

## メンテナンストライボロジーの現状と課題

木村 好次／東京大学生産技術研究所

### トライボロジーとメンテナンス

“トライボロジー”という言葉が誕生したのは1966年のことだから、もはや新語でもないが、それほど歴史のある言葉でもない。

“相対運動を行いながら相互作用を及ぼしあう表面およびそれに関連する実際問題の科学技術”と定義されるトライボロジーは、摩擦、摩耗、潤滑などをおもな対象とする工学の一分野である。それまで“潤滑”という言葉が同じ意味に使われていたが、どうもこの言葉には“油を差す”というような単純作業のにおいが強く、機械工学、化学工学、材料科学などに広がりをもつ一つの分野を代表するにはいささか不適切と考えられ、ギリシャ語をひっぱり出して新しくこしらえたのである。

もう一方の“メンテナンス”という言葉も、機械のお守りというような単純作業のにおいが強いことでは、上述の“潤滑”と似たところがある。近年対象とするシステムの巨大化・複雑化、さらには資源・エネルギーの有限性の認識にともなって、生産に対比されるべき重要性をもつ工学の分野としてメンテナンスを位置付ける必要が生じた、その学問的な体系化を目指し、ライフサイクル・コストを評価関数として生産から運転、さらに廃棄までの一貫した取扱いが試みられ、“トライボロジー”の成功に倣って“テロテクノロジー”という言葉が提案されたが、こちらはすでに定着している“メンテナンス”にはかなわなかったようである。

さて“トライボロジー”と“メンテナンス”は、どちらも表舞台に立つことが少なく、ぱっとした派手さに欠ける点でも共通しているが、実はそれら相互の内容の関わりが大変深い。メンテナンスを構成する技術の一つとしていわゆる設備診断があるが、設備のどういう部位をその対象にしているかという調査をすると、軸受をはじめ、トライボロジカルな要素が過半を占めるのが通例であって<sup>1)</sup>、メンテナンスにおけるトライボロジーの重要性が浮彫りにされている。その反面、トライボロジーに期待される経済効果を調べた結果を見ると、保全費、部品交換費の節減、耐用年数の延長による設備投資の節減など、メンテナンスに直接関連するアイテムが大半を占めていて<sup>2)</sup>、トライボロジー自体、いわばメンテナンス・オリエンテッドな工学分野であることが分かる。

### メンテナンス・システム

先に挙げた、メンテナンスの対象とするシステムの巨大化・複雑化のいい例が、鉄鋼プラントである。そこでは円滑な操業のために、膨大な数の設備を的確に管理してゆかなくてはならない。

ではどのようにして、それらのメンテナンスを行えばいいのだろうか。ここで厄介なのは、なんでも手厚くメンテナンスをしさえすればいい、というものではない点である。

あまりいい例ではないかもしれないが、日本の原子力発電所は、不工合による予定外の休止が少ない点では世界に冠たるものだけけれど、予定された休止、すなわち定期点検の形で行われるメンテナンスのための休止時間が長いといわれる。これは安全性を重視した一つの結果ではあるのだが、かりに1回の定期点検に要する時間が3箇月であったとして、それを2箇月に短縮できれば、発電設備を10%減らせる計算になる。鉄鋼プラントに話を戻すと、たとえば高炉が最も重要な設備の一つであり、その故障は許されないとしても、毎日1回火を落としてメンテナンスをする、なんて方法が現実的でないのは明らかだろう。

さて、そういうメンテナンスの計画をたてるときに、メンテナンスの善し悪しを評価する基準をどうとればいいのか。それは対象とするシステムの違いによって、必ずしも同じではない。常識的に考えて、安全性、経済性など、満たすべき要求はいくつかあるが、システムが鉄鋼プラントであるのか原子力発電所であるのか、あるいは航空機であるのかなどによって、具体的な点は微妙に違う。

いま話を単純にするために、経済性を基準とした場合を考えよう。粗雑な表現になるが、手厚いメンテナンスを行えば、上述の原子力発電所の例のように、不工合による休止がもたらす故障損失は少なくなるが、メンテナンス・コストは増大する。逆にラフなメンテナンスを行ってメンテナンス・コストを下げれば、その分故障損失の増加を見込んでおかなくてはならない。したがって、システム全体としての最適解を求めるためには、個々の設備についてこれらを定量的に算定し、トータル・コストを最小にすべくメンテナンス方式と実施手順を決定する必要がある。こういう決定のためのロジック、あるいはその実施手順に関するソフトウェアの体系を、メンテナンス・システムと呼んでおり、確立されたシステムがいくつもあるほか、活発な研

究が展開されている。

## メンテナンスの方式

さてこの「手厚い」メンテナンス、「ラフな」メンテナンスとは、具体的にどのようなものを指すのだろうか。

もっとも手厚い方式は、いわゆるオーバホールである。一定時間経過したら、あるいは一定時間運転したら、その設備の状態がどうであれ、分解して点検しようというもので、メンテナンス・コストもかかり、手間もかかる。上述の定期点検は、その典型的なものである。逆に一番ラフな方式は、壊れたら修理あるいは交換しようというもので、事後保全と呼ばれる。メンテナンス・コストは低減できるが、故障が起こっても大したことはないというものに、適用範囲が限られる。

両者の中間に位置付けられるのが、予防保全と予知保全である。この二つは似て非なるものであって、前者は時間を基準とした方式であるのに対し、後者は状態を基準とした方式である。すなわち予防保全では、対象とする設備、機械、あるいは要素について、予め運転時間に対して故障の生ずる確率の統計をとっておく。多くのものは、いわゆるバスタブ・カーブにしたがい、運転の最初には初期故障が多発し、やがて故障の発生率の低い偶発故障域に入り、それらの寿命に近づくと老化に起因する故障が再び多発する領域に入るといわれる。こういう場合には、最後の故障発生率が高くなる領域の手前で修理なり交換なりを行うことにより、故障の発生を抑えることが可能である。一方予知保全は、図1に示すように、対象である設備、機械、あるいは要素の状態を運転中に監視して、それが一定のレベルを下回ったところで修理・交換などの保全作業を行おうというものである。予防保全に比べると、監視するだけ余計な手間がかかるけれど、バスタブ・カーブに従わないものに対しても、あるいは故障の統計のない新しい対象に対しても適用が可能である。この状態の監視に用いられる技術が、いわゆる設備診断技術なのであって、その進展により、近年は予防保全に代って予知保全が多用される傾向に

ある。

## トライボロジカルな故障

トライボロジーの用語集などを見ると、摩擦面に生ずる表面損傷として、ずいぶんたくさん名前が載っているが、メカニズムに基づいた体系的な分類を試みるならば、一般に見られる主要な損傷は次の3種類に大別される。

**摩耗** 摩擦に伴って、固体表面から材料が少しずつ取り去られる現象。原因によってさらに区分すると、硬質の相手面あるいは異物の微視的な切削によるアブレシブ摩耗、微小な真実接触部に作用する力に基づく微視的な疲れ破壊である凝着摩耗、潤滑剤中の活性物質などとの反応生成物の除去による腐食摩耗などがある。

**ころがり疲れ** ころがり接触の繰返しによって、固体表面にクラックが入ったりはく離を起こしたりする現象。

**焼付き** 潤滑された摩擦面において、温度上昇に伴って予期した潤滑ができなくなり、固体表面が凝着をおこして摩擦係数が急上昇する不安定な遷移現象。

摩耗は、潤滑油などの流体膜によって二つの摩擦面が完全に引離されている流体潤滑状態を除くと、ゼロにすることがほぼ不可能だという点では厄介な損傷であるが、上述のように少しずつ進展するところがその特徴であるため、予知保全では扱いやすいところもある。それに対し、ころがり疲れはいったん発生すると振動を生じ、円滑な運転を不可能にすることが多く、また焼付きは往々にして機械を止めてしまい、場合によっては巨視的な破壊を生ずるといって、ともにカタストロフィックな損傷であるが、いずれも突発的であるため、発生に先立って兆候を検出することがなかなかむずかしい。

## トライボロジカルな要素の予知保全

予知保全の前提は、いうまでもなく故障が予知できることであり、そのために設備診断技術がいろいろ開発されている。

摩耗に関する診断技術として、直接寸法の変化を監視できる場合を別にすれば、もっともポピュラーなのは潤滑油中の摩耗粉の監視、いわゆる油分析法だろう。摩耗が起こると摩耗粉が潤滑油に混入するから、運転中の機械、設備から潤滑油を抜き取って調べようというわけである。もっとも単純なのは潤滑油回路中に磁性を帯びたプラグを設置しておき、鉄系の摩耗粉をキャッチしようという、マグネティック・チップ・ディテクターで、ときどき取外して摩耗粉の付着状態を見ればいい、二番目がフェログラフィーで、採取した少量の潤滑油を磁極の上に流し、摩耗粉を大きさの順に沈殿させて、大きな摩耗粉の発生状態から異常を検知したり、摩耗粉の形状から摩耗形態を推定したりす

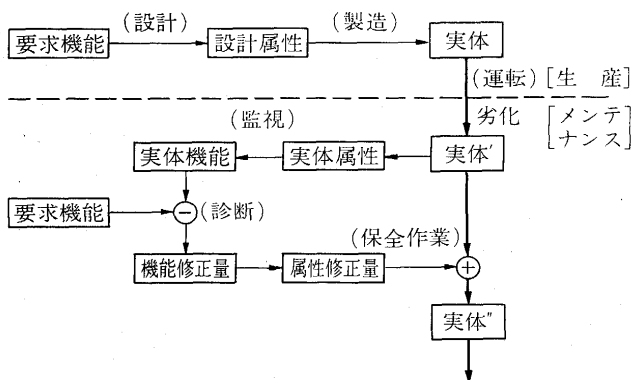


図1 生産とメンテナンスの概念

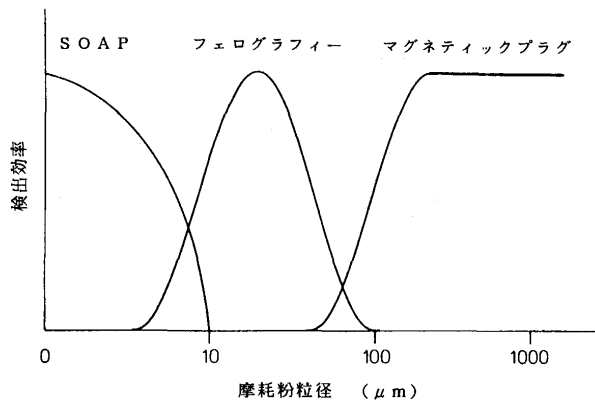


図2 三種の方法の摩耗粉検出効率

る方法である。三番目はSOAP (Spectrometric Oil Analysis Program) と呼ばれるもので、採取した潤滑油を分光分析して含有金属を定量的に検出し、その相対的な変化から摩耗の生じている部位を特定し、進行状況を監視するものである。これらは図2<sup>3)</sup>のように得意とする摩耗粉の大きさが異なっており、それらを併用することによって、より有効な監視が可能になるといわれている。

放射線の利用も注目されており、実験室的には、たとえばエンジンのピストンリングを放射化しておき、潤滑油回路において連続的に放射能を測定する方法があるが、利用できる条件はかなり限られている。また特定の重要部位の摩耗を定量的に監視する方法として、放射化した材料を摩擦面に埋め込んでおき、摩耗に伴う放射能の減少を外部から検出する方法が試みられている<sup>4)</sup>。

摩耗に比べると、ころがり疲れの予知はむずかしい。ころがり軸受は、トライボロジカルな要素としては例外的に寿命理論が整備されているものだが、その本質は統計だから予知保全には使えない。クラックの発生・進展を、運転中の振動レベルの変化によって検出しようという試みはふるくからあって、従来からの単純な振動計の使用に加え、

包絡線検波によって信号のS/N比を上げる方法<sup>5)</sup>、振幅分布の形態から損傷の進行を判断しようという試み<sup>6)</sup>などが報告されている。いずれも、損傷の発生にどの程度先立って兆候を検知できるかが問題であり、この点から近年AEの利用が注目されている<sup>7)</sup>。焼付きの予知はさらにプリミティブな段階にあり、せいぜい温度の監視が行われている程度である。

このような、トライボロジカルな要素の予知保全における第1の問題は、皮肉なことにそれらの要素が一般に安価であり、寿命が長いという点にある。安い要素に高価な監視設備を付帯させるのはどうか、というのは常識だろうし、大体軸受などは、監視設備より長もちをする。タイムシェアリングによる群管理など、経済性を考慮した手法の開発が必要である。

第2の問題は、摩耗にしてもころがり疲れにしても、上のような方法で検出したデータから、どのようにして将来の変化を推定し、余寿命を予測するかという点である。現在実際の予知保全に用いられている方法は、ほとんどの場合過去のデータを延長するだけの傾向管理であって、ごまんとある摩耗、ころがり疲れの研究成果は生かされていない。それらのメカニズムの理解に基づいた予測が望まれるところである。

## 文 献

- 1) 製造プラントのメンテナンス技術 - 設備診断技術 - に関する調査研究報告書 (日本プラントメンテナンス協会), (1985), p.33
- 2) 潤滑実態調査報告書 (機械振興協会・技術研究所), (1970), p.76
- 3) R.A. Collacott: Industrial Tribology, ed. by M.H. Jones and D. Scott, (1983), p.427, [Elsevier Scientific Publishing]
- 4) 山本匡吾, 川本淳一: トライボロジスト, **36** (1991), p.905
- 5) 星谷昌二, 関 勝美, 西尾健二, 宮地敏雄: 航空宇宙技術研究所報告, TR-675 (1981)
- 6) R.H. Bannister: Condition Monitoring of Machinery and Plant, (1985), p.11 [IMEchE]
- 7) 吉岡武雄: トライボロジスト, **39** (1994), p.685

(平成7年4月25日受付)