

# 薄板バーゲージ設計最適化

杉山 賢司\*・池田 元樹\*<sup>2</sup>・明田 成徳\*<sup>3</sup>・鈴木 隆昌\*<sup>2</sup>・和嶋 潔\*・佐谷 秀世\*<sup>2</sup>

Optimization of Steel Sheet Bar Gauge

Kenji SUGIYAMA, Motoki IKEDA, Masayoshi AKETA, Takamasa SUZUKI, Kiyoshi WAJIMA and Hideyo SATANI

**Synopsis :** In order to manufacture products, various manufacturing specifications are necessary to be determined in advance. To manufacture cold-rolled steel sheets, as an example, specifications, such as additive elements, rolling conditions, heat treatment conditions, have freedom of choice. And they have to be properly determined, considering various conditions and restrictions. More concretely, manufacturing specifications are usually determined through laboratory experiments or trial manufacture at actual processes, considering their influences on quality, cost, and production throughput of products. As changing manufacturing specifications usually give influence on quality, cost, and production throughput of products, it is not easy to change them according to the conditions such as the amount of in-process inventory, change of production cost or production requirements, and so on. This paper presents a new approach to promptly determine manufacturing specifications, by analyzing and quantitatively modeling relations between manufacturing specifications and indices of estimation for consequent manufacture, and selecting manufacturing specifications for realizing optimum indices of estimation. This approach is applied for determining bar gauge, thickness of hot-rolled coils, for manufacturing cold-rolled steel sheets, and improvement of production is realized by adapting to the changes of requirements and circumstances of production.

**Key words :** bar gauge; cold-rolled steel sheet; manufacturing specification; optimization; modelin.

## 1. はじめに

一般に、製品を製造する場合には、様々な製造仕様を事前に決定しておく必要がある。特に、複数工程での処理を経て生産される製品に対しては、数多くの製造仕様の決定が必要であることが多い。例えば冷延コイルを製造する場合には、製品の寸法、重量、機械特性、表面品位などは、一般に顧客から注文時に指定される仕様、即ち注文仕様として与えられるが、それらの注文仕様を実現する為の、成分、圧延条件、熱処理条件、及び中間製品である熱延コイルの板厚など、製品製造時に決定される仕様、即ち製造仕様は、一般に各工程での製造において選択の自由度があり、様々な条件を考慮して適切な値に決定することが必要である。具体的には、製造に用いる設備の能力からくる制約や、製造仕様を変更した場合の、製品品質、製造コスト、製造スループット（単位時間当たりの最大製造可能量）への影響などを考慮し、実験室での実験や実際に製品を製造する工程での試作を行い、多くの手間と時間をかけて製造仕様の値を決定するのが一般的である。

複数工程での処理を経て生産される製品の、特定の工程における製造仕様を変更すると、当該工程や前後工程での製造コスト、製造スループットや製品品質等が変化するこ

とが多い。従って、特定の工程の製造仕掛かりが多く、その工程の製造スループットを向上させたい場合には、製造仕様をその方向に変更することで、工程一貫での製造スループットが向上することが期待出来る。また、各工程の製造コストを合計した総製造コストは、製造仕様の値によって変化するだけでなく、同じ製造仕様に対しても、エネルギー単価等が変化すれば、その値が変化する。従って、総製造コストを最小にする製造仕様の値も、上記単価が変化した場合には変化することが多い。更に、同じ製品を製造する場合でも、その時々受注状況、生産状況の変化や、それらを受けての生産戦略の変化によって、総製造コストをなるべく小さくしたい場合、総スループットをなるべく大きくしたい場合、或いは製品品質をなるべく高くしたい場合など、生産に対する要求が様々に変化する。それに対応するには、上記生産に対する要求項目を評価指標として指定して、その評価指標値に関して最適な製造仕様を選択出来ることが望ましい。しかしながら、製造仕様の決定は、前述の様に様々な条件を考慮し多くの手間と時間をかけて行っており、各工程の製造仕掛かり状況や製造コストの変化、生産に対する要求の変化等に応じて柔軟に変更することは容易ではない。

本論文では、各工程より収集した製造実績データから、

平成20年3月25日受付 平成20年8月26日受理 (Received on Mar. 25, 2008; Accepted on Aug. 26, 2008)

\* 新日本製鐵 (株) 技術開発本部 (Technical Development Bureau, Nippon Steel Corporation, 20-1 Shintomi Futtsu 293-8511)

\*<sup>2</sup> 新日本製鐵 (株) 君津製鐵所 (Kimitu Works, Nippon Steel Corporation)

\*<sup>3</sup> 新日本製鐵 (株) 技術総括部 (Technical Administration & Planning Division, Nippon Steel Corporation)

各工程の製造仕様と評価指標の値との関係を解析して定量的なモデルを構築し、このモデルを用いて、与えられた評価指標の値を最適にする各工程の製造仕様の値を迅速に決定する手法を提案し、薄板バーゲージ設計を対象に検討した結果について報告する。

## 2. 薄板バーゲージ設計について

薄板バーゲージ（以下BGと略す）とは冷延・メッキ製品製造の際の熱延仕上げ厚みのことであり、鋼種、製品板幅区分、製品板厚区分等によって決められたメッシュ毎に指定された値が固定的に用いられるのが一般的である。製品板幅区分については例えば200mm刻み毎に、製品板厚区分については例えば0.1mm刻み毎に区切られる。同じ厚みの鍍片母材から同じ製品寸法の冷延コイルを製造する場合にも、複数の異なるBGの値を選択することは可能であるが、前述の様な検討を経てメッシュ毎に1つの値が製造仕様として決定されており、この値を随時変更するという事はない。

生産に対する要求の変化に応じて、例えばBGを小さくすると、即ち熱延コイルの板厚を薄くすると、熱延工程での圧下率を大きくする必要があるため処理時間が長くなり、熱延工程における製造スループットは低下し、圧延所要動力が増加するので熱延工程での製造コストは増加する。一方で、冷延工程においては、材料となる熱延コイルの板厚が薄くなるので、製造スループットは向上し、製造コストは低下する。従って、熱延工程と冷延工程を相対的に比較して、熱延工程の製造負荷が高い時には、BGをより大きな値にすることで、その製造スループットを改善することが可能となる。また、熱延工程と冷延工程を合わせた合計製造コストは、BGの値によって変化するだけでなく、同じBGの値に対しても、電力等のエネルギー単価や各用役、副原料等の単価が変化すれば、その値が変化する。従って、この様な状況の変化に応じて、合計製造コストを最小にするBGの値を決定することが出来れば、大きな操業改善効果が期待出来る。

BGの値の適正な決定という要求に対して、圧延負荷の適正配分を目的とした熱延のスケジュール決定<sup>1)</sup>や、同様に、圧延負荷やモータ電流を考慮した冷延スケジュール最適化<sup>2)</sup>などの報告はあるが、生産に対する要求の変化に対応した最適なBG設計を行う試みは報告されていない。

ここでは、各工程より収集した製造実績データから、BGの値と、熱延工程、冷延工程の各評価指標の値との関係を定量的にモデル化し、このモデルを用いて、与えられた評価指標の値を最適にするBG設計値を決定する手法について説明する。

## 3. BG設計最適化

Fig. 1にBG設計最適化の手順の概略を示す。まず、各工程から必要な製造実績データを収集し、収集したデータから、BGと各工程の評価指標の値との関係を定量的に表すモデル（ここではこれを工程モデルと呼ぶ）を構築する。そして、このモデルを用いて、BGを変更した時の各工程の評価指標の値の変化をシミュレーション・図示したり、最適化手法による計算を行ったりすることで、指定された評価指標の値を最適にする各工程の製造仕様の値を決定する。薄板製品の製造において考慮すべき評価指標としては、製造スループット、製造コスト、製品品質等があげられる。ここで、製造実績の無い条件で製造した製品の品質を予測することは一般的には難しいので、本検討では、BG変更による製品品質の影響が少ないと予想される普通鋼を対象に、製造スループットと製造コストを評価指標としたBG設計最適化をまずは試みる。製造コストについては、最終的には、焼なまし工程以降を含めた薄板製造工程全体のコストを評価すべきであるが、ここでは、BG変更による影響の大きい熱延工程と冷延工程を対象に検討を行う。尚、製造スループットについては、単位時間当たりの製造トン数(T/H)で表すことが一般的であり、以降の説明においては製造スループットのことをT/Hと呼ぶことにする。

### 3.1 製造実績データ収集

まず、従来設定されているBGによって、熱延工程における熱延コイル製造、及び冷延工程における冷延コイル製造を行った実績データを、なるべく多くの品種、多くの寸法（板厚、板幅）の冷延コイルに対して収集する。製造実績データとしては、まず、製造スループット評価に必要なものとして、圧延トン数、圧延開始/終了時刻などのデータを収集する。また、コスト評価に必要なものとして、各工程での使用電力量をはじめとする各種エネルギー使用量や、各工程での製造に用いられる原材料、消耗品の使用量

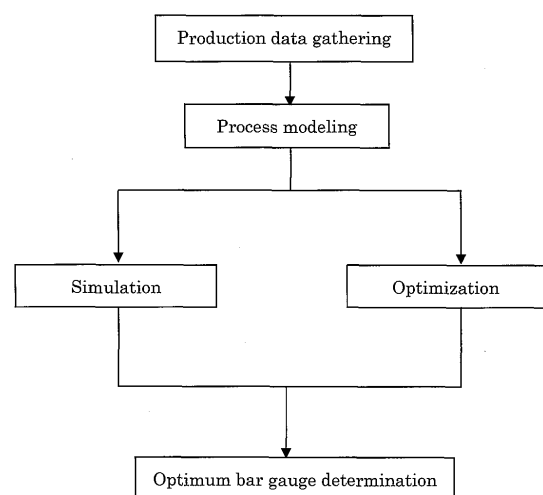


Fig. 1. Flow of the optimum bar gauge determination.

など、製造コストに含むべき項目についての実績データを収集する。(品質を評価指標とする場合には、その為に必要なものとして、圧延後に切り出した試験片について機械試験にて測定される各種機械特性(ランクフォード値、引っ張り強度、等)データ、オンライン表面疵検査装置で測定される表面疵発生実績データ等の表面品位に関するデータ、オンライン形状計により測定される形状実績データ、等の実績データを収集するが、本検討では対象外である。)

### 3.2 工程モデル構築及びシミュレーション

熱延工程、冷延工程のそれぞれについて、BGと各評価指標(両工程のT/H、製造コスト)との関係を表す工程モデルを作成する。これは、従来製造実績の無いBGも含めて、設定したBGで製造した場合のBGとT/H、製造コストとの関係を求めることが目的である。熱延工程については、特定のメッシュの冷延コイルに対しては製造実績の無いBGであっても、熱延コイル製造としては実績のある仕上げ厚みであるから、製造実績データからの統計処理によって、BGと各製造仕様との関係をモデル化することが可能である。一方冷延工程については、指定されたメッシュの冷延コイルの製造を、従来実績の無い仕上げ厚みの熱延コイルを母材に行うことになるので、製造実績から直接求めることは出来ず、推定が必要となる。これらの関係は、BGの設定を行う、品種、製品板厚区分、製品板幅区分によるメッシュ毎に独立したモデルとする。

#### (1) 熱延工程モデル

収集した製造実績データから、評価指標値であるT/H、製造コストの値を計算する。T/Hについては、圧延トン数を圧延所要時間(圧延終了時刻-圧延開始時刻)で除することで求める。製造コストについては、製造コストに含むべき項目についての実績使用金額を合算して求めるが、コイル1本毎に集計するのが難しく、1日単位など、より大きな時間単位で集計されるものについては、圧延トン数比率や処理時間比率など、項目毎に決められた基準により各コイルに配分する。

評価指標値が計算された後には、製造仕様であるBGと評価指標値であるT/H、製造コストとの関係を表すモデルを作成する。ここでは、各BGに対して前述の様に計算されたT/H実績から、一般的な統計解析手法である最小二乗法による回帰式によって二次の回帰式を作成した。また、BGとコストの関係についても同様に実績データから二次の回帰式を作成した。

#### (2) 冷延工程モデル

モデル構築の考え方と手順の概略をFig. 2に示す。冷延工程は、酸洗ラインと冷延ミルで構成されるが、酸洗ラインについては、設備仕様(最高速度、通板可能板厚、等々)の範囲内であれば、また、他の条件が同一であれば、BGの増加に従って、コイル長さが短く、コイルの表面積も小

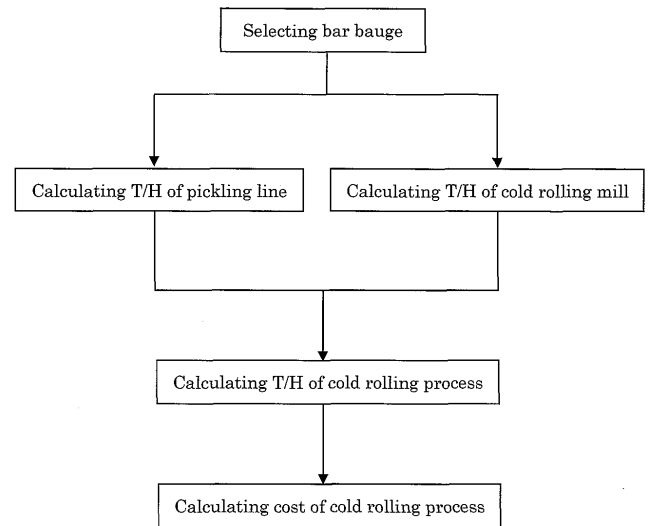


Fig. 2. Flow of modeling cold rolling process.

さくなるので、一般にT/Hが増加する。一方で、冷延ミルについては、他の条件が同一であれば、BGの増加に従って、圧延動力が増加するので、設備能力限界から圧延速度が低下し、T/Hが低下することが多い。ここでは、酸洗ラインと冷延ミルが連結した連続ラインを前提として検討を行い、冷延工程のT/Hとしては、両工程のうちのT/Hの小さい工程がボトルネックとなると考え、この様に計算される酸洗ラインT/Hと冷延ミルT/Hの最小値を冷延工程のT/H推定結果とする。

製造コストについては、固定費と変動費から構成され、単位製造トン当たりで考えると、(T/H向上が当該設備での生産量増加に繋がることを前提とすると)固定費はT/Hの逆比で小さくなり、変動費はT/Hによらず一定と見なすことが出来る。従って、基準条件の時のT/Hとコスト実績から、以下の式(1)によって指定されたT/Hの時の製造コストを予想することとした。

$$\begin{aligned}
 \text{製造コスト} &= \text{基準T/H時のコスト} * \text{影響係数} * \\
 & \quad (\text{基準T/H}) / (\text{指定T/H}) \\
 & \quad + \text{基準T/H時のコスト} * (1 - \text{影響係数}) \\
 & \quad \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 \text{影響係数} &= (\text{基準T/H時の固定費}) / \\
 & \quad (\text{基準T/H時のコスト}) \dots\dots\dots(2)
 \end{aligned}$$

上記手順に従ってコイル毎に、特定のBGを指定した時のT/H、製造コストを計算する。BG設計はメッシュ毎に行うので、メッシュ毎の冷延工程についての工程モデルを以下の手順で計算する。

- 1) 収集したコイル毎の実績データを、各メッシュにふるい分ける。
- 2) 上記データをメッシュ内の全コイルについて重量で重

み付け平均し、当該メッシュの代表データとする。

- 3) 上記代表データについて、0.5mm刻みでBG値を変更し、それに対する冷延工程のT/H、製造コストを、上述の手順で計算する。

BG設計値とT/H、製造コスト等との関係を工程モデルとして構築し、BGを指定した時の各評価指標の値をシミュレーション・図示することによって、現状のBG設計値をどの様に変更すれば、工程毎のT/H、製造コストがどの様に変化するかを知ることが可能である。製品板厚0.8~0.9mm、製品板幅1,100~1,300mmのメッシュについての、熱延工程モデル、冷延工程モデルの一例を、現行BG値の例と共にFig. 3に示す。ここで、T/Hについては、現行の値であるBG 4mmの時の熱延工程のT/Hを100とした時の相対値で、また、製造コストについても、BG 4mmの時の熱延工程のコストを100とした時の相対値で示している。冷延T/Hについては、BGが大きい部分は冷延ミルネックとなるので、BGが大きくなるほど値が小さくなり、BGが小さい部分は酸洗ラインネックとなるので、BGが小さくなるほどやはり値が小さくなる。熱延T/Hについては、BGが大きくなると熱延ミル自体ではなく、巻き取り機ネックとなってT/Hが低下する。両工程のコストは、それぞれのT/Hと増減が逆の傾向になっている。

ここで計算するT/H、製造コストは、BG決定の際にメッシュ毎の値を目安として推定するものであり、コイル

毎の値を正確に予測することを目的とするものではない。実際の製造時におけるコイル毎の製造T/Hは、(従ってその結果として製造コストは)その前後に処理されるコイルの仕様や、その時々設備のコンディション等々により、まったく同じ製造条件に対してもばらつきを生じる。ここでのモデルは、いわばその様な操業の代表値として、平均的な操業条件の時の値を表すものと考えることが出来る。

### 3.3 最適化

多数のメッシュについて、例えば熱延工程のT/Hを最大にするBG設計値を計算しようとする、個別メッシュ毎にモデルを1つ1つ見ていくのは非常に手間がかかる。そこで、最適化手法の適用により、与えられた評価指標を最適にするBG設計値を計算することを考える。

Fig. 3の例からも分かる通り、BGとT/H、製造コストとの関係には非線形性が存在するので、代表的な数的手法である線形計画法を適用することは難しい。ここでは、非線形計画法として広く用いられる準ニュートン法<sup>3,4)</sup>を適用した最適化を試みる。手順を以下に示す。

- 1) 冷延工程についてのモデル計算結果は、0.5mm刻みのBG設計値についての離散値であり、最適化計算にそのままでは使用できないので、多項式回帰(十分な精度を得るために3次式とした)を行い、この回帰式を以降の最適化計算にモデルとして用いる。熱延工程については、3.2(1)項で求めたモデルをそのまま用いる。
- 2) 上記両工程のモデルについて、評価関数を指定して最適化計算を実施することで、メッシュについての計算結果を得る。ここで評価関数としては、式(3)で示すFを用いている。

$$F = c11 \cdot y11' + c12 \cdot y12' + c21 \cdot y21 + c22 \cdot y22 \quad (3)$$

ここで、 $y11'$  : 熱延工程T/Hの逆数

$y12'$  : 冷延工程T/Hの逆数

$y21$  : 熱延工程製造コスト

$y22$  : 冷延工程製造コスト

$c11 \sim c22$  : 評価重み

これはT/Hと製造コストという2つの評価指標の重み付け和であり、Fの値を最小にするのが最適なパーゲージの値である。ここで、製造コストは小さいほど好ましく、T/Hは大きいほど好ましいので、T/Hが小さいほど大きくなる指標として、熱延工程、冷延工程のT/Hのそれぞれ逆数を取って $y11'$ 、 $y12'$ とし、製造コスト $y21$ 、 $y22$ と加え合わせる。

- 3) 得られた計算結果を、以下の式(4)、式(5)を用いてメッシュ毎に全対象量(対象コイル全体)について重量で重み付け平均し、総合T/H、総合コストの計算結果とする。

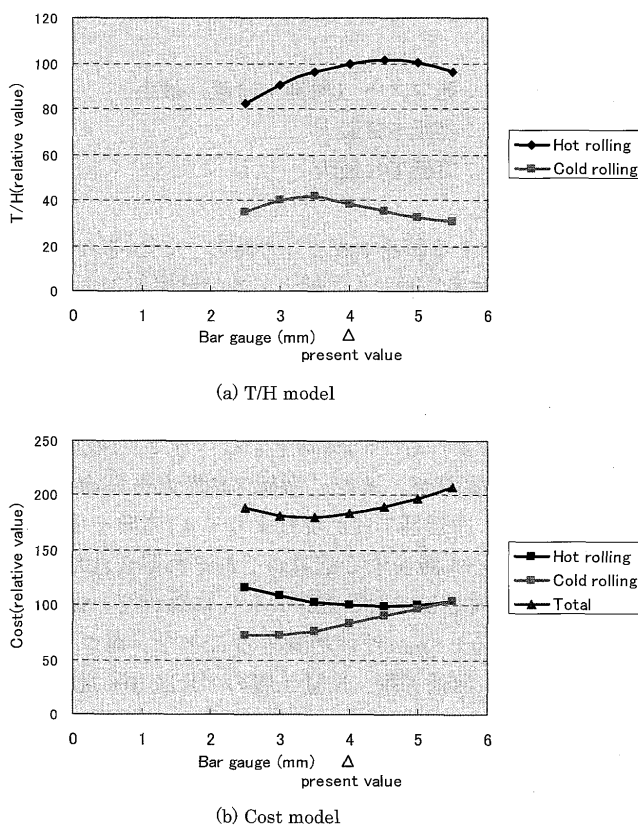


Fig. 3. Example of process model. (a) T/H model (b) Cost model.

	Present value	Case.1 Total cost minimum	Case.2 Hot rolling T/H maximum	Case.3 Cold rolling T/H maximum
Bar gauge (mm)	—	Present value-0.5	Present value +0.5	Present value -0.5
Total cost	100	98	103	98
Hot rolling T/H	100	96	101	96
Cold rolling T/H	100	109	92	109

Fig. 4. Example of optimization.

$$\text{総合T/H} = \frac{\text{総重量}}{\sum (\text{各メッシュ重量} / \text{各メッシュT/H})} \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{総合コスト} = \frac{\sum (\text{各メッシュ重量} * \text{各メッシュコスト})}{\text{総重量}} \dots\dots\dots(5)$$

Fig. 3に示したメッシュについての計算結果をFig. 4に示す。ここで、評価関数としては、以下の3ケースを指定して計算を行った。計算結果は、現行BGに対する値を100とした時の、それぞれのケースについての相対値で示している。

- 1) ケース1：総コスト（熱延+冷延）最小（式(3)にてc21=c22=1, 他の重みは全てゼロ）
- 2) ケース2：熱延T/H最大（c11=1, 他の重みは全てゼロ）
- 3) ケース3：冷延T/H最大（c12=1, 他の重みは全てゼロ）

この結果から、総コスト最小を目的としたケース1では、現行よりも総コストが2%低下し、熱延スループット最大を目的としたケース2、冷延スループット最大を目的としたケース3では、熱延スループット、冷延スループットが、それぞれ現行よりも、1%、9%向上することが分かる。また、これらの改善効果の値は、Fig. 3に示された、BGと各評価指標の値との関係とも整合している。

3.4 結果と考察

以下の様にBG設計最適化を試みた。その内容、結果を記す。

(1) 対象データ

3.3項では、特定のメッシュを対象にした計算結果を示したが、ここでは、過去に製造された冷延コイルのうち、以下の対象材についての操業実績データについて評価を行った。

- ・鋼種：普通鋼
- ・サイズ：全板厚・板幅区分
- ・本数：21,535本
- ・総重量：485,060トン

(2) 計算手順

3.1項~3.3項に記載の通り。対象データ全体についての、総合T/H、総合コストを計算する。

(3) 評価関数

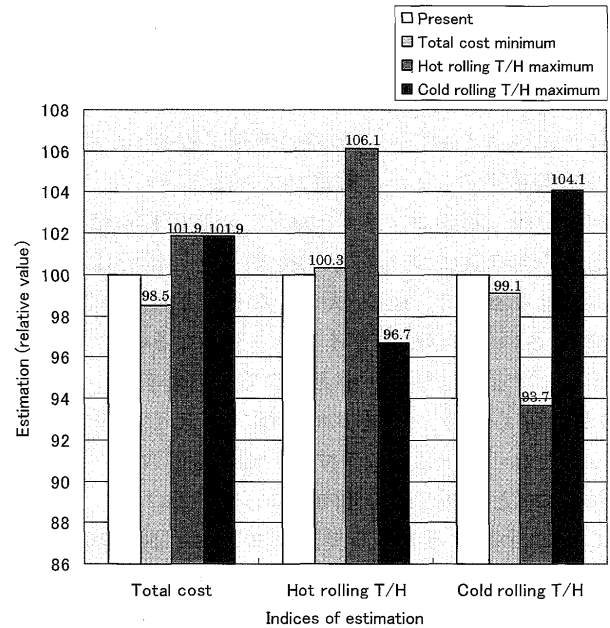


Fig. 5. Result of optimization.

- 1) ケース1：総コスト（熱延+冷延）最小
- 2) ケース2：熱延T/H最大
- 3) ケース3：冷延T/H最大

(4) 計算結果

現行BGに対する値を100とした時の、それぞれのケースについての結果をFig. 5に示す。この結果から、総コスト最小を目的としたケース1では、現行よりも総コストが1.5%低下する結果が得られたが、一方でその時の冷延T/Hは0.9%低下する。熱延T/H最大を目的としたケース2では、熱延T/Hが現行よりも、6.1%向上する一方で、冷延T/Hが6.3%減少する結果が、また、冷延T/H最大を目的としたケース3では、冷延延T/Hが現行よりも4.1%向上するが、熱延延T/Hが3.3%減少する結果がそれぞれ得られた。Fig. 2, Fig. 3に一例として示したメッシュにおいて、BGを最小変更幅である0.5mmだけ増減することで、総コストが2~3%増減し、熱延工程、冷延工程のT/Hは10%近く増減するケースもあることを考え合わせると、全メッシュについての総和であるFig. 5の値が、この様な大きさの改善効果を示すものになったことも、納得出来る結果と考えられる。

この様に、その時々生産状況の変化や、それを受けて

の要求の変化に応じて、適切なBG設計値を選択することで、より要求に対応する生産を実現することが可能となる。

#### 4. おわりに

本論文では、各工程より収集した製造実績データから、各工程の製造仕様と評価指標の値との関係を定量的にモデル化し、このモデルを用いて、与えられた評価指標の値を最適にする各工程の製造仕様の値を迅速に決定する手法を提案した。そして、この手法の薄板パーゲージ設計への適用を検討し、その時々が生産状況の変化や、それを受けての要求の変化に応じて、適切なBG設計値を選択することで、より要求に対応する生産を実現することが可能である

ことを示した。

今後は、品質への影響のモデル化手法の検討を進めることで、より広い鋼種への適用を進める。また、本手法は、BG設計以外の製造仕様、例えば成分、熱処理条件等に対しても適用可能であり、より広範な適用を検討していきたい。

#### 文 献

- 1) P.P.Sengupta, S.Rath and V.Kumar: *Iron Steel Technol.*, **2**, (2007), 489.
- 2) A.Murakami, M.Nakayama, M.Okamoto, Y.Abiko, K.Sano and T.Tsuchihashi: *Kobe Steel Eng. Rep.*, (2006), 24.
- 3) 伊理正夫, 今野 浩, 刀根 薫監訳: 最適化ハンドブック, 朝倉書店, 第I章, (1995), 12, 58.
- 4) 丹慶勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊郎, 小林 誠訳: ニューメリカルレシピ・イン・シー, 技術評論社, 10.7章, (1993), 313.