

スコープ

Scope



久保 愛三*
Prof. Aizoh KUBO

Number of machine troubles increases recent days. Often the causes of them look very primitive: they are careless mistakes at the designing, manufacturing and usage. Vast application of computer in the job for green engineers could be the roots of the trouble or the roots could be that they could not consider the actual situation well, because it is not written in Manuals. In the field of technology concerning functional machine elements, most of difficult work could not well be done according to the established simple procedure written in manuals. On the other hand, the application of computer and data processor is necessary to carry out the complicated job. The unconscious acts at using data processor in large scale, e.g. as developing simulation for the phenomena, can produce uncertain results, that costs huge money. It is concluded that the capability to see and to evaluate the object and its surroundings well is the most important.

Key Words: MOT, bearing, gear, pitting, flaking, edge contact, simulation

1. はじめに

scopeという言葉は、見渡せる範囲、いろいろな活動の対象としている範囲、広がり、長さを意味している。ある物事を考える場合、あるいは議論する場合、それが対象としている範囲、すなわちその議論の結果の有効範囲がスコープである。古今東西を通じ、スコープを制限することによって自分の考え方の正当性を、一見、論理矛盾なく説明する方法が全ての領域において、プロパガンダの最大の手法として利用され、種々の意見が形成されてきた。このような例は限りなく挙げることができる。このやり方が、人を効果的に納得させられる理由は、おそらく、現在議論の対象とされているものごとのスコープを正確に認識することが人間にとって極めて難しいものであるという、根元的な人間の本性 nature に由来することではないかとも思われる。技術の分野においても、スコープを正確に認識できないため、有効範囲を超えた馬鹿な設計が行われたりすることが跡を絶たない。これが、事故の絶えないことの大きな原因の一つと考えられる。経営においても、近年、MOTの重要性が叫ばれ、対応の努力がなされている。しかし、対象技術とその周辺についてのスコープを十分に持たない人が、MOT (management ON technology) ではなく MOT (management OF technology) を進めようとして

いるところに大きな危険性が潜んでいる。現場的にそれを誰も指摘しない、あるいは、指摘できないことが問題である。

本稿は、機械要素の設計という、ある極めて狭い領域においても、このスコープの限界が認められる例を紹介し、最新技術を取り扱う人間の態度について、現在の技術動向をふまえ考察する。

2. 機械要素の信頼性とシミュレーション

図1は、ある疲労折損をした、はすば歯車の歯の状態を示している。接触面の過激な疲労損傷であるスポーリングが歯面に進行し、それが破壊的亀裂を誘発し、歯の折損に至った状況が認められる。この状態を見せられて対策を尋ねられた技術者のおそらく9割以上の答えは、「歯がひどい片当たりをしていますね。だから強当たり側の接触応力が材料の耐久限界を超えてしまって、スポーリングが発生し、そこから致命的なき裂が進行したのでしょうか。したがって対策には、歯筋の傾き角の修整やより適正なクラウニングを与えと言った歯面のマイクロ形状の修整が必要で、また、装置の剛性を調整するなどして、片当たりをなくすることが基本です。」というものであろう。しかし、この意見は正しく、また十分なのであろうか。実はここに無意識のうちにスコープを侵犯している「とちり」がある。

*京都大学工学研究科 精密工学専攻 教授 工学博士

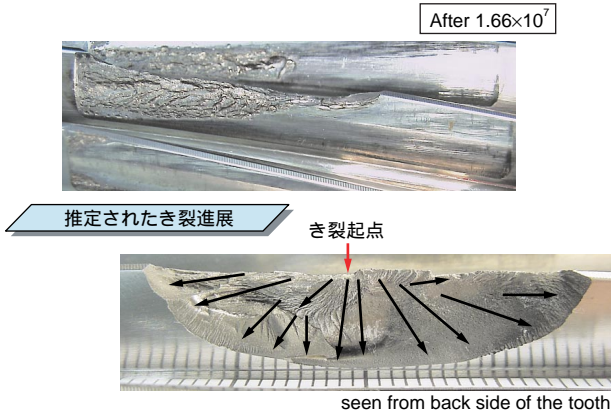


図1 スポーリングから起こった歯の折損
Gear tooth breakage caused by spalling

図2は、図1の損傷の発生から破壊に至るまでの経過を詳細に観察した結果を示す。運転のごく初期に、短い歯幅の歯車の歯の側端と接触する広い歯幅の歯車の歯面に、歯幅の強当たり側、弱当たり側とも、ポリッシュされた領域が出現し、その中に認識できるかどうかぎりぎりぐらい小さなピットが発生する。負荷の繰り返しとともに強当たり側のこのマイクロピットが拡大し、ここから表面下横方向にクラックが進展してスポーリング状態に至るのが確認できる。このごく初期に発生したマイクロピットがこの事故の引き金になったことはほとんど疑うことのできない事実であるが、では、どうしてこのマイクロピットが発生したのが問題である。

図3は機械要素の強度を判定する一般的な方法を示す。材料がどこまでの応力に耐えられるかと言う耐力と発生する応力とを比較し、耐力が発生応力より高ければ大丈夫だとするのが基本である。しかし、機械装置の用途により、加わる外力の状態は千差万別であり、その正確な見積もりは設計時点では困難なことも多く、また、機械装置の構造により、対象としている機械要素に加わる

力を正確に計算することも容易ではない。したがって、判定に用いる耐力、発生応力の大きさの定量的信頼性はそれほど高くないことが多い。そこで、歴史的には、対象としている機械の用途と機械要素の種類ごとに発生応力の指標値を算定する設計式が開発され、この発生応力の指標値と材料耐力の指標値の比較により機械の設計が行われてきた。また、安全のため、この両者の比率を安全率と称し、この比率が十分大きくなるように設計することによって、判定の信頼性の低さが事故に結びつく程度を下げるが行われるのである。

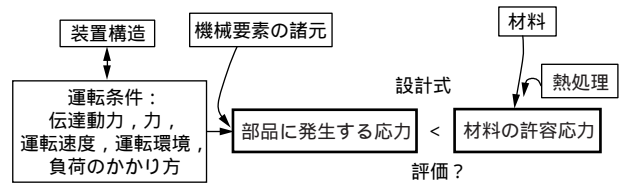


図3 機械要素の強度的信頼性の伝統的検討法
Traditional method to predict strength reliability of machine elements

上例の歯車の歯面疲労損傷に対する設計式の基本は、ヘルツやブシネスクによって提案された接触応力計算法の円筒に対する式を歯車用に若干修正したものである。ヴィデキーがこの2次元ヘルツ応力計算式を歯車歯面強度推定に採用してから、その有効性が多く実証され、接触面の強度を推定する一つの信仰のようになり、そのスコープに対する認識が失われてしまった。

歯車の歯面の接触は3次元的であるので、接触応力も3次元的に計算しなくてはだめだという拡張は容易に思いつく。図4は、歯車歯面が接触する時に、どのような応力が発生するかを3次元FEMで解析した結果の一例を示す。接触線中央付近断面の表面下応力状態は2次元ヘルツ応力計算結果とよく一致するが、接触線の両側端近くで接触圧力ならびに表面下応力の極大値が観測され

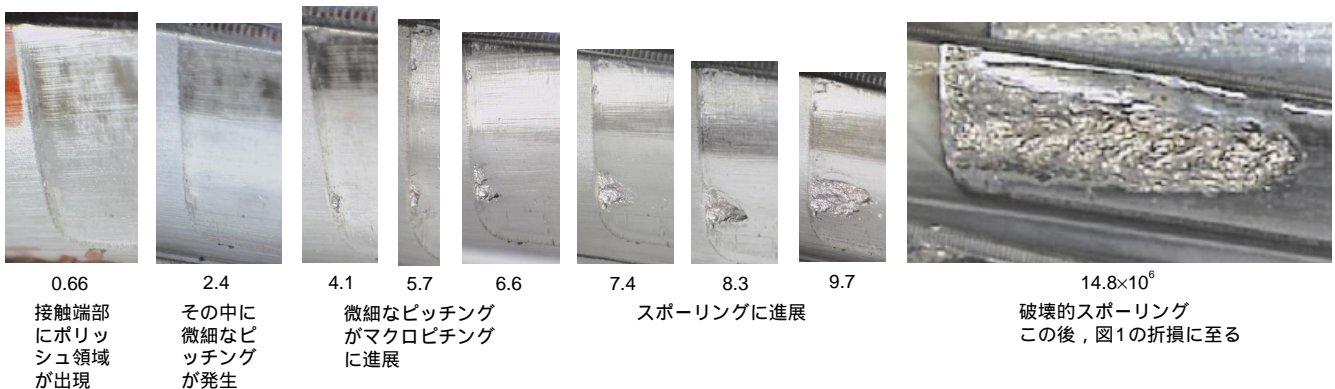


図2 真実の経過

True procedure to the tooth breakage

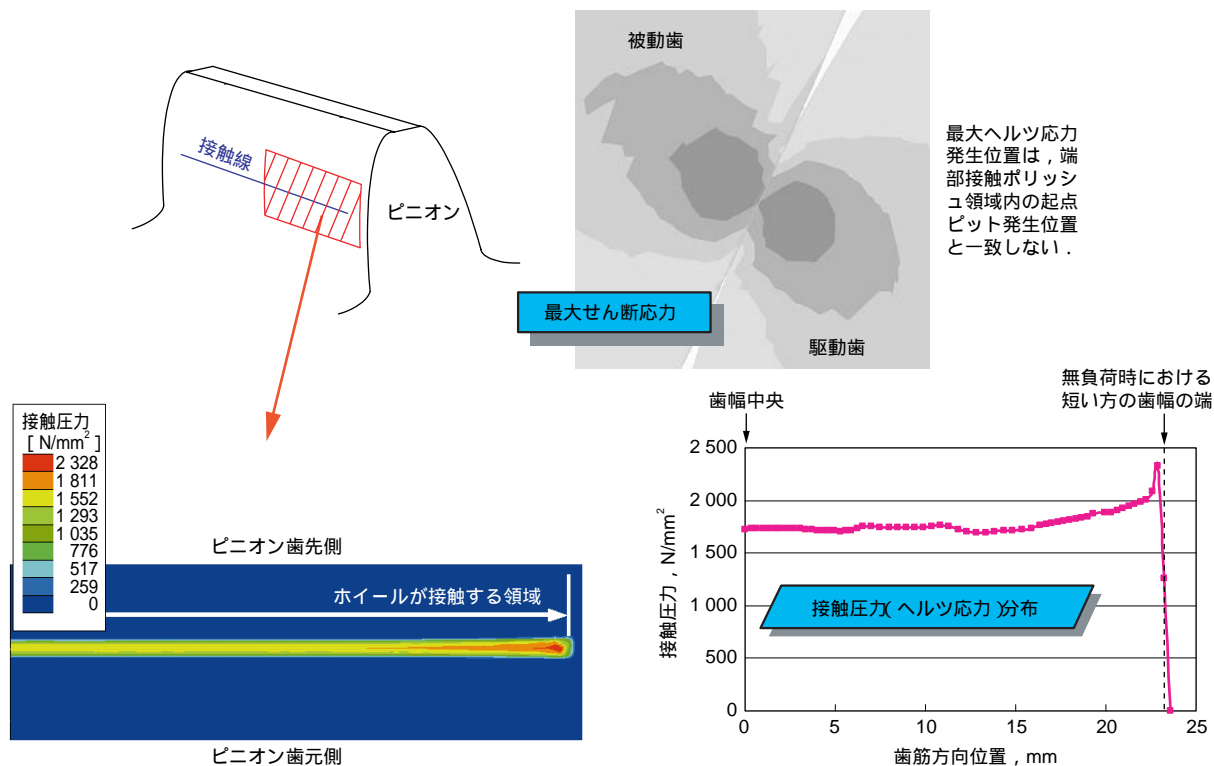


図4 歯面の接触応力

Contact stress of mating tooth flank

る。この事実はよく知られていることであるが、では歯車運転のごく初期に発生し、事故の引き金となったマイクロピットの発生原因がこの応力極大値であろうか。詳細に見ると、相手歯の端部と接触するポリッシュされた領域やその中に発生したマイクロピットの位置は、図4の接触応力極大値の位置よりもずっと接触領域の側端の近くにある。また、3次元FEMの解析結果の接触領域側端近くの応力状態は、計算モデルの立て方によってかなり大幅に違ってきて、それほど定量的に信頼の置けるものではないことも解ってきた。どうも、破壊の引き金となったマイクロピットの発生は、2次元・3次元のヘルツ応力計算で通常求まる応力値や、設計式で計算される応力値とはあまり関係のない状態で発生しているようである。歯車表面の負荷状態を見ると歯の接触変形が、接触する歯面領域の端部において、歯幅方向の局所すべりを引き起こし、これが歯のかみあいごとに繰り返される。おそらく、これに起因する材料疲労がこのマイクロピットを発生させた可能性が高い。従来のヘルツ応力信仰がこの考えに至ることの邪魔をしていたようである。

有限要素法(FEM)や境界要素法(BEM)といったコンピュータを最大限に利用した計算手法が容易に利用できるようになって、近年、トランスミッションや歯車・軸受の設計、強度の検討にも利用されることが多くなってきた。しかし、軸・

軸受・ギヤボックス全体で解析するような大規模計算やシミュレーションのプログラムは、コンピュータが一見まともらしい答えを吐き出すようにするため、プログラムを作った人しか知らないようなモデル化、単純化、近似等々の上に成り立っているのが実情である。

コンピュータは何でもできるのだ、それは正しい答えを出すのだといった、コンピュータ信仰が存在し、また、技術に詳しくない人ほどこの信仰に陥りやすい。一方、現実を正しく見ることには非常な努力と費用がかかるので、できるだけ避けたいという経済的理由もある。これらの結果として、現在、設計業務の性格が昔に比べ、かなり変わってきている。良い点もあるが、ここに大きな危険性も潜んでいる。

コンピュータは、情報を集め、整理し、複雑な計算をするのに非常に強力な道具である。しかし、それが吐き出す結果の信頼性・有効性は、プログラムに用いている前提条件の正しさ、プログラム記述の際に持ち込まれる近似の程度、また、難しい点をどうしても乗り越えなければならない時に用いる「ごまかし」の程度、そして、そのようなシミュレーションプログラムを用いる際、そのスコープを正しく認識した上の利用がなされているかどうか、に依存する。図1、図2の損傷については、2次元、3次元の接触応力の従来の解析結果そのままでは、損傷発生指標値として適用で

きないのは、上に見てきた通り明白である。この一つの小さな事実からも、コンピュータによる計算やシミュレーションを、いかに有効に利用するかについては、十分なる配慮が必要であることが解る。図3で示した強度設計の考え方に対し、実際の強度に影響を及ぼす因子は図5のようなネットワークで働く。問題は、多くの影響因子が発生応力と材料耐力の双方に働くことで、これが問題の見通しを悪くし、単純な推定をできなくしている。接触面の損傷の場合には状況はもっと複雑で、図6のようなことになり、多くの種類の損傷モード、効率、振動、その他、極めて広範囲の状況が相互に影響し合い、この範囲があまりに広いため、これら全体をシミュレーションすることは極めて困難で、適当な単純化をしない限り、コンピュータを利用した解析すらできない状況にある。

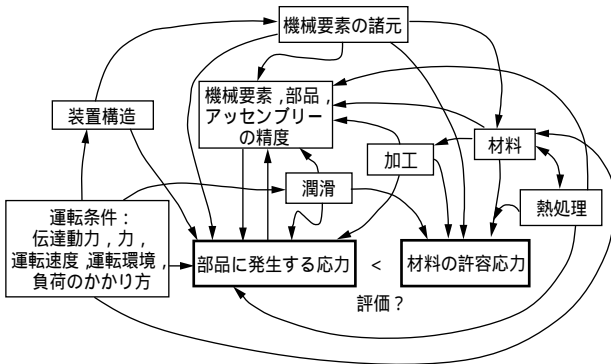


図5 機械要素の強度的信頼性

Judgement of strength reliability of machine elements and influencing factors on it

3. シミュレーションと観察

ある機械装置に起こる現象をコンピュータシミュレーションするプログラムを作り、その結果と、実験、実績データを比べて、改良を行ったり、対策を立てる作業は、図7に示すような流れで遂行される。図中の作業を形作るかなり多くの部分は、破線で囲まれ黄色に色づけされている。これらの箇所は、そこでの作業が論理的な客観的判断にもとづいてなされるのではなく、主観的判断で次の段階に進んでゆくところを表している。すなわち、情動 emotion が判断を下すところが、シミュレーションプログラムの作成、および、シミュレーションの運用作業の構造の大半を占めている。判断を下す情動は、担当している個人のDNAと経験の関数であり、偏見もその一部である。したがって、情動の産物に近いシミュレーションの結果の妥当性・信頼性は、実験的事実により確認しなくてはしようもない。すなわち、シミュレーションを進歩させるには、シミュレーションが対象としている現象を正しく観察し、認識できることと、それにもとづく客観的な評価が不可欠である。これなしにはシミュレーションの信頼性の向上はあり得ず、コンピュータの有効利用は夢物語となる。現実とシミュレーション結果が合わない場合には、シミュレーションプログラムに不備があることは間違いないので、それを修正する能力が必要となる。自社でこの能力を持たず、お仕着せ市販品で各種業務をコンピュータ化をしてゆける限

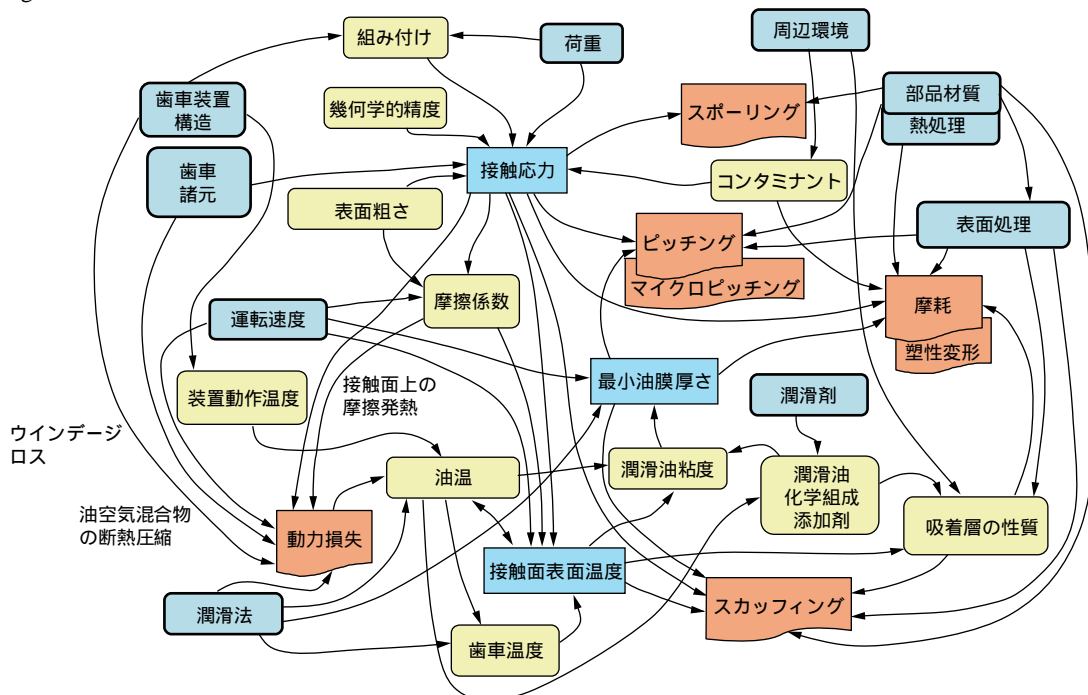


図6 接触面の損傷(歯車の場合)

Damages of contacting surfaces and their influencing factors (in case of gears)

界がこの観点からも存在する．中身を知らなくても日常の使用で問題が生じなければ大丈夫だという部分と，中身を十分知っていないてはならない部分とが存在し，それがどの部分であるかということのを正しく認識して，それに対応した形でシステム構築をしてゆく必要がある．

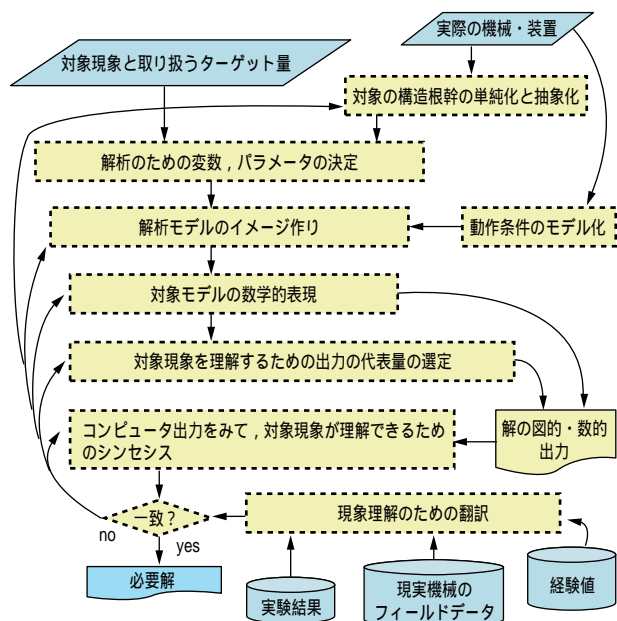


図7 コンピュータシミュレーションの成り立ちとその利用の本質

Nature and structure of computer simulation and way of its usage

近年，機械のトラブルが増えてきている．持ち込まれる例を見てみても，極めて初歩的な配慮の不足が原因であることが多々ある．コンピュータを利用しているためにその問題点に気がつかなかったことが原因の可能性もあり，あるいは，マニュアル通りにやって何ら頭を使わなかったせいであるのかもしれない．

機械要素技術には，設計，製造，品質管理，使用法，トラブル対策などの分野でまだしなくてはならないことが山積しているが，そのほとんどはマニュアル通りの作業では片のつかないものである．一方，その作業の複雑さと量から，コンピュータを利用しなければうまく処理をすることができない現実がある．この状況で，コンピュータをうまく利用するには，まず，対象の正しい観察と評価のことができることが基本条件である．

4. あとがき

昔，科学は物事や現象をいかに正確に見，自分の論理思考でそれを理解し，記述するかということから始まった．近年，コンピュータの利用が一般化するに伴い，現象を正確に観察することを忘れ，現場に出ず，自室の机の前でコンピュータを相手に現象を理解しようとする人が増えている．我々は，オフィスルームの中で，しばしば，非常に不確かな仮定をおいて，自分が欲しいと思う出力が得られる様，コンピュータに働きかけ，シミュレーションプログラムを作っている．多くの場合，このようなシミュレーションの結果は大きな問題を含んでいることを経験する．

もっとも大切なことは，対象とする現象とその周辺を正確に見ることであり，また，見ることのできる能力である．この明白な事実にもかかわらず，他人の作ったシミュレーションや解析プログラム，設計プログラムの出力を，何の疑いもなく信じる人が多いのはなぜか……．人は，コンピュータが神となった新たな宗教に帰依を始めたともいえるであろう．

参考文献

- 1) 日本機械学会 R C 156 コンペティティブ歯車装置のための最新設計製造技術調査研究分科会 - コストパフォーマンス世界一の歯車装置の追求 - 研究報告書(2000)
- 2) 日本機械学会 R C 184 歯車装置の次世代設計製造技術調査研究分科会 - 歯車技術のブレークスルーを探る - 研究報告書(2002)