鉄鋼業における数学の活用

中川, 淳一
新日鐵住金株式会社

出版情報：COE Lecture Note. 46, pp.251-260, 2013-02-28. Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University

鉄鋼業における数学の活用

中川　淳一

新日鐵住金株式会社

1　はじめに

実世界で頻繁に問題となるのは、高炉プロセスの炉況不調や連続鋳造プロセスの品質欠陥等にみられるような定常状態から大きく乖離したときに発生すると考えられる異常状態である。これらプロセスの操業は、通常、このような異常状態を可能なかぎり回避するように管理されるので、異常状態が定常的に継続するようなことは稀で、我々が、異常状態の解析を行う際に眼にするのは、殆どのケースで、過渡的な遷移過程にあるデータである。

一方、プロセス内の現象を解析するために、熱収支、物質収支または運動量収支等に基づく偏微分方程式で現象を記述し、差分法や有限要素法等の数値解析手法を使って、コンピュータ上に現象を再現する、所謂数値シミュレーション解析がよく行われている。しかし、異常状態を引き起こす原因となる境界条件が、大抵の場合、不明であるため、既存の数値シミュレーションによって異常状態をコンピュータ上に再現することは、困難を極めているのが現状の実態である。

従って、このような問題に対処するには、①過渡的な遷移過程にある状態の普遍的な性質を見出し定量化する必要がある。すなわち、過渡的な遷移過程にあるデータから、異常状態を引き起こす際の法則性を見出す必要がある。これは、非定常状態の同定問題であり、自由度が大きく、かつ、瞬時の状態が問題となるような力学系に対し、システム固有の非線形法則性を見出すことである。これは、鉄鋼業だけでなく、他の材料、化学反応、生物反応等を扱う分野でも高い必要性を有していると考えられる。

また、解析対象となる現象が、溶鉄の熱流動状態の変化に関係している場合は、広範囲の 3 次元空間内の現象を扱う必要があるが、溶鉄が 1500 °C 以上の高温状態にあり、また、装置が巨大であるため、流束の直接計測が極めて困難である。従って、装置壁に埋設された熱電対による温度計測値のような限定された間接情報からの推定を余儀なくされている。従って、②熱電対による温度計測の時系列データに埋め込まれた系内の現象に関する情報を抽出する必要がある。これは、特定の数学条件を満たすような変換を施すことで、熱電対温度の時系列データのみから、もとの力学系（すなわち、解析対象の熱流動現象）と 1 対 1 に対応するような関数を再構成する問題である。また、一般的に、熱電対埋設位置と解析対象面が離れた位置にあるため、解析対象面の時間変化に対し、熱電対の計測信号は、装置壁材料の伝熱抵抗のため、時間的に減衰するという深刻な問題も有している。さらに、実世界のデータを扱う際に、ノイズ（システムノイズ＋観測ノイズ）の混入は不可避であり、実データの解析の際には、③ノイズに対する高い耐用性が、常に、求められている。

実世界で問題となる上述の課題解決のために、数学を活用し、現象のモデリング、所謂、数学モデルの作成を行う。一般的に、数学モデルとは、現象の本質を抽出し、数量化する作業の成果物であるが、そのプロセスには、2つの重要な工程を含んでいると考えている。ひとつは、解析対象となる現象から本質となる要素を抽出し、方程式等の形式で現象を記述する物理モデリングの工程であり、もうひとつは、物理モデルの解の特性を調べ、現実現象との対応関係を、或る論理構造 (Logical-Path) として記述する工程である。

物理モデリングの工程には、実現象の観察に基づく洞察力を発動し、解析対象となる事象と関係のない枝葉の部分を、時には経験をもとにした大胆な仮定をおいて、刈りとり、いかに現象を単純化して記述できるかが、重要なポイントになる。特に、企業の製造現場への数学モデルの適用を考える場合は、常に、精度の追求と開発工期という2つの相反する観点からの検討が求められ、微視的な精度を追求するあまり、必要以上に問題を複雑にして扱うことが、その後の工程（実現現象とモデル間の論理構造の記述）を含め完成した数学モデルの精度向上を、必ずしも約束するものではない。その意味で、物理モデリングの工程には、工学者や企業に所属する技術者・研究者の洞察力に負う所が多くあると考える。

次の論理構造 (Logical-Path) 導出の工程においては、物理モデルの解と現実の現象との対応関係を分析することになるが、解析対象とする現象が複雑になるにつれ、単に、偏微分方程式の解を求めるだけ、あるいは、物理モデルによる計算結果と実データとの相関を統計的手法で単純に分析するだけでは、対応できなくなるケースが少なくない。物理モデル自体が、現実現象にいくつかの仮定をおいて導出したものであり、物理モデルによる計算結果を、現実現象と完全に一致させる必要はない。むしろ、物理モデルは現実現象の仮想空間へのひとつの写像であると考え、物理モデルと現実現象との1対1の対応関係を、論理構造 (Logical-Path) として、記述することを指向すべきであると考える。ここに、現実現象の解析における数学活用の醍醐味があると思う。

以下に、鉄鋼業の代表的な設備である高炉を題材にして、数学活用の具体的な方法論を示す簡単な事例のひとつを紹介したい。

2　高炉の概要と操業異常

鉄鋼業の製鉄所のように巨大な設備で高温物質を扱う産業では、現場・現物という視点が重要である。例えば、製鉄所の高炉のなかで起きている現象は、非定常で非線形であり、また、多変量の操作因子を扱うため、ほとんどの場合で複雑である。しかし、1500 °C 以上の溶鉄を扱い、また、装置が巨大なために観測できる情報は極めて限定されている。例えば、高炉の場合、溶鉄の熱流動状態が、操業および品質に大きな影響を及ぼすと予想されているが、溶鉄の流速の直接計測が極めて困難であるため、煉瓦に埋設された熱電対の温度計測値のような間接情報からの推定を余儀なくされている。

そのため、我々は、一部の計測データのなかから、現象を支配する法則をいかに見出すかに重点をおき、計測データのなかに隠された現象の本質を解明する努力を日々行っている。

図1に、高炉内部断面の概念図を示す。高炉は、鉄鋼業のシンボル的な存在であり、高さが約 35 m、内径が約 15 m の巨大な反応容器である。高炉は、焼結鉱とコークスを化学反応させ

て、溶銑と呼ばれている銑鉄をとりだす工程である。ここで、焼結鉱とは、粉状の鉄鉱石と石灰石を約 1300 °C の高温で事前に焼き固めて、5 mm〜25 mm 程度の均一の塊にしたものである。一方、コークスとは、石炭を蒸し焼きしてできる、高純度の炭素の塊で、焼結鉱から鉄を取り出すための還元剤および熱源として使用する。高炉の上部から焼結鉱とコークスを交互に装入し、下部から約 1200 °C の高温空気を吹き込むと、炉内温度は 2000 °C 以上の高温状態になり、化学反応が促進され焼結鉱から鉄が還元・分離され、銑鉄はトピードカーと呼ばれる運搬容器に入れて、次の工程である製鋼工場に輸送される。また、焼結鉱に含まれるさまざまな不純物は、スラグとして取り出される。

図 1 に、高炉炉底の煉瓦に埋設された熱電対による温度計測データを示す。図 1 のグラフの中で、1 点鎖線で囲った時間帯が異常状態を示し、正常時の温度に対し、1.7 倍程度の高い温度値を示しており、この異常状態が 2 ヶ月以上継続している。図 1 の矢印で示したタイミングで休風を実施している。ここで、休風とは、高炉に高温空気を吹き込むことを止め、銑鉄の製造を 1 日程度休止する操作である。休風の本来の目的は、定期的な設備の保守・点検であるが、図 1 では、炉の温度を下げるため、非定期な休風を 5 回も実施している。大型の高炉では、一日に約 10000 トンの銑鉄を製造しており、休風の間は、銑鉄の製造が出来ないため、これらの非定期的な休風は大きなコスト損失になる。「何故、このような異常状態が突然発生するのか？ 正常状態から異常状態に移行する際の現象に内在する論理構造を、数学的に明らかにする。」ことが重要であり、以下に、その解析の一例を示す。

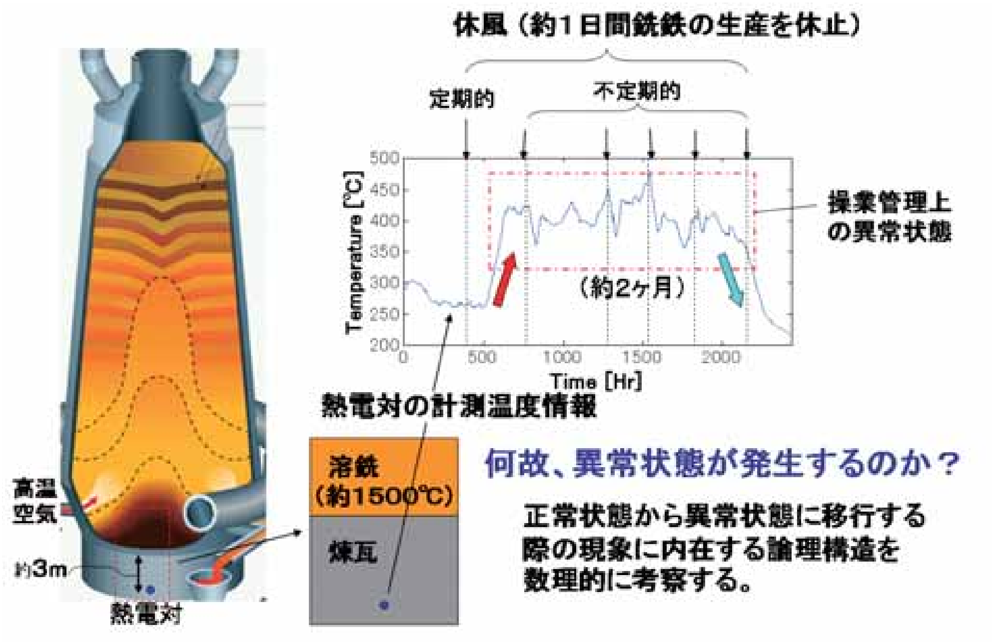

図 1：高炉における数学の課題設定

3　高炉煉瓦内部の伝熱現象の物理モデリング

図 2 は、図 1 の煉瓦断面図を拡大したものである。高炉は、炉底と呼ばれる約 15 m の内径の溶銑浴を囲むように 2 m〜3 m の大きさの煉瓦が積まれており、本来は 3 次元形状の解析対象物である。しかし、溶銑との接触面から煉瓦内部を熱伝導で移動する熱量は、溶銑との接触面に対し鉛直軸方向の熱伝導が、放射軸方向（水平方向）に対し圧倒的に大きいため、鉛直軸方向の 1 次元非定常熱伝導問題として、物理モデリングを行うことで、(1) 式に示すような簡単な偏微分方程式で、現象を記述できる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{1}$$

ここで、T は煉瓦の温度、t は時間、λ は煉瓦の熱伝導率、x は溶銑との接触面から鉛直軸方向の距離を表す。

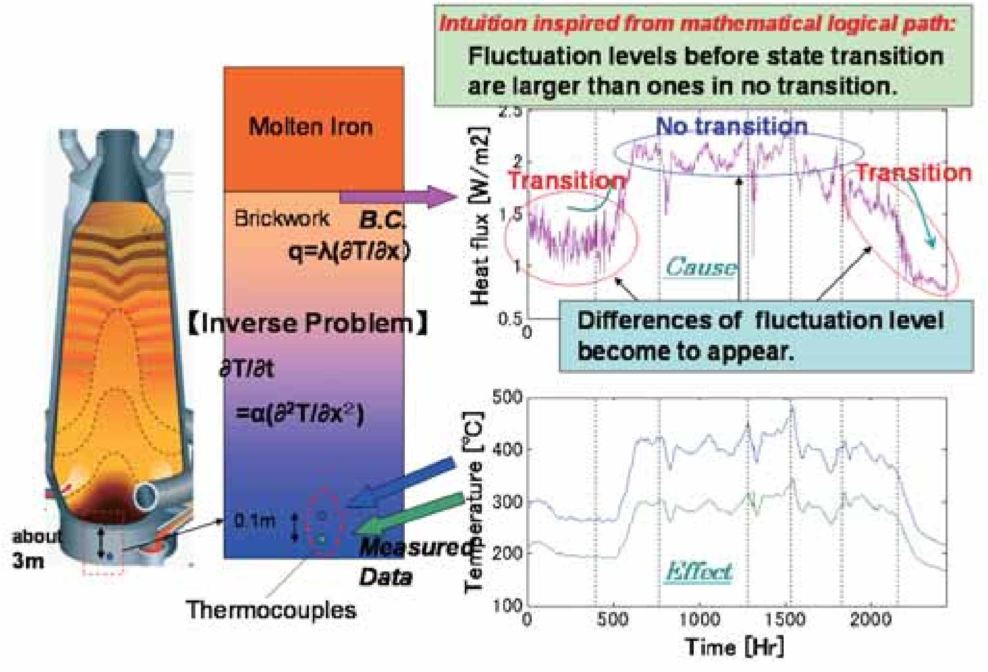

図 2：論理構造 1：原因系の物理量の再構成

4　論理構造の導出 1「原因系の物理量の再構成」

上述の式 (1) は、適切な初期条件と境界条件を設定すれば、簡単に解くことができる。しかし、高炉は、一旦稼動すると、12 年から 15 年の期間、昼夜に亘り連続して運転される。従っ

て、煉瓦も12年から15年間の長期間に亘り、交換せず連続して使用する必要があり、その間に、煉瓦の溶損が進行するので、炉内監視用として煉瓦に埋設される熱電対の位置は、溶銑との接触面に対し、2〜3 m程度、離れた位置に設置せざるを得ない。

これは、異常状態が発生したときに煉瓦内部の伝熱現象を解析する際に、式 (1) を得るために必要な初期条件、すなわち、煉瓦内部の初期温度分布の情報が得られないことを意味する。

その代替手段として、溶銑との接触面から2 m以上、離れた位置に設置された複数の熱電対温度の時間挙動から炉内状況を予測することが行われているが、溶銑との接触面と熱電対位置の間には、大きな伝熱抵抗が存在するため、熱電対による温度計測値には、炉内の動的な熱変化に対し、大きな熱伝導遅れが生じる。

従って、炉内の動的な挙動を熱電対で監視するためには、炉内の動的変化の結果である熱電対温度計測値から、その原因系を代表する物理量を推定する必要がある。これが、「原因系の物理量の再構成」という、ひとつの論理構造 (Logical-Path) であり、ここに、「逆問題」[1] という数学を適用する。具体的には、煉瓦の温度が、式 (1) の非定常熱伝導方程式で記述できると仮定し、煉瓦内部の複数の温度計測値が、式 (1) を満足するように、その境界条件である熱流束と初期温度分布を同時に決定する。ここでは、温度計測値が「結果」であり、熱流束推定値が「原因」となっており、逆問題という数学の適用により、因果関係を逆に遡ることが可能になる。

図2に、逆問題で推定した熱流束値を示す。ここで、注目したいのは、正常状態から異常状態、および、異常状態から正常状態に遷移する前および遷移中の熱流束値の変動が、状態遷移のない場合と比較して、大きくなっていることである。これは、もとの温度計測値の挙動を眺めているだけでは、気づくのは極めて困難であり、数学の適用により触発され、技術者の現象を診る眼が格段に向上することを示す格好の事例である。

5　論理構造の導出「時系列データに内在する法則性の導出」

次に、上記の熱流束変動の大きさの差異が、どのような法則にもとづいて起きているのかを考察する。これが、「時系列データに内在する法則性の導出」という、もうひとつの論理構造 (Logical-Path) である。

そのために使用するのが、時系列データからのアトラクタの再構成に関する数学理論であり、その手法の概要を図3に示す。これは、我々が実際に観測できる時系列データは限られているが、たった1変数の時系列データのみから、直接知ることのできない非線形力学系のアトラクタの軌道を、再び構成する手法である。具体的なアトラクタの再構成手法は、時間遅れ座標系への変換であり、1変数の観測値 $x(t)$ を用いて、時間遅れの大きさを D とする n 次元の再構成状態空間における n 次元ベクトルを作成すると、次元数 n を適切に選択することにより、再構成されたアトラクタは、もとの力学系との1対1対の対応が可能になる。理論の詳細は、合原一幸著の「カオス学入門」(放送大学教育振興会) [2] を参照されたい。

図4-1に示す熱流束の時系列データから、再構成した n 次元アトラクタを、図4-2に示す。次元数 n は、相関次元解析 [2] により算出した相関次元値をもとに、埋め込み定理 [4] を考慮し

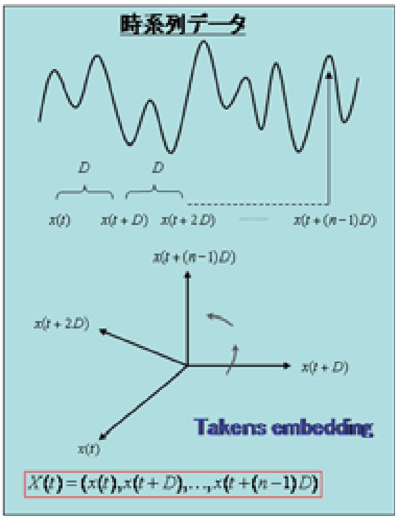

図3：時系列データからの非線形力学系の再構成
（東京大学生産技術研究所　合原一幸教授からの提供）

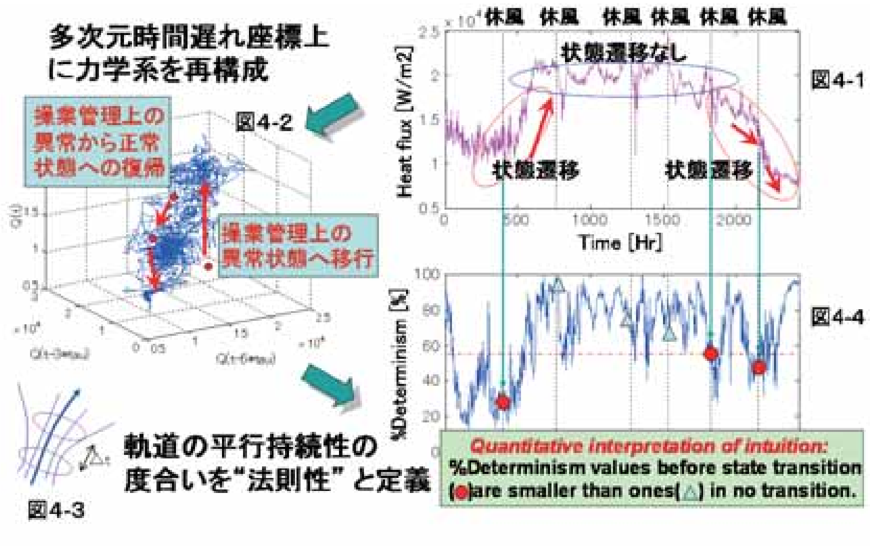

図4：論理構造2：時系列データに内在する法則性の導出

て7と決定した[5]。尚、図4-2では、表記の便宜上、第1次元、第4次元および第7次元成分のみからなる3次元図としてアトラクタの挙動を表示している。

状態の挙動をΔtの時間スケールで観測したときに、時間発展の様子が決定論的、すなわち

或る法則性に支配されて推移するように見えるということは、図 4-3 に示すように再構成された軌道群の近接した部分が Δt 後に近接した部分に移されることを意味する。これは、アトラクタ軌道が周囲の近傍点の軌道に対し、平行に走ることを意味しており、図 4-3 の n 次元再構成アトラクタの軌道の平行線の持続性を、ある時刻 t における再構成アトラクタ上の点の周囲にある近傍点の集合が、$t+\Delta t$ において近傍点として存在する割合を%Determinism と定義し ([5])、計算した結果を図 4-4 に示す。

図 4-4 では、状態遷移の前および状態遷移中の%Determinism 値が、状態遷移のない場合と比較して、小さくなっていることである。これは、図 2 に前述した「正常状態から異常状態、および、異常状態から正常状態に遷移する前および遷移中の熱流束値の変動が、状態遷移のない場合と比較して、大きくなっている。」という観察結果を定量化したものであり、「観察結果を代表物理量として定量化する」という数学の重要な活用事例を示していると考える。これは、一見するとホワイトノイズとして処理されてしまうような図 4-1 の熱流束の変動の意味を数学的に解釈することによって得られる新しい知見である。

ノイズの物理的意味を数学的に解釈することにより、ノイズのなかから種々の情報を引き出す可能性を有しているという点からも、数学活用の意義は大きいと思う。

6　複数の論理構造の組み合わせによる工学原理の導出

図 5 に、解析結果の総括を示す。前述したように、今回の事例では、数学により導出した 2 つの論理構造 (Logical-Path) を使って、正常状態から異常状態、異常状態から正常状態へ遷移する際に、熱電対による煉瓦内部の温度計測データ（図 5-1）に内在する法則性の分析を行った。その結果を図 5-4 に示す。図 5-4 は、休風直前の%Determinism 値（図 5-3 参照）と休風による熱流束変化量（図 5-2 参照）の関係を示す。休風直前の%Determinism 値が低下するにつれ、休風による熱流束変化量が増加するという相関関係が見出せる。この結果から、「%Determinism 値が低下しているときに、休風のような激しいアクションを行うと、大きな状態遷移を引き起こし易くなる」という、ひとつの製造原理を導出できた。

もし、論理構造-1「原因系の物理量の再構成」を経ずに、図 5-1 の熱電対温度データのみから、直接、論理構造-2「時系列データに内在する法則性の導出」を行った場合の結果を、図 6 に示す。図 6 では、休風直前の%Determinism 値と休風による熱流束変化量の間に、図 5-4 のような相関関係を見出すことは出来ない。複数の論理構造 (Logical-Path) を組み合わせることにより、製造現場の計測データから、これまで見えなかった法則性を見出すことが可能になることが判る。

7　数学研究への期待

図 7 は、現実世界の現象を、定常、非定常、線形および非線形という 4 つのカテゴリーに分類したものである。高炉に代表されるような製造現場で起きている複雑な現象は、非定常で非線形の領域に属するが、この領域を正面に見据えて解析できる一般的な方法論を、我々は持ち合わせていない。前述したように、現実世界で問題となるのは、高炉の炉況不調や連続鋳造プ

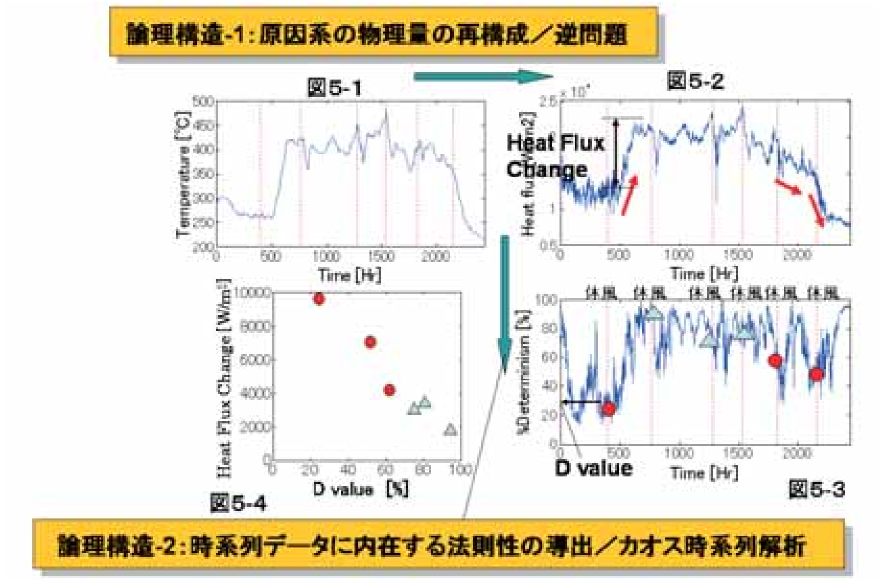

図５：複数の論理構造のインテグレーションの効果

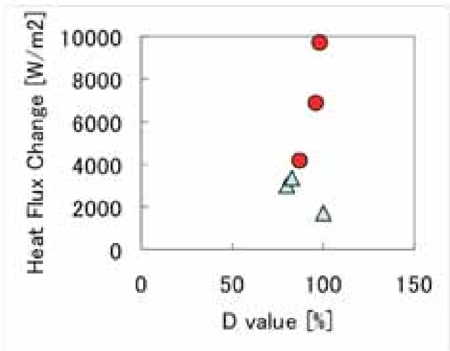

図６：論理構造-2 のみの解析結果

ロセスの品質欠陥等にみられるような定常状態から乖離したときに発生すると考えられる異常状態である。これらプロセスの操業は、通常、異常状態を可能なかぎり回避するように管理されるので、異常状態が定常的に継続するようなことは稀で、我々が眼にするのは、過渡的な遷移過程のデータである。従って、このような問題に対処するには、過渡的な遷移過程にあるデータから、異常状態を引き起こす際の法則性を見出す必要がある。現状は、現場の経験と勘と呼ばれる定性的なアプローチを拠り所に、現実現象の解明に取り組んでいる。

もし、この非定常で非線形の領域に、新しい数学理論が適用出来れば、現実現象に数学論理をリンクさせ、新しいものの見方・考え方を製造現場に導入し、製造技術の効率化の追求や新

しい技術概念の創出が可能になると考える。この領域への数学者の参入を大いに期待する。

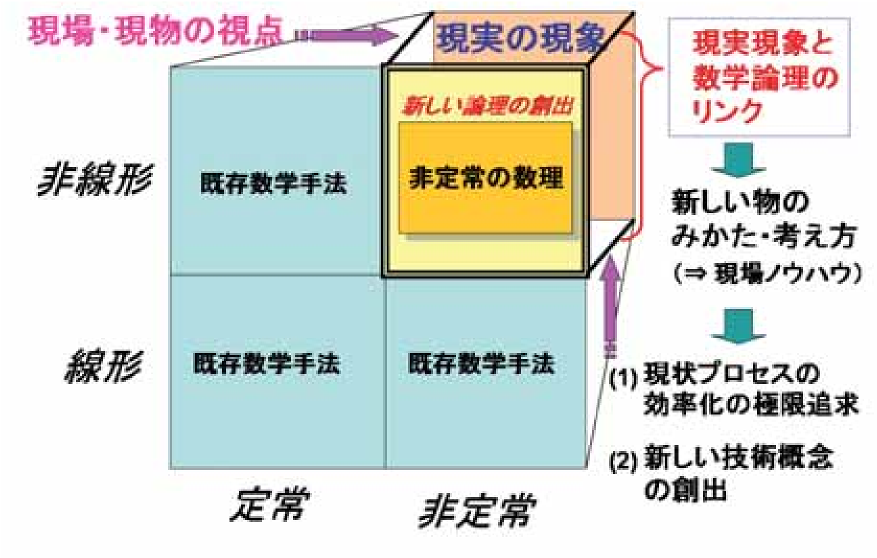

図 7 : 製造現場からの数学研究への期待

具体的な課題を普遍的なものに置き換え考えるという数学的思考の利点を現実世界で最大限発揮できるよう、

(1) 数学により抽象化した枠組みのなかで現実世界の問題をとらえ問題の根源を明らかにすること、

(2) 数学により構築した枠組みをもとに既存の技術概念の再構築を図ること、

(3) 技術の出口をつくり技術の製造現場や社会への浸透を図りイノベーションに繋げること、

これらが数学をコアにした産学連携の目指すものであるといえる。

CT スキャン、暗号理論、ウエーブレット等、数学者が純粋な数学的興味から作った理論が、時を隔てて数学者以外により思わぬ応用が見いだされ、応用面からの刺激で数学の分野が新たな次元で発展するという構図をとっており、これまでの歴史が実証するところによれば、数学・数理科学の他分野への応用及び応用からの刺激による理論研究の発展・深化は殆ど常にこの形で起こっている [6]。数学をコアにした産学連携は、数学理論と社会を動かす技術実現の時間の隔たりを劇的に短縮する大きな可能性を有しているといえる。

また、数学は普遍的であるがゆえに、個別の現象やデータに依存せずとも理論が成立し、中立を保つことができる。この中立性こそ、数学がイノベーションの源泉として、諸科学、工学、産業界に対し、ギブ・アンド・ギブン (Give & Given) の課題解決型の新たな連携スタイルを構築できる大きな強みになるはずである。

参考文献

[1] 山本昌宏, “逆問題入門”, 岩波書店 (2002).
[2] 合原一幸, “カオス学入門”, 放送大学教育振興会 (2001).
[3] P. Grassberger and I. Procaccia, “Characterization of strange attractors,” Phys. Rev. Lett., vol. 50, no. 5, pp. 346–349, 1983.
[4] F. Takens, “Detecting strange attractors in turbulence,” in Dynamical Systems of Turbulence, ed. D. A. Rand and B. S. Young, vol. 898 of Lecture Notes in Mathematics, pp. 366–381, 1981.
[5] 中川淳一, 合原一幸, “リカレンスプロットによる高炉の非定常解析”, 信学論 (A), vol. J187-A, no. 10, pp. 1303–1309, 2004.
[6] 九州大学, 東京大学, 新日鐵, 日本数学会, 文部科学省委託事業「数学・数理科学と他分野の連携・協力の推進に関する調査・検討～第 4 期科学技術基本計画の検討に向けて～」報告書 (2010).