鉄鋼とOR

中川 義之，熊本 和浩，小西 伸之，西田 大，坂井 伸弘*

1．はじめに

鉄鋼業においては，昨今の経済状況を反映して，さらなる経営体質の改善のため，たとえば，歩留・稼働率の向上等による製造コストの削減，生産性の向上といった課題に直面している．

鉄鋼業は，巨大装置産業と呼ばれるように，その製造プロセスは大規模な設備の集合体である．製造現場においては，その工程は大規模なバッチ式あるいは半連続式の資源（設備）が多段階に連結された形態となっており，物流現場においては，鉄鋼製品を大型搬送設備により運搬しなければならない．

したがって，これら製造・物流現場における大規模な設備を有効に活用することなくして，製造コスト削減や，生産性向上といった課題は解決されない．

ORの技術は，大規模設備の複雑でかつ厳しい操業条件のもと，人間の勘と経験だけでは対応しきれない状況においても，強力な武器となる．すなわち，現在の状況こそが，ORを活用すべきかつてない機会なのである．

住友金属工業においては，1960年代初頭に中央技術研究所（当時）内のOR研究グループとして活動を開始し，以来30年以上にわたってOR技術の全社活用，展開を図ってきた．その間，日々進歩するOR要素技術を積極的に取り入れ，実適用を行うことで，膨大なOR適用技術を蓄積してきた．

そして現在，蓄積してきたOR適用技術を活用し，さまざまな業種を対象とした外販活動，すなわちORコンサルタント事業を展開しつつある．

本稿では，鉄鋼製造プロセスにおけるOR対象問題を概観したのち，OR適用技術の中核ともいえるORモデリング技術について，事例として取合せ問題を取り上げ，その解法を紹介する．

2．鉄鋼業におけるOR問題の分類

素材加工産業である鉄鋼業において，鉄鋼製品を製造するプロセスは概して次のような形態をとっている．

まず，鉄鉱石，コークス等の原料が高炉と呼ばれる設備に装入，溶融され鉄鉱石が含有する酸素が還元反応によって除去され，溶銑が製造される．そして溶銑は転炉と呼ばれる設備においてさまざまな添加物が加えられ，あるいは不要な化学成分が除去され，成分調整されて，炭素鋼，ステンレス鋼といった多種類の材質の溶鋼となる．

次に，この溶鋼は連続鋳造あるいはインゴット造塊工程において，冷却，固化され，スラブ，ブルーム，ビレットと呼ばれる中間素材が製造される．最終的に，これらの中間素材が圧下，引き延ばされ（圧延），薄板コイル，厚板，条鋼，パイプ等の鉄鋼製品ができあがる．

このように鉄鋼製造プロセスは1つの大きな素材を分割，加工し，極めて多種類の製品につくりあげてゆくブレイクダウン型の製造工程である．

最終工程で製造される極めて多種類の製品において，納期・品質といった顧客ニーズを満足させるため，初期工程の段階から，さまざまな制約条件・目的関数を視野にいれる必要がある．同時に，多段階に連結されたバッチ設備を稼働させるため，操業・設備制約条件を充足する解を見つけなければならない．つまり，鉄鋼製造プロセスとはさまざまなタイプのOR問題を随所に内包するプロセスである．

当社ではこれら問題を1つ1つ解決し，ノウハウを蓄積し，それを次の問題の解決に活かすという活動を長年にわたり繰り返してきた．鉄鋼製造プロセスにおけるOR問題を対象分野という視点から分類すると次

なかがわ よしゆき，くまもと かずひろ，
こにし のぶゆき，にしだ はじめ，さかい のぶひろ*
住友金属工業(株) 住友金属システム開発(株)*
〒541-0041 大阪市中央区北浜4-5-33

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

のようになる。

(1) 原料計画

さまざまな成分・品位の鉱石を，所定の品位になるようにうまく配合して，高炉に装入する計画である。このような原料配合計画に対しては，線形計画法が有効である[1]。

(2) 製造計画

① 材料計画

製造コスト削減のため，極力同一仕様の注文を取りまとめ，製造ロットを大きくする。このとき，当然コスト高にならないよう，注文を取りまとめ(取合せ)，母材化する必要がある。これには遺伝アルゴリズムをはじめとするメタ・ヒューリスティクス[2]，数理計画法[3]などの手法の適用が可能である。

② 操業計画

鉄鋼製造プロセスは前述のとおり大規模なバッチ設備からなる多段階のジョブショップ型である。さらに，ロット生産するための注文集約条件や，段取替条件などの厳しい制約条件がある。このような中で，各設備に対する注文毎の製造順序を決定する操業スケジューリング問題は，製造コストを左右する極めて重要かつ困難な問題である。ここでは，その対象規模と計画精度から，以下 i ～ iv のレベルに分類し，分枝限定法，動的計画法やこれらにヒューリスティクスを組合せた手法により問題解決を図ることができる。

i 月間，週間，日単位の生産スケジューリング[4]～[7]

ii 操業スケジューリング[8]～[10]

iii リアルタイムスケジューリング[11]

iv 個別最適化スケジューリング[12][13]

(3) 物流計画

① 配船計画

原料である鉄鉱石や，製造した鉄鋼製品を運搬する配船（各船の航海スケジュール）は，単に滞船料の削減だけでなく，原料供給という製鉄所操業の死活問題にもつながりうる。数理計画法などを活用すれば，配船計画の立案や，荷役作業の効率化が可能である。

② 配送計画

各工場でロット単位に生産された製品は，倉入を経由する過程で出荷先単位の出荷ロットに組み替えられる。配送計画では工場－倉庫－浜出し（出荷岸壁への製品の搬出）・出荷間の製品輸送が対象とされ，製品と運搬車両の割当てや，車両走行スケジュール，さらには，船積計画（船積方法と船積み順序づけ）などが大きな課題である。ここでは分枝限定法や離散事象シミュレーション技法などが有効である。

以上，鉄鋼製造プロセスが内包する OR 問題を対象分野別に分類してみたが，これらの問題は数理的な視点から以下の 3 タイプにも分類できる[15]。

・type 1 ：順序づけ問題／スケジューリング問題
　　（注文の製造順序・時刻決定等）

・type 2 ：取合せ問題／ナップザック問題
　　（注文のグルーピング等）

・type 3 ：割当て問題／マッチング問題
　　（注文と設備との対応づけ等）

すなわち type 1 は注文の圧延順序づけ等，時間軸に沿って動的な順序を決定する問題である。type 2，type 3 は，時間軸の考慮を必要としない静的なタイプであるが，前者は大きな枠（たとえば母材）に注文等を取合せる（グルーピング）問題であり，後者は製品と車両との割当てなど，$n:m$のマッチングを行う問題である。

鉄鋼製造プロセスにおける OR 対象分野と問題タイプとの対応表を**表 1** に示す。

3．OR モデリングの事例 ～取合せ問題～

本章では，当社における OR 技術活用の経験を蓄積した OR 適用技術のうち，その中核ともいえる OR モデリングの事例について述べる。

OR 問題を解くためにはモデリング，すなわち現実問題を計算機の世界で扱いやすい数理的表現された世界に変換する作業が必要不可欠である。いったんモデリングされた問題は適切な手法で解かれ，その解を活用することで製造コスト削減等の目的が達成される。

すなわち，最初のモデリングの良否が解の精度，ひいては本来の目的の達成度を大きく左右する。このモ

表 1　鉄鋼製造プロセスにおける OR 対象分野と問題タイプ

問題 type ＼ 対象分野	type 1 ：順序づけ問題／スケジューリング問題	type 2 ：取合せ問題／ナップザック問題	type 3 ：割当て問題／マッチング問題
(1) 原料計画		○ [1]	
(2) 製造計画	○ [4]～[13]	○ [2][3]	○ [16][17]
(3) 物流計画	○		○ [14]

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

デリング技術こそが，目的達成のための強力な武器であるといっても過言ではない．

本節では，当社で扱ってきたOR問題モデリングの一事例として，母材（2次元の領域）に複数の注文を取合せる問題（前述のtype 2に該当）を取り上げ，その解法[3]を紹介する．

3.1 問題の定義

鋼板，ガラス，紙，フィルム等の素材製造においては，複数の注文を母材に集約（大ロット化）し，生産する形態をとる．このような場合，母材の余剰となる部分を最小化するように，母材に注文を取合せ（組合せ）てロット化することは，コスト削減の面で極めて重要である．

ここでは多種類の矩形注文品を帯状の母材に取合せる問題を考える．注文は母材を長手方向と幅方向に切断することにより割当てられる．注文の製造プロセスのイメージを図1に示す．

まず，母材を長手方向に切断（STEP 1）した後，いったん，幅方向に切断（STEP 2）し，帯状の中間素材を生成する．次にこの中間素材を幅方向に順次切断しながら注文を切り取っていく（STEP 3）

母材に注文を割当てる際には，幅方向の製造ロス（幅ロス），必要注文数以上の製造（過製造）を最小限に押さえることがコスト削減のために必要である．また設備・操業上の制約条件としては，幅方向に取合せる注文数（スリッタの刃数に起因），顧客ニーズに合わせた品質上の制約としては，注文を配置する位置などが存在する．これらの制約条件下で，幅ロス，過製造を最小化するように，注文を取合せることが本問題の目的である（図2参照）．

3.2 モデリングの概要

本問題を解くためには，問題を計算機で扱える（求解できる）形への定式化，すなわちモデリングする必要がある．

本問題では，同一あるいは異なるサイズの注文が母材の幅方向に取合されるため，まず幅方向の配置を考える．

この配置を‘取合せパターン’と呼ぶことにする．多種多様な注文が存在するため，‘取合せパターン’を形成する注文の組合せが幾通りも存在することになる．そこで，‘取合せパターン’を列挙し，次に目的を達成するような‘取合せパターン’の組合せを決定する．以下そのモデリング方法について述べる．

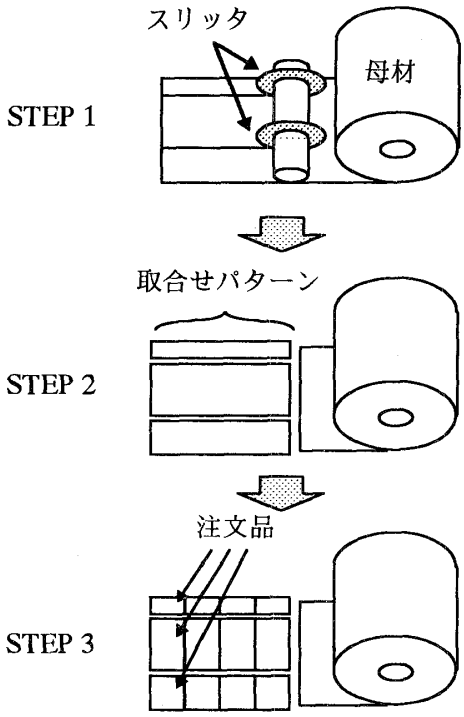

図1　製造プロセス

【手順1】取合せパターンの列挙

まず，母材の幅方向に取合せ可能な注文の組合せを列挙する．次に，幅方向にならべられる注文数（スリッタの刃数に対応），特定注文の母材位置等，幅方向の取合せに関する制約条件をチェックし，現実的に可能な組合せのみを列挙する．これらの可能な取合せパターンを行列で表現する．3種類の注文A，B，Cがある場合の例を図3に示す．

【手順2】数理計画問題への定式化

【手順1】で列挙された取合せパターンのうち，目的を達成するような組合せを選択し，選択されたパターンの母材長手方向の長さを決定してやればよい．これは整数計画（IP：Integer Programming）の問題として次のように定式化できる．

$$\min \quad \sum_i c_i^1 d_k + \sum_j c_j^2 l_j x_j \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_j p_{ij} x_j - d_i = b_i, \quad i=1,\dots,m \tag{2}$$

$$y_j - L z_j \leq 0, \quad j=1,\dots,n \tag{3}$$

$$x_j = y_j + M z_j, \quad j=1,\dots,n \tag{4}$$

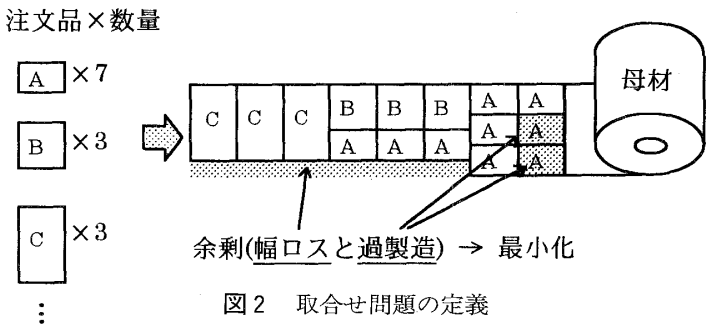

図2　取合せ問題の定義

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

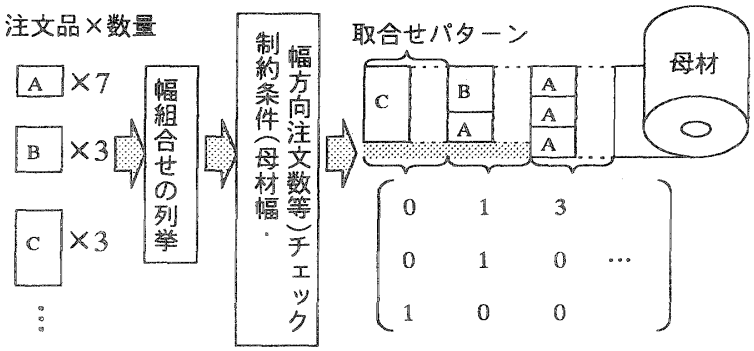

図3　取合せパターンの列挙

$$x_j, y_j \geq 0, \text{integer}, \quad j=1,\ldots,n \tag{5}$$

$$z_j \in \{0,1\}, \quad j=1,\ldots,n \tag{6}$$

ここで,

i：注文品の添字

j：取合せパターンの添字

c_i^1：過製造に対するペナルティ係数

c_j^2：幅ロスに対するペナルティ係数

x_j：取合せパターンjの製造量

y_j：取合せパターンjの製造量下限値を越えた製造量

z_j：0/1変数（取合せパターンjが採用される場合：1，採用されない場合：0）

p_{ij}：取合せパターンjに含まれる注文品iの数

d_i：注文品iの過製造量

b_i：注文品iの受注量

L：十分大きな定数

M：取合せパターンの製造量下限値

l_j：取合せパターンjの幅ロス

式(1)における，c_i^1, c_j^2は各々過製造と幅ロスのペナルティ係数である。過製造のペナルティ係数c_i^1は，特定サイズの在庫を保持したくない場合，在庫を備蓄したい場合等のコントロールに使用できる。式(2)は各注文が所定の注文量を充足するための条件である。これにより該当注文の発注主である顧客のニーズを満足することができる。式(3)～(6)は取合せパターンjが採用される($z_j=1$)場合は必ず，製造量下限値M以上とる必要があることを表現した制約式である。これは段取り替えコストの低減等，設備の稼働率向上を狙いとした，本例固有の制約条件である。

3.3 求　解

混合整数計画問題として定式化された問題は種々手法[18]により求解可能である。また，市販のパッケージソフトを活用することも開発生産性向上のためには有効である。

本手法は実データを用いた計算により平均99.2%の歩留を達成した。これは従来法（ハンドによる）に比べて約1%歩留を向上させたことになる。求解時間については生成列数が約3,000のとき，求解時間は約3分，生成列数が約1,000のとき，求解時間は1分以内であった。使用計算機はSPARC station 20 (SUN Microsystems製）である。

4．おわりに

住友金属工業(株)においてORグループが誕生して35年以上になる。これまでの経験から，鉄鋼製造プロセスにおけるOR対象分野と問題タイプを整理してみた。また，OR問題モデリングの実践例として，取合せ問題を取り上げ，その解法を紹介した。本事例は元来鉄鋼プロセスを対象に開発したモデリング法ではあるが，現在では他業種にも応用，活用している。

鉄鋼製造プロセスのみを対象としても実に数多くのOR事例が存在する。これらの経験・ノウハウの蓄積がモデリングに役立っているものと自負する。近年，計算機の高速化，数理計画汎用パッケージソフトの高性能化などから，従来では求解できなかった大規模問題が比較的容易に解けるようになってきた。世の中に存在する数多くの問題，これがたとえどんなに複雑であろうと，いかにその本質をとらえ，数理的視点でモデリングできるかがOR実施のポイントではなかろうか。

本事例が今後のOR発展のための一助になれば幸いである。

参考文献

[1] N.Ueno et.al.：Management and Control Systems for Raw Materials Operation in Iron Steel Industries, IFAC 3M Symposium/Preprints, 1986

[2] 平山，梶原 ほか：ハイブリッド遺伝アルゴリズムの厚板スラブ設計への適用，システム制御情報学会論文誌, Vol.9, no.9, pp.395-402, 1996

[3] N.Konishi et.al.：A MIP-based Approach to the Cutting Stock Problem with Minimum Production Amount Constraint, APMS'96, pp.603-608, 1996

[4] 中川，熊本，淺田ほか：バックワード・フォワードスケジューリングを活用した多段工程操業計画法，日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集，pp.24-25, 1995

[5] 外嶋，杉原ほか：EWSを活用した継目無管工場操業

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

計画システム，第36回システム制御情報学会研究発表講演論文集，pp.105-106，1992
[6] 外嶋，杉原ほか：多重ループを含む多段階工程ジョブショップスケジューリング，日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集，pp.52-53，1992
[7] K.Asada et.al.：Cell Sequencing Approach to Multi-Stage Production Scheduling，APMS'96，pp.609-614，1996
[8] 今井，中川ほか：中間工程の順序計画固定型一貫操業スケジューリングシステム，日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集，pp.306-307，1996
[9] 山田，西田 ほか：ジョブショップ型生産工程における搬送を考慮した操業計画シミュレータの開発，日本機械学会第74期全国大会講演論文集，pp.283-284，1996
[10] 上野，中川，熊本ほか：鉄鋼生産におけるあいまいな制約を考慮した操業スケジューリング，日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集，pp.196-197，1991
[11] 藤原 ほか：和歌山冷延・表面処理工場コイル物流制御システムの開発，日本鉄鋼協会講演論文集「材料とプロセス」Vol7，p.339，1995
[12] M.Nagai et.al.：Efficient Scheduling Algorithm for Steel Sheets Manufacturing，APORS'94，pp.382-289，1994
[13] R.Tamura et.al.：Functionally Partitioned Scheduling System Equipped with Two-stage Scheduling algorithm in Steel Manufacturing，Japan-U.S. A Symposium on Flexible Automation，pp.1107-1113，1994
[14] 中川 ほか：製鉄所における鉄鋼製品の輸送計画法，オペレーションズ・リサーチ，Vol.39，No.3，pp.131-135，1994
[15] 中川：鉄鋼業における離散事象システムの最適化（第5章），離散構造とアルゴリズムIII，近代科学社，pp.163-204，1994
[16] 西田，山田 ほか：列生成法による鋳型設置場所割当問題の解法，日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集，pp.112-113，1996
[17] 中島，梶原 ほか：受注計画・操業計画のための負荷予測システムの構築，生産スケジューリングシンポジウム'96講演論文集，pp.145-150，1996
[18] 岡本：一般の整数計画問題と分枝限定法（第4章），整数計画法と組合せ最適化，日科技連，1982

基礎課程 微分積分 I, II
西山 享著　A5・約150～200頁・予価各1600円

フーリエ解析・ラプラス変換
寺田文行著　A5・約100頁・予価1200円

詳解演習 微分積分
水田義弘著　A5・352頁・2色刷・2200円

月刊誌 **数理科学**
毎月20日発売／952円
12月号・特集
類体論の100年
類体論の歴史と概要　三宅 克哉
パラダイムとしての p 進解析　足立 恒雄
代数群におけるHasseの原理について　佐武 一郎
高木貞治先生の思い出　彌永 昌吉
類体論の一般化について　加藤 和也
シャファレヴィッチ-テイト集合について　小野 孝
類体論に関連した諸問題について　山本 芳彦

新時代のコンピュータ総合誌　隔月刊
Computer Today
偶数月18日発売／905円
11月号・特集
ネットワークコンピューティングの新展開
——オープンJavaのもたらすもの——
OpenJIT　松岡 聡
——自己反映計算に基づいた動的に変更可能なJavaJITコンパイラ
拡張可能Javaプリプロセッサ EPP　一杉 裕志
CORBA 3.0/IIOPの動向と今後の展望　鈴木 純一
Ninf　関口 智嗣
——高速ネットがもたらすグローバルコンピューティングの夢と課題

サイエンス社
〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷1-3-25
TEL (03)5474-8500 FAX (03)5474-8900
http://www.saiensu.co.jp ＊価格は税抜き。

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．