メンテナンス・テクノロジーの確立と評価

正員 渡辺 保彦 (渡辺エンジニアリング)

1. はじめに

メンテナンスについての注目が高まっているが、そこにある問題点を広い立場から整理する。地球の資源の有限性と関係し、経済の景況と強く結び付いている。技術開発に成功しても次の段階のメンテナンスに失敗すれば、折角の成功もつまずくことをスペースシャトルの例が教えている。

メンテナンスの用語は幅広く使われているが、ここで考えるのは産業の機械システムに関するものである。産業のメンテナンス・コストは1983年度において11.6兆円で GNP の 4.23% に相当し、このテクノロジーが国民経済に深く関係していることを示している。

メンテナンス・テクノロジーはそれぞれの産業の場で発達してきたため個別的で交流が少なかった。今後テクノロジーとして発展させるために統合化が緊要でその途を考案する。またメンテナンスが重要であればあるほど正しい評価方法が欲しい。ケーススタディを加えてその具体案を述べる。

2. メンテナンスの問題点

2.1 なぜメンテナンスに注目するか

まず最初に地球人口の増加と資源の有限性である。膨張する人口に快的な生活を保証するためには、再生産不可能な有限資源を有効に利用すべきであろう。資源を大量に消費して製作した機械システムをなるべく長く有益に使用することは当然で、メンテナンスに注目するゆえんである。

第2は経済成長の低下である。1970年代初頭までの成長期には技術革新と大量生産とが経済を支配した。より強い競争力をもつプロセス、より大形のものが次々に機械システムを更新した。しかし1970年代後半から成長は低下し、大量生産は伸び悩み、新プロセス

もまれにしか出現しなくなった。現在ある機械システムを長く稼働させる情勢となり、メンテナンスが当然重要となった。

第3には良質の製品とサービスを願望する時代である。これを可能にするのは製品、サービスを生み出す機械システムを高いレベルでメンテナンスすることである。

第4にはメンテナンス・コストの高騰である。人件費高と老朽化に伴ってコストは高騰する傾向にある。経済の景況が悪いのでコスト削減への圧力が強い。メンテナンスをこの点から見直す気運となった。

■第5には複雑化、連続化、自動化、無人化への対応である。機械システムは上記の傾向をたどっており、故障が多発したのではその意義を失う。ここではメンテナンスの完備が前提となる。

第6にはメンテナンスと技術開発との並存である。スペースシャトル、原子力発電所など多くのプロジェクトが技術開発の成果を上げた。しかし、使用の段階で思わぬ災害が突発し、開発を停滞させる。ひとたび技術開発に成功しても、その後のメンテナンスはこれに劣らず重要である。

第7には海外技術サービスの柱とすることである。我が国はメンテナンスが上手である。この技術をもつと諸外国、特に途上国に対してメンテナンス・サービスを行うことは国際協力に寄与するであろう。

2.2 メンテナンス・テクノロジーの特性

メンテナンスは注視の中に押上げられつつあるが、そのテクノロジーの特性は何であろうか。それは①多様性、②不定性、③非繰返し性、④横断性である⁽¹⁾。すなわち、①あらゆる分野のあらゆる機械に対応する多様性をもつ。②故障が確定するまではその部位は不明であり、モードも不明である。③故障部位を修復すればその部位は当初と全く同一ではなく、全く同じ故障は再び起らない。④しかし、このテクノロジーは検知、診断、検査、修復、手入整備などの同じパターンをもち横断性がある。

Integration and Evaluation of Maintenance Technology. By Yasuhiko Watanabe, Member (Watanabe Engineering Corp.).

また、他の角度からみるとメンテナンス・テクノロジーは、

(i) 使用の工学

(ii) 現場実務に密着した工学

である。機械システムは研究開発、設計製作の場のみ技術があるのではなく、使用の場にも技術がある。時間の経過と共に起こる挙動について設計での知見は不十分であり、未解決のまま使用者の対処にゆだねられている。使用中に手入整備を行い、または故障修復を行って初めて長期の使用に耐える。使用は長時間かつ広大な実験場であり、設計での不備を補完する。設計、製作、使用の間に知見の交換があって技術は一層進歩する。

メンテナンスは企業体の実務であり、直接経済活動の成果に関係する。高いレベルの技術、確実な作業、合理的なコスト管理が三位一体となってメンテナンスは成功する。メンテナンスの作業は高い所、タンクの中、計器盤の裏など困難な場所で実施されることが多い。そこで行われる一人の作業者の作業結果がメンテナンスのすべてを支配することがある。製作の場では随時作業管理を行い、また中間行程でも検査を行うことができる。製作の作業とメンテナンスの作業とはかなり異質のものである。メンテナンスには必ずコストがかかる。実務であるからコストの多寡は無視できない。メンテナンス・テクノロジーはこうに三位一体の中に位置づけられる。

3. 経済との関係

3.1 産業のメンテナンス・コスト

メンテナンス・テクノロジーを考察するうえで、我が国のメンテナンス・コストがどのくらいであるかを参考にしてみたい。産業における機械システムのメンテナンス・コストを1983年について集計すると次のようになる(単位10億円)。

鉱業	26.4
製造業	3,279.4

建設業	306.4
用 役	1,327.3
電気	1,122.4
ガスその他	204.9
運 輸	5,714.3
鉄道	1,620.0
自動車(自家用を含む)	3,783.5
航空その他	310.8
通信とコンピュータ	973.1
電信電話	651.0
コンピュータその他	322.1
合 計 (A)	11,644.9
GNP (B)	275,230.1
(A)/(B)	4.23%

ここでメンテナンス・コストとは、メンテナンスを本務とする従業員の人件費、メンテナンスのための部品費、資材費、外注工事費および直接経費を合計したものとする。

集計の方法はメンテナンス・コストを公表している業種はその値を、修繕費のみを公表している業種はその他のコストを推定して加算した。製造業などの純民間会社には公表されたデータが少ないので諸資料から推算した。

3.2 メンテナンスと国民経済との関係

良いメンテナンスは設備の稼働率を上げ、製品とサービスの質を向上し、設備の耐用年数を延ばし、また安全にも寄与する。GNPの4.23%に及ぶ産業のメンテナンス・コストが有効に消費されたか否かは後年度の経済発展に大きく影響する。

製造業は純私企業で競争原理が働いており、メンテナンス・コストはおのずと最低化を目指しているはずである。用役、運輸および通信の分野では公益事業が多く、そこでは料金が認可制で、査定にコスト主義を取るものが多い。コストとして認められるものならという心理が働かないであろうか。

販売電力量あたりのメンテナンス・コストについて

表1 日米電力会社メンテナンス・コストの比較

	SOUTHERN CALIFORNIA EDISON				COMMONWEALTH EDISON			DETROIT EDISON			九電力会社計			
	メンテナンス・コスト		販売電力量		(A)	(B)	(A)/(B)	(A)	(B)	(A)/(B)	(A)	(B)	(A)/(B)	(A)/(B)
	(A)	(B)	(A)/(B)											
	10 ⁶ \$	10 ⁶ kWh	\$/10 ⁶ kWh		10 ⁶ \$	10 ⁶ kWh	\$/10 ⁶ kWh	10 ⁶ \$	10 ⁶ kWh	\$/10 ⁶ kWh	10 ⁶ 円	10 ⁶ kWh	円/kWh	\$/10 ⁶ kWh
1981	193.5	62.5	3.10		224.8	60.3	3.73	165.0	34.0	4.85	909.4	443.5	2,051	12.82*
1982	210.2	59.3	3.54		262.9	59.2	4.44	171.0	32.0	5.34	865.1	449.1	1,926	12.04
1983	279.9	59.9	4.67		287.6	61.2	4.70	187.8	34.3	5.48	1,056.8	477.5	2,213	13.83
1984	419.5	63.3	6.63		316.1	63.3	4.99	203.9	35.9	5.68	1,107.7	500.9	2,211	13.82

*: 1\$=160 円と仮定

9電力会社とアメリカの3有力電力会社とを比較したものが表1である。ここで両国では制度、設備が異なること、我が国では景気対策上多額の支出を要望されることがあるなどの事情を考慮に入れる必要がある。

上下水道、道路、港湾などの社会資本にあっては問題はもっと深刻である。今後、社会資本の老朽化が進むと公共事業費の大部分をメンテナンスに食われる恐れがあるからである⁽²⁾⁽³⁾。ここではメンテナンスの効率化とコスト低減化とが一層望まれている。

4. メンテナンス・テクノロジーの統合化

様々分野、職域でメンテナンスが行われている。そこにある技術の多くは、個別的であり応急的であって交流も少なかった。メンテナンス全体を高い位置から観察すると共通の性質をもっていることがわかる。技術を統合して進歩に対する基盤を構築し、交換と伝達とを容易にすることが緊要である。メンテナンス・テクノロジーは図1のように構成されている。

(1) フェイズ1 メンテナンス・テクノロジーは使用の工学であることを述べた。使用者が機械システムを使用しているとやがて故障が起こる。機械システムは部品から成り、そのいずれかの部品の機能が時間の経過と共に低下し故障に至る。そこで、

- (i) 部品の機能
- (ii) 故障モード
- (iii) 故障のメカニズム

以上の3項目の時間についての相互関係の解明がテクノロジーの中心課題となる。

部品の機能は負荷に対応している。負荷には内部負荷(内部または隣接部品から受ける負荷)と環境負荷(外部から受ける負荷)とがある。この負荷を考えながら機能の主要なものを分類表示すると表2のようになる。部品の機能が低下するとき様々な故障モードが

表2 部品の機能の分類

機能の分類			機能(主要なもの)
1 構造体 に 荷 重 を 負 担 す る 部 品	1.1 構造体	1.1.1 構造部	1. 構造体の構成(柱、はり、枚、フレームなど) 2. 力の支持 3. 力の伝達 4. 補強
		1.1.2 接合	1. ねじ 2. リベット 3. 継手 4. キー
	1.2 機構	1.2.1 機構	1. 歯 2. ばね 3. カム 4. プレーキ 5. 運動の拡大または縮小
	1.3 運動体	1.3.1 運動体	1. 回転体 2. 羽根 3. 往復運動 4. 軸受 5. 運動拘束
2 相 の 境 界 (境 界 負 荷 に 対 応 す る 部 品)	2.1 相の隔離	2.1.1 流体の封じ込め	1. 封じ込め(压力容器、タンク、パイプ) 2. 流体の伝送 3. 分割 4. 隔離 5. ピストン 6. レール 7. パッキング
		2.1.2 流体の制御	1. 弁 2. ノズル 7. 流体理論素子
		2.1.3 エネルギ-の封じ込め	1. 電気絶縁 2. 磁気絶縁 3. 熱絶縁 4. 遮へい 5. 防音 6. 放射線遮へい
		2.1.4 エネルギ-の制御	1. 電気スイッチ 2. 光スイッチ 3. 制御器 4. 信号の伝送
	2.2 2相間の作用	2.2.1 エネルギ-変換	1. 電気光変換素子 2. ビエソ電気 3. 熱交換 4. 穀収 5. 照明
		2.2.2 加工	1. 切削 2. 研削 3. 電解加工
		2.2.3 物理的および化学工学的作用	1. 圧延 2. プレス 3. 摩擦 4. 吸収 5. ろ過 6. 溶解 7. イオン交換
		2.2.4 化学反応	1. 重合 2. 酸化 3. 腐食 4. 電池 5. メッキ
		2.2.5 保護	1. 塗装 2. 表面処理 3. 保護カバー
		2.2.6 計測	1. 温度測定 2. センサ

現われる。例えば、構造体の構成材の機能についてはクラック、クリープ、座屈などの故障モードが対比し、電気絶縁の機能については沿面放電、内部破壊などの故障モードが対比する。また、それぞれの故障モードについて故障メカニズムが解明される。

このような時間についての相互関係の解明からメンテナンスにおける点検、検査、診断、修復および手入整備が技術的根拠を得ることになる。

また、この解明は長い年月を要し、使用者と設計・製造者との間の協力が欠かせない。得られたデータは設計者にフィードバックされるべきであろう。

(2) フェイズ2 部品の故障をシステムの立場からいかに支援するかがこのフェイズである。一部に故障が出てもシステム全体としては機能が損われないことが望ましい。

第1にはシステムの構成を使用の実績に照して改善する。システムの冗長性を点検し再編成する。問題の機器があれば検査と修理を集中してシステムへ影響の及ぶのを排除する。

第2にシステムの稼動を下げないような技術を開発する。稼動のまま行う点検・検査法、機械装置を止めずに行う修理技術、極めて迅速な修復技術、故障部品の切捨て法などの開発である。

(3) フェイズ3 人間とのかかわり合いに関することである。ここで最も問題となるのは作業者の行

図1 メンテナンス・テクノロジーの統合化

う作業である。メンテナンスの出来映えは個々の作業に依存することをさきに述べた。メンテナンスの成果を上げるために良い作業を招来する技術を考究せねばならない。このために、

(i) 作業者に対する教育訓練

(ii) 作業に対し人間工学的対処

がある。教育訓練は基礎的技能の向上を繰返し実施することである。部品が機能を正確に保つように、仕上げ、組立て、嵌合、接続、溶接および検査などの基礎技能を繰返し訓練する。

人間工学的対処としては、①正確な作業を行いやすい機械のレイアウト、②正しい姿勢がとりやすい機械の形状、③誤り作業の防止（例、A型のカバーはAのみにはまり、Bにははまらない）、④正確な作業のできる工具の使用（例、トルクレンチの使用）、⑤標準作業のみで作業を構成する、⑥繰返し作業には自動化を導入するなどである。

(4) フェイズ4 テクノロジー実施の手法の考究である。機械システムの特性に見合った手法を選択して適用する。複数の手法を混合して適用する場合もある。手法のフレームの中でマニュアル化されドキュメント化された方法に従い実施する。計画、実行および管理がむだなく、落ちなく実施でき、記録が機械的にできる。データをコンピュータで処理することも多く行われている。現在まで考えられた手法は次のようである。

(a) 予防保全 機械の稼動した時間を基準として点検、修理を行う方式である。故障はいまだ起きていないが、点検して故障の直前であったことを発見することもある。定期修理制はこの一種である。この方式は歴史が長くマニュアルが完備している。計画、実行が良く制御され、点検基準、修理基準が完成し、記録帳票が整備されている。

(b) 予知保全 機械を稼動のまま常に診断し、故障の少し手前で整備する。診断技術が向上すれば有力な手法である。

(c) 事後保全 機械の故障が発生した都度、修復を行う。

(d) 信頼性保全 信頼性データを基準にしてメンテナンスを行う。

(e) 遠隔診断・遠隔修理 故障発生現場より離れた場所から信号を介して診断を行い、修理を行う。現在は情報通信設備で実施されている。

(f) 保全ロボット方式 極限作業において活動が待望されているが、やがて広範に行われるであろう。

(g) 知識工学化 検査、診断などを知識工学を用いて自動的に行う。

以上のように、メンテナンス・テクノロジーはフェイズ1からフェイズ4で構成され、それぞれのフェイズにおいて対象を研究し体系化すると共に、フェイズ全体として統合の道を歩むものである。

5. 評価

5.1 総括的評価

メンテナンスは経済活動であるから企業体の存続を安泰にし、更に有利に導かねばならない。当面の営業活動に適合するか否か、また次に総体的かつ長期的な視野で評価されるべきである。総括的評価には3段階があり、第1段階から順次満足されねばならない。

(1) 評価の第1段階 機械システムの機能低下が破壊的災害にまで広がり、企業体に重大な損害を与える、また環境に被害を与える場合がある。メンテナンスが原因でこのような災害が生じたときは、メンテナンスに対する評価は零点である。そのような可能性があるならば、最大限の努力でメンテナンスを行い、この種災害を予防せねばならない。しかし、一般には災害の原因はメンテナンス以外にある場合が多い。計画、設計の時点からシステム全体として冗長性、多重防護法または空間的防護性を採用し、運転・メンテナンス・警防と協力して災害を未然に防ぐべきであろう。

(2) 評価の第2段階 機械システムの機能低下により、生産またはサービスが欠落し企業体に損害を与える場合である（例、機械が故障して製品の納期が遅れた）。損害は計量可能で損害額は機械システムの稼動率として捕えられる。図2に示すように、メンテナンス努力を追加し（メンテナンス・コストを増やし）A点からB点まで稼動率を上げるべきである。

図2 稼動率とメンテナンス・コスト

この段階は一般にメンテナンスのレベルがいまだ低いので、レベルを向上して稼働率を上げ、経済的利益を増進する必要がある。

(3) 評価の第3段階 既にメンテナンスのレベルが相当の高さに達しており、第1段階の災害、第2段階の操業損失は克服済みの場合である。我が国の企業体の多くはこの段階にあり、一定のレベルに達したメンテナンスの評価がこの段階である。

メンテナンスは実務であり経済活動であるから、メンテナンス・コストの産出量に対する比を指標として把握し評価する。これをメンテナンス・コストの生産性係数と仮称する。

$$\text{メンテナンス・コストの生産性係数} = \frac{\text{ある期間のメンテナンス・コスト}}{\text{同じ期間の産出量}}$$

この産出量は企業体の成果を代表するものを選ぶ。係数は長い年月にわたる変化の度合いを捕えるのが良い。また係数は前年比百分率で観察するのが結果をわかりやすくする。

ケーススタディとして電電公社（当時）は産出量として電話機数を取り、民営鉄道は輸送人キロを取り、図3、図4で示す。双方とも評価の第1段階と第2段階とは克服済みと考えた。理由は電電公社では加入電話受付故障率（1箇月100加入電話あたりの件数）が1972年より1983年までの各年1.3、1.0、0.9、0.8、0.7、0.6、0.6、0.59、0.55、0.49、0.48、0.47であり世界の水準を凌駕している。また民営鉄道では運転事故率（列車100万キロあたりの件数）が1972年より1983年までの各年6.9、6.3、5.2、4.5、4.0、3.4、3.0、2.7、2.3、1.9、1.8、1.6であり、かなり好成績である。図3を観察すると、メンテナンス・コストの生産性係数前年比百分率は賃金上昇率のそれよりかなり低く、GNPデフレータのそれよりもやや

図3 電電公社（当時）のメンテナンス・コストの生産性係数：前年比百分率

図4 民営鉄道のメンテナンス・コストの生産性係数：前年比百分率

低位にある。このことは賃金上昇を十分吸収してメンテナンスが生産性を上げていること示している。図4を観察すると、この生産性係数は賃金上昇率よりやや低いか同等の線にあり、この事業の難しさを示している。ただし、これは民営鉄道142社の総計であり、各社ごとには大きな隔差がある。

以上の例は公表数字を基にした評価である。企業体にあっては自ら所有するデータのうち、最も実状を反映する産出量を選択すれば一層明確に評価できるであろう。企業体内の各部門の評価については、その部門を代表する産出量を採用することにより部門評価が可能となる。期間はケーススタディでは各年としたが、各四半期、各月など必要に応じ工夫すればよい。

5.2 個別テクノロジーの評価

メンテナンスはもろもろのテクノロジーの統合からなるから、個別テクノロジーを評価する必要もある。これらのうち有効なものは次のようである。

(1) 故障率による評価 故障を減らすことはメンテナンスの主要眼目である。機械ごと、機種ごとに故障率を調べ期間による変化を解析して評価する。故障度数率、故障強度率、突発故障率などに分解してみると細部の状況が明らかになる。

ここで機械部品はその製造年度により品質向上度が違い故障率も異なるから、この点を加味して検討せねばならない。この事情を示す一例として表3を付した⁽⁴⁾。

(2) 修理技術の評価 第1は修理の所要時間を記録し検討する。例えば、故障が起きても15分以内に修理すればサービスに影響しないシステムにあって

表 3 自動車電子部品の市場における故障率

名 称	1973		1975
	設置数 ($\times 10^4$)	故障率 (ft)	故障率 (ft)
IC	デジタル リニア	30 68	880 270
トランジスタ	小信号用 パワー用	201 27	150 210
ダイオード	プレーナ形 スイッチ用	38 266	75 20
抵抗		945	2

は、故障の 15 分以内修理完成率を評価の対象にする。

第 2 は修理再発率である。同じ箇所を再び修理する度合いで評価する。

(3) 診断の適中率 診断技術の開発が盛んであるが、診断の結果故障と判定した場合その適中率をみる。これは診断技術の進歩に良い役割を果たす。

以上、メンテナンスの評価について説明したが、極めて実務的即物的な立場であった。メンテナンスが重要になればなるほど、ここにもニュー・テクノロジーが必要である。研究開発はこの評価の枠外で活発に行われねばならない。

6. ま と め

メンテナンスがますます重要になりつつあるが、その背景を考え、国民経済に対する影響が強いことを指摘した。また我が国の海外経済協力のための技術力として、メンテナンス・テクノロジーは極めて有力な柱

となりうる。

メンテナンスは経済活動であり高いレベルの技術、正確な作業、適切なコスト管理が三位一体となって効果を発揮する。メンテナンス・テクノロジーはこのように位置づけられるものであるが、今後はテクノロジーとして発展するために統合化の道を取り、基礎を固め交流を盛んにする必要がある。

メンテナンスは使用の工学として設計・製造における工学と対等の立場を確保し、存在を主張すべきである。手はじめとして使用者の購入仕様にはメンテナンス技術条項を必ず加え、設計寿命、点検・検査の方法、修理要領などの明示を要求するべきであろう。また製造者側もメンテナンス問題への応答を積極的に考えるべき時期にきている。①メンテナンス技術条項に回答し、②保全しやすさ、フォールトトレラントなどメンテナンスを意識して設計、製作を行い、③使用で得た知見のフィードバックを求めるチャンネルを構築するなどの立場をとることを期待したい。

(昭和 61 年 10 月 2 日受付)

文 献

- (1) 吉川：「保全技術の必要性と可能性」，精密機械，49，81（昭和 58）
- (2) 上原：「拡大する社会資本のメンテナンス市場」，ザ・エンジニアリング・ビジネス，p. 8（昭和 57-6）
- (3) 税所：「社会資本とメンテナンス」，開発，p. 34（昭和 59-10）
- (4) S. Yamamoto：「Failure Analysis」，International Conf. on Automotive Engineering，p. 519（1981）