解説

<マイクロマシンの要素技術>

マイクロマシンの設計論

Design Methodology for Micromachines

中 島 尚 正* *東京大学工学部

Nakajima Naomasa* Faculty of Engineering, Tokyo University*

1. は じ め に

マイクロマシンの設計は一般の機械の設計とどのように違うのか。両者の比較を通じて、マイクロマシン設計の特質について説明してみたい。この比較を行うにあたって、機械設計のプロセスを、仕様の明確化、概念設計、基本設計、詳細設計の四つに分類する。ここで、基本設計は機能や性能について定量的な検討を行うプロセス、詳細設計は構造の形状や配置について寸法を与え明確にするプロセスと考えることにする。

以下に、個々のプロセスごとに上述の方法でマイクロマシン設計について述べるが、全体を通じていえることは、マイクロマシンの設計の方が通常の設計よりも包括的であり、通常の設計をより一般化したものがマイクロマシン設計である、ということである。

2. 設計の出発点

物事には始まりと終わりがあるように、設計にも出発点と終点がある。しかし、最近の設計はこの出発点がどこなのかははっきりしなくなってきた。設計者がどこからかわりあいをもつかという意味において、出発点が不明になってきたのであり、マイクロマシンの登場によって、将来はさらに分かりにくくなると考えられる。

10 数年前までは、設計は仕様が与えられてスタートする、と単純に考えてよかった。つまり、仕様を与えるのは設計者ではなく発注者や利用者であって、設計者はこの仕様の内容に矛盾がないかどうか、あるいは、技術上の問題がないかどうか、確認をすればよかった。典型的な例として、標準化された歯車のような定形型設計がある。この場合はユーザが出した要求仕様が設計者による点検を経てふつうはそのまま設計仕様になる。

しかし、最近のメカトロニクス製品のように、設計生産

技術が革新や競争の最中にあり、しかも、設計対象がユーザの利用知識を超えたものであるような場合には、仕様を作ることで自体が創造的な設計プロセスとなる。仕様を明確化する上で、設計者にとって不確定な要素が多くなると、設計者だけでは策定が難しくなり、様々な専門分野の人々の協力が必要になる。最近、注目されているコンカレントエンジニアリング (concurrent engineering) は、様々な専門分野にまたがる協調作業の支援を目的としており、このような仕様の策定に対しても有効な手段となりうるであろう [1]。

上述のように、設計生産技術の成熟度や革新の速度、ユーザの利用技術に対する知識のレベル等に依存して設計仕様の策定者は変わる。

3. 目標の設定

さて、マイクロマシンの現状は、一般の機械のような意味で仕様の策定ができる状況ではない。なぜならば、マイクロマシンにかんしては、その利用にかんする知識はユーザはもとより技術者や研究者でも十分とはいえないからである。それどころか、仮に設計仕様が明確にされたとしても、その仕様どおりのマイクロマシンが現状技術だけで十分実現できるとは到底思えない。そこで、不足している技術を補うためにマイクロマシンの研究開発と並行して設計を進めることが不可欠になるだろう。

では、将来、研究開発が進展したあとはどうであろうか。おそらくでも、上述のような設計と技術開発の同時並行状態は続くと考えたほうがよいと思う。その理由は、一般の機械と違ってマイクロマシンにおいては、マクロの世界で長い歳月をかけて築いてきた経験的な知識や法則の多くが適用できない。そのために、マイクロマシンの技術体系を確立するのに非常に多くの時間がかかることが予想されるからである。

したがって、将来においてもマイクロマシンの設計は技術開発と並行して行うことが避けられないであろう。その結果、設計の出発点がますます分かりにくくなるに違いない。

もっとも、このように技術開発と連動した設計は、マイ

原稿受付 1994 年 2 月 4 日

キーワード: micromachine, machine design, abduction, scale analysis, design methodology

*〒 113 東京都文京区本郷 7-3-1

*3-1 Hongo 7, Bunkyo-ku, Tokyo 113

クロマシンに限ったことではなく、現状でも新規性の高い機械の設計や社会的要請にもとづくニーズ指向の設計にはよく見受けられることである。視点を変えてみれば、技術開発を前提とした設計の方が一般的であって、技術開発と独立に進めることのできる従来型の設計は特別なケースとみなせるのである。なお、技術開発を伴う設計においては、仕様の明確化や策定という表現よりも目標の設定という表現の方が適っている。

4. 目標設定の3ケース

マイクロマシンにおける目標設定を目的別に整理してみると、次の三つのケースがある。

第1のケースは、マイクロマシンを作ることそれ自体が目的である。例えば、SF映画『ミクロの決死圏』においては、ミクロな潜航艇が大活躍したが、このような潜水艇をつくることを目的とするのが第1のケースである。現状の新規性の高い機械の設計や社会的要請にもとづくニーズ指向の機械の設計はこのケースに該当するものである。近い将来にマイクロマシンの研究開発が進展すれば、このケースが多く見られるようになるであろう。

第2のケースは、マイクロマシンに関する基盤技術 (generic technology) の確立が目的である。工業技術院が産業科学技術研究開発制度 (旧大型プロジェクト) に基づいて推進しているプロジェクトである「マイクロマシン技術」は、その1例である。このプロジェクトでは10年の総開発期間を予定しているが、後期の5年間は保全や医療応用を目的としたマイクロマシンの試作が予定されている。しかし、マイクロマシンを作ることそれ自体が目的ではなく、将来に向けてマイクロマシン技術の基盤技術を確立することを目的としているのである。

第3は、工学の新たな体系化や学問の創出を目的としてマイクロマシンを取り上げているケースである。約2年前から吉川によって提唱された人工物工学[2]の研究が始まっているが、マイクロマシンの設計、製造、運用に関する研究は、人工物工学の創出に有効であると考えられている。人工物工学は専門領域に細分化された現在の工学に対して、領域を取り去った総合的工学を目指しており、人工物をつくる人の行為に対して知識利用過程を明示し、行動規範を与えることを目指している工学である。

5. 仮説形成の思考形式

マイクロマシンは狭い空間内に小さい様々な部品を高密度に集積してつくる。しかし、空間の制約が厳しいので、機械や電気などの専門領域ごとに確立している技術をただ寄せ集めただけではまとめることができない。そのために、技術の融合が必要とされるのである。技術融合の問題を極めていくと、現状の細分化された専門領域の存在や設

計時の視点の限定が問題になる。そして、この問題に対する解決法を探ることが、人工物工学を確立するためのひとつの手掛かりとなるのではないかと期待されているのである。

上述の三つのケースに共通することであるが、目標の設定においては利用者や関係者の願望を満たすように思考される。この願望を満たすように目標を設定する人の思考形式を考えてみると、それは演繹的論理の形式でもなければや帰納的論理の形式でもなく、仮説形成の論理形式、すなわち、現象を統一的に説明できる仮説を形成するときの論理形式に似ている[3]。仮説形成の典型としては、ニュートンの3法則 (等速直線運動、加速度、作用反作用) をあげることができる。ニュートンは地上のりんごの落下も天体の惑星や彗星の運動も統一的に説明するために、有名なこの3法則を導いた。

さて、目標設定の方法論は、思考形式の類似性に注目すれば仮説形成の問題に置き換えることができる。仮説形成のプロセスを明確化にすることや、そのプロセスに有効なように知識を体系づけることは、人工物工学の重要な課題であり、人の仮説形成の思考をコンピュータシステムによって有効に支援する方法も検討されている[4]。

6. 概念設計を支えるシーズの蓄積

設計仕様や目標設定がなされたあとに続く設計プロセスが概念設計である。概念設計は、仕様や目標を実現し達成するために、具体的に機械の仕組みや構成を構想するプロセスであり、その内容は要求される機能 (function) に対してそれを実現する機構 (functional carrier) を見出すことである。ここでいう機構とは「機能担体」を意味しており、機構学におけるメカニズムよりももっと広義の概念である。

一般の機械の場合は、この機構を実現するための技術要素や素材であるシーズが利用可能な状態になっていて十分に蓄積されているのがふつうである。

これに対して、マイクロマシンの場合はシーズが十分に揃っているわけでない。ここでいうシーズとは、様々な製品仕様に見合うように多様化され特殊化されたセンサー、アクチュエータ、電源などの機構を指している。

概念設計の作業は積み木のように機構を積み上げていく作業であるから、足りない機構に出会うと、そこで設計は中断されてしまつて前に進めなくなる。それならば、貯金をするように設計に先行してシーズの蓄積不足を補っておけばよさそうであるが、現実にはそう簡単にはいかない。それは、設計を行ってみないと必要となるシーズの詳細が分からないからである。つまり、シーズの蓄積が不十分であると設計が進まず、設計が進まないとシーズの蓄積ができない。これは、鶏と卵の関係と似たジレンマである。

上述のジレンマはマイクロマシンだけの問題ではない。社会の要請に応えることを目的としたニーズ指向が強い設計の場合には、一般の機械設計であってもシーズの蓄積不足の問題に直面することが少なくない。そのために、現実的な妥協を迫られて不本意ながら仕様の要求レベルを緩和することが多いのである。

7. 先 導 設 計

このジレンマの解決法として、技術開発を誘導するような設計法を考えるのが有効であると思う。このような設計を筆者らは先導設計 (leading design) と言っているが、先導設計はシーズを明確化することを目的としたものであり、その要点は、不足シーズに出会ったときにそれを仮想シーズと見做すことによって、設計の中断を回避することである[5]。すなわち、先導設計においては図1に示すように実在するシーズを活用して設計を進めるが、例えばあるセンサーが不足しているときは、そのセンサーの要求仕様を調べ明示して仮想シーズのひとつとして登録したのち、そのセンサーが実在するものとして設計を進める。このようにして登録された仮想シーズは同時に技術開発の課題を意味する。このようにして明確にされた課題について研究開発を行い、やがて成果が実ればそれは実在シーズとなる。

この先導設計は現時点では設計が完成しないことに意義があるので、設計の目標はできるだけ高く掲げるのがよい。筆者らは、例えば『ミクロの決死圏』の工学的再現を目標においた血管内で活躍する医療用マイクロマシン[5]、極限までマイクロ化された人工衛星などを設計課題に取り上げて先導設計を進めている。

先導設計において重要なことは設計を中断させないことである。単に、仮想シーズを設定して登録するだけでは、設計を継続させる動機づけが十分とはいえない。実現の可能性を尊重しようとする設計技術者の心理にとって、仮想シーズはそのままでは受け入れ難いのである。そこで、仮想シーズが近い将来に実現されることを設計技術者に理解さ

せるための設計環境が必要となる。このような設計環境においては、様々な角度からシーズの実現可能性が提示されることが重要であり、そのためには規模データベース、コンピュータシミュレーション、VRなどの技術の活用が有効であろう。

8. 基本設計とスケール解析

マイクロマシンの活躍するミクロな環境においては、卓越する物理現象が我々の通常経験するマクロな世界とは異なる。そのために、マイクロマシンの特性や機能を経験や勘に頼って推定することは危険であるので、コンピュータシミュレーションやスケールモデルを用いた模型実験による定量的な検討が必要になる。しかし、コンピュータシミュレーションにしても模型実験にしても、その準備はそう簡単ではない。そこで、定量的検討は可能性の高い案を絞り込んだ後に実行するのが实际的であり、それ以前の様々な案を比較検討する段階では、次に述べるスケール解析を適用するのがよい。

スケール解析は、対象物の代表長さが ε 倍になったとき、注目している特性や現象が ε の何乗に比例して変化するのか解析する方法である。

コイルばねを例に取り上げて、その形状を相似に保ちながらサイズを小さくしたときに、ばね定数はどのように変化するのか調べてみよう。材質是不変とする。コイルの線径を d 、コイルの平均径を D とおくと、ばね定数 k は

$$k \propto \frac{d^4}{D^3} \propto \varepsilon$$

となり、 ε の1乗に比例して変化する。すなわち、サイズに比例してばね定数も小さくなることが分かる。このばねに質量 m が付けられているとすると、固有角振動数 ω は、

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \propto \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon^3}} \propto \varepsilon^{-1}$$

すなわち、 m は長さの3乗に比例することから、 ω は ε の-1乗に比例することがわかる。したがって、このばねと質量を材質は一定のまま相似的に小型化すると、固有角振動数はサイズに反比例して大きくなることが分かる。

9. 支配的な熱伝導

伝熱については、良く知られているように熱伝導、対流による熱伝達、放射伝熱の3形態がある。熱伝導は、 h : 単位時間当たり伝熱量、 k : 熱伝導率、 s : 面積、 dT/dx : 温度勾配、とすれば、

$$h \propto k s \frac{dT}{dx} \propto \varepsilon$$

となる。上式はサイズを小さくしていくと比例して伝熱量も小さくなることを意味するが、これは我々の経験と一見

図1 先導設計の概念と支援環境技術

矛盾することである。すなわち、上式の意味は、小さなものは大きいものよりも速く冷え、速く暖まるという事実に反するからである。

実は、小さいものが冷えやすく暖まりやすいのは、伝熱量そのものが大きいためではなく、体積当たりの伝熱量が大きいからである。

そこで、伝熱量を体積 v で割った量に変えると、

$$\frac{h}{v} \propto \frac{\epsilon}{\epsilon^3} \propto \epsilon^{-2}$$

上式より、サイズを小さくすると ϵ の -2 乗に比例して伝熱量は大きくなることが分かる。

対流伝熱の基本式は、熱伝達率 a 、温度差 ΔT とおくと、

$$h \propto a s \Delta T \propto \epsilon^2 \quad (?)$$

であるので、伝熱量 h は一見 ϵ^2 に比例するようにみえるが、 a がサイズに依存するのでこのように簡単には扱えない。しかし、マイクロマシンの世界では後述するように対流が問題になることはほとんどないので、一般に対流伝熱を考える必要はない。

放射伝熱の基本式は、高温物体 1、低温物体 2 の温度をそれぞれ T_1 、 T_2 とおくと、

$$h \propto s(T_1^4 - T_2^4) \propto \epsilon^2$$

したがって、熱伝導よりも ϵ 倍小さくなる。

以上より、マイクロマシンにおける伝熱は熱伝導が卓越

するので、ふつうは熱伝導のみを考慮すればよい。

なお、対流の発生の有無は、グラフホフ数 Gr とプラントル数 Pr の積 $Gr \cdot Pr$ の値を用いて判定することができる。この値が 1708 以下の場合には対流は生じないのである。例えば、水平に置いた 2 枚の平行平板間の空気層における対流の有無を考えてみる。上、下の平板の温度をそれぞれ 60°C 、 20°C とし、間隔を $8[\text{mm}]$ とする。 $Gr \cdot Pr$ 数は、 g ：重力加速度、 D ：間隔、 T_1 、 T_2 ：上、下の平板の温度、 T_m ：空気の平均温度、空気の動粘性係数 $\nu[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ とすると、次式で与えられる。

$$Gr \cdot Pr = \frac{g D^3 (T_1 - T_2)}{\nu^2 T_m} \times Pr$$

上の例の場合には (Pr 数は 0.71) この値は 1490 となるから、対流は生じないことが分かる。

最近の電子回路部品は実装密度が高くなったために、これらを組み込んだ機械の設計においては伝熱解析が重視されている。この場合、上述の例からも想像できるように、IC や LSI を高密度実装した個々の基板がパッケージ化されて密空間に納められているときは、内部で対流は生じないことが多い。しかし、このようなパッケージの外部、すなわち、これらを組み込んだ装置の内部空間では、一般に対流伝熱が無視できないどころか支配的になる。

表 1 は、マイクロスターリングエンジンの基本設計におけるスケール解析のために整理した物理量とスケールファ

表 1 マイクロスターリングエンジンの設計における物理量とスケールファクタの関係

物 理 量	計 算 式	スケールファクタ	出力当たり スケールファクタ	備 考
質量	$m = \rho v$	ϵ^3	1	ρ ：密度、 v ：体積
圧力による力	$f_p = sp$	ϵ^2	ϵ^{-1}	s ：受圧面積、 p ：圧力
重力による力	$f_g = mg$	ϵ^3	1	g ：重力の加速度
慣性力	$f_i = m d^2x/dt^2$	ϵ^4	ϵ	x ：変位、 t ：時間
熱膨張力	$f_t = as$	ϵ^2	ϵ^{-1}	a ：定数
圧力による摩擦	$f_{rp} = \mu f_p$	ϵ^2	ϵ^{-1}	μ ：摩擦係数
重力による摩擦	$f_{rg} = \mu f_g$	ϵ^3	1	
慣性力による摩擦	$f_{ri} = \mu f_i$	ϵ^4	ϵ	
熱膨張力による摩擦	$f_{rt} = \mu f_t$	ϵ^2	ϵ^{-1}	
圧力による応力	$\sigma_p = f_p/s$	1	--	
重力による応力	$\sigma_g = f_g/s$	ϵ	--	
慣性力による応力	$\sigma_i = f_i/s$	ϵ^2	--	
熱膨張力による応力	$\sigma_t = f_t/s$	1	--	
線形ばね定数	$k = 2Uv/\delta^2$	ϵ	--	U ：体積当たりひずみエネルギー、 δ ：変位
固有振動数	$\omega = \sqrt{k/m}$	ϵ^{-1}	--	
慣性モーメント	$I = \alpha mr^2$	ϵ^5	ϵ^2	r ：回転体の半径
熱伝導	$h_c = as dT/dx$	ϵ	ϵ^{-2}	s ：面積、 dT/dx ：温度勾配
放射伝熱	$h_r = as(T_1^4 - T_2^4)$	ϵ^2	ϵ^{-1}	T_1 、 T_2 ：物体 1、2 の温度
気体の流れ	$q = su$	ϵ^3	1	u ：気体の流速(層流)
圧力損失	$p_l = \alpha ul/d^2$	1	ϵ^{-3}	l ：流路長さ、 d ：流路内径(層流)
掃過容積	$V = SL$	ϵ^3	1	S ：シリンダ断面積、 L ：ピストン行程
出力	$W = \int p S dx$	ϵ^3	1	p ：作動ガス圧、 x ：ピストン変位
漏れ損失	$E_l = p_l V$	ϵ^3	1	

クタ ϵ の関係である[7].

スケール解析で注意を要することは、物理法則の公式の適用範囲を誤らないことと、卓越する物理現象を見逃さないことである。例えば、マイクロ化によって伝熱がよくなることは、同時に断熱については悪くなることを意味する。表1では摩擦係数 μ を用いて摩擦力を表現しているが、部品サイズが約1[mm]以下になると静電気や表面張力の影響が卓越するために、摩擦係数と力の積で摩擦力を表現する方法は適用できなくなることが多い。トライボロジー、材料強度、残留応力などでは、マイクロ化に伴って生じる特異な現象に注意する必要がある。例えば、磁気ディスク装置におけるヘッドと媒体間の間隙(浮上間隙)を0.1[μm]以下にするために、媒体表面の粗さを0.05[μm]以下にすることが望まれるが、この程度の滑らかな表面同士になると、一旦接触すると大きな吸着力が働いて離れなくなる[8]。また、サブミクロン以下の間隙を対象とする薄膜気体潤滑においては気体の粒子性の影響が問題になる[9]。

8. 詳細設計と標準化

機械の形状の詳細を定める段階になると、機械要素などの標準化が重要になる。マイクロマシンにおいても標準化の重要性は変わらないが、まだ、マイクロマシン技術が発展途上にあるので、標準化を徒に早めると技術の発展の妨げになる恐れがある。しかし、時期を失すると標準化が非常に難しくなることはこれまでの経験から明らかなことである。

マイクロマシンに限らず、発展途上の若い技術の標準化は、常にこのような難しい課題を抱えているが、この解決法は技術の細部に立ち入らないで、インターフェースに限定したところから標準化に着手することであろう。

マイクロマシンについては、LIGA プロセスで有名なドイツのカールスルヘ原子核研究所の Menz 教授らがインターフェースに重点をおいた国際標準化を早くも提唱して

おり、今後の展開が注目されている。

9. 結 び

以上に述べたように、マイクロマシンの設計では、従来の設計では必要とされなかったことまでが要求される。その意味でマイクロマシンの設計は従来型の設計を拡張したものと理解することができる。したがって、マイクロマシンの方に一般性がある、一般の設計はマイクロマシン設計が特殊化されたものと解釈することもできる。マイクロマシン設計を特別なものと位置づけるよりも、このように考える方が自然ではないかと思う。

参 考 文 献

- [1] 福田収一：“コンカレントエンジニアリング”，1993，培風館。
- [2] 吉川弘之：“設計学と人工物工学”，第一回人工物工学シンポジウム予稿集，pp. 5-7，1992。
- [3] 吉川弘之：“テクノグローブ”，1993，工業調査会。
- [4] 久保田晃弘：“東京大学人工物工学研究センター”，研究資料，1993。
- [5] N. Nakajima：“Micromachines as Intelligent Artifacts,” Proc. 1st International Symposium on Research into Artifacts (Tokyo), pp. 48-51, 1993.
- [6] 鎌原健志，村上存，中島尚正：“血管内移動マイクロマシンの流れを利用したガイド法の研究”，日本機械学会第3回設計工学・システム部門講演会講演論文集，pp. 293, 1993.
- [7] N. Nakajima, K. Ogawa and I. Fujimasa：“Study on Microengines” Miniaturizing Stirling Engines for Actuators, SENSOR AND ACTUATORS, 20-1/2, 75-82, 1989.
- [8] 小野：日本機械学会第686回講習会，“情報機器の機構設計と動作解析の最新技術”，(1988年10月)，p. 7, 1988.
- [9] 三矢，同上，p. 14

中島尚正 (Naomasa Nakajima)

1969年東大大学院終了，現在同学教授，平成4年より東大人工物工学研究センター長を兼務。人工物工学，マイクロマシン等の教育研究に従事。