

論文内容の要旨

論文題目： Creation of mathematical methods for the social cooperation: solutions of problems in the steel industry, environments and the traffic flow
(社会連携における数学的手法の創造：製鉄業、環境ならびに交通流についての課題の解決)

氏名： 中川淳一

本学位申請論文の第1章において、まず、社会連携のための数学の活用の原理ならびに方策を、学位申請者の産学連携の経験に即して論じた。現実の課題を解決し、イノベーションを創出するために数学が有効であることを第2章以降で事例とともに示した。第2章では高炉、第3章はその他の製鉄プロセス、第4章はスケーリング則、第5章は材料、第6章は環境問題、第7章は交通流をとりあげる。以下に、各章の内容の概要を述べる。

第1章の内容： 本章の第1節では、社会連携における数学的手法の創生の事例として伝熱逆問題をとりあげた。伝熱逆問題の詳細は第2章で述べるが、高炉の炉底煉瓦に溶銑から流入する熱流束量を予測するため、炉底煉瓦内の熱移動現象が1次元非定常伝熱方程式に従うと仮定した数学モデルを設定し、煉瓦内の外壁近傍に埋設された2か所の温度計の時系列温度データから煉瓦内壁の熱流束を推定する問題である。本課題は、放物型偏微分方程式の初期条件と片側のノイマン境界条件が未知で、もう一方の境界条件としてノイマン境界条件とディレクレ境界条件の双方が計測により与えられた場合の逆問題として定式化される。これは、高炉の伝熱逆問題という具体的な製鉄業の個別問題に対し、数学による抽象的枠組みのなかで問題をとらえることで、「温度と熱流束の時間変化を同一場所で同時に計測することにより、材料内部の温度と熱流束を予測する問題」として一般化され、赤外線カメラによる装置材料の非破壊診断技術として、第3章で述べる溶鋼鍋をはじめとする高温物質を扱う設備の異常診断技術として応用展開されている。すなわち、数学の枠組みにより、現実世界の問題を抽象化した枠組みでとらえ、問題の根源を明らかにし、既存の技術概念の再構築を行い、技術の出口をつくり製造現場や社会への浸透を図って産業現場においてイノベーションを創出した。これは、社会連携における数学イノベーションのための方策を示唆するものである。第2節では、そのようなイノベーションを起動させるための数学者と企業研究者の社会連携におけるスタイルを示した。連携に参画する数学者の専門性を最大限発揮できるよう、ひとつの課題に対し複数のタスクフォームチームを並行して走らせ、各々の課題の性格に応じて、数学者のメンバー構成を柔軟に編成する。この連携の場は、課題解決だけでなく人材育成の場を担っており、すべての中心にフィードバックが機能するコミュニケーションの場がある。現象の解釈、数学的なものの考え方、必要に応じた数学モデルの設定と妥当性・精度検証等、さまざまな視点からのフィードバックを経て、製造現場をはじめとする社会で起こっている問題の本質を数学的に解釈する一連の手続きが完成する(図17)。これは、既存の数学的手法をそのまま適用するのではなく、数学者と企業研究者による議論を通じた共同の成果物であり、当該課題の解決だけでなく数学的にも新しい発見や新たな研究分野の創出に繋がる。そのような新たな研究分野の創生を伴った成

功事例の一つとしては、第6章の土壤汚染問題に関連する非整数階微分方程式があった。

第2章の内容： 本章の第1節で、伝熱逆問題による高炉の操業状態の異常診断技術を取りあげた。第1章に記載した2か所の温度データから煉瓦内壁の熱流束の時間変化を逆問題により計算し、時間遅れ座標の高次元空間に埋め込み、熱流束挙動の回帰性（法則性）を表現する数値指標を創出し、異常状態が正常状態に移行する際の条件を予想し現場データを使い検証した。これは製鉄業における複数の課題解決に応用できる汎用的な手法である。第2節では、前節の逆問題の数学理論について述べた。材料外壁近傍の計測温度（既知変数）が、初期温度分布（未知変数）のフーリエ級数、内壁の熱流束（未知変数）を含む積分項と外壁近傍の熱流束（既知変数）を含む積分項の和により表現されることを用いて数値計算上の不安定性を回避するための数学手法と数値計算アルゴリズムを確立した。

第3章の内容： 本章の第1節では焼結の数学モデルを考察した。高炉に原料を供給する焼結プロセスにおいて、焼結品質・操業コストを向上させるため焼結層の温度分布の制御は重要であり、温度分布挙動を線形近似し制御することを目的とする数学モデルを提案した。すなわち、焼結層の厚さ方向の燃焼排ガスを1次元非定常温度分布としてとらえるマクロな温度モデルと、燃料である粉コークスが燃焼により粒径を減じていく挙動を扱うミクロな反応モデルからなる非線形反応拡散系の偏微分方程式のシステムを考え、スケーリングパラメータを適切に導入し、最高温度を示す場所と時間における温度とコークス粒径を0次項にし、偏微分方程式を3次項までベキ級数展開した線形近似式を導出し、前記の非線形偏微分方程式システムの数値計算結果とよく一致することを検証した。第2節では、鋼材加熱炉のスケジューリングと燃焼制御の同時最適化を実現するハイブリッド制御の技術を考察した。本技術は、種々の操業・設備制約条件下での燃料使用量最小化を混合整数計画法の数学的枠組みのなかで実現すべく、2つの技術的な先進性を確立した。① 物理モデルと制御システムの融合：鋼材および燃焼排ガスの熱収支に関する非線形偏微分方程式を、線形常微分方程式に変換し線形計画法の枠組みのなかで処理できるようにした。② 離散量と連続量のハイブリッド制御：鋼材スケジューリングの離散変数の取り扱いを線形不等式によって書きなおしたことで、組み合わせ演算回数を抜本的に削減し、実用化のために現実時間のなかでの計算を可能にした。第3節では、溶鋼鍋の残存煉瓦厚みを診断するための数学的手法について述べた。溶鋼鍋は、鉄鋼製造工程において、転炉で製造した溶鋼を次の工程である連続铸造機に運搬するための耐火煉瓦で構成された容器であり、溶鋼運搬中の溶鋼が入った状態と铸造終了から転炉で次の溶鋼を受けるまでの空鍋の状態を交互に繰り返す。溶鋼鍋の外壁温度は、溶鋼運搬中は上昇し空鍋時は下降するので、溶鋼運搬の間に最高温度に到達する。この到達時刻は煉瓦の残存厚と対応関係があるので、赤外線カメラにより外壁温度を計測し最高温度到達時刻を測定し、最高到達温度と残存煉瓦厚みの因果関係を、第2章第2節における伝熱逆問題の手法と第4章で述べるスケーリング則を使い、現場データにより定量化した。

第4章の内容： 本章では、スケーリング則を使った鉄鋼製造工程の精錬プロセスと呼ばれる反応過程を定量化する工学的手法の導出について述べた。スケーリング則とは、数学モデルと実現象の間の物理量の相似性を無次元数で表現する体系的な方法論であり、数学手法を実用化につ

なく際の現場における作業指針の創出のために不可欠である。

第 5 章の内容： 本章では、格子欠陥の一つである螺旋転位の数学的な考察を行った。転位とは、外力等によって金属材料を変形する際、結晶がある結晶格子面上を部分的に滑り、原子配列が乱れる現象であり、マクロな世界で観察される塑性変形の原因となっており、材料の強度や伸び等の機械的性質を決定する重要因子である。結晶格子を格子の滑り方向を法線とする平面（底空間）に射影し、底空間の原子上に S^1 ファイバーを設定する。螺旋転位は、底空間での転位芯周りのループがなす基本群がファイバーに作用し、ファイバー上の原子配列を S^1 関数値で置き換えるモノドロミーで記述できることを示した。

第 6 章の内容： 本章第 1 節では、土壌内の汚染物質の異常拡散現象の数学モデルを考察した。現場で観察される異常拡散現象の連続時間ランダムウォークによる帰納的な記述方法が、時間非整数階の偏微分方程式に対応することに触発され数学の研究分野が世界的・飛躍的に拡大・深化している。これは産学・異分野連携が数学の研究領域自体を発展させた事例である。土壌粒子間の空隙分布の不均質性というミクロな世界の影響が、マクロモデルとして時間非整数階偏微分方程式で表現可能となり、ミクロな世界とマクロな世界を繋ぐマルチスケールモデリング構築の一つの考え方を示した。第 2 節では、非整数階偏微分方程式の数学解析の成果を解説した。

第 7 章の内容： 本章第 1 節では、交通流の数理モデルを題材にして、前章でとりあげたマルチスケールモデリング構築の考え方をより具体化した。これまで交通工学の学術分野で提案されている種々の交通流モデルを体系的にサーベイし、個々の車の挙動を対象にした最適速度モデルと呼ばれている離散でミクロな常微分方程式モデルが、車両の流れを流体として扱う連続でマクロな偏微分方程式モデルに適切な数学的な変換により対応づけられることを示した。第 2 節では、交差点の信号機のオン・オフで交通流を制御するための最適化方法について述べた。信号機のオン・オフを離散値として扱い、交差点ごとに定義した交通流量に関する局所コスト関数の総和の時間勾配が常に負となるようなりアップノフ関数を見出し、同関数に基づき信号のオン・オフ制御を行う方法と、信号機のオン・オフを 2 重井戸関数により連続値で扱えるような大域的成本関数を定義し最適化問題を解く方法を提案した。