



# 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

藤井 聡\*・谷本 直\*<sup>2</sup>・富山 伸司\*・木村 亮介\*・白井 正明\*・宮原 弘明\*<sup>3</sup>

Genetic Algorithm with Reduction of Search Space Using Operational Constraints and  
Its Application to Scheduling System for Steelmaking Process

Satoshi FUJII, Sunao TANIMOTO, Shinji TOMIYAMA, Ryosuke KIMURA, Masaaki SHIRAI and Hiroaki MIYAHARA

**Synopsis :** This paper describes an automatic scheduling system for steelmaking process from refining converter to continuous caster. Conventional daily scheduling system does not get an optimal solution automatically, but gets a feasible solution with no machine conflicts between processes. It is very difficult to get the optimal solution for the large-scale and complex problem of steelmaking process scheduling, because this scheduling involves particular constraints and varying production requirements of each process. The proposed scheduling procedure consists of optimal method by using modified genetic algorithm (GA). This method applies multi-constraints to the reduction of the search space obtaining feasible solutions. And it can suppress the calculation time. The system has two benefits. One is an extension of the weekly scheduling system from the daily one. The other is an improvement in the quality of the schedule. The cost effectiveness is low waiting time of secondary refining process and low changing of alternative secondary refining process. This algorithm was installed in the scheduling system of NKK Keihin Works and has contributed to improving its efficiency in the steelmaking process.

**Key words:** steelmaking; scheduling; genetic algorithm; large-scale system; optimization; quasi optimal solution.

## 1. はじめに

近年、鉄鋼製品の高級化、多品種化に伴い製造工程は非常に複雑化しており、操業・物流の最適化を目的とした計画立案を可能とするスケジューリングシステムの実現が強く望まれてきた。一般的に鉄鋼のスケジューリング問題は、大規模、多制約、多目的なため、目的、規模、制約条件などを考慮し、実用的な時間内で最適な計画立案ができるシステムの実現が期待されてきた<sup>1-4)</sup>。

これまで、京浜製鉄所の転炉～二次精錬～連続鋳造までの製鋼工程の日程計画システム (Scheplan)<sup>5)</sup> は、1990年に開発された。このシステムは、オペレータが製造順を決定した後、設備の競合を解消し、各設備の開始、終了時刻を決定しているもので、最適化をはかった計画ではなかった。一方、納期管理の精度を上げるために、これまでの1日分の計画から1週間分の出鋼予定が必要となってきた。

このような問題を解くために、数理計画問題の最適化手法の有効な手法の一つとして、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下GA)<sup>6)</sup> がある。

これまでにも、鉄鋼の生産計画にGAが適用されているが、収束がそれほど良くなく、計算時間がかかるため、ヒューリスティックと組み合わせることで、実用的な時間で

解を求めている<sup>7)</sup>。

ルール型のヒューリスティックを多用すると、システムの保守性が悪いため、制約条件を活用して探索空間を絞り込むことにより処理時間を短縮するGAを開発した<sup>8)</sup>。

この最適化手法を用いて、生産量を確保した上で、二次精錬の待ち時間最小化、標準の通過工程以外の代替処理工程発生によるコスト増を抑えるとともに、1週間分の計画を自動で策定する新しい出鋼順編成システムを開発し、京浜製鉄所において実用化した。

## 2. 製鋼工程

製鋼工程では、溶銑を転炉と二次精錬設備によって目的の成分と温度の溶鋼にし、連続鋳造設備において薄板、厚板、管材となる素材の鋼片を次工程に供給する。

鋳造順編成は、この工程の生産計画を作成するものである。この工程は、転炉の吹錬 (約300 ton) を1単位 (チャージ) とするバッチプロセスであり、この中に複数の圧延注文 (同一鋼種) を含んでいる。連続鋳造設備において、鋳込み開始、終了部位を少なくし、歩留まりを上げるために、チャージを複数つないで鋳造を行う (以下連々鋳セット)。このため、各チャージが鋳造設備でつながる

平成15年4月1日受付 平成15年9月16日受理 (Received on Apr. 1, 2003; Accepted on Sep. 16, 2003)

\* JFE技研 (株) 計測制御研究部 (Instrument & Control Engineering Dept., JFE R&D Corp., 1-1 Minamiatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210-0855)

\* 2 日本工業大学電気電子工学科 (Dept. of Electrical & Electronics Engineering, Nippon Institute of Technology)

\* 3 JFEスチール (株) 技術企画部 (Technology Planning & Coordination Dept., JFE Steel Corp.)

ように、転炉から鑄造までの各設備における処理の開始、終了時刻を決定する。また、鑄造される素材の鋼種約2000種類に合わせた、二次精錬設備の選択が必要である。このため、これら設備の競合解消が必要となっている。京浜の製鋼工程では、転炉1機、二次精錬設備7機、連続鑄造設備3機、造塊1機が稼働しており、これら設備を対象とした出鋼順自動編成を開発した。

### 3. 出鋼順自動編成

#### 3.1 出鋼順編成の概要

出鋼順自動編成は、各圧延工場からの鑄造要望（圧延予定）に基づいて、転炉から鑄造設備までの各工程の開始時刻および終了時刻をチャージごとに7日分決定するものである。7日分の出鋼順編成は、1日目から順に1日単位で作成する。

出鋼順は、下記の各チャージに関する情報に基づいて編成される。

- $ch\_day(i)$  :  $i$ チャージの出鋼要望日
- $ld\_fix(i)$  :  $i$ チャージの出鋼指定日時
- $ch\_zc(i)$  :  $i$ チャージの鋼種
- $ch\_size(i)$  :  $i$ チャージの鑄造サイズ（幅）
- $Nr(i)$  :  $i$ チャージの使用二次精錬設備数
- $cost(i,s,m)$  :  $i$ チャージの  $s$  番目 ( $s=1, \dots, Nr(i)$ ) の二次精錬処理を  $m$  番設備によって処理した場合のコスト

出鋼指定日時  $ld\_fix(i)$  は、転炉からの出鋼時刻が厳しく限定されるチャージに対して指定される。各チャージは、転炉での処理の後、1回または複数回の二次精錬処理が施された後、所定の鑄造設備で鑄造され、次工程に搬送される。 $Nr(i)$  は各チャージの二次精錬で用いられる設備の数を示している。

各設備には、転炉に1番、二次精錬設備に2~8番、連続鑄造設備に9~11番と、設備識別番号がつけられており、 $cost(i,s,m)$  の  $m$  には2~8の番号のうちいずれかが入る。また、各二次精錬処理に使用できる設備は、必ずしも1処理に対して1設備に限定されているわけではなく、複数の設備から選択できる場合もある。ただし、使用する設備によって処理コストが異なっており、そのコストが変数  $cost(i,s,m)$  で定義されている。

さらに、各チャージには、属する連々鑄セットが決められており、この情報も出鋼順編成に用いられる。

$CCC(k)$  : 連々鑄セット  $k$  を構成するチャージ番号の集合  
ただし、集合  $CCC(k)$  の要素は連続した番号(自然数)である。

また、各設備の処理開始終了の日時、転炉作業員のための食事休憩（転炉食休）の開始終了の日時、および処理設備は、以下の通りである。

- $sch\_ld(i)$  :  $i$ チャージの転炉処理開始日時
- $ech\_ld(i)$  :  $i$ チャージの転炉処理終了日時
- $sch\_sr(i,s)$  :  $i$ チャージの番目 ( $s=1, \dots, Nr(i)$ ) に行われる二次精錬処理の開始日時
- $ech\_sr(i,s)$  :  $i$ チャージの  $s$  番目 ( $s=1, \dots, Nr(i)$ ) に行われる二次精錬処理の終了日時
- $sch\_cc(i)$  :  $i$ チャージの鑄造開始日時
- $ech\_cc(i)$  :  $i$ チャージの鑄造終了日時
- $sl\_stp$  : 転炉食休の開始日時
- $el\_stp$  : 転炉食休の終了日時

これらの変数は、日時を実数値に変換したものであり、早い日時ほど小さな値をとる。また、日時の差は、変数の差から計算できる。

- $id\_sr(i,s)$  :  $i$ チャージが  $s$  番目の二次精錬処理に使用する二次精錬設備番号
- $id\_cc(k)$  : 連々鑄セット  $k$  を鑄造する連続鑄造設備番号

ただし、造塊設備は、1機であり、連続鑄造設備との競合もないため、ここでの記述は省略する。

#### 3.2 評価項目

##### 3.2.1 目標出鋼杯数確保

本来は制約条件であるが、目標杯数が得られないとき計画が作成できないため、評価指標として取り扱う。

$$\left| \sum_{i \in FC(d)} 1 - pp(d) \right| \rightarrow \min \dots \dots \dots (1)$$

ここで、上に示す評価式の変数の意味は、下記の通りである。

$FC(d)$  : 出鋼日が  $d$  となるように編成されたチャージ番号の集合

$pp(d)$  : 出鋼日  $d$  の杯数目標量

##### 3.2.2 二次精錬待ち時間最小化

チャージが二次精錬の設備に到着してから、二次精錬処理が開始されるまでの待ち時間を評価項目とする。待ち時間を短くした分、出鋼温度を下げることができ、耐火物原単位低減などの効果がある。

$$\sum_{i \in FC(d)} \sum_{s=2}^{Nr(i)} (sch\_sr(i, id\_sr(i,s)) - ech\_sr(i, id\_sr(i,s-1)) - move(id\_sr(i,s-1), id\_sr(i,s))) + \sum_{i \in FC(d)} (sch\_sr(i, id\_sr(i,1)) - ech\_ld(i) - move(1, id\_sr(i,1))) \rightarrow \min \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $move$  は設備間の移動時間を計算する関数である。

$move(p,q)$  : 設備  $p$  番から設備  $q$  番までの移動時間

3・2・3 二次精錬設備選択の最適化

二次精錬設備は、複数の通過工程が設定されており、その中から設備競合しないように処理コストが低い工程を選択する。

$$\sum_{i \in FC(d)} \sum_{s=1}^{Nr(i)} cost(i,s,id\_sr(i,s)) \rightarrow \min \dots\dots\dots(3)$$

3・3 出鋼順編成の制約条件

3・3・1 処理時間

転炉、二次精錬設備、連続鋳造設備における処理開始日時、処理終了日時の関係を(4)~(6)式に示す。チャージ*i*に対して、

$$ech\_ld(i) = sch\_ld(i) + proc\_ld \dots\dots\dots(4)$$

$$ech\_sr(i,s) = sch\_sr(i,s) + proc\_sr(ch\_zc(i), id\_sr(i,s)) \quad (s=1, \dots, Nr(i)) \dots\dots\dots(5)$$

$$ech\_cc(i) = sch\_cc(i) + proc\_cc(ch\_zc(i), ch\_size(i)) \dots\dots\dots(6)$$

- proc\\_ld* : 転炉での処理時間
- proc\\_sr(p, j)* : 二次精錬設備 *j* 番での、鋼種 *p* のチャージの処理時間
- proc\\_cc(p, l)* : 鋳造サイズ *l* で鋼種 *p* のチャージの処理時間

である。

3・3・2 処理順序

チャージ *i* は、転炉、二次精錬設備、連続鋳造設備の順で処理される。設備間ごとに移動時間は指定されている。

$$ech\_ld(i) + move(1, id\_sr(i,1)) \leq sch\_sr(i, id\_sr(i,1)) \dots\dots\dots(7)$$

$$ech\_sr(i,s) + move(id\_sr(i,s), id\_sr(i,s+1)) \leq sch\_sr(i,s+1) \quad (s=1, \dots, Nr(i)-1) \dots\dots\dots(8)$$

$$ech\_sr(i, Nr(i)) + move(id\_sr(i, Nr(i)), id\_cc(k)) \leq sch\_cc(i) \quad (i \in CCC(k)) \dots\dots\dots(9)$$

連々鋳セットを構成するチャージの鋳造順序は指定されているため、連々鋳セット *k* 内の連続するチャージ *i, i+1* に対して、(10)式が成立する。

$$ech\_cc(i) = sch\_cc(i+1) \quad (i, i+1 \in CCC(k)) \dots\dots\dots(10)$$

3・3・3 出鋼要望日

出鋼要望日(チャージごとの納期:チャージ内には、納期の異なる複数の注文が入る)と計画されたチャージの出鋼日の較差は、許容値  $\alpha_{day}$  以下とし、(11)式が成立する。

$$|ch\_day(i) - t2d(ech\_ld(i))| \leq \alpha_{day} \dots\dots\dots(11)$$

ただし、*t2d* は入力された日時データから日データを返す関数である。

3・3・4 設備競合

各設備では同時に1チャージしか処理できない。また、

二次精錬設備における1チャージの処理開始前と、連続鋳造設備における連々鋳セットの処理開始前には、それぞれ準備時間(段取り時間)が必要である。

すなわち、2つのチャージ *i, j* (*i* ≠ *j*) について、転炉の制約条件

$$(sch\_ld(i), ech\_ld(i)) \cap (sch\_ld(j), ech\_ld(j)) = \phi \dots\dots\dots(12)$$

を満たす必要がある。

また、*id\\_sr(i, s<sub>1</sub>) = id\\_sr(j, s<sub>2</sub>)* を満たす *s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub>* が存在する(すなわち同一の二次精錬設備を使う)2つのチャージ *i, j* (*i* ≠ *j*) について、二次精錬設備の制約条件

$$(sch\_sr(i, s_1) - sr\_rest(id\_sr(i, s_1)), ech\_sr(i, s_1)) \cap (sch\_sr(i, s_2) - sr\_rest(id\_sr(i, s_2)), ech\_sr(i, s_2)) = \phi \dots\dots\dots(13)$$

を満たす必要がある。

さらに、2つの連々鋳セット *k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>* (*k<sub>1</sub>* ≠ *k<sub>2</sub>*) について、

$$\left( \min_{i \in CCC(k_1)} (sch\_cc(i) - cc\_rest(id\_cc(k_1))), \max_{i \in CCC(k_1)} ech\_cc(i) \right) \cap \left( \min_{i \in CCC(k_2)} (sch\_cc(j) - cc\_rest(id\_cc(k_2))), \max_{i \in CCC(k_2)} ech\_cc(j) \right) = \phi \dots\dots\dots(14)$$

となる必要がある。ここで、

(*t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>*) : 日時 *t<sub>1</sub>* を過ぎてから、日時 *t<sub>2</sub>* になる直前までの日時集合

(*t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>*) ∩ (*t<sub>3</sub>, t<sub>4</sub>*) = φ : 日時集合 (*t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>*) と (*t<sub>3</sub>, t<sub>4</sub>*) の時間帯に重複する設備が存在しない

*sr\\_rest(p)* : 二次精錬設備 *p* 番の段取り時間

*cc\\_rest(p)* : 連続鋳造設備 *p* 番の段取り時間

を意味している。

3・3・5 特殊材の前後処理

二次精錬設備で特殊材 (*ch\\_zc(i) ∈ Q*) を処理する際、特殊材の前後で処理されるチャージの鋼種は限定される。

$$ch\_zc(chno\_pre(i, id\_sr(i,s))) \in pre(ch\_zc(i), id\_sr(i,s)) \dots\dots\dots(15)$$

$$ch\_zc(chno\_pre(i, id\_sr(i,s))) \in next(ch\_zc(i), id\_sr(i,s)) \dots\dots\dots(16)$$

ここで、

*Q* : 特殊材の鋼種の集合

*pre(p, m)* : *m* 番の二次精錬設備において鋼種 *p* の直前に処理可能な鋼種の集合

*next(p, m)* : *m* 番の二次精錬設備において鋼種 *p* の直後に処理可能な鋼種の集合

*chno\\_pre* と *chno\\_next* は、(17), (18)式で定義される。

$$chno\_pre(i, m) = \arg \max_{j \in PR(i, m)} ech\_sr(j, s_2),$$

$$PR(i, m) = \{j | ech\_sr(j, s_2) < sch\_sr(i, s_1), id\_sr(i, s_1) = id\_sr(j, s_2) = m\} \dots\dots\dots(17)$$

$$\begin{aligned} chno\_next(i,m) &= \arg \min_{j \in NX(i,m)} sch\_sr(j,s_2), \\ NX(i,m) &= \{j | sch\_sr(j,s_2) > ech\_sr(i,s_1), id\_sr(i,s_1) \\ &= id\_sr(j,s_2) = m\} \dots\dots\dots(18) \end{aligned}$$

3.3.6 出鋼時刻指定

電気炉から出鋼される湯との合わせが必要なチャージの場合、出鋼時刻が指定される。

$$|ld\_fix(i) - ech\_ld(i)| \leq \alpha_{fix} \dots\dots\dots(19)$$

(19) 式において、指定された出鋼時刻に対して、許容値  $\alpha_{fix}$  以内に出鋼しなければならない。

3.3.7 設備休止

チャージについて (20), (21) 式、連々铸セット  $k$  について (22) 式に、故障や修理が設定されている場合の設備制約を示す。

$$(sch\_ld(i), ech\_ld(i)) \cap (sld\_sd, eld\_sd) = \phi \dots\dots\dots(20)$$

$$\begin{aligned} (sch\_sr(i,s), ech\_sr(i,s)) \cap \\ (ssr\_sd(id\_sr(i,s)), esr\_sd(id\_sr(i,s))) = \phi \\ (s=1, \dots, Nr(i)) \dots\dots\dots(21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left( \min_{i \in CCC(k)} sch\_cc(i), \max_{i \in CCC(k)} ech\_cc(i) \right) \cap \\ (scc\_sd(id\_cc(k)), ecc\_sd(id\_cc(k))) \dots\dots\dots(22) \end{aligned}$$

ここで、

- $sld\_sd$  : 転炉休止の開始日時
- $eld\_sd$  : 転炉休止の終了日時
- $ssr\_sd(p)$  : 二次精錬設備  $p$  番休止の開始日時
- $esr\_sd(p)$  : 二次精錬設備  $p$  番休止の終了日時
- $scc\_sd(p)$  : 鑄造設備  $p$  番休止の開始時刻
- $ecc\_sd(p)$  : 鑄造設備  $p$  番休止の終了時刻

を意味する。

3.3.8 転炉食休

転炉作業員の食事休憩は、あらかじめ指定された食休時間帯内に所定の時間をとる必要がある。

$$(min\_ld\_stp, max\_ld\_stp) \supseteq (sld\_stp, eld\_stp) \dots\dots\dots(23)$$

$$eld\_stp - sld\_stp = ld\_stp \dots\dots\dots(24)$$

$$(sld\_stp, eld\_stp) \cap (sch\_ld(i), ech\_ld(i)) = \phi \dots\dots\dots(25)$$

食事休憩中は転炉での処理は、不可である。

ここで、

- $min\_ld\_stp$  : 転炉食休取得時間帯の開始日時
- $max\_ld\_stp$  : 転炉食休取得時間帯の終了日時
- $ld\_stp$  : 食休取得時間

である。

3.3.9 複数同時鑄造

3機ある連続鑄造設備のうち、同時に稼動できるのは日

時  $t$  に対して、2機までである。

$$\sum_{p \in OP(t)} 1 \leq 2 \dots\dots\dots(26)$$

ここで、 $OP(t)$  は日時  $t$  において稼動中である鑄造設備の番号の集合である。

$$OP(t) = \{p | \exists k, \exists i \in CCC(k), p = id\_cc(k), sch\_cc(i) \leq t \leq ech\_cc(i)\} \dots\dots\dots(27)$$

また、2機の連続鑄造機が同時稼動している場合に、残り1機が時刻  $t_2$  に稼動可能になるのは、稼動している2機のうち1機が処理を終了 ( $t_1$ ) してから  $cc\_wrap$  経過後である。このとき、 $t_1, t_2$  は (28) 式を満たす。

$$\begin{aligned} t_2 - t_1 > cc\_wrap \\ \left( t_1 < t_2, \sum_{p \in OP(t_1)} 1 = 2, \overline{OP(t_1)} \cap OP(t_2) \neq \phi \right) \dots\dots\dots(28) \end{aligned}$$

3.4 操業制約を活用したGAによる自動編成アルゴリズム

制約条件を活用して探索空間を絞り込むことにより処理時間を短縮するGAの概要を Fig. 1 に示す。

以下に、初期個体群の生成、交叉、評価について説明する。

3.4.1 初期個体群の生成

連々铸セット内の各チャージは、チャージのつながり目、テーパー（鑄造幅変更）を考慮して、各鑄造部位に注文が充当されている。このため、連々铸セット内の各チャージの鑄造順序変更や分割、他の連々铸セットとの結合の操作を実施すると鑄造部位と注文の関係が壊れることから、連々铸セットを遺伝子とし、連々铸セットの処理順序を個体  $P$  とする。

$$P(g,r) = \{C_1^{g,r}, \dots, C_m^{g,r}\} \dots\dots\dots(29)$$

ここで、

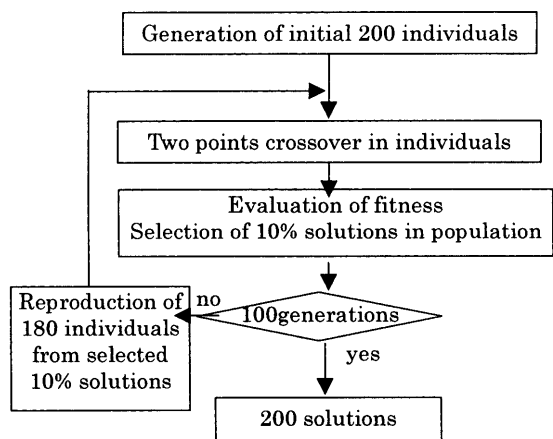


Fig. 1. Proposed algorithm.

- $C_i^{g,r}$  : 連々铸セットの番号 ( $C_i^{g,r} \neq C_j^{g,r}$  ( $i \neq j$ ),  
 $C_i^{g,r} \in \text{IDX\_CCC}$  ( $i=1, \dots, m$ ))
- IDX\_CCC : 連々铸セットの番号の集合
- $m$  : 連々铸セット数
- $g$  : 世代
- $r$  : 個体番号 ( $r=1, \dots, R$ )
- $R$  : 個体数

初期解候補の与え方は、乱数、もしくは最早納期順、最小作業時間順、受注順などの簡単な規準の組み合わせがある<sup>9)</sup>。これらの方法による初期解の作成では、鋼種や処理設備による制約条件が考慮されていないことから、非実用解の計画が多数発生してしまう。これを回避するために、各制約条件を満足する初期個体群を作成する。

個体の生成手順は、計画材源の中から 3・3 節で示した出鋼要望日、特殊材の前後処理、出鋼時刻指定、設備休止、複数同時鑄造の制約条件を満足する連々铸セットの候補を選択する。次に、直前の連々铸セットが処理される二次精錬、鑄造設備と異なる連々铸セットを候補とし、この候補の中からランダムに連々铸セットを選択する操作を繰り返す。連々铸セットの並び順を決定する。これらの手順により作成された連々铸セット順序の個体は、設備の空き時間が少ない(出鋼杯数が多い)実行可能解の初期個体を得ることができる。

3・4・2 交叉

通常交叉方法では、制約条件の複雑さのために、制約を充足することは困難であり、操業条件を満たさない致死遺伝子を多数生成してしまう欠点を持つ。致死遺伝子の発生を抑制し、実行可能解となることを優先するために、交叉個所を限定し、各個体内で2点交叉<sup>6)</sup>を実施している。このとき、交叉によって設備が競合し、3・3 節で示した設備競合、特殊材の前後処理、設備休止、複数同時鑄造の各制約条件が維持されていない場合には、制約条件を満足するようにルールで各処理設備の開始、終了時刻を移動させて修正する。また、処理設備の開始、終了時刻を移動させるだけでは設備競合を回避できない個体は排除する。

3・4・3 評価

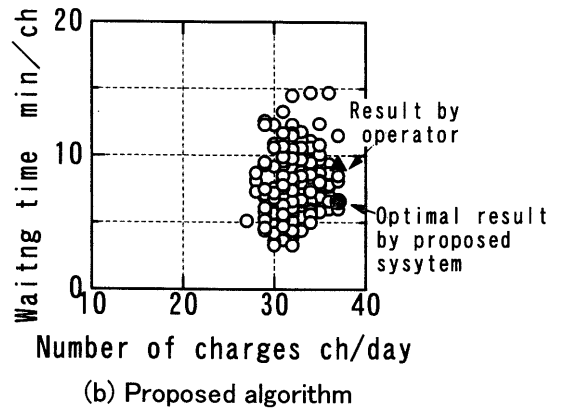
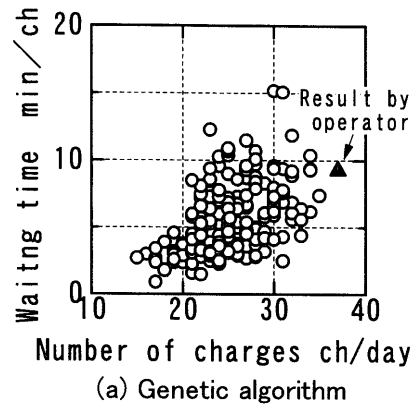
これらの作成された解から評価の良いものを10% (20個体) 残し、その解に基づいて180の新しい個体を作成することを100世代繰り返す。

4. 適用結果

4・1 従来GAとの比較

従来GAと本手法の比較結果を Fig. 2, Fig. 3 に示す。従来GAは乱数で初期個体群を作成するシンプルGA<sup>6)</sup>である。

Fig. 2(a), (b) は100世代後の解の結果である。ここでは、



Distribution of feasible solutions

Fig. 2. Comparison with GA and proposed algorithm.

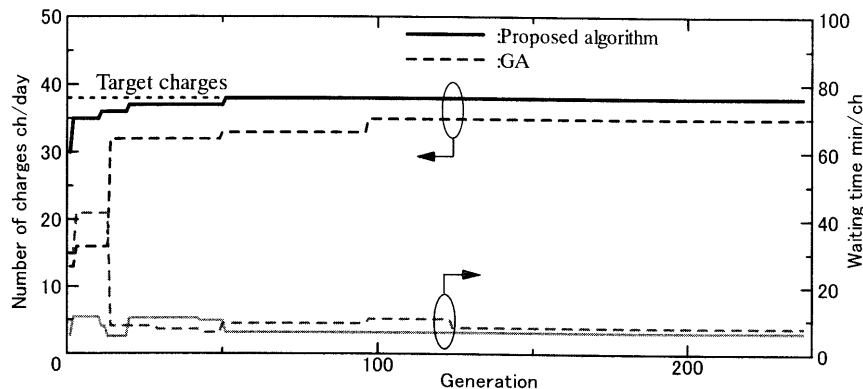


Fig. 3. Convergence of solutions.

杯数が多く、待ち時間が小さい領域（図中、右下方向）をねらっている。図中○は各アルゴリズムを適用した計画結果の200個の解分布、▲は従来システムを用いてオペレータが策定した計画結果を表す。●は、この他、代替処理工程を考慮した最適解を表し、この結果が計画として採用される。ただし、図中では、評価項目の二次精錬設備の代替処理については評価を示していない。

Fig. 3 は、世代ごとの個体群の中で杯数が最も多く、その個体の待ち時間の推移を示す。

本手法は、制約条件を満足している初期個体を生成しているため、探索開始時の杯数は、従来手法に比べ、倍の30 ch/day から開始されている。このため、従来GAに比べ、本手法は目標杯数に50世代以降でほぼ到達している。

これらの従来手法との比較検討から、100世代程度の演算で探索が可能であることが確認できる。これにより、従来のGAの数千から1万の探索回数<sup>10)</sup>に比べ、100倍程度の短縮が可能である。

#### 4.2 応用

京浜製鉄所のシステム構成をFig. 4 に示す。ホスト計算

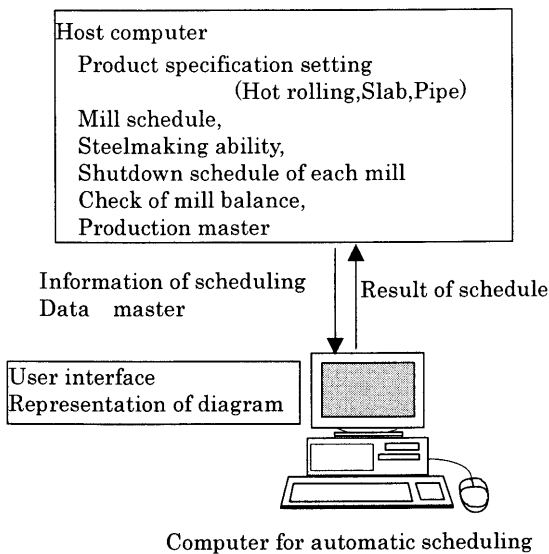


Fig. 4. Structure of scheduling system.

機上の計画策定に必要な鑄造情報が出鋼順自動編成用の計算機に伝送され、この計算機上で計画を策定する。

従来システムと本システムの計画評価テストを7日分実施した。Table 1 に各日およびその平均値の評価結果を示す。本システムは、1日の出鋼杯数が従来システムと同じで、二次精錬の待ち時間が2分/ch短縮している。また、二次精錬の標準工程以外の代替処理工程選択が1.6 ch/日減り、処理コストを抑制している。

従来システムと本システムでの計画策定範囲、計画時間をTable 2 に示す。従来の手組みをベースとする計画は1日分を約数時間かけて作成していたが、本システムでは、1週間分の最適化された計画を約20分で策定する。

実操業時の事例をFig. 5, Fig. 6 に示す。各図は、1日分

Table 1. Scheduling results.

	ch/day		Process waiting time min./ch		Alternative process operation ch/day	
	Cs	Ps	Cs	Ps	Cs	Ps
Case1	33	34	10.0	6.2	4	0
Case2	39	39	8.4	7.5	4	3
Case3	39	39	9.2	6.0	3	0
Case4	40	39	12.0	10.0	3	3
Case5	40	39	14.7	11.6	1	2
Case6	38	38	14.7	13.9	3	1
Case7	37	38	9.0	7.1	4	1
Ave.	38	38	11	9	3	1.4

Cs: Results by conventional system  
Ps: Results by proposed system

Table 2. Evaluation of system.

	Conventional system	Proposed system
Scheduling range	Daily	Weekly
Scheduling time	Several hours	About 20 min.

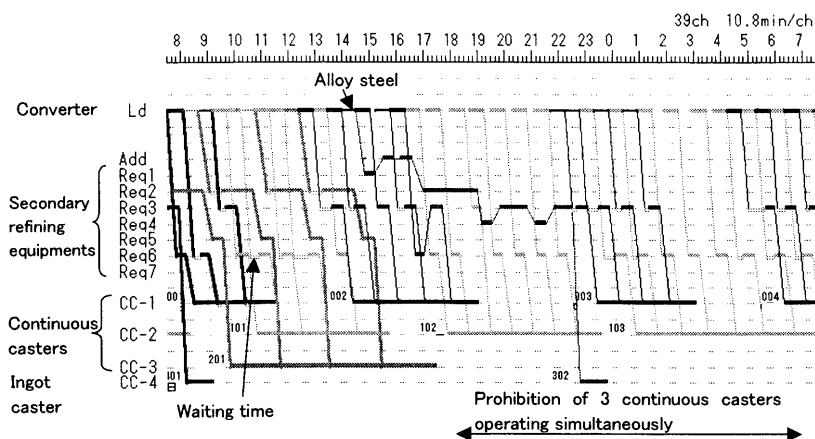


Fig. 5. Scheduling result with constrains of continuous casters and alloy steel.

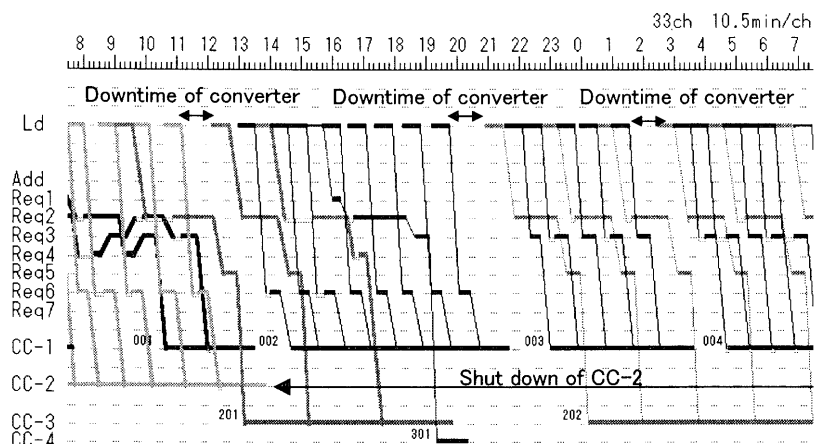


Fig. 6. Scheduling result with constraints of converter and shut-down.

(AM7:30~翌日AM7:29)の計画で、右上の数字は、1日の出鋼杯数および、出鋼杯数あたりの待ち時間を表す。なお、実操業で用いる線図では、各チャージの鋼種名、連々铸セット名、設備名が表示されている。

Fig. 5は連続铸造設備3機の夜間ラップ(21:00以降)操業が不可で、特殊材が存在するときの例である。特殊材(転炉開始14:00、造塊終了23:30)は、指定時刻に出鋼し、電気炉の湯とAddの位置にて合わせている。特殊材を二次精錬設備Req-3で処理する前後に、特殊材に適合する鋼種を含む連々铸セット(102, 003)を配置している。

Fig. 6は、稼働率が低下しているときの例である。铸造設備(CC-2)が14:00から24時間休止で、各直(1直:7:30~14:30, 2直:14:30~21:00, 3直:21:00~7:30)に転炉食休による転炉の作業休止時間の制約がある。

これらの例からわかるように、本システムは種々の操業環境変化にも対応でき、日々の操業に用いられている。

## 5. おわりに

制約条件を用いて探索空間を絞り込むことにより処理時間を短縮するGAを開発した。このGAは、従来のシンプ

ルGAに比べて1/100程度で収束することができる。

この手法を用いて、転炉~二次精錬~連続铸造までの製鋼工程の週間計画システムを実用化した。

今後、他の工程にも本手法を適用する予定である。

## 文 献

- 1) 柳原紀彦, 金子雅彦, 井塚滋夫: 日本オペレーションリサーチ学会春季研究発表会, 日本オペレーションリサーチ学会, 東京, (1984), 51.
- 2) 高橋哲也, 田村繁彦, 小西正躬, 花岡宏卓, 中川浩之: 第25回SICE学術講演会, 計測自動制御学会, 東京, (1986), 269.
- 3) M.Saito and T.Yamada: *J. Soc. Instrument Control Eng.*, **6** (1990), 33.
- 4) 今井太一, 中川義之, 熊本和浩, 野平正樹, 山口知子: 生産スケジューリングシンポジウム, 日本経営工学会, 東京, (1996), 151.
- 5) H.Hamada, Y.Ogura, Y.Tabata, A.Yamanaka, T.Yamada and M.Sato: *NKK Tech. Rep.*, No. 137 (1991), 9.
- 6) D.E.Goldberg: *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Massachusetts, (1989), 59.
- 7) K.Hirayama, H.Kajihara and Y.Nakagawa: *Trans. Inst. Systems, Control Information Eng.*, **9** (1996), 395.
- 8) S.Fujii, H.Miyahara and K.Fujikawa: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 1000.
- 9) Y.Kajihara, H.Osaki and T.Kagawa: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **62** (1996), 2079.
- 10) 遺伝的アルゴリズム2, 北野宏明編, 産業図書, 東京, (1995), 25.