

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19700239
 研究課題名（和文） 鋼板製造を対象としたスケジューリング・システム
 研究課題名（英文） A Scheduling System for Manufacturing Steel Sheet
 研究代表者
 岡本 東 (OKAMOTO, AZUMA)
 岩手県立大学・ソフトウェア情報学部・講師
 研究者番号：10305310

研究成果の概要：分解型工程を有する素材型産業を対象とした、生産スケジューリング手法とスケジューリング・システムの研究を行った。まず、鋼板製造工程を、多段階ハイブリッドフローショップとしてモデル化し、問題の定式化を行った。次に、ディスパッチング・ルールとメタ戦略による手法を開発した。また、生産計画とスケジューリングの統合手法を開発した。これらの成果を元に、Web 技術を活用したスケジューリング・システムの開発を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	600,000	0	600,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,100,000	150,000	1,250,000

研究分野：生産スケジューリング

科研費の分科・細目：情報学・情報図書館学・人文社会情報学

キーワード：スケジューリング・鋼板製造・分解工程・メタ戦略・フローショップ

1. 研究開始当初の背景

近年、製造業において、最適化理論に基づくスケジューリングが実用になり、情報システムの重要性が高まった。1980 年代には生産スケジュールの最適化に関する多数の研究が行われ、また、日本の製造業、特にトヨタ生産方式を対象とした研究が行われ、理論の体系化や改良された生産方式が確立されてきた。1990 年代には単なる工程の最適化だけでなく、顧客からの要求に基づき資材調達まで含めたスケジューリングによって納期回答を行う ATP (Available to Promise) や、SCM (Supply Chain Management) 等の要素も含んだ APS (Advanced Planning and Scheduling) が登場した。これらの理論の発展によるスケジューリング・ソフトウェアの進歩、およびコンピュータの高速化・大容量化・低価格化等ハードウェアの進歩によって、製造業は情報システムによる効率化が進められた。

しかし、製造業に原材料を供給する素材型産業や食品加工業等、従来の理論がそのまま

適用できない分野も依然として存在する。これらの業種における工程で多く見られる分解型工程には、一般的な機械工業等の組立型工程にはない特徴が多くあり、従来の理論がそのまま適用できないことが多い。また、在庫を持たない JIT (Just in Time) を実践している製造業に対し、部品を供給するサプライヤは、任意の時間に要求された量を出荷しなければならない。しかし、これを実現するための確立された方法はなく、過剰な在庫をもって対応しているのが現状である。

素材型産業の一つである鋼板製造には以下の特徴がある。

- 多品種を前提とした変種変量生産である。鋼板は、用途に応じて金属の組成・厚さ・幅・めっき等について様々な種類とそれらの組合せがあり、最終製品は極めて多品種である。更に、鋼板を使用する製品（自動車等）のモデルチェンジによって需要が大きく変化する。
- 工程の上流と下流でロットサイズが大きく

く異なる。製鋼工程では（溶鉱炉の大きさに応じて）一度に大量の同種の組成をもつ半製品（スラブ）が作成される。一方、最終製品（自動車鋼板等）は少量ずつ出荷される。ここで、金属の組成は溶鉱炉に投入する材料の配合で決定され、後から変更することはできない。

- 板幅の広い鋼板の後に狭い鋼板を圧延するといった先行関係の制約が存在する。圧延に用いるローラーの磨耗の関係から、逆順となる場合にはローラーの交換に伴う段取りが発生する。これを行わない場合、後から製造した鋼板の前に製造した鋼板の縁のあとが転写されてしまう。同様の理由で同幅の鋼板の連続生産にも限度がある。更に、板厚の変化についても制約がある。
- この他、金属の特性や熱に関する特性により、工程の順序や時間に関する様々な制約が存在する。

鋼板製造スケジューリングのもつ特徴である分解型工程、工程によるロットサイズの変化、変種変量生産は、食品加工業等多くの業態に共通であり、生産計画・スケジューリングを難しくしている要因でもある。これらの業態においても、本研究におけるスケジューリング手法が応用できると考えられる。

2. 研究の目的

(1) 分解型工程を有する素材型産業を対象とし、効果的な生産スケジューリング手法の開発を行う。鋼板の製造工程の形態は、多段階ハイブリッドフローショップにあたる。これは、各工程が単一の機械を使用するフローショップと異なり、工程が複数の機械で構成されている。従来のディスパッチング・ルール及びメタ戦略とその複合アルゴリズムについて、実験を行う。

(2) スケジューリング・システムを構築する。生産現場におけるスケジューリングでは、計算機によって求められたスケジュールを常にそのまま適用することはできず、現場における制約や急な障害などに対応してスケジュールを変更する必要がある。このため、スケジューリング・システムには、現場担当者がスケジュールを目視し、必要に応じて変更を行うことができるユーザインタフェースが必要である。ここでは、XML (Extensible Markup Language), SVG (Scalable Vector Graphics), ECMA Script (ISO/IEC 16262)をはじめとする近年の Web 技術を活用したスケジューリング・システムを作成する。

3. 研究の方法

(1) 分解型工程を有する素材型産業を対象とし、効果的な生産スケジューリング問題を定式化する。現実の鋼板製造の制約と評価関数

（制約違反のペナルティ等を含む）を明確にし、モデルを作成する。その特性を解析的な手法やシミュレーションによって明らかにする。

(2) 従来のディスパッチング・ルールをベースにしたスケジューリングの改良についての研究を行う。実験データとそのデータに基づく最適スケジュールを元に、データマイニングによってディスパッチング・ルールを生成する。ここで得られたルールと従来の人手で作成したルールについて数値実験を通してスケジューリング結果を比較し、ディスパッチング・ルールの作成に関する知見を得る。

(3) メタ戦略による解の改善に関する研究を行う。既存アルゴリズムによる解（スケジュール）を初期解とし、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm)をはじめとするメタ戦略に基づく最適化についての実験を行い、適切なアルゴリズムを選択する。

(4) アルゴリズム開発の成果を元に、生産計画担当者の意思を介在させることができる Web によるユーザインタフェースをもつスケジューリング・システムを構築する。

4. 研究成果

(1) 鋼板製造工程（図 1）を、多段階ハイブリッドフローショップ（図 2）としてモデル化し、スケジューリング問題の定式化を行った。一般的なハイブリッドフローショップの特性に加え、作業の優先順位を導入し、優先順位の低い作業から高い作業へ順に連続で実行する場合に、段取り替え時間のペナルティを課す。これにより、鋼板圧延工程特有の順序依存関係（鋼板の幅の広いものから狭いものへ順に行う）を表現した。さらに、鋼板の厚さの変化に対する段取り替え時間も追加した。また、以下の実験では、目的関数をメークスパンの最小化と納期遅れの最小化の 2 目的として用いた。

以下に数学モデルの一部を示す。

k, l : オーダのインデックス, $k, l = 1, 2, \dots, K$

i, j : 作業のインデックス, $i, j = 1, 2, \dots, J_k$

g : 工程段階のインデックス, $g = 1, 2, \dots, H$

m : 資源のインデックス, $m = 1, 2, \dots, N_g$

K : オーダの総数

J_k : オーダ k における作業の総数

N_g : 段階 g における資源の総数

H : 段階の総数

d_{ki} : オーダ k 作業 i (以下 (k, i)) の納期

p_{kigm} : (k, i) の資源 (g, m) における作業時間

r_{kij} : (k, i) と (k, j) の先行関係制約 (制約有: 1)

t_{gm} : 資源 (g, m) における段取り替え時間

u_{ki} : (k, i) の優先順位

v_{kij} : 段取り替えの有無 ($u_{ki} < u_{ij}$ の場合 1)

w_{kij} : (k, i) と (k, j) の作業順序 ($c_{ki} < c_{kj}$ の場合 1)

A_{gm} : 資源 (g, m) で実行可能な作業の集合

c_M : メークスパン

T : 納期遅れの総和
 x_{kigm} : 作業割当ての決定変数 ((k, i) を資源(g, m)に割当て: 1)
 c_{ki} : (k, i) の作業完了時刻

$$\min c_M = \max_{k,i} c_{ki} \quad (1)$$

$$\min T = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{J_k} \max \{c_{ki} - d_{ki}, 0\} \quad (2)$$

$$\text{s. t. } (c_{kj} - p_{kigm} - c_{ki}) r_{kij} x_{kijgm} \geq 0, \forall i, j, k, m, g \quad (3)$$

$$(c_{lj} - p_{ljgm} - t_{gm} v_{kij} - c_{ki}) w_{kij} x_{kijgm} x_{ljgm} \geq 0 \quad (4)$$

$$\forall (k, i), (l, j), m, g$$

$$x_{kigm} = 0, \forall (k, i) \notin A_{gm}, \forall m, g \quad (5)$$

$$\sum_{g=1}^H \sum_{m=1}^{N_g} x_{kigm} = 1, \forall i, k \quad (6)$$

$$r_{kij} w_{kij} = 0, \forall i, j, k \quad (7)$$

$$c_{ki} - p_{kigm} x_{kigm} \geq 0, \forall i, k, m, g \quad (8)$$

$$x_{kigm} \geq 0, \forall i, k, m, g \quad (9)$$

式(1), (2)はメイクスパン・納期遅れを最小化する目的関数, 式(3)は作業順序に関する制約, 式(4)は作業の資源割当てに関する制約, 式(5), (6)は資源に関する制約, 式(7)は先行関係の制約, 式(8), (9)は非負条件である。

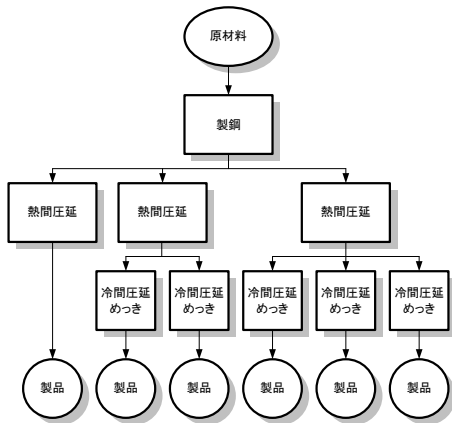


図 1. 鋼板製造工程

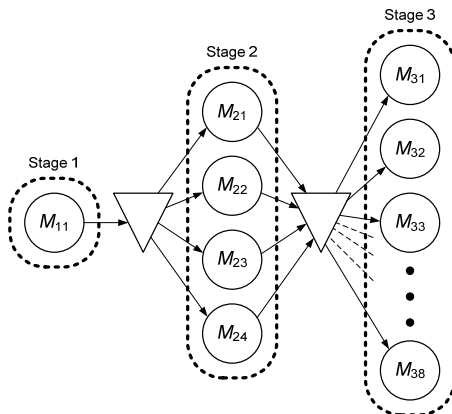


図 2. 多段階ハイブリッドフローショップ

(2) ディスパッチング・ルールによるスケジューリングについての実験を通じて手法の開発を行った。前項で作成したモデルの下で実験データを作成し、複数のルールに基づきスケジューリングを行った。用いたルールは, EFT (Earliest Finishing Time), SPT (Shortest Processing Time), LPT (Longest Processing Time), Slack の他, 本モデル固有の作業優先順位を考慮した Priority ルールを作成した。また, スキームとしてアクティブ・スケジューリングと遅れなし (non-delay) スケジューリングの 2 種類を, それぞれのルールと組み合わせさせた。その結果, メイクスパンの最小化では EFT, SPT の順に良く, 納期遅れの最小化では Slack が良い結果であった。Priority によって段取り替え回数は減る方向に貢献するものの, 上記 2 目的の最小化には直接貢献しなかった。また, スキームの優劣は問題のサイズに依存する結果となった。この為, パラメータ化アクティブ (parameterized active) を用いた。最終的には, EFT, Slack, Priority の複合ルールにより探索を行うことにより, 本問題の特性を考慮しない単純なメタ戦略 (GA) よりも良いパレート最適解が得られた。

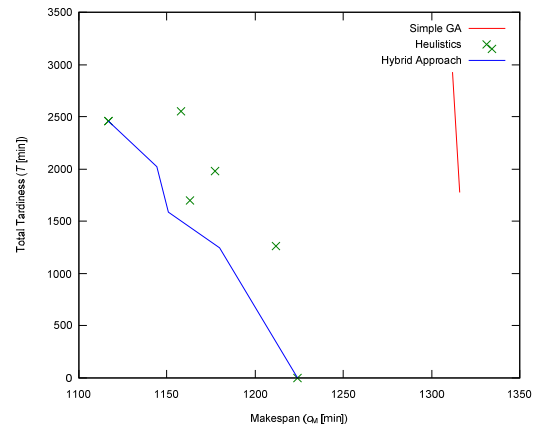


図 3. 多目的スケジューリングの結果

(3) メタ戦略を用いた解の改善についての研究を行った。ディスパッチング・ルールによって作成されるスケジュールの改善についての研究を行った。ルールベースのスケジューリング手法は, 一般には完全な最適解にはならず, 改善の余地が残されている。スケジューリング問題のように, 多峰性の解空間から最適解を探索する方法としては, メタ戦略に関する研究が数多く行われている。ここでは, ルールベースで求められた一点の解を基点として多目的メタ戦略手法による改善の数値実験を行った。特に限られた時間でのスケジューリングにおいては, 複合手法が最も優れた結果を示した。図 3 は, サンプルデータによる実験結果の一部であり, 赤線が単純 GA, 緑がディスパッチング・ルール, 青が複合手法によって得られた解である。

(4) 生産計画に基づくスケジューリングならびにスケジューリング結果に基づく生産計画の見直しを行うため、生産計画とスケジューリングの統合手法を開発した。研究の背景および目的を達成する上で、当初考慮されていなかった生産計画が重要である点が、工程に関する調査の過程で、明らかになった。生産計画を行い、スケジューリングを行う従来の手順(図4左)では、工程の様々な要因で発生するボトルネックにより、スケジューリングの段階で組合せ最適化を行うだけでは限界がある。そこで、ボトルネック検出を介した生産計画とスケジューリングの統合について提案した(図5右)。ボトルネックの検出には、スケジューリング時に確定している制約下において、作業によって資源の占有される確率を求める方法を提案した。この方法によって、具体的なスケジュール生成前に、基準を超えるボトルネックを検出した場合には再計画を行うことができる。また、ボトルネック検出と同時にある程度のスケジュールの概略が生成されるため、これをスケジューリングの制約として用いることによって探索の範囲を限定することができた。

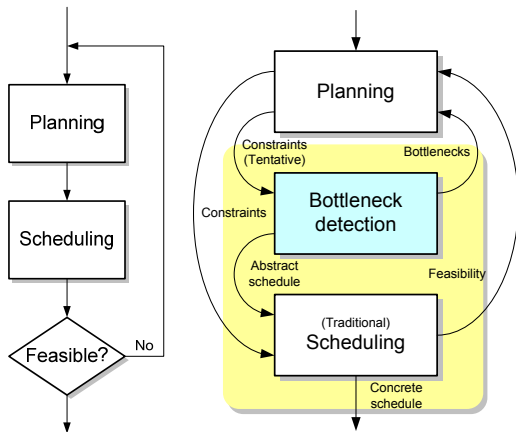


図4. 生産計画とスケジューリング

(5) 近年の Web 技術を活用したスケジューリングのシステムを構築した。スケジューラは計画変更またはユーザからの入力に伴う制約変更をトリガとして動作する。生成されたスケジュールは、ユーザからの要求によって SVG によるガントチャートによって Web ブラウザ上に示される。また、SVG に埋め込まれた ECMA Script によってユーザの入力を検知し、再スケジューリングの制約パラメータとして Web ブラウザからスケジューラに送信する。データの授受には XML ならびに JSON (JavaScript Object Notation)を用いた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 岡本 東, 菅原光政, 玄 光男: “改善を考慮した GA によるスケジューリング・システム”, 日本設備管理学会誌, Vol.19, No.4, pp.235-243, 2008. (査読有)

[学会発表] (計6件)

- ① Okamoto, A., Sugawara, M. and Gen, M.: “Multistage Hybrid Flowshop Scheduling with Setup Operations”, *Proceedings of the 3rd International Congress on Logistics and SCM Systems (ICLS 2007)*, pp.92-99, 2007. (2007-08-28, Kanagawa University)
- ② 岡本 東, 玄 光男, 菅原光政: “生産物流情報システムのためのGAスケジューラ”, 平成19年度電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.132-137, 2007. (2007-09-05, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス)
- ③ Okamoto, A., Sugawara, M., Gen, M. and Shiota, M.: “A Scheduling Approach for Hybrid Flow Shop in Material Industry”, *Proceedings of the Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems (APIEMS) & the Chinese Institute of Industrial Engineers (CIIE) 2007*, CD-ROM, 2007. (2007-12-11, Ambassador Hotel, Kaohsiung, Taiwan, R.O.C.)
- ④ 岡本 東, 菅原光政: “設備保守を考慮したスケジューリング・システム”, 平成20年度日本設備管理学会春季研究発表大会論文集, Part.A, pp.5-10, 2008. (2008-06-05, 青山学院)
- ⑤ 岡本 東, 菅原光政: “確率分布に基づいた生産スケジューリング手法”, スケジューリングシンポジウム 2008 講演論文集, pp.241-246, 2008. (2008-09-20, 青山学院)
- ⑥ Okamoto, A. and Sugawara, M.: “A scheduling method using probability-based bottleneck detection”, *Proceedings of the 9th Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems (APIEMS)*, pp.176-181, 2008. (2008-12-03, Nusa Dua Bali, Indonesia)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 東 (OKAMOTO, AZUMA)

岩手県立大学・ソフトウェア情報学部・講師
研究者番号: 10305310

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし