

製鉄所におけるスケジューリング業務のシステム化に求められる技術

岩谷 敏治

製鉄所の出鋼スケジューリング業務を例題として説明し、それを用いて熟練作業者にしか実現できていない能力として、経時的変化への対応、操業変動への対応、さらには逆問題を解くことによる設備投資問題への対応等の、具体例を示す。次に、それらの能力をシステム的に実現する場合に必要な機能を示し、エージェント技術やヒューマンインターフェース技術の必要性を提示する。最後に、上記技術と大規模最適化、データ処理等のオペレーションズ・リサーチ技術との関係を議論し、さらには、生産管理課題に対するアプローチ方法を決定する技術の重要性を考察する。

キーワード：製鉄所、スケジューリング問題、エージェント技術、ヒューマンインターフェース技術、大規模最適化問題

1. はじめに

鉄鋼業においては、過去30年にわたりさまざまな業務に対してシステム化、自動化が試みられた。そして、比較的単純な業務に対しては省人化、高機能化を実現し、大きな成果[1]をあげてきた。しかし、いわゆる‘熟練者’が担当している業務に関しては、その機能の部分的代替に留まっており、現在も熟練者が製鉄所を支えている。そして、その状態のまま、近年、製鉄所は熟練者数の減少に直面し、その対応に迫られている。当然ながら、システム分野にも貢献が期待されるが、その実現に必要な技術は、従来技術の延長上有あるのか、そうでないのであればどこにあるのか、十分検討する必要がある。

本稿では、熟練者に依存している製鉄所諸業務のシステム化を実現するために、求められる技術について議論する。熟練者が支えている業務は、保全、設計、診断、制御等、多岐にわたるが、本誌のスコープを考慮し、スケジューリング業務を例題とする。まず、2節では具体例とする出鋼スケジューリング問題を説明し、次に、3節では従来のシステム化技術では実現困難である、熟練者の業務内容を例示する。4節ではそれらの特徴と求められるシステム化技術を議論し、5節を考察、6節を結言とする。

なお、2節で示すスケジューリング問題とその対象

工程は、議論を具体化するために設定したものであり、特定の会社、製鉄所のものではないことを、最初におことわりしておく。

2. 例題とするスケジューリング問題の概要

2.1 対象工程とその設備構成

製鉄所は多くの工程から構成され、全ての工程においてスケジューリング問題があるといつても過言ではない。その中でも、製鋼工程のスケジューリング業務は、熟練度の必要性が高い業務である。その理由には、製鋼工程は、成分、サイズ等が決定される重要な工程であること、千℃以上の溶銑、溶鋼を数百t単位で扱うため、設備増設には膨大なコストがかかり、複雑な制約条件が緩和されずに残ること、等が挙げられる。製鋼工程内だけでも設備が多く、そのスケジューリング問題は、転炉より前工程の予備処理を対象とする問題[2][3]と、転炉以降の二次精錬、連鉄機を対象とする問題[4]～[6]の2種類に大別できるが、ここでは、後者を例題とする。

例題の対象は、転炉2基、二次精錬2基、連鉄機2基から構成（図1）されるものとする。なお、製鋼工程での最小生産単位をチャージと呼び、各チャージは、転炉、二次精錬、連鉄機で必ず1回、この順序で処理されるものとする。なお、二次精錬を複数回実施する場合もあるが、問題簡略化のため、ここでは考慮外とする。

2.2 出鋼スケジューリング問題の概要

連鉄機では、複数のチャージを連續して鋳造する。

いわたに としはる

株神戸製鋼所 技術開発本部 生産システム研究所
〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5

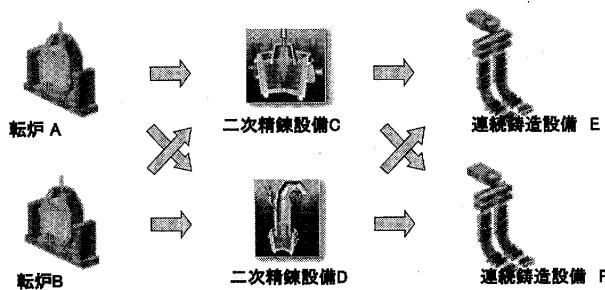


図1 転炉～二次精錬～連鉄工程の例

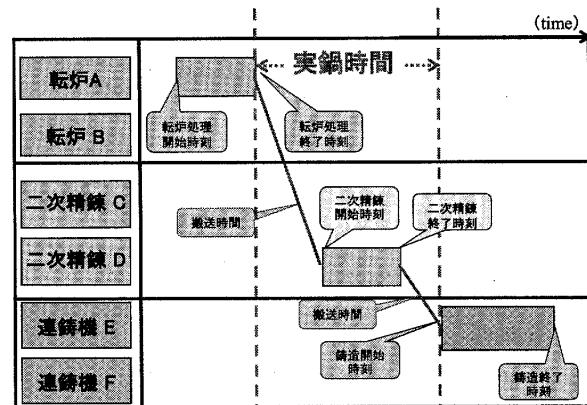


図4 各設備の処理時間と実鉄時間

連鉄機E のキャスト	品種P	品種P	品種P	
	キャストE1			
連鉄機F のキャスト	品種Q	品種Q	品種R	
	キャストE2			
連鉄機F のキャスト	品種S	品種S	品種S	品種S
	キャストF1			
連鉄機F のキャスト	品種T	品種T	品種V	品種V
	キャストF2			

図2 キャストの例

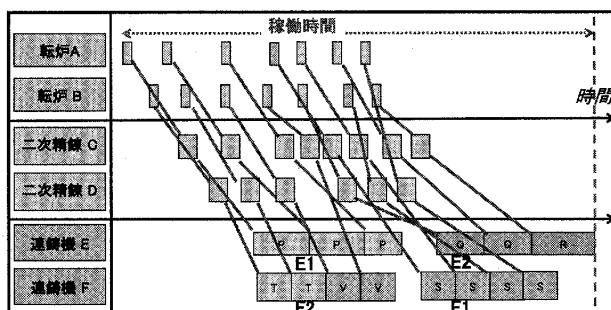


図3 出鋼スケジューリング問題の解

このチャージの連なりをキャストと呼ぶ。図2に連鉄機E, Fに与えられた2キャストを示す。なお、各チャージの横方向の長さは、連鉄での鋳造時間(=処理時間)を示す。与えられたキャストに含まれる全チャージに対し、各サブ工程(転炉、二次精錬、連鉄)の設備と、処理開始、終了時刻を決定する問題、すなわち図2から図3を求める問題を、出鋼スケジューリング問題と呼び、例題とする。なお、本稿では、キャストは、あらかじめ連鉄機別に与えられるものとし、連鉄機の選択は不要とする。

2.3 最適化問題としての記述

出鋼スケジューリング問題を最適化問題として記述する。3節で示す熟練者の能力説明に具体性を持たせ

ることが目的であるため、数式を用いた厳密な定義ではなく、図や言葉による感覚的な記述であることを了解願いたい。

通常、最適化問題は式(1)の形式で記述される。決定変数 x 、評価指標 $F(x)$ 、制約条件 S を以下で説明する。

$$\text{Minimize } F(x)$$

$$\text{sub.to } x \in S$$

$S \subseteq X$ X : 決定変数 x の全体集合

(a) 決定変数 x

全チャージに対し、転炉サブ工程、二次精錬サブ工程で利用する設備と、全設備における処理開始時刻と終了時刻が決定変数となる。

(b) 評価指標 $F(x)$

各製鉄所の設備構成、製品構成によって、指標が異なるが、代表的なものを以下に示す。

(b-1) 稼働時間最短化(生産性最大化)

先頭チャージ吹鍊開始から最終チャージ鋳造完了までの時間を最短化する(図3)。

(b-2) 実鉄時間の総和最小化(熱コスト最小化)

各チャージの転炉出鋼完了から連鉄での鋳造開始までの時間を実鉄時間(図4)と呼ぶ。実鉄時間が長いと溶鋼温度低下を招き、コストアップ要因となるため、全チャージの実鉄時間総和を最小化する。

(c) 制約条件 S

(c-1) 同一設備での処理チャージ数

同じ時間帯には1チャージ以下でなければならない。

(c-2) キャストにおける連続性

同一キャスト内では、前チャージの鋳造終了時刻が次チャージの鋳造開始時刻に一致しなければならない。

(c-3) 設備での処理時間、移動時間、キャスト間の

準備時間

あらかじめ与えられるこれらの時間を守るように、決定変数 x は決定されなければならない（図 2）。なお、それら時間は、最小値、最大値により範囲として与えられる場合もある。

(c-4) 設備とチャージの適合制約

ある品種は、複数ある転炉や二次精錬設備の一部設備でしか処理できない場合がある。

(c-5) 納期制約

複数日にわたるスケジュールを決定する場合、チャージの最遅鋳造完了日時が指定される場合がある。

3. 熟練者の業務能力の実際

出鋼スケジューリング問題に対しては、さまざまな解法が試みられ、実用システムが構築されている。導出される解のレベルは熟練者に比べて遜色なく、生産性向上、コスト削減等の効果をあげている。しかし、以下に示す、熟練者の業務内容はシステムでは実現できないため、熟練者の代替とはなっていない。

3.1 経時変化への対応能力

スケジューリングシステムの場合、2節(c-2)で示した、処理時間、移動時間は各中間製品の品種をキーとしたデータベースで与えられる。しかし、これらの値は、操業改善による短縮や、逆に設備劣化による長時間化が発生するため、メンテナンスが必要であるが、これが意外に難しい。例えば、品種 T の二次精錬工程での処理時間は 30 分とする。それがある条件の下、例えば、チャージの‘用途’を一部種類に限定すれば 20 分に短縮可能という改善が実現される場合がある。さらには、前工程における転炉サブ工程での当該チャージの前チャージの品種が、二次精錬の処理時間に影響を与える可能性もある。また、同様に、(c-4)のチャージと設備の適合性も、変化する。そのような経時変化に対しては、データベースの再設計が必要であり、特にホスト系システムでは、改造にはコストと時間が必要となる。これに対し、熟練者は特に問題なく、対応できている。

3.2 操業変動への対応能力

製鋼工程の上工程は高炉を中心とした製銑工程である。高炉からの出銑量を長期的に一定に保つことは困難であり、日々変動する。出銑量が低下すると、製鋼工程で処理できるチャージ数は減少し、逆に、予定を越えた場合にはそれを有効活用する方法を考える必要がある。熟練者は、前者の場合は与えられていたキャ

ストの長さを短縮し、また、後者の場合は先納期チャージをキャストに組み込むといった対応の上で、再スケジューリングを行う。また、特に操業変動が大きい場合は、コスト最小化のため設定されている制約条件((c-3), (c-4), (c-5))の緩和や、評価指標 ((b-1), (b-2)) の変更も行う。同様の対応は、上工程の変動だけではなく、下工程や、別の製鋼工程での操業変動に対しても行われる。すなわち、製鉄所内のどこかに、大規模操業変動が発生した場合、熟練者は、与えられた問題そのものを変更し、別の問題を再構成した上で、それを解いているといえる。

3.3 設備改善課題への対応能力

スケジューリング業務に従事する熟練者は、しばしば、工程改善案の決定に意見を求められる。例えば、品種 A が 5%, 品種 B が 10% 増えるという品種構成条件において、総生産量の 3% 以上の増産を実現するには、どの設備の能力増強が必要か、といった問題である。

複数のサブ工程から構成される工程全体の生産性を向上させる場合、通常、ボトルネックとなっているサブ工程の改善が鍵となる。本例では、転炉サブ工程、二次精錬サブ工程、鋳造サブ工程からなるため、通常ならば最初に行うべき作業は、それらの生産能力比較に基づくボトルネックの特定となる。しかし、サブ工程間の中間在庫バッファサイズが小さい場合、同一チャージにおける前後工程の処理時間が相互に影響を与え合い、さらには、同一工程で前後に処理されるチャージの処理時間も影響し合う。製鋼工程のスケジューリング問題もこの特徴をもつ。そのため、どのサブ工程がボトルネックとなるかは、問題が与えられた時点では不明であり、スケジュールを組まなければ判断できない場合が多い。したがって、ボトルネック同定にはスケジューリング業務への熟練が必要となる。

その結果、上記のような生産性向上のための、設備投資方針策定には、式(1)の逆問題を解く必要が生じる。つまり、スケジューリング問題において、問題が与えられて、さらに、 $F(x)$ の項目、(b-1)に対して、下限値を設定し、それを満足する制約条件(c-3), (c-4)を求める問題となる。

このような逆問題の定量的な求解は、熟練スケジューリング担当者であっても容易ではない。しかし、定性的ではあるが信頼性が高い意見を出す能力を持つのは熟練者だけであるため、設備投資検討の際に、その意見が重視される。

4. 熟練者の業務能力の特徴とシステム化技術

4.1 熟練者の業務能力の特徴

図5に出鋼スケジューリング問題に対する、スケジューリングシステムの入出力を示す。問題としてキャストが与えられ、諸時間に基づき、制約条件を満足し、評価指標を最適化する解を導出する。それに対し、熟練者の業務能力を図6に示す。前節に示したように、問題の全ての要素（入力、制約条件、評価指標、諸時間）に対して、適切な変更を行う能力を持つことを示している。両図の比較で明らかなように、スケジューリングシステムは、当たり前ではあるが、与えられた問題の求解しかしない。これに対して、熟練者は多様な情報にアクセスし、常に‘問題’を変更する。そしてそれを解き、その結果に基づき、次の変更を実施しそれを繰り返す。このように、問題を常に変化する動的なものとして捉える点が、両者の大きな違いといえる。以下では、3節で示した3種の対応能力が図6で示された機能により、どのように実現されるべきかを示す。

(i) 課題抽出機能

3節で述べた3種の能力を遂行するには、いずれも、適切に課題を設定する機能が必要である。3.1節では、現実の製鋼工程の操業実績データとスケジューリング結果を比較し、スケジューリング機能が現実にあっていなければ、それを解決すべき課題と認識する。3.2節では、上工程、下工程の情報を参照し、現状のスケジュール（=現状の問題の最適解）で操業を続けた場合に発生が予想される製鉄所全体の問題（=溶銑やスラブの不足や過剰）を予測し、それを課題と考える。さらに、3.3節では担当する製鋼工場のあるべき生産能力やコストと現実とのギャップを課題として抽出する機能が必要となる。

(ii) 解決手段設定機能

課題抽出後には、その解決手段の設定が必要である。3.1節では、(c-3)の中の適切な値を選択し修整することであり、3.2節では、(b-1), (b-2), (c-3), (c-4), (c-5)あるいは、入力であるスケジューリング問題を変更する。また、3.3節では、生産性、コストを改善する、(c-3), (c-4)を導出することになる。

なお、3節で示した、熟練者の業務能力の中にはスケジューリングアルゴリズムの変更による問題解決はなかつたが、そのような解決策も存在する。

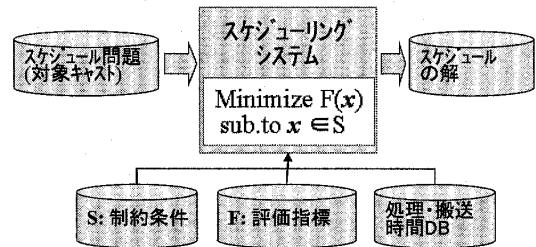


図5 スケジューリングシステムの機能

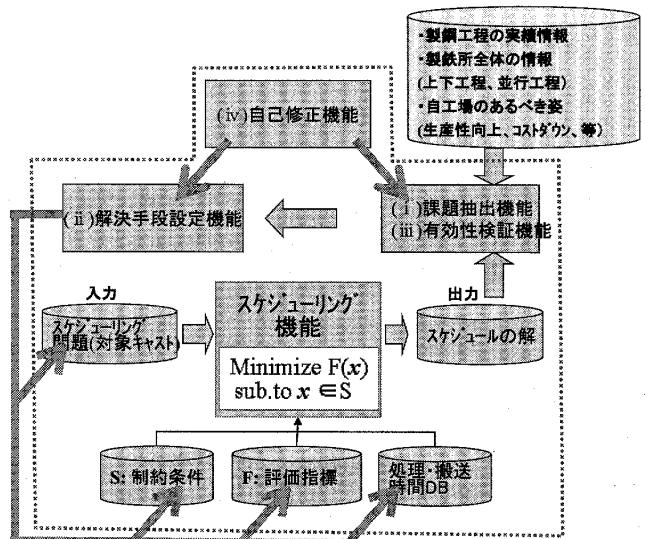


図6 熟練者の固有機能

(i) 課題抽出機能

解決手段設定機能で設定された変更が有効であったかを検証する。これは、解決策を実施したのち、すなわち、入力、制約条件、評価指標、データ、あるいは、スケジューリングアルゴリズムを修整した後に導出したスケジュール結果と、さまざまなデータを比較し、解決手段が課題に対して有効であったか否かを、(ii)解決手段設定機能に入力することになる。(ii)は、その内容に応じて、解決策を設定する機能を持ってなければならない。

(ii) 解決手段設定機能

熟練者たるそのゆえんは、失敗を繰り返さない点にある。同じ状態（諸情報とスケジューリング結果のギャップ）に対して、過去に設定した同じ課題や解決策を採用すると、同じ失敗を繰り返すことになる。したがって、熟練者は上記の(i)～(iii)の機能そのものを、常に修整しているといえる。つまり、それら機能の使い方を学習、修整するメタ機能を持つものと考えられる。なお、この機能への入力は多様なため、あえて図中に

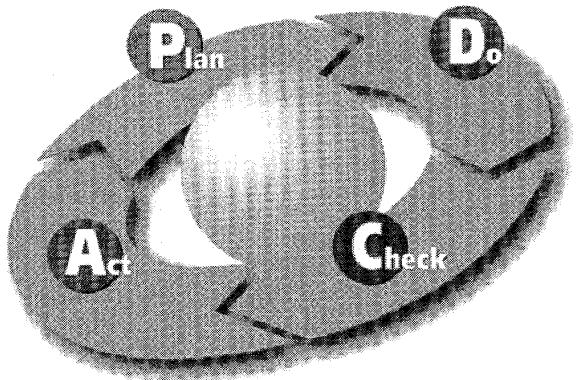


図7 PDCA サイクル

表1 PDCA サイクルの実際

PLAN (計画)	従来の実績や将来の予測などをもとにして業務計画を作成する
DO (実行)	計画に沿って業務を行う
CHECK (評価)	業務の実施が計画に沿っているかどうかを確認する
ACTION (改善)	実施が計画に沿っていない部分を調べて処置をする

は示さなかった。

4.2 必要となるシステム化技術

本稿の目的である‘製鉄所におけるスケジューリング業務のシステム化に求められる技術’は以上であり、あとは読者各位に実現方法を考えていただくべきとも考えたが、以下では、必要な要素技術案を提示する。

(a) エージェント技術

4.1節から明らかなように、システムに求められる機能には、自律的、協調的な振る舞いが必要となることから、エージェント技術が重要な役割を担うと考える。製造業のスケジューリング問題へのエージェント技術の適用事例[7]も近年さまざまな試みが見られる。実用化には解決すべき課題は多いと考えるが、これから展開に期待したい。

(b) 人とシステムの協調の実現……インタフェース技術

4.1節に示した、4機能は、品質管理分野、生産管理分野で、用いられるPDCAサイクル(図7)に類似する。その内容を表1に簡単に示す。課題抽出と解決策設定を合わせるとPLANとなり、スケジューリング機能そのものがDO、有効性検証機能はCHECKに対応し、ACT(改善)につながるところはメタ機能となる。そう考えれば、スケジューリングの熟練者の実現している機能は、次式で表現できる。

熟練者の機能

$$= \text{スケジューリング機能} + \text{PDCA機能} \quad (2)$$

各種業務の熟練者が定年を迎えた後にも、多くの産

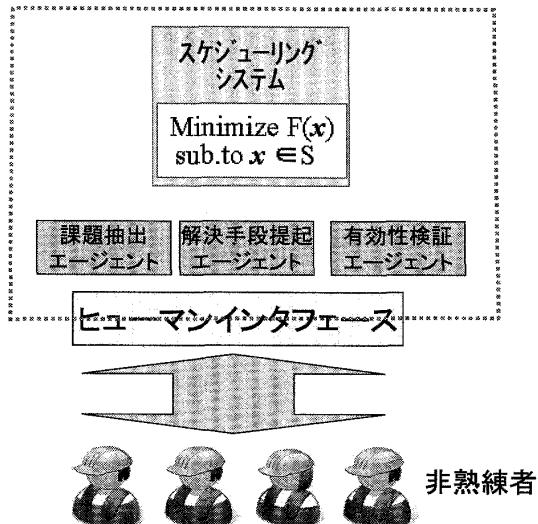


図8 共進化するシステム

業の製造現場には、PDCAを実行する組織は健在である。したがって、スケジューリングシステムを、そのPDCAサイクルの中に組み込めば、熟練者並みの機能の実現が可能になる。しかし、通常、スケジューリングシステムは、システムを設計、構築したシステム技術者だけが、その内部動作を理解できる(内部ロジックを提供した熟練作業者も理解できる場合がある)。そのようなシステムでは、製造現場のPDCAサイクルに組み込むことは不可能である。したがって、図8に示すように、スケジューリングシステムの内部を、製造現場の人、組織に理解できるようにみせる機能が必要と考える。

エージェント技術が、スケジューリングシステムを自己診断し、課題の候補を、インタフェースを介して、作業者に問いかける。作業者がそれを課題であると確認し、その旨を入力すれば、別のエージェントが解決案を作成し、同様にインタフェースを介して解決案を提示し、それをまた、作業者が選択する。そのように、エージェントと非熟練作業者が対話を重ねて、PDCAサイクルが回り、システムもそして人も共進化する、というシステムが実現できれば、理想である。

5. 考察

5.1 既存のOR技術による方法論との関係

ここまで議論に、違和感を覚えた読者も多いと思う。例えば、3.1節で述べた経時変化に対応する機能は、スケジューリングの時間諸元や適合制約条件を十分管理できていれば不要であり、3.2節の操業変動に対応する機能は、そもそも最初のスケジューリング問

題の範囲を、他工程まで広げて設定すればよいともいえる。

前者の解決には、大量データからの学習技術が、後者は大規模な組合せ最適化問題の高速求解技術が必要となる。本誌読者には、こちらの方が馴染み深いと想像する。これは、スケジューリング問題を静的、大規模なものと考える方法論であるが、問題の大規模化への対応は容易ではない。そのため、4節で述べた方法論は、スケジューリング問題を、小規模ではあるが動的に変化するものと考え、その動的に変化する部分を、エージェント技術、インターフェース技術でシステムが非熟練者と協業して代替するというものである。それらと、既存のOR技術による方法論は矛盾するものではなく、補完し合うと考える。OR技術により解ける問題の範囲が広くなれば、エージェント技術、インターフェース技術が埋めなくてはならない領域は狭くなる。筆者は双方の進化を期待するものである。

5.2 システム技術の担当範囲を判断する技術

一般に、生産スケジューリング問題の目的は、生産性、コスト、納期の達成であり、それを達成する方法論の比較を図9に示す。(A)は熟練者が主体となる場合、(B)は従来のOR技術主体、(C)が本稿で提案した手法である。また、(D)のように生産設備に投資して問題を解決する方法も考えられる。つまり、投下資本が限られた生産現場において、目標をクリアし、競争優位を確立するためには、設備、人、システムのいずれに重点をおくかという問題に帰着する。現実の多くの製造業では、スケジューリングシステム構築や、熟練者育成ではなく、製造設備投資に重点を置き、その実現を図っている場合が多いのではないだろうか。これに対し

て、鉄鋼業においては、生産設備、搬送設備が高額であること、当面は熟練者が不足することを考えると、技術的課題は多々あるが、システム主体の戦略は有望な選択肢であると筆者は考えている。しかし、この方法論の選択が、本当は一番重要な課題であり、そこを間違えるとその後の多くの努力が無駄になる恐れがある。このような意思決定問題へのアプローチ方法についても、オペレーションズ・リサーチ学会への期待は大きい。

6. 結言

製鉄所における、出鋼スケジューリング問題を例題とし、熟練者にしか実現できない作業能力を具体的に示し、また、それを実現するためのシステムの機能を分析した。さらに、4節では、それらの実現に必要な技術、すなわち、製鉄所において今も熟練者依存の状態になっている業務をシステム化するために必要な技術として、エージェント技術とヒューマンインターフェース技術を挙げ、また、この2つの組合せにより、人とシステムが共進化するシステムを理想として提示した。5節では、それら技術と既存のOR技術が補完関係にあること、また、生産管理問題へのアプローチ方法を決定する、意思決定問題が重要であることを示した。

参考文献

- [1] 小西正躬：鉄鋼における生産管理技術の発展と展開，鉄と鋼，Vol. 90, No. 11, pp. 964-969 (2004).
- [2] 本田直也, 他：クレーンの干渉を考慮した製鋼工程スケジューリング、スケジューリングシンポジウム2002講演論文集, pp. 108-113 (2002).
- [3] T. Iwatani et al.: Prediction-Based Simulation for Molten Metal Logistics, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2004, pp. 22-27 (2004).
- [4] 今井太一, 他：汎用的アプローチを用いた製鋼工程スケジューリングシステム、システム制御情報学会論文誌, Vol. 10, No. 4, pp. 204-210 (1997).
- [5] 藤井聰, 他：操業制約による遺伝的アルゴリズムの探索効率化と出鋼順編成への応用, 鉄と鋼, Vol. 89, No. 12, pp. 1220-1226 (2003).
- [6] 伊藤邦春, 他：出鋼スケジュール作成支援システム-2, 材料とプロセス, Vol. 21, No. 5 (2008).
- [7] 玉置久, 他：整数計画モデルによる熟練者エージェントへの接近スケジューリング問題を対象として鉄と鋼, Vol. 97, No. 6, pp. 27-32 (2011).

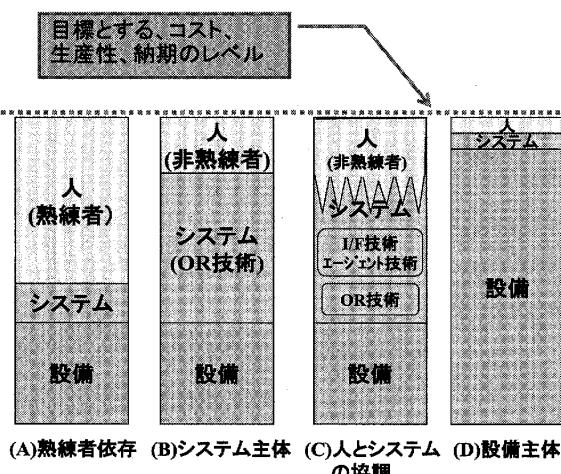


図9 目標とするコスト、生産性、納期の達成方法