

(論文)

オーダへの半製品在庫の最適充当技術の確立

Establishment of Optimization Technology for Assigning Billets to Orders



白坂貴成*1
Takanari SHIRASAKA



池田英生*1
Hideo IKEDA



楢崎博司*2 (博士(工学))
Dr. Hiroshi NARAZAKI



多田良幸*3
Yoshiyuki TADA



山口哲治*3
Tetsuji YAMAGUCHI



山村武志*3
Takeshi YAMAMURA

This paper describes a meta-heuristic method that finds pseudo-optimum combinations of orders and billets to be rolled. The problem is formulated as an integer programming problem with constraints. Due to the large number of orders and billets, as well as limited computation time, we established a method consisting of global and local searches, employing heuristics and random search. The system thus developed is currently in daily use, contributing to the efficiency and quality of operation.

まえがき = 鉄鋼圧延製品の製造における充当とは、ビレットをはじめとする未圧延の在庫（以下、半製品在庫という）と受注案件（以下、オーダという）とを紐（ひも）づける業務である（図1）。充当では、オーダで指定された仕様（成分、品質、機械特性など）に基づいて半製品在庫を受注量分引当てて圧延、加工し、検査を経て製品として出荷する。

本稿では、鉄鋼圧延製品のなかでも条鋼分野を対象とした充当における最適化技術について述べる。

当社鉄鋼事業部門では、加古川、神戸の両製鉄所の上工程を2017年10月に加古川製鉄所に集約した。この集約に合わせて充当方法も見直した。すなわち、これまでのオーダ受注後の溶製を中心とする形態から、一定量保持した半製品在庫量のなかからオーダに引当て、さらに将来のオーダを見越して先行溶製するという在庫補填型に移行した。

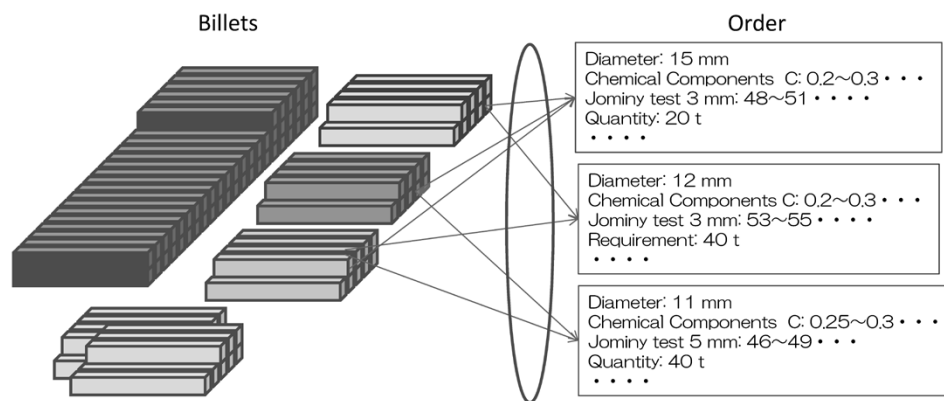
製品構成が多品種にわたるなか、総量が限定された在

庫をどのように構成すべきかは、生産計画および管理上重要な問題である。

通常、オーダ情報の工場への投入は一定期間ごとにまとめて行われる。半製品在庫は、同一成分の鋼種であっても製造のタイミングや品質によって「ロット」に分けて管理されている。一つのロットは数本~数十本のビレットから構成される。一つのオーダに複数のロットを充当可能であり、逆に、一つのロットを複数のオーダに充当可能である。

このように、オーダとロットは多対多の関係にあり、多様な組合せが可能である。また、オーダに対するロットの組合せ条件に制約がある場合もあり、制約を満足するような適切な組合せと充当量を決定する必要がある。その際には将来の充当を見越した在庫構成も考慮する必要がある。

オーダには、充当可能ロットに対する制約が厳しいものや、逆に、ロットには充当可能なオーダの少ないもの



Assign billets to order in many-to-many relationship

図1 オーダへのビレット充当の概要
Fig. 1 Outline of assigning billets to orders

*1 技術開発本部 生産システム研究所 *2 技術開発本部 AI推進プロジェクト部 *3 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 工程部

がある。一般的には、充当しにくいオーダーとロットの組合せ（充当可能なロットが少ないオーダーと充当可能なオーダーが少ないロット）を優先的に充当することで、さきざきでの充当自由度を高く維持できる。充当可能なロットが不足する場合、緊急溶製が必要になって納期面でのリスクが増大する。このため、在庫の充当自由度が高く維持できるような組合せを見出す必要がある。

そこで、充当自由度を数値化する「在庫戦力度」を定義した。そしてその在庫戦力度を指標にしつつ、さらにさまざまな操業上の優先度や評価指標を組合せて最適な充当を見出すための支援技術を開発した。

1. 支援技術のアプローチ

充当においては上述のように、どのオーダーにどのロットをどれだけ組合せて割り当てるかを決める必要がある。また、組合せされるロットのタイミング（チャージ）の数や同一チャージの充当量下限制約もある。在庫不足の場合は一部が先送りされ、さきざきの溶製材で充当される。その際、チャージ構成数や同一チャージロット制約は、今回および先送り分を合わせて満足させる必要がある、それを踏まえて先送り量を決定する必要がある。さらには、同一ロットであったとしても在庫が複数箇所保管されている鋼片を充当する場合、それらを船やトラックで輸送する必要があり、物流負荷やリードタイムによる制約、優先度がある。

先に述べた在庫戦力度は本技術の重要な指標である。いっぽうで、できるだけ多くのオーダーへの充当を完了させ、先送りを最小化する「充当完了率（= 充当完了オーダー件数 / 充当対象オーダー件数）」も重要な指標である。ロットは1本単位で充当されるため、解を整数とする制約付き組合せ最適化問題、すなわち整数計画問題として定式化できる。このときの実用上の課題は、計算時間の制約のもとで最適解に近い解を見出すことである。現状、毎日早朝に一括して解を求めるほか、生産の進捗に伴って組合せ制約や条件が変化することもあり、再計算が必要となる場合もある。一般的に分枝限定法、切除平面法などさまざまな計算の工夫について研究がなされている^{1)~3)}。さらに、短時間で高精度の近似解を求めるメタヒューリスティックな手法^{4), 5)}も多く提案されている。

本技術開発にあたっては、これらの報告を踏まえてつぎのようなアプローチを採用した。オーダーと在庫を品種や納期単位に問題をグループ分割した。問題のグループ分割は、品種に加えて圧延予定日までの余裕、あるいは納期確定の有無に基づいて行った。最も大きい問題で数百ロットと数百件のオーダーの組合せとなった。探索方法としては、メタヒューリスティック手法の一つである局所探索を用いることとした。局所探索では、初期解から始めて解を少しずつ変え、より良い解（最善解）に更新していく。その際、探索の初期解により解の品質や計算時間が大きく異なるため、できるだけ良い初期解から探索を開始するのが好ましい。そのために本技術開発では「広域探索」と組合せた。また、実用的な観点から計算

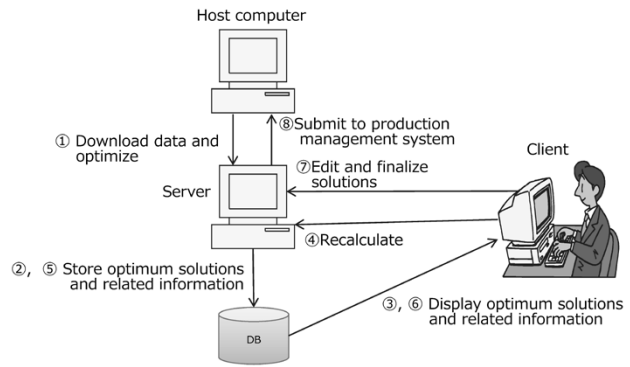


図2 システム構成とワークフロー
Fig. 2 System configuration and workflow

時間の上限を設定した。

計算時間の上限を超えて局所探索過程が途中で打ち切られた場合、改善途中の中途半端な解である可能性もある。そうした場合に対応するため、探索で得られた解をヒューリスティックルールによって改善する処理も組合せた。この処理を実現するためのシステム構成とワークフローを図2に示す。充当組合せ候補の作成は、鋼種の成分系（以下、鋼種Grという）ごとにホストコンピュータで行う。それらの候補のなかから組合せの選択と充当量の算出を行った後、オペレータによる確認修正や再計算、ホストコンピュータへの充当反映が指示できる。

2. 最適化方法

2.1 問題の定式化

本節では、充当の整数計画問題への定式化について述べる。1章で述べたとおり解の指標は、半製品在庫の戦力度と、できるだけ多くのオーダーへの充当を完了させる（要求される重量以上の充当を行う）充当完了率の二種類がある。この二つの指標は必ずしも相反するものではないが、求解過程ではどちらを重視するかの指針が必要となる。ここでは、広域探索でできるだけ多くのオーダーの充当を完了すべく、充当完了率が大きくなるほど良い解とした。局所探索では、半製品在庫戦力度を維持すべく、各オーダーと半製品在庫の充当本数の重み付き線形和が大きいほど良い解とする（<式1>の(1-1)）。重みは、該当半製品在庫の優先順位および該当オーダーの優先順位が高いほど大きくなる値とした。これは半製品在庫の充当自由度を表現することを意図しており、充当自由度が少ない組合せ（充当可能なロットが少ないオーダー、あるいは充当可能なオーダーが少ないロットの組合せ）ほど、重みが大きくなるようにしている。

<式1>

$$\text{評価関数} = \sum W_{ij} * X_{ij} \rightarrow \text{maximum} \dots\dots\dots (1-1)$$

$$W_{ij} = P / (O_i * L_j) \dots\dots\dots (1-2)$$

ここで、 O_i ：オーダー*i*の優先順位（1～オーダー数）、 L_j ：ロット*j*の優先順位（1～ロット数）、 P ：定数、 X_{ij} ：オーダー*i*とロット*j*の組合せの充当本数である。

解 X_{ij} は以下の制約条件を全て満たす必要がある。

$$\cdot \sum_i X_{ij} \leq Y_j \dots\dots\dots (1-3)$$

(Y_j ：ロット*j*の余材本数)

$$\cdot \sum_j X_{ij} * T_j \leq Z_i \dots\dots\dots (1-4)$$

(T_j :ロット j の単重, Z_i :オーダ i の充当量上限)

・ X_{ij} :整数

〈式1〉のなかで、オーダの優先順位はオーダの状況ごとに以下のように定義する。

5日以内に圧延するオーダ群 (オーダGr1)

・圧延日までのリードタイム (昇順)

6日先以降に圧延するオーダ群 (オーダGr2)

・圧延日までのリードタイム (昇順)

圧延日未定 (受注直後のオーダ) (オーダGr3)

・充当可能なロットの量 (昇順)

同様に、〈式1〉のなかで、ロットの優先順位は以下のように定義する。

・ロット戦力度 (昇順)

ここで、ロットの在庫戦力度は、「ロットと同一鋼種Grのオーダ受注量合計に占める、充当可能なオーダ受注量」で定義する。ロットの在庫戦力度が「小さい」とは、本来充当対象となるオーダに対して (表面や内部の品質などにより) 充当できるオーダが「少ない」、すなわち充当自由度が「小さい」ことを意味する。

2.2 解探索の全体フロー

前節で定式化した充当問題について、鋼種Grごとに、かつオーダGrごとに、オーダGr1, 2, 3の順に解の探索を行う。所定の制限時間のなかで最善解を求めるフローを図3に示す。最初に、広域探索にて充当完了率が最大となる最善解を求め、局所探索の初期解とする。局所探索では、初期解におけるオーダおよびロットの充当本数をランダムに少しずつ変える。より良い解、すなわち前節で示した評価関数が改善する解が得られれば、これを現在の最善解と入れ替える。これらの操作を繰り返すことにより、広域探索で充当完了率を最大化したものの、局所探索で戦力度改善を図るなかで充当完了率が低下する場合もある。制約条件を満足するためには、オーダ間の競合を解消する目的で優先度の低い在庫をあえて使うことが有利な場合もある。しかしその反面、充当量が多い方が評価関数値が大きくなるため、必ずしも充当完了率と利益相反するものではない。今回は、広域探索で求めた充当完了率を下限として、さらに戦力度評価値を改善する解を「より良い解」とした。

広域探索と局所探索の繰返しを1バッチとし、終了条件が成立するまでバッチを繰返す。探索の終了条件は解の評価とはしなかった。すなわち計算時間の制約を考慮し、探索の繰返し回数の上限、もしくは最善解の入れ替えが連続して行われない回数の上限とした。その上で、局所探索で得られた解に対して、例えばあるオーダに対してより優先度の高い在庫が余っていれば、優先度の低い在庫と入れ替えるといった必ず評価関数値が向上する「自明な」改善処理を適用している。

2.3 広域探索

広域探索では局所探索の初期解を求める。広域探索は、オーダやロットの順番を並べ替えた上で、受注量や制約を考慮してオーダに順次ロットを充当していく「順次充当」処理を繰返す。オーダあるいはロットの並べ替えにより多様な解の探索を行う。

探索の最初で繰返し回数を決定する。バッチ単位での繰返し回数が少ない段階で大きく、またオーダ件数が多いほど大きく設定する。

広域探索のフローを図4に示す。基本的な考え方は、オーダやロットの優先度の高い順に順次充当する。しかしながら、あるオーダにあえて優先度の低いロットを充当した方が全体的な充当量や充当完了率が向上し、結果としての評価値が上がる場合もある。網羅的な探索は非現実的であるため、オーダやロットの優先度を、本来の優先度のみでなく確率的に変更することによって多様な組合せを探索する。そのような確率的な変動の与え方は問題の特性に応じた工夫が必要である。そのため、ケーススタディを通じ、つぎのような考え方に従うこととした。

オーダの優先順位は、前句までに受注したオーダについては圧延日が近いものを優先する必要がある。このため、

優先順項目1:圧延日 (昇順)

優先順項目2:充当可能なロット重量合計 (昇順)

とした。また、今句に受注したオーダについては、要求品質が高く充当が困難なオーダに対し、充当できるロット

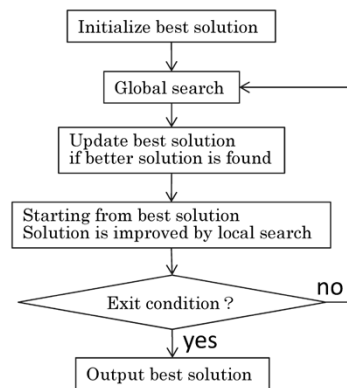


図3 解探索の全体処理フロー

Fig. 3 Entire processing flowchart for searching solutions

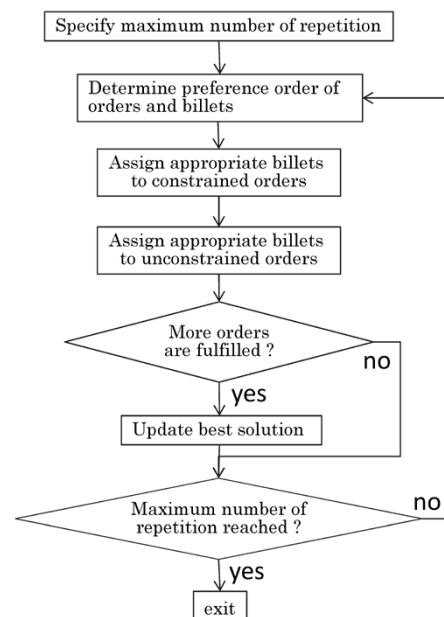


図4 広域探索処理フロー

Fig. 4 Processing flowchart for wide area search

トを確実に充当するため、

優先順項目1：充当可能なロット重量合計（昇順）

優先順項目2：圧延日（昇順）

優先順項目3：未充当量（降順）

とした。いっぽうで在庫は、同一溶製タイミング（同一チャージ）の在庫が複数のロットに分割されるため、チャージ単位、およびロット単位の二種類の優先度がある。制約付きオーダーを対象とする場合は、まずチャージ単位に優先順位を決定し、さらに各チャージに含まれるロットの優先順位を決定する。

チャージの優先順位は、下記四種類の決定方法を用いる。

T1：余材本数（昇順）

T2：他チャージとの競合オーダー数（昇順）

T3：充当可能なオーダーの要望量計（昇順）

T4：ランダム

またロットの優先順位は、充当しやすいものは残しておくため、

優先順項目1：充当可能なオーダー要望量合計（昇順）

優先順項目2：滞留日数（降順）

優先順項目3：余材本数（昇順）

とする。

広域探索では、充当にあたっては最初に制約付きオーダーを対象とする。制約付きオーダーとは、溶製品質のばらつきを抑えるべく、充当するチャージ数の上限や一つのチャージから充当されるロットの量の下限値が指定され

たオーダーである。

図5に示した例を用いて充当方法を概説すると、オーダーNo.01は、t/ch制約（同一チャージのロットの充当量下限）が10tであるため、図中の網掛けセルで示した充当可能な組合せのなかで制約を満足可能なチャージNo.C3のロットを充当する。オーダーNo.02はチャージ数が1ch以下のため、これを満足可能なチャージNo.C1のロットを充当する。同様に優先順位の順に制約を満足するよう充当する組合せを決めていく。このような制約付きオーダーに対し、ロットを優先順に充当する（図6）。得られた充当に対して充当完了率（必要量以上のロットを充当できたオーダーの割合）も考慮して既に求められている最善解よりも善い解であればそれを最善解とする。このような探索を繰り返す。

2.4 局所探索

広域探索では、優先順位を変更することによってできるだけ多くのオーダーが充当完了するように解の探索を行った。いっぽう局所探索では、広域探索で得られた最善解を初期値とし、評価関数に基づいて解の改善を行う。評価関数計算で用いるロットの優先順位は、広域探索で用いたチャージ単位の優先順位には関係なく、ロット単位の優先順位を用いる。広域探索では、最初に制約付きオーダーを対象に絞ったためチャージ単位の優先順位を考えた。しかしながら評価関数では、解の評価を行う目的から、在庫の最小評価単位であるロット単位の優先順位に絞る。

		preference order higher → lower					
		Order	O1	O2	O3	O4	
		Constraint	t/ch	ch	t/ch	ch	
		Requirement	14t	8t	28t	10t	
		criteria	more than 10t	less than 1ch	more than 14t	less than 1ch	
preference order	higher	Lot No.	Charge No.	rest(t)			
	↓	L1	C1	4			
L2		10				○	
L3		8			○		
L1		C2	2				
L2			10			○	
L3			4			○	
L1		C3	2	○			
L2			12	○			
L3			16			○(14t)	

■...assignable pair

図5 制約付きオーダーへの優先順充当の例

Fig. 5 An example of billets assignments to orders with constraints based on order preference

		preference order higher → lower		
		Order No.	O5	O6
		Constraint		
		Requirement	2t	4t
		criteria		
preference order	higher	Lot No.	ChargeNo.	rest(t)
	↓	L1	C1	4
L1		C2	2	
L2		C1	0	
L1		C3	0	
L2		C2	0	
L3		C2	0	
L3		C1	0	
L2		C3	0	
L3		C3	16	○ 2t

■...assignable pair

図6 制約なしオーダーへの優先順充当の例

Fig. 6 An example of billet assignment to orders without constraints by preference order

局所探索では解をランダムに変化させ、それによって評価関数が改善されれば解を更新する。1回の局所探索処理のフローを図7に示す。評価関数の変化量が十分小さくなるまでこのような局所探索を所定時間内で繰り返す。

まず繰り返し回数を決定する。繰り返し回数とは、後に示す擾乱（じょうらん）処理を適用するオーダーの件数Mである。オーダー全件数をN、選択するオーダー件数を定数Mとすると、確率 $\min(1, M/N)$ で擾乱を与えるオーダーを選択する。そして、当該オーダーに対してロットの充当組合せをランダムに選択すると同時に充当本数もランダムに変更する。この処理を擾乱処理と呼ぶ。

擾乱処理により、ロットの制約（<式1>の（1-3））違反や制約付きオーダーの場合にはオーダーの制約違反が発生する。これを解消すべく、ロットを共有するオーダーへの充当本数を修正し、あわせてオーダーに充当されている別ロットの充当本数を修正する。この処理を擾乱伝播処

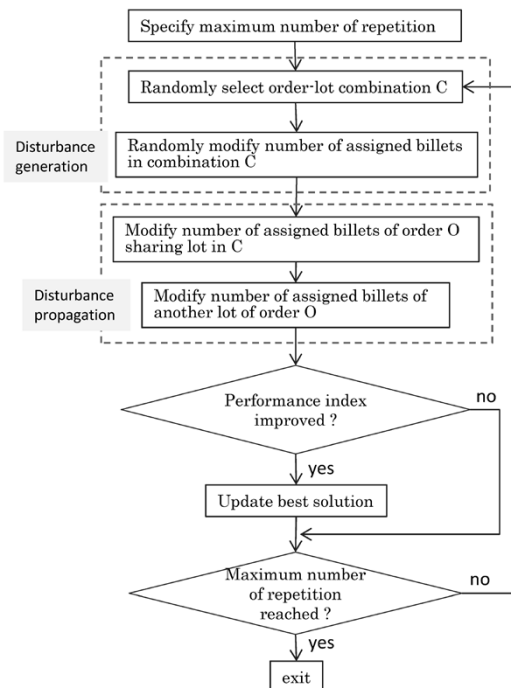


図7 局所探索処理フロー
Fig. 7 Processing flowchart for local search

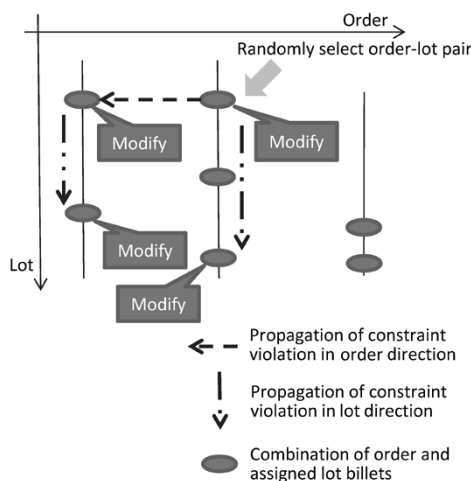


図8 局所探索における擾乱伝播イメージ
Fig. 8 Image of disturbance propagation in local search

理と呼ぶ。擾乱処理により制約違反を生じさせ、これを解決するために他の充当組合せの充当本数を修正していくことにより、初期解近傍でさらなる改善を目指す。図8に擾乱伝播のイメージ図を示す。

3. 評価結果

実際のオーダー（Gr3）と在庫（鋼種GrA, GrB）に探索フローを適用した。このときの探索の繰り返しによる改善の様子を図9, 図10に示す。それぞれの図において、上図は評価関数値（<式1>の（1-1））の改善の様子を、また下図は在庫の充当量（t）および充当完了オーダー数の改善の様子を示す。またいずれのグラフも、評価関数値、および1回目の広域探索で求めた最善解（初期解）を用いた場合の在庫の充当量や充当完了オーダー数を最善解で正規化した値の推移を示している。この値が1を超えて大きくなるほど良い解に改善されていることを示す。適用対象の鋼種Grはオーダー数が数百件と多く、また半製品在庫ロットも多いものとした。

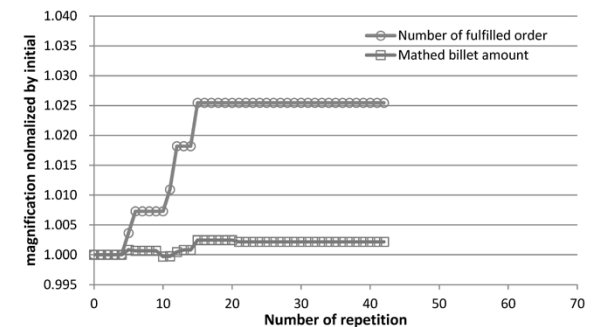
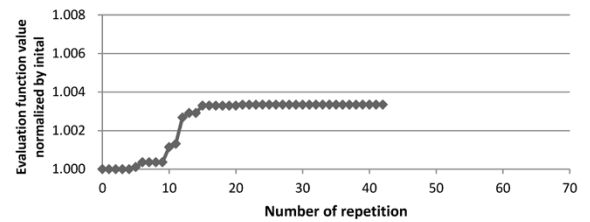


図9 解の評価値推移（鋼種GrA, オーダGr3）
Fig. 9 Shift of solution (Steel GrA, Order Gr3)

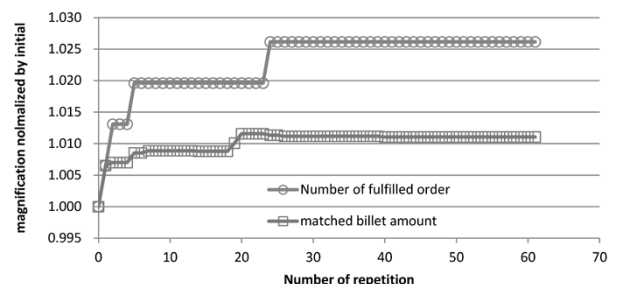
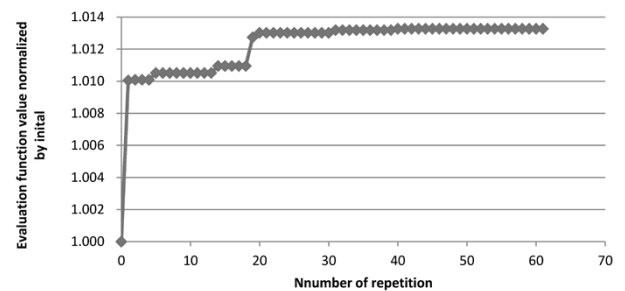


図10 解の評価値推移（鋼種GrB, オーダGr3）
Fig.10 Shift of solution (Steel GrB, Order Gr3)

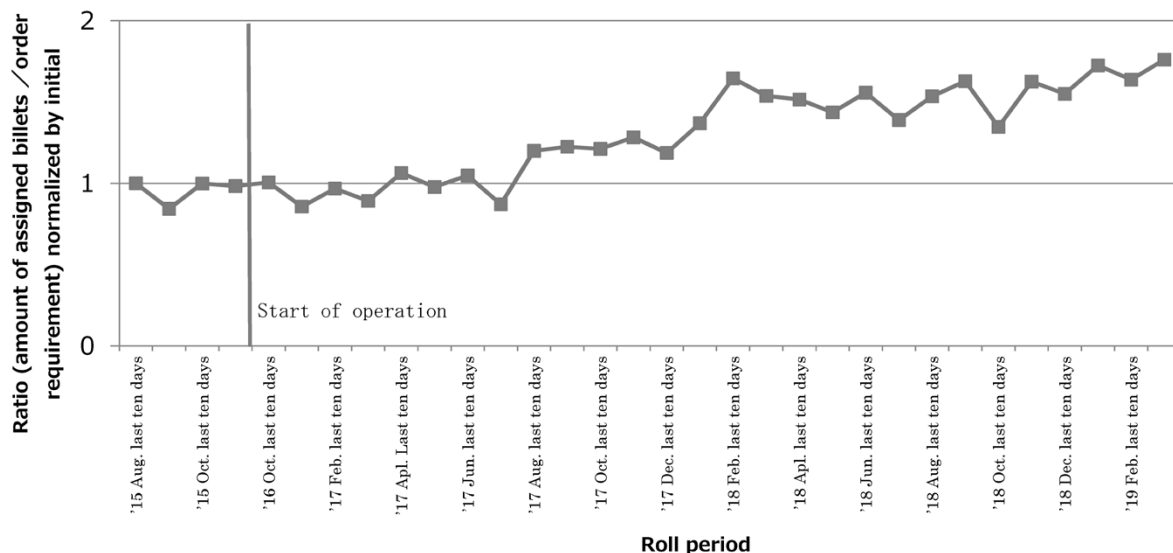


図11 在庫充当率の改善（充当された在庫／オーダーの要望量）
 Fig.11 Transition of ratio (assigned billets / order requirements) normalized by initial

いずれの図（上図）でも評価関数値の改善が確認できる。改善は全繰返し回数の最初の3分の1までに実現されており、全体フローの前半で広域探索の回数を多くした効果が確認できる。また、各図の下図に示した充当完了オーダー数の初回値に対する改善、および充当量の同改善についても、同様に推移している様子が分かる。特に、いずれの図においても、充当量の改善率に比べて充当完了オーダー数の改善率が大きくなっている。限られた充当可能な組合せのなかから、優先度の高い組合せを対象に充当完了できるオーダーに効率的に充当していることが分かる。

つぎに、実際の在庫充当率（在庫充当量／オーダー要望量合計）の改善の様子を図11に示す。本技術を用いたシステムの運用開始前からのおよそ3年半にわたる在庫充当率の推移を示している。在庫充当率は、2015年8月最終旬の在庫充当率（初期値）で正規化した10日ごとに投入されるオーダー単位の値である。運用開始前に比べておよそ1.5倍に改善しており、当初ねらった「在庫戦力度向上による在庫補填型充当」に近づきつつあることが分かる。

また、本技術を用いたことにより、担当者による充当業務に要する時間が一人あたり20時間／月削減できており、業務効率化の効果も現れている。

むすび＝本稿では、条鋼分野の半製品在庫の充当問題を対象に、数理計画問題への定式化と局所探索を用いた解法の提案を行った。実業務での適用においては、本解法による充当案と、人手による修正を経て充当が確定される。受注直後のオーダーに対しては、充当可能な半製品在庫が存在するオーダーに限定しても、その在庫充当率は、圧延日が迫っているオーダーに比べて低位にとどまる。これは、圧延日が迫っているオーダーに優先的に充当することが原因の一つである。

今後の課題としては、充当できるオーダーの多い半製品在庫（すなわち高品質の在庫）を溶製すること、さらには不足する鋼種の在庫を溶製することなど、需給管理も含めたトータルな生産管理の考え方が必要になると考える。

参考文献

- 1) 加地太一ほか. 情報処理学会第45回全国大会 講演論文集. 1992. p.71-72.
- 2) 藤江哲也. オペレーションズ・リサーチ, 2003, Vol.48, No.12, p.935-940.
- 3) Toshihide Ibaraki. Journal of the Operations Research Society of Japan. 1982, Vol.25, No.3, September, p.292-321.
- 4) 山田武士ほか. 情報処理学会論文誌. 1997, Vol.38, No.6, p.1126-1138.
- 5) 柳浦睦憲ほか. 組合せ最適化—メタ戦略を中心として—. 朝倉書店. 2001, 244p.