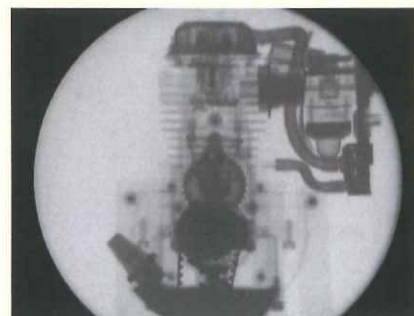


特集「ここまできた鉄鋼の計測・制御・システム技術」 計測・制御・システム技術の 先端研究



計測技術の応用研究例

中性子線を用いた新しい計測技術、中性子ダイナミックCTシステムによる撮像例。作動中のエンジン内のオイルの動きなど、通常では知ることができない内部の挙動を見ることができる。(画像提供=東京都市大学工学部原子力安全工学科 持木幸一教授)

制御技術の応用研究例

マルチロータの自律小型無人ヘリコプタ。外乱要因の多いヘリコプタの制御には、ポスト現代制御理論に類する新しい制御理論が多く使われる。(画像提供=千葉大学大学院 工学研究科 野波健蔵教授)

製鉄所などの生産現場はもちろん、自動車、家電製品など身近な製品に至るまで、現在では、計測と制御を両輪とした自動化の技術は欠くことのできないものとなっている。

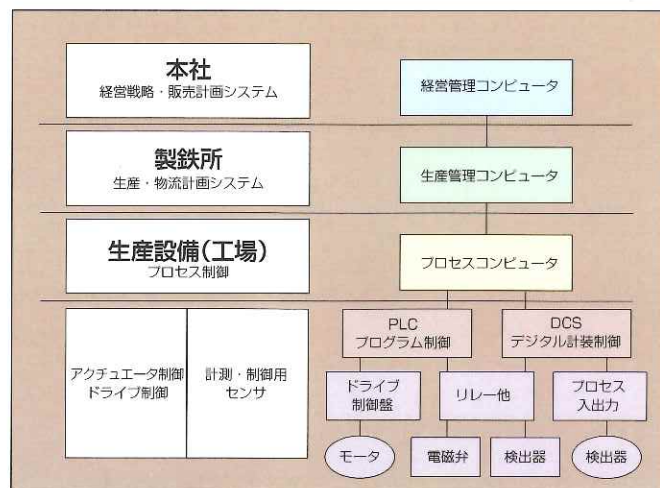
あらゆる産業分野に浸透している計測、制御、システム技術の全体像を眺めてみるとともに、その先端研究の可能性をみてみよう。

■鉄鋼業における計測・制御・システム技術の位置づけ

鉄鋼業は多品種・多仕様の下で小ロット化が進んでいるが、全体としては依然大量生産型産業であり、製鉄所では1日あたり数万吨規模の鉄鋼が処理されている。

生産現場でのやっかいな問題は、予測できない外乱という不確かさを扱わねばならないことであり、製品仕様が複雑になることで、製造プロセスや管理も複雑さを増している。

大量のデータを相手に不確かさと複雑さを克服するのはもはや人間の力だけでは不可能であり、これを克服し、助けるものとして、計測・制御・システム技術は発展してきた。製造プロセスにおける計測に基づく操業管理や品質管理は勿論のこと、経営戦略や販売システムにまで及ぶ広い範囲で計測・制御・システム技術が使われている(図1)。



【図1】計測・制御・システム相関図

鉄鋼業において、生産現場から経営に至るまでのコンピュータシステムの概要と階層別機能を表す。階層ごとに計測・制御・システムの各技術が対象とする領域があり、互いに関連する。(石川好蔵「第193回西山記念技術講座(日本鉄鋼協会編)」を参考に作成)

当初は、見えないものを定量化・数値化するいわゆる“見える化”の手段としての計測が主体であり、その情報を元に人間が設備を操作していた。次にコンピュータの進歩とも相まって、計測された情報による温度制御・寸法制御など個別プロセスの自動化が進んだ。さらに、複数の制御を総合的に組み合わせた操業技術の自動化の例として、材質の制御などが挙げられる。

そして今後は、複数プロセスを統括した造りこみというシステム技術が要求され、製鉄所全体の合理的な運用が課題となる。製品の納期を遵守しつつ必要な品質を保証するためには、生産計画全体の最適化が求められる(図2)。

個別の計測・制御の技術がより精緻なものになっていく一方で、工程管理など従来人手で処理されているものも多い。この分野でも、より柔軟に対応できる“人に優しい”システム技術の開発が重要な課題となっている。

■計測・制御・システム技術の全体像

▼計測技術の進化

事物を量的にとらえるための方法・手段である計測は技術の発展にとって欠くことのできないものであり、古代に遡る長い歴史を持っている。特に20世紀後半、第二次大戦後の発展は著しく、計測はさまざまな分野に共通する基盤技術として広く認識されるようになった。

背景にあるのは、半導体技術の発展とともにエレクトロニクス技術が進歩したことである。その結果、計測においても多種多様な

信号を電気信号に変換するセンサが開発された。

1970年代以降の日本では、重工業、プロセス産業、ロボット技術、エレクトロニクス産業などの各分野において、計測工学とセンサの技術は特に重要な基盤技術となって発展してきた(図3)。

最近では、インフラとしての電子技術・コンピュータ技術・情報関連技術の発展が、計測技術に大きなインパクトを与えており、特に進歩の著しい画像・光・超音波・磁気センシング分野で最新技術の導入・利用が盛んである。

また、コンピュータの性能向上とコスト低下も相まって、従来は処理時間やコスト面で適用が難しかったパターン処理(画像処理、コンピュータド・トモグラフィ(CT))やデジタル信号処理(パルス圧縮・スペクトル解析技術)を駆使した新しい計測方式・計測技術の開発・実用化も多く報告されるようになってきた。

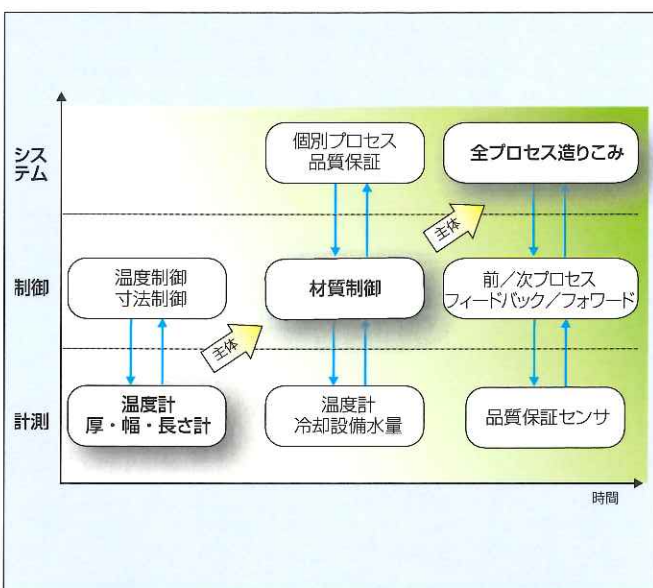
さらに、複合情報、あいまい量なども積極的に計測の対象に取り入れ、有益なデータを提供するために、信号処理手段等を含む、いわゆる“インテリジェント”な計測システムを構築するソフト開発が進められている。

後述の中性子ダイナミックCTシステムは、最新のセンサ、画像処理、複合情報計測技術などを組み合わせた計測システムの例である。

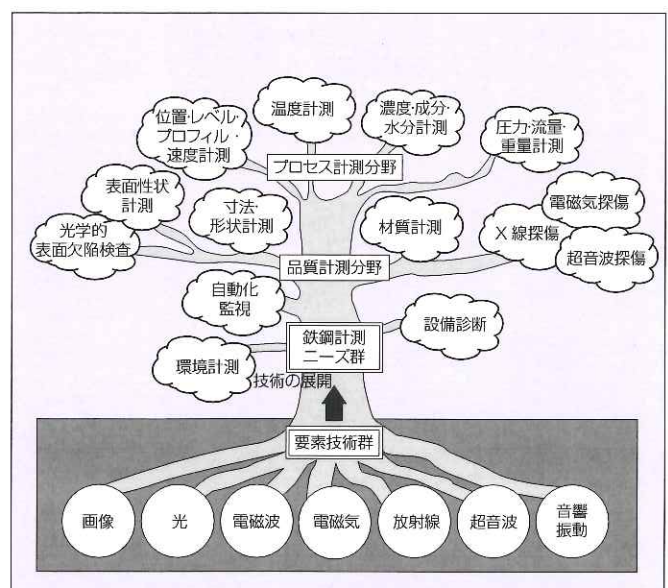
▼制御技術の進化

制御対象に対して自動的に所定の操作を加える制御技術の代表例は、フィードバック制御とフィードフォワード制御である。

フィードバック制御の機能は、反省と見直しの繰り返しである。

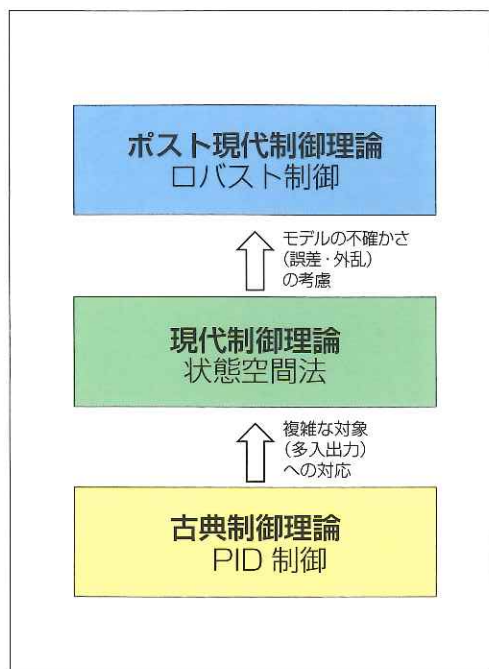


【図2】鉄鋼業における計測・制御・システム技術の流れ
例えば厚さ計で測って板厚制御を行う程度(第1段階)から、品質保証のために材質制御を行うなど、プロセスごとに制御を行う(第2段階)、製品造りこみのため全プロセス間で情報をやりとりする(第3段階)など、時間経過とともに、計測から制御、そしてシステムへと主体が移ってきている。



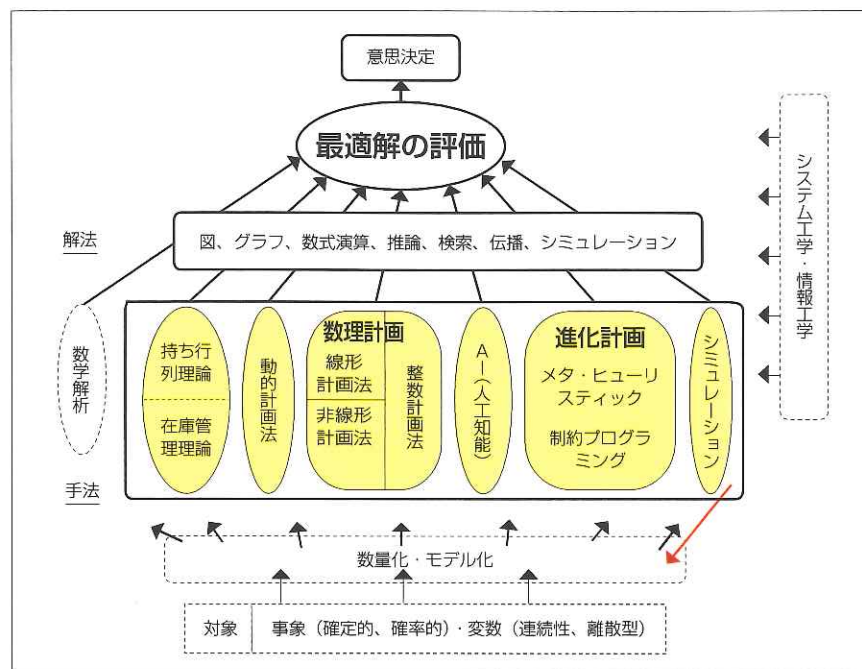
【図3】計測技術のニーズとサイズ

計測は、事物の形状や温度、速度、電磁気や振動など、我々の周りを取り巻くほとんどすべての事物を対象とし得る。主に鉄鋼業で使われるものを中心に、対象とする要素技術群と、さまざまなニーズに対応した計測技術を示す。(『鉄鋼便覧 第4版』収録の図版より改変)



【図4】 制御理論の発展

1入力1出力の古典制御理論から多入力多出力の現代制御理論へ、さらに誤差や外乱などを考慮したポスト現代制御理論へと、次第に発展している。



【図5】 オペレーションズ・リサーチ手法関連図

さまざまな事象に対し、数学的・統計的なモデルを作成し、さまざまな手法（アルゴリズム）をあてはめることで、効率的な解を見出す技法をオペレーションズ・リサーチという。これはまた、システム構築の基本的な考え方でもある。（大村平「ORのはなし」収録の図版を参考に作成）

コントローラーは計測結果を受け取って目標値との隔たりを計算（反省）し、出力を変化（見直し）させる。この操作を繰り返して目標値と実測値の偏差を打ち消す。

フィードフォワード制御は、対象のプロセスの特性が既知であるとして、変動をあらかじめ予測しておき、先取りして修正することで変動要因を取り除く。

フィードバック制御は結果を見て修正する制御であるため、どうしても時間遅れが伴う。そのためフィードフォワード制御が併用される場合が多い。

フィードバック制御とフィードフォワード制御は、製鉄所や発電所などの設備において温度、圧力、流量、pH値などを所定の値に保つためのプロセス制御や、自動車などの輸送機やロボットなど移動体の時々刻々変化する速度、方向、姿勢などを目標値に追従させるように制御するサーボメカニズムに適用されている。

制御理論は、複雑な対象に適用したり、モデルの不確かさなどに適応するために発展してきた（図4）。

古典制御理論は、入力信号と出力信号の関係を数式で捉える。基本となるのは1入力1出力である。古典といいながら、その代表であるPID制御は現在でも制御の基本技術として広く使われている。PID制御は、出力値と目標値との偏差を最小にするように、比例（Proportional）、積分（Integral）、微分（Derivative）の3要素の信号を基に入力値を制御する。その手順は、比例操作で残る偏差を積分操作で取り除き、微分操作は振動的な入力の影響を打ち消す。

現代制御理論は、制御対象の特性と入・出力値を精査し、大量の連立一次微分方程式を解くことで、多数の入・出力を同時に制御できるため、古典制御理論よりも複雑な制御対象への適用が可能である。

ポスト現代制御理論は、制御対象の特性が変化することを前提として制御系の設計を見直し、モデル化誤差に対して有効な制御系設計を提案するもので、1980年代以降に登場した。その中で、ロバスト制御は外乱信号の影響を抑制する制御系構築の理論として最も注目されている。後述の自律小型無人ヘリコプタにおいてもロバスト制御は、強風・突風（外乱）の影響や機体重量変化（モデル化誤差）の影響を抑制するための基本技術となっている。

▼システム技術の進化

計測と制御は別個のものであるが、複数の設備を組み合わせたシステムを、自動で安全かつ効率的に動作させるためには、この両者を互いに密接に関係づける必要がある。特に1970年代以降、コンピュータの普及に伴って設備の数値制御の技術も大きく発展し、設備や人を含む要素を組み合わせたシステムを効率よく動かすために、数理的なモデルや最適化技法が生まれた。

オペレーションズ・リサーチ（OR）は戦場での戦略問題から端を発して生まれてきたものであるが、意思決定を支援するためのさまざまな手法として発展してきている（図5）。近年のコンピュータ処理能力の飛躍的な向上を背景に、数理計画法・メタヒューリスティッ

クなどのソフトウェアアルゴリズムを適用して複雑な計画問題を解いたり、工程全体を模擬したりする大規模シミュレーションも可能になってきた。

一方、状況変化に柔軟に適應できる人の意思決定に注目し、熟練者の持つ操業ノウハウを抽出したり再利用したりするデータマイニング技術も発展しつつある。

また後述の渋滞学は、“渋滞”という現象面を捉えて新たな数量化・モデル化を提案する注目のアプローチである。直接の交通工学をはじめとして“渋滞”という現象に関連する数学、物理学、生物学、情報工学、そして心理学や経済学まで分野横断的に関係しており、産業への応用が期待されている。

■計測・制御・システム技術の先端研究

ここでは鉄鋼業に限定せず、広く計測・制御・システム技術の各分野での先端研究の事例を取り上げる。

▼最先端の可視化計測「中性子ダイナミックCTシステム」

計測の分野では、コンピュータの処理能力の向上によって、得られた情報をプロセス制御のみに用いるのではなく、画像処理を行って普段は見ることができない現象を可視化する技術の進化も目覚ましい。

物体内部の構造やその変化は通常見ることができないが、近年、中性子線を用いて非破壊で内部を透視する手法（中性子ラジオグラフィ、または中性子イメージングと呼ばれる）が注目されている。

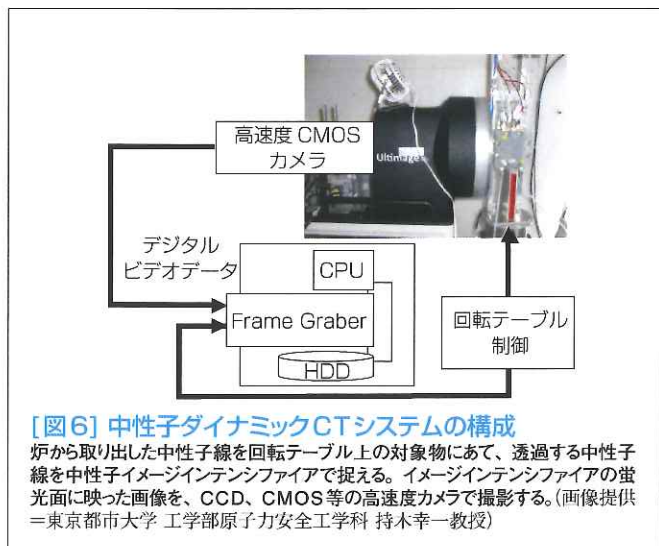
すでに静止画像としての中性子ラジオグラフィ技術は広く応用が進められているが、東京都市大学 工学部原子力安全工学科放射線診断分析研究室（持木幸一教授）では、高感度で高空

間分解能特性をもつ中性子イメージインテンシファイアを開発し、これを核として一定周期でCT撮像を連続して行い、内部変化を3次元的に可視化し観察することを可能にした中性子ダイナミックCTシステムを構築している（図6）。

放射線を用いて物質内部の透過画像を得るラジオグラフィの技法のなかでは、X線が一般に使われているが、X線が金属等の重い元素をはっきり映し出すのに対し、中性子は水素や酸素などの軽い元素ほど不透明に（影として）映し出す特徴を持つ。このため、X線撮影では捉えづらい、物質内部の水や油の挙動などを把握することに適している（図7、タイトルページの画像）。

この特性を活かす有望な応用分野と考えられるのが、近年ますます利用が広まりつつある燃料電池内部の可視化と計測である。

燃料電池は、水素と酸素を化学反応させることで電気エネルギーを継続的に取り出す装置である。しかし、その反応の際に発生する水がガス排出管内部で結露してしまうと、ガス供給が妨げられ、発電効率が低下する。従来、その変化は主に、発電効率の変化によって推察するしかなかった。中性子ダイナミックCTシステムを使うことで、内部の電圧や電流をモニターしつつ、内部の水の分布・挙動を可視化、発生位置、時間、量などを計測し、その相関関係を明らかにすることが可能になる（図8）。



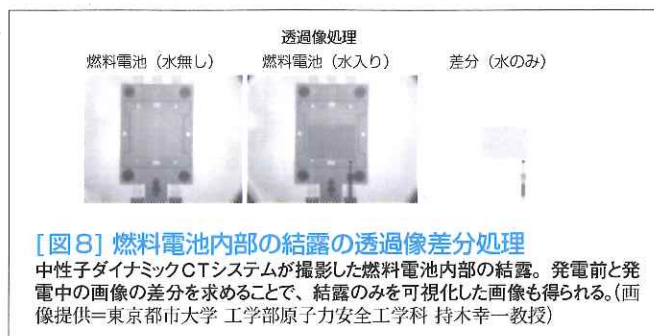
【図6】中性子ダイナミックCTシステムの構成

炉から取り出した中性子線を回転テーブル上の対象物にあて、透過する中性子線を中性子イメージインテンシファイアで捉える。イメージインテンシファイアの蛍光面に映った画像を、CCD、CMOS等の高速度カメラで撮影する。（画像提供＝東京都市大学 工学部原子力安全工学科 持木幸一教授）



【図7】中性子線およびX線による透視の比較

空気を跳ねるおもちゃを、中性子線（左）およびX線（右）でそれぞれ透視したもの。主に金属の硬質部分を映すX線に対し、中性子は樹脂製の軟質部分の形状を明瞭に映すなど大きな違いがある。（画像提供＝東京都市大学 工学部原子力安全工学科 持木幸一教授）



【図8】燃料電池内部の結露の透過像差分処理

中性子ダイナミックCTシステムが撮影した燃料電池内部の結露。発電前と発電中の画像の差分を求めることで、結露のみを可視化した画像も得られる。（画像提供＝東京都市大学 工学部原子力安全工学科 持木幸一教授）



【図9-1】自律小型無人ヘリコプタ

自律型ヘリコプタ「SF40」。一般的なシングルロータ形式で、機体下部、脚の間の四角いフレームに収まるのが制御装置。観測機器等を搭載するペイロードを稼ぐため、制御装置は小型軽量にする必要がある。(画像提供=千葉大学大学院 工学研究科 野波健蔵教授)



【図9-2】自律制御小型無人ヘリコプタによる送電線点検

中国電力と千葉大学で共同開発された、自律小型無人ヘリコプタによる高圧鉄塔・送電線巡視システム、「SKY SURVEYOR」の飛行経路図。設定した経路に沿い、自動で送電線追尾を行う。(画像提供=千葉大学大学院 工学研究科 野波健蔵教授)

▼難制御対象を制御する「自律小型無人ヘリコプタ」

固定翼の航空機に比べ、ヘリコプタは離着陸に広大な滑走路を必要とせず、空中での停止（ホバリング）や低速度での方向を選ばない移動が可能のため低空で地形追従性の高い飛行ができるなど、優れた特長をもつ。

しかし一方で、安定した飛行を行うことができる固定翼機に比べて、高度な姿勢制御が必要であり、より操縦は難しい。

千葉大学大学院 工学研究科（人工システム科学専攻）野波健蔵教授の研究室では、ラジオコントロール・ヘリコプタのメーカーと共同で、こうした難制御対象であるヘリコプタの自律制御に取り組んでいる。研究の内容は、オーソドックスなシングルロータ機（図9-1）や、ピッチコントロールの必要がないマルチロータ機（タイルページ写真）などを用いて、姿勢制御、速度制御、自律離着陸制御、自律フォーメーション飛行など、多岐にわたる。

特に実用化に向けての研究が進んでいるのが、すでに有人ヘリやラジコンヘリが使われている送電線点検や農業散布への応用である。

うち送電線点検は、山奥等の交通の難所を中心に、現在は有人ヘリで行われているが、天候等による飛行条件が厳しく、事故のリスクも少なくないため、簡易で安全性の高い手段への変更が期待されている。研究室では、中国電力と共同で、高圧鉄塔・送電線の巡視業務を行う自律無人ヘリコプタ「スカイサーベイヤー」送電線点検仕様を開発、現在、中国電力において実運用に向けた実証試験が行われている（図9-2）。

巡視ヘリは、鉄塔間で緩やかに垂れ下がっている架線を、ほぼ10m間隔で速度を落としながらカメラに捉え、架線に追従して飛行しなければならない。ヘリコプタの低速飛行は風など天候の影響を受けやすい上、架線からセンサに影響を与える磁場も発生

しているため、飛行の制御はいっそう難しい。

研究室では、オリジナルの数式モデルを使用して制御系をデザインしているが、不確定な外乱信号を抑制し、堅牢性が高いロバスト制御を多用している。現在では、複雑な理論も比較的簡易なコマンド入力で設計に持ちこめる支援ソフトウェアなども開発されており、より困難な対象へ自律制御を導入する環境が整ってきているという。

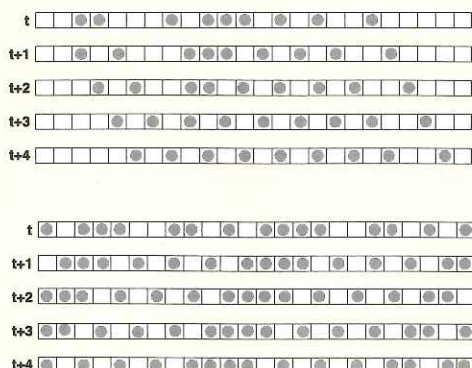
▼物流システムなどへの応用が注目される「渋滞学」

東京大学先端科学技術研究センターの西成活裕教授が提唱する「渋滞学」は、数学や物理学を使って渋滞の原因究明と解消に取り組む学問であり、交通流をはじめとしているいろいろな分野で注目されている。

生物の行動や人が動かす車などは、行動に自発性をもち、物理法則以外の社会心理的な力が動きに影響をおよぼす。このような「自己駆動粒子」（力学の法則に当てはまらず、自発的に動く個体粒子）の独特な動きが、渋滞の発生に大きく関わっていると考えられるもので、力学の基本原則に従わないため、定量的な解析が難しい事象である。

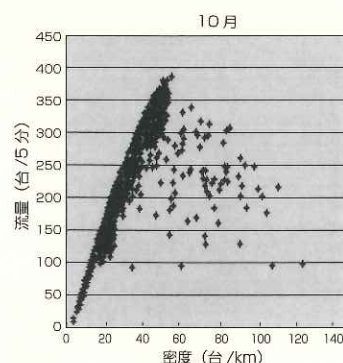
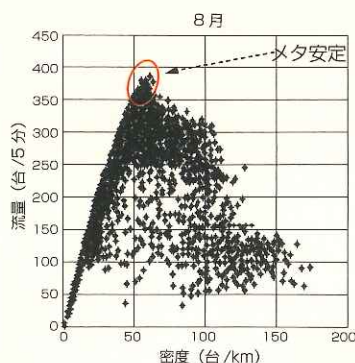
しかし近年、自己駆動粒子の運動をモデル化してシミュレーションすることで、渋滞の解消その他に活かす研究が進められるようになった。自己駆動粒子系の挙動と渋滞を考える上で有効な理論モデルが、ASEPと呼ばれるものである（図10）。ASEPとは「Asymmetrical Simple Exclusion Process（＝非対称単純排除過程）」を意味し、非常にシンプルなモデルでありながら、渋滞発生メカニズムと、渋滞が発生する臨界の状態を分かりやすく観察できる。

こうした研究は、道路などの設計を通して、交通渋滞の発生や、



【図 10】ASEP による渋滞のモデル化

自己駆動粒子の振る舞いをASEPで表したもの。箱の列は、左右端でつながって回路になっているものとする。玉は左から右へ一度に1コマずつ移動するが、すでに右隣のコマに玉が入っている場合には動けない。中の玉が少ない場合(上)、時間経過とともに玉は自然に適当な間隔を置いてスムーズに移動するようになるが、箱の数に対する玉の数の割合が一定以上になると(下)、移動が阻害された「渋滞」のクラスターが生じる。(西成活裕「渋滞学」より)



【図 11】交通流量・密度の基本図

東名高速道路における、渋滞が多発する時季(左・8月)とほとんどない時季(右・10月)の比較。(西成活裕「渋滞学」より データ提供:旧・道路公団)

それによる事故など二次的災害の抑制・抑止に活かすことができる。

図 11 は、実際の道路で交通流量、密度を測ったものだが、低密度の領域では密度と流量がほぼ比例しているのに対し、ほぼ 1km あたり 50 台を臨界密度として渋滞が発生し、右下がりに広がったデータ分布を示していることが分かる。詳細に分析すると、渋滞への相転移は臨界密度に達して即座に起きるのではなく、「いつ渋滞になってもおかしくない」状態にも関わらず渋滞になっていない状態がわずかにある。これを「メタ安定」と呼ぶ。現実の道路交通であれば、メタ安定は通常 5 分から 10 分程度で崩れ、渋滞に移行する。しかし、物流の観点からすれば、仮に人為的にメタ安定を維持できれば、より大量かつ高速搬送が可能となる。

また森林火災や伝染病など、伝播を一種の流れと見なすと自己駆動粒子系に似た動きを示す事象も多く、この場合は、いかに流れの阻害=渋滞を起こすかという発想が有用になる。このように、「防ぐ」「解消する」「発生させる」など渋滞を自在に操ることが、「渋滞学のアプローチを活かした制御」であり、物流、生産、通信など多くの分野への適用が期待される。

■先端研究の鉄鋼業への適用の夢

近年、金属物質内部を対象とした計測ニーズが高まっている。一般的には破壊検査もしくは放射線利用などが考えられるが、製造ラインでの非破壊オンライン計測はまだ困難な状況である。中性

子ダイナミック CT システムのように、非破壊で鉄鋼材料の内部組織や欠陥をオンラインで計測できることが計測技術の夢のひとつである。

製鉄設備の自動化は着実に進んでいるが、自動制御では対応しきれず人手に頼っている設備も少なくない。自律小型無人ヘリコプタ制御は究極の難制御対象であるヘリコプタの安定飛行を、人手を介さず自動制御系だけで実現するものであり、ロボスト制御を柔軟かつより広範囲に適用することによって、鉄鋼製造における自動制御をさらに進化させることができるであろう。

生産を流れという視点で捉えたと、全ての在庫は交通流における渋滞に相当する。渋滞学を基にお客様の行動も視野に入れたスムーズな流れをつくることで、リードタイム(生産所要期間)短縮やお客様満足度向上に役立つのではないだろうか。

【取材・文＝川畑英毅】

取材協力＝東京都市大学 工学部原子力安全工学科

持木幸一教授

千葉大学大学院 工学研究科 野波健蔵教授

東京大学 先端科学技術研究センター 西成活裕教授

監修＝山下道雄(計測・制御・システム工学部会／

JFE スチール(株))