

厚板チャージ編成におけるDPの適用

井上 英明

1. はじめに

鉄鋼の製造は受注生産方式であり、特に厚板は受注オーダーの鋼種、寸法等の製造仕様は多種多量が十数トン程度の小ロットのものが多い。その製造は製鋼炉の精錬単位であるチャージ(250トン前後)ごとに溶鋼を製造することから始まる。したがって製造計画は受注オーダーのロットをいかにしてチャージに集約するか、すなわちチャージ編成を目標として進められる。そこでは製造設備や操業の条件を満足させるとともに、納期や歩留等それぞれの管理項目に対し損失の少ない集約を考える必要がある。本稿では、日本鋼管福山製鉄所において厚板素材を製造している転炉と連続鋳造工程に対するチャージ編成システムを取り上げ最適なチャージ編成を達成するために、動的計画法の適用を図ったので、その概要を紹介する。

いとうえ ひであき 日本鋼管 福山製鉄所 システム部開発室

2. 厚板の製造

厚板の製造は、鋼種別にチャージ単位で溶鋼を製造することから始まる。次に溶鋼は、チャージごとに選んだモールドでスラブ断面寸法を決め鋳造される。その後、図1に示すようなスラブへの分割、圧延、厚板への分割を経て、最終的に2~5トンの受注オーダーに合った製品ができあがる。各中間工程で製造される半成品の寸法や重量には設備制約による製造可能範囲が決められている。たとえば、スラブ単重は3.7~18.8トンである。厚板の製造は受注生産であり小ロットの受注オーダーが多い。したがって製造計画では半成品の製造可能範囲を満足させるために、ロット集約をせざるを得ない。ロット集約されたものに対して技術的に可能な最高の歩留により必要最小の重量の半成品とする。だから厚板の製造計画は受注オーダーから製造工程を逆にさかのぼりロット集約を繰り返す作業となる。そして最終的には同一モー

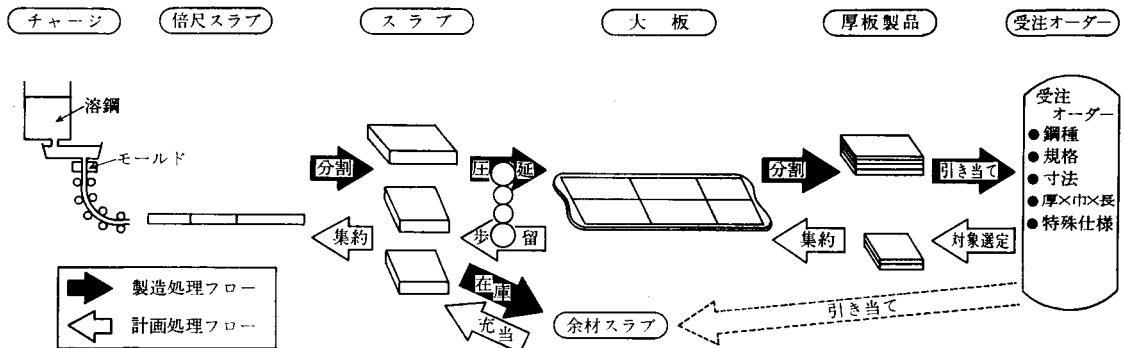


図1 厚板の製造フローと計画フロー

ルドで铸造される，すなわち同一断面寸法をもつスラブを集約しチャージとする．これが厚板でのチャージ編成である．また集約は原則的には鋼種単位に行なわれるので，特殊鋼種等ではオーダー量がチャージ量より少ない場合がある．この場合も納期を守るために，チャージに満たない分をオーダーが引き当てられていないスラブ，すなわち余材スラブで埋め，チャージ量を確保し製造を開始することも考える．

3. 計画システム

厚板の製造計画で作成されたチャージ編成結果は製造工程に決定的な影響を与える．そのため計画段階で全受注オーダーに対し工場の負荷バランスを考えたうえで，納期の遵守，歩留の確保を図らなければならない．このように計画システムの役割は大きく，要求される機能も多岐にわたるため，システム的には図2のように機能分割し処理している．

受注されたオーダーに製造諸元を設定し，出鋼対象選定により納期や工場の負荷バランスを考えたながら翌日の出鋼請求チャージ数（出鋼枠）に相当する量のオーダーを選ぶ．次のスラブ編成では出鋼請求オーダーの製品を組み合わせ図1の大板イメージを作る．ここでは大板を製品に分割する際の作業性や無駄のない板取りによる歩留低下防止を考慮している．この段階ではスラブ寸法が決定されておらず厳密には仮スラブとでも呼ぶべきものであるが，以後便宜上スラブと呼ぶことにする．チャージ編成ではチャージごとに翌日の铸造予定モールドの中から1つのモールドを選び，そのモールドで製造可能なスラブを組み合わせチャージ編成する．以上の結果の最終確認を行なうのが出鋼請求システムであり，修正が必要な場合には対話形式により修正し出鋼請求を行なう．

この中で特に重要なチャージ編成システムは，次の2つの機能をもつ必要がある．第1は作業上の制約条件を満足させながらスラブを組み合わせ

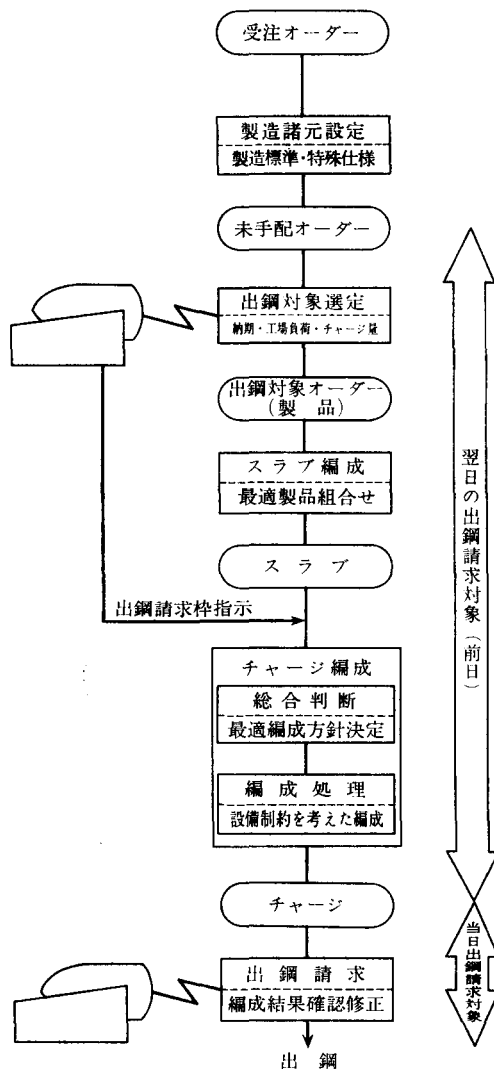


図2 厚板計画システム処理フロー

チャージにまとめる機能．第2は次に述べるような“望ましいチャージ編成”を行なうには铸造予定モールドにどのようなスラブを割当てれば良いか判断する機能．前者を編成処理，後者を総合判断と呼ぶことにする．編成処理では倍尺スラブ長制約やオーダー仕様による铸造位置指定等を考慮する必要があるため，スラブを1本1本積上げる順次処理にならざるを得ない．一方，総合判断では次の点に留意し“望ましいチャージ編成”を実現する必要がある．

- (1) スラブ（オーダーが引き当てられている）

をより多くチャージに編成する。すなわち全スラブ数に対するチャージ編成されたスラブ数の比であるチャージ編成率を高くする。

(2) 歩留の良いモールドを使う，これはモールドにより決定されるスラブ寸法が圧延に影響し歩留が変わるからである。

(3) 余材スラブ（オーダーが引き当てられていない）量を少なくする。

(4) 出鋼請求枠（モールド別チャージ数）を満足させる。これは鑄造計画が他品種との調整をあらかじめ行っており，この枠を守らないと他品種の計画に影響を与えるからである。

このように相反する内容をもつ項目に対して，順次処理である編成処理の中でバランスを取り最適化を図ることはむずかしい。したがって，個別スラブの積み上げを行なう際，前もって使用可能なモールドやその歩留といったスラブ属性と量からくる大局的判断を行なう必要があり，これらを総合判断と名づけて図2のように編成処理の前に置いた。ここで，総合判断では動的計画法を適用し4項目間のバランスを考えた最適化を図っており，いわばチャージ編成の方針を立てている。編成処理ではこの方針に沿って，総合判断で考えられていない設備制約を考慮し総合判断を補うようにチャージ編成する。こうすることによりバランスのとれたチャージ編成を行なうことができる。

4. 総合判断モデル

4.1 評価関数の同定

まず評価関数を前記4項目に対してそれぞれ考え，最適の状態からロス値として定義する。

チャージ編成する場合，チャージ内のスラブ比率を基準以上確保し余材スラブ量を抑えるためにその最低比率 r が決められている。したがって，評価関数でもスラブ量がこの比率 r を満足しない場合にはチャージにしないと判断する。各評価項目の考え方から評価関数は図3に示すようにチャージにする場合と，しない場合に分れ，1チャー

ジ目を定義すれば2チャージ目以降はその繰り返しである。チャージ重量範囲を $z_{01}, z_{02} (z_{01} < z_{02})$ ，集約されたスラブ重量の合計を z とすると，各々 $[0, 1]$ に正規化された評価関数は次のように定義してよい。ただし制限範囲外の z については評価値は0とする。

(1) 編成率ロス u_1 ：チャージにしないと判断した場合のロスで，在庫としてもっているスラブに引き当てる場合の歩留ロスや製造を遅らせる場合のペナルティーを考える。

$$(4.1) \quad u_1 = z / rz_{01} \quad (0 \leq z < rz_{01})$$

(2) モールドロス u_2 ：歩留が最高となる最適モールド以外のモールドでチャージ編成した場合の歩留差によるロス。歩留差を5段階の歩留レベルに分け，歩留レベル別の平均歩留差を q_i ，そのスラブ重量の合計を z_i とする。

$$(4.2) \quad u_2 = \left(\sum_{i=1}^5 q_i z_i \right) / q_5 z_{02} \quad (rz_{01} \leq z = \sum_{i=1}^5 z_i \leq z_{02}, q_1 = 0)$$

(3) 余材スラブロス u_3 ：余材スラブを充当してチャージとした場合に，将来余材スラブに引き当てるときの歩留ロスやスラブヤード管理上のペナルティーを考える。

$$(4.3) \quad u_3 = (z_{01} - z) / (z_{01} - rz_{01}) \quad (rz_{01} \leq z \leq z_{01})$$

(4) 出鋼請求枠ロス u_4 ：指示された出鋼枠の制限を越えるチャージを請求するために他品種の出鋼や操業計画変更によるペナルティー。出鋼枠を越えるモールドが厚板専用か他品種兼用かにより評価値は異なる。ここでは出鋼枠内である場合を最善レベル，他品種兼用モールドでの出鋼枠越えを最悪レベルとし，厚板専用モールドの出鋼枠越えの評価値をNeumannとMorgensternのくじによる方法[1]で推定した。なお(4.4)式の α については無差別となるケースを検討し，実操業に合うように調整した。

$$(4.4) \quad u_4 = \begin{cases} 0 & \text{出鋼枠越えなし} \\ \alpha (0 \leq \alpha \leq 1) & \text{専用モールド出鋼枠越え} \\ 1 & \text{兼用モールド出鋼枠越え} \end{cases}$$

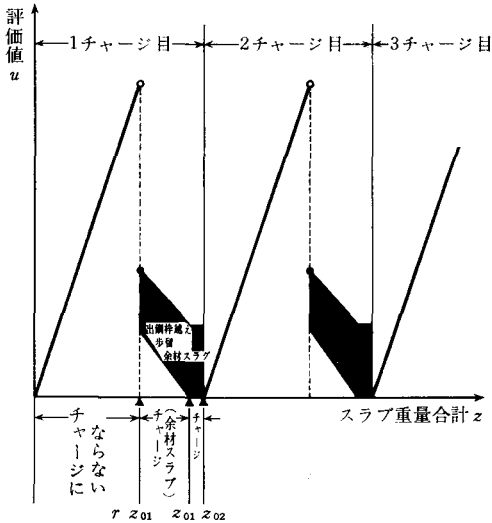


図 3 評価関数の概念

上記4項目の評価はそれぞれ異なる尺度をもっているため、効用理論におけるKeeneyの多属性効用関数の構成方法[1]を用いる。各項目の評価値は他の項目のレベルに無関係だから各項目は相互に効用独立である。したがって求める多属性効用関数は、加法形か乗法形の分解表現形式で表わされる。ここでは加法形、すなわち $u = \sum_{i=1}^4 w_i u_i$ を仮定し、重み w_i をくじにより推定する。推定された重みで無差別となる具体的なケースを関係者に示し調整を行なった。その結果、加法形の仮定は実用上問題ないと判定し、図3のように評価関数を決定した。

4.2 集合分割問題の多段構造化

総合判断は全出鋼請求対象スラブをチャージに注目して分割し、モールドを決定する集合分割問題である。また総合判断が編成処理のためのマクロ的判断であることを考えると、厳密解でなくとも実用上問題のない近似解を短時間に求めることが必要である。スラブ間の集約可否の関係は非平面グラフとなる。したがって本質的には3次元空間で扱うべき[2]であるが、ここでは1軸上に並べられたスラブの分割問題として捉え、1次元にした影響を減らすことは別に考慮する。

スラブに対し製造可能モールドとその歩留レベ

ルからなる属性を考え、同一属性をもつスラブを単位量(たとえば50トン)以内でまとめて、分割するときの基本単位とする。このようなスラブ属性を後述する規則にしたがって1軸上に並べ、属性、重量を順に $x_i, y_i (i=1, 2, \dots, M)$ とする。こうして並べられた x_i に対し図4に示すように分割が x_s と x_{s+1} の間、 x_m と x_{m+1} の間で行なわれた場合、 x_{s+1} から x_m の間をまとめ、ある1つのモールド l にて製造すると考える。その時スラブ重量の合計は $z = \sum_{i=s+1}^m y_i$ であり、ロス値 $g(s+1, m, l)$ は前述の評価関数により、

$$(4.5) \quad g(s+1, m, l) = \sum_{k=1}^4 w_k u_k(z)$$

と書ける。ここで、出鋼対象モールドが L_0 種類あるとする。 x_1 から x_m までを n 分割 ($n \leq m$) した場合のロスの最小値 $G(n, m)$ は、 $G(n, m)$ が次式の $G(n-1, s)$ に関して非減少であると仮定し、 $L = \{1, 2, \dots, L_0\}$ および $S = \{n-1, n, \dots, m-1\}$ とすれば、

$$(4.6) \quad G(n, m) = \min_{l \in L, s \in S} [G(n-1, s) + g(s+1, m, l)]$$

$$(4.7) \quad G(1, m) = \min_{l \in L} g(1, m, l)$$

となり動的計画法[3]が適用できる。出鋼請求対象のスラブ総重量がたかだか N チャージ分であれば求める最適値は、

$$(4.8) \quad G^*(M) = \min_{1 \leq n \leq N} G(n, M)$$

である。

さて $G(n, m)$ の $G(n-1, s)$ に関する非減少性の仮定であるが、 u_1, u_2, u_3 については定義より明らかに満足する。しかし u_4 はモールド別の出鋼枠越えによるロスであり非減少性を満足しない可能性があるため、総合判断モデルでは次のような対処を行なった。すなわち今後どのようなチャージができるか上記の方法で以降の属性の最適な分割 $G^*(m+1)$ を求め、これを予測値として枠越え判断に反映している。また最適案だけでなく編成チャージ数の異なる次善案も求めておき、両者についてそれぞれ次ステップの計算を行ないその中から最適解を選ぶ。このようにして枠越えチャージ

がある場合の判定精度を高めている。このような方法を採用することにより非減少性の仮定は実用上問題がなくなる。

次にスラブ属性を1軸上に並べ1次元分割問題としたことにより、分割された区間を集約し1つのモールドでの製造を考えると製造できない属性を含んでいることがありうる。このような属性を別に集約して、図4に示すように独立のチャージとして扱えるようにもした。他にも細かい問題はあるが、量的には少ないので事後処理で調整を行なうことで回避した。

4.3 スラブ属性の1次元配置

集合分割問題の多段階構造化の方法により、1次元に配置されたスラブ属性は基本的に隣り合ったものが同一チャージに集約されることになる。また人為的に多段階構造を導入したために、終盤段階での出鋼枠を考えたチャージ集約がむずかしくなる傾向がある。したがってスラブ属性の1次元配置では類似した属性を近くに配置し、しかも集約のむずかしいモールドで製造可能な属性から並ぶように考えなければならない。なお、集約のむずかしさはモールド別の出鋼枠と製造可能なスラブ総重量の比較により判定する。スラブが、あるモールドで製造可能かどうかは、そのモールドの断面積によりほぼ決定づけられ、断面積の同じようなモールドであれば製造可能である。したがってここではスラブ属性として、最小可能モールド l_{min} 、最大可能モールド l_{max} 、最適モールド l_{best} に着目して話を進める。

実際のスラブ属性配置の基本的な考え方は次の2点よりなる。最初に、集約のむずかしいモールドから、断面積の大きい順にチャージ集約できるように属性を並べることを考える。具体的には次の2つのパターンがある。

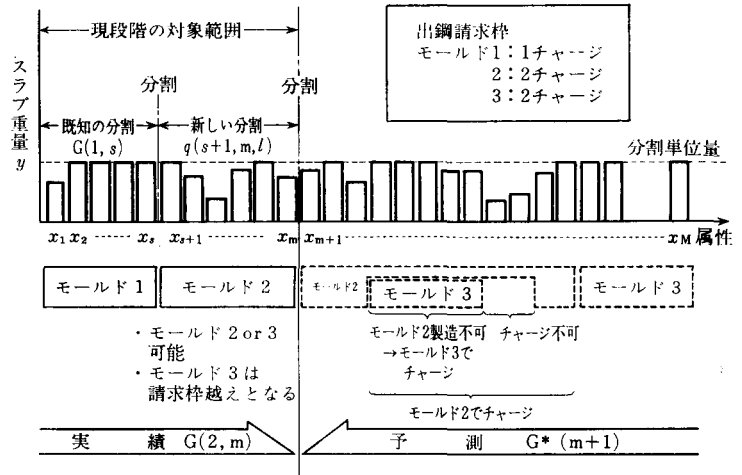


図4 総合判断の多段階決定構造

(a) 小断面モールドが集約難：製造可能モールド範囲を $l_{min} \cdot l_{max}$ とし昇順に並べる。

(b) 大断面モールドが集約難：製造可能モールド範囲を $l_{max} \cdot l_{min}$ とし降順に並べる。

次に、製造可能モールドと最適モールドのどちらに着目して並べるか考える。パターン(a)は図5に示すように次の3つのパターンに分かれる。

(a-1) 編成率形： $l_{min} \cdot l_{max} \cdot l_{best}$ とし昇順に並べる。

(a-2) 中間形： $l_{min} \cdot l_{best} \cdot l_{max}$ とし昇順に並べる。

(a-3) 歩留形： $l_{best} \cdot l_{min} \cdot l_{max}$ とし昇順に並べる。

(a-1) では歩留を少々犠牲にして隣との集約や集約の難しい小断面モールドを重視し、(a-3) では隣との関係より最適モールドでの集約の可能性を追求している。(a-2) は両者の中間だが小断面モールドを重視しその中で歩留を優先している。いずれにしても小断面モールドを優先している。

(b) のパターンについても同様である。パターンの選定は、モールド別の最適なスラブ量と製造可能なスラブ量により次のように行なう。まず、集約のむずかしいモールドは編成率中心のパターンとし、次に量が豊富で集約のやさしいモールドは歩留中心のパターンで属性が並ぶように行なう。

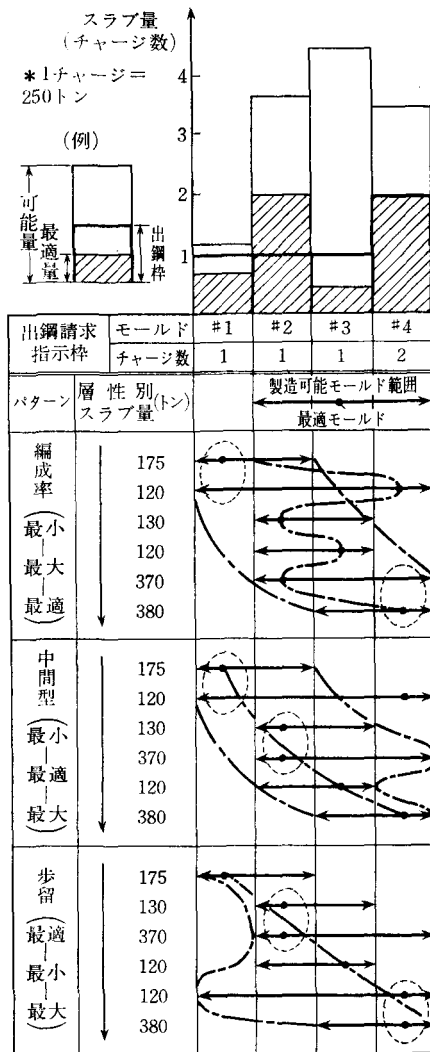


図5 仮スラブ属性の1次元配置パターン

5. 実施結果

総合判断モデルの最終調整はテスト段階における実際のデータでの編成処理結果を見て行なった。そこで総合判断の内容・チャージ編成結果について工程管理部門と協議し、実用上問題のないことを確認した。処理時間は図5の例で15秒 (IBM 370/168)程度である。チャージ編成システムで、旧システムと総合判断機能を追加した新システムとを比較すると、図6のようになる。新システムでは編成率や出鋼請求枠の満足度が大幅に上昇し、

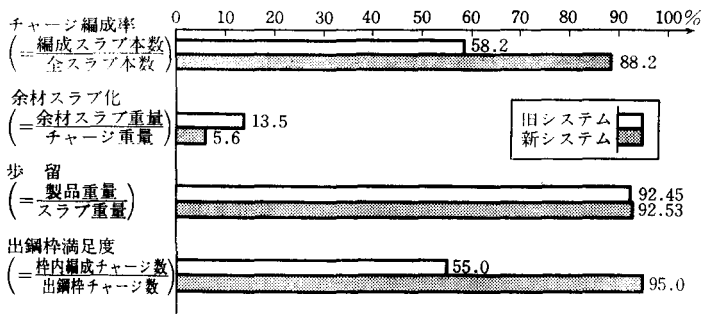


図6 厚板チャージ編成 新旧システム比較

余材スラブ量が減少したにもかかわらず、歩留は同じ程度もしくは若干上昇している。これは質の高いチャージ編成ができたことを示しており、総合判断が十分機能していることを裏づけている。

6. おわりに

厚板のチャージ編成システムはこれまで順次処理だけで構成し、人間の判断で適宜修正していたが、全体のバランスを考え最適化を図る総合判断機能を導入し、最適化手法を適用しシステム化した。また最適化モデルでの取扱いがむずかしい部分は前処理や後処理として heuristic な処理パターンを導入した。このようにチャージ編成システムに要求されるマクロ的判断とミクロ的処理を分離し相互で補うことにより、質の高いチャージ編成が実用的処理時間で可能となった。さらに、厚板製造方針を反映する計画システムの中核部分にパターン化やOR手法を導入することにより、方針の変更が発生しても定数項やパターン選択方法を変えるだけで対応できるようになった。これは計画システムを考える場合の重要な問題である。保守性、システム寿命の面での効果も大きいと考えている。

参考文献

[1] 市川惇信編：多目的決定の理論と方法，計測自動制御学会，(1980)
 [2] Harary, F.: *Graph Theory*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, (1969)
 [3] 杉山昌平：動的計画法，日科技連，(1976)