

薄板生産管理システムへの最適化・シミュレーション技術の適用

山口 収, 渡辺 敦, 笹井 一志, 田野 学, 天沼 陽介, 古家 辰弥

一貫製鉄所における薄板製品の生産管理システム再構築プロジェクトに OR 技術者として参画し、生産管理のコンセプト提案や、計画システムのプロトタイプ構築・手法評価から実機システム化に至った最適化・シミュレーション技術の適用事例を紹介する。1 例目は、多段工程の生産管理をどのようにするべきかを端的に示すシミュレーションであり、プロジェクトが目指す姿を提示した。2 例目は、スラブという中間素材の設計方針設定、3 例目は製鋼プロセスにおける成分系設計の方針決定と出鋼ロットまとめの実機向けアルゴリズム開発、4 例目は冷延以降の薄板プロセスのスケジューリングに使用する対話型スケジューラである。いずれも実機化に結びつき、リードタイムの削減などの効果をあげている。

キーワード：薄板製品，生産管理，最適化，シミュレーション，素材設計，成分設計，対話型スケジューラ

1. 緒言

多品種・多量の薄板製品の素材設計・製造・出荷までを取り扱う生産管理システムは、非常に大規模、複雑な制約条件を持つシステムである。コンピュータの発達とともに、最適化手法の適用が試みられ、鉄鋼プロセスの生産・物流計画への分枝限定法、GA・SA・タブーサーチなどの応用事例は多数報告されている[1]。

2006 年度からスタートした、JFE スチール西日本製鉄所福山地区の薄板系生産管理再構築プロジェクトにおいて、生産管理に必要な機能・要件に関して、検討および実装の両フェーズで、シミュレーション・最適化技術を活用した。シミュレータから得られた知見は、システム開発の方向性を決定するとともに、最終効果である在庫率低減・リードタイムの短縮に貢献

した。

2. 薄板系生産管理再構築プロジェクト概要

福山薄板系生産管理再構築プロジェクトの目的・手段・効果を下記にまとめる[2]。

■目的

- ① 薄板系品種の在庫率低減と生産・出荷の一層の効率化
- ② 需要環境や品種構成の変化への対応力強化

■手段

- ① 複数連铸機・熱延の最適選択
- ② 複数プロセス間の同期/連続化操業スケジューリング
- ③ 製造ユニット（スラブサイズ）の最適化，サイクルロット（出鋼ロット）の拡大

■効果

- ① 在庫率の低減
- ② プロセス間同期比率向上
- ③ プロセス間リードタイム短縮

本プロジェクトにおいては、従来のような全自動スケジューラの開発ではなく、シミュレーションによる基本コンセプトの提案，アルゴリズムの提案，設計方針の妥当性の検証など，開発の方向性を示すような貢献の仕方を心がけた。

鉄鋼製品の製造プロセス詳細に関しては弊社ホームページを参照されたい[3]。本プロジェクトが対応し

やまぐち おさむ
JFE スチール スチール研究所計測制御研究部
〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1
わたなべ あつし
JFE スチール 東日本製鉄所京浜地区製鋼部
ささい ひとし
JFE スチール 本社 IT 改革推進部
たの まなぶ
JFE スチール 西日本製鉄所福山地区製鋼部
あまぬま ようすけ
JFE スチール 西日本製鉄所福山地区錫鍍金部
こげ たつや
JFE スチール 本社電磁鋼板営業部

たプロセスは、製鋼工程から最終ラインの鍍金工程まで薄板系の全プロセスにまたがる。その中で、本稿で報告する案件は図1に示すものである。

図1中のプロセス名は、それぞれCAL:Continuous Annealing Line (連続焼鈍ライン), EGL:Electric Galvanizing Line (電気亜鉛鍍金ライン), CGL:Continuous Galvanizing Line (溶融亜鉛鍍金ライン)を表す。

3. シミュレーション・最適化技術適用内容

福山薄板系生産管理再構築プロジェクトにおいて、シミュレーション・最適化技術を適用し検討した4項目の内容を以下に順次説明する。

3.1 生産管理のあるべき姿

プロジェクト発足当初の3つの素朴な疑問：

- (1) 在庫の変動はなぜ生じるのか？
- (2) 置き場能力 Max まで活用するのが最良の方法なのではないか？
- (3) プロセス間の連携が本当に有効なのか？

に答えるため、簡単なシミュレーションにより効果を

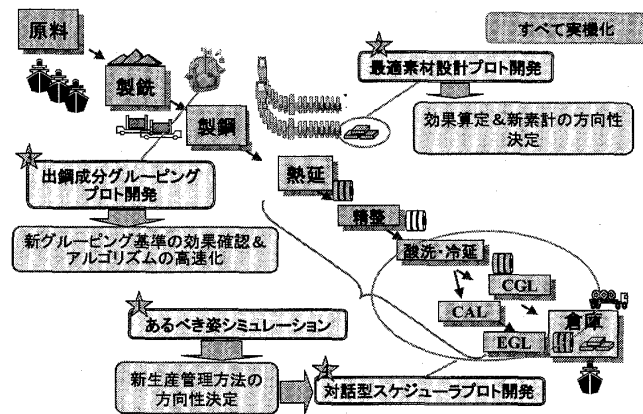


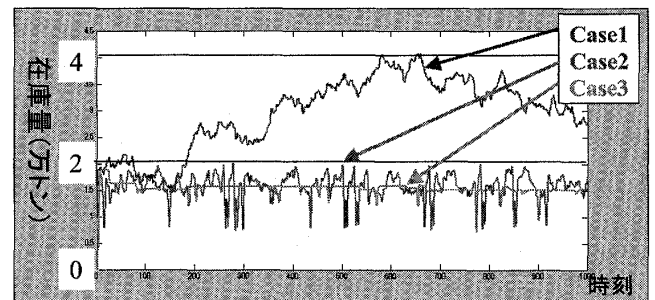
図1 製鉄プロセス全体と本稿の内容

可視化した。

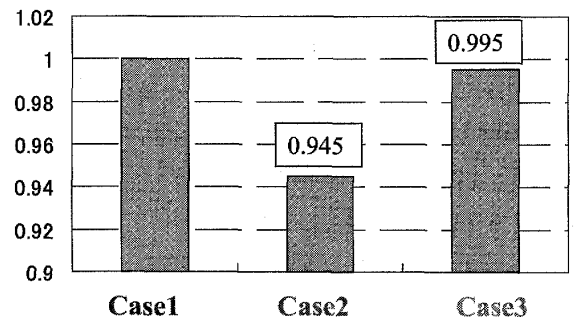
図2に示す平均生産量が同一(10,000 ton/日)で、ライン前に置き場を持つ3機械直列モデルを想定し、3種の生産管理手法の違いをシミュレートした。各ラインのロット集約条件の差異によって生じる日々の生産量のばらつきを、簡易的にホワイトノイズで表現している。

比較した3種の生産管理方式は、それぞれ、「Case 1: 平均量バランスでコントロール無し」、「Case 2: 置き場オーバーフロー時生産 Stop (置き場コントローラ On)」、「Case 3: プロセス間同期生産 (生産同期化コントローラ On)」であり、各々前述の(1)~(3)の問いに対応する。

図3上段は生産管理方式別の置き場3の在庫推移、下段はCase 1を1.0に正規化したスループットを表



(a) 在庫推移



(b) スループット

図3 生産管理手法ごとの在庫推移とスループット

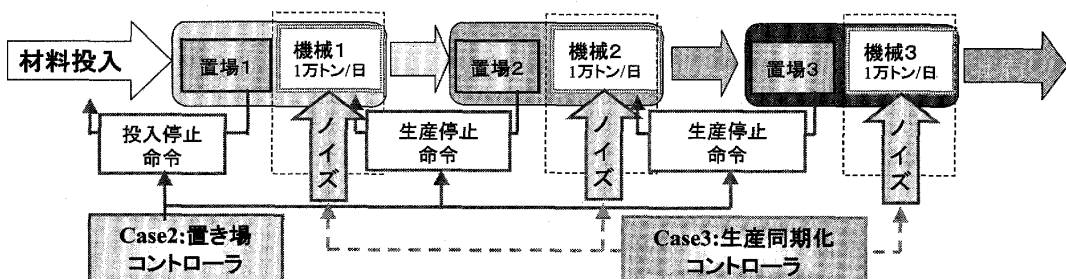


図2 3機械直列生産モデル

す。図3に示す結果から、プロセス間の非同期性によって在庫量が大きく変動する Case 1, 在庫量上限制限によりスループットが低下する Case 2 と比べて、Case 3 は在庫変動を抑制しながら、スループットを維持 (0.5% 減にとどまる) できることがわかる。本シミュレーションは、プロセス間の同期化という、プロジェクトの目指すべき方向を認知させる重要な役割を果たした。

組合せ最適化手法の適用は、当然効果を発揮するが、個々人が理解して企業文化として根付かせるためには、シンプルで誰もが理解できるように可視化することが肝要である。本例のように同期化操業による在庫削減・リードタイム削減を可視化することも、企業のOR技術者の果たすべき重要な責務だと考えている。

3.2 素材設計シミュレータ

鉄鋼業における素材設計とは、顧客からの注文に対して、最終製品の要求する機械特性を満足できるようにスラブ (厚 200~300 mm, 幅 750~2100 mm, 長さ 6000~9000 mm の極厚の鋼板) という中間製品を設計することをいう。製鉄プロセスでは、スラブを薄く圧延してコイル状に巻かれたものを製造し (熱延・冷延プロセス), 焼鈍し (CAL プロセス), 防錆のために鍍金 (EGL, CGL プロセス) を施して製品にいたる。

素材設計には大きく分けて、鋼の特性を決定付ける化学成分 (C, Mn, Si, Al, P, S など) と、生産性・歩留まりを決定付けるスラブサイズ (厚・幅・長さ) がある。いかなる成分系で、どんなサイズのスラブを設計するかは、製鋼プロセス以降でのロットサイズ (= 生産性) や製品歩留まりなどに影響する。その意味で、スラブ設計問題は製鉄所全体の効率を左右する重要な課題となっている。本件では、成分決定の後の、スラブサイズ設計を検証対象としている。

スラブサイズの決定に際しては、図4に示すようにいくつかの戦略がありえる。以下に戦略と効果を列挙する。

- (1) スラブサイズ最大化⇒製鋼・HOT 能率向上
- (2) 製品サイズ⇒顧客満足度向上
- (3) コイルサイズ⇒所内ハンドリング性向上
- (4) 歩留まり (製品採取率) ⇒生産性向上

環境変化が著しい昨今、多様な設計方針から最良のものを導き出す必要があり、素材設計シミュレータの構築と戦略検討を行った。

図5に、可能性のあるすべての分割パターンを示す。

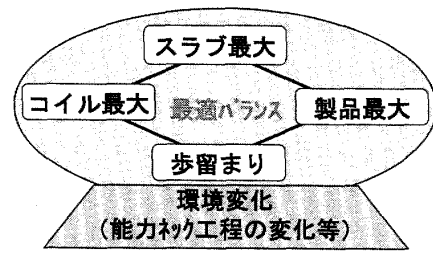


図4 素材計算のパターン

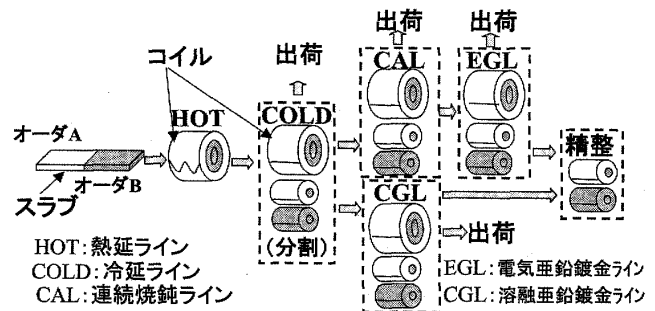


図5 分割パターンとしてありうるケース

表1 各種素材設計結果比較表

品種	同属性	歩留向上効果(単位:%)					
		異属性					通過工程違い(分割)
		異厚	異巾	異鍍金量	COLD	CGL	
CGL	1.99	0.00	0.29	0.10	0.00	0.00	0.00
EGL	0.56	0.78	0.45	0.34	0.06	0.00	0.03
COLD	0.48	1.09	0.76	0.00	0.11	0.00	2.02

COLD 後コイル分割, CAL 後コイル分割, CGL 後コイル分割などの可能性がある。スラブサイズを大きくするため、厚・幅・鍍金厚等、製造スペックの異なるもの、および製品化までの通過工程の異なるものを組み合わせることを試行し、歩留まり向上効果を検証した。

表1にシミュレーション結果を示す。CGL 品種は異属性組み合わせに対する制約が厳しいため、同属性での向上効果が大きい (1.99%)。また、COLD 品種の異属性組み合わせ (異厚, 異幅, CAL 後の通過工程違い) による歩留まり向上効果が最も顕著であり、積極的に進めていくべきであるという知見を得て、実機システムに組み込むことになった。

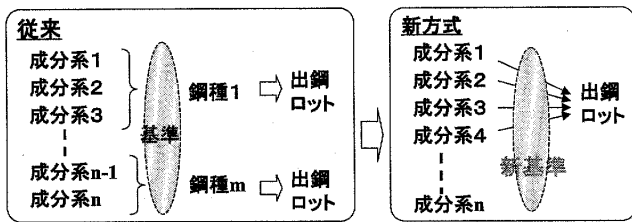


図6 従来の出鋼ロット決定方式と新方式

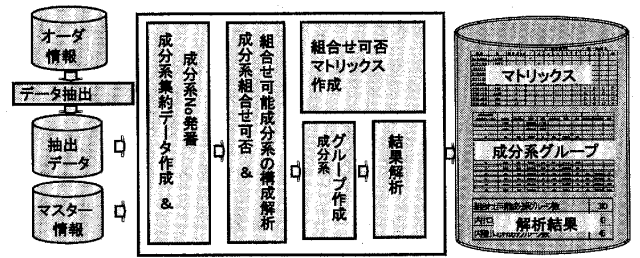


図7 出鋼成分グルーピングプロトタイプ

3.3 出鋼成分グルーピングプロトタイプ

図6は、再構築前後での転炉における出鋼ロットの作り方を示したものである。図中の成分系1~Nは顧客要望仕様から決定される鋼の成分系を示している。多様な成分系が存在するため、実際の出鋼に際しては、いくつかの成分系をまとめてロットを大きくする必要がある。

従来は、中間の成分グループとして鋼種という概念を導入していた。本プロジェクトにおいては、その中間概念を排除し、随時ダイナミックに出鋼ロットを形成することにより、ロットサイズを大きくすることを狙いとした。適切なグルーピングにより、製造ロットとオーダー群のマッチングがしやすくなり、仕掛かり在庫の低減、最終的にはオーダーの納期達成率を向上させることができる。

図7にプロトタイプの構成を示す。本プロトタイプでは、前処理で個々の成分系から類似する成分を集めた成分系グループを構成することにより、成分系同士のマッチングの回数を大幅に減らすことができ、従来法による計算時間との比較において、30分⇒2分と15倍の高速化を達成した。

さらに、本プロトタイプを使用して、成分系設計案の妥当性検討を行った。図8は、成分系の見直し前後での製鋼プロセスでの成分グループ数と、個々の成分に対して製造制約緩和と厳格化双方向に製造可能範囲値を変更したシミュレーション結果を示す。この結果から下記のことになり、新案を採択するに至った。

- (1) 新案は、対現状比でグループ数減少
- (2) 主要成分4種の製造制約の緩和をしても劇的な改善なし
- (3) 製造制約が厳格になるとグループ数が大幅増⇒現状制約維持必須

3.4 対話型スケジューラプロトタイプ

複数プロセス間の同期化推進、属人性排除による計画の品質向上、熟練者不足対応のため、対話型で誰で

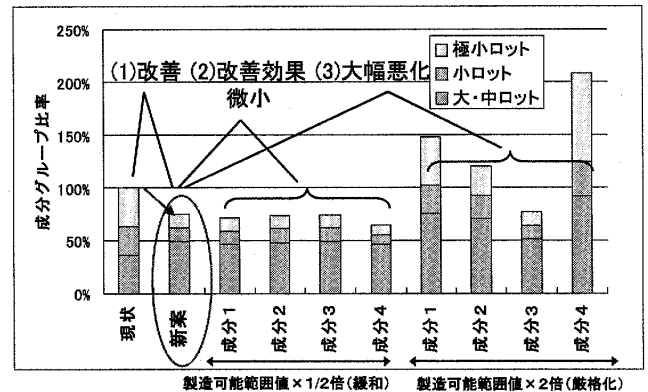


図8 プロトタイプによる成分系設計評価

も短時間でスケジューリング可能なシステムが必要とされている。過去の全自動スケジューラの開発事例は、環境変化や制約条件の変更による陳腐化に至ることが多かった。その反省から、本プロジェクトにおいては、視認性・操作性の良い対話型スケジューラを構築することとした。

アルゴリズムの骨組みは、図9に示すような「制約条件緩和による仮順序決め(初期解作成) + 対象限定による深さ優先探索」というシンプルな構成であり、自動による過度な探索を排除した。

図10に対話型スケジューラのプロトタイプを示す。左半分は、実コイル情報と操作ボタン、右半分は各種制約に関連する諸元のコイル単位の推移グラフとなっている。グラフ中のスパイクが初期解生成時の制約違反箇所を示している。制約違反の箇所を含むエリアの選択と制約違反解消ボタンの押下を繰り返すことで、全体の制約違反を解消し、装入指示可能なスケジュールを作成する。推移グラフによる全体の可視化とオペレータとのインタラクションのための探索機能を付加した新しいコンセプトで、スケジューリング電卓とも呼ぶべき機能構成となっている。

スケジューラプロトタイプの計画案とオペレータによる計画案との比較結果は、

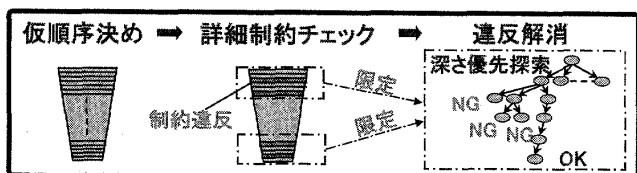


図9 対話型スケジューラ探索アルゴリズム

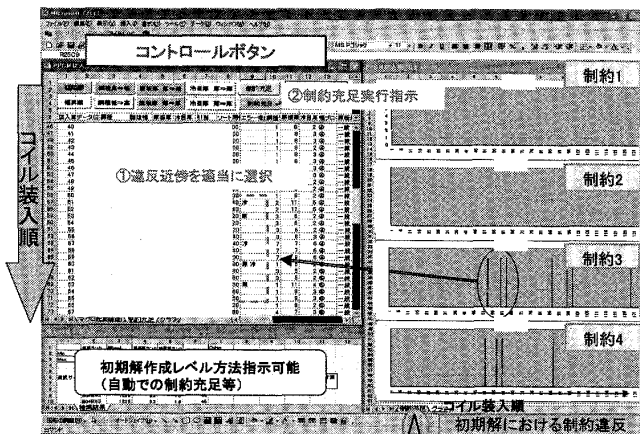


図10 対話型スケジューラ画面

(1) 制約違反・最適化指標に関してはオペレータと同等

(2) 総作業時間については10倍以上の高速化であり、冷延以降のプロセスのスケジューラとして実機適用された。

4. システムのHMI・アルゴリズム構成に関する提言

事例4の説明で少し触れたが、旧来の全自動化を志向した最適化技術が、制約条件・目的関数の変化により、すぐに陳腐化する、あるいは実応用になじまない、というケースが多々ある。その主たる要因は、問題の可視化の不十分さと計画オペレータによる介入のしにくさ、実際にメンテナンスを行うソフトウェア技術者に対する解法・アルゴリズムの伝承の困難さにある。システム開発プロジェクトが終了し、OR技術者が離れた瞬間から、システムの陳腐化が始まるといっても過言ではない。最適解を導出する手法の開発に留まらず、継続して活用していけるシステムとはどうあるべきか、を常に念頭におき、手法・HMI (Human Machine Interface) などの設計をすることが企業内OR技術者に求められている。

事例3の出鋼成分系のグルーピングや、事例4の対話型スケジューラの開発を通じて、ノード(点)とリンク(枝)で構成されるネットワーク(ORではグラフと呼ぶ)による問題表現・可視化・解法の構成が、現実の問題解決には有効なのではないかと感じている。

例えば、他分野(コンピュータネットワーク、社会ネットワーク、免疫学、バイオなど)に応用が進みつつある複雑ネットワーク科学[4]を適用すれば、

- (1) 大規模なネットワークの特徴量を計算してネットワーク構造に関する情報を得る
- (2) ネットワークの中で密な結合を持つ部分(コミュニティ)を抽出しグループ分けする
- (3) コミュニティを一つのノードとみなすことで粗視化(coarsening)し、全体構造をよりわかりやすくする

ことにより、全体像を把握した上で最適化することができるという、より効率的な解法の構成へのブレークスルーとなる可能性がある。

アルゴリズムを詳述していないが、事例3の出鋼ロットグルーピングを高速化できた主たる要因は、成分系が形成する無向ネットワーク中のクリーク(すべてが相互につながっている部分ネットワーク)を抽出し、クリークに属するか否かを判定する手法によっている。

また、対話型スケジューラで取り扱ったCALの装入順決定問題では、個々のコイル同士の結合関係を制約条件によって規定すると、有向ネットワークを形成することができる(図11上)。装入順決定問題は、このネットワーク上のルート探索問題に変換される。このとき、対象が張る有向ネットワークからコミュニティを抽出して(図11下)、問題を階層化して高速に解くというアルゴリズム構成も可能となる(図12)。Leichtらにより、有向ネットワークからのコミュニティ抽出方法は2008年に提案されている[5]。また、ネットワーク可視化ソフトもフリーのものが多数公開されており、アルゴリズムと可視化ソフトを組み合わせることでスケジューリングシステムを構成することができる。図11上のネットワークの描画にはNetDrawを使用している[6]。

このように、ネットワーク表現は、問題の構造の可視化、問題の階層化、階層化した問題への介入のしやすさを兼ね備えており、高速な解法の提供とユーザフレンドリーなHMIを構成することができる手法として活用できる。

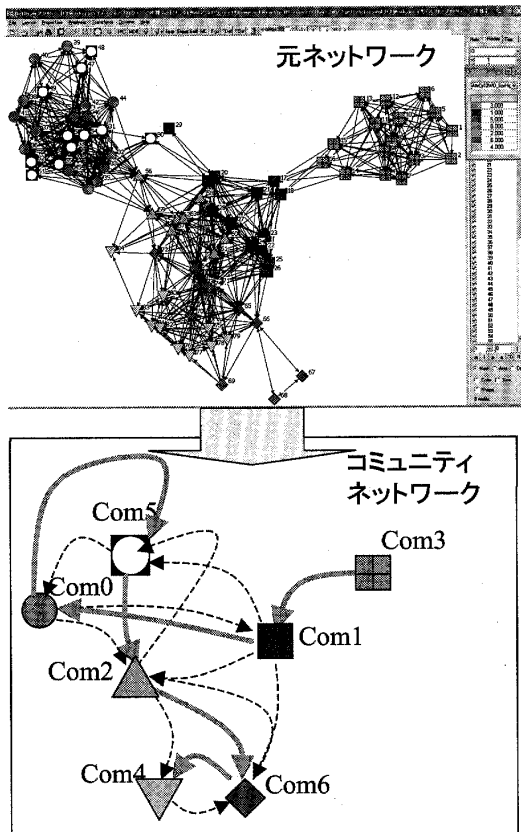


図11 CAL 装入順決定問題の元ネットワークとコミュニティネットワーク

5. 結言

薄板系生産管理再構築プロジェクトにおいて、シミュレーション・最適化技術を応用した下記4事例を紹介した。

- (1) 生産管理のあるべき姿検討
- (2) 素材計算シミュレータ
- (3) 出鋼成分グルーピング
- (4) 視認性・操作性に優れた冷延スケジューラプロトタイプ

(1)はプロジェクトの基本コンセプトとなり、(2)~(4)は実機システムに組み込まれ稼動中である。

今回のシステム再構築により、

- ① 在庫率低減
- ② プロセス間同期比率向上
- ③ プロセス間リードタイム短縮

を達成した。

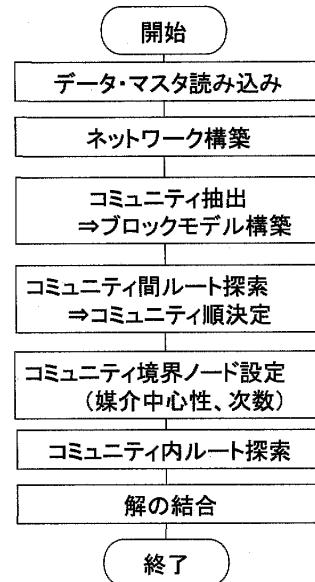


図12 コミュニティ抽出による階層型探索法

さらに、複雑ネットワークの応用に関しての期待を述べた。ネットワーク表現は、問題構造の可視化、コミュニティ抽出を活用した解法の階層化など、表現方法のみならず、最新のアルゴリズムを使用することにより、高速で使い勝手の良いスケジューリングシステムを構築できる可能性があり、さらなる発展を期待している。

参考文献

- [1] 木村亮介：“鉄鋼物流における最適化およびシミュレーション技術の活用,” オペレーションズ・リサーチ, Vol. 51, No. 3, pp. 9-14 (2006).
- [2] JFE Steel News Release, 2009.10.22
- [3] <http://www.jfe-steel.co.jp/products/usuita/process.html#>
- [4] M.E.J. Newman, A.L. Barabasi and D.J. Watts: “The Structure and Dynamics of Networks,” Princeton University Press.
- [5] E.A. Leicht and M.E.J. Newman: “Community structure in directed networks,” Phys. Rev. Lett., 100, 118703 (2008).
- [6] <http://www.analytictech.com/netdraw/netdraw.htm>