

Title	機械工学成立期における科学と技術の関係(基礎的研究の社会的意味(1), 一般講演, 第22回年次学術大会)
Author(s)	能見, 利彦
Citation	年次学術大会講演要旨集, 22: 867-870
Issue Date	2007-10-27
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/7414">http://hdl.handle.net/10119/7414</a>
Rights	本著作物は研究・技術計画学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Science Policy and Research Management.
Description	一般講演要旨

## 機械工学成立期における科学と技術の関係

○能見利彦 (神戸大学)

## 1. はじめに

イノベーション・モデルにおいて、科学と技術の関係や基礎研究と応用研究との関係は古くて新しい問題であるが、この中で工学の位置付けは必ずしも明確ではない。ストークスは、科学研究を真理の探究と応用目的の有無との2軸で分類したが、工学の基礎理論はどう位置付けられるだろうか？

我が国産業界の研究者の75.8%が工学出身(2005年、総務省科学技術研究調査報告)であることから明らかなように、工学はイノベーションを支える重要な学問分野であるが、工学がどのように構築されたか、その歴史が語られることは科学に比べて少なかった。工学には、科学に基づいて発達した化学分野、電気分野や古い技術の伝統をも受け継いだ土木分野、機械分野などがあるが、本研究では、機械工学に焦点を当てて、どのような人・組織が、どのような考え方に基づいて機械工学を成立させ、発展させてきたのかを文献調査し、これに基づいて、科学と技術の関係を再考した。

## 2. 科学と技術の歴史の概観

## 2.1. 中世大学の成立から近代科学の成立

欧州における中世大学の成立は、12世紀～13世紀のことである。1200年前後に、フランスのパリ大学、イタリアのボローニャ大学、イギリスのオックスフォード大学、ケンブリッジ大学などが設立されている。これらの大学における自然科学(自然哲学)の内容は、アリストテレスなどの古典的な理論体系に基づくスコラ哲学であった。

一方で、この時代に、技術を担っていたのは職人層で、彼らはギルドを作って、経験に基づく技術知識を親方から弟子に伝承していた。大学は技術とは無縁で、大学の中には工学は存在しなかった。例えば、ルネッサンス晩期の天才レオナルド・ダ・ヴィンチ(1452-1519)は、絵画、彫刻のみならず技術者としても天才であり、運河の設計を行った他、クランク、歯車、カム、ポンプ、風車から人力飛行機まで数多くの機械装置を設計、考案しているが、彼は大学の教育を受けておらず、職人として多くの

弟子を率いる親方の1人であった。(村上(1971)は、彼を「高級職人層の最頂点」と位置付けている。)

17世紀には、中世のスコラ哲学やアリストテレスの権威に代わって、近代科学が誕生した。具体的には、コペルニクスの地動説(1543年に「地球の回転について」)の後、ケプラーの惑星の三法則(1609年の「新天文学」で第1と第2の法則を、1618年に第3の法則を発表)やガリレオの落体の研究(1632年に「天文対話」を、1638年に「新科学対話」を出版)を経て、ニュートンが1687年の「プリンピキア」の中で、慣性の法則、力と加速度の運動法則、作用反作用の法則及び万有引力の法則を提示して、近代科学が誕生した。この科学革命において、研究の方法論も近代化した。すなわち、中世の訓古学的な方法に代わって、①実験や観察に基づく方法と②数学を駆使した定量的な方法が用いられるようになり、その後の科学の発展の基礎となった。また、科学と技術との観点においては、次の3点に留意する必要がある。1点目は、コペルニクス、ケプラー、ガリレオ、ニュートンはいずれも大学で教育を受けた知識人であり、職人層とは異なること、2点目は、科学の研究目的は真理の探究であり、産業応用は考えられていなかったこと、3点目は、ガリレイが望遠鏡によって木星の衛星を発見したように、科学機器の発達が科学研究に貢献したことである。

## 2.3. 力学の成立以前(17～18世紀)

ニュートン力学は、現在では、機械工学の基礎として、材料力学、流体力学、熱力学、機械力学に応用されているが、プリンピキアの後も、これらの力学の誕生までは時間を要した。その課程において、ベルヌーイー族、オイラー、ラグランジェといった18世紀フランスの数学者達の貢献があった。

材料力学を例にとると、その最もシンプルな問題は、荷重を受けるはりの強度とたわみの問題である。これは、ダ・ヴィンチやガリレオも検討しており、技術上重要で古くからの問題であった。17世紀の科学革命の時期、ロバート・フックは、ばね

など様々な弾力体に力を加える実験を行い、力の大きさと変形の大きさが比例するとのフックの法則を見出していた（1678年に「ばねについて」を發表）。フックと同時期、フランスの科学者マリオットは、はりの強度の問題を研究したが、中立軸をはりの下端と仮定したために理論式の導出に誤りを犯している。

一方、数学は、ライプニッツの微積分学がその後の数学者達によって発達するが、彼らは、数学の応用分野を開く目的で一部の力学上の問題を解析学で解く努力を行い、それが、後の力学の成立に貢献する。材料力学分野では、ヤコブ・ベルヌーイが、微分法を用いてはりのたわみ曲線の理論式を求めた。ただし、中立軸に関するマリオットの誤った仮定を用いたために、その式は誤っていた。正しい理論式は、18世紀になってから、オイラーによって導かれた。オイラーは、その師であるダニエル・ベルヌーイ（ヤコブ・ベルヌーイの甥）のアドバイスに基づき、ポテンシャル・エネルギーを最小化する曲線としてたわみ曲線を解析的に導き、1744年の「曲線を見つける方法」で発表した。オイラーは、弾性安定問題における柱の座屈の式や、はりの振動方程式も導き、材料力学に貢献している。

フランスの数学者達は、流体力学や機械力学の発展にも貢献している。流体力学の分野では、ベルヌーイの定理で有名なダニエル・ベルヌーイが「流体力学」を1738年に發表している。機械力学の分野では、オイラーが回転運動を含めて剛体の力学を完成させ、ニュートンの運動方程式を $F = m\alpha$ の形で定式化している。さらに、ラグランジュが、1788年に「解析力学」を發表し、一般座標の考え方を導入した。ラグランジュによる解析学の手法は、現在も、機械力学、材料力学の中で利用されている。

このように18世紀の数学者達によって、解析学が力学に応用できることが示されたことは、後のエコール・ポリテクニクにおける機械工学の成立に大きく貢献した。特に、ラグランジュは、「解析力学」の出版後、1795年のエコール・ポリテクニクの設立時に招かれており、力学に解析学を応用する手法は、エコール・ポリテクニクに引き継がれた。ただし、彼ら数学者達が取り組んだのは、ため、機械工学の一部の問題だけで、材料力学の中心となる強度論は残されていたなど、機械設計に携わる技術者が利用できるような現在の形に体系化されるのは、更に時間を要した。

### 2.3. 18世紀産業革命の担い手

フランスで数学者達が活躍した18世紀は、イギリスで産業革命が始まった時代でもある。しかし、

産業革命は17世紀からの近代科学の成立とは無縁であり、近代科学は産業革命に貢献しなかったことには留意する必要がある。

綿工業において、1733年にケイが織機の飛び杼を、1764年にハーグリーヴズがジェニー紡績機を、1769年にアークライトが水力紡績機を、1779年にクランプトンがミュール紡績機を、1786年にカートライトが力織機を発明した。これらの技術の発明を担ったのは職人、商工業者などで、大学教育とは無縁の人達であった。なお、この時期の技術は、ギルドからは独立して発明され、ギルドの秘密主義による技術の保護とは異なり、特許による保護が広がった。

熱機関に関しては、鉱山の水汲みに用いられていた熱機関が、1769年のワットの復水器（凝縮器）の発明によって改良され、それまでのニューコメンの大気圧機関に比べて効率が4倍になった。これはカルノーの「火の動力について」の55年も前のことである。さらにワットは、ピストンの往復運動を回転運動に変える遊星歯車機構を発明し、工場の機械の動力としても蒸気機関の利用が進んだ。ワットは、学校教育としては小学校しか出ておらず、職人として修行を積んで、グラスゴー大学の実験器具の製作者としての職を得た職人である。

ワットの後、19世紀に、蒸気機関は、ボイラーの耐圧性能の向上などによって高温高压の蒸気を利用するようになり、効率の向上と馬力の増大が図られている。また、用途の面では、1807年にフルトンが蒸気船に、1825年にスティーブソンが蒸気機関車に利用して、用途が拡大している。

### 2.4. 工学系大学の設立と工学の誕生（18～19世紀）

技術者を学校で育成するとの考え方は、18世紀のフランスで始まった。1720年に、兵学校がいくつか開校されて築城術や砲術の専門家養成を行い（その教師のベリドが「技術者の科学」を1729年に出版）、1747年には、エコール・デ・ポン・エ・ショセ（橋と道路の学校＝土木工学校）がパリに開校され、1795年には、エコール・ポリテクニク（パリ高等理工学校）が設立された。エコール・ポリテクニク設立の背景は、1789年のフランス革命によって技術者や工兵仕官が国外に逃亡し、技術者の養成が革命政府の大きな課題になったためである。

エコール・ポリテクニクでは、ラグランジュ、モンジュ、フーリエ、ポアソンなどが数学や力学の教授陣となり、その後の工学の発展に大きく貢献した。モンジュは、「画法幾何学」を1795年に發表して近代的な製図法を確立し、実用面で技術に

大きく貢献した。フーリエ級数で有名なフーリエは、1822年の「熱の解析理論に関する論考」で、熱伝導の微分方程式とその解法を示した。材料力学では、コーシーが「応力」の概念を弾性論に導入し、ポアソンはポアソン比を見出した。さらに、ナヴィエ（1783～1836）は、三次元弾性理論の定式化（等方弾性体のつりあい方程式など）や弾性はりの曲げに関する基本式の提示などによって材料力学を確立し、その講義録は（1826年の「力学講義録」）は現在の材料力学教育の骨格をなしている。ナヴィエは、流体力学にも大きく貢献し、粘性流体の基本式である「ナヴィエ・ストークス方程式」は有名である。これら理論面での工学の発展に際しては、エコール・ポリテクニクなどで多くの実験研究も行なわれており、理論と実験の両面で、近代的な工学が形成されていった。

エコール・ポリテクニクでは、技術者の教育方法も変わった。それまでは土木、鉱山、造船、工兵仕官などを別々に教えていたが、エコール・ポリテクニクでは、2年間で全ての技術に共通する数学や物理を徹底的に教育し、その後、デ・ポン・エ・ショセなどの専門の技術学校に進むようにした。これが、その後の工学教育のモデルとなった。また、この時期、人材面でも新しいタイプの人材が登場している。後で述べるカルノーは、エコール・ポリテクニクで学び、職人の経験なしに技術上の課題の研究しており、新しいタイプの技術者かつ研究者である。エコール・ポリテクニク出身ではないが、電磁気学で有名なクーロン（1736～1806）は、フランス科学アカデミー会員であるとともに、若い頃は、軍で微積分学、幾何学、動力学、静力学を学んで工兵隊で実務も経験した技術者でもある。この時代以前には、大学教育を受けた科学者と社会の現場の技術者とは全く分かれていたが、この時代からは、高等教育機関で教育を受けて科学的な研究方法や数学を駆使することができる技術者や工学者が生まれ、その後の工学や技術の発展を担うこととなっていくのである。このようにエコール・ポリテクニクは、教育面でも研究面でも技術を目的とした近代的な体系を構築していった。三輪（2000）は、「近代「工学」はこの学校で生まれた」と評価している。

なお、イギリスでトーマス・ヤング（1773～1829）が活躍したのもこの時期で、材料の引張りや圧縮に弾性係数という考えを導入して材料力学に大きな貢献をしている。しかし、イギリスでは、この時期、技術者を教育する高等教育機関は存在せず、科学者と技術者とが分かれた状態が続いており、ヤングの活躍は個人的なものであった。

エコール・ポリテクニクの成功は、他の国にも影響を与えた。19世紀に、ドイツでは、技術者教育

のための高等技術学校（いわゆる TH）の設立が相次いだ。1815年のウィーン、1821年のベルリン、1825年のカールスルーエ、1827年のミュンヘンなどの高等技術学校（今の工科大学）である。これらでは単に技術問題を解くだけではなく応用科学を自ら発展させ得る技術者の養成を目指し、2年間の科学教育の後、2年間の専門分野の工学教育を行なった。また、これらの高等技術学校では、産業界との結びつきが密接で、教育と研究で実用的な工業力学が発達した。これがドイツの産業を振興させ、19世紀の終わりには、工学の分野でドイツが確固たる地位を得る要因となった。

## 2.6. 熱力学の誕生（19世紀）

機械工学の基礎理論の中では、熱力学が最も遅れた。温度の測定は、ガリレオの時代に温度計（測温器）が発明されてから始まるが、18世紀においても熱の本質を物質とする考え方（化学で言うフロギストン説）が主流であった。熱の定量的な測定が始まったのも18世紀で、イギリスの科学者ブラックが、温度と熱量とを区別すべきことや、熱素、比熱、熱容量、溶解熱、潜熱の概念を明らかにした。

近代的な熱力学が成立するのは19世紀である。カルノーが蒸気機関を研究して、1824年に「火の動力についての考察」を発表し、熱機関の効率やカルノー・サイクルの概念を明らかにした。これはワットの蒸気機関の55年後であり、蒸気機関の利用が科学に研究課題を与えた例である。なお、この時点では、カルノーは熱の物質説を取っており、運動説に考えを変えるのはその後である。

マイヤーやジュールが熱の仕事当量（ $1\text{ cal} = 1\text{ J}$ ）を測定し、ドイツの物理学者ヘルムホルツが1847年の「力の保存について」の中でエネルギー原理を解明し、ランキンがエネルギーの用語を導入して力学的エネルギーと熱エネルギーとの関係を数学的に扱った。これらによって、熱が力学的エネルギーと等価であることが解明され、熱力学の第1法則が見出された。さらに、クラウジウスなどが熱エネルギーの第2法則やエントロピーの概念を導入し、19世紀の半ばに、ようやく熱力学が近代的なものとなった。

## 2.7. 機械工学のその後の発展

機械工学は、19世紀の終わりには、基礎工学部門（材料力学、機械力学、流体力学、熱力学）、設計・生産部門、個別工学部門（造船工学など）との現在の形がほぼ整ったが、技術の発展に伴う新たな技術上の課題に対応するため、その後も専門特化しながら発展を続けてきた。

材料強度の分野では、鉄道の発達はその車軸が繰り返し荷重を受けることによって静的な破壊荷重よりもはるかに小さな荷重で破壊するとの問題を生み、鉄道技師ウェーラーが金属疲労の研究を始めた。吊り橋のワイヤーや蒸気プラントでは、時間とともに変形が進むクリープが問題になった。金属疲労やクリープの問題は、応力や歪みの解析的な手法のみでは解決できず、材料の特性の実験的な解明などが必要となり、材料学の発達を促した。第二次世界大戦中には、米国で大量に建造された船が何の前触れもなく、突然、脆性的に破断するとの問題が生じ、アメリカ海軍技術研究所のアーウィンが破壊力学の研究を始めた。

流体力学の分野では、1903年にライト兄弟が飛行機を開発して以降、翼理論が発達した。ドイツの数学者クッタ（1902の揚力研究）、ロシアのモスクワ大学教授ジュウコフスキー（1908の揚力理論）、イギリスの自動車会社の技師ランチェスター（1908の翼理論）が、この分野のパイオニアである。戦後、航空機が音速を超えるようになるとハンガリー出身のカリフォルニア工科大学教授のカルマンが高速流体力学を発展させた。

これらの発展を担ったのは、近代的な工学教育を受けた研究者、すなわち工学者であった。

### 3. ディスカッションと結論

機械工学における核心の理論は、材料力学、機械力学、流体力学、熱力学である。これらを、単純に、理学（純粋科学）の応用とみなして良いだろうか？前節で概観した歴史を整理すると次のようになる。

- ①17世紀の近代科学の成立期には、ニュートンなどの純粋科学者が力学上の基礎的な概念とそれらの間の定量的な関係を見出した。（熱力学ではこの時期は遅れた。）
- ②17世紀末から18世紀には、フランスの数学者達が、力学上の問題に解析学を応用できることを示した。
- ③18世紀末から19世紀に、技術者養成のために設立されたエコール・ポリテクニクやドイツの高等技術学校の研究により、技術者に必要な形に機械工学が体系化された。
- ④19世紀以降の機械工学は、技術の発展に伴って社会的に必要な課題を解決するために発展してきており、それは工学の研究者の貢献が大きい。

このように、機械工学の核心となる理論は、純粋科学者のみによって創られたのではない。その上に、数学者の貢献と、技術者のニーズに対応した体系化との2つの要素が加わって、ニュートンの100年以上後に成立したものである。さらに、

機械工学成立後は、機械の技術発展に必要な課題は、その理論的解明を含めて機械工学者が中心となって解決してきている。

また、技術を担ってきた人材は、19世紀に近代的な技術者教育、すなわち工学教育が広がってからは、18世紀までの人材（職人層）と全く異なり、実務面でも研究面でも、近代的な技術者や工学者が中心となっている。

20世紀に科学と技術とは一体化して「科学技術」と総称されることが一般的になったが、振り返って考えれば、19世紀に、工学として、科学と技術とを一体的に考える学問体系と教育体系が整った時点で「科学技術」は生まれたと解釈することもできるのではないだろうか？

現在、イノベーションを促進する上で基礎研究の重要性が主張されている。本研究では、電気工学や化学工学などに触れておらず、また、計算科学、生命科学、ナノ科学がイノベーションに直結する最近の状況にも触れていないので、性急な結論は慎まなければならないことには十分留意する必要があるものの、機械工学の核心の理論が誕生した歴史を踏まえれば、真理の探究目的の研究のみではイノベーションには遠く、応用目的を明確にした研究が加わることによって、新たな科学分野・技術分野が拓かれるのではないかと推測される。

### 参考文献

- [1] Donald E. Stokes, “PASTEUR’S QUADRANT”, Brookings Institution Press, 1997
- [2] 横尾壮英, 「大学の誕生と変貌 —ヨーロッパ大学史断章—」, 東信社, 1999
- [3] H. バターフィールド, 「近代科学の誕生 (上) (下)」, 講談社学術文庫, 1978
- [4] N. R. ハンセン, 「科学的発見のパターン」, 講談社学術文庫, 1986
- [5] 鈴木善次, 馬場政孝, 「科学・技術史概論」, 建帛社, 1979
- [6] 村上陽一郎, 「西洋近代科学」, 新曜社, 1971
- [7] ジェームス・カービル, 「工学を創った天才たち」, 工業調査会, 1986
- [8] フォーブス, デイクステルホイス, 「科学と技術の歴史」, みすず書房, 1977
- [9] S. P. ティモシェンコ, 「材料力学史」, 鹿島出版社, 2007
- [10] 三輪修三, 「機械工学史」, 丸善株式会社, 2000
- [11] T. S. アシュトン, 「産業革命」, 岩波文庫, 1973
- [12] H. W. ディキンソン, 「蒸気機関の歴史」, 平凡社, 1994
- [13] 西川兼康, 「熱工学の歩み」, オーム社, 1999