

Title	イノベーションの系統進化：トリガーと雪崩のダイナミズム
Author(s)	弘岡, 正明
Citation	年次学術大会講演要旨集, 23: 452-457
Issue Date	2008-10-12
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/7599
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

イノベーションの系統進化 —トリガーと雪崩のダイナミズム

○弘岡正明（テクノ経済研究所）

要旨

18世紀後半の産業革命以来、多くのイノベーションの発展とその相互作用により、近代工業化社会の形成が進捗、今日その成熟期を迎えようとしている。これまでの各種のイノベーションの消長とそれらの相互作用を解析し、イノベーションの系統進化の動態を明らかにしようとする。その要点はどのようにしてトリガーが出現し、具体化したイノベーションから雪崩を打って多くのイノベーションが誘発されてきたかである。それは、生物の系統進化と同様な経緯を辿り、生物の進化が真性細菌、古細菌、真核生物の3つのドメインから構成されているのと相似して、物理系、生物系、化学系の3つのドメインから構成されたイノベーションの進化体系が形成されてきた。それぞれのドメインにおける進化の全貌を検証し、それらの延長上に近未来の動向を探る。

1. はじめに

近代工業化社会の形成は18世紀後半に英国で発生した産業革命がその起源とされているが、その背景として、中世の長い封建時代の終末期にいくつかの転機が生まれた。まず11世紀に始まった十字軍の遠征により、ビザンチン、イスラムの進んだ東方文明に接し、大きな刺激を受けるとともに、東西交流のきっかけができた。13世紀から14世紀にかけて、羅針盤の発明とカラベル型の帆船の技術革新が進み、15世紀には大航海時代が幕を開け、ヨーロッパは大きく視野を広げることとなった。十字軍の失敗で教会の権威が失墜したが、一方でイタリアを軸に交易商人が台頭、力を得るとともに、その豊かさの中から14世紀から15世紀にかけてルネサンスが開花した。それは宗教中心の封建時代からの脱却であり、科学的なものの考え方が燎原の火のごとくに広がった時代となったのである。また、13世紀の火薬の発明と銃砲の発達により、兵器の近代化が進み、その普及とともに100年戦争、30年戦争など戦乱の時代が続いた。加えて14世紀から17世紀にかけてはマウンダー極小期を含め3回の寒冷気候が続き、飢饉とペストの流行などに襲われ、General Crisisといわれる時代となった。そのような背景の中で、最初の科学の発展は、1543年のコペルニクスによる地動説に始まる天文学の進展であり、また1560年の「科学の学会」を契機としたガレリオ、ベーコン、デカルトらによる科学思想の展開である。当初の科学的考え方は、コペルニクスやガレリオの宗教裁判に象徴されるように、封建時代の教会の圧力に抑圧された中で発展した。要するに、近代化へのきっかけは13世紀の十字軍遠征、航海術、ゴシック建築、15世紀のルネサンス、銃砲兵器、大航海、17世紀にニュートン力学、科学思想などのパラダイムが転機をもたらしたといえる。それらパラダイムのタイムスパンは13世紀で170年、15世紀で160年、17世紀になると150年となり、18世紀の産業革命で、蒸気機関、製鉄、紡績機械のタイムスパンは100年となり、同時並行的に生物学、化学、電磁気学が約100年のタイムスパンで進展し、成熟した。これら科学技術の黎明期の諸要因が重畳的に機能して近代化へのイノベーション雪崩の引き金となったといえる。どのような引き金が誰によってもたらされ、それが次の引き金を生み出す雪崩現象となって行ったのか、その詳細を検証してみよう。

2. 物理系ドメインの系統進化

ルネサンスで醸成された科学的なものの考え方は、まず天体の運行についての科学的解釈から始まった。天文学はすでに古代文明の時代に予想以上の知見を得ており、5000年前、中国では惑星の動きを描いた天球図が完成しており、5つの惑星がBC2446年に一ヶ所に集まったことが記録されており、今日の天文学で確認された。古代エジプトでも神官が太陽の動きを観測し、洪水の関係を暦を作っている。これは今日の太陽暦の原型となった。5000年前のバビロニアではカルディア人が星座を描き、今日の星座の原型が生まれた。バビロンの天文学では金星の8年周期をはじめ、各惑星の運行を正確に把握していた。

メソポタミアの天文学はギリシャに流れ込み、高度な発達を遂げ、惑星運行理論、恒星表、地球の大きさを予測するなど、多くの成果を上げた。宇宙観が形成されたが、地球中心の天動説がコペルニクスまで続くこととなる。当時、BC4世紀にはヘラクレイデスが太陽中心の地動説を唱えていたが、正論とはならなかった。

1543年のコペルニクスの地動説以降、チコ・ブラーエは精力的な天体観測を行ったが、その後ガリレオが近代天文学の創始者として決定的な役割を担った。それは1609年にオランダの望遠鏡を知り、自ら組み立てて天体を観測したことによる。望遠鏡で見た天体はこれまでの常識を破る多くの情報をもたらしたからである。ガリレオは月の表面を詳細に観測し、木星の4つの衛星を発見、太陽の黒点を観測し、それが太陽の表面に存在していることを認識した。これらの観測結果を1610年にまとめた「星界の報告」で、始めてコペルニクスの地動説を明確に擁護した。一方ケプラーは1609年、チコ・ブラーエの詳細な火星の観測結果を解析し、惑星が楕円軌道を描いているとの結論に達した。それはプラトン以来2000年に涉って円軌道だとされてきた惑星の軌道を初めて修正したことになる。ケプラーの法則は太陽と惑星の描く線分の面積速度が一定であることを示したが、さらに1619年、公転周期の二乗が軌道の半長径の3乗に比例するというケプラーの第3法則に到達し、地動説モデルでより正確に惑星の運動を記述できるようになった。アイザック・ニュートンは1687年、重力の発見と運動の法則をこのケプラーの法則と組み合わせて、万有引力の法則に到達した。コペルニクス以来、約150年のスパンでニュートン力学のパラダイムが完成したことになる。その後、ニュートン力学は、マイケルソン・モーリーの実験をきっかけに、アインシュタインによる相対性理論に進化した。それに伴い天文学は相対性理論をトリガーとして新しい展開を示し、ブラックホールの存在、ビッグバンとその背景輻射、インフレーション宇宙など、近代天文学のパラダイムへと進化した。相対性理論はさらに次なるパラダイム：ひも理論に始まった統一理論へとパラダイムシフトし、今日に至っている。

一方、ニュートンは光に強い関心を示し、1666年、プリズムによって初めて光のスペクトルを観測、1678年、光が粒子であると考え、ホイヘンスの波動説と対峙した。マクスウェルは1864年、光は電磁波の一種であることを予測、1888年ヘルツにより電磁波が確認された。さらにアインシュタインにより光は光子として量子化されて扱われることとなった。その後電磁波は電波として実用化され、無線電信、ラジオ、テレビとして、今日なくてはならないものとなった。また、光通信が今日の情報化社会の動脈となり、大きな貢献をしていることを改めて認識したい。

ガリレオは天文学に新しい転機を築いたが、慣性の法則の発見者でもあり、理論的な考察を実験で検証してみせて、力学を根底から改革した。1638年の「新科学対話」ではさらに真空の合理性を認めていた。鉱山でのポンプが10m以上で機能しないのは水自身の重さによって水柱が切れるからだと説明した。これを受けて弟子のトリチェリはガリレオの死の翌年、1643年に有名な真空実験を行って、真空の存在を始めて証明した。パスカルはこの報告を受けて、1648年、大気こそが水銀柱を支える唯一の原因であることを指摘した。マグデブルグ市長のゲーリケはトリチェリと全く違った方法：真空ポンプを作ることにより成功、マグデブルグの半球実験を行うとともに、実験を行って真空の各種の特性を明らかにした。ボイルはゲーリケの実験を知って、フックとともに真空ポンプを試作、ゲーリケの実験を追試、ボイルの法則を生み出すことになる。パパンはボイルと共同研究をするとともに、フックの助手となり、圧力鍋を発明した。パパンはさらに蒸気機関の研究を始めたが、実用化には至らなかった。その後、この流れはセイバリー、ニューコメンの蒸気機関の開発へとつながり、さらに1765年ワットの蒸気機関の発明へと推移、1783年の複動式蒸気機関でようやく100年のタイムスパンで蒸気機関パラダイムの完成を見たのである。ワットの蒸気機関は、1709年、デーヴィの高炉の発明以降の製鉄技術の発展、1701年の旋盤の発明に端を発する工作機械のパラダイムに支えられ成功したといえる。一方、蒸気機関は製鉄のふいご動力として採用され、紡績機械の駆動方式として紡績工業発展の原動力となった。また、1804年にはトレビスニックが蒸気機関車を発明、1825年には鉄道が敷設され、馬車に代わって近代工業化社会の最初の交通機関となった。また、帆船に代わり蒸気船が海上交通を支えた。さらに内燃機関が発明され、ガソリンエンジンが自動車に、ジェットエンジンが航空機の推進機関として発展した。

一方、ゲーリケは1660年に放電実験を行うなど多才な片鱗を見せ、後にフランクリンの実験につながった。電気の知識は1800年のヴォルタの電堆の発明に端を発し、電気に関するパラダイムが展開した。そこでは電磁気学が誕生するとともに、発電機による電力産業が発展、また電磁石の発明から電信技術が通信分野で大きな役割を果たすこととなった。一方、ゲーリケの作成した真空ポンプから、ガイスター管、陰極線を経て、真空管にたどり着く。それはラジオの検波器として機能するとともに、計算機の心臓部として活躍、1948年のトランジスターの発明に端を発した集積回路は今日の情報化社会の中

核を担っている。

ここでもう一つ付け加えるならば、エネルギーの系統進化が木炭の時代から、石炭、石油、電力、原子力と多様な発展を遂げてきたことがある。

3. 化学系ドメインの系統進化

化学の進化過程は非常に明快な系統として記述できる。それはラヴォアジエが化学反応を明確に捕らえ、質量保存の法則で化学原論を記述したことに始まる。化合物の同定とその合成が可能となったため、各種の化学産業が一斉に立ち上がった。また、原子の認識は一方で素粒子論へと発展し、クオークの発見からひも理論を出発点とする統一理論へと展開した。

全ての元素が火、土、水、空気よりなるとするギリシャ時代のエンペドクレスの4元素説が18世紀に至るまで信じられてきた。物理系がコペルニクスにその端緒を見出したのと同じ頃、アグリコラが1556年に「デレメタリカ」をまとめた。それは鉱山の採鉱技術の詳細を記述したもので、鉱山学としての最初の学問の発端ともなった。1597年リバウは中世の錬金術をまとめた「アルケミア」を刊行、化学の教科書としても価値のある内容で、18世紀の近代化学誕生の下地となった。1803年ドイツのシュタールは酸化反応を燃素フロギストンの脱離で説明しようとしたが、酸化反応が酸素の付加であるのと逆の考えであった。ラヴォアジエは1774年、 Priestriの酸素の情報をもとに水銀の酸化反応を検証し、酸素による酸化反応をはじめて化学量論的に解明、質量保存の法則(1775)に到達した。これが近代化学の出発点となり、1789年「化学原論」が出版された。ドルトンが1803年原子論を提案、原子量概念をまとめた。1860年、カールスルーエの化学会議で、アヴォガドロの法則を認めることで、統一的な化学概念が確立した。1789年、メンデレーフの周期律表がまとめられ、元素系の体系的な認識が確立した。この間、基礎化学のパラダイムは約100年のタイムスパンを持つことになる。

化学概念が確立し、化合物の同定とその合成法が開発されるようになって、各種の化学工業は同時並行的に展開を始め、戦前までに主要な化学工業が逐次構築されて行った。1828年、ヴェーラーが無機化合物から有機物の尿素の合成に成功し、有機と無機の境界がなくなり、統一的な化学概念が確立した。最初は天然物の化学処理として、ゴムの加硫(1832)やセルロースの化学処理による化学繊維(1845)が開発された。1856年ベッセマーは鉄の炭素含量を調節して鋼鉄を直接得る方法を開発、さらに不純物のリンを除去することで鋼の製造法が確立した。1856年のもう一つの画期的な成果は合成染料の開発に成功したことである。天然染料は非常に高価であったから、その成功は大きな反響を呼び、合成染料の工業化は多くのベンチャービジネスの台頭とともに発展した。今日の巨大な化学会社、バイエル、ヘキスト、BASFなどはこのときのベンチャービジネスとして誕生したものである。少し遅れて化学療法剤の工業化も進み、今日の医薬産業へと発展した。農薬の黎明期には1867年硫酸鉛がジャガイモの甲虫防除剤としての効果が発見され、また1868年ごろ果樹のカビ防止剤として硫酸銅・硫酸鉄混合物が検討され、ボルドー液として実用化された。しかし、本格的な農薬は1938年のDDT、42年のBHCなどを契機に積極的な開発時代に入った。合成高分子は有機化合物の合成が先行したため、合成されたモノマーがたまたま重合した結果得られた。これらは1880年前後のことであり、ビニール重合、縮合重合、イソプレンの重合などが見出されている。高分子の認識は、このような経緯を経て、20世紀に入ってから確立した。シュタウディンガーは1917年にゴムの長鎖構造式を発表、1920年に高分子長鎖構造説を提唱、1930年になって高分子の基本概念を確立した。同時にナイロンやポリエチレンなど、各種の汎用高分子が開発され、戦後の石油化学の工業化とともに合成樹脂、合成繊維、合成ゴムの全盛期を迎えた。

無機化合物は昔から伝統的な製法が受け継がれてきた。1597年リバウの「アルケミア」には塩酸、硫酸、王水の製法が記載されている。1661年ボイルの「疑い深い化学者」は錬金術に対する懐疑的な姿勢がにじみ出ている、化学元素を実験によって探り出そうとする。こういった背景の中で無機化合物はラヴォアジエによる基礎化学の確立を待たずに進展していた。1746年には鉛室法による硫酸の製造が開発され、1789年にはルブラン法によるソーダ製法が工業化され、1861年のソルベー法まで世界の市場を制覇してきた。無機化学で大きなイノベーションは1913年、ハーバー・ボッシュによるアンモニア合成の工業化であろう。この技術がなかったならば世界の人口の半分しか養えないとされる。1800年のヴォルタの電堆の発明に端を発し、電気化学工業が進展した。また戦後になってセラミックスの精密合成が進展し、ファインセラミックスの時代が開花した。

これらの化学ドメインの系統進化の動向から最近注目されているハイテク技術としてナノレベルでの開発がある。ナノポーラス触媒、カーボンナノチューブ、フラーレンなどが注目され、高分子も精密重合に大きな期待がある。しかし、これらは汎用製品の一部を置き換える役割と考えるべきであろう。

4. 生物系ドメインの系統進化

生物系ドメインは 1590 年、ヤンセンによる顕微鏡の発明に大きく触発されて発展してきた。1665 年レーヴェンフックは顕微鏡で池の水を観察し、76 年に微生物を発見、1683 年にはその微生物よりもさらに微細なバクテリアの存在を知った。天文学が望遠鏡の発明によって飛躍的な発展を遂げたように、生物学では顕微鏡がその後の発展に大きな役割を果たしたのである。

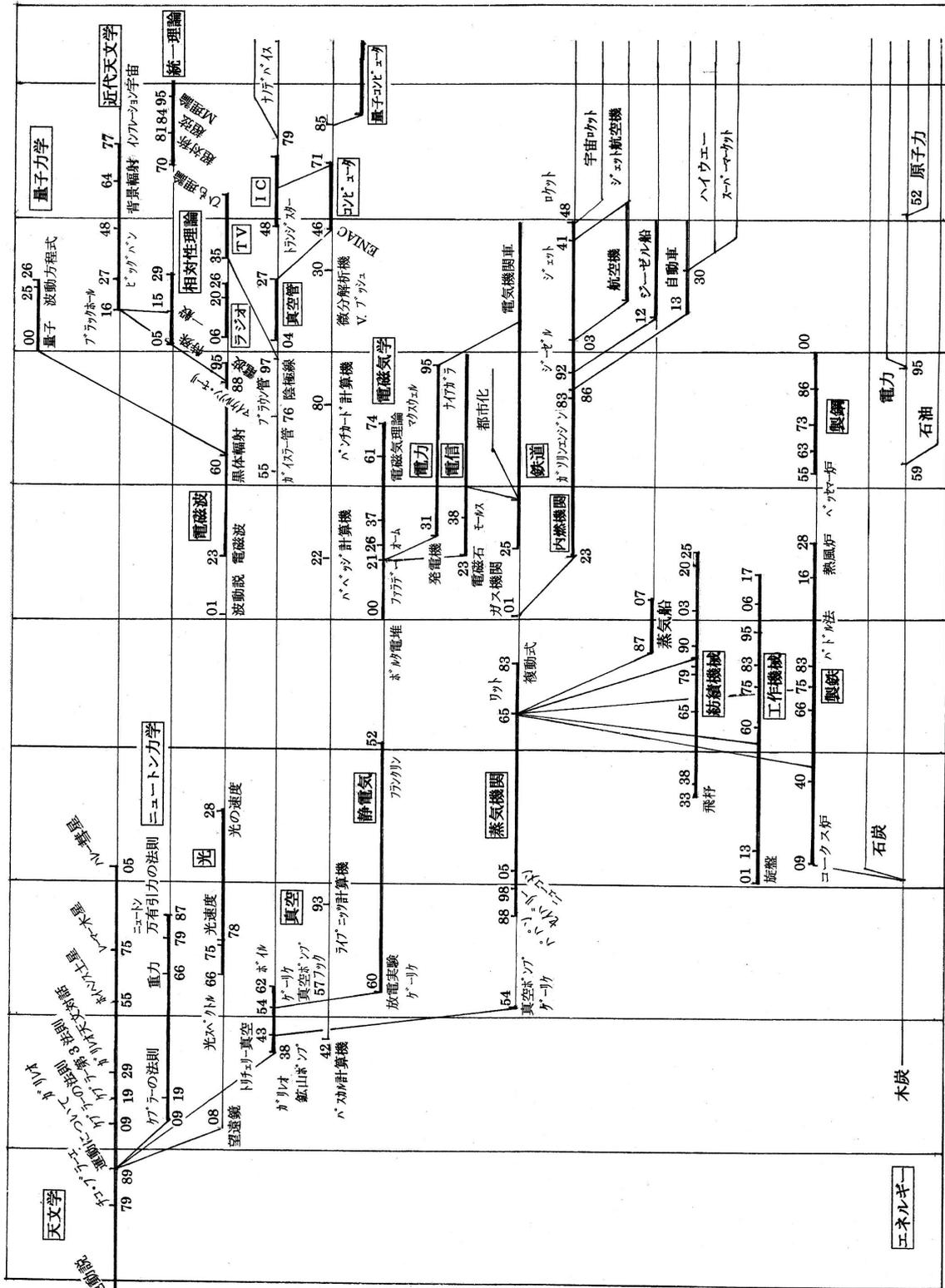
1668 年、イタリアの医者レーディは生物は自然発生するものでないことを、蠅の発生について実験的に検証した。1759 年、ドイツの生理学者ヴォルフは分化した個々の器官は生体組織から発生したものであることを示し、生物の発生学の創始者とされている。1779 年、スパランツァーニは受精の機作を認知した。19 世紀になって生物の組織に対する認識が深まってきた。ロバート・フックが顕微鏡でコルクの細胞を発見したのに刺激されて、生体組織の細胞を観察するようになった。ブラウンは 1831 年細胞の中に核が存在することを見出し、1838 年にはシュライデンが生きた植物組織はすべて細胞からできていることを発表、翌年シュヴァンが動物でも同様であることを指摘した。特に細胞核が再生に重要な役割を果たしていると考えたが、解明には至らなかった。1846 年、モールは植物細胞の原形質を初めて確認した。ネーグリは細胞分裂を明らかにし、細胞説を修正した。1882 年、フレミングは細胞分裂の機構を明らかにし、翌年ファン・ベネーデンは細胞内の染色体は種によって一定であり、生殖細胞の形成においては減数分裂が起こることを知った。1838 年、デュラテュールは酵母を発見、1839 年、パスツールは病原体が微生物であることを認識し、細菌学の端緒を開いた。生体の分子生物学的解析ができるようになって、生物学は分子レベルでの解明が進んだ。

生物の進化についての認識は 1749 年のビュフォンの「博物誌」に遡る。彼は進化を退化の現象として捉え、その考えは誤っていたが、進化の問題を初めて述べたことで注目される。19 世紀になって、生物は進化を遂げて今日に至っているとの認識が生まれていたが、明確な解明には至らなかった。その中でラマルクは 1809 年に「動物哲学」で進化の問題を論じ、獲得形質の遺伝が進化の本質であるとした。しかし、この考えは後に否定される。ダーウィンは進化を駆動するものが何かを考え、それが自然選択による淘汰であるとの考えに到達した。慎重な彼は多くの証拠を集め、長年の歳月を費やして原稿をまとめていた。ウオーレスは 1854 年生物地理に関するウオーレス線を発見、1958 年、自然淘汰による進化の考えをまとめダーウィンに送った。ダーウィンはこれにショックを受け、それぞれの論文をまとめて出版するとともに、自身の考えをまとめて 1859 年「種の起源」を出版した。このダーウィンの進化論は今日まで大きな貢献をした。しかしさらに、DNA が遺伝子の本質であることが判ってから、DNA レベルでの進化論が進展し、中立説、断続平衡説、共生説などが提案され、進化論は大きく変わった。

1873 年、シュナイダーは細胞分裂で現れる染色体を発見、フレミングは 1882 年、細胞分裂の機構を解明、v. ベネーデンは 1883 年、減数分裂を見出した。1900 年、ド・フリースは、遺伝の法則を見出したが、それは 1865 年のメンデルの遺伝の法則の再発見であった。彼は其中で突然変異を発見した。1909 年、モルガンは染色体が遺伝と密接な関係があることを見出し、その仕組みを解明、染色体上の遺伝単位は遺伝子と呼ばれることとなった。染色体が DNA 分子を含む蛋白質であることが判っていたが、1944 年、アヴェリーは DNA が遺伝子の本質であることを初めて確認した。これを契機に DNA をめぐる研究が急速に進展、二重らせん構造が明らかとなり、コーエン・ボイヤーが 1973 年遺伝子の組み換えに成功、バイオテクノロジーのパラダイムが出来上がった。1981 年ゲノム自動解析についての和田昭允の提案を契機として、ゲノム解読が進み、2004 年に 33 億塩基対のヒトゲノムの解読が完了、ポストゲノム、蛋白質工学の時代に入った。また生物発生メカニズムが解明され、1957 年のセンダイウイルスによる細胞融合の成功以来、クローン技術の研究が進展した。1981 年、胚性幹細胞が発見され、細胞の分化についての技術が進展、自分の多能性幹細胞から目的とする組織を創出することの可能性が見えてきた。特に 2007 年、中山による *i*-PS 細胞の発見は画期的なことで、再生工学のパラダイムが大きく前進した。

5. まとめ

科学技術の 3 つのドメインの系統進化図を次ページに示す。これらの経過を見ると、すでに主要な進化は最終段階に入り、分岐、細分化が進んでいることを示している。すなわち、18 世紀の後半から進展を始めた近代科学技術が 21 世紀半ばまでの 300 年のスパンで成熟しようとしている。数々のイノベーションの重畳で形成されてきた工業化社会は成熟しつつあり、これからは経済に大きな付加価値を与える新しい基幹イノベーションは多くを期待できないことを示唆する。同時に BRICs の台頭で世界は急速に狭まり、資源・エネルギーの供給不安が加速、環境問題が前面に浮かび上がってきた。これからはこれらに対処するイノベーションに期待しなければならない時代といえる。



イノベーションシステム進化図 (1) 物理系ドメイン

ITTECS 弘岡正明 2000

