形の科学から形の工学へ

菊池 昇*

自然科学から人文科学までの全方位から形を科学するために形の科学会が組織され、その活動として「形の科学百科事典」*がまとめられ、第59回毎日出版文化賞を受賞した。このように、近年、自然界に潜む色々な形を探索する活動が活発になっている。今、自然が示すさまざまな形を科学することから、さらに私たちはもう一歩踏み込んで、形を工学することを考えても良い時代になった。

何故、自然界は少しだけ不完全で不均質なフラクタル的な階層性を持つ構造を作り上げるのか。そこには、階層性や周期性を少しだけ乱すことで、何がしかの特別な反応を、一定の条件を満たしたときにだけ発現させるためのメカニズムがあるように思われるし、通常時には、その階層性や周期性から得ることの出来る特別な機能があるからこそ、複雑な構造形態を自然界は作り込むのだろう。一つ一つの階層での形が持つ機能を解明し、繰り返し現れる形を、各階層間での繋がりと他の階層からは独立した特長とに分離し解析することで、工学への道が開かれるように思える。

このために、イタリア、フランス、ロシアを中心に数学者たちが1970年代に精力的に研究し始めた、均質化法という、2つのスケールが存在する現象のための数学理論に興味を持った。均質化法を機械工学という分野で、構造物やデバイスの設計・製造などに関わる工学問題に応用することを考え始めたのである。数学理論があれば、コンピュータ・シミュレーションのアルゴリズムが作り出せるし、そのシミュレーションで形を科学しながら、その成果を応用するための方策を模索し、シミュレーションで得られた形を製造するプロセスを考案するような工学が可能になる。

1980年代後半、この実現に向け、土木・建築・機械などの構造物や、いろいろなデバイスの数学的な形であるトポロジーを最適化するソフトを開発し、OPTISHAPEと名付けた。例えば、三方向からの引っ張りや圧縮による構造物の形状や形態を、軽量でありながら一定の剛性を持つように設計すると、構造物の総重量によって形状や形態が変化することが解った。十分な重量であれば均質で滑らかな境界線を有する板になり、投入する重量を減少していくと、荷重を受ける部分は多孔体となり、離れた部分では細い筋状の離散的な梁構造を持つ形態へと変化したのである。単に構

造物を構成する材料の総重量を変化させるだけで、最適化のための数学で得られる構造物の形態に大きな変化があること、また、この単純な条件下で得られた結果からですら、多孔体としての人骨など自然界に存在する様々な構造形態の不思議を説明する可能性があるように思われたのである。シミュレーションに、力学特性のみならず熱や流れ、反応場をコントロールする多孔質性などの条件を入れ込むと、更に自然界の条件に近くなるかも知れず、工学の可能性は大きく広がるように思う。

トポロジーの最適化は、その後、構造物の剛性に関する問題のみならず、材料特性を支配する材料のメソスケールでの微視構造の設計にも応用可能であることがO. Sigmundによって明らかにされ、微視構造を構成する基本材料を複数個にし、その分布のトポロジーを設計することで、様々なマクロ特性を作り出すことに成功した。負のポアソン効果を持つ微視構造や負の熱膨張係数を持つ微視構造を作り出すことが数学的にも可能になり、更には、こうした活動が左手系の電磁特性を作り出すという新分野にまで広がってきた。望む機能を設計したメゾ構造を、周期的に配置することで発現させるメタマテリアルの概念形成である。この考え方は、フォトニクスへも伝播し、世界中が量子効果を制御することで光学特性を設計するための研究が世界中で興っている。

このようなアプローチは、自然界の形をそのまま科学する形態学とは異なり、形の科学と形を作り出す数学手法が一体化した形態創成に関わる形の工学とでも名付けて良さそうである。手に入る限られた材料で、階層性や周期性を利用し、各スケールでの構造形態を設計制御することで、材料そのものには存在しないかもしれない望むべき力学、熱、電磁、光特性やそれぞれの機能を発現させ、ものを製造するエンジニアリングの可能性は、ますます広がるのではないのか。言い換えれば、マクロ、メゾ、ミクロ、ナノ構造のトポロジーを操作することで新たな特性や機能を作り出す構造形態を設計し、それを製造加工するこれまでとは異なる「ものづくり」が可能になっている時代である。

* Kikuchi, Noboru
ミシガン大学工学部機械工学科
Roger L. McCarthy Professor of Mechanical Engineering
(兼任) 豊田中央研究所
2007.5.9 受理

※形の科学会編集：形の百科事典（2004）、朝倉書店