

ファジィ多目的計画法による 熱延仕上げミルのパススケジュール設計

北村 章*・檜崎 博司*・小西 正躬*・坂和 正敏*²

Pass Schedule Design of Hot Strip Mills Based on Interactive Fuzzy Satisficing Method
for Multi-Objective Programming Problem

Akira KITAMURA, Hiroshi NARAZAKI, Masami KONISHI and Masatoshi SAKAWA

Synopsis: This paper describes a new approach of pass schedule design for hot strip rolling. Recently theoretical optimization techniques have been applied to obtain the optimum schedule instead of the usual power curve. In this method, the pass scheduling is treated as a single objective programming problem. There are plural objectives in the pass design, which are to satisfy the thickness specification and the temperature specification, to attain the high productivity, and so on. The conflict of the objectives is not considered and the conflict can not be modified.

In order to solve these problems, the pass schedule is formulated as a multi-objective programming problem in which the objectives are thickness, temperature, flatness, productivity (rolling time) and cost (rolling energy). A multi-objective optimization technique is applied to obtain the Pareto optimum solution. The interactive fuzzy satisficing method is employed to reflect the pass designers preference and modify the conflicts.

Through the numerical simulation, it is confirmed that the interactive fuzzy satisficing for multi-objective programming problem can generate the reasonable pass schedule which has a small amount of scatter in the grade for each objective, compared with the usual approach.

Key words: hot strip mills; pass schedule; rolling characteristics; mathematical model; optimization; multi-objective programming problem; interactive modification; fuzzy satisficing method.

1. 緒言

熱延仕上げ圧延の目的は、生産性やコストを考慮しつつ、圧延材の寸法、温度、形状といった多くの要因を同時に制御することである。この目的を達成するために、熱延仕上げミルでは、パススケジュールの設計を行っている。ここで、パススケジュールの設計とは、圧延製品の寸法、形状、材質を考慮して各スタンドの目標板厚やロール速度などの変数を決定することである。

パススケジュールの設計の条件と目的を具体的に述べると、次のようになる¹⁾。

①各スタンドの圧延荷重、圧延動力（主モータの動力）、ロール回転数、ロール間隙、ロールベンディング力が機械的制約を満たすこと。

②ロール間隙を設定することにより、仕上げ板厚が公差（仕様に対して許容される範囲）内に入り、目標とする狙い厚（仕様の板厚）に極力近い。

③仕上げミル出側の材料温度が許容される公差内に入り、目標仕様の温度に極力近い。

④圧延材の形状（平坦度）が良好である。

⑤生産性が高い。（圧延速度が高速であること）

⑥生産コストが安い。（圧延に要するエネルギーが小さいこと）

これらを踏まえてパススケジュールを決定するには、各スタンドの入側・出側板厚、圧延速度、圧延材の変形抵抗などと圧延動力、圧延荷重、材料温度などとの関係が明確でなければならない。

一般に、パススケジュールの設計はミル能力（圧延荷重、トルクなど）、材料温度および形状（平坦度）を考慮して、各スタンドの負荷配分比（圧延動力の配分比）を過去の圧延データを基にして経験的かつ試行錯誤的に定めておき、動力カーブ²⁾を用いて各スタンド出側の目標板厚を求める方法が用いられている。

これに対して、圧延特性の数式モデルに基づいてタンデム圧延を非線型の大規模システムとして取扱い、ダイナミックプログラミングや非線型計画法を用いて最適パススケジュールを求める研究が行われてきた³⁾⁴⁾。しかし、これらの研究では圧延動力の合計などを評価規範とした一目的最

適化の立場にたっており、例えば、「コストを低減したいが平坦度は損ないたくない」といった、各要因（板厚，材料温度，形状，生産性，コスト）間の競合関係を考慮したうえでシステムを最適化することができなかった。

そこで，本研究では，上記の問題を多目的計画問題として定式化した。また，この問題を解決するために設計者のもつ目標をファジィ集合のメンバシップ関数で記述し，対話しながら最適解を導出する，いわゆるファジィ多目的計画法⁵⁾¹⁰⁾¹¹⁾を用いて最適パススケジュールを決定する方法について検討した。以下では，最適パススケジュールの設計方法を詳述し，計算結果について考察する。

2. 多目的計画問題としての定式化

パススケジュールの設計の目的は，前章で述べたように，①～⑥にまとめることができる。このうち，①については比較的大きな範囲を持った機械的な制約であるのに対し，②～⑥は圧延製品が満たすべき仕様と圧延の目的である。そこで，パススケジュールの設計を数理計画問題としてみると，圧延荷重，ロール回転数，圧延動力，ロール間隙，およびロールベンディング力の機械的制約や動作範囲を満たすべき制約関数の変数とし，板厚，形状（平坦度），材料温度，生産性（圧延速度），および生産コスト（圧延エネルギー）を最適化すべき目的関数と考えることができる。

一方，タンデム圧延は多くの変数が複雑に絡み合う大規模な非線型系である。また，「生産性を上げるために圧延速度を増加させると，圧延に要するエネルギーが増大してしまう」に代表されるように，これらの目的関数の間には，いわゆる競合関係が存在する。したがって，パススケジュールの設計は，数理計画問題のなかでも多目的計画問題として取り扱う必要がある。

一般に，多目的計画問題は，複数個の互いに相競合する目的関数を与えられた制約関数のもとで，なんらかの意味で最適化（最小化）する問題であり，以下のように定式化されている⁵⁾。

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))^T \cdots (1) \\ &\text{subject to } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \cdots (2) \end{aligned}$$

ここで， $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ は n 次元決定変数ベクトル， $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ は目的関数 $f_i(\mathbf{x})$ を要素とする k 次元ベクトル関数， $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = (g_1(\mathbf{x}), g_2(\mathbf{x}), \dots, g_m(\mathbf{x}))$ は m 次元制約関数である。

本研究では，圧延特性の数式モデルをもとに，パススケジュールの設計を多目的計画問題として定式化している。以下では，決定変数，目的関数，制約関数について具体的に述べる。

2・1 決定変数

本研究で設定した決定変数 x_i の個数は17変数である。具体的には，各スタンドの圧下率 $(x_1, \dots, x_7)$ ，No.1 スタンド

の材料先端および後端部のロール回転数 (x_8, x_9) とロールベンダーが設置されているNo.4～7スタンドの材料先後端部のロールベンディング力 $(x_{10}, \dots, x_{17})$ を決定変数として計算される。

圧延材の後端部は，先端部に比べて圧延のタイミングが圧延に要する時間 T_R だけ遅れる。この結果，後端部は先端部に比べて大気中における放冷時間が長くなり，材料温度が20～30℃程度低くなる。出側板厚 h や板クラウン C_R は，材料温度 θ の関数でもあることから，圧延材の先端部と後端部でその大きさに差が生じる。一方，パススケジュールの設計では，圧延材の全長に亘って与えられた仕様を満たす必要がある。そこで，本研究では，決定変数や次に述べる形状や材料温度などの目的関数を，圧延材の先端部と後端部を区別して設定している。なお，上添え字のTPおよびBMは，それぞれ，圧延材の先端部と後端部を示している。

ところで，仕上げミル入側板厚 H_1 (mm) は初期設定として与えられる。また，多目的計画問題を解くことでNo.1スタンドのロール回転数 N_1 と各スタンドの圧下率 $\eta_i = (H_1 - h_i)/H_1$ (i : スタンドナンバー) が決定され，各スタンド出側の目標板厚 h_i (mm) が計算される。そこで，No.2～7スタンドのロール回転数 N_i (rpm) については，Simsの先進率の式⁶⁾ $[f_i]$ と体積速度一定則 $((1 + f_i) V_i h_i = \text{一定})$ を用いることで順次計算される。ここで， V_i (mm/s) $(= 2\pi R_i N_i / 60)$ ， R_i (mm)：ロール径）はロール周速度を表す。

2・2 目的関数

板厚，材料温度，形状，生産性，生産コストの各目的関数を以下に示す。

(1) 板厚に関する目的関数 $f_1(\mathbf{x})$ を，仕上げミル出側の幅方向中央部の目標板厚 h_t と狙い厚（仕様の板厚） h_s との偏差の絶対値とする。

$$f_1(\mathbf{x}) = |h_t - h_s| \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで， h_t は各スタンドの圧下率 η_i と仕上げミルの入側板厚 H_1 から求めることができる。

(2) 材料先端部の温度に関する目的関数 $f_2(\mathbf{x})$ を，仕上げミル出側の材料先端部の温度 $\theta_{\text{out}}^{\text{TP}}$ と目標仕様の温度 θ_s との偏差とする。

$$f_2(\mathbf{x}) = |\theta_{\text{out}}^{\text{TP}} - \theta_s| \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここで， $\theta_{\text{out}}^{\text{TP}}$ は，各スタンドの材料温度のモデル式⁸⁾⁹⁾と初期設定として与えられる仕上げミル入側の材料温度 θ_{in} から求めることができる。本モデルでは，塑性加工発熱による材料温度の上昇，摩擦発熱による温度上昇，ロールへの熱伝導による温度降下，空冷による温度降下を考慮している。

同様に，仕上げミル出側の材料後端部の温度 $\theta_{\text{out}}^{\text{BM}}$ と目標仕様の温度 θ_s との偏差の絶対値を，後端部に関する目的関数 $f_3(\mathbf{x})$ とする。

$$f_3(x) = |\theta_{out}^{7BM} - \theta_5| \dots\dots\dots (5)$$

(3)本研究では、形状（平坦度）が良好であることを各スタンド出側のクラウン比率 $\gamma_i (= C_{Ri}/h_i)$ の差 $\Delta\gamma_i (= \gamma_{i+1} - \gamma_i)$ が小さいこと、すなわちクラウン比率が一定であることとする。そこで、材料先端部の形状に関する目的関数 $f_4(x)$ クラウン比率の偏差の絶対値の平均で定義する。

$$f_4(x) = \frac{1}{4} \sum_{j=4}^7 \left| \frac{C_{Rj}^{TP}}{h_j} - \frac{C_{Rj-1}^{TP}}{h_{j-1}} \right| \dots\dots\dots (6)$$

ここで、各スタンド出側の先端部の板クラウン C_{Ri}^{TP} は、圧延荷重 P_i とロールベンディング力 P_{Bi} などを変数とするモデル式⁷⁾で計算される。

同様に、材料後端部の形状に関する目的関数 $f_5(x)$ を下式で定義する。

$$f_5(x) = \frac{1}{4} \sum_{j=4}^7 \left| \frac{C_{Rj}^{BM}}{h_j} - \frac{C_{Rj-1}^{BM}}{h_{j-1}} \right| \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 C_{Ri}^{BM} はNo.iスタンド出側の圧延材後端部の板クラウンである。

(4)生産性に関する目的関数 $f_6(x)$ を、No.1スタンドにおける材料先端部の圧延時間 $T_{R1}^{TP}(s)$ と後端部の圧延時間 $T_{R1}^{BM}(s)$ の平均とする。

$$f_6(x) = \frac{1}{2} (T_{R1}^{TP} + T_{R1}^{BM}) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 T_{R1}^{TP} と T_{R1}^{BM} は、それぞれ下式で計算される。

$$T_{R1}^{TP} = \frac{10^{12} \times W}{\rho h_1 B V_{R1}^{TP}}, \quad T_{R1}^{BM} = \frac{10^{12} \times W}{\rho h_1 B V_{R1}^{BM}} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 W ：圧延材の質量(t)、 ρ ：圧延材の密度(kg/m³)、 B ：板幅(mm)、 V_{R1}^{TP} ：No.1スタンド出側の材料先端部の速度(mm/s)、 V_{R1}^{BM} ：No.1スタンド出側の材料後端部の速度(mm/s)

(5)No.iスタンドの材料先端部の圧延動力 $K_{Wi}^{TP}(kW)$ と後端部の圧延動力 $K_{Wi}^{BM}(kW)$ は、それぞれ下式で定義される。

$$K_{Wi}^{TP} = \frac{1}{A_d} \cdot \frac{2\pi G_i^{TP} N_i^{TP}}{60}, \quad K_{Wi}^{BM} = \frac{1}{A_d} \cdot \frac{2\pi G_i^{BM} N_i^{BM}}{60} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 G ：圧延トルク(Nm)、 N ：ロールの回転数(rpm)、 A_d ：動力変換係数((Nm/s)/kW)

ここで、圧延に要するコストとして圧延材の1t当りの加工に必要なエネルギーを $E_R(kW \cdot h/t)$ とすると、No.iスタンドの材料先端部の加工に必要なエネルギー E_{Ri}^{TP} および後端部の加工に必要なエネルギー E_{Ri}^{BM} は、それぞれ下式となる。

$$E_{Ri}^{TP} = \frac{K_{Wi}^{TP}}{3600W_g} T_{Ri}^{TP}, \quad E_{Ri}^{BM} = \frac{K_{Wi}^{BM}}{3600W_g} T_{Ri}^{BM} \dots\dots\dots (11)$$

タンデム圧延のコストに関する目的関数 $f_7(x)$ を、各スタンドの E_{Ri}^{TP} と E_{Ri}^{BM} の平均値とし、下式で定義する。

$$f_7(x) = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \frac{E_{Ri}^{TP} + E_{Ri}^{BM}}{2} \dots\dots\dots (12)$$

2・3 制約関数

目標板厚 h 、材料温度 θ 、圧延荷重 P 、ロール回転数 N 、圧延動力 K_w 、ロールベンディング力 P_B の不等式制約条件、および決定変数である圧下率 r の不等式制約条件をTable 1にまとめて示す。

ここで、 P_{max} 、 N_{max} 、 K_{Wmax} 、 S_{max} 、 P_{Bmax} は、各変数の機械的に許容される上限値を示す。また、 h_{min} 、 h_{max} 、 θ_{min} 、 θ_{max} は、板厚および材料温度に関する公差(仕様に対する許容値)を表している。圧下率 r の制約については実機の圧延データに基づいて最大値 r_{max} と最小値 r_{min} が設定される。

多目的計画問題では、制約条件が(2)式に示す不等式で取り扱われる。そこで、制約関数 $g(x)$ を下式のように定式化しておく。

$$g_1(x) = -P_i$$
$$g_2(x) = P_i - P_{imax} \dots\dots\dots (13)$$

3. ファジィ多目的計画法による最適パススケジュール

多目的計画法では、目的関数が互いに相競合することから、一目的の最適化問題と同様に論ずることはできない。そこで、消極的な解としてある目的関数を改善するために、少なくとも他の目的関数を犠牲にせざるを得ないような解の概念が「パレート最適解(非劣解)」として定義されている⁵⁾。

一般に、パレート最適解は無限個の点からなる解集合を形成するので、現実の意志決定においては、意志決定者(本研究の場合はパススケジュールの設計者)はなんらかの合理的な解を選択しなければならない。

多目的計画問題では、各目的間に競合があることから、全ての目的を統合して満足できる解を数理計画法で求めることは困難である。そこで、ファジィ数理計画法に対話型手法を導入してパレート最適解を求める方法が提案されている¹⁰⁾¹¹⁾。本方法は、各目的関数に対してファジィ集合におけるメンバシップ関数を決定して意志決定者の設定する基

Table 1. Inequality constraints.

Aimed thickness at No.7 std	$h_{min} \leq h_7 \leq h_{max}$	
Aimed temperature at No.7 std	$\theta_{min} \leq \theta_{out}^7 \leq \theta_{max}$	
Rolling force	$0 \leq P_i \leq P_{imax}$	($i=1, \dots, 7$)
Roll revolutions per minute	$0 \leq N_i \leq N_{imax}$	(")
Power consumption	$0 \leq K_{wi} \leq K_{wimax}$	(")
Roll gap	$0 \leq S_i \leq S_{imax}$	(")
Roll bending force	$0 \leq P_{Bi} \leq P_{Bimax}$	(")
Reduction in thickness	$r_{imin} \leq r_i \leq r_{imax}$	(")

準点に近いパレート最適解を求め、意志決定者がこの解に満足できない場合には、対話的に基準点を変更することによって最終的にパレート最適解を求める手法である。

仕上げミルのパススケジュール設計問題では、目的間に競合がある。また、圧延材によっては「板厚については公差内に入っていればよいが、形状については急峻度をできるだけ小さくする」スケジュールが望まれたり、「材質、すなわち、温度の制御精度を最優先で考慮する」圧延が要求される場合がある。このことは、パススケジュールの設計にも設計者の主観に基づくあいまい性が存在することを意味している。そこで、本研究では、上記の方法をファジィ多目的計画法と呼び、本方法を用いて熱延仕上げミルのパススケジュールの設計を行った。

上記の方法を具現化するために、パススケジュールの設計問題を下式に示すミニマックス問題⁵⁾として定式化した。本研究では、下式のミニマックス問題を解いてパレート最適解を求めた。

$$\underset{\mathbf{x}}{\text{minimize}} \quad \max_{i=1, \dots, k} \{ \bar{\mu}_{mi} - \mu_{mi}(\mathbf{x}) \} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 $\mu_{mi}(\mathbf{x})$ は、多目的計画問題の目的関数 $f_i(\mathbf{x})$ に対する意志決定者のメンバシップ関数であり、 $\bar{\mu}_{mi}$ は、 $f_i(\mathbf{x})$ に対して意志決定者の希望を反映させた基準メンバシップ値である。

このように、ミニマックス問題とは、 $f_i(\mathbf{x})$ に関するメンバシップ関数の希望値と $\bar{\mu}_{mi}$ とメンバシップ値 $\mu_{mi}(\mathbf{x})$ との差、すなわち、不満足度が最大になるものについて、その値を最小にするように決定変数ベクトル $\mathbf{x}$ を決める問題である。

4. 最適パススケジュールの計算方法

ファジィ多目的計画法によって最適パススケジュールを計算するプログラムを作成し、数値計算を行った。ミニマックス問題を解くためのプログラムの基本構成をFig. 1に示す。本プログラムは、最適化計算と最適化計算によって得られた決定変数の値を用いて圧延特性を計算するブロックに大別される。最適化手法としては一般縮小勾配法⁵⁾¹²⁾を用いている。

以下では、各ブロックの計算内容について説明する。初期設定と決定変数から圧延特性を計算するブロックについて述べる。計算は、熱延タンデム圧延の数式モデルに基づく。まず、与えられた入側板厚 H と圧下率 r から各スタンド出側の板厚を計算する。次に、Simsの荷重式⁶⁾を用いて圧延荷重 P を求める。また、ゲージメータ板厚式($h=S+P/M$, M :ミル定数)を用いて、ロール間 S を求める。その後、各スタンドのロール回転数 N 、材料温度 θ 、板クラウン C_R およびクラウン比率を求め、圧延トルク G および圧延エネルギー E_R を材料先端部と後端部について順次計算して行く。

初期設定の項目と計算例として用いた値、および入力、

出力項目をTable 2にまとめて示す。

最適化計算のブロックでは、制約条件の最小値と最大値を初期設定とし、制約関数 $g(\mathbf{x})$ ((2)式)のもとに、(15)式の評価規範を最小にする極値探索を行い、決定変数の値を求める。この過程で、目的関数 $f(\mathbf{x})$ の値および、そのメンバシップ値 $\mu_m(\mathbf{x})$ を計算することは言うまでもない。制約条件の項目と計算に用いた値をTable 3に示す。

また、板厚、材料温度、形状(平坦度)、生産性(圧延時間)、生産コスト(圧延エネルギー)別に設定したメンバシップ関数 $\mu_m(\mathbf{x})$ をFig. 2に示す。ここで示したメンバシップ関数の形状と値は、過去の圧延データとパススケジュール設計者の選好を考慮したものである。

最後に、対話によって各目的関数の基準メンバシップ値

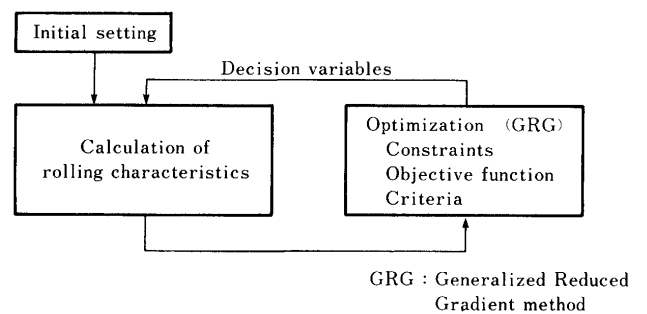


Fig. 1. Program configuration for solving the mini-max problem.

Table 2. Initial setting and Input/Output for calculation of rolling characteristics.

Initial setting	Mass of rolled material	W	15t
	Entry thickness at No.1 stand	H_1	35mm
	Desired thickness	h_s	4mm
	Entry temperature at No.1 stand	θ_{1in}^1	1050°C
	Desired temperature	θ_s	895°C
	Strip width	B	1200mm
Input	Decision variables	x_i	($i=1, \dots, 7$)
Output	Exit thickness at No.7 stand	h_7	
	Exit temperature at No.7 stand	θ_{out}^7	
	Percentage strip crown	γ_i	($i=1, \dots, 7$)
	Rolling force	P_i	(")
	Roll gap	S_i	(")
	Power consumption	K_{wi}	(")
	Rolling energy	E_{Ri}	(")
	Roll revolutions per minute	N_i	(")

Table 3. Maximum and minimum values in constraints.

Aimed thickness	$h_{min}=h_s-0.10\text{mm}$	$h_{max}=h_s+0.15\text{mm}$
Temperature	$\theta_{min}=\theta_s-15^\circ\text{C}$	$\theta_{max}=\theta_s+30^\circ\text{C}$
Rolling force	$P_{1min}=0\text{N}$	$P_{1max}=19.6 \times 10^6\text{N}$
Roll revolutions	$N_{1min}=0\text{rpm}$	$N_{1max}=1200\text{rpm}$
Power consumption	$K_{w1min}=0\text{kW}$	$K_{w1max}=10000\text{kW}$
Roll gap	$S_{1min}=0\text{mm}$	$S_{1max}=30\text{mm}$
Roll bending force	$P_{B1min}=0\text{N}$	$P_{B1max}=4.9 \times 10^5\text{N}$
Reduction in thickness	$r_{1min}=0.2$	$r_{1max}=0.5$
	$r_{2min}=0.2$	$r_{2max}=0.5$
	$r_{3min}=0.15$	$r_{3max}=0.5$
	$r_{4min}=0.15$	$r_{4max}=0.4$
	$r_{5min}=0.1$	$r_{5max}=0.35$
	$r_{6min}=0.05$	$r_{6max}=0.3$
	$r_{7min}=0.0$	$r_{7max}=0.5$

を修正し、最適パススケジュールを求める概略フローチャートをFig. 3に示す。ここで、 で囲んだ部分が上記のFig. 1で示した計算である。

5. 最適パススケジュールの計算結果と考察

ファジィ多目的計画法を用いて、熱延仕上げミルのパススケジュールを計算した結果について検討する。初期設定や制約条件はTable 2, Table 3に示したとおりである。以下に計算結果と考察を示す。

(1)各目的間の競合関係を検討するために、例として2種類のパススケジュールを計算した。Table 4に各目的のメンバシップ値 $\mu_{mi}(x)$ を示す。また、このときの各スタンドの圧下率 η_i の計算結果をFig. 4に示す。

ケース1は、目標板厚と後端部の形状が良好なパススケジュールである。ケース2はケース1に比べて生産性(圧延速度)が改善されているが、材料温度が好ましくない例である。また、Fig. 4の圧下率の変化をみると、ケース2では、ケース1に比べてNo. 3スタンドの圧下率を低く抑えている。ケース2では、生産性の改善のために圧延速度を高くすることから圧延材の温度が上昇する。そこで、材料温度を目標に近づけるためにNo. 3スタンドの圧下率を低くし、塑性加工発熱による温度上昇を低く抑えている。しかし、そのままでは目標板厚に関する満足度が劣化するため、No. 1スタンドの圧下率を高くしたものと考えられる。

このように、タンデム圧延では各目的が複雑に競合していることがわかる。したがって、すべての目的関数について完全に満足のかく解を見いだすことは困難である。

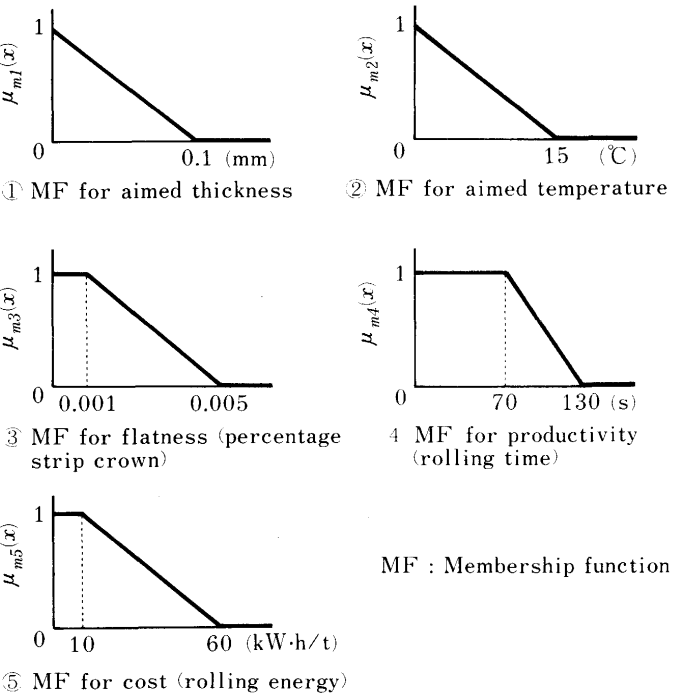


Fig. 2. Membership function for each objective.

(2)対話によってメンバシップ値を改善する例を示す。まず、すべての目的について基準メンバシップ値を0.85に設定した結果をFig. 5の白抜きの棒グラフで示す。これに対して、目標板厚の満足度の向上を考える。ここでは対話の結果、目標板厚の基準メンバシップ値 $\bar{\mu}_{m1}$ を0.95と高く設定し、材料温度とコストに関する基準メンバシップ値を0.80と設定した。その他の $\bar{\mu}_{mi}$ については0.85である。最適化計算によって得られたメンバシップ値 $\mu_{mi}(x)$ をFig. 5の斜線を施した棒グラフで示す。なお、これらのグラフでは、先端部の $\mu_m(x)$ のみを示している。また、基準メンバシップ値の

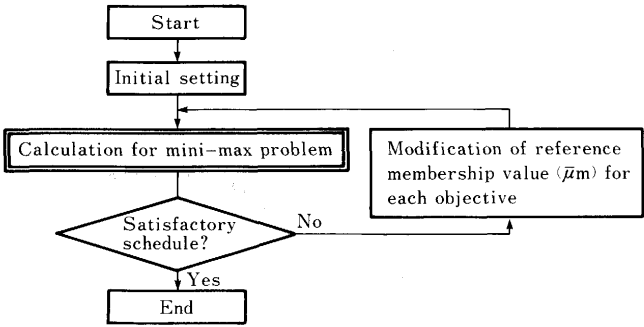


Fig. 3. Flow chart of interactive approach for optimum pass schedule design.

Table 4. Resulted membership values for each objective function.

Objective function		Resulted membership values	
		Case 1	Case 2
$f_1(x)$	Thickness	0.95	0.91
$f_2(x)$	Temperature (Top)	0.80	0.68
$f_3(x)$	Temperature (Bottom)	0.74	0.67
$f_4(x)$	Flatness (Top)	0.88	0.82
$f_5(x)$	Flatness (Bottom)	0.92	0.83
$f_6(x)$	Productivity (Rolling time)	0.74	0.80
$f_7(x)$	Cost (Rolling energy)	0.80	0.80

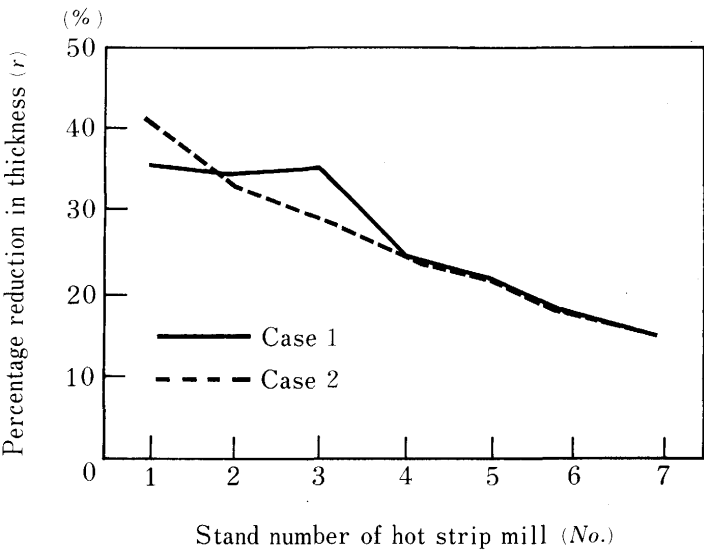


Fig. 4. Calculation results of reduction pattern by multi-objective programming method.

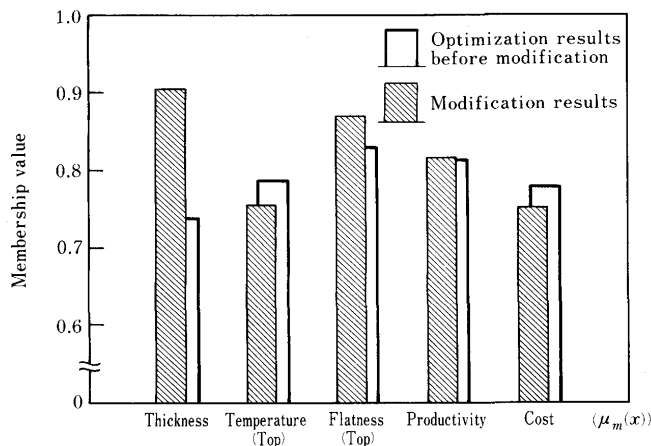


Fig. 5. Interactive modification of membership value for each objective.

修正前の各スタンドの目標板厚と修正後の目標板厚の変化を、それぞれFig. 6の破線と実線で示す。

これらの図から、目標板厚は、より仕様の値 h_s に近づいていることがわかる。また、このパススケジュールでは材料温度とコストが犠牲になっているが、その値はわずかである。

(3)一目的の計画問題として最適化した結果との比較を行う。ここでは、パススケジュールの設計をコスト関数(12)式)を評価規範とする一目的の計画問題として定式化し、最適化計算を行った。この問題では、コスト以外の目的を制約関数としている。

$$\text{minimize } f_i(\mathbf{x}) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{subject to } g_1'(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \dots\dots\dots (17) \\ g_2'(\mathbf{x}) \leq 0 \\ \dots\dots$$

ここで、 g_i' は、一目的問題における各制約条件式を表す。上記(2)の修正後の各目的のメンバシップ値(材料温度と形状については先端部のみ)をTable 5(a)に示す。また、一目的問題として得られた物理量をFig. 2のメンバシップ関数を用いてメンバシップ値に変換したものをTable 5(b)に示す。一目的問題として解いた場合、コストについては高い満足度を示すが、他の変数については多目的問題と比較して、メンバシップ値が大きくばらついている。

(4)実操業データとの比較を行う。Table 2に示した計算例と同一鋼種、同一サイズの材料について、実圧延データを用いてメンバシップ値を計算した結果をTable 5(c)に示す。実圧延データとは、圧延材先端部について200msごとにサンプリングされた数点のデータを平均して求めたものである。項目は、板厚、荷重、ロール間、圧延速度、ミル出側材料温度、板クラウン量(クラウンメータの測定値より計算する)などである。また、メンバシップ関数はFig. 2を用いている。

この結果、本圧延材については、パススケジュールの設計に際して板厚と生産性に関する目的を他の目的に優先し

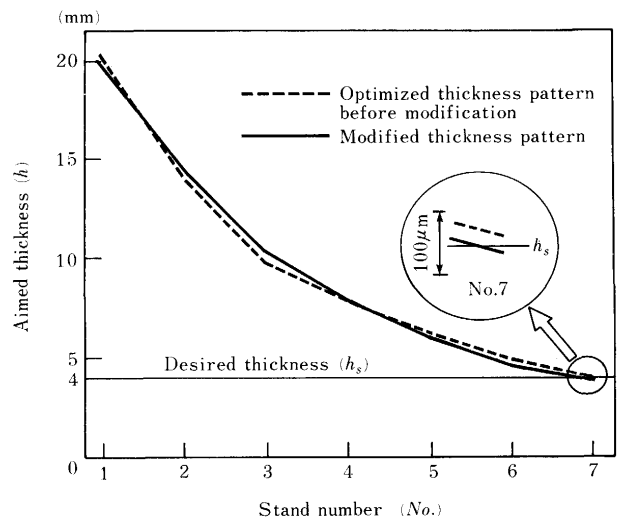


Fig. 6. Interactive modification of aimed thickness pattern.

Table 5. Comparison of resulted membership values.

Objective function	Resulted membership values		
	(a)	(b)	(c)
	Fuzzy Multi-objective	By Usual optimization	Based on actual data
$f_1(\mathbf{x})$ Thickness	0.90	0.86	0.91
$f_2(\mathbf{x})$ Temperature	0.75	0.79	0.72
$f_4(\mathbf{x})$ Flatness	0.87	0.68	0.71
$f_6(\mathbf{x})$ Productivity	0.81	0.62	0.89
$f_7(\mathbf{x})$ Cost	0.75	0.93	0.74

て考慮したものと考えられる。また、メンバシップ値のばらつきを検討すると、その最大値と最小値の差が、本研究の方法では0.15 (Table 5 (a))、一目的問題として解いた場合は0.31 (Table 5 (b))、実操業データに基づいて計算すると0.20 (Table 5 (c))となる。したがって、実操業では、経験的にパススケジュールの設計を多目的計画問題として取り扱い、圧延の仕様や材料特性によって各目的間の競合関係を考慮しているものと考えられる。

6. 結言

本論文では、大規模分散系である熱延タンデムミルにおいて、ファジィ多目的計画法による最適パススケジュールの設計方法について述べた。本技術の特徴と結果は、以下の通りである。

(1)熱延タンデムミルのパススケジュールの設計では、板厚、材料温度、形状、生産性、生産コストの各目的間に競合関係があることから、多目的計画問題として定式化した。

(2)熱延仕上げミルの数式モデルに基づいて、各目的関数を構成した。特に、温度と形状については材料先端部と後端部の温度差を考慮し、先端部と後端部のそれぞれについて目的関数を設定した。

(3) ファジィ数理計画法に対話型手法を導入した、ファジィ多目的計画法による最適パススケジュールの設計方法を開発した。ここでは、多目的計画問題をミニマックス法を用いて解き、パレート最適解を求めている。また、基準メンバシップ値 μ_m を修正することにより、設計者の主観に基づくあいまい性や選好を考慮した最適パススケジュールを求めることができる。

(4) 最適パススケジュールを計算するプログラムを開発した。実績データを用いて数値計算を行った結果、以下のことが確認できた。

- ① 板厚、材料温度などの各目的間に競合関係がある。
- ② 対話型手法により、各目的に対する満足度のばらつきが少ない最適パススケジュールを設計できる。
- ③ 実操業のパススケジュールを解析すると、一目的問題の最適解に比べて各目的に対する満足度のばらつきが少

ない。すなわち、設計者はパススケジュールの設計を経験的に多目的計画問題として取り扱っている。

文 献

- 1) 西川龍彦, 平野 良: 第3版鉄鋼便覧Ⅲ (日本鉄鋼協会編), (1980), p.386 [丸善]
- 2) 北之園英博: 圧延理論とその応用 (日本鉄鋼協会編), (1969), p.435 [誠文堂新光社]
- 3) 岡戸 克, 鈴木 弘: 塑性と加工, **10** (1969), p.808
- 4) (株)神戸製鋼所 (私信) 1979年11月
- 5) 坂和正敏: 非線形システムの最適化, (1986), p.114 [森北出版]
- 6) R.B.Sims: Proc. Instn. Mech Eng., No.168 (1954), p.191
- 7) 河野輝雄: 板圧延の理論と実際 (日本鉄鋼協会圧延理論部会編), (1984), p.101
- 8) 小門純一: 塑性と加工, **11** (1970), p.816
- 9) 阿高松男: 生産研究, **24** (1972), p.224
- 10) 坂和正敏: 電気通信学会論文誌, **J67-A** (1984), p.1138
- 11) 坂和正敏, 矢野均: 電気通信学会論文誌, **J68-A** (1985), p.1030
- 12) 清水清孝: システム最適化理論, (1976), p.86 [コロナ社]