

(解説)



複雑な「ものづくり」をコントロールするための 意思決定支援技術（OR技術）

池田英生*¹・梅田豊裕*¹ (博士(工学))・岩谷敏治*¹ (博士(工学))・井筒理人*¹

Decision Support Technology for Controlling Complex Manufacturing (Operations Research Technology)

Hideo IKEDA・Dr. Toyohisa UMEDA・Dr. Toshiharu IWATANI・Rihito IZUTSU

要旨

当社は、複雑な製造プロセスにおける品質、コスト、納期（QCD）を管理するためにオペレーションズリサーチ（OR）に基づいた独自の意思決定支援技術を開発してきた。近年、製造業における意思決定の範囲は、単一の工場からサプライチェーンでつながった企業群へ、またQCDから環境影響に至るまで拡大している。このような複雑なビジネスエコシステムにおいて、新たな価値を創造する基盤として意思決定支援技術あるいはORの重要性が高まっている。本稿では、意思決定支援技術を構成する基盤技術と、KOBELCOの製造プロセスにおける役割を説明するとともに、実際の製造工場向けに開発されたソリューションを通じて、意思決定支援技術が提供する価値と可能性について説明する。

Abstract

Kobe Steel has developed its unique decision support technology based on Operations Research (OR) to manage quality, cost, and delivery (QCD) in complex manufacturing processes. In recent years, the scope of decision-making in manufacturing has expanded from single factories to interconnected networks of companies within supply chains, extending to considerations beyond QCD, including environmental impact. In such complex business ecosystems, the importance of decision support technology, or OR, as a foundation for creating new value has grown. This paper explains the foundational technologies that constitute decision support technology and their roles in KOBELCO's manufacturing processes. It also describes the value and possibilities offered by decision support technology through solutions developed for actual manufacturing facilities.

検索用キーワード

意思決定支援技術、オペレーションズリサーチ、数理最適化、シミュレーション、充当最適化、機械加工、カーボンフットプリント

まえがき = 製造業へのコンピュータ活用の歴史において、鉄鋼業はその黎明（れいめい）期から先端を走っており¹⁾、当社においても、ホストコンピュータによる生産管理が始まった1970年代から複雑で巨大な製鉄所の操業最適化の取り組みが開始された。当初は製鋼工程や出荷バースなど単一工程の生産計画の効率化を図る取り組みから始まったが、やがて、計算機能力が向上してくると、複数の工程が連結された人間では把握できない複雑な生産計画立案にも展開されるようになり、さらにシミュレーションによって生産性や物流搬送の変化を模擬できるようになると、新たな設備投資における事前評価や生産物流設計にも使われるようになった。

当社は、幅広い分野のお客様に対して技術・製品・サービスを提供しているが、個別の事業で見ると、同業他社と比べ相対的に規模が小さい中で事業展開を行っているケースが多い。そのものづくりは必然的に限られた製造リソースで多くの品種を製造する「多品種混流生産」になりがちであり、複雑な条件のもとでQCD（quality, cost, delivery）を安定してコントロールするためには、データに基づき設備投資や生産物流設計、日々の生産計

画に関わる意思決定を適切に行う必要がある。当社のOR（operations research）技術をベースとした意思決定支援技術（以下、意思決定支援技術（OR技術）と表記する）は、このような背景のもと当社事業モデルと連動して独自の発展を遂げてきた。

さらに、近年、デジタル化とグローバル化の進展により、サプライチェーンを構成する企業群は、より密接かつ複雑に連結されるようになるとともに、データの共有や活用によって自社だけではなしえないビジネスエコシステムとしての「最適化」が志向されるようになってきている。また、何をもって最適かを測る指標群も、従来のQCDに加え、「安全・安心なものづくりへの貢献」や「グリーン社会への貢献」など多軸的になりつつある。

当社の意思決定支援技術（OR技術）は、これら複雑で多様な現在のものづくりにおいて、当社、パートナー、さらにはお客様が連携してものづくりを最適化し、新たな価値を社会に提供していく基盤となりうる技術であり、様々な人の意志決定をデータで支える「ソリューション」として展開を図っている。

本稿では、これらの背景のもと、当社で蓄積してきた

*1 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター

本技術を構成する要素技術を解説するとともに、実際の事例を通じて、本技術が提供する価値や未来の可能性についても示すこととする。

1. 意思決定支援技術（OR技術）の概要

本章では、意思決定支援技術（OR技術）の概要について述べる。

工場では、様々な工程を経て製品が生産されていく。これらの生産プロセスの順序やその中の制約条件を数式やルールで示したものを数理モデルと呼ぶ。OR技術は、数理モデルに基づいて最適な工場生産の条件を導き、あるいは、特定の選択肢を選んだ場合の将来の状態を予測評価することで意思決定を支援する技術であり、前者は数理最適化技術、後者はシミュレーション技術と呼ばれる²⁾。

1.1 数理最適化技術

数理最適化技術は、対象となる目的関数を最大化（あるいは最小化）するような決定変数のセットを、与えられた制約条件や決定変数の許容範囲（定義域）の中で求める技術である。

数理最適化技術の中で、決定変数が長さや量などの連続変数で、かつ、目的関数や制約式が直線関係で記述できる場合を「線形計画モデル」と呼び、例えば、複数の原材料の配合割合（決定変数）を、あらかじめ定められた品質条件（定義域）を守りつつ、コスト（目的関数）を最小化するように決定したい場合などに適用される。線形計画モデルの応用範囲は、製品構成、人員配置、在庫計画など幅広く、また、最適解を実用的な時間内で厳密に求めるアルゴリズムも広く研究されている。

いっぽう、当社のような金属産業の製造プロセスにおいて生産計画を立案する際には、ロット編成や設備での処理順序などの主要な決定変数が離散値となるため、その最適化手法は決定変数の組み合わせを探索する「組み合わせ最適化」となる。組み合わせ最適化では、一般に現実的な時間で最適解を探索することは困難であり、そのため、厳密な最適性は保証できないが準最適な組み合わせを効率的に得る探索手法を問題の特徴に合わせて適用する必要がある。また、実際の操業では、品質管理や生産設備に関する様々な制約が存在し、ルールでは記述できても数式による数理モデルとしては記述困難な場合も少なくない。

当社における数理最適化技術の開発では、多品種混流生産など当社のものでつくりの特徴に合わせたモデル化手法や探索手法を構築するとともに、制約判断や目的関数を仮想的な操業モデル、すなわちシミュレータで表現する手法も組み合わせ、現実的かつ表現力の高いアプローチを実現してきた。

図1に示す組立型クランクシャフトの主要部品であるスローの熱処理計画立案³⁾においては、熱処理炉ごとに熱処理時間枠（バッチ枠）を設定したうえで、処理対象である各スローをどのバッチ枠に割り当てるかという組み合わせ最適化を行うことになるが、各スローの大きさの違い、炉内での二段積みの可否、品質面での炉内

位置制約などの複雑な条件を考慮しつつ、バッチ枠への割り当てと炉内での配置を決定する必要がある。このケースでは、バッチ枠ごとのスローの割り当てをまず仮に決定し（図左上）、専用のシミュレータを用いて制約条件を満たす最適な炉内配置を探索（図右）、その結果より熱処理納期遅れとエネルギー原単位の重み和を目的関数として評価した後に（図左下）、再度異なるスロー割り当ての組み合わせを探索する、というサイクルで最適な熱処理計画を決定探索している。

1.2 シミュレーション技術

シミュレーション技術は、対象とする問題の決定変数の変化に対する将来や変化を予測し、評価する技術である。例えば、工場設備の新設や変更、生産計画や人員配置の変化に際し、それらの変化によって発生する対象の挙動を数理モデルに基づいて予測し、各種変更案を評価して優劣判断を行うために用いられる。

図2に示す架空の製鋼工場を例として、シミュレーション技術適用の実例を説明する⁴⁾。この工場は、トビードカーから溶銑（ようせん）を溶銑鍋に移動させる払出場（charging facility）、脱硫設備（De-S）、脱リン設備（De-P）、脱炭設備（De-C）から構成され、溶銑は、上記の順に処理されると共に、溶銑鍋は設備間をクレーン（crane）で搬送される。

シミュレータの構築にあたっては、まず、各設備の動作条件や処理時間をルールベースで記述し、これを決定変数として取り扱う。このうち、動作条件としては、処理順序や各処理における溶銑鍋の状態の条件、クレーン

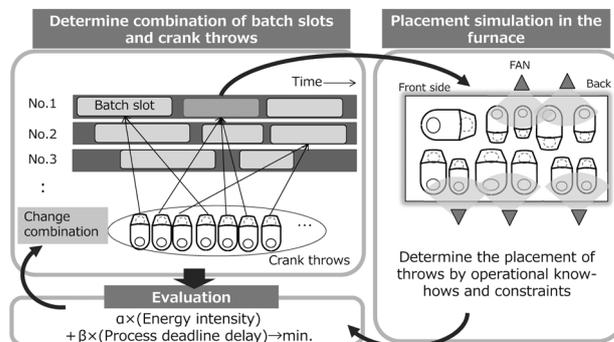


図1 熱処理バッチ編成の最適化の例
Fig.1 Optimization of batch slots combination

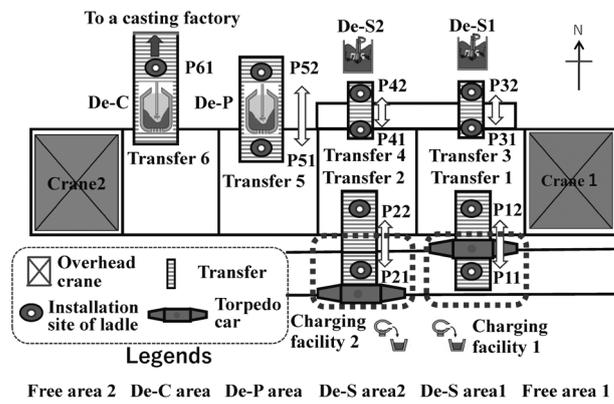


図2 製鋼工場のレイアウト例
Fig.2 Layout of steel making plant for example study

など搬送設備の制約条件などがあり、また、処理時間は常に一定とは限らず、例えば、溶銑を鍋に移動させる払出時間は、トビードカー1台から供給する場合と2台からの場合の2か所のピークを持つ時間分布となるなど設備によって確率的に変動する場合もある。このような記述モデルにしたがい構築したシミュレータを用いて生産性を示す平均出鋼間隔などの目的変数を算出すると、決定変数として設定した各設備の諸条件が目標を達成しているかどうかを評価でき、未達であれば改善案を検討する、あるいは、複数の案があればその優劣を判断することができるようになる。

シミュレーション技術の適用方法としては、前節の事例のように、最適解探索プロセスの一部として決定変数から目標変数を得るための「演算モデル」として用いる場合と、上述のようにシミュレーション結果を見ながら、目標を達成するための設備増設や操業改善などの検討や判断に用いる場合がある。とくに大規模な新設備建設の場合などは、当初の段階では全ての論点を網羅することはできないが、一定の仮定を置いたシミュレーション結果を関係者と共有し、条件検討とシミュレーション評価を反復的に繰り返しながら検討を進めることで、当社固有のカスタマイズされた生産設備群の適切な設計・運用条件の意思決定を支援することができる。

2. 意思決定支援技術（OR技術）の事例

本章では、意思決定支援技術（OR技術）を用いて当社のものづくりにおける業務プロセスやビジネスモデルの変革へとつなげるソリューション事例をトピックスとして示す。

2.1 線材・条鋼分野における充当支援システム⁵⁾

当社では2017年に加古川、神戸の両製鉄所の上工程を加古川製鉄所に集約し、神戸製鉄所（現、加古川製鉄所神戸線条工場）で使用するビレットなどの半製品は、あらかじめ加古川で製造して神戸に搬送し、一定量保持した在庫の中から製造オーダーに引き当てる「在庫補填型」に移行した。それに伴い、統合後の加古川の大ロット生産のもと、必要最小限の半製品在庫で、神戸の特徴である小ロットでの特殊線条の生産に対応する新たな生

産管理技術が必要となった。

図3を用いて今回開発した充当支援システムの概要と充当最適化技術を解説する。加古川で製造されたビレット（図左）は、神戸（図右）に搬送され、半製品在庫として保持された後、製造オーダーに対して引き当てられる（これを充当と呼ぶ）。ビレット在庫は鋼種だけではなく、 casting タイミングや重量、成分、表面品質などの条件によって数本～数十本の「ロット」に分けて管理され、また、各オーダーは充当可能なロットについてそれらの条件に関わる仕様要求を持っている。ビレットは在庫ロットからオーダー要求を満たすように充当されるとともに（図右上）、残在庫の評価結果を基に次のビレット製造が計画されるが（図左下）、加古川から新たにビレットが補充されるには一定の期間が必要となるため、充当組み合わせは、今の在庫で現在のオーダーに対応するだけでなく、残在庫による将来オーダーへの対応力（在庫戦力度と呼ぶ）をも最大化する「組み合わせ最適化問題」となる。

本システムの最適化手法では、「現在オーダーへの充当完了率」と「将来オーダーのための在庫戦力度」の二種類を指標として定義し、「充当完了率」を重視した組み合わせを探索する「広域探索」と、広域探索の結果を初期解として「在庫戦力度」を向上させる「局所探索」を組み合わせるアプローチを取った。実装においては、まず「広域探索」で現在オーダーに対応可能な解を探索した後に、「局所探索」で在庫戦力度を向上させる近傍解を探すことで、制約時間内で実用上十分な解を確保できるようになった。

本システムにより、大ロットでコスト競争力の高い加古川の上工程と、小ロットの神戸の特殊線条生産とをビレット在庫を介して連動させることが可能となり、お客様の個別要求にカスタマイズされた高品質な特殊鋼を安定供給できるようになった。

2.2 高砂機械工場生産物流管理システム⁶⁾

当社の約200台の加工機を持つ高砂機械工場は、受注設計生産による多品種混流生産を特徴とするが、局所的な負荷変動による進捗遅れが課題となっていた。それに対し、リアルタイム進捗管理と、生産リソース配分の最

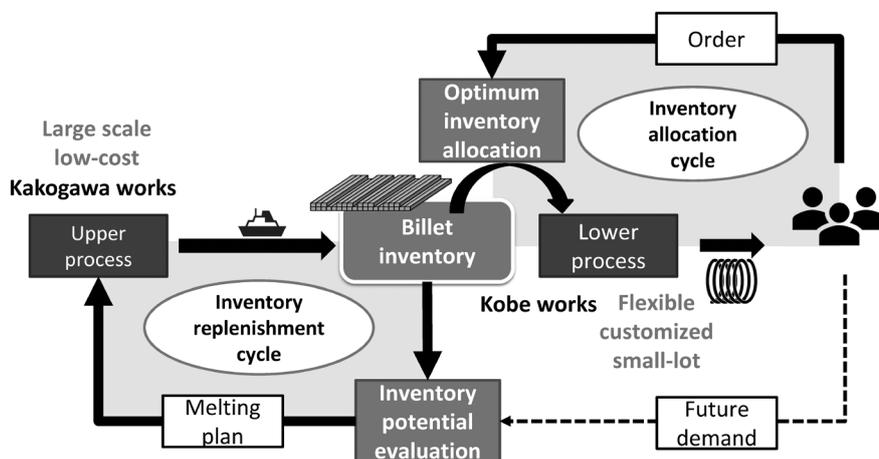


図3 充当支援システム概要
Fig.3 Overview of inventory allocation guidance system

適化によって、安定生産を実現する生産物流管理システム（iLiss：innovation of logistics and intelligent scheduling system）を開発した。図4に示す本システムは、日程計画システム（iLiss-S：図左）と物流管理システム（iLiss-L：図右）から構成され、日程計画システムは、中長期（1箇月先以降）と短期（1箇月以内）に分かれた生産計画立案を、物流管理システムは、日程計画に基づく現場への作業指示と作業実績管理を行う。ここでは、日程計画システムのロジックについて解説する。

本日程計画システムは、まず中長期計画にて負荷調整を行い、その後、調整された負荷に対して短期計画を立案することで負荷変動に対応する。すなわち、中長期計画では、納期遵守を条件として、設備・作業者に作業を割り付け、能力を超過して割り付けられた作業（超過作業）を外注化候補として抽出し、外注加工パートナーとの分担計画を立案する。短期計画では、外注化判断後に残った内作作業について、設備・作業者の能力制約に従い実行可能な計画を立案する。

中長期計画で「超過作業」を抽出するシミュレーションロジックは下記の通りである。

- ①作業選択：未割り付けで、かつ、その部品の前作業が割り付け済みの作業から、納期余裕の最も小さい作業を優先的に選択する。
- ②作業の仮割り付け：選択した作業を、まず設備・作業者能力の制約内で仮割り付けする。設備は利用可能な中で最も早く割り付けられるものを、作業者は作業できる設備数が少ない順に選択する。
- ③超過割り付け：仮割り付けした作業の終了時刻が最遅終了時刻（残り工程を標準作業時間で実施したとして納期に間に合う時刻）を超えない場合はそのまま確定する。超える場合は、最遅終了時刻に間に合う設備・作業者に、能力制約を無視し、「超過作業」として割り付けする。
- ④その後、全ての作業が割り付けられるまで、上記①～③を繰り返す。

このように、中長期計画の段階で「超過作業」を適切に抽出することで、計画の初期段階から外注化の調整・判断ができるようになった。さらに、物流管理システムによる全体の進捗状況の把握と合わせ、外注加工パートナーと効率的に連携したものづくりによって、受注設計生産による負荷変動の大きな多品種混流生産に対応できるようになった。

2.3 製品別CFP算出モデル

世界各国で取り組み強化が進むカーボンニュートラルに向け、当社においても、金属素材事業を想定した製品別CO₂排出量（CFP：carbon footprint of production）を算出・分析するモデルを検討中である。これは、製品別原価管理モデルを拡張してCO₂排出量として算出するものであり、従来のQCDに加え、将来的には環境負荷という観点でも個別製品を評価可能とすることを目的としている。

当社で検討中のCFP算出モデルを図5に示す。計算範囲としては、当社製品の製造から製品をお客様にお届けするまでとし、具体的には、原材料の調達、エネルギーの調達・使用、消耗品や副資材類の購入、廃棄物処理、外注加工、調達および製品納入時の輸送などを対象とした。

本モデルでは、四種類の入力情報（図左）を用いて計算することを想定する。

- ①エネルギー使用量：電力、LNG、灯油など、期間内に工場で利用したエネルギーの使用量。設備や部門単位で算出する。
- ②購買・発注情報：原材料、設備や部門別の消耗品類の購入、製品ごとの外注加工先、輸送先、輸送手段などの情報。事前にグルーピングした上で④のCO₂排出係数とひもづける。
- ③製造中のマテリアルフロー：期間内に生産した製品の製造実績から素材の分割やりサイクルなどの流れと工程ごとの処理時間や重量のデータ。製品仕様と製造工程別に集計する。
- ④CO₂排出係数：①②で設定した各項目の物流や設

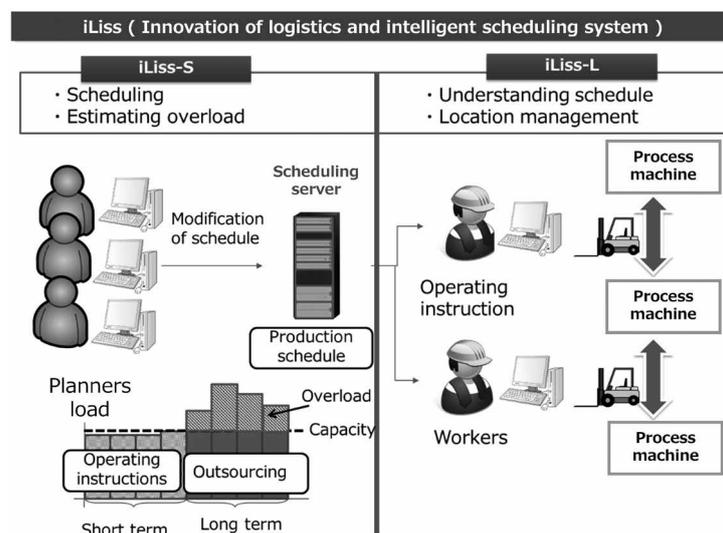


図4 iLissの概要
Fig.4 Overview of iLiss

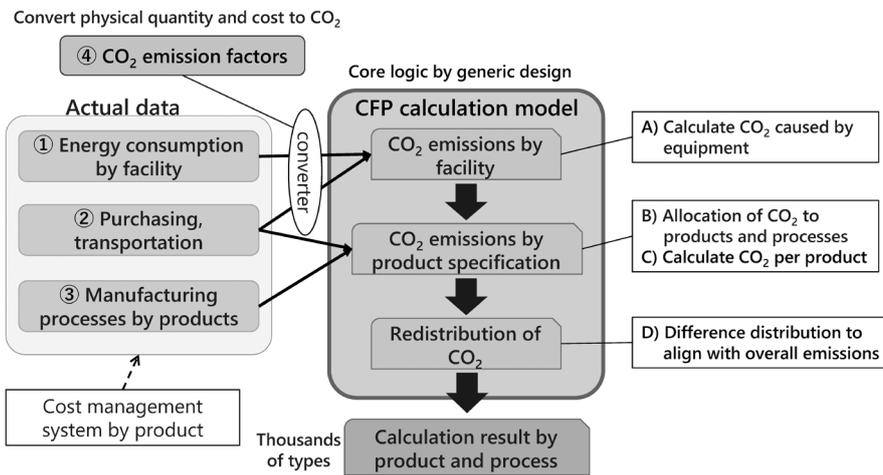


図5 CFP計算モデル
Fig.5 Calculation model of CFP

備の情報を、CO₂排出量に変換するための係数テーブル。産業技術総合研究所にて開発されたIDEAなど、標準的に利用される公開情報を使用する。

上記の入力情報を用い、下記の手順（図右）により算出を行う。まず、A) 設備別のCO₂排出量の合計を算出し、B) それを各製品に対して使用実績に基づき配賦する。C) それにマテリアルフローによる金属素材あたりのCO₂排出量を組み合わせて製品別CO₂排出量を計算し、D) 必要に応じて再配賦して拠点全体との整合性を担保する。

このような算出モデルを用い、製品別CO₂排出量をデータに基づき合理的に計算することができるようになると、まず、企業単体として、CO₂排出量を基準に設備・工程設計・製品構成の検討・評価が可能となるとともに、サプライチェーン上の企業間でのデータ連携を通じ、製品製造プロセス全体としても評価が可能となる。このような算出モデルと最適化やシミュレーションなどの意思決定支援技術（OR技術）を組み合わせることにより、社会全体としてのCO₂排出量削減にも貢献していけると考える。

むすび = 当社では、40年以上前から「ものづくり」においてOR技術をベースとした意思決定支援技術を活用してきた。当初は、単一プロセスのコスト、納期達成率などの単純指標の最適化、シミュレーションであったが、それが、複数プロセスに広がり工場全体の様々な指標を対象とし、あるいは社外のステークホルダも考慮した技

術に進展してきた。

20世紀までの「ものづくり」では、自社のQCDを考慮するだけで十分であったが、近年はESGを考慮した経営が必要となってきている。これらの課題は、自社だけではなく、当社のパートナーやお客様を含めたサプライチェーン全体で対応する必要性も生じてくるなど、意思決定支援技術（OR技術）で解決すべき課題はますます複雑になってきつつある。

いっぽう、本技術と関わるICT周辺技術では、従来では取得できなかった操業状態を詳細かつリアルタイムに取得できるIoT技術や、従来解けなかった複雑な問題を短時間で解ける量子コンピュータ、サプライチェーン上の複数の企業が適正に情報を共有するためのブロックチェーン技術など、多くの技術進展も生まれている。

このような状況変化に対し、当社では意思決定支援技術（OR技術）を様々な新技術と組み合わせ、より複雑で高度な社会課題に対して解決に取り組んでいきたいと考える。そして、それらを通じた当社の「ものづくり」の新たな価値を社会に提供する「ソリューション」としても具体化を図っていく所存である。

参考文献

- 1) 井上義祐. 計測と制御. 1968, Vol.7 No.2 p.97-106.
- 2) 森戸晋ほか. オペレーションズリサーチ. 1998, Vol.43 No.2 P81-87.
- 3) 梅田豊裕ほか. 自動制御連合講演会. 2019, Vol.62 1D1-03.
- 4) 岩谷敏治ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.29-35.
- 5) 白坂貴成ほか. R&D神戸製鋼技報. 2019, Vol.69, No.2, p.73-78.
- 6) 井筒理人ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.3-6.