

報 告

# 21世紀ものづくり科学のあり方について



平成20年（2008年）9月18日

日 本 学 術 会 議

機械工学委員会

生産科学分科会

この報告は、日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会での審議ならびにシンポジウム結果を反映して取りまとめ、公表するものである。

### 日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会

委員長	古川 勇二	(第三部会員)	東京農工大学大学院技術経営研究科教授
幹事	帯川 利之	(連携会員)	東京大学生産技術研究所教授
委員	稲崎 一郎	(第三部会員)	中部大学総合工学研究所教授
	岸浪 建史	(第三部会員)	釧路工業高等専門学校校長
	小林 敏雄	(第三部会員)	日本自動車研究所副理事長
	須賀 唯知	(第三部会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	柘植 綾夫	(第三部会員)	芝浦工業大学学長
	中島 尚正	(第三部会員)	産業技術総合研究所理事
	青山 藤詞郎	(連携会員)	慶應義塾大学理工学部教授
	新井 民夫	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	有信 睦弘	(連携会員)	東芝執行役常務・経営監査部長
	大森 整	(連携会員)	理化学研究所主任研究員
	木内 学	(連携会員)	帝京平成大学教授
	木村 文彦	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	清水 伸二	(連携会員)	上智大学理工学部教授
	鈴木 宏正	(連携会員)	東京大学先端科学技術研究センター教授
	高田 祥三	(連携会員)	早稲田大学理工学院教授
	西脇 信彦	(連携会員)	東京農工大学大学院工学府教授
	森 和男	(連携会員)	栃木県産業技術センター所長
	森脇 俊道	(連携会員)	摂南大学工学部教授

# 要 旨

## 1 作成の背景

低炭素社会を実現し、地球温暖化を抑止することが喫緊となり、その実現を支援できる施策の一つとして、量産化時代の「もの」の生産・使用のあり方を見直すべきことが今日問われている。これを学術面からリードしていくことが求められているが、「もの」を生産する上での学術的基礎としての「生産科学」は、半世紀前から工学を基礎とした製図・設計学、加工プロセス学、生産システム・管理学、品質計測評価学などの個別分野に細分化され、また関連する理学や社会科学との連携が少なかったため、生産活動の新しい使命に対して総合的に支援できている状況にはない。

それゆえ学術会議としては、長期的・総合的視点から生産のあり方を再検討する必要があるため、これまで生産に関連して培われてきた知識を生産科学として集約し、関連学術分野との相補関係を明らかにし、これらを統合して「21世紀生産科学のあり方」を確立し、それに基づいて、今後、生産活動の新しい使命の達成に寄与できる「21世紀生産科学の体系とその内容」を明示することが求められている。

またわが国では、第三期総合科学技術基本計画等において、「生産」ないしは「製造」の用語が「ものづくり」へと変更され、その概念が拡張してきた状況に鑑み、標題では「21世紀ものづくり科学のあり方」としている。

## 2 現状と問題点

日本学術会議は18期に「新しい学術体系委員会」を設置し、「社会のための科学のあり方」について継続的に検討してきた。これらを受けて20期において「科学者コミュニティと知の統合委員会」が設置され、平成19(2007)年3月に「知の統合—社会のための科学に向けて—」が提言された。その中で本報告に重要な示唆を与える内容を引用すると以下のとおりである。

「あるもの」や「存在」を探究する認識科学と「あるべきもの」や「当為」を探究する設計科学の間の連携の促進が、「社会のための科学」にとって重要である。すなわち、認識科学によって導出された知が、設計科学による人工物や制度・方策等の案出をへて社会化されることに加えて、このような連携が新たな知を生む場合が少なくないからである。

また、その好例としてノバートウィナーによるサイバネティックス他を以下のように挙げている。

ウィナーは、生物の脳の運動制御と人工物の制御が同じ原理に基づいていることを発見し、生物学と通信・制御工学を結びつけることを通してサイバネティックスを提唱し、その結果として生物模倣科学と医工学を創出した。最近では、機械工学と電気工学の両者から運動体に関わる知を抽出し運動制御を核としたメカトロニックスの誕生が、知の統合の好例として挙げられよう。

このメカトロニクスの事例に見られるように、現実を目を向ければ、人間の生産活動の成果としての人工物が人間社会に役立ち、かつ自然環境と調和すべきことは今日必然であり、したがって生産活動は、上記報告の「当為」すなわち「為すべきこと」を規範とすべきことも自明であろう。

日本学術会議生産関連の諸専門委員会では、生産科学のあり方について継続的に検討し、併せて「生産学術連合会議」および「エコデザイン学会連合」を組織し、成果を啓蒙してきた。しかし残念なことに従来は、「生産科学の個別分野」ないしは「技術を対象としての生産科学」に的を絞って検討してきたために、今日、喫緊の課題である「ものづくりがもたらす社会経済効果と自然環境への影響との調和」に対して、科学的根拠に基づく学術としての俯瞰的な提言がなされていない状況にある。

さらにわが国では、ものづくりに関連する研究室は専攻・学科に分散化・細分化され、その多くが個別に研究活動を展開しているため、ものづくり系企業の細分化された特定の生産活動に寄与できているものの、21世紀におけるものづくり活動全体に課せられた新しい使命に対して総合的に貢献できている状況にはない。

### 3 報告の内容

(1) 学術会議生産科学分科会では、従来の「生産」ないしは「製造」という用語と「ものづくり」の意味するところの違いを明らかにするために、「ものづくり」を以下のように定義することを検討してきた。

「ものづくり」とは、「人間社会の利便性向上を目的に人工的に「もの」（形のある物体および形のないソフトウェアとの結合を含む）を発想・設計・製造・使用・廃棄・回収・再利用する一連のプロセスおよびその組織的活動であり、結果が社会・経済価値の増加に寄与できるとともに、人間・自然環境に及ぼす影響を最小化できること」を指す。

(2) 「ものづくり」がもたらす新しい価値を予測し、ものづくり企業がこれを達成し競争力を維持していくには、「科学に基づくものづくり」を実践する必要があるため、従来、分散的に存在していたものづくり関連の知見を学術が中心になって「ものづくり科学」として集約・拡充し、「ものづくりの種」を積極的に創出する必要があること、またそのあり方を検討している。

(3) 「ものづくり科学」は、「もの」の開発・設計・生産の基本を左右する工学基礎、ナノテクノロジーやバイオテクノロジーなどの先端工学、「もの」の使用・廃棄・回収と再利用、および人間・自然環境との調和を考慮するための環境学、さらには「もの」の市場と経済価値を論じる上で不可欠の社会、文化、経済・経営学等とも連携し、「もの」の開発目的に合わせて知識を統合ないしは収斂し、推進中の第3期科学技術基本計画が目指す政策目標（社会イノベーション）の実現に寄与すべきことを検討している。

- (4) 「ものづくり科学」の中核は、従来の「設計生産工学」ないしは「製造工学」と呼ばれる学術であるが、その下で細分化されている現在の研究体制のままでは、新しいものづくり価値を創造する上での科学的・学術的支援が不十分であること、それゆえ既存の研究室を連携・統合して総合的に対処できる「ものづくり研究拠点」の形成を図るべきこと、およびその主たる研究領域を検討している。
- (5) 「ものづくり科学」を振興し、「ものづくり研究拠点」の形成を促進していくには、関連予算の配分を今日の細分化から大括り化し、研究拠点への重点配分等が必要であることを検討している。

## 目 次

1	はじめにー従来の検討経緯と本報告の位置づけ	1
2	「ものづくり」の定義	2
3	「ものづくり科学」の創始と展開	4
4	「ものづくり」がもたらす新しい価値と「ものづくり科学」の方向	6
	(1) 利便性の更なる高度化と「ものづくり科学」の方向	6
	(2) サービス、安全・安心の付加とものづくり科学の方向	7
	(3) 環境・エネルギー価値増加に向けたものづくり科学の方向	8
5	人工科学の提案とものづくり科学の枠組み	9
	(1) 人工科学におけるものづくり科学の位置づけ	9
	(2) ものづくり科学に立脚したイノベーション	11
6	ものづくり科学の研究拠点形成	12
	(1) 現状の研究組織	12
	(2) 研究組織の拠点化	12
	(3) 研究拠点におけるものづくり科学研究領域	12
7	ものづくり科学予算のありかた	13
	参考文献	15
	参考 1	16
	参考 2	17

## 1 はじめにー従来の検討経緯と本報告の位置づけ

日本学術会議は、「社会に役立つ科学」を標榜して平成 18 年（20 期）に抜本改正され、従来の学術専門分野を越えた学際的・総合的な立場で社会をリードすることを新しい使命としている。この間、現代社会の諸問題に対して、学術の立場から中立かつ俯瞰的な勧告・声明・提言等が多くなされてきた。その一環として、20 期において「科学者コミュニティと知の統合委員会」が設置され、平成 19（2007）年 3 月に「知の統合ー社会のための科学に向けてー」が提言された。その中で本報告に重要な示唆を与える内容を引用すると以下のとおりである。

「あるもの」や「存在」を探求する認識科学と「あるべきもの」や「当為」を探求する設計科学の間の連携の促進が、「社会のための科学」にとって重要である。すなわち、認識科学によって導出された知が、設計科学による人工物や制度・方策等の案出をへて社会化されることに加えて、このような連携が新たな知を生む場合が少なくないからである。

また、その好例としてノバートウィナーによるサイバネティックスなどを以下のように挙げている。

ウィナーは、生物の脳の運動制御と人工物の制御が同じ原理に基づいていることを発見し、生物学と通信・制御工学を結びつけることを通してサイバネティックスを提唱し、その結果として生物模倣科学と医工学を創出した。最近では、機械工学と電気工学の両者から運動体に関わる知を抽出し運動制御を核としたメカトロニックスの誕生が、知の統合の好例として挙げられよう。

なお上記の提言における「設計科学」は、社会科学、医学、工学などを含むとしているが、以下では、工学におけるいわゆる「設計（デザイン）」との意味の違いを明確にするために、「広義の設計科学」と呼ぶことにする。

現実に関目を向ければ、従来の生産活動は産業界を中心に展開され、その成果としての人工物・工業製品等が人間社会の利便性向上に大いに貢献し、社会経済価値を増してきた事実は万人が認めるところであるが、他方、過剰になり過ぎた人工物・工業製品等が、今日、大気中炭酸ガス濃度の急増を招き、このことが地球温暖化の主因ではないかとの社会的認識が高まるにつれ、人工物・工業製品等の生産活動が自然環境維持とも調和すべきことが社会的合意になりつつある。このことから今後の産業界における生産活動は、従来にも増して人間社会に利便性を供与することの「当為」にプラスし、自然環境との調和も含めた「新しい当為」を規範とすべきことも自明であろう。

日本学術会議機械工学研究連絡委員会機械加工専門委員会は、平成 8 年 10 月にシンポジウム「21 世紀で開花する生産科学・技術」を開催し、「21

世紀初頭における生産科学・技術の研究指針」を提示した<sup>1)</sup>。また人工物設計・生産研究連絡委員会生産システム学専門委員会は平成12年4月に「人工物のライフサイクルデザイン(LCD)のための振興すべき基礎学術」<sup>2)</sup>、平成15年6月に「ライフサイクルデザイン(LCD)指標体系に基づく人工物設計・生産の評価指針-LCD戦略に向けた構造的評価方法-」<sup>3)</sup>、平成17年7月に「生産システム学について今後推進すべき基礎的学術課題」<sup>4)</sup>などを公表してきた。

いずれも時宜を得た提言であったが、固有の生産活動に特化した学術・技術のあり方とそれらの評価指針に関する内容が主体であったため、今日必要とされている、“生産活動がもたらす社会経済価値と地球環境悪化へのリスクを両面的に捉え、21世紀における生産活動方針の策定に寄与できる科学・学術としての体系構築”の視点が欠落していたと思量される。

さらにわが国の生産技術に関連する研究室の多くは小規模の上、個別に研究活動を展開してきているため、製造企業の細分化された特定の生産活動には寄与できているものの、21世紀における生産活動全体に課せられた新しい使命に対して、生産科学総体として学術的支援をできる状況にはほとんど至っていないと考えられる。

かかる観点から新生20期学術会議に生産科学分科会を設置し、21世紀に期待される生産活動の新しい役割に対して、学術の立場からリードしていくことを目的として検討してきた。

まず本報告では、従来の生産科学と関連学術分野との相補・学際関係から、広義の設計科学の学術の一つとして新たに「ものづくり科学」を位置づけ、そのあり方を検討している。今後、この結果を関連の科学者・学協会等に広報して理解を促進し、このあり方を参考にして関連の科学者・学協会等が研究を進め、かつ相互に連携を促進することによって、ものづくり活動の新しい使命の達成に寄与できる「21世紀ものづくり科学の体系」に深化できていくことを期待している。その結果として、将来、ものづくりがもたらす社会経済価値と自然環境維持という一見矛盾した課題に対して、両立し得る解を提供できることを期待している。

「生産」から「ものづくり」に用語を変更した理由は、第三期総合科学技術基本計画等において、国では従来「製造技術分野」と呼称していたものを「ものづくり技術分野」に変更したことを尊重していることによる。ただし国では、「製造」ないしは「生産」と「ものづくり」の意味を十分に吟味した上での用語変更ではなかったと推量されるので、本分科会において「ものづくり」の定義を新たに検討した。

## 2 「ものづくり」の定義

発音での「モノヅクリ」を日本語表記すれば20数通りがあるが、前述したように既に内閣府総合科学技術会議等で、ひらがなの「ものづくり」

を用いているので、本分科会としてもこれを尊重することとした。しかし、その定義が曖昧である現状に鑑み、本分科会では以下のように検討している。

「ものづくり」の定義：人間社会の利便性向上を目的に人工的に「もの」（形のある物体および形のないソフトウェアとの結合を含む）を発想・設計・製造・使用・廃棄・回収・再利用する一連のプロセスおよびその組織的活動であり、結果が社会経済価値の増加に寄与できるとともに、人間・自然環境に及ぼす影響を最小化できること。

「ものづくり技術」：ものづくりに関わる技術の総称

「ものづくり科学」：ものづくりに関わる科学の総称

「ものづくり」の解説

広辞苑によれば、「生産」とは、「人間が自然に働きかけて、人にとって有用な財・サービスを作りだすこと、もしくは獲得すること」であり、産業分類からは、第一次産業（農林業、水産業）と第二次産業（鉱業、製造業、建設業）に属するが、最近では第三次産業のソフトウェアを含ませることもある。それに対して「製造」とは、「工業製品（商品）」にするために原材料を加工すること」とし、第二次産業の生産に限定して用いている。

「製造」のほぼ同義語として、最近、文末の参考に示したように「モノヅクリ」と発音される20数通りの用語が用いられている。

そこで新たに定義したひらがなの「ものづくり」は、第一には、全てのプロセスを連携（すり合わせ）統合して、高品質かつ高能率にものを作りこむ上手さを総合的に意味することとする。

また「生産」と「製造」が、人間社会の要望に応じてその利便性向上に寄与できる物財ないしは工業製品を企画・設計・製造する、すなわち供給側からの「正の工程」を主たる対象としているのに対して、「ものづくり」は、それらの使用・廃棄・回収・再利用に関わる消費者側からの「逆の工程」を含めた「すべての工程」として捉えることとする。このことが「ものづくり」が、単に利便性向上に資するばかりではなく、自然環境との調和にも配慮しなければならないことを喚起している。

また従来の「製造」は形のある工業製品を作り供給することを主たる目的にしているのに対して、「ものづくり」では、元来形がない「情報」と、「情報」と一体化した工業製品、さらには形のない気体や液体の材料的製品、食糧、医薬分野における工業製品をも対象とし、その総称として「もの」と称することにする。このように最新の「ものづくり」は、ナノテクノロジー・材料、バイオテクノロジー等の先端工学を取り込んで常に「新しいもの」を開発しなければならないため、産業界のみでは立ち至らない状況にあり、大学を中心にした学術における「ものの種」の創出が不可欠になっている。

「もの」は一般的には単体であり、集合して「システム」を形成することもあるが、「単体のもの」と「システム」との境界が不明確の場合も多い。「ものづくり」の産業的分類は第二次産業に含まれるが、建築物や社会基盤等の構造物全体を作ることは含めないこととする。

さらに「もの」の使用者側から見た価値、すなわち「もの自体の機能」に加えて、その使用時の「サービス」および「安全・安心」が使用者にもたらす価値の重要さが増してきた状況に鑑み、これを科学的に解明しようとするのが、従来の「製造」「生産」とは異なる点である。このように「もの」の使用者側から見た価値を拡大して社会現象的な「ことづくり」を実現することが真の「ものづくりイノベーション」であるとの理解がされつつある。

### 3 「ものづくり科学」の創始と展開

人間が人工的なエネルギー源である蒸気機関を実用してから未だ3世紀にも満たない。18世紀初頭のトーマス=ニューコメンの日誌を読みると、「鑄造した丸棒インゴットを X 字に組んだ二対の丸太に載せ、インゴットに何重にも巻いたロープを勢い良く引っ張り、回転させ、刃物で外径を削ってピストンを作る」、「今日はシリンダーとの隙間がコインの厚さまで小さくできて大成功」、「ピストンとシリンダー間の蒸気の漏れを防ぐために革を巻いた」などと記述されている。蒸気機関はこのような現場的・技能的対応で少しずつ進歩し、原型ができてきた。これらの技能は徒弟的制度によって伝承され、やがて図面や文章として記述・整理され、少しずつ経験知識の体をなしてきたと思われる。ニューコメンから半世紀を経た1776年に、ワットが蒸気機関の製作を「技術知識」として取りまとめたと理解してよいであろう。さらに半世紀を経た1820年にカルノーが蒸気機関を考究して科学的・工学的にカルノーサイクルとしてまとめ、ここに初めて熱力学なる学術研究が緒についたのである。

この事例が示すように、「もの」をつくる知識の体系は、まずは現場経験的な技能が先行し、多くの技能経験が集約、整理され技術知識へと体系化されてきた。機械製品を事例に挙げれば、20世紀に入って量産化が可能になった頃に、材料・変形・機構・エネルギー変換・制御などに関わる現象を、科学的知識（数学、物理、化学など）によって一般的に説明できるようになった。すなわち材料学、変形力学、機構学、エネルギー変換学、計測制御学などの工学的知識として整理・体系化することが可能となってきた。この結果、今度は作ろうとする図面に対して工学的知識を適用し、作るものの機能を事前に予測し、さらには保証できるようになった。これを1章に述べた「広義の設計科学」に対して、「狭義の設計（デザイン）」と呼ぶことができる。この「狭義の設計」に基づいて画かれた部品図面に従って部品を加工し、それらを機械製品に組み立て、その品質を統計的に

管理・保証できるようになった。今日では、未存在の機械製品に工学知識を適用することにより、未存在製品の性能を理論予測して設計科学となし、必要に応じて膨大な数値データをコンピュータ処理することにより、未存在製品の現象をシミュレーションすることまでもが可能となった。

以上の設計、シミュレーション、加工、組み立て、検査の工程に関わる知識を科学的根拠に基づいて整理・体系化したのが「設計生産工学 (Design and Production Engineering)」ないしは「製造工学 (Manufacturing Engineering)」と呼ばれる学術で、これを「狭義のものづくり科学」と位置づけることができる。

他方、今後の「ものづくり」がもたらす価値は、図1に示すように、人間社会に利便性を供与するという第一の役割（供給者側の義務）の高度化、「もの」の利用者が享受できるサービス、安全・安心の付加という第二の役割（利用者側の権利）、および、「ものづくり」が省エネルギーで自然環境にも調和しなければならないという第三の役割（自然環境側の要求）へと拡張し、それら三つの役割とその価値をいかに配分するかが重要になってきている。このためには以下の項目を考慮していかなければならない。

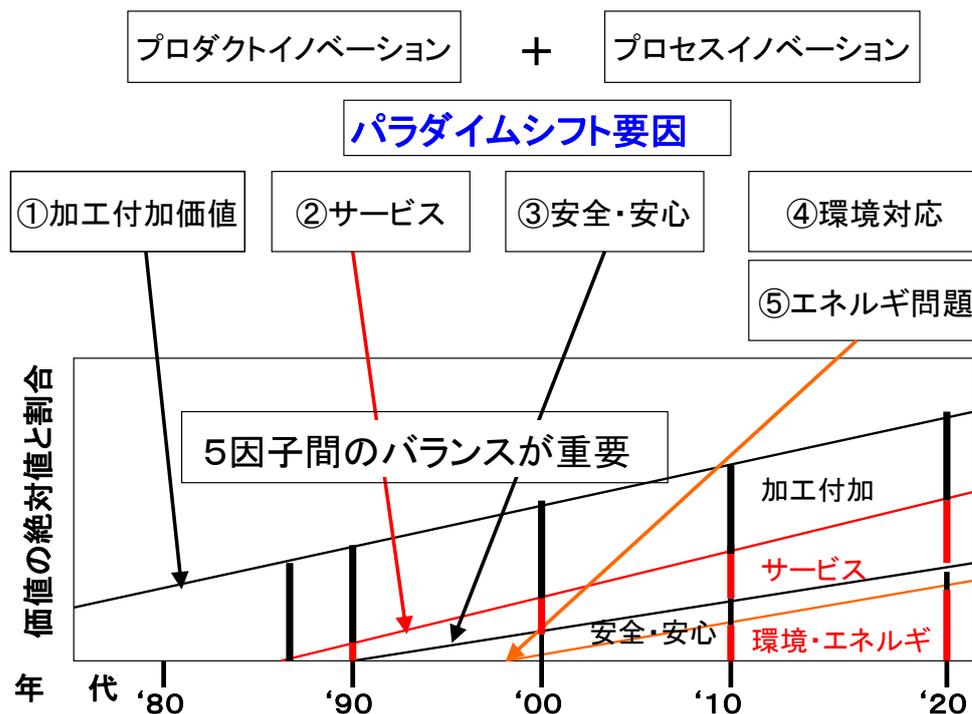


図1 ものづくり付加価値の変遷

## 4 「ものづくり」がもたらす新しい価値と「ものづくり科学」の方向

### (1) 利便性の更なる高度化と「ものづくり科学」の方向

「ものづくり」の第一の役割は、人間が欲する機能を代替し、人間に利便性を供与することである。このものづくりプロセスは、20世紀までは、どちらかといえば資源・材料に外部エネルギーを加えて変形・変態を導出するか(物理的原理)、ないしは自律的な反応を導出して(化学的原理)、人間の利便性に供する機能を創出してきた。物理的原理は固体形状から成り立つ機械部品の製造プロセスに多用され、そのプロセスは他律的な制御が可能である。他方、化学的原理は、形状のない液・気剤の製造プロセスに多用され、そのプロセスでは反応を自律的に制御している。最近では両者の特徴を併せ持った物理化学的原理が実用され、半導体加工プロセスや新物質の創成に多用されている。

20世紀後半からは、形状的な「もの」に加えて非形状の情報の持つ価値が増大し、情報単体ないしは情報システム、および固体物に情報を付加することで、「もの」の価値を飛躍させてきた。ここでは記号論理を原理とする情報科学が発達した。

21世紀に入ると、従来の物理的、化学的および記号論理的原理に基づくものづくりプロセスは、一方では極大化してスペーステクノロジーへ、他方では極小化してナノテクノロジーへと開花してきている。並行して情報科学も膨大な情報を極短時間処理可能なユビキタス技術へと展開してきている。

今後に期待できるものづくりは、生物原理に基づくプロセスの開発であろう。生物体自体に内在するDNAを他律ないしは自律的に制御することで、これまで主に固・液・気を対象にしてきたものづくりは、一挙に固体形状の軟体物をも対象にできることになる。すなわち元来軟体である人間や生物に親和な軟らかい構造の提供、情報科学との結合により人間の肉体的不具合や感性に関与しうる機能の提供、食料の大量供給、自然環境緩和が可能な機能の提供等、20世紀の原理では不可能であったものづくりの可能性が確実視されている。他方、このような生物原理に基づく新しいものづくりは、遺伝子組み換え等、従来の自然界には存在していなかった生命体を創出することにもなり、それによる自然環境への影響を踏まえた慎重な対応が不可欠であろう。

ものづくりに関連する研究者と学協会が、ものづくり科学とこれらの先端科学との密接な連携を意図し、必要に応じてこれらの一部をものづくり科学の範疇に取り込み、「ものづくりの種」を積極的に創出する姿勢がなければ、21世紀のものづくり科学を深化させることは不可能であろうし、同時に、これまで産業界を中心に展開されてきたものづくり活動が行き詰まってしまおうであろう。

また第3期科学技術基本計画の政策目標に社会イノベーションが掲げ

られているが、その実現にはものづくりが重要な役割を担うべきであることを認識するべきであろう。そのためナノテクノロジー等の8つの個別要素技術推進分野とものづくり科学とを連携させることが重要であり、具体的には、開発する「もの」に合わせて必要な知見を統合する「日本型収斂技術群（コンバージングテクノロジー）」の設定とそれらの振興を検討していかなければならないであろう<sup>6)</sup>。

## (2) サービス、安全・安心の付加とものづくり科学の方向

先進諸国におけるものづくり企業の多くは、従来は加工価値を付加した工業製品を顧客に提供することで収益を得るビジネスモデルであり、収益を最大化するためには、大量生産、大量販売、大量消費を基本としてきた。しかし社会の持続性が重要視される今日、環境や資源の制約が大きくなり、また日用必需品の製造拠点が中国等に移る中で、旧来のビジネスモデルのままでは経営が困難になってきている。そのため、もの自体の提供から、ものにサービスを付随させて提供する方向に収益の源泉がシフトしてきている。元来、顧客はものを保有することを必要としているのではなく、ものを使用して得られる利便性を必要としているのであるから、それを提供してビジネスを行う本来の当為が存在し、ここに「ものづくりの第二の役割」がある。つまり、ものの売切りでなく、顧客がものを購入・使用・保守し、さらには買い替えるライフサイクル全体を通してサービスを提供することによって、新たな付加価値を生み出すビジネスモデルを考える時代になってきている。

しかしこのサービスは、本来的に無形かつ消滅的性質を有し、工業製品のハード・ソフトのごとく分割できない上に、その良否は顧客の評価に依存するので変動的である。そのため従来の工業製品の設計理論の延長ではサービスを設計することはおよそ困難である。このため、ものの開発・活用・産業経済化・社会との関わり等に対して経営学、社会学、心理学などの社会科学が果たしてきた役割をものづくり研究者は十分に認識し、今後のもののサービス価値を研究しなければならないであろう。

サービスを科学するための理論や方法論などの学術については、最近になってようやくサービスのモデル化、それによる顧客満足度を定量化する方法論、製品のライフサイクル全体にわたるサービスの評価手法などの研究が開始された。今後サービス科学は、経営学、社会学、心理学などの社会科学の知を積極的に取り込んで振興すべきであろう。

「ものづくりの第二の役割」の他の側面は、ものという人工的な存在と利用が人間、社会、自然に対して安全・安心であるべきことである。20世紀当初の工業化社会草創期では、ものの第一の役割が優先されてきたが、20世紀末には先進諸国では、ものの安全・安心を法的に保障する目的で「製造物責任（PL）法」が制定されてきた。

21 世紀に入ると、4 (1) で述べたように先端科学技術がものづくりに活用され、ものづくりが一層高度化されてきたのに伴い、ものに用いられる材料や構造等が一層複雑化・複合化されてきた。これらのものの安全・安心を確保するためにはその設計が鍵であるため、設計への負荷が増大し、併せて設計期間短縮と開発費削減が要請されるために、設計者がものの安全・安心面を十分に検討する余裕がなくなっている現況にある。そのために、ものの安全・安心を保証する上で、やや未熟なシミュレーション技術のみに依存する傾向が重なり、ものの安全・安心度が低減している状況にある。ゆえに、安全・安心な設計を支援できるシステムの開発が急務である。具体的には不具合の発生しにくい構造の設計支援技術、設計ミス防止技術、シミュレーション信頼性向上技術、PL 対応技術などであり、そのため設計検証システムと現物融合システムの研究開発が喫緊である。

設計検証システムとしては、設計便覧や設計標準に従ったチェックを実行して結果を確認する機能、重要な部位の要求仕様や性能が満たされているかをシミュレーションや試験とリンクしてチェックする機能、さらに、設計変更がもたらす影響のチェック機能などの開発に向けた科学構築が不可欠である。

また CAD/CAM/CAE という情報世界での仮想モデルに基づく設計・開発が今後さらに進展すると期待されるが、この場合、仮想モデルと実際に作られる「現物」の間には必ず誤差が発生するので、これをデジタルエンジニアリング情報に還元し、製造バラツキを見込んだ頑強な設計理論、さらに現物情報を用いたシミュレーション技術の開発が急務である。

### (3) 環境・エネルギー価値増加に向けたものづくり科学の方向

自然界には存在していなかった人工的なものを作り出すことは、自然環境、とりわけ地球温暖化に影響する可能性が大きい。その影響を最小限にとどめるために、たとえば平成 19 (2007) 年 5 月に安倍総理が発表した「クールアース 50 計画」では、2050 年までに世界全体の温室効果ガス排出量を現状の半分にするとしている。平成 20 (2008) 年 7 月に開催された洞爺湖サミットにおいては、「2050 年までに世界全体の温室効果ガスの排出量を少なくとも 50% 削減するという長期目標を、世界全体の目標として採択することを求める、との認識で一致した」との福田議長による総括がなされた。併せてわが国は、長期目標の実現に向けて、産業セクター別アプローチ、すなわちエネルギー利用効率 (CO<sub>2</sub> 排出原単位) の改善を電力や鉄鋼、セメントといった CO<sub>2</sub> 排出量が多い産業分野 (セクター) 別に実施するべしとの提案を行っている。

東京大学小宮山総長を中心としたビジョン 2050 の提言では、日本の消費エネルギーは、ものづくり 30.6%、日々の暮らし 39.1%、エネルギー変換 30.3% から成り立ち、これらを削減するためにエネルギー変換

は必要不可欠だが、その過程でのCO<sub>2</sub>ゼロ供給を目指し、「ものづくり」においては、それらの素過程における変換効率から重点目標を設定するべきとしている。具体的には車の生産などの加工組み立ての素過程エネルギー消費を1とすれば、還元反応を主体とする化学（日本の消費エネルギーの10.5%）と鉄鋼（同7.5%）は1000倍にも達するので、この分野の削減が必須であるとしている。また日々の暮らしにおけるエネルギー消費の大半はオフィス、旅客、家庭、輸送で占められているので、省エネルギー製品をいかに開発・利用・リサイクルするかのライフスタイルの転換が要であるとしている。

上記の地球環境維持に向けた長期目標とその実現に向けた科学的根拠に基づいて、ものづくり科学を展開することが必須である。これまで自然環境維持と経済発展の両面より人間・社会システムの最適化を目指す手法としてエコデザイン学<sup>3)</sup>やサステナビリティ学の必要性が提唱されてきているが、まだ緒についたばかりで、早急な確立が不可欠である。低環境負荷・高付加価値型製品の創出を可能とできるエコデザイン学の確立には、本章の(1)で述べた革新的なものづくり科学が先導的役割を果たすと期待されている。例えば、接合部品の分解と再組立のために可逆的インターコネクションを適用する技術開発が進められているが、そこではナノレベルでの接合と分離を可能とする常温接合や、バイオミメティクスに基づいて開発されたカーボンナノチューブ人工繊維の超接着テープなどが研究されており、今後のものづくり科学の重要な構成要素として注目される。

## 5 人工科学の提案とものづくり科学の枠組み

### (1) 人工科学におけるものづくり科学の位置づけ

我々が生息している地球は、自然、人間、社会、そして人間が創り出した自然物・人工物により構成されており、その本質を明らかにして普遍的法則を見出そうと科学・学術が進展してきた。自然、人間、社会に対しては、それぞれ自然科学、人文科学、社会科学が学術として発展してきている。また人間を含む自然物や人工物を人為的に回復ないしは作ることを目的に、工学、農学、林学、水産学、医学等が振興され、これらを応用科学と呼称してきたが、数学を自然科学に含めるべきか応用科学に含めるべきかについては立場により異なった見解が示されてきた。また最近では、従来の応用科学とは一線を画した情報科学、ナノテクノロジー学、バイオ・ライフサイエンス学、環境科学などの先端科学が発展してきている。そこで本分科会では、4章に述べたように、ものづくり科学を新たに構築すべきこと、そして従来の応用科学等を含めて一括りにし、「人工科学」という枠組みにしてはどうかと検討してきている。この枠組みに数学を含めることにより、「人工科学」は自然の存在を対

象にするのではなく、人間の脳裏で構想し、人間を含む自然物や人工物を人為的に回復ないしは作ることを対象にした学術体系として位置づけることにしてはどうかとの検討を進めてきた。

学術会議提言「知の統合－社会のための科学に向けて－」の実現を以上のような「人工科学」の観点から考えると、図2に示したように「人工科学」は「自然科学」「人文科学」「社会科学」との連携促進を基本として新たな知を創出し、その中において「ものづくり科学」は、まず「工学」を基礎としてその確立を目指し、その過程において、他の「人工科学領域」はもとより、「自然科学」「人文科学」「社会科学」と連携して社会に貢献できるものづくりを支援しなければならないと思量している。具体的には「ものづくり科学」は、2章で定義した「ものづくり」に関わる科学として人工科学の構成分野の一つに位置づけ、その主要な領域を図中に示した。

「人工物」を対象とした科学が確立していないとの観点から、東京大学に人工物工学研究センターが1992年に発足しているが<sup>5)</sup>、これは基本的には工学であり、内容的にはシンセシス工学を中核に人文、社会科学との連携の輪を広げており、本分科会で検討している「ものづくり科学」に重複する項目も多い。

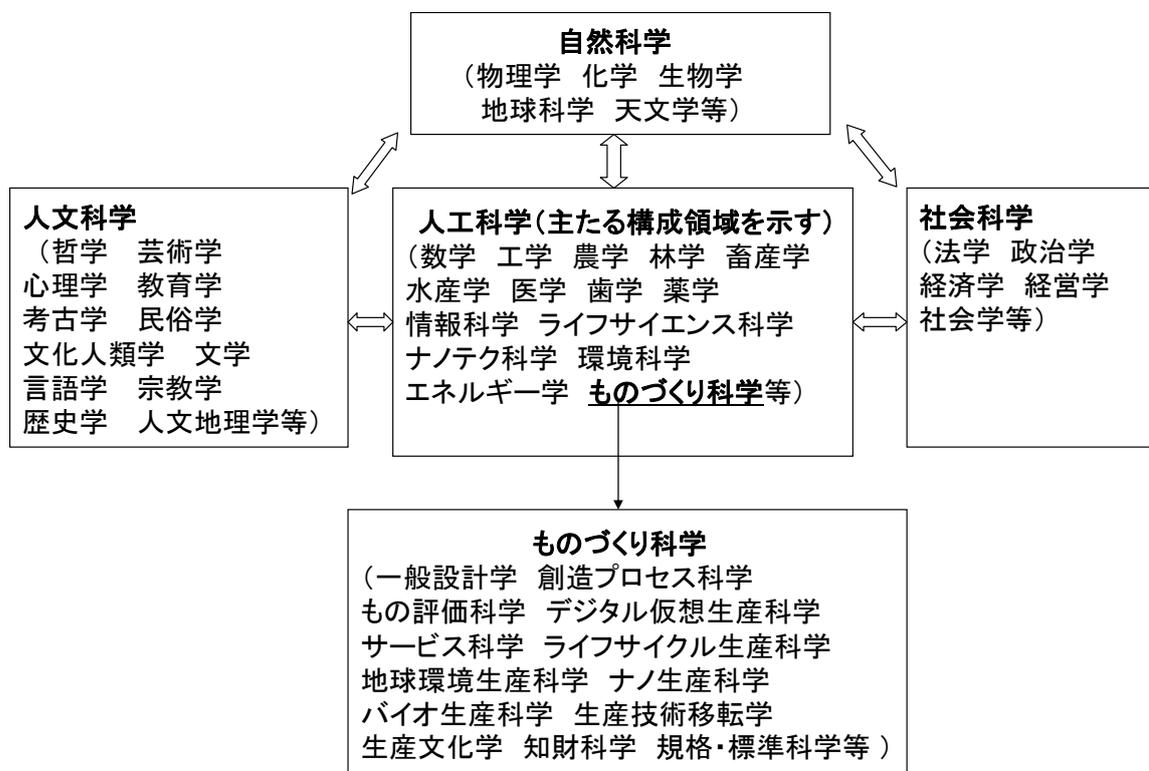


図2 ものづくり科学の位置づけ

## (2) ものづくり科学に立脚したイノベーション

日本型ものづくりの強みは、トヨタ自動車が平成 11（1997）年に世界で初めて量産販売したハイブリッド車に代表される。これはガソリンエンジンと電気モーターを複合した動力源を持ち、省エネルギーでかつ排気ガスや鉛使用量の削減等の環境対策が十分になされている。ガソリンエンジンと電気モーターそれぞれは既知の技術であるが、省エネ、環境対策、高品質を同時に達成したプロダクトとプロセスの複合型イノベーションに大きな特徴が見出せる。このようにプロダクトイノベーションとプロセスイノベーションを巧みに融合させて時代の要求に応えるという「複合型ものづくり」は我が国に優位性があり、これを不断に継続し、結果として我が国産業の軸足を漸進的にも移動させて世界の第一人者たるべきことが重要である。自動車に加え、材料、情報家電、精密、ロボットなどの我が国の代表的産業のイノベーションの多くは、この複合型イノベーションによって支えられてきている<sup>7)</sup>。

しかし民間企業にもものづくりを頼り、その基礎・基盤研究を怠ると近い将来、現在競争力を持っている産業分野においても、急速に競争力を失うことが懸念される。それゆえ、現在のイノベティブ製造技術および省エネ・環境調和技術での強みを維持しつつ、上述した「ものづくり科学」を振興し、それを基盤とした「21 世紀ものづくり技術」をリードすることが国力の源泉である。そのためには、次世代ものづくり技術開発の正確なロードマップに対応して、中期的な技術開発を支援できる「ものづくり科学知見」を統合する必要がある、その手法としてはコンバージング・テクノロジーの適用が有効であろう。これは次世代の具体的なものの開発目標に対して、必要なものづくり技術と科学を集中的に収斂させる方法である。前述したハイブリッド車に対して、存在するものづくり科学・技術知見を収斂させたのが好例である。

政策的には、総合科学技術会議等の科学技術行政および各研究資金供給機関は、第 3 期科学技術基本計画が掲げた 6 つの大政策目標、12 の中政策目標、さらには 60 余の個別の政策目標実現と、その実現に必要なナノテクノロジーや情報通信分野等の 8 つの要素技術別推進分野とを結合させる施策を、広義の“高付加価値創造型ものづくり科学技術群”（日本型コンバージング技術群）と位置付け、その振興を促す新たな施策の企画・実行を推進するべきであると考え、その支援が可能な「ものづくり科学」の確立が不可欠であることを分科会としては検討してきた。

## 6 ものづくり科学の研究拠点形成

### (1) 現状の研究組織

現在、大学に設置されているものづくり科学系の研究室は、機械、電気、電子、化学、土木、建築などの産業分野に対応した専攻・学科に分散して存在し、さらにそれぞれの専攻・学科内で材料・設計・加工などの研究室に細分化されている状況にある。また、ものづくりの管理的側面から、生産工学などの専攻・学科も存在する。これらは、高度成長期から今日に至るまで、わが国の技術発展に重要な役割を果たしてきたが、近年目まぐるしく変革するものづくり技術の高度化・多様化に対して、細分化され過ぎているため学術面から総合的に対応できているとは言い難い状況にある。

### (2) 研究組織の拠点化

上述の視点に立ち、全国の大学等のものづくり科学系研究室に分散している人材、施設・設備、予算を連携、必要に応じて分散統合して複数の拠点を設け、世界トップの研究者を集結して世界をリードするものづくり研究を達成していくことが不可欠であると考え。具体的には、研究室を地域ないしは専門分野ごとに、また地理的・物理的には分散していても組織的には統合させ、その発展形態として必要に応じて地理的・物理的にも統合し、地域の特性や専門分野特性を持つ拠点形成を図るべきである。

これらの分散統合拠点を通してものづくり研究者の自由で密な共同研究が担保され、知識の共有、データや設備の共同利用によって無駄を省くことにより、先端的ものづくりのビジネス速度の早さにも対応できると期待される。併せて研究者が、拠点に一定期間滞在研究できる「ものづくり科学研究サバティカル制度」を実施できる制度化を促進する必要があると考えている。

ものづくりイノベーションは、単一の先端技術によって実現されるものではなく、多様な科学技術の統合化によって実現される。そのために、ものづくり科学研究拠点は、他領域、特に工学基礎分野の研究室ともダイナミックに連携し、開放性を維持していなければならない。

また、ものづくり科学の実証の場である企業との連携が不可欠で、そのため拠点で実施される研究が、基礎研究から実用化まで、要求分析⇒研究開発⇒試用評価というサイクルを何度も回して実用化への道を拓いていくことが必要である。

### (3) 研究拠点におけるものづくり科学の研究領域

このようなものづくり科学研究拠点で実施すべき研究課題について、競争力確保の観点から国として中長期的な方向性を打ち出すべきと

考えるが実態は以下のようなものである。第3期科学技術基本計画が掲げた中政策目標の一つに「イノベーター日本」があり、その個別目標の一つに「ものづくりナンバーワン国家の実現」がある。この実現に向けて経済産業省が掲げている研究開発課題は、「設備安全計測」「製品トレーサビリティ」「計量標準」「ものづくり試験・評価の標準化」にとどまっています、わが国の中長期的なものづくり基盤を支える研究の枠組みが極めて乏しい現状にある。

そこで本生産科学分科会にて検討してきた「ものづくり技術を支えるものづくり科学の研究領域」を参考までに列挙すれば以下のようなものである。

- ・ 持続可能なものづくりシステムの構築とそのための革新的技術の創成
- ・ 革新的デジタルものづくり科学  
CAD/CAM/CAE、仮想現実感、RP/RT/RM、感性・満足度評価、サプライチェーン等
- ・ バイオテクノロジーを活用したものづくり科学  
バイオアクチュエータ、バイオミメティクス、バイオセンサー等
- ・ 生体工学・医用工学と統合化されたものづくり科学  
計測、モデリング、マイクロツール開発、無侵襲技術、ヒューマンアシスト等
- ・ 新しいメカニズム・メカニカルシステムの創成  
ナノ／マイクロ／メゾ・メカニズム、常温／低温・接合／分解、ロボット、MEMS、工作機械等
- ・ 新しい原理に基づく革新的ものづくりプロセス技術の創成  
表面、新素材、加工、改質、コーティング、自己組織化、マスクレス化、超高精度化等
- ・ その他の戦略的ものづくり科学  
レアメタル低減化、エネルギー最小化ものづくり

## 7 ものづくり科学予算のありかた

第三期科学技術基本計画における国家の科学技術研究費は、毎年度、約3兆6000億円程度であるが、いわゆる「ものづくり技術分野」に特化した配分は僅か1%に満たない現状にある。ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料の重点推進分野の予算枠の中でもものづくり分野に関連するものも見られるが、ものづくりを国家基盤とするわが国においては、ものづくり技術の開発は民間に委ねていけばよいとの方針を見直し、中長期的な競争力強化に向けて、その基盤となる「ものづくり科学分野」に対する直接的投資を真剣に検討するべきであると考えます。

まずは「ものづくり関連予算」において、従来のテクノロジーベースで細分化された予算枠から、統合化されたものづくり科学としての大分類へ

予算枠を変更し、上述した研究拠点の形成と予算配分・拡充が不可欠である。これにより従来のテクノロジーベースから、研究拠点を中心としたサイエンスベースへと研究スタイルが変化し、その結果、醸成されたものづくりの知の蓄積と統合、他の分野の知との連携・収斂が十分に行われるようになり、日本型の高付加価値ものづくりイノベーションの創出につながることを期待される。

最近の「科学技術の状況に係わる総合的意識調査（定点調査）全体概要版（科学技術政策研究所、平成 19 年 10 月）」によれば、「世界のトップレベルの成果を生み出すために拡充する必要がある研究開発資金」や「産学官連携で現在活発な段階と本来中心であるべき段階」の調査項目において、第 3 期科学技術基本計画の重点推進 4 分野、推進 4 分野のなかで最も基盤・基礎を重視したのは「ものづくり技術分野」である、と報告されている。このことから回答者である代表的研究者・有識者が科学的視点からの「ものづくり研究」の必要性和産学官連携における学のリーダーシップの重要性を十分に認識していることは明らかであると考えられる。

## 参考文献

- 1) 学術シンポジウム「21世紀で開花する生産科学・技術－夢のブレークスルー」要旨集、日本学術会議機械工学研究連絡委員会、平成8年10月22日、日本学術会議講堂
- 2) 人工物設計・生産研究連絡委員会生産システム学専門委員会報告「人工物のライフサイクルデザイン(LCD)のための振興すべき基礎学術」日本学術会議、平成12年4月24日
- 3) 人工物設計・生産研究連絡委員会生産システム学専門委員会報告「ライフサイクルデザイン(LCD)指標体系に基づく人工物設計・生産の評価指針 LCD戦略に向けた構造的評価方法」日本学術会議、平成15年6月24日
- 4) 人工物設計・生産研究連絡委員会生産システム学専門委員会報告「生産システム学について今後推進すべき基盤的学術課題」日本学術会議、平成17年7月21日
- 5) 東京大学人工物工学研究センター、[www.race.u-tokyo.ac.jp/](http://www.race.u-tokyo.ac.jp/) - 12k
- 6) エコデザインと技術開発、古川勇二、学術の動向2008-6、p 57
- 7) 生産科学の展開、古川勇二、学術の動向2006-12、p 17

## <参考1>

「モノヅクリ」あるいは「モノツクリ」と発音する用語は以下のように多様である。

「ものづくり」：比較的使用例が多く、かつ製造、工学的、工業的分野での利用が多い。

「ものつくり」：用例が少ない。「ものづくり」に準拠しているが、「ものつくり」大学の命名に当たっては、日本古来の伝統的用法として「ものつくり」とした。

「モノづくり」：用例が少ないが、工学的、工業的に適切に用いられている。

「もの作り」：用例は多いが、「作る」に用例上の重点が置かれ、結果として、工学的範囲よりも、一般的に広範囲に使用されている。

「モノ作り」：「もの作り」に比べて「モノ」にウェイトが置かれ、結果として具体の物体を対象とした用例が多い。

「物つくり」：用例が少ない、内容的には「ものつくり」に準じている。

「物づくり」：用例が少ない、「物つくり」に準じるが、やや一般的な用例が多い。

「物作り」：用例が最も多い。工学的・工業的・一般的に使われている。広辞苑によれば、耕作、農作など第一次産業対象に歴史的に用いられてきた。

「もの造り」：用例が少なく、かつ造るにウェイトが置かれた利用が多い。

これらを考慮の上、生産科学分科会としては、「モノヅクリ（発音）」に以下の意味を持たせたい。

- ・ 人間社会、自然環境を配慮して、物、もの、モノ（形のある物体、および形のない対象を含む）を発想・設計・製造・利用・評価（デザインとライフサイクル）の一連のプロセスを定義する。
- ・ 動詞部分に漢字の「作」「造」などを用いると、歴史的には自然対象に耕作する、工作するなど意味が限定されている。最近、「創」を用いる事例もあるが、これは「独創的ものづくり」など独創性を重視した表現である。
- ・ これらの点から、漢字で動詞部分を表現すると内容が限定されるので、生産科学分科会で意図する「広汎なモノヅクリ」とは意味が異なってしまうことが懸念される。
- ・ 上記に定義した「広汎なモノヅクリ」を示すためには、ひらがなで、対象としての「もの」と、プロセスとしての「つくり」を一体化した表現としての「ものづくり」が好ましい。

## <参考2>分科会等の活動記録

### (1) 分科会

第1回会議	平成18年10月
第2回会議	平成18年12月
第3回会議	平成19年3月
第4回会議	平成19年7月
第5回会議	平成19年10月
第6回会議	平成20年1月
第7回会議	平成20年3月

### (2) シンポジウム

第1回「ものづくりイノベーションシンポジウム」	平成19年3月27日、日本学術会議講堂
第2回「ものづくりイノベーションに向けた生産科学提言」	平成20年3月28日、日本学術会議講堂

### (3) タスクフォース

第1回会議	平成18年11月
第2回会議	平成19年2月
第3回会議	平成19年6月
第4回会議	平成19年9月
第5回会議	平成19年11月
第6回会議	平成19年12月