産業革命と数学

佐野茂*

2007年10月28日

1 はじめに

科学技術の歴史において，自然現象を統一的に理解するために数学が使われ天文学，物理学，機械工学などの科学技術が発達してきたと説明されてきた．また，数学もそうした科学技術から刺激を受けて発達してきたことも明らかにされてきた．

ところが，日本の江戸時代の和算は科学技術とは結びつかずに，家元から伝承されるような芸事として発展してきたのが西洋とは異なると杉浦光夫先生により以前から指摘されていた．そこで，本稿では江戸時代（1603-1867）の和算とその時代に西洋で数理科学が基礎付けられ，さらにイギリスから始まった産業革命により数理科学が発展する歴史を比較しながら考察してみたい．

比較数学史でも江戸時代における日本の数学と西洋の数学とは対比され研究されてきたが，純粋数学が研究対象となっていた ([Mu])．そのため，科学技術との結びつきについての考察はほとんどなされてこなかった．

2 江戸時期に生まれ，産業革命で発達した数理解析

ここでは江戸時期（1603-1867）の西洋において，科学技術が数学と結びついて発達していく過程を追ってみよう．

16世紀にコペルニクスにより提唱された地動説は受け入れられなかったが，1600年代に入りケプラーにより天体観測を通してケプラーの第1，第2，第3法則が発見されている．さらに，ガリレオによって太陽の黒点が観測され，太陽も自転していることが明らかにされた．二人はコペルニクスの地動説を支持し，数学を用いて観測結果を分析して奥に潜む統一的な法則を明らかにしようとしたのである．こうした自然科学的分析方法をデカルトは方法序説を著して説き，さらに物体は抵抗がない限り直線運動をするという慣性の法則も見つけている．

そしてニュートン（S.I.Newton,1642-1727）は微積分学を基本定理を含めた形で創造し，プリンキピア（自然哲学の数理的原理）を著して自然科学へ微積分を応用している．天文学では万有引力の法則を発見し，ケプラーやガリレオらの結果を統一的に解き明かしている．そして，デカルトの慣性の法則も発展させて，運動する物体の運動法則として統一的に扱っている．さらに彼は振動，音響，潮の干満を分析している．こうした微積分を基礎として分析するという科学的指針は19世紀の末まで大きく影響を与えている．

またライプニッツ（G.W.Leibniz,1646-1716）により微分積分学の記号法が編み出され，テイラー

*北海道職業能力開発大学校，小樽市銭函 ssano@uitec.ac.jp

によりべき級数展開も与えられている．こうして微分積分は科学技術へ自在に応用可能なまでに完成した頃から，産業革命が起こってくる．

1750 年から 1850 年にかけてのイギリスにおける産業革命では，鉄の製錬技術とその加工技術（鋳造，ネジ切り旋盤，曲げ加工等）により鉄製の機械による生産が可能になる．アークライトの紡績機械や鉄橋などが生まれている．また水力や動物の力に代わって，ワットらの蒸気機関による動力革命がおこる．その頃オイラーとベルヌイとは振動や振り子などさまざまな運動方程式を議論している．例えば板の縦方向の振動の方程式

$$K^4 \frac{d^4 y}{dx^4} = y \tag{1}$$

を 1734 年に考えている（[Eu]）．1800 年代に入り，産業革命はフランスやベルギーなどヨーロッパ大陸に広がっていった．

動力革命では精度の高い加工技術と効率のよい力の伝達が要求され，解析力学が発達している．また効率的な蒸気機関の開発から，熱現象の研究が進んだ．フランスのカルノーは蒸気機関の効率を理論的に考察して，1824 年に「火の動力，熱機関についての考察」を著し，蒸気機関の設計だけでなく熱力学という新しい学問の基礎となる内容を論じている．

電磁気の方は 1820 年にデンマークのエルステッド（A.C.Oersted,1777-1851）が電流の流れる導線に磁石を近づけると磁針が回転することを発見している，この話を聞いたアンペール（A.M.Ampére, 1775-1836）は電流間に作用する力をさっそく調べて，平行電流間に作用する力を発見している．またビオやサバールらにより各地で現象の基礎的な研究がなされた．

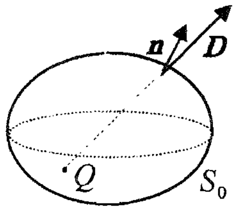
理論形成に大きく貢献したのは高名なガウス（J.C.F.Gauss,1777-1855）である．これらの電束や磁界に対して，自分が体系化した曲面論もとに，現象の本質をとらえ曲面上の積分まで考えて公式化している．

ガウスの電束の公式

$$\int_{S_0} D_n dS = Q \tag{2}$$

ガウスの磁界の公式

$$\int_{S_0} B_n dS = 0 \tag{3}$$



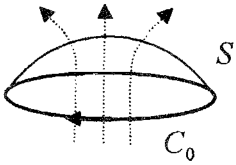
エルステッドの実験はイギリスにも伝わりイギリス王立協会のファラデー (M.Faraday,1791-1867) は優れた構想により実験を行い 1831 年に電磁誘導を発見している．これは空中の磁界を金属が横切ると電気が発生する現象である．こうした多くの実験や考察によって得られた電磁気現象はイギリスのマックスウェル（J.C.Maxwell,1831-1879）により集大成された．これを読んだヘビサイド（O.Heaviside,1850-1925）は非常に驚き，何年もかけてベクトル解析を用いて整理したのが現在教科書に載っている理論である．

アンペール・マックスウェルの公式

$$\int_{C_0} \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{s} = I + \int_S \frac{\partial D_n}{\partial t} dS \tag{4}$$

ファラデーの公式

$$\int_{C_0} \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{s} = -\int_S \frac{\partial B_n}{\partial t} dS \tag{5}$$



そしてマックスウェルは電場と磁場の変化による横波が電磁波で，光は波長の短い電磁波だと1864年に予想した．この予想は1886年にヘルツにより実験で確かめられ，1894年のマルコーニによる通信技術へとつながっていった．さらに，1897年にはトムソンにより，熱したフィラメントから放出される荷電粒子として，電子の概念が確立していく．

このように微積分は時代の要請からベクトル解析へと発展し電磁気現象を統一的に記述できるようになっただけでなく，新たな現象も予想できるまでに理論は深まったのが理解できる．

3 江戸時代の和算

ヨーロッパにおける技術革新の時代に，日本は江戸時代で鎖国をしていて，こうした洋算（数理科学）に対して日本独自の和算が発展している．

1627年（寛永4年）吉田光由が著した塵劫記（じんこうき）には九九やそろばんの使い方といった実用数学だけでなく，ねずみ算や継子立てなどの遊戯的算術も楽しい図入りで掲載されていて算数の標準的教科書として江戸時代を通して用いられた．また，塵劫記の巻末には問題を提起しているが，つぎの人が自著でこれを解いてまた別の問題を提起していくという遺題継承という習慣をつくり和算の発展に寄与した．

佐藤正興は天元術と呼ばれる算木を使って高次方程式を表す方法を用いて，当時そろばんでは解けなかった問題を解いている．そして1669年に佐藤正興は天元術の解説書「算法根源記」を著して，遺題を出している．沢口一之は天元術を発展させこれらの問題を解き，1671年に「古今三法記」を著して遺題を出している．天元術では算木とそろばんを使って問題を解くが，2元方程式はそろばんで表すためこれを1元化する必要があったし，また未知数の係数が非整数のときには暗算で処理する必要もあった．こうした天元術では解きにくい問題を「古今三法記」では遺題としていた．

関孝和（1642-1708）は，算木を用いないで，新しい演算記号を入れて道筋を紙に書いて最後の結果までを導く演段術を考案して「古今三法記」の遺題15問を解いた．関孝和はこの方法により，行列式論，方程式論，角術，円理を確立していった．また，関孝和は無限小の概念はもっていたが，無限小の比までは考えつかなかったため微分の概念には到達できなかった．

こうした研究は徳川将軍の庇護の下に建部賢弘（1664-1739）により受け継がれていった．1722年の「綴術算経（てつじゅつさんけい）」では，理論的考察や数値計算により帰納的に問題の解を探り当てる方法論を述べている．西洋の数学の影響を受けずに独立に与えているのである．この本には2^8角形を用いて円周率πの近似値を40桁余りまで求めている．また，$(\arcsin x)^2$のxによるベキ級数展開式

$$\frac{1}{2}(\arcsin x)^2 = \frac{x^2}{2!} + \frac{2^2}{4!}x^4 + \frac{2^2\cdot 4^2}{6!}x^6 + \frac{2^2\cdot 4^2\cdot 6^2}{8!}x^8 + \cdots \tag{6}$$

も掲載されているが，この公式はオイラーがベルヌイに 1737 年に送った書簡に初めて現れており，建部賢弘は 15 年も前に導いていたことになる ([NS]).

松永良弼（1692-1744）はこうした結果を発展させて，1739 年に「方円算経」を著している．久留島義太（1705 前後-1757）も独創的な和算家であった．和算もこの頃までが多産な時代で，その後は理論の目覚しい発展はなかった．そこで，江戸を前半と後半とに分けてみるのが自然であろう([Sa])．

江戸前半期（1600 年初頭-1730 年代）において和算は，暦学や測量に用いられている．行政にも重要なものになっており，その要求に和算家達も貢献しようと努力している．和算家達の意識も専門技能者という高いプライドをもっていて，多くの独自の理論が開花している．伝授の仕方も家元が免許を与えていく免許制度になっている．

江戸後半期（1730 年代-1860 年代）においては，いくつもの流派が生まれ，趣味としての和算も盛んになる．文化・文政以降文化の大衆化が進み，上は大名から豪商そして農民までが趣味として和算を楽しんでいる．算術の修行で各地を訪問して，寺院に奉納された算額を調べたり，和算を教えたり和算家と交流するのも流行っている．この時期には各地で和算に数百人も携わったりしているが，西洋のように和算は科学技術と結びついて発展していない．

4　和算と科学技術

それでは日本ではなぜ和算が科学技術と結びついて発展しなかったのだろうか．まず，当時日本は農業国で科学技術は理論を必要とする水準でなかったと言える．科学技術が数学を必要とするレベルまで到達していなかったのである，そのため数学が科学技術の基礎となるという認識もなかった．それではいくつかポイントを押さえながら考えてみよう．

（1） 和算を測量や暦などに使う発想はあった．

租税，築城，日暦など社会生活と結びつきそれがまた和算の発展を促す面はあった．1697 年に関孝和は白道，赤道に関する天球上の位置を示す「四余算法」を著し，天文学に強い興味があったことが分かる．享保 (1716) に入り将軍吉宗の庇護をうけて，建部賢弘は数学の応用面でも能力を発揮している．1719 年に日本総図の製作を命ぜられ 4 年後に「日本輿地図」完成させている．また 1726 年に中国より暦算全書が伝わり，吉宗はその訓訳を建部賢弘に命じている．建部の弟子中根元圭が 1733 年に完成させて，西洋の天文数学が知られるようになる．また和算を用いて精巧な水車が作られたりしたが，それ以上科学技術と結びついて発展することはなかった．

例えば，平賀源内（1728-1780）は静電気を起こす「エレキテル」で有名であるが，これは故障していたオランダ製のものを修復した装置である．源内は原理については理解していなかったと伝えられている，また気球や電気についても研究しているが実用化には至らなかった．江戸時代は電気現象を統一的に説明するために数学を使うレベルにはなかったと言える．

（2）時間に関する習慣の違い

動力革命では動きを正確に捉えて，機械により駆動させる必要があった．こうした，一瞬の変化の状態を分析する思考が西欧にあるのを強く感じる．それに対して，日本では和時計も自然に合わせて時刻が変わるなど穏やかな時間の意識をもっている．そのため微分の概念が和算からは生まれなかったのかもしれない．

（3）時計のメカニズム

大航海時代に海難事故を防ぐため，イギリスでは船の位置を知ることが切実な問題となっていた．緯度は星を観測することにより求めることができたが，経度は星の観測からはどうしても求め

ることができなかった．しかし，船上とグリニッジ天文台との時間の違いを知れば，グリニッジ天文台との経度の差が計算できることが明らかにされたのである．けれども当時の時計は振り子時計のため，船上では使い物にならなかった．そこで震動しても狂わない時計の開発がニュートンらにより試みられたが，正確に時を刻む機械式の時計の製作に成功したのはヨークシャーのハリソンである．

イギリスではこうした時計の技術を生かして，紡績機械の開発を行っている．アークライトは時計技師を雇い，糸車を使って糸を作る工程を機械化している．まず，綿の繊維を伸ばし，それに撚りを掛けて巻き取るという一連の手の動きを捉え，時計の駆動メカニズムを利用してその動きを機械化しているのである．

ところが，日本では田中久重が時計のメカニズムを利用して，茶運び人形や弓射り童子などのカラクリ人形を作っている．さらに万年時計自鳴鐘を作成している．こうした，時計のメカニズムの生かし方の違いも興味深い．

（4）西洋数学の輸入

マリオ・リッチと徐光啓の「幾何学原本」は中国で1607年に翻訳された最初の西洋数学書であるが，この本は日本に輸入されても和算家達には大きな影響を与えていない．それはユークリッド幾何における論証の重要性を和算家達は理解しないで，描かれた図形から和算の方がレベルが高いと思ったからのようだ．その後，寛永の禁書令（1630）により長年に渡って洋書の輸入が禁止されてしまう．しかし，吉宗は中根元圭の進言により，寛永の禁書令を緩めて中国で出版されたイエズス会士が記述した西洋科学書の輸入を許可している（1720）．

最初のものは1723年に刊行された清の数学者梅文鼎の著作した「暦算全書」で，3年後の1726年には輸入されている．翌1727年には137巻にもおよぶ大叢書「崇禎暦書」が輸入され，三角関数表が初めて伝来される．また中国での洋書の訳書も輸入されるようになった．

（5）まとめと課題

江戸時期の西洋での数理解析は，ニュートンの微積分を用いて自然現象を分析するという革命的な方法に始まり，産業革命に刺激されて発展しているが，一カ国だけでは無理で多くの国が成果を共有する必要があった．ヨーロッパでは各国が地理的に近いだけでなく共にアルファベットを用いるなど意思疎通が容易で，互いに刺激しあいながら発展している．ところがアジアでは国を隔てる言葉の壁も高く，植民地となっていた国も多かった．また中国の清王朝から産業革命が起こることもなく，アジア諸国が互いに刺激しあいながら発展する状態ではなかったと言える．

西洋では文化や科学技術の交流から数学の記号も発展して，方程式の変形や因数分解も自由に行うことが出来た．ところが和算では記号の整備がなされておらず因数分解などの式の変形が自由でなかったし，ライプニッツによる微積分の記号も明治維新を迎えるまで普及しなかった．また，デカルトらの提唱する数学を用いて分析するという科学的な考え方が基礎になかったのも，和算が科学技術と結びつかなかった理由の一つかもしれない．

近年，若者の理工離れが問題になっている．また，科学的な考え方が身についていないことも明らかになった．そこで文部科学省により教育改革がなされ，ゆとり教育という方向付けと生きる力をつけるために総合学習が導入された．そうした努力にもかかわらず，国際比較のデータでは科学的な考え方がまだまだ身についていない．

江戸時期における西洋でのニュートンによる微積分を用いて自然現象を分析するという数理的な指導原理やそれに続く産業革命での数理科学の飛躍的な発展の内容は日本語訳され伝えられているし，すでにこれらの科学技術は高校から大学での基礎教育科目としてある．しかしその時代の自然現象の本質に迫ろうして実験を考えとことん分析する迫力，試行錯誤の苦悩，そして発見した喜びなど背景にある躍動感が若者へとうまく伝えきれていないのも原因の一つと言えよう．

また高校から大学での科学技術教育では実験と理論とが系統的に関連付けられていないし，科学技術史は全体の歴史の中で小さく扱われている．高校では数学，理科，社会などを有機的に関連付けて教えていない．こうした事は数理科学の歴史を振り返ると見えてくる．明治以降に国を挙げて西洋に追いつこうと励んできたが，江戸時代に鎖国をしていた負の影響はまだまだ癒されていないのではないだろうか．

参考文献

[Eu] Leonhardi Euleri, Opera Omnia Mathmatica v.11-2.

[Ga] G.F.Gauss, Werke band XI.1.

[Mu] 村田全，日本の数学　西洋の数学，中央公論社，1981.

[NG] 日本学士院，明治前日本数学史全５巻，岩波書店，1960.

[NS] 日本の数学 100 年史編集委員会，日本の数学 100 年史，岩波書店，1983.

[Sa] 佐藤賢一，近世日本数学史，東京大学出版，2005.

[SO] 佐藤賢一，大竹茂雄 他，和算史年表，東洋書店，2002.

[Si] 城阪俊吉，科学技術史，日刊工業新聞，1978.

[Su] 砂川重信，電磁気学，培風館，1988.

数理科学年表

	西洋の数理科学	日本の数理科学（和算）
1600	1609 ケプラー「新天文学」を著す 1613 ガリレオ「太陽黒点論」を著す 1632 ローマ教皇は地動論を禁止していたが、ガリレオは「天文対話」を著す 1637 デカルト「方法序説（屈折光学・気象学・幾何学)」を著す	1607 訳書「幾何学原本」が中国で刊行され、以後日本にも輸入される 1622 毛利重能「割算書」を著す 1627 吉田光由「塵劫記」3巻本を刊行、実生活に即した算術で広く庶民に普及 1639 鎖国令発令
1650	1671 ニュートンの微積分法の確立 1684 ライプニッツ微積分の発見 1687 ニュートンは「プリンキピア（自然哲学の数理的原理)」を著して運動法則、万有引力、抵抗を受けている物体の運動、振動、音響、潮汐の現象などを論じ科学技術の発展へ影響を与える	1671 沢口一之は天元術の解説書「古今三法記」を著す 1674 関孝和「発微算法」を著す 1683 関孝和は行列式の「解伏題之法」を著す 1685 関孝和「解隠題之法」、「開方翻変之法」を著す 1695 宮城清行「和漢算法」9巻を著す 1697 関孝和は白道、赤道に関する天球上の位置を示す「四余算法」を著す
1700	1715 テイラーは級数展開の定理を発表 1744 オイラーの光の波動説（色の違いを波長で説明) 1748 オイラーは関数概念を用いて「無限解析序説」を著す	1704 関孝和は「算法許状」を宮地新五郎に授ける 1710 関孝和、建部賢明、建部賢弘らは和算の全集「大成算経」を28年かけて編集する 1722 建部賢弘、数学の帰納的方法や円弧を級数展開で求めた「綴術算経」を著す 1723 建部賢弘は「日本輿地図」を作成する 1726 久留島義太は無理数の連分数展開を述べた「平方零約術」を著す 1739 松永良弼はπなどの級数展開を述べた「方円算経」を著す
1750	1758 オイラーはコマの回転運動を論じた「剛体の運動方程式」を著す 1785 クーロンによりクーロン法則の発見 1788 ラグランジュは力学に一般化座標を導入して「解析力学」を著す	1761 近藤遠里は天文、度量衡、数学の「数学夜話」を問答形式で著す 1769 有馬頼徸は関流の秘法を「拾璣算法」で公開 1776 平賀源内が摩擦発電機エレキテルを製作

1800	1820 エルステッドは公開実験を行い電気と磁気とが密接な関係があることを示し、フランスのビオやサバールそしてアンペールらに影響を与える 1821 コーシーの微積分の体系化をした「微積分教程」を著す 1824 カルノーは「火の動力、および熱機関の考察」を著す 1829 ガウスの線束定理の発見 1831 ファラデー電磁誘導の発見 1832 ガウスの磁界の絶対測定 1833 ファラデー電気分解の法則を発見 1849 キルヒホッフの電気回路網の法則の発見	1800 伊能忠敬は蝦夷地を測量する 1805 和田寧は極値を導く「円理極数術」を著す 1844 小出兼政は7桁の対数表「算法対数法」を著す
1850	1864 マックスウェルの電磁場理論の大成と電磁波存在の予想	1868 明治維新 1871 橋爪貫一は対数も含めた「洋算独学」を講義形式で著す 1872 学制発布、西洋数学を採用して和算を廃止