



アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ-32

プロセス制御から生産情報学へ

From Process Control to Production Informatics

北村 章 鳥取大学
大学院工学研究科
Akira Kitamura 特任教授



1 はじめに

私は、平成30年3月に鳥取大学工学研究科を定年退職し、現在は特任教授として研究活動を続けております。大学に転進するまでは神戸製鋼所におよそ24年間在職し、主に圧延プロセスのシステム制御技術を開発してきました。大学では、広く、生産プロセス制御から生産情報学に関わる研究に従事してきました。

鉄鋼協会での活動の記憶は多々ありますが、特筆すべき出来事は、計測・制御・システム工学部会会の発足に立ち会えたことです。阪神淡路大震災のあった1995年に発足したのですが、会議の当日、当時の上司でもあった故小西正躬博士（元岡山大学教授）に連れられて、神戸から福知山ルートで新大阪に辿り着いたこと事を覚えています。大学の学科構成にも似た工学部会の構成は、その時に作られたもので、それは今でも継承されています。部会活動では、企業側の幹事として部会長を支えたりもしました。近年では、部会長を経て研究会Ⅰ（冷延タンデムミルのシェアードコントロール）の主査を務めております。本当に長いお付き合いです。計測・制御・システム工学部会は、特定のプロセスに特化せず、「横系系」として計測技術やシステム制御理論を適用して、品質・歩留まりや生産性の向上（最適化）を目的として活動しています。

私は、神戸製鋼所と鳥取大学において、約40年に亘り、生産設備の最適制御、製造工程の最適スケジューリング、および、製造における人の発する情報をシステム科学として捉える生産情報学について研究してきました。本報告では、研究経緯に沿って、圧延の制御と生産情報学の適用事例を述べるとともに、最後にメッセージとして想いを伝えたいと思います。また、大学での取り組みにも触れることから、鉄鋼製造プロセス以外の事例も含まれていることについては、ご容赦願います。

2 制御理論の応用への取り組み

神戸製鋼所では、主に圧延工程などの鉄鋼製造プロセスの制御や生産システムの開発に携わってきました。圧延の制御は、制御工学の分類ではプロセス制御の範疇となります。ここでは、プロセス固有の問題を分析し、解決するための制御アルゴリズムを開発するとともに、製鉄所の制御技術部門や操業部門と協力して、実機に適用し、効果を検証することが主なミッションでした。その後、大学に移り、制御工学については教育の面からも関わってきました。

2.1 制御理論の美しさ¹⁾

現代制御において、入力と出力からシステム同定によってモデリングを行い、線形システム制御によって最適制御系を設計するという流れは、制御とその理論の美しさとエレガンスの象徴です。しかも、線（正確には矢印）と箱で結ばれたブロック線図は、古典も現代も、その特徴を内在させるとともに、箱は製造プロセスやロボットのみでなく、ダイナミクスを含むものであれば、経済や社会システムをも表現しています。これが、「横系系」と呼ばれる所以です。さらに、MATLABの登場以降、そのエレガンスの実態を容易に体得できます。現代制御以降のロバスト制御やモデル予測制御は、実応用における問題を解決する形で登場しましたが、基本的な美しさやエレガンスは継承しています。

2.2 制御は理論か実学か？

制御は理論か実学か？言うまでもなく、両方に意味があります。古典制御から現代制御にいたる理論体系は、数学や物理の普遍性に立脚した学問として理想の姿や最適性を追求します。それは、線形や非線形、確定的や確率的、などの現象を抽象的にモデル化し、コントロールしようとする意味でロマンさえも感じさせます。また、その根底には数学や物理と言った普遍性があり、それらの出口として様々な応用分野が

あり、数学や物理の応用として、教育においても重要な役割を果たしています。理論は、制御理論のみならず、その体系化と汎化を求めており、現実との乖離があります。中でも制御理論はその乖離が大きいと言われています。制御理論は、その美しさやエレガンスの多くが線形の世界で完遂しており、理想の姿と理解のし易さをそこに求めています。その美しさ故に、現実をそれに引き込むことさえあります。

一方、制御を実学としてみると、安定化や最適化、高精度化や高機能化、自動化によって経済効果を生み出したり、社会に貢献することのできる重要な役割を担っています。現実には目を向けると、鉄鋼製造プロセスを含めて、多くの現象は非線形であり、そこには定常状態のみでなく、非定常状態が含まれます。これらは、線形制御を基軸とする制御理論の実応用において、理想とする最適化を阻害したり、場合によっては安定性をも脅かす要因となっています。非線形制御の考えも多く存在しますが、広く応用されるほどの汎用性を見出すには至っておらず、もう一段の進展が待たれます。また、生産現場では、設備の立ち上がりなど、強い非線形性や非定常状態時の対応として、操業オペレータの手動運転や「介入」と呼ばれる操作を行うことで高度な生産を維持しています。線形制御の一環であるロバスト制御では、非線形性や非定常状態に起因するモデル化誤差を考慮した制御として効果を発揮していますが、操業に高い熟練度が要求されるプロセスでは、熟練オペレータの「技」が勝る場合もあります。その場合は「介入」に頼ることになり、それらは経験知や操業ノウハウとして個人や組織に蓄積されてゆきます。

2.3 制御理論の実応用

実学としてシステム制御技術を応用することは、理論ではカバーできない現実の問題を如何に解決するかが問われます。その方法は問題によって様々ですが、プロセスから得られるデータや情報を用いる方法があります。つまり、データに内在する、理論では表すことのできない「事実」を見出して、それを理論と組み合わせるという工夫です。これは、システム制御技術のみでなく、理論の実用化をミッションとする開発研究者には、必ず要求される能力だと思います。

記憶に残るのは、冷延タンデムミルのロール偏芯制御²⁾です。これは、圧延荷重とロールの回転角データを採取して、ロールの偏芯位置と偏芯量を時々刻々推定して、压下操作で偏芯を補償するシステムです。ここでは、偏芯量と位相角の各パラメータを推定するのに適応制御で用いられているパラメータの逐次推定手法を応用しました。幾何学的（理論的）に決定される偏芯モデルのパラメータを実データによって決定することから、理論とデータから得られる「事実」を組み合わせたシステムと考えられます。実用化については、丁度、

この時期に加古川製鉄所の設備技術室に駐在して、現場を経験しつつ、ロール偏芯制御システムを開発していました。研究所で開発した技術を製鉄所に移管するのとは異なり、日々変化する操業の中で開発することは、人間関係の構築を含めて貴重な体験でした。これは、その後の生産情報学への取り組みにも繋がっています。

3 生産情報学

製造に関わる理論は、物理的、数学的普遍性に基づいており、主に数式やモデルで表現されます。製造の全てを説明できないが、実データの存在しない領域での予測性が高いことがその利点です。また、製造プロセスで計測されるデータは、正しく測定されていれば測定領域において事実（真実）を表しています。大量データの分析により統計解析モデルを構築できますが、理論的普遍性を陽に表現しておらず、データ領域外での予測性は乏しいことが特徴です。一方、多くの製造現場では、オペレータや技術者の経験知や操業ノウハウによる製造が行われています。人の経験知やノウハウは個人に帰属し、共有化が困難です。また、経験知だけでは新製品の早期量産化はできません。現実には、これらの理論、データ、および人の経験知やノウハウを臨機応変に組み合わせた生産活動が行われています。そこで、計算機援用による製造支援を考えるには、これら3要素を組み合わせたシステムの構築が有効です。すなわち、製造に関わる理論・データ・操業ノウハウの融合による知的生産システムの実現により、安定生産や生産性・品質の向上、あるいは新製品の早期量産化が期待されます。これが、生産情報学のコンセプトです。概念図を図1に示します。

3.1 生産情報学の応用事例

上記のコンセプトに基づく製造事業所のリスクアセスメント³⁾を紹介します。製造現場（石油精製事業所）では、設備運転員の各個人が経験したヒヤリハット報告の情報を共有することによって、重大な事故や災害を未然に防止する活動が行われています。ヒヤリハット報告には操業者の知見やノウハウが含まれており、大量に蓄積されるものの、十分に活用されていません。そこで、リスクアセスメントにおける事故予知システムでは、大量のヒヤリハットデータに、AI技術の一環でもある確率推論（ベイジアンネットワーク）⁴⁾を適用して設備運転員に事故や不具合に関わる「気づき」を提供することで、事故の「芽を摘む」活動に繋げることを目的としています。

リスクアセスメントのための確率推論による事故予知システムの概要を図2に示します。図1と比べると、「理論・技術・数式」が図2の「理論（普遍性）」に対応しています。同様に、

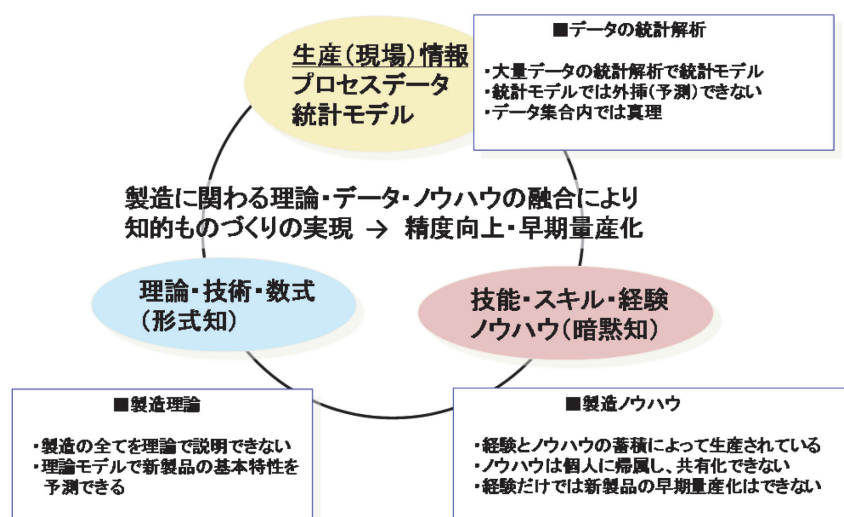


図1 生産情報学のコンセプト

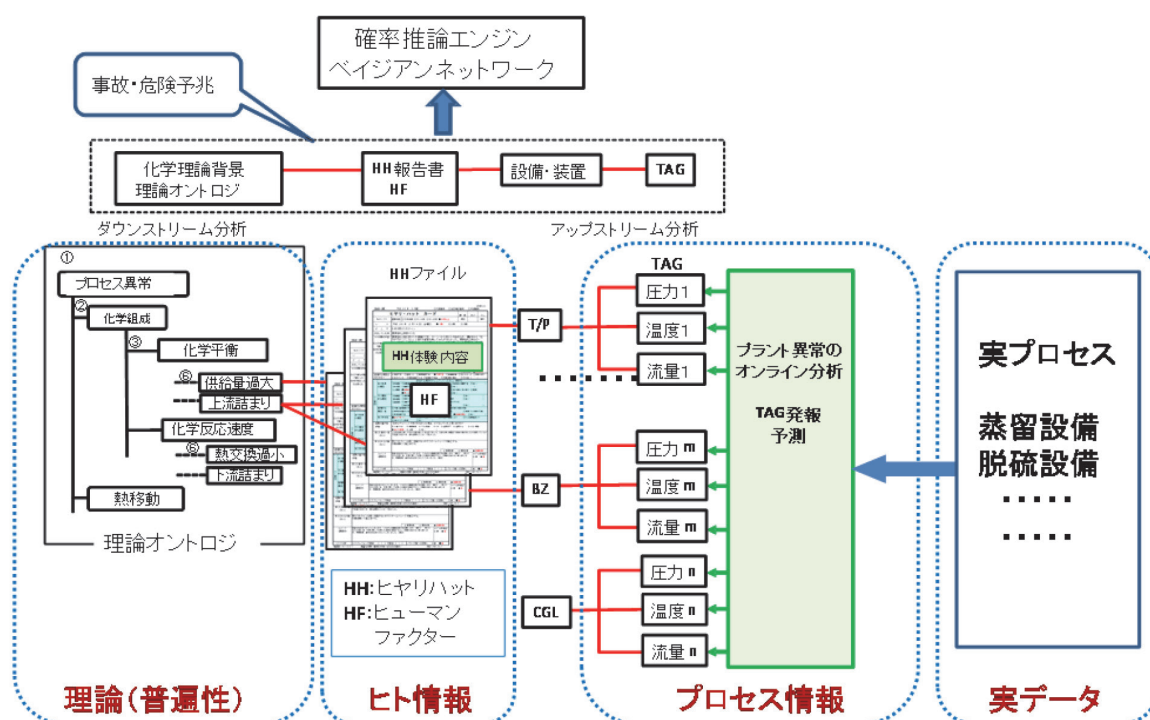


図2 確率推論による事故予知システム

「技能・スキル・経験」が「ヒト情報」に、また「生産(現場)情報」が「プロセス情報と実データ」に対応しています。ここで、TAGとは、各種センサの識別番号を表しており、ここでは、特定のTAGによる製造データの分析によって製造の異常が認められることを「TAGが発報」として表現します。推論システムは、実プロセスで起こるTAG発報を受けて確率推論を行うアップストリーム分析と理論オントロジーに記載した事故や危険の背景にある理論項目から、関連するヒヤリハット報告に紐づくTAGを推論するダウンストリーム分析で構成されています。

3.1.1 理論オントロジー

図1における「理論」の表現は、普遍性を担保すれば様々な形態が考えられます。ここでは、テキストを扱うことから、知識を体系化する方法として知られるオントロジーを用いました。ヒヤリハット報告に含まれる現場で発生する事象の原因を化学理論的に分類し、木構造に体系化した理論オントロジーを構築しています。理論オントロジーの概要(一部)を図3に示します。本オントロジーでは事象の原因が化学理論知識として「抽象-具体」の関係を表す「is-a」関係に基づき、ルート(親ノード)から順に6桁の数字とともに階層的に体

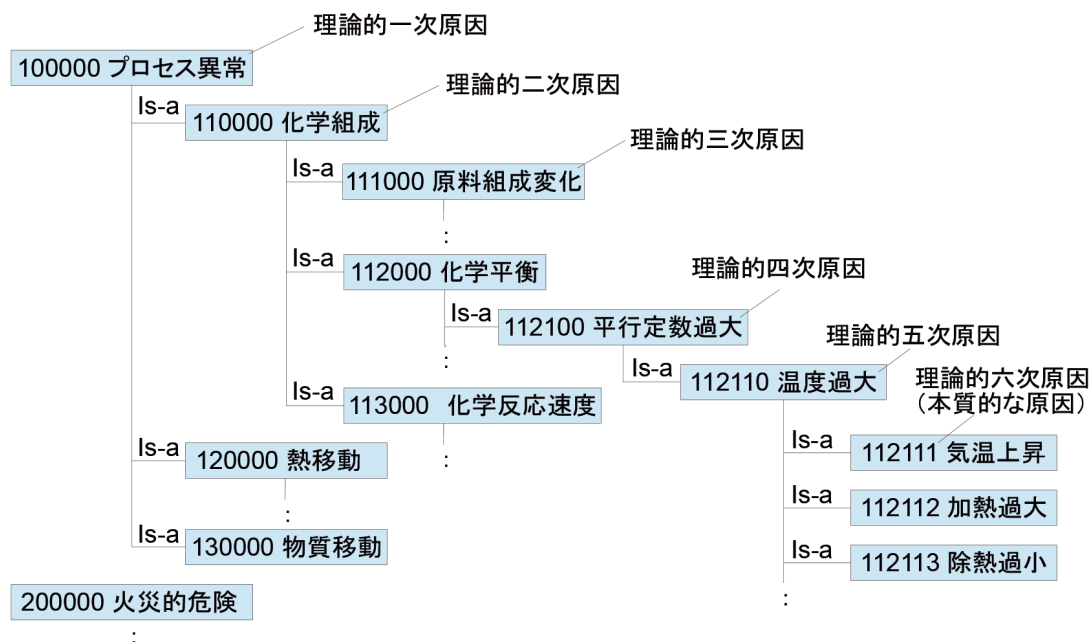


図3 理論オントロジーの概要 (一部)

系化されています。現場で発生する事象の原因は、プロセス異常、火災的危険、有害物危険、測定装置異常などに分類できます。例えば、プロセス異常のさらなる原因は、化学組成、熱移動、物質移動のいずれかに分類されます。その中でも化学組成のさらなる原因は、原料組成変化、化学平衡、化学反応速度のいずれかに分類できます。また、オントロジーの末端ノードに位置する概念は事象の本質的な原因です。理論オントロジーで体系化される化学知識については、鳥取大学に在籍する化学工学の専門家に協力を仰ぎました。

3.1.2 情報の結合と事故予知のための推論

図1では、3つの知識や情報を連携させることを示しています。事故予知システムの事例では、3つの知識や情報を、機械学習方法を用いて「紐付け」しています。また、これらのヒヤリハットや関連TAG情報は、理論オントロジーにおける膨大なプロパティと見る事もできます。3つの結合された知識や情報に対して、複数の原因と結果間の複雑な関係性を確率的に定量化することを特徴とする確率推論を適用して、プロセスの異常情報を入力として、事故予知に係る重要なテキスト情報(気づき)を抽出しています(アップストリーム分析)。詳細については、参考文献3)を参照して下さい。

4 おわりに

私は、制御理論を応用したプロセス制御システムや最適化理論によるスケジューリング技術を開発してきました。これらを生産現場で実現する活動をするうちに、製造現場で採取

される多様なデータ・情報や設備を運用する操業オペレータや技術者に内在する経験知や操業ノウハウの活用が不可欠であることに辿りつきました。最後に、私の「経験知」を以下のメッセージとして伝えます。

- (1) 理論は、現場にない情報や知識を予測することができます。
- (2) 現場で採取されるデータには、理論では見出せない事実(真実)が含まれています。
- (3) 熟練オペレータや技術者に内在する経験知や操業ノウハウには、理論やデータでは表せない興味深い知識が含まれています。
- (4) 理論・データ・ノウハウを融合した知的生産システムが有効です。
- (5) これらを達成するには、プロセスの理論を知る専門家や熟練操業者の協力を得ることが不可欠です。

参考文献

- 1) 北村章：システム／制御／情報, 56 (2012) 6, 313.
- 2) 北村章, 高橋哲也, 能勢和夫, 小西正躬, 菊地弘介：システム制御情報学会論文誌, 9 (1980) 11, 287.
- 3) 北村章, 片田直伸：システム／制御／情報, 62 (2018) 8, 305.
- 4) 繁梈算男, 植野真臣, 本村陽一：ページアンネットワーク概説, 培風館, (2006)

(2019年10月2日受付)