さまざまな選択肢についてこのようなシミュレーションを行うことで、どの選択肢がよいのかが分かります。



このような予測技術を用いることで、適切なメンテナンス計画を立てることができ、それに基づいたメンテナンス管理が可能になります。これは予測情報のフィードフォワードと言えます。

ただ、これはあくまでも予測であり、精度の高い予測ができるかは、また別の問題になります。ですから、予測の精度を高めていく必要がありますが、メンテナンスのよいところは時間があることです。劣化するにしても、すべての要素が急に劣化することはありませんので、運用する中で得られるデータを適切に収集し、そのデータを次の予測へフィードバックするといったループを回すことによって、よりよいメンテナンス方式に改善することができます。

もちろん、設備の使い道や条件が変化していきますから、その都度、予測の結果が変わってくるかもしれません。しかし、このようなライフサイクルデータのフィードバックの仕組みを確立することができれば、変化に対応して、常に適切なメンテナンスを実施することができるようになります。そういう姿が、本シンポジウムの目標とするところでもあるのではないかと、私は解釈しております。



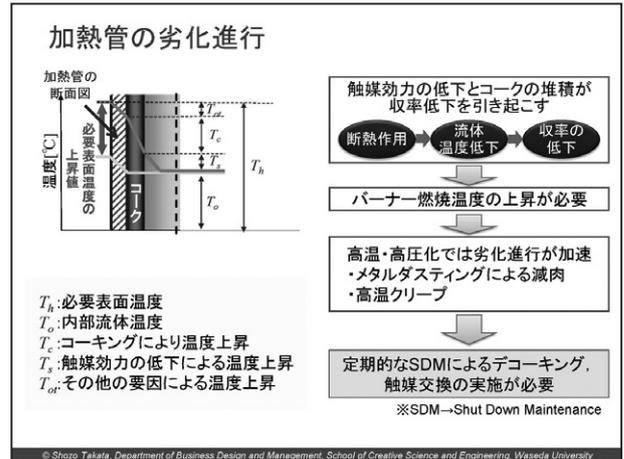
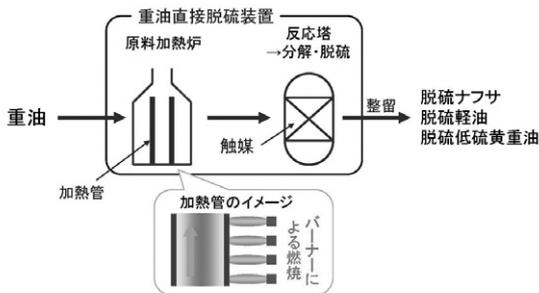
4. ライフサイクルメンテナンスの適用例

ライフサイクルメンテナンスについて、いくつかの適用事例を紹介します。事例の対象設備は現実のものではありませんが、計算はあくまでも研究として行ったものです。最初は、重油の直接脱硫装置のO&Mを計画した事例です。

石油精製プラントでは、重油に含まれる硫黄などの不純物を除去する脱硫という工程があります。そこでは、最初に加熱管の中に油を通して、外側からバーナーで温めます。ところが、この油が流れる加熱管の内側にコークが堆積します。これが断熱作用を持つため、外側の温度を上げてあげないと、中の油が十分温まらなくなってしまいます。しかし、外側の温度を上げると、油もたくさん必要になりますし、加熱管の表面の温度が上がってしまいますから、高温クリーブ損傷が進行してしまいます。

重油直接脱硫装置のO&M統合計画

重油直接脱硫装置
石油精製設備に含まれ、分解・脱硫を行うことで重油中の硫黄分を低下させる装置



一方で、コークを掃除するためには、装置を止めなければならず、一旦止めると、冷却と加熱だけで数週間かかり、生産に大きな影響が出てしまいます。この事例では、まず、設備で生じるさまざまな劣化故障モードを表に示すように挙げました。今回のケースでは、これらのうち高温クリーブによる過熱管の寿命が一番問題となります。これについては、推定式がすでに研究されていますので、それに基づいて過熱管の寿命消費率とその時の破断確率をリスクとして計算するようにしました。

劣化・故障特性のモデル化

劣化モード	ワイブルパラメータ m(形状) n(尺度)	適用保全方式	管理状態量	処置	検査可能 タイミング	処置可能 タイミング
触媒効力の低下	-	時間基準	生産量	交換	-	運転停止時
コーキング	-	状態基準	コーク堆積量	補修	運転停止時	運転停止時
高温クリーブ	-	時間基準	寿命消費率	交換	運転停止時	運転停止時
メタルダスティング	-	状態基準	管の減肉率	交換	運転停止時	運転停止時
レンガの脱落	12	状態基準	レンガの傾度	補修	運転停止時	運転停止時
バーナータイル破損	14	時間基準	総運転時間	補修	-	運転停止時
バーナーチップ詰まり	10	時間基準	総運転時間	交換	-	常時

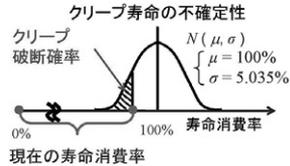
- 高温クリーブは劣化進展モデルを用いて評価
- 触媒効力の低下、コーキング、メタルダスティングの進行は運転時間に比例すると仮定
- その他の劣化モードはワイブル分布を用いて故障時間を評価

高温クリープによる加熱管破断リスク

Manson-Haferd の寿命推定式

$$\log t_R = \log t_a + [(T + 273.15) - T_a] \times \left\{ \sum_{k=0}^5 b_k (\log S)^k \right\}$$

t_R : 破断時間(h)
 T : 温度 (degree)
 t_a, T_a : 最適定数
 S : 応力 (MPa)
 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$: 回帰係数
 k : 回帰式の次数

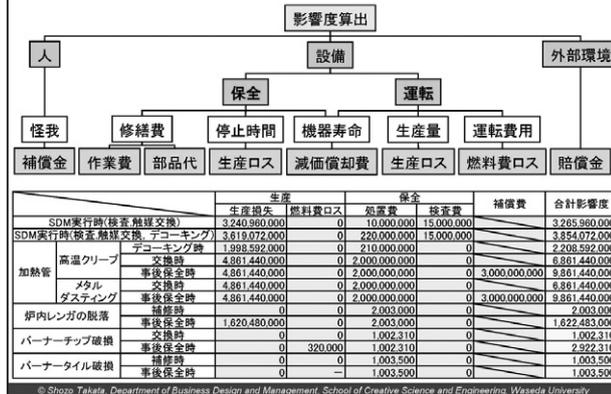


- クリープ破断確率を常に 10^{-4} 以下に保つことでクリープ破断リスクを抑制
- クリープ寿命の標準偏差はNIMSのデータを使用

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

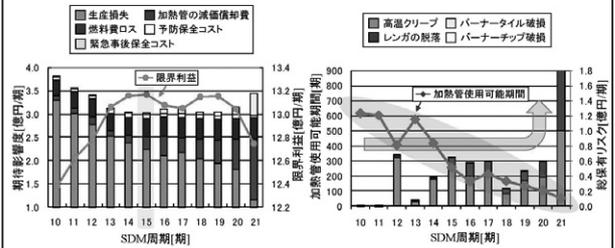
一方、影響度については、図に示すように、人、設備、外部環境の面から評価しました。設備については、さらに保全と運転の観点に分けて項目を設定しました。

O&M活動の影響度評価



このようにして分析を行うと、当然、装置を止めてメンテナンスを行うシャットダウンメンテナンス (SDM) の周期を短くすると生産損失が増加し、メンテナンスの周期を延ばしていくと加熱管の寿命が短くなって減価償却費が上がるのが分かります。今回のケースでは、SDMの周期が15期 (15ヶ月) 辺りで最もよい結果になることが図から見てとれます。

期待影響度、保有リスクの評価



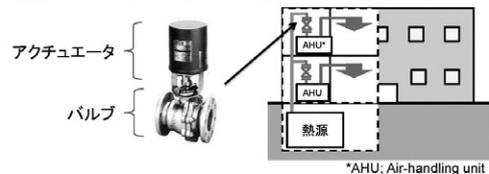
- SDM周期が15期のとき、限界利益は最大値を取る
- SDM周期が長くなるにつれて保有リスクは増加する
- 触媒交換周期が長くなることで加熱管の使用可能期間は減少する

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

もう一つの例は、空調用のバルブアクチュエータのメンテナンスの事例です。これは、ビルの空調用に使われているもので、冷水や温水をビルの各階に供給し、エアハンドリングユニットで、冷風や温風を作ります。この例でも、まず、バルブアクチュエータを構成している部品について劣化故障解析を行いました。基本的にはバルブアクチュエータを分解し、どのような部品からできていて、どのような劣化故障があるかということを列挙しました。

空調用バルブアクチュエータ

- 各階ユニット方式で冷温水の流量を調節



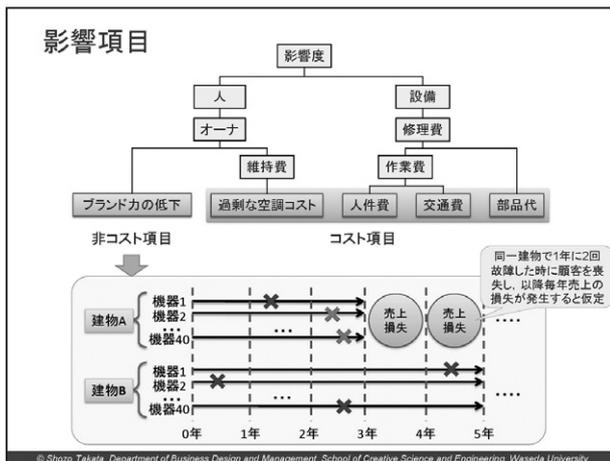
- 構成アイテムの劣化・故障解析

対象アイテム	劣化	故障
モータ		運動停止
ポテンシオメータ	摩耗	摩耗粉による導通不良
ギア	疲労破壊	歯の欠損
ボール	異物の噛み込み	潤滑による運動停止
グラント	摩耗	グラントでの漏れ
シートリング	摩耗	シートでの漏れ

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

また、劣化故障による影響項目については、過剰な空調コストや人件費、交通費、部品代などに関して計算することになりました。

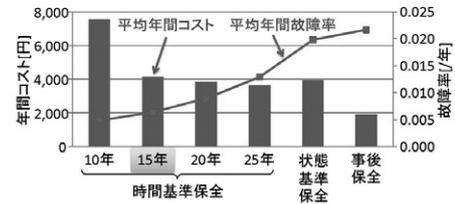
また、影響度の計算では、ブランド力の低下という項目も入れました。これは、あまり頻繁に故障が発生すると、そのメーカーのものは買わなくなるという想定で考えたものです。1年間に2回故障してしまった場合に、ビルのオーナーはそのメーカーからそれ以後買わなくなると仮定し、それにとまってどのくらいの売上損失が発生するかを評価することになりました。1ビルあたりのバルブアクチュエータ数は全国平均で約40個存在することから、この平均値をもとに計算をします。



まず、このブランド力を考えずに計算をしてみました。現状は、時間基準保全で15年周期の交換をしています。この周期を延ばしていけば当然コストは下がり、故障率は上がります。

時間基準保全の周期を変えた場合、状態基準保全にした場合、および事後保全の場合で計算をしてみると、事後保全が、故障の影響を含めてもコスト面で最もメリットがあるという結果になりました。

機器一台当たりの平均年間コスト・平均年間故障率



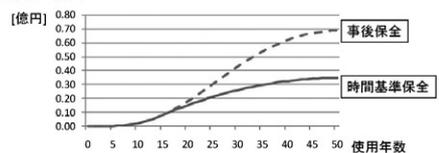
- 空調設備の耐用年数が15年であることから、15年周期の時間基準保全を基準とした。
- 事後保全を行うと15年周期の時間基準保全に比べ、コストは半分程度になるが、故障率が3倍以上となる。

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

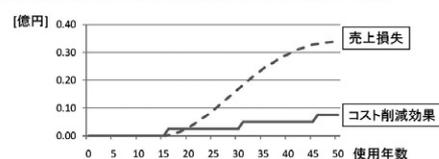
ところが、ブランド力の低下の影響を計算してみると、事後保全によるコスト削減効果よりブランド力の低下による売上損失の方が長期的には大きくなるという結果になりました。これは、単純に事後保全にするわけにはいかないということを示しています。

ブランド力の低下による売上損失の推定

■ 累積売上損失



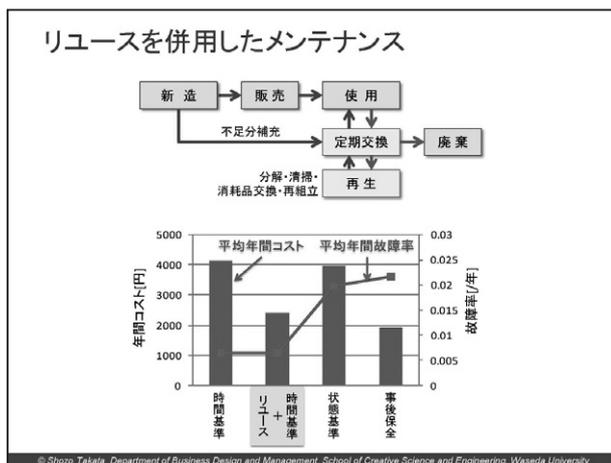
■ 事後保全の適用によるコスト削減効果と売上損失の比較



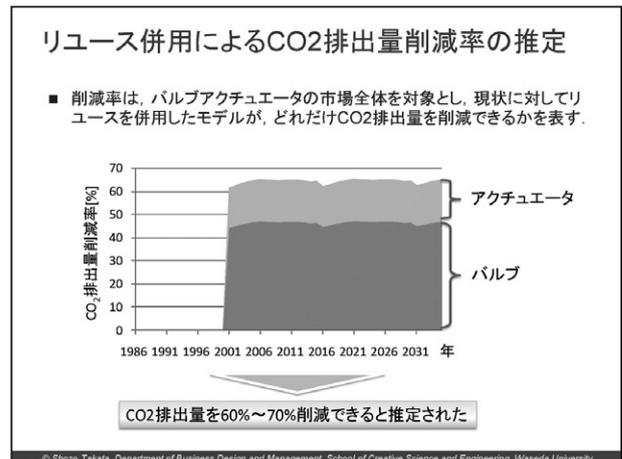
© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

それでは、どのようにすればコストを下げるかということになりますが、ここでは、定期交換したバルブアクチュエータをもう1回再生して使うことを考えました。

劣化故障の発生を部品ごとに見ていきますと、バルブについては異物によるボールの固着と摩耗によるシートでの漏れ、アクチュエータについてはポテンションメータの不具合といった一部の部品の故障に限られています。その他の部品は、劣化故障の可能性が低く、寿命を使い切っていないと思われます。そこで、故障原因となる部品だけを交換して、定期交換したバルブアクチュエータをリユースすることで、信頼性を保ちながらコスト削減が可能となります。



この例では、EoLまで視点を広げることによって新しい選択肢が出てきて、メンテナンス費用を低減できる可能性が出てくるということが分かると思います。また、リユースをすることで製造時の環境負荷を下げることもできます。あくまで概算ですが、バルブアクチュエータの市場全体に対してリユースを適用できたとすれば、60~70%の環境負荷を削減できる可能性があります。

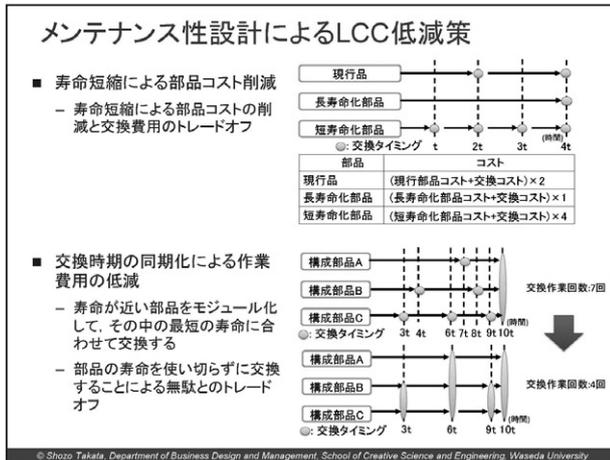


最後の事例も同じバルブアクチュエータを対象としていますが、BoL段階に視点を広げた場合です。設計段階で検討すべき課題の例として、2つのことを考えました。

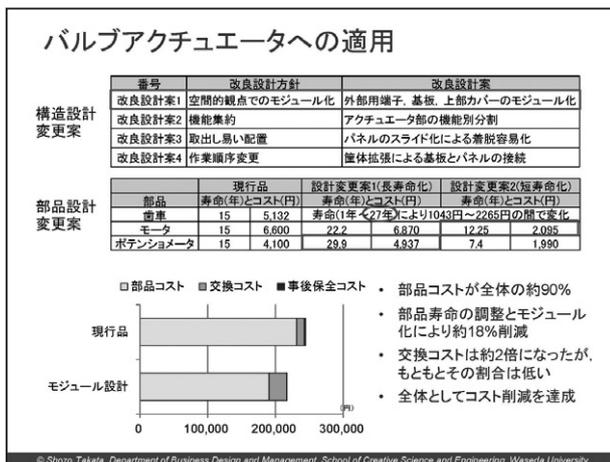
一つは、部品のコストと寿命の間のトレードオフの問題です。例えば、歯車の材料を、現状の焼結金属から樹脂製のものに変えるとコストが下がりますが、寿命も短くなり交換費用が増加します。また、歯幅を小さくしていけば、さらに寿命が短くなりますがコストも下がります。そのような条件のもとで、アクチュエータの部品の寿命をどのくらいに設定するのがよいかを考えました。部品コストと交換コストとのトレードオフの問題を計算してみたということです。

Special feature article

もう一つは、予防保全で部品を交換する場合、構成部品ごとに交換周期を決めてしまうと交換時期がバラバラになり効率が悪くなるので、複数の部品の交換を一緒に行うことで作業コストを削減することを検討しました。



これらの計算もライフサイクルシミュレーションを使って行いました。部品の寿命をコントロールするとともに、いくつかの部品を一緒に交換するとした場合、現行より18%程度のコスト削減ができることがわかりました。この数字にどれだけ現実的な意味があるのかはわかりませんが、例えばこのようなことを考えながら、さまざまな選択肢を評価することが大事ではないかという意味で、紹介させてもらいました。



5. 海外のメンテナンス関連研究プロジェクト

最後に、以上述べてきたようなライフサイクルメンテナンスの考え方に関連した海外の研究の状況を簡単に紹介したいと思います。最初のものは、イギリスのクランフィールド大学を中心として昨年開始されたThrough-life Engineering Servicesという研究です。ここでEPSRCというのは、大学等の研究機関に研究資金を出すイギリスの機関で、日本でいうと学術振興会のような組織です。この研究プロジェクトはロールスロイスがサポートをしています。ロールスロイスは、ジェットエンジンという「もの」を提供するビジネスを、「性能」を提供するビジネスに変化させています。例えば20年間の性能をこのくらいの稼働率で保証しますからいくらかかりますというビジネスをしたいのです。そのためには、効率的なメンテナンスやライフサイクル管理の研究の必要性があるわけです。



Through-life Engineering Services
A Multi-sector National Centre

44 The UK manufacturing sector is strong in providing through-life engineering services for their global customers. The EPSRC Centre and its experts are committed to their equity which to ensure high value products with enhanced reliability, productivity and reliability, with the lowest life cycle cost and improve their competitiveness.

Line partners: Rolls-Royce, Cranfield University, Durham University, BOMBAER

TESプロジェクト

Core projects

- Study of cross sector challenges in through-life engineering services feedback to design and manufacturing
- Reduction of no-fault found (NFF) through system design
- Characterisation of in-service component feedback for system design and manufacturing
- Improvement of system design process for whole life cost reduction
- Self-healing technologies for electronic and mechanical components and subsystems

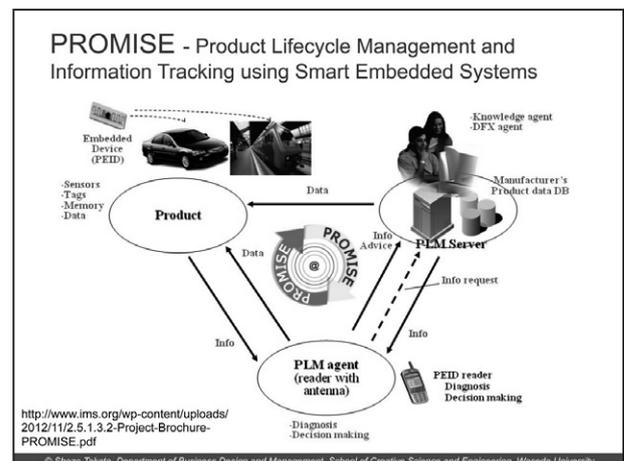
<http://www.through-life-engineering-services.org/home>

<http://www.through-life-engineering-services.org/home>

より引用

同じような考え方で、ドイツのMRO (Maintenance, Repair and Overhaul) というプロジェクトがあります。これはベルリン工科大学にあるフラウンホーファー研究所が中心となって、さまざまな研究を行っているという例です。鉄道や飛行機などをターゲットにして、やはりライフサイクル全体の管理の最適化を目的に研究をしています。

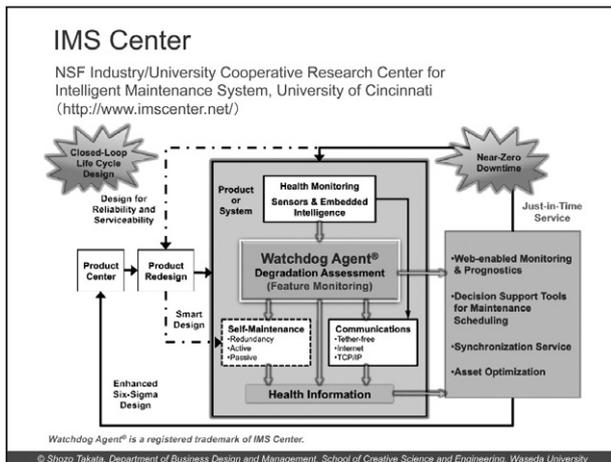
次は、PROMISEという、数年前に終了したEUの研究プロジェクトで、いかにライフサイクルデータを収集し、それを有効に活用するかということ、ICTの側面からアプローチした研究です。



Markus, F., Closed-loop product life cycle management, using smart embedded systems, International Society of Automation, 2011. より引用

Special feature article

一方、アメリカのシンシナティ大学のJay Lee教授が中心になって、IMS Centerという研究所を運営しています。ここでは、インテリジェントなモニタリングシステムを開発し、さまざまな設備に適用しようという取組みを積極的に行っています。



<http://www.imscenter.net/>

より引用

6. まとめ

今回の講演のまとめをさせていただきたいと思います。最初に申し上げましたように、ストック型社会が進展していく、あるいは資源環境問題が深刻化していくという中で、効率的な設備管理の必要性はますます高まっていると思います。この分野は相変わらず地味な分野ではありますが、その重要性は間違いなく高いものがあると考えています。設備管理の効率化を達成するためには、メンテナンスを単にメンテナンスとして捉えるのではなく、O&M、あるいはライフサイクルの中で位置づけ、全体として最適化をめざしていく必要があります。そのようなメンテナンスの概念を、我々は、ライフサイクルメンテナンスと呼んでいるわけです。

ライフサイクルメンテナンスを実現していくためには、ICTを活用したさまざまな技術が必要で、その一例として、ライフサイクルシミュレーション技術を紹介させていただきました。

最後に、海外における研究の状況をお話させていただきました。現在、単純にものを提供するのではなく、機能を提供する、あるいはものとサービスを融合して提供するということが盛んに議論されるようになっている中で、ライフサイクルビジネスへの関心が高まっています。特にインフラ産業などにおいては、このような傾向が今後さらに強まってくると考えられ、その中で、今回紹介させていただいたような技術が、まさに求められているのではないかと思います。

まとめ

- ストック型社会の進展、資源・環境問題の深刻化から、設備の適切な管理の必要性が高まっている。
- 設備管理の目的を達成するためには、メンテナンスをO&Mあるいは設備ライフサイクルの中で位置づけ、最適化を図る必要がある。
- このようなメンテナンス概念をライフサイクルメンテナンスと呼ぶ。
- 効果的・効率的なライフサイクル管理のためには、ライフサイクルシミュレーションなどのICTを活用した技術が重要である。
- 近年、B2Bを主体として、ライフサイクルビジネスへの注目が集まっており、特にインフラ産業においては、今後は主要なビジネス形態になっていくと考えられる。

© Shozo Takata, Department of Business Design and Management, School of Creative Science and Engineering, Waseda University

ご清聴ありがとうございました。