

博士論文

冷間タンデム圧延機における
パススケジュールの最適化に関する研究

村 上 晃

1 序論	1
1.1 背景	1
1.2 冷間圧延の板厚張力制御に関する研究	1
1.3 本研究の目的と概要	4
1.4 本論文の構成	5
2 冷間圧延における最適化に関する課題	7
2.1 冷間圧延	7
2.1.1 圧延機	7
2.1.2 圧延プロセス	14
2.2 パススケジュール	20
2.2.1 定義(板厚目標値と張力目標値)	20
2.2.2 テーブル	24
2.3 圧延モデル	31
2.4 最適化に関する課題と提案手法概要	36
2.4.1 過去データを確率分布として利用した機会制約条件計画問題	36
2.4.2 制御パラメータのテーブルの段階的な最適化	38
2.4.3 圧延機での多変数カスケード最適制御	39
2.5 本章のまとめ	40
3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化	41
3.1 緒言	41
3.2 パススケジュール [板厚目標値]	41
3.2.1 テーブル	41
3.2.2 規定方法	43
3.3 最適化前の圧延状態	44
3.4 ばらつきを考慮した最適化	46
3.4.1 最適化に用いる圧延モデル	46
3.4.2 機会制約条件計画問題	47
3.4.3 冷間圧延におけるばらつき	48
3.4.4 確率分布として過去データを用いた確定問題への変換	52
3.4.5 信頼率の緩和による優先順位付け	59
3.5 最適化の手順	59
3.6 実機適用結果	60
3.6.1 設計例	60
3.6.2 実機適用結果	65
3.7 結言	67
4 パススケジュール [張力目標値] の最適化	68

目次

4.1	緒言	68
4.2	パススケジュール [張力目標値]	68
4.2.1	張力カーブ (張力目標値の圧延速度依存特性を示すカーブ)	68
4.2.2	テーブル	70
4.3	張力カーブのテーブルの段階的な最適化	71
4.3.1	各升目での最適化 <1段階目>	72
	・最適化に用いる圧延モデル	72
	・1圧延材での最適化	73
	・1つの升目内での張力カーブの導出	76
4.3.2	全升目での最適化 <2段階目>	77
4.4	最適化の手順	82
4.5	実機適用結果	83
4.6	結言	88
5	ミルバランス制御 (パススケジュールを圧延中に変更する最適制御)	89
5.1	緒言	89
5.2	ミルバランス制御の概要	90
5.3	ILQ設計法を用いたミルバランス制御の設計	91
5.3.1	設計に用いる制御対象のモデル	91
5.3.2	ILQ設計法によるフィードバック補償	93
5.3.3	フィードフォワード補償の付加	98
5.4	実機適用結果	98
5.4.1	圧延荷重制御	98
5.4.2	モータ電流制御	100
5.4.3	フィードフォワード補償	104
5.5	結言	106
6	結論	107
	謝辞	111
	補遺	112
	参考文書	115
	関連文書	119

1 序論

1.1 背景

鉄鋼プロセスにおける冷間タンデム圧延機(TCM:Tandem Cold Mill)は、熱間圧延された長い原板を、常温下で複数のスタンドにより連続的に板厚を減少させ、板厚精度が高く、表面品質の良好な鋼板を製造する設備である。複数の圧延スタンドがタンデム状に配置され、鋼板が連続的に圧延スタンドを通され、連続的に圧延されることにより、高生産性での冷延鋼板の生産が可能となっている。

ここで、圧延機を制御対象として見た場合、航空機と同様、干渉のある多入力多出力の系であり、非線形性が存在する。航空機には、制約の範囲内で、所定の高度や速度等を維持することが要求されているが、冷間圧延においても、制約の範囲内で、所定の板厚精度を確保することが要求されている。

そこで、板厚精度を達成するために、冷間タンデム圧延機には、板厚制御(AGC:Automatic Gauge Control)が適用されている。最近では、スタンド間の張力も制御する板厚張力制御が多く適用されてきている。板厚張力制御を適用することにより、1本の鋼板において板厚が公差を外れる部分の長さ(オフゲージ長さ)を短くすることが可能となる。

近年、自動車や電気製品に使用される鋼板の板厚精度要求が厳格になるにつれて、板厚張力制御系の性能向上が必要になっていた。また、自動車用の鋼板として、高張力鋼板(ハイテン材: High Tensile Strength Steel)と呼ばれる高強度の鋼板の生産量が増加している。高強度の材料であるため、圧延が難しく、過大な圧延荷重による鋼板の蛇行・形状悪化や、圧延機のモータ電流の定格値超過等の問題が発生する場合があった。鋼板の蛇行や形状悪化が生じると、板厚張力制御が難しくなり板厚精度が劣化する場合があった。また、モータ電流が定格値を超過すると、圧延速度を減速する必要があり、生産性が低下する場合があった。

そこで、高板厚精度かつ高生産性で鋼板を生産可能な制御技術が必要とされていた。

1.2 冷間圧延の板厚張力制御に関する研究

冷間圧延の板厚制御では、近年、スタンド間の張力も制御する板厚張力制御^{1,2,3,4)}が多くなっている。板厚張力制御は、一般的に、2つのステップ、すなわち、(i)目標値の設定と(ii)フィードバック制御の2ステップから成っている⁵⁾。

以降、本節では、各ステップについて、内容、課題、従来の研究を概説する。

第1ステップの目標値設定を概説する。このステップでは、板厚張力制御の目標値である全スタ

1 序論

ンド出側の板厚目標値を計算し設定する。ここで設定される板厚目標値はパススケジュールと呼ばれる⁶⁾。また、スタンド間の張力も制御される場合には、張力目標値も計算し設定する。なお、本論文では、張力目標値が設定される場合を扱い、板厚目標値と張力目標値を合わせてパススケジュールと呼ぶこととする。冷間圧延される鋼板は、厚さ、幅、成分等が鋼板毎に異なるため、目標値の計算、すなわち、パススケジュールの計算は、圧延される鋼板毎に、圧延前に行われる。これは、航空機の飛行経路の決定⁷⁾と同様である。民間航空機の場合、航空機の種類、出発する空港、到着する空港等により、飛行前に上昇経路や下降経路を定めること⁸⁾に相当する。

第1ステップの1つめの課題は、パススケジュールの設定には、自由度があることである。すなわち、板厚目標値に着目すると、冷間圧延前の原板は上流工程の熱間圧延機で圧延された鋼板であり、厚さは既定である。また、冷間圧延後の板厚は、最終製品である冷延鋼板の板厚であり、これも既定である。しかし、最終スタンドを除いたスタンドの出側板厚は、一意ではなく、スタンドが下流側になるにつれて薄くなる順番であれば、任意の値を取り得る。これは、航空機が空港に着陸する際に、降下開始時の位置(緯度、経度、高度)と、降下終了時の空港の位置が既定であっても、降下経路に自由度があるのと同様である。

この課題に対し、パススケジュールを経験的に決定する方法と理論的に決定する方法があった⁹⁾。経験的に決定する方法では、制約を満たす解を得ることが難しい場合がある。また、理論的に決定する方法では、評価関数や制約条件の設定が難しい。このため、いろいろな方法が提案されてきたが^{10,11,12,13,14,15,16,17)}、実圧延に定常的に用いられる段階には達していなかった¹⁸⁾。

次に、第1ステップのパススケジュール設計の2つめの課題は、最適化問題としてみた場合、従来は確定論的な設計となっていることである。ばらつきを考慮していないため、原板の硬さや板厚にばらつきがあった場合、不適切なパススケジュールとなり得る。

この課題に対し、確定的な最適化の課題に対する従来の研究では、確率変動する対象の確率分布がわかっている場合に、確率的要素を考慮して最適化を行う確率計画法^{19,20)}がある。そして、確率計画法の中で、ある確率レベルで制約条件が満たされればよいとする方法として、機会制約条件計画問題^{21,22)}があり、電力供給計画問題への応用例²³⁾も報告されている。また、従来の研究として、構造設計の分野では、最適信頼性設計²⁴⁾と呼ばれる設計法がある。これは、不確定な要因を確率的に取り扱いながら構造の解析および設計を行い、さらに構造における種々の目的を最適化するような設計法であり、航空宇宙工学を始め様々な分野で開発が進んでいる^{25,26)}。これらの方法では、確率分布を仮定して最適化を行うことが多いが、圧延のパススケジュール設計の場合には、代表的な確率分布と異なる場合やピークが2つ以上ある場合等があり、確率分布の仮定が困難であり、パススケジュール設計への適用が難しいという問題があった。

さらに、第1ステップのパススケジュール設計の3つめの課題は、制御パラメータが条件によりテーブル化されている場合の、制御パラメータテーブルの最適化である。圧延の場合、板厚、板幅、

材料の成分等により制御パラメータを変更する必要がある、テーブルに板厚等に応じた制御パラメータを格納している。なお、航空機の場合も、ゲインスケジュール^{27, 28)}のように、高度、速度、姿勢等により制御パラメータを変更する必要がある、テーブルあるいは関数等を作成して全制御範囲で制御パラメータを決定する場合がある。テーブルの各升目の制御パラメータが、制約を満たし適正に設定されることが必要である。また、板厚、板幅、材料等が近い鋼板の場合、同じような制御応答の方が好ましいため、隣接する升目の制御パラメータは近似している必要がある。

この課題に対して、本論文で対象とする冷間圧延機の場合、テーブルの各升目に格納される制御パラメータは、実績データの回帰計算から求めていた。そして、実績データのない升目のパラメータについては、補間や補外により求めていた。このため、テーブルの制御パラメータは、試行錯誤的に決定され、必ずしも最適な値とはなっていなかった。一方、最適化の分野においては、近年の航空機の設計のように構造、制御、流体等の複数の領域で最適化を行う複合領域の最適化問題²⁹⁾等において部分的な問題に分割する最適化や、段階的な最適化^{30,31,32,33,34)}が行われている。また、応答曲面法³⁵⁾のように最適化の途中で近似曲面を利用する方法がある。しかし、圧延の分野において、これらの手法の適用例は少なく、また、部分問題化や近似曲面の利用には、圧延の制御に適した方法が必要となる。

第2ステップの板厚と張力のフィードバック制御を概説する。このステップでは、圧延中に、板厚実績値が板厚目標値に合致するようにフィードバック制御を行う。また、張力も制御される場合には、張力実績値が張力目標値に追従するようにフィードバック制御を行う。

第2ステップの板厚張力制御の課題は、圧延中に板厚目標値や張力目標値を変更すべき場合があることである。すなわち、原板の硬さや板厚がパススケジュール計算時と異なる場合や圧延中に変化する場合には、圧延荷重やモータ電流が制約を超える場合がある。このような場合には、圧延中に板厚目標値や張力目標値を変更することにより、圧延荷重やモータ電流を適正化する必要がある。これは、航空機において、変化する風速に対して、速度や高度の制約を満足するために、位置や姿勢を制御するフライトコントロールだけでなく、飛行経路を制御⁷⁾するフライトマネジメントシステム⁸⁾が必要なことと類似している。

この目標値変更を要するという課題に対して、従来は、手動操作または自動操作により目標値の変更がなされていた。手動操作の場合、全スタンドのモータ回転数が一律に低減される場合が多く、生産性が低下していた。また、自動操作により、最終スタンドの圧延荷重変動を抑制するための板厚目標値を変更する技術等が開発されている^{36, 37)}。この場合、最終スタンドの圧延荷重は一定に制御される。しかし、全スタンドのモータ電流および圧延荷重のバランスを考慮しておらず、また、全スタンドの動特性を考慮した制御となっていないという問題があった。

1 序論

1.3 本研究の目的と概要

本研究では、高張力鋼板を含む冷延鋼板の板厚精度を向上し、板厚公差外れ長さであるオフゲージ長さを短縮することを目的とする。同時に、圧延荷重・モータ電流等に関して良好な圧延状態を保ち、生産性を高く維持することを目的とする。そのため、パススケジュールの最適化に関して、3つの手法を提案する。そして、実機適用により効果を確認する。

まず、3つの手法の概要を以下の第 1.1 表で説明する。

目的

	＜第1ステップ＞ パススケジュール設定	＜第2ステップ＞ 板厚張力制御
(1)パススケジュール最適化 〔板厚目標値〕	・板厚精度向上 ・圧延荷重・モータ電流の適正化	－
(2)パススケジュール最適化 〔張力目標値〕	・加減速時の板厚精度のさらなる向上 ・加減速時の圧延荷重のさらなる適正化	－
(3)ミルバランス制御 (パススケジュールを 圧延中に変更)	－	・板厚精度維持 ・圧延荷重・モータ電流の適正化

技術内容

	＜第1ステップ＞ パススケジュール設定	＜第2ステップ＞ 板厚張力制御
(1)パススケジュール最適化 〔板厚目標値〕	板厚目標値(最大圧延速度時)の最適化	－
(2)パススケジュール最適化 〔張力目標値〕	張力目標値(加減速時)の圧延速度依存特性の最適化	－
(3)ミルバランス制御 (パススケジュールを 圧延中に変更)	－	観測値に基づいて板厚目標値と張力目標値をオンラインで変更

特徴

	＜第1ステップ＞ パススケジュール設定	＜第2ステップ＞ 板厚張力制御
(1)パススケジュール最適化 〔板厚目標値〕	・数理計画法による設計 ・ばらつきを考慮した最適化 ・過去の実績データを確率分布として利用	－
(2)パススケジュール最適化 〔張力目標値〕	・パラメータテーブル全体の最適化 ・部分問題化、段階的最適化、曲面近似利用	－
(3)ミルバランス制御 (パススケジュールを 圧延中に変更)	－	・圧延の負荷バランスの最適制御 ・多変数のカスケード制御

第 1.1 表 提案する3手法の概要

まず、1つめのパススケジュール最適化〔板厚目標値〕では、板厚精度向上を目的とし、同時に、

圧延荷重・モータ電流の適正化も目的とする。技術内容としては、最大圧延速度でのパススケジュール(ここでは、板厚目標値のみ)の最適化を行う。本手法の特徴は、パススケジュール設計において、数理計画法を適用し^{21, 35, 38)}、定量的な最適化を可能としたことである。そして、ばらつきを考慮した設計とするために、新たに、機会制約条件計画²¹⁾において、過去の実績データを確率分布として利用する最適化の手法を提案する。提案手法の効果を、シミュレーションおよび実圧延により確認する。

次に、2つめのパススケジュール最適化[張力目標値]では、加減速時のさらなる板厚精度向上を目的とし、同時に、加減速時の圧延荷重のさらなる適正化を目的とする。技術内容としては、加減速時のパススケジュール(ここでは、張力目標値のみ)の最適化を行う。すなわち、張力目標値の圧延速度依存特性を最適化する。ここで、この張力目標値の圧延速度依存特性を示すカーブを張力カーブと呼ぶ。張力カーブの設定は、加減速時の圧延荷重変動、板厚変動に影響を及ぼす。本手法の特徴は、制御パラメータをテーブルで格納する場合に、パラメータテーブル全体を最適化することである。テーブルのすべての升目の制御パラメータを決定するデータがない場合においても、全ての升目で制約条件を満たす制御パラメータを求めることが可能となる。また、部分問題化、段階的最適化、曲面近似の利用により、求解の容易さや計算時間の短縮を実現する。提案手法の効果を、実圧延により確認する。

最後に、3つめのミルバランス制御と呼ぶ最適制御では、板厚精度を維持し、圧延荷重・モータ電流を適正化することを目的とする。ここで、ミルバランスとは、圧延機(ミル)の全スタンドの圧延荷重・モータ電流の分布(バランス)を意味する工場での用語である。ミルバランス制御の技術内容としては、リアルタイムの観測値に基づいてオンラインでパススケジュール(板厚目標値と張力目標値の両方)を変更する最適制御である。すなわち、板厚目標値と張力目標値をダイナミックに変更する新しい制御であり、鋼板の硬さ等にはばらつきがある場合や、外乱が印加する場合にも、板厚精度を確保しつつ、圧延状態を良好に保つことを可能とする。本手法の特徴は、圧延における負荷バランスの最適制御である。さらに、圧延の分野では数少ない多変数のカスケード制御となっている。提案手法の効果を、実圧延により確認する。

1.4 本論文の構成

本論文は6章から構成されている。

第1章は、本章の序論であり、研究の背景を説明し、冷間圧延の板厚張力制御におけるこれまでの研究をまとめた。そして、本研究の目的と論文の概要を述べた。

第2章では、本研究で対象としている冷間圧延について、プロセス、パススケジュール、圧延モデルを詳説する。そして、最適化に関する研究課題を抽出する。続いて、研究課題を解決するた

1 序論

めの、新しく開発した3つの技術について概説する。

第 3～5 章では、板厚張力制御を適正化するための3つの技術の研究内容について説明する。第 3 章では、1つめの技術であるパススケジュールのうちの板厚目標値の最適化について、第 4 章では、2つめの技術であるパススケジュールのうちの張力目標値(張力カーブ)の最適化について、第 5 章では、3つめの技術であるミルバランス制御(パススケジュールを圧延中に変更する最適制御)について述べる。

第 6 章では、結論として本研究の成果を総括する。

2 冷間圧延における最適化に関する課題

本章では、まず、対象としている冷間圧延に関して、プロセス、パススケジュール、圧延モデルを詳説する。そして、最適化における研究課題を抽出する。続いて、研究課題を解決するための、新しく開発した3つの技術について概説する。

第 2.1 節では、冷間タンデム圧延機について、製鉄所での位置づけ、製品、動作・構造を説明する。次に、冷間圧延プロセスについて、スタンド単体の制御方式、複数のスタンドを組み合わせた場合の制御方式、圧延中の圧延状態の変化について述べる。そして、板厚張力制御系の目標値を最適に設定し制御する必要性について述べる。

第 2.2 節では、板厚張力制御系の目標値であるパススケジュールの定義を述べる。続いて、パススケジュールがパラメータとして格納されているテーブルについて説明する。

第 2.3 節では、パススケジュールの設定値の最適化やパススケジュールを変更する最適制御系の設計に必要な圧延モデルについて説明する。

第 2.4 節では、第 2.1～2.3 節を踏まえて、冷間圧延における最適化に関する研究課題を抽出し、研究課題を解決するための、新しく開発した3つの技術について概説する。具体的には、(1)過去データを確率分布として利用した機会制約条件計画問題、(2)制御パラメータのテーブルの段階的な最適化、(3)圧延機での多変数カスケード最適制御の3テーマを略説する。

2.1 冷間圧延

2.1.1 圧延機

本研究の対象となる冷間タンデム圧延機は、第 2.1 図、第 2.2 図に示す製鉄所の設備の1つである(第 2.3 図)。

2 冷間圧延における最適化に関する課題



第 2.1 図 製鉄所全景（神戸製鋼所パンフレット「KAKOGAWA WORKS」）



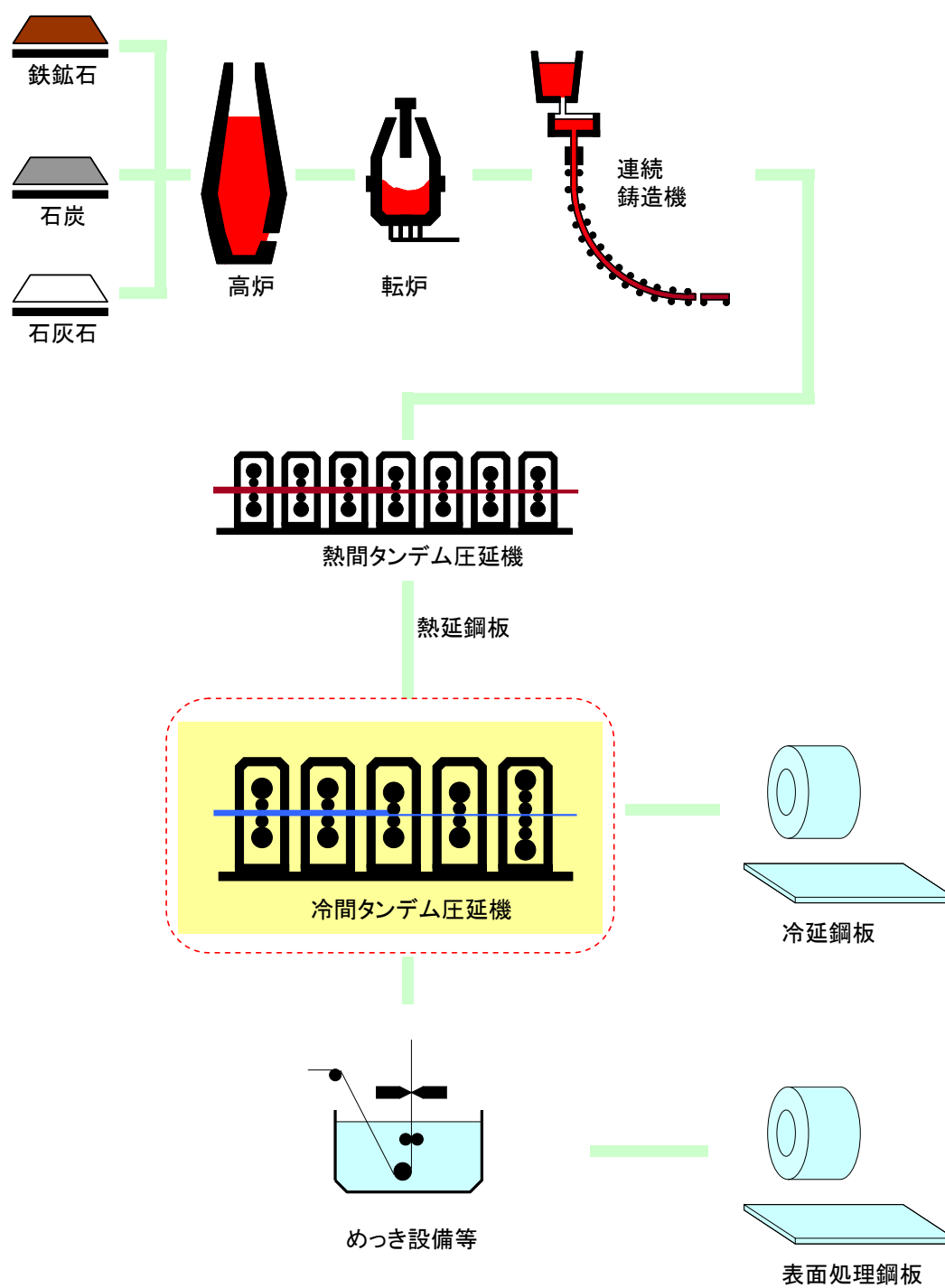
第2.2 図 製鉄所レイアウト（神戸製鋼所パンフレット「加古川製鉄所」）



第 2.3 図 冷間タンデム圧延機外観（神戸製鋼所パンフレット「加古川製鉄所」）

製鉄所では、第 2.4 図に示すように、鉄鉱石、石炭、石灰石を原料にして、高炉で溶けた鉄である銑鉄を製造し、転炉で炭素を除去して炭素量の少ない強靱な鋼とし、連続铸造機で凝固させ鋼の塊である鋼片を製造する。続いて熱間タンデム圧延機において高温のまま、鋼片を板状に薄くし熱延鋼板とする。

2 冷間圧延における最適化に関する課題

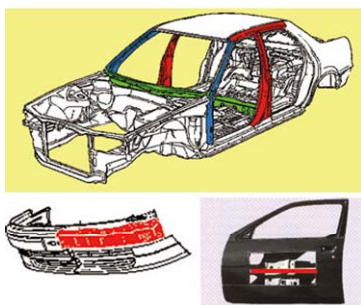


第 2.4 図 冷延鋼板・表面処理鋼板の製造プロセス
(神戸製鋼所パンフレット「加古川製鉄所」)

続いて、冷間タンデム圧延機で、常温の状態ですらに鋼板を薄くし、良好な表面品質を有する冷延鋼板(第 2.5 図)を製造する。なお、冷延鋼板の一部は、亜鉛めっき等を施され、表面処理鋼板となる。冷延鋼板や表面処理鋼板は、主に、自動車や家電製品に用いられる(第 2.6 図)。



第 2.5 図 冷延鋼板（神戸製鋼所パンフレット「加古川製鉄所」）



自動車用部材



ドアインパクトビーム



センタービラー



ドアアウト



ボディサイドアウト

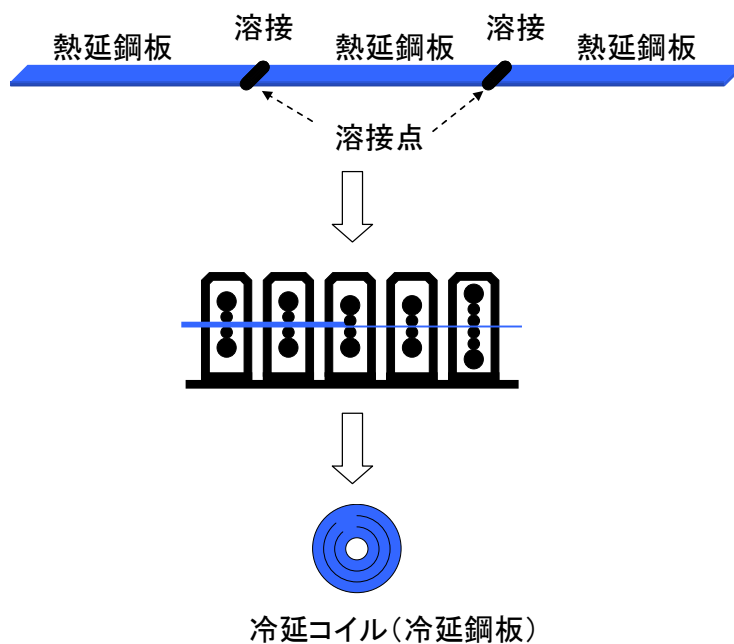
- AV機器（シャーシ、機構部品）
- 複写機、プリンタ
- コンピュータケース
- 家電製品（洗濯機、冷蔵庫、エアコン）

第 2.6 図 冷延鋼板・表面処理鋼板の用途（神戸製鋼所HP）

次に、第 2.7 図に、冷間圧延の概要を説明する。熱間タンデム圧延機で圧延された熱延鋼板は溶接され、連続的に冷間タンデム圧延機で圧延される。冷延鋼板は巻き取られ、冷延コイルとな

2 冷間圧延における最適化に関する課題

る。

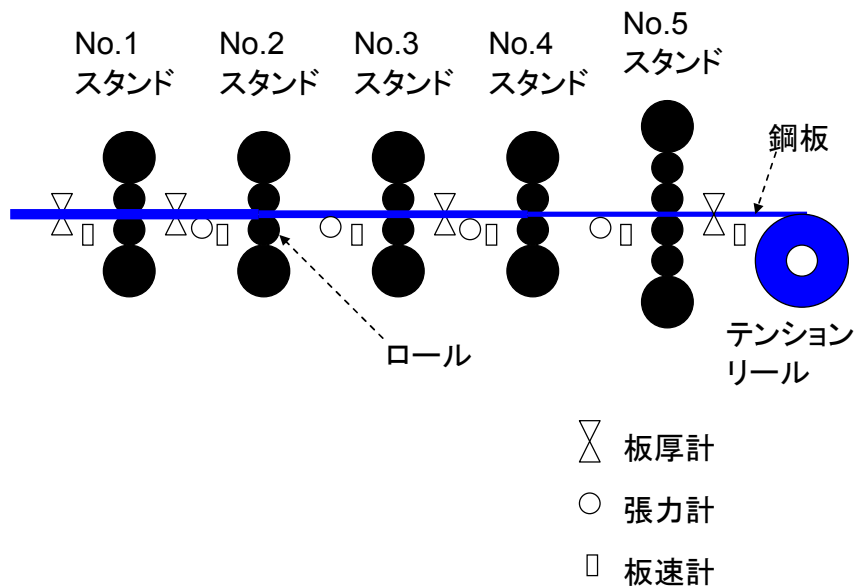


第 2.7 図 冷間圧延の概要

第 2.8 図に、冷間タンデム圧延機の構造を示す。溶接された熱延鋼板が No.1 スタンドに移送され、ロール間の間隙において圧力を加えて圧下されるとともに、スタンド間張力により引っ張られ、板厚が減少する。鋼板は、さらに順に、No.2、No.3、No.4、No.5 スタンドへと移送されるとともに、圧下され、引っ張られ、所望の厚さの冷延鋼板となり、テンションリールにより巻き取られる。

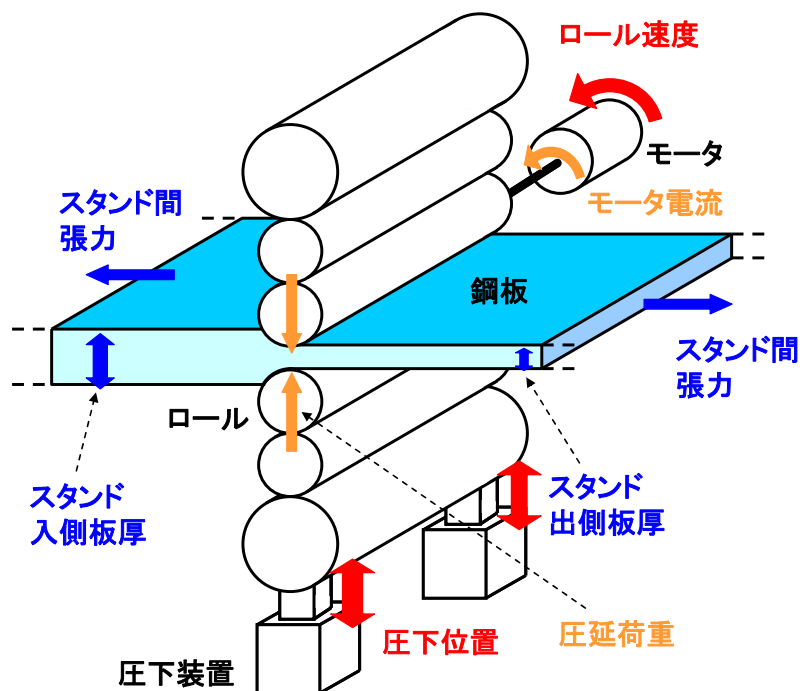
制御のためのセンサとしては、板厚計が、No.1 スタンドの入側と No.1、No.3、No.5 スタンドの出側に設置されている。また、板速計が、No.1 スタンドの入側と全スタンドの出側に設置されている。さらに、鋼板の張力を測定するための張力計が、全スタンド間に設置されている。

なお、No.1～No.5 スタンド出側板厚は、板厚計と板速計の値から、鋼板の体積速度一定則を用いて計算される。



第 2.8 図 冷間タンデム圧延機の構造

第 2.9 図に、冷間タンデム圧延機各スタンドの構造を示す。モータが回転することにより、ロールが回転し、また、ロール端部に設けられた油圧の圧下装置により、ロールを介して鋼板が圧下される。そして、鋼板には、スタンドの入側、出側ともに張力が加えられている。ここで、張力は隣接するスタンドでの板速差により発生する。また、ロールには圧下の反力として圧延荷重が発生し、モータでは仕事量に応じたモータ電流が必要となる。



第 2.9 図 冷間タンデム圧延機各スタンドの構造

2 冷間圧延における最適化に関する課題

2.1.2 圧延プロセス

まず、第 2.9 図を用いて、スタンド単体での制御方式を説明する。

鋼板をスタンド入側板厚からスタンド出側板厚まで圧下し、かつ、スタンド間張力を適切に制御するために、圧下装置とモータの2種類のアクチュエータが設けられている。

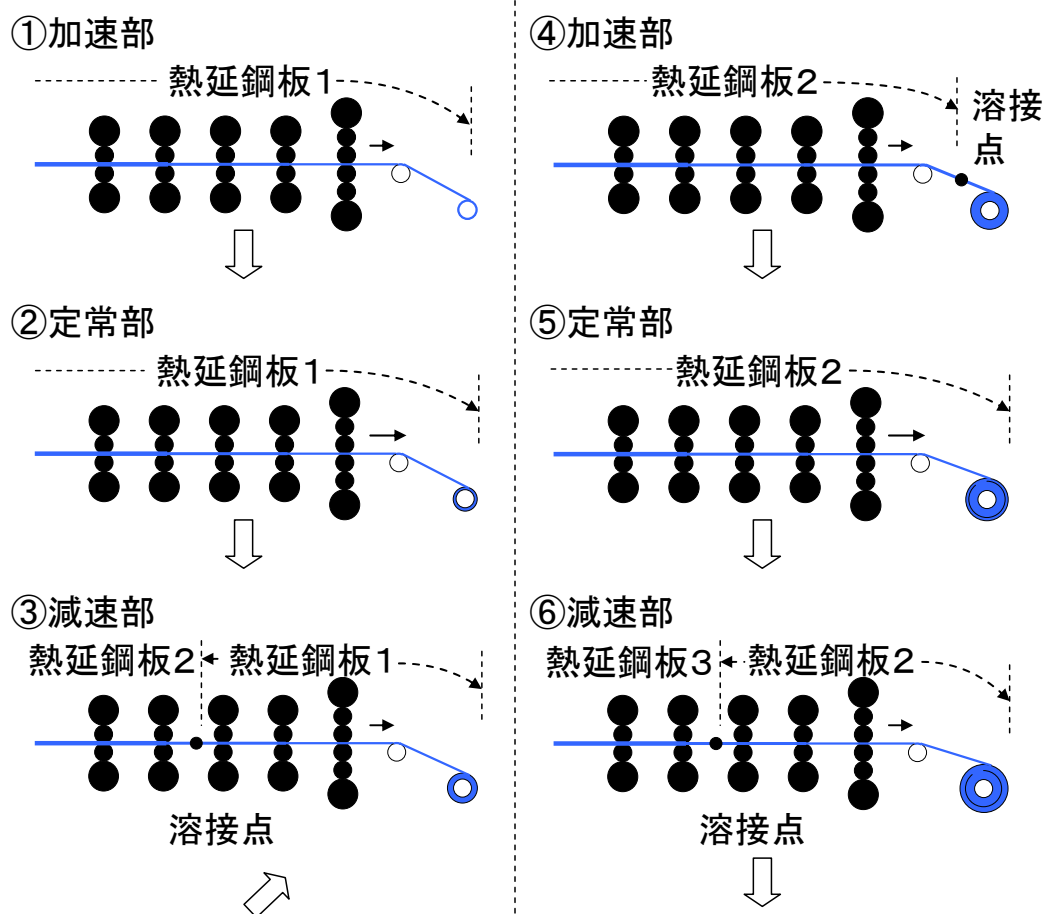
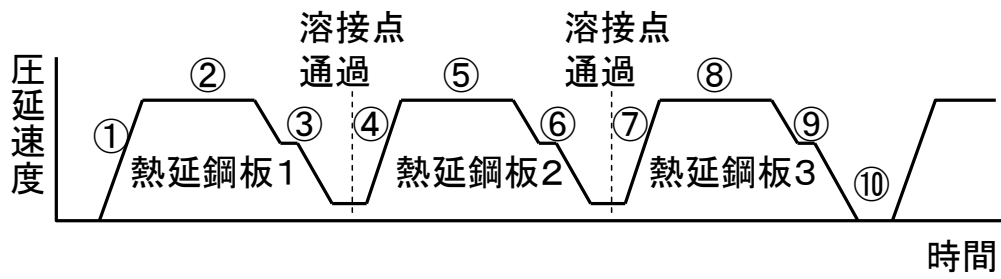
圧下装置はロールの両端に設置されており、スタンド上部のロールとスタンド下部のロールとの間隙を調整する。圧下位置を変更することにより、板厚が低減される。また、板厚が変化することにより、単位時間当たりの鋼板の通過量(マスフロー)が変化することにより、スタンド間張力も変化することとなる。

モータはロールを回転させ、鋼板を移送する。また、ロールの回転速度を変更することにより、スタンドの入側および出側のスタンド間張力を変化させる。冷間圧延では、スタンド間張力によっても鋼板の板厚が低減されることが特徴となっている。

そして、冷間圧延においては多くの場合、このような単スタンドが、第 2.8 図のように連結されており、冷間タンデム圧延機と呼ばれる。タンデムとする理由は、熱延鋼板を所望の板厚の鋼板へと圧延する場合に、単スタンドで複数回圧延するより、複数のスタンドで1回圧延する方が、効率的であり生産性が向上するためである。

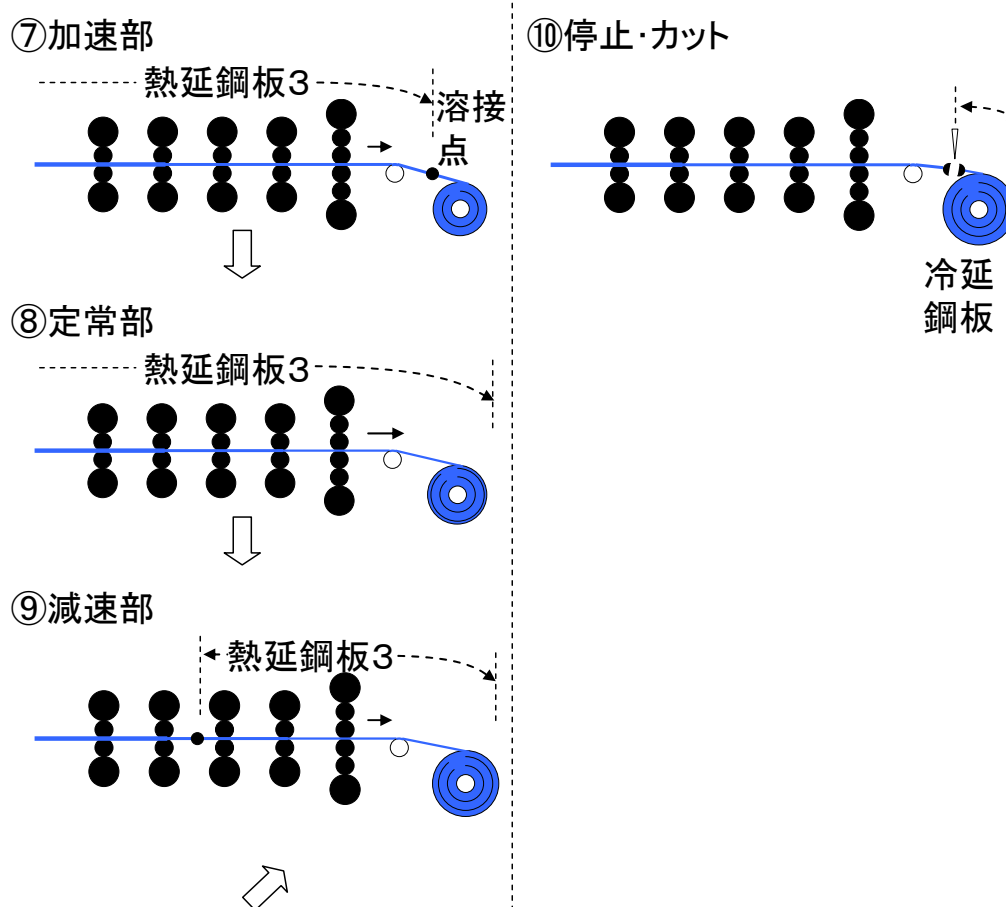
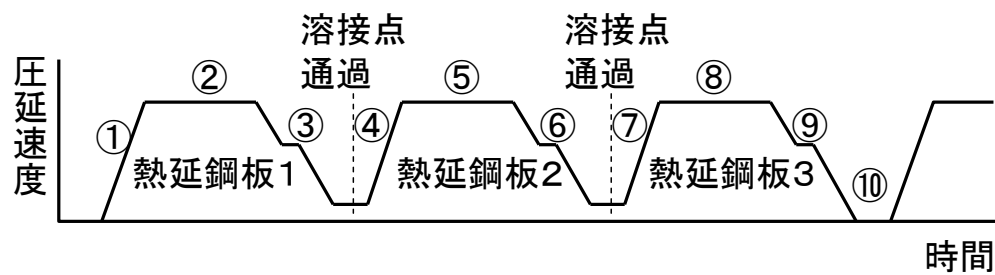
加えて、さらに効率的に鋼板を生産するため、前掲の第 2.7 図に示すように、冷間圧延の前に、酸洗工程で熱延鋼板を溶接によって連結し、その後、連続して冷間圧延を行っている。

続いて、冷間タンデム圧延機での圧延について、溶接された3つの熱延鋼板を連続して圧延し巻き取る場合を例にして、第 2.10 図を用いて詳説する。圧延速度は、第 2.10 図の上図のように設定される。



第 2.10 図(1/2) 冷間タンデム圧延機での圧延

2 冷間圧延における最適化に関する課題



第 2.10 図(2/2) 冷間タンデム圧延機での圧延

- ①において、1つめの熱延鋼板の圧延を開始し、圧延速度を増加させる。
- ②において、1つめの熱延鋼板について一定速度で圧延を行う。生産性の点からはできるだけ高速であることが望ましい。
- ③において、1つめの熱延鋼板の尾端部で減速し、減速後に溶接点を通過させる。なお、減速するのは、溶接点近傍での万一の板破断時の被害を小さくするためである。
- ④において、2つめの熱延鋼板の圧延を開始し、圧延速度を増加させる(1つめと同様)。
- ⑤において、2つめの熱延鋼板について一定速度で圧延を行う(1つめと同様)。
- ⑥において、2つめの熱延鋼板の尾端部で減速し、減速後に溶接点を通過させる(1つめと同様)。
- ⑦において、3つめの熱延鋼板の圧延を開始し、圧延速度を増加させる(1つめと同様)。
- ⑧において、3つめの熱延鋼板について一定速度で圧延を行う(1つめと同様)。
- ⑨において、3つめの熱延鋼板の尾端部で減速し、減速後に溶接点を通過させる(1つめと同様)。
- ⑩において、3つめの熱延鋼板の尾端でカットする。3つの熱延鋼板が連続に冷間圧延され、1つの冷延コイルができたことになる。

このとき、圧延状態の変化は第 2.11 図のようになる。主に、加速・減速時に板厚偏差が大きくなり、板厚の公差を外れて、オフゲージ(板厚公差外れ)となる。歩留り向上のために、このオフゲージの長さを短縮することが重要である。

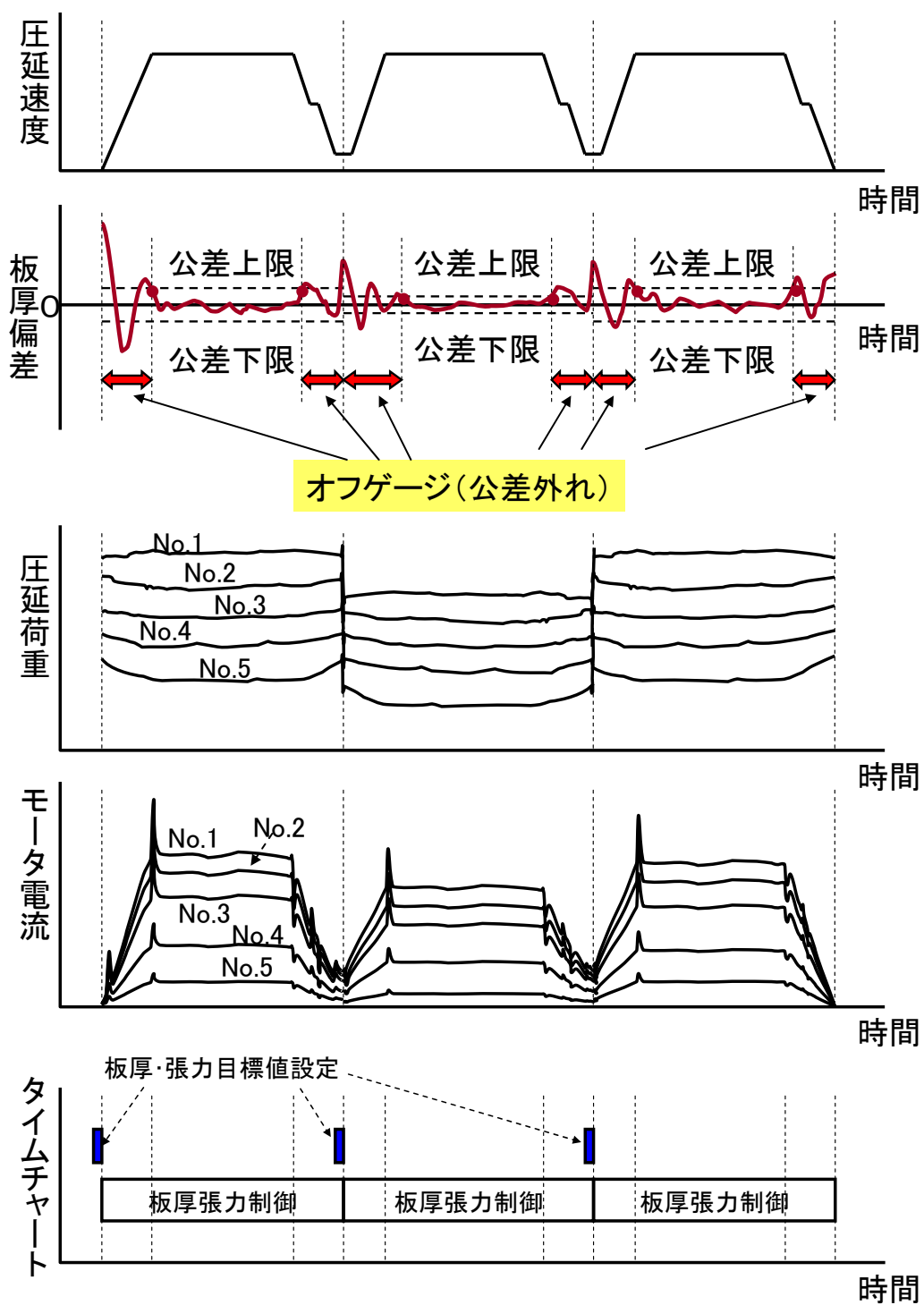
また、圧延中には、第 2.11 図に示すように圧延荷重やモータ電流が変化するが、これらの値を適正な値とすることが必要である。

なお、第 2.11 図の最下のタイムチャートについては後述する。

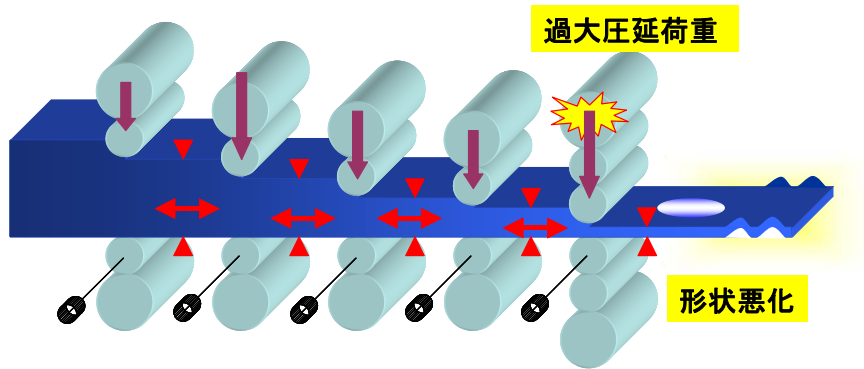
各スタンドの圧延荷重は、熱延鋼板の厚さや幅等により鋼板毎に異なり、また、圧延中にも変化する。圧延荷重が過大・過小であると第 2.12 図のような形状不良が発生する。ここで、鋼板の中央部が伸びる現象は中伸びと呼ばれ、端部が伸びる現象は耳波と呼ばれる。また、第 2.13 図に示すように、鋼板が蛇行する場合もある。そこで、形状悪化や蛇行を防止するために、圧延荷重を適切な範囲に設定・維持することが必要である。

同様に、各スタンドのモータ電流も鋼板毎に変化し、圧延中にも変化する。モータ電流には定格値があり、第 2.14 図のように定格値を一定時間超えると圧延機が停止するため、定格範囲内に維持することが必要となる。

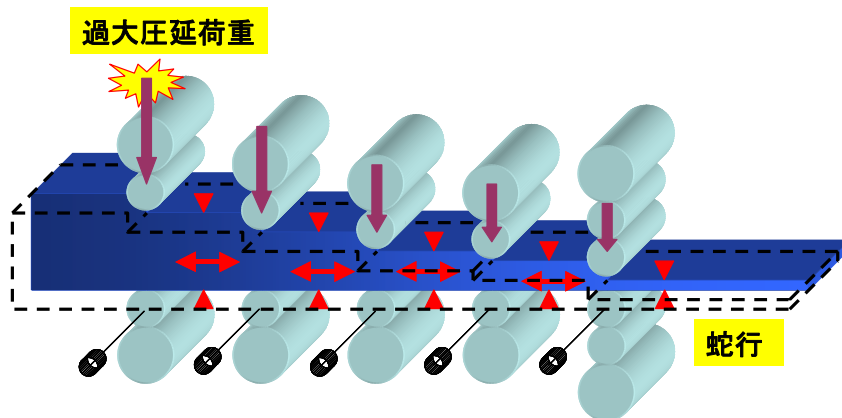
2 冷間圧延における最適化に関する課題



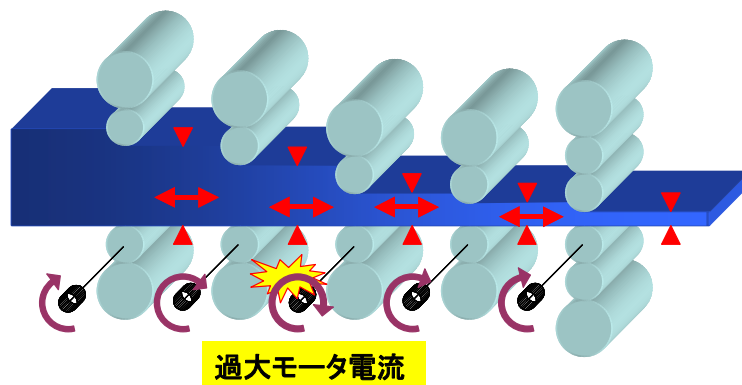
第 2.11 図 冷間圧延中の圧延状態の変化



第 2.12 図 過大圧延荷重による形状悪化



第 2.13 図 過大圧延荷重による蛇行



第 2.14 図 過大モータ電流

2 冷間圧延における最適化に関する課題

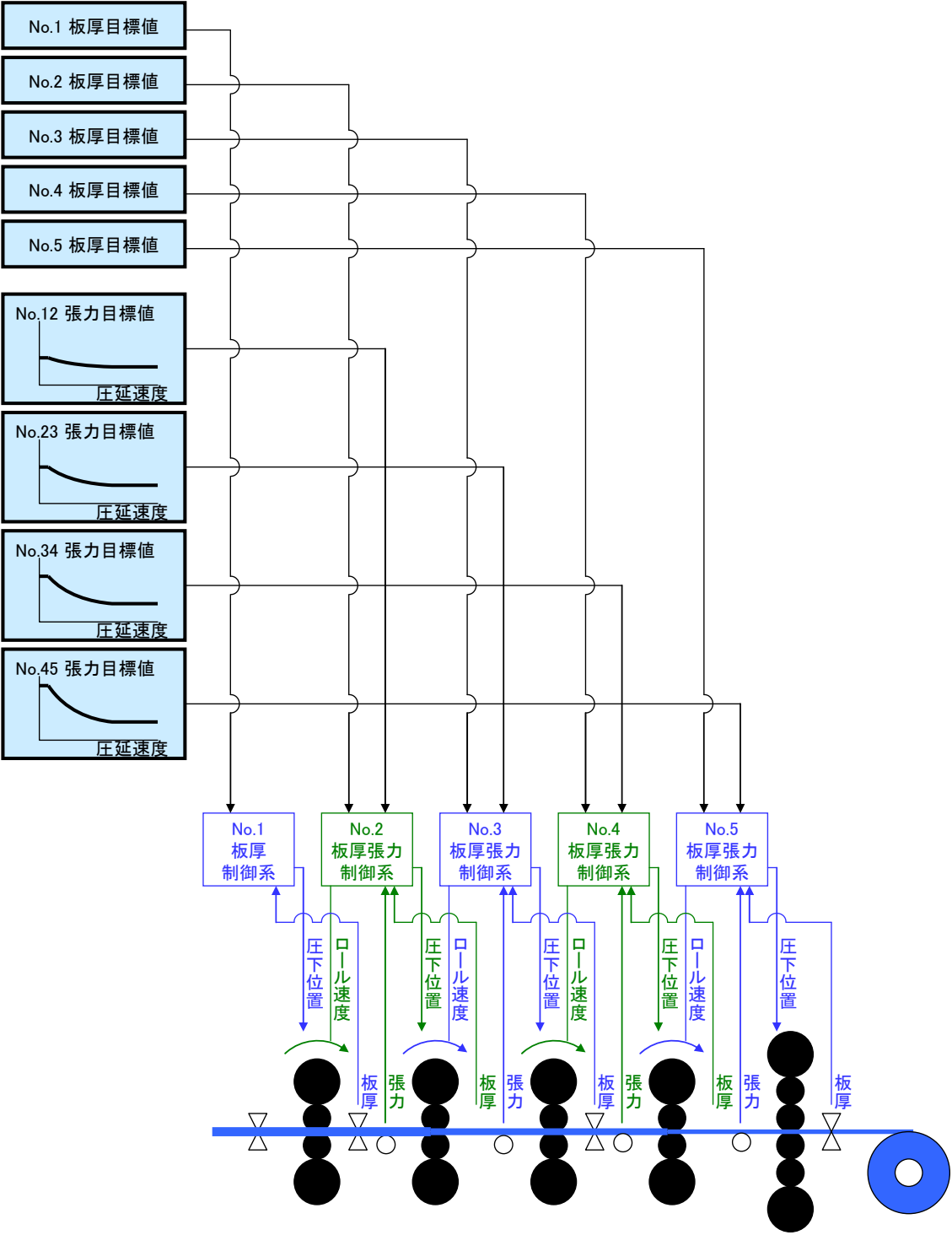
続いて、第 2.11 図の最下の制御系のタイムチャートについて説明する。冷間タンデム圧延機に設けられた板厚張力制御系は、各スタンド(No.1～No.5 スタンド)の出側板厚と、各スタンド間(No.1-No.2、No.2-No.3、No.3-No.4、No.4-No.5)の張力を制御する。なお、以下では、No.1-No.2 スタンド間張力を、No.12 張力と表記する。同様に、No.2-No.3、No.3-No.4、No.4-No.5 スタンド間張力を、No.23、No.34、No.45 張力と表記する。板厚張力制御系の板厚目標値(No.1～No.5 スタンド出側板厚目標値)と張力目標値(No.12、No.23、No.34、No.45 張力目標値)は、各熱延鋼板の圧延前に設定される。

ここで、スタンド出側の板厚目標値とスタンド間の張力目標値を適切に設定することは、上述の圧延荷重やモータ電流の適正化やオフゲージの低減のために非常に重要である。板厚や張力により、圧延荷重やモータ電流が変化するためであり、また、結果として、板厚精度に影響を与え、また、板厚張力制御の継続が困難となる場合もあり、オフゲージ長さが増加するためである。

2.2 パススケジュール

2.2.1 定義(板厚目標値と張力目標値)

板厚と張力を適切に制御するために、対象とする圧延機には、第 2.15 図に示すような板厚張力制御系が設けられている。



第 2.15 図 対象圧延機の板厚張力制御系

2 冷間圧延における最適化に関する課題

図中の No.1 板厚制御系～No.5 板厚張力制御系^{39, 40)} について説明する。

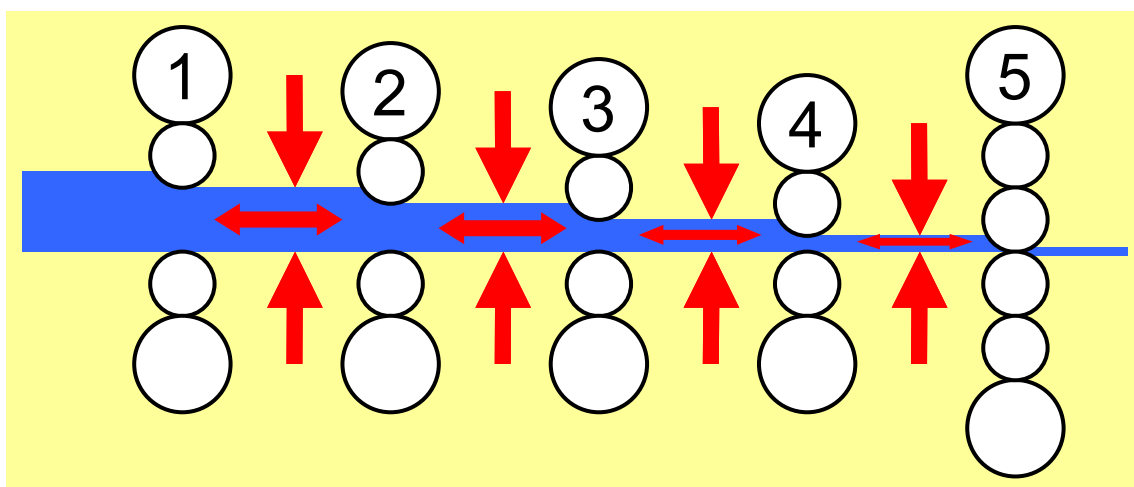
No.1 板厚制御系は、No.1 スタンドの圧下位置(ロール間隙)を操作し、No.1 スタンド出側の板厚を所定の No.1 板厚目標値に制御するものであり、1 入出力の制御器である。

No.2 板厚張力制御系は、No.2 スタンドの圧下位置と No.1 スタンドのロール速度を操作し、No.2 スタンド出側板厚を所定の No.2 板厚目標値に制御し、No.12 張力を No.12 張力目標値に制御するものであり、2 入出力の制御器である。ここで、No.2 スタンド出側板厚は、板厚、板幅、板速を乗じた体積速度(マスフロー)が一定であることを利用して求めている。No.4 スタンド出側板厚についても同様である。

No.3～No.5 板厚張力制御系は、No.2 スタンドと同様であり、例えば、No.5 板厚張力制御系は、No.5 スタンドの圧下位置と No.4 スタンドのロール速度を操作し、No.5 スタンド出側板厚を所定の No.5 板厚目標値に制御し、No.45 張力を No.45 張力目標値に制御する。なお、No.1 板厚制御系～No.5 板厚張力制御系の詳細については省略する。

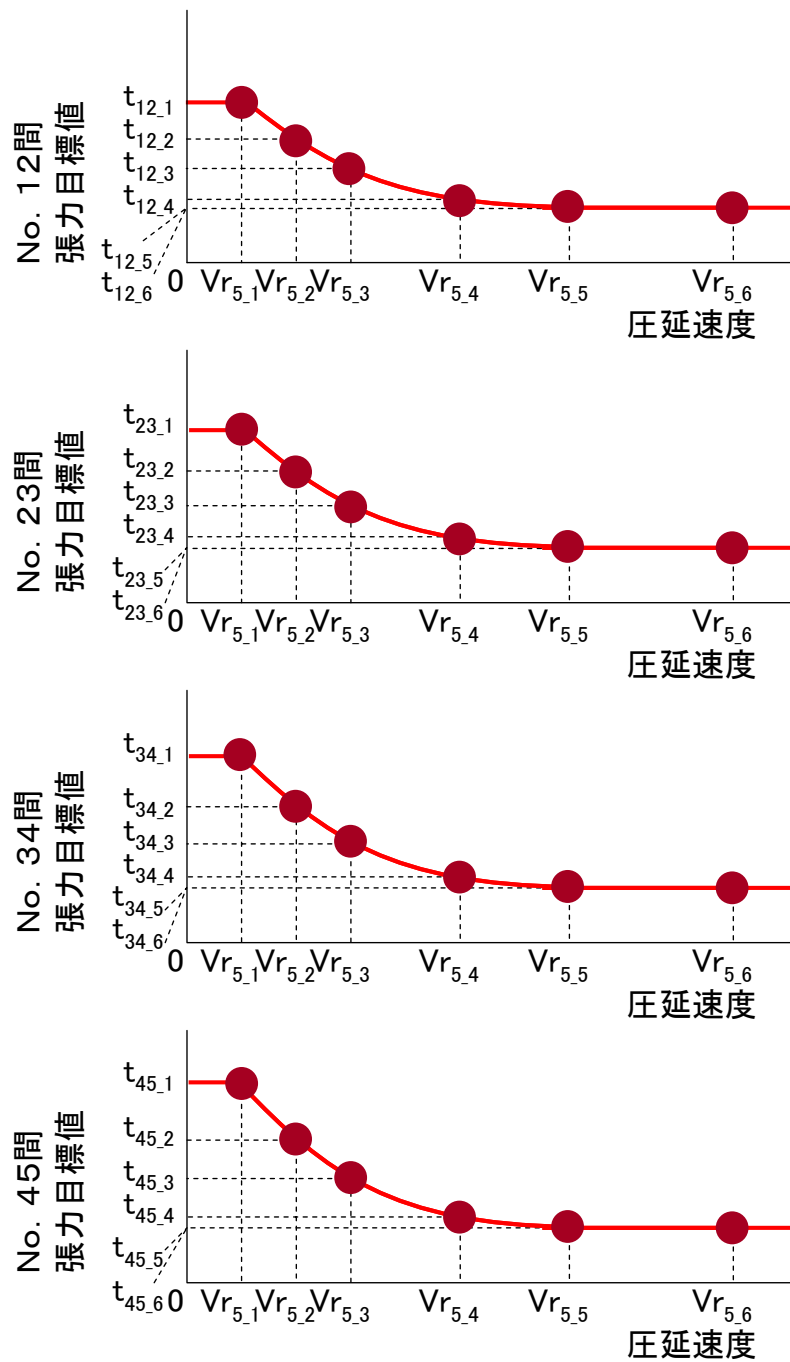
ここで、No.5 板厚目標値は最終板厚であり、同一鋼板内で一定値である。No.1～No.4 板厚目標値および No.12～No.45 張力目標値には自由度があり、変更が可能である。

本論文では、既述のように、No.1～No.4 板厚目標値と No.12～No.45 張力目標値を併せて、パススケジュールと呼ぶこととする。パススケジュールを第 2.16 図に示す。



第 2.16 図 パススケジュールの定義 [板厚目標値と張力目標値]

ここで、板厚張力制御系において、No.12～No.45 張力目標値は、圧延速度に依存した値とし、同一鋼板内で変化させている。張力目標値は、圧延開始時の低速時は大きく、加速するにつれて小さくなり、高速の定常部では所定の値となり、減速時には大きくなる(第 2.17 図)。なお、図中のカーブ上の丸印は、後述するように、パラメータテーブルに格納される張力目標値の座標である。



第 2.17 図 圧延速度に依存した張力目標値(張力カーブ)

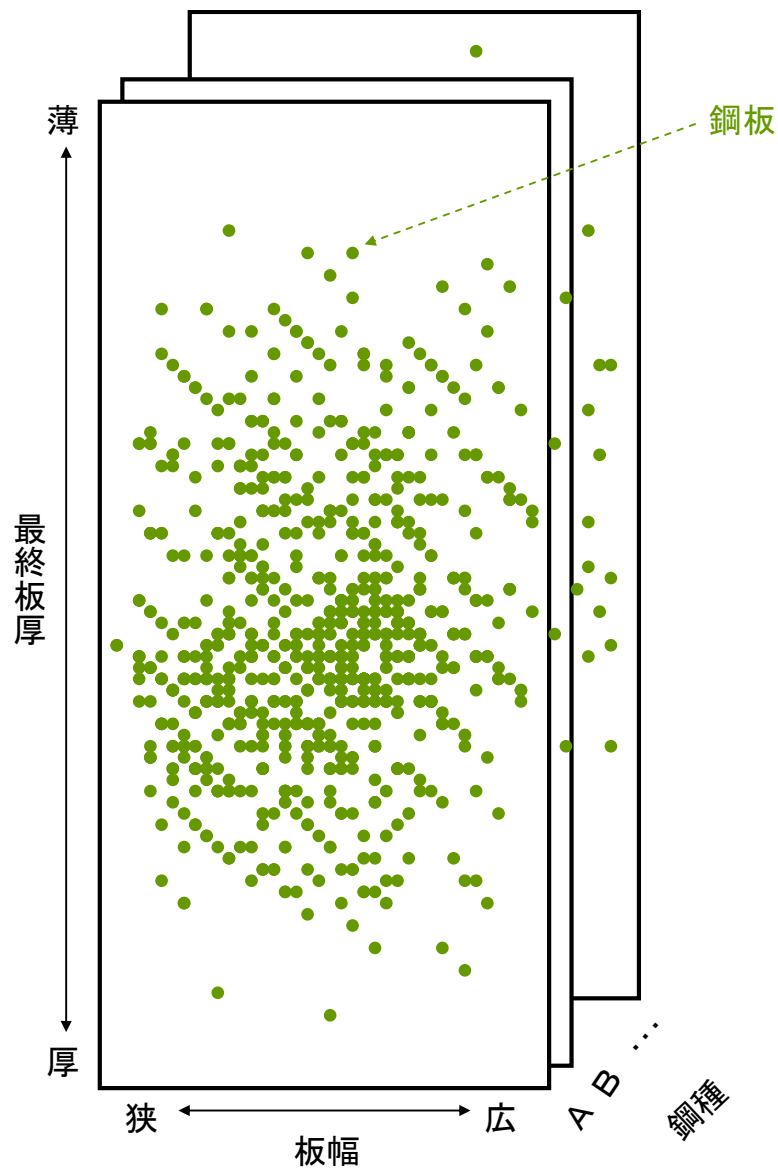
板厚目標値と張力目標値を適切に設定・制御することにより、適切な圧延荷重やモータ電流となり、板厚精度や形状が良好な鋼板の製造が可能となる。従来は回帰計算や現場での調整により目標値設定が行われていたが、制御性能向上に限界があった。そこで、板厚目標値と張力目標値(パススケジュール)を最適化手法により設定することが必要となった。

2 冷間圧延における最適化に関する課題

2.2.2 テーブル

航空機の制御器のゲイン等の制御パラメータは、テーブル化あるいは関数化され、飛行状態に応じて参照され、ゲインスケジューリング^{27, 28)}されている。

冷間圧延の制御においてもパラメータテーブルが多く用いられる。まず、冷延鋼板の仕様は需要家のニーズにより定まり、鋼種、冷間圧延後の最終板厚、板幅は、第 2.18 図に示すように広く分布している。なお、第 2.18 図の各点は1つの冷延鋼板を示す。また、鋼種は、鋼中の炭素量や添加元素量等の違いにより定められている。

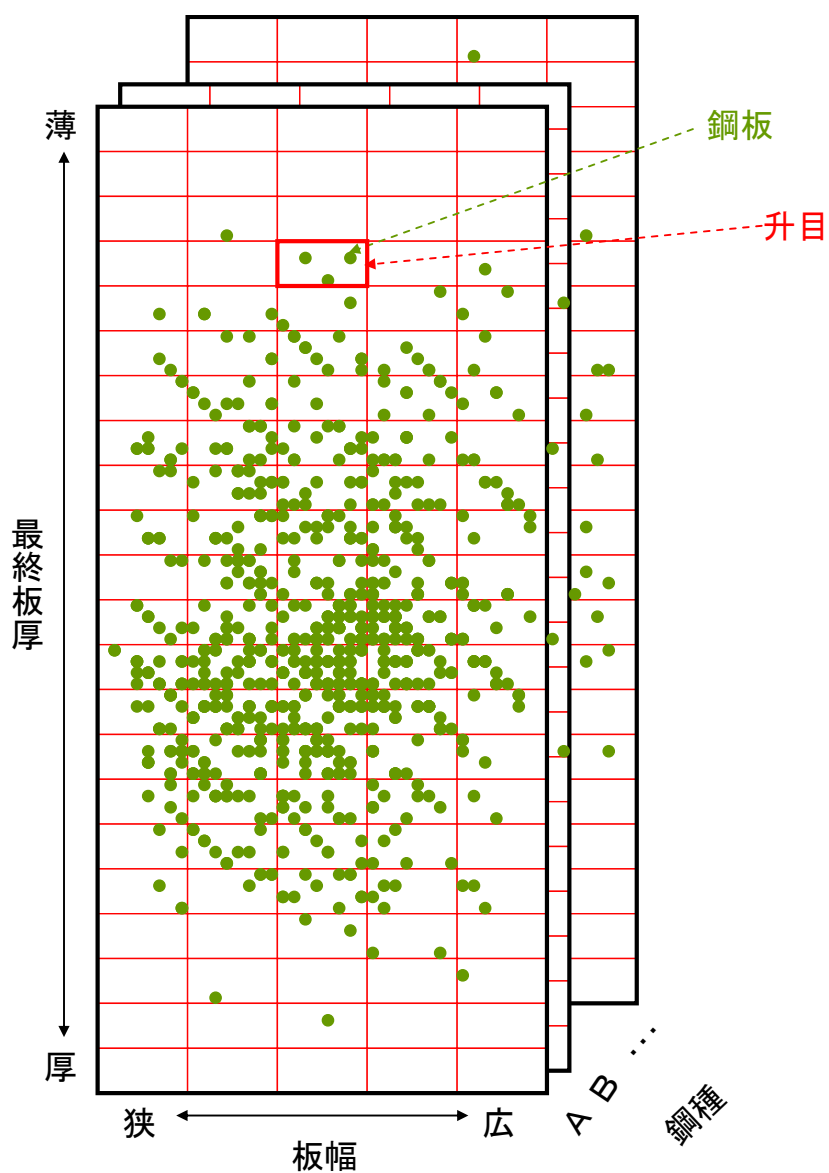


第 2.18 図 冷延鋼板の仕様の分布

冷延鋼板においては、鋼種や最終板厚等により鋼板の性質や圧延状態が大きく変化するため、すべての冷延鋼板に対して、同一のパラメータ(パススケジュール等)を用いて板厚張力制御を行うとすると、広い範囲の中での最悪値に対する設計となり制御結果が保守的となる。

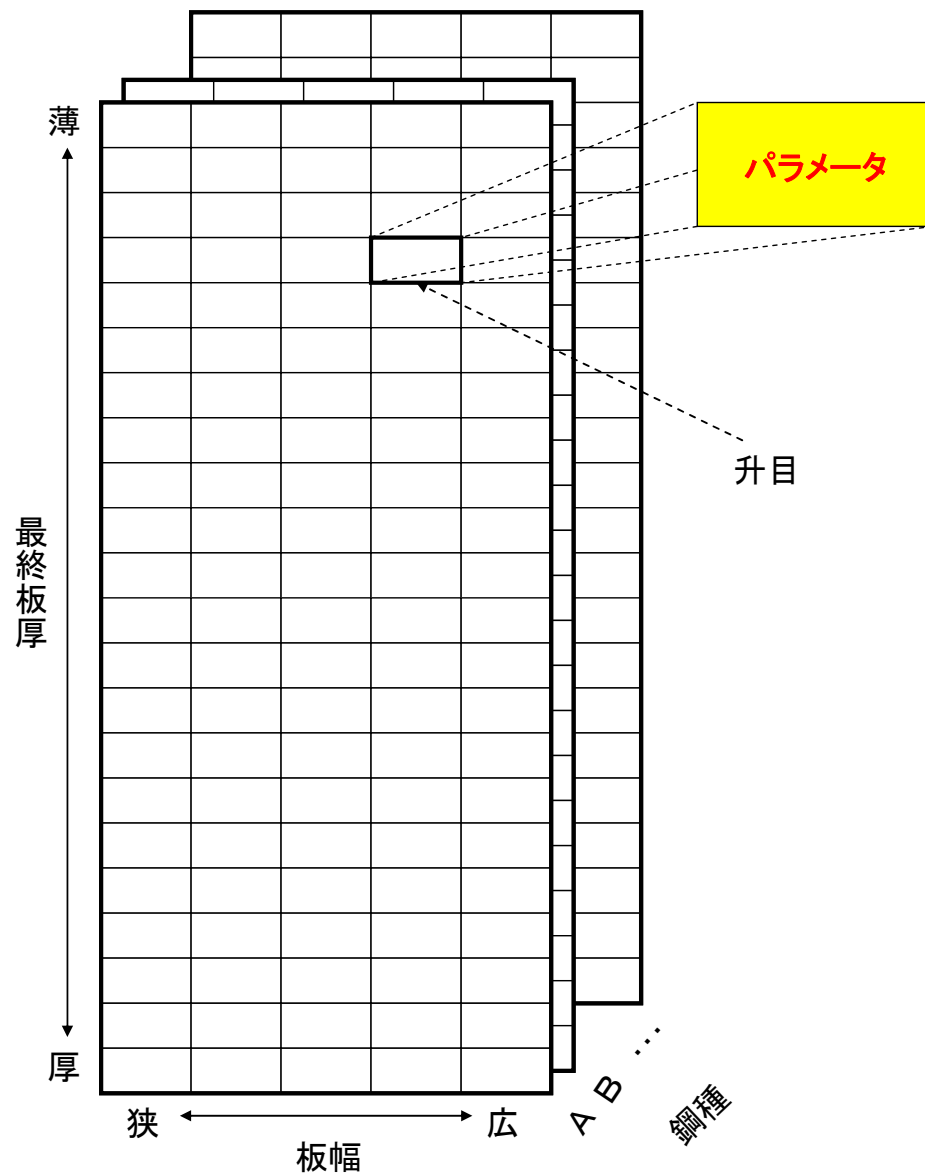
そこで、第 2.19 図に示すように、冷延鋼板の仕様に基づき、冷延鋼板(図中の点)をグループ分けすることとしている。このようにグループ分けされた小さな升目の範囲の冷延鋼板(図中の点)に対してパラメータを升目ごとに設定することにより、すべての冷延鋼板に対するパラメータより、狭い範囲の中での設計となり制御結果が良好となる。そこで、従来の手法においても狭い升目を設け、パラメータを個別に設定している。

2 冷間圧延における最適化に関する課題



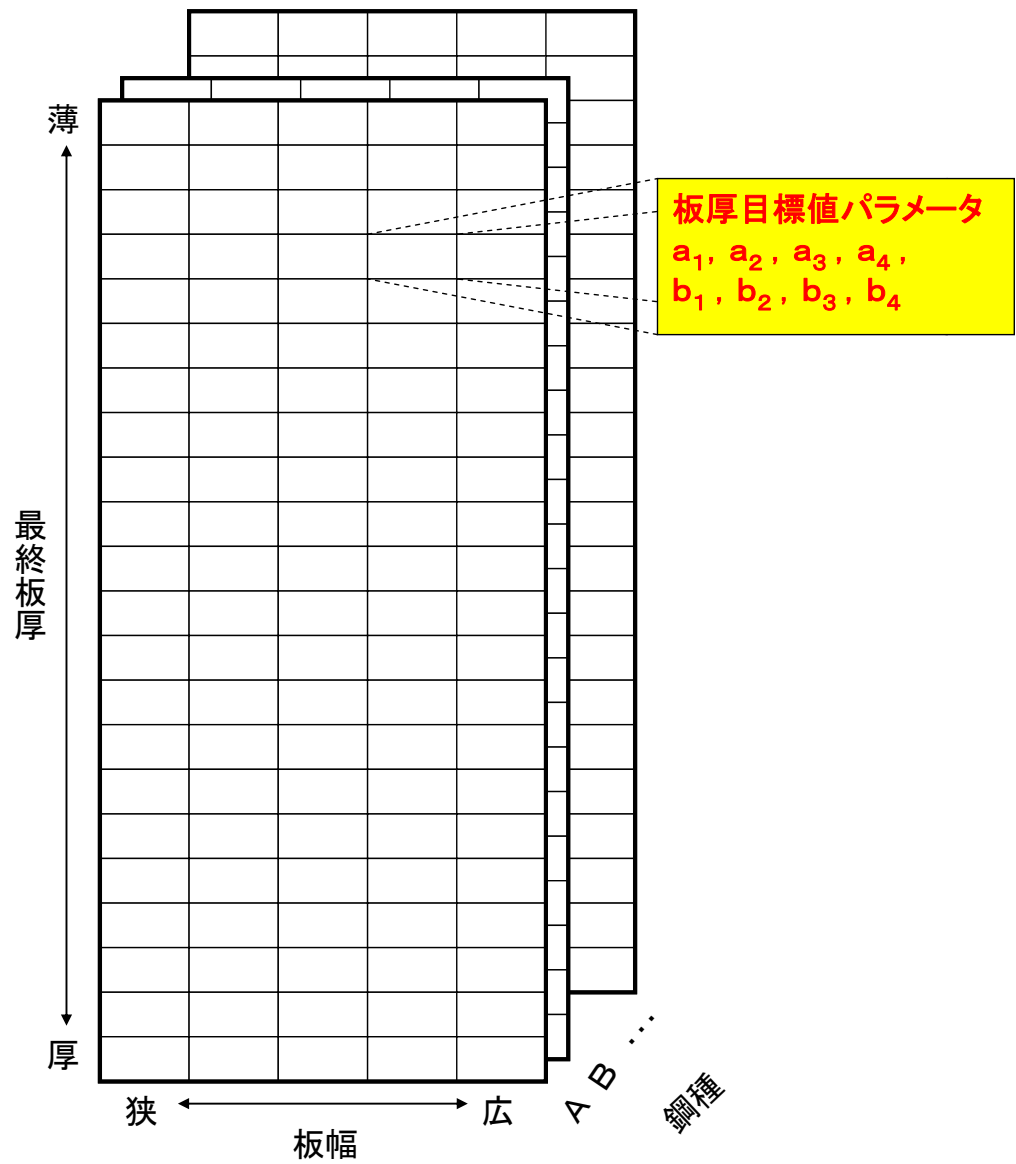
第 2.19 図 冷延鋼板の仕様に基づいたグループ分け

具体的には、第 2.20 図に示すように、冷間圧延では、鋼種、最終板厚、板幅に応じてパラメータをテーブルとして、升目ごとに格納している。そして、次に圧延する鋼板の鋼種、最終板厚、板幅に応じて対応したパラメータを選択し、制御に用いている。



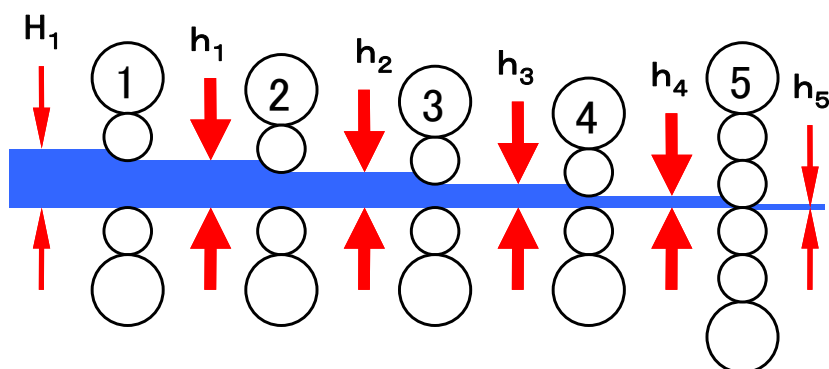
第 2.20 図 冷間圧延で用いられるパラメータテーブル

第 2.21 図に、一例として、パススケジュールのうち板厚目標値パラメータを格納したテーブルを示す。これは、第 2.22 図の No.1 板厚目標値～No.4 板厚目標値 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 に相当する値のテーブルである。このテーブルでは、鋼種、最終板厚、板幅に応じて板厚目標値のパラメータ a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 が格納されている。



第 2.21 図 板厚目標値のパラメータテーブル

このとき、No. i スタンド出側板厚 h_i を次式で計算することとしている。



第 2.22 図 No.1 スタンド入側板厚と No.i スタンド出側板厚

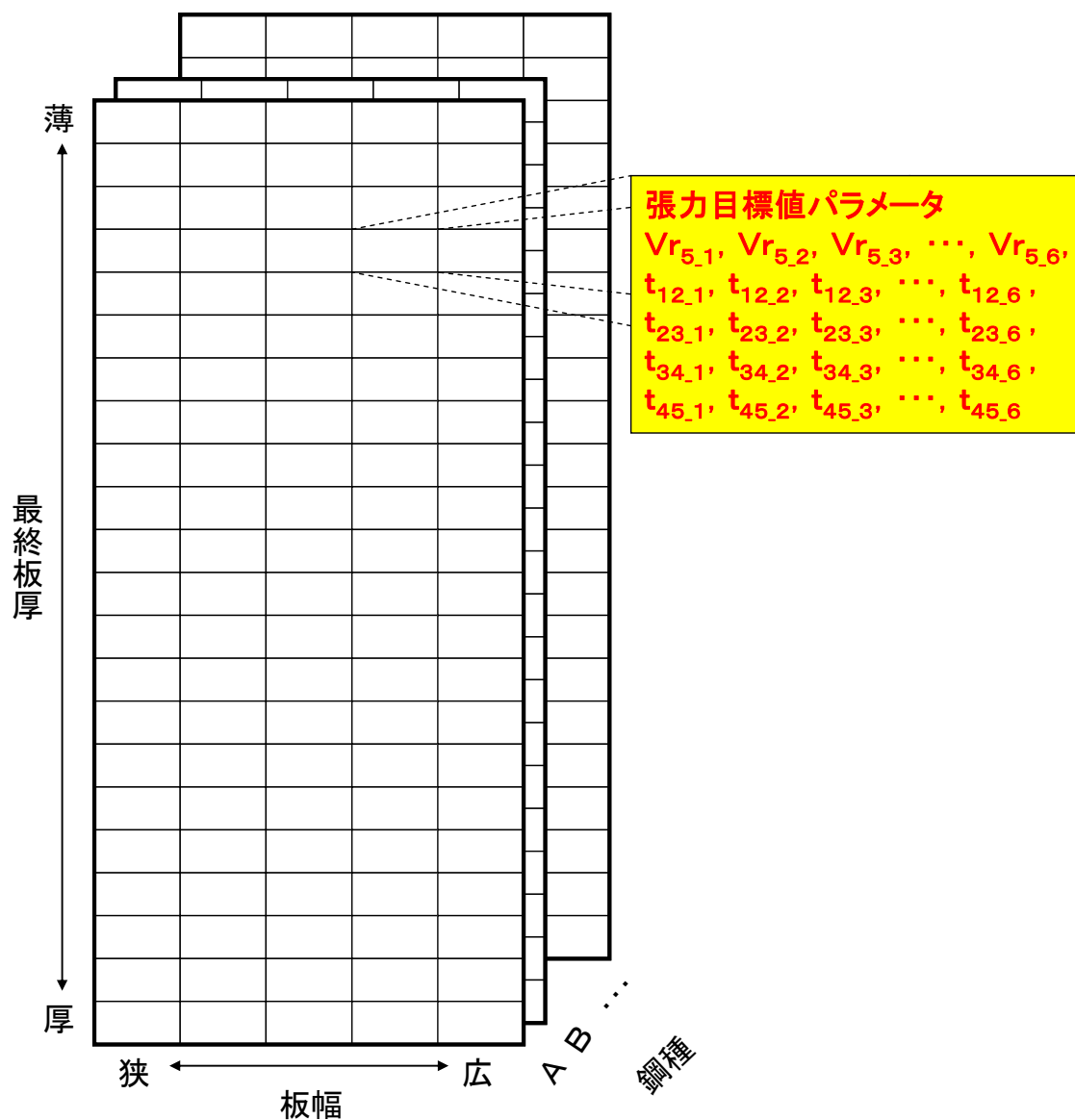
$$\ln(H_1/h_i) = a_i \cdot \ln(H_1/h_5) + b_i \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (2.1)$$

No.1 スタンド入側板厚 H_1 と No.5 スタンド出側板厚 (最終板厚) h_5 は既定であるため、パラメータ $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4$ から、スタンド出側板厚 h_1, h_2, h_3, h_4 が計算できる。

ここで、スタンド出側板厚 h_1, h_2, h_3, h_4 ではなく、パラメータ $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4$ をテーブルに格納する理由は、No.1 スタンド入側板厚や No.5 スタンド出側板厚が、鋼板ごとに異なる場合でも計算可能だからである。なお、第 3 章のパススケジュール最適化では、板厚目標値パラメータであるパラメータ $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4$ を最適化する。

第 2.23 図に、張力カーブのテーブルを示す。張力カーブとは、前掲の第 2.17 図に示すように、圧延速度に依存した No.12、No.23、No.34、No.45 張力目標値を意味する。そして、第 2.23 図の張力カーブテーブルには、張力カーブの横軸の圧延速度と縦軸の張力目標値の値が格納されることとなる。なお、第 4 章の張力カーブ最適化では、 $t_{12_1}, t_{12_2}, t_{12_3}, \dots, t_{12_5}, t_{23_1}, \dots, t_{45_5}$ のパラメータを最適化する。なお、 $t_{12_6}, t_{23_6}, t_{34_6}, t_{45_6}$ は、最大圧延速度時の張力であり、既定の値を用いるものとする。

2 冷間圧延における最適化に関する課題



第 2.23 図 張力目標値(張力カーブ)のパラメータテーブル

従来は、これらのパラメータテーブルの調整を、過去の実績データの回帰計算や、現場での経験に基づいて行っていた。しかし、この方法では、パラメータの適正化が難しく、圧延される鋼板の鋼種等の変化や圧延機の設備変更への対応が困難であった。また、高張力鋼のような硬い鋼板の場合、圧延機的能力を超えるパラメータ設定となる場合もあった。

2.3 圧延モデル

従来、冷間圧延では、圧延モデルについての基本的な式が、参考文献 41) で得られており、圧延荷重等の圧延変数の計算、圧延特性の評価、シミュレーション等に用いられている。

パススケジュールの最適化においても、この圧延モデル式を利用することとした。

参考文献 41) に倣い、圧延モデルを静的モデルと動的モデルの順に、以下に示す。

まず、記号を次のようにおく。なお、添え字の i は、スタンド番号を表わす。

- v_i : スタンド出側板速
- h_i : スタンド出側板厚
- H_i : スタンド入側板厚
- w : 鋼板幅
- U : 体積速度
- v_{ri} : ロール速度
- f_i : 先進率 ($f_i = (v_i - v_{ri})/v_{ri}$)
- s_i : 压下位置
- P_i : 圧延荷重
- M_i : ミル定数
- Q_i : 塑性係数 ($Q_i = -\partial P_i / \partial h_i$)
- R_i : ロール半径
- N_i : ロール速度設定値
- G_i : モータ電流
- q_{fi} : スタンド出側張力
- q_{bi} : スタンド入側張力
- μ_i : 摩擦係数
- k_i : 変形抵抗

このとき、静的モデルでは、体積速度一定の条件が満たされるとして、次の式が成り立つ。

●体積速度一定の式

$$v_i \cdot h_i \cdot w = U \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (2.2)$$

●スタンド出側板速の式

$$v_i = (1 + f_i) \cdot v_{ri} \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (2.3)$$

●スタンド出側板厚の式

2 冷間圧延における最適化に関する課題

$$h_i = s_i + P_i / M_i \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (2.4)$$

●先進率の式

$$f_i = f_i(H_1, H_i, h_i, q_{fi}, q_{bi}, \mu_i, k_i) \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (2.5)$$

具体的には、先進率の式は、Bland&Ford の解法により、参考文献 41) p.34 (2.174)式、p.9 (2.19)式、p.34 (2.175)式、および、参考文献 41) p.40(2.230)式の偏平ロール径 R'_i の式より、次のように得られる。

$$H_{ni} = \sqrt{\frac{R'_i}{h_i}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{H_i - h_i}{h_i}} \right) - \frac{1}{2\mu_i} \ln \left(\frac{H_i}{h_i} \frac{1 - q_{fi}/k_i}{1 - q_{bi}/k_i} \right) \quad (2.6)$$

$$R'_i = \left(1 + \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E} \frac{P_i}{w(H_i - h_i)} \right) \cdot R_i \quad (2.7)$$

$$f_i = \tan^2 \left(\frac{H_{ni}}{2} \sqrt{\frac{h_i}{R'_i}} \right) \quad (2.8)$$

●圧延荷重の式

$$P_i = P_i(H_1, H_i, h_i, q_{fi}, q_{bi}, \mu_i, k_i, w) \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (2.9)$$

具体的には、圧延荷重の式は、Hill の式より、次の手順で得られる。
参考文献 41) p.35 (2.185)式、p.7 (2.8)(2.10)(2.11)式より、

$$Qr_i = 1.08 + 1.79r_i\mu_i \sqrt{\frac{R'_i}{H_i}} - 1.02r_i \quad (2.10)$$

また、参考文献 41) p.36 (2.193)式より、

$$k'_i = k_i - q_{bi} - \frac{\phi_{ni}}{\phi_{li}} (q_{fi} - q_{bi}) \quad (2.11)$$

ここで、 ϕ_{ni}/ϕ_{li} は、参考文献 41) p.36 にあるように、例えば、 $\phi_{ni}/\phi_{li} = 1/2$ とすればよい。

投影接触長と呼ばれるロールと鋼板の接触面の長さ l は、参考文献 41) p.7 (2.10)式より、

$$l_i = \sqrt{(H_i - h_i)/R'_i} \quad (2.12)$$

このときの単位幅の圧延荷重は、参考文献 41) p.19(2.97)式、(2.10)、(2.11)、(2.12)式より、

$$p'_i = Qr_i \cdot k'_i \cdot l_i \quad (2.13)$$

また、弾性圧下域の圧延荷重への寄与分は、参考文献 41) p.42(2.246)式より、

$$p''_i = \frac{1-\nu^2}{4E} H_i \sqrt{\frac{R'_i}{H_i - h_i}} (k_i - q_{bi})^2 \quad (2.14)$$

さらに、弾性復元域の圧延荷重への寄与分は、参考文献 41) p.42(2.245)式より、

$$p'''_i = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1-\nu^2}{E}} R'_i h_i (k_i - q_{fi})^3 \quad (2.15)$$

(2.13)、(2.14)、(2.15)式を用いて、圧延荷重は次式で与えられる。

$$P_i = (p'_i + p''_i + p'''_i)w \quad (2.16)$$

●モータ電流の式

$$G_i = G_i(H_1, H_i, h_i, q_{fi}, q_{bi}, \mu_i, k_i, w) \quad (i=1, 2, \dots, 5) \quad (2.17)$$

具体的には、モータ電流は次の手順で得られる。まず、トルク式を求める。

参考文献 41) p.35 (2.186)式より(または、参考文献42) p.195 より、)、

$$H_{Gi} = 1.05 + (0.07 + 1.32r_i)\mu_i \sqrt{\frac{R'_i}{H_i}} - 0.85r_i \quad (2.18)$$

このときのトルクは、参考文献 41) p.20 (2.104)式より、次のように得られる。

$$G'_i = wR_i(k_i(H_i - h_i)H_{Gi} + (H_i q_{bi} + h_i q_{fi})) \quad (2.19)$$

直流モータの場合、電流はトルクに比例するので、 K_{Ti} をトルク定数とすると(減速機の減速比も含めるものとする。)、電流は次式で得られる。

$$G_i = G'_i / K_{Ti} \quad (2.20)$$

また、変形抵抗・摩擦の式は次のように表わされたとする。

2 冷間圧延における最適化に関する課題

●変形抵抗の式

$$k_i = k_i(H_1, H_i, h_i, v_i) \quad (i=1, 2, \dots, 5) \quad (2.21)$$

具体的には、変形抵抗は次の手順で得られる。参考文献 41) p.186 (7.46)式より、ひずみを ε_i として、

$$k_{sti} = C_i \cdot \varepsilon_i^{n_i} \quad (2.22)$$

で表わされる。ここで、 C_i 、 n_i は、参考文献 41) p.187 に述べられているように、鋼種、成分、結晶粒径などの関数としてあらかじめ調査して与えておく。

次に、ひずみ速度は、参考文献 41) p.11 (2.44)式より、次式のように得られる。

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{v_{Ri}}{\sqrt{R'_i \cdot h_{li}}} \frac{1}{\sqrt{r_i}} \ln \frac{1}{1-r_i} \quad (2.23)$$

このとき、動的変形抵抗は、参考文献 41) p.188 (7.51)式より、次のように得られる。

$$k_i = k_{sti} + e^{6.5} (\dot{\varepsilon}_i / \dot{\varepsilon}_0)^{\frac{KT_i}{0.14}} \quad (2.24)$$

ここで、 K は、ボルツマン定数、 T_i は鋼板の絶対温度である。多スタンド圧延の場合、 T_i は、参考文献 41) p.159 に述べられているような履歴となる。あらかじめ調査して求めておくものとする。

●摩擦の式

$$\mu_i = \mu_i(v_i) \quad (i=1, 2, \dots, 5) \quad (2.25)$$

具体的には、参考文献 41) p.207 図 8.17 に示されるように、摩擦係数は圧延速度に依存することが知られている。摩擦係数と圧延速度の関係は、あらかじめ調査して求めておくものとする。

次に、動的モデルを示す。動的モデルの場合には、静的モデルの場合と異なり、(2.2)式の圧延機全体での体積速度一定の式は成り立たない。記号を次のようにおく。

$v_{out,i}$: スタンド出側板速(静的モデルの場合の v_i に相当する。)

$v_{in,i}$: スタンド入側板速

b_i : 後進率 ($b_i = (v_{ri} - v_{in,i}) / v_{ri}$)

E : ヤング率

L : スタンド間距離

動的モデルの場合にも、スタンド前後の体積速度一定則 $v_{in,i} \cdot H_i = v_{out,i} \cdot h_i$ が成り立つことから、後進率は次のように得られる。

●後進率の式

$$b_i = (1 + f_i) \cdot h_i / H_i - 1 \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (2.26)$$

一方、スタンド出側板厚の式、先進率の式、圧延荷重の式、モータ電流の式、変形抵抗の式、摩擦の式は、静的モデルの場合と同じである。

また、(2.3)式のスタンド出側板速の式は次式で置き換えられる。

●材料速度式

$$v_{out,i} = (1 + f_i) \cdot v_{ri} \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (2.27)$$

$$v_{in,i} = (1 + b_i) \cdot v_{ri} \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (2.28)$$

さらに、スタンド間張力の式は、次式で得られる。

●張力の式

$$q_{fi} = E/L \int (v_{in,i+1} - v_{out,i}) dt \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (2.29)$$

$$q_{bi+1} = h_i / H_{i+1} \cdot q_{fi} \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (2.30)$$

また、鋼板の移送の式は次式となる。

●材料の移送の式

$$\Delta x_i = v_{out,i} \cdot \Delta t_i \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (2.31)$$

これらのモデル式を次章以降のパススケジュールの設定値の最適化やパススケジュールを変更する最適制御系の設計に用いる。

冷間タンデム圧延機の板厚張力制御の操作量は、各スタンドの压下位置、ロール速度であり、状態量は、板厚、スタンド間張力、板速度、圧延荷重、モータ電流等となっており、冷間タンデム圧延機のモデルは、多入出力の非線形な系となっている。これは、多入出力の非線形な系である航空機のモデルと同様である。

ここで、モデル式の誤差が最適化の際の問題となる。変形抵抗((2.21)式)や摩擦係数((2.25)式)は、原板の硬さやロール表面の粗さ等の影響を受けるため、鋼板によって、あるいは、圧延条

2 冷間圧延における最適化に関する課題

件によって、誤差を含む。このため、変形抵抗値や摩擦係数値に依存する圧延荷重((2.9)式)やモータ電流((2.17)式)の値も誤差を含み、鋼板ごとのばらつきを生じることとなる。また、同一の鋼板であっても、圧延中に圧延荷重やモータ電流が変化することとなる。

2.4 最適化に関する課題と提案手法概要

これまでの第 2.1～2.3 節を踏まえて、本節では、冷間圧延のパススケジュールを最適化するに際しての課題を抽出する。

パススケジュールは、第 2.2 節の説明のように、パラメータテーブルに格納されている。従来は、これらのパラメータテーブルの調整を、過去の実績データの回帰計算や、現場での経験に基づいて行っており、新鋼種対応等に限界があり、数理的なパススケジュール設計が望まれている。

また、特にテーブルの外縁部分の升目は過去のデータがないことが多く、外挿が必要となり、パラメータの決定が難しい。そこで、過去のデータがないテーブルの升目があっても、すべてのテーブルの升目のパラメータを設計する方法が望まれている。

さらに、同一の升目の中の鋼板であっても、板幅や板厚等の仕様が異なることから、仕様のばらつきも考慮したパラメータ決定、すなわち、パススケジュール設計が必要である。

次に、設定値最適化や最適制御系設計に用いる圧延モデルは、第 2.3 節のように得られている。

ここで、圧延モデルには、変形抵抗や摩擦等の誤差が存在し、計算される圧延荷重やモータ電流には、鋼板ごとのばらつきが生じる。パススケジュール設計の際には、このばらつきを考慮する必要がある。

また、圧延中に圧延荷重やモータ電流が圧延モデルによる計算値と異なる値に変化することもあり、この場合は圧延中にパススケジュールを変更する制御により、圧延荷重やモータ電流を適切な値に維持する必要がある。

以上の課題に対して、次の3つの手法を提案し、概要を説明する。

2.4.1 過去データを確率分布として利用した機会制約条件計画問題

既述の確率計画法¹⁹⁾や最適信頼性設計²⁴⁾においては、変数が所定の確率分布に従うものとして、制約条件を満たす確率を所定の値以上としながら最適化するが、その際に、数学的に扱いが容易な正規分布等の確率分布を仮定して最適化を行うことが多い。

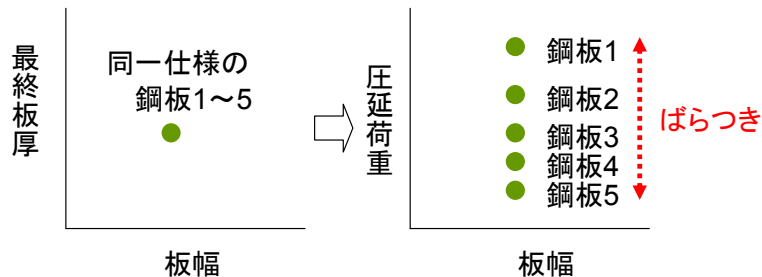
しかし、確率分布自体の仮定が困難な場合や、数学的に扱いやすい分布とならない場合がある。例えば、計測不可能な値の確率分布や、データ数の少ない場合の確率分布を求めることは難しく、また、ピークが複数ある分布となる場合もある。

そこで、本論文では、過去のデータと最適化対象のモデルを用い、確率分布の仮定を不要とした最適化の一手法を提案する。

以下に、圧延のパススケジュールのうち板厚目標値の最適化の場合を概説する。

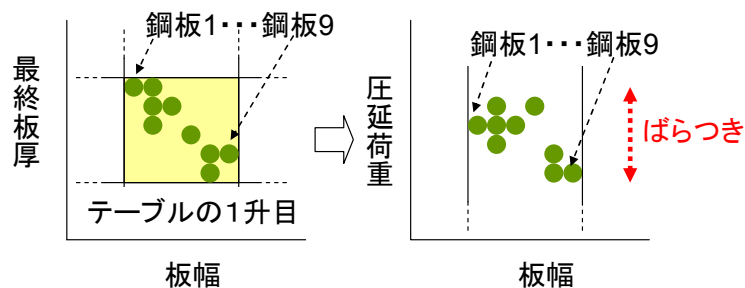
冷間圧延において、確率分布、すなわち、ばらつきを有する要因としては、主に2種類ある。

1つめは鋼板の硬さ(変形抵抗)や圧延状態(摩擦係数等)にばらつきが存在することである。例えば、第 2.24 図に示すように、板厚や板幅が同じ仕様の鋼板を冷間圧延する場合であっても、圧延中の圧延荷重が異なる場合がある。これは、冷間圧延される前の鋼板の硬さにばらつきがあり、また、冷間圧延時の鋼板とロール間の摩擦係数にばらつきがあるからである。鋼板の硬さは、冷間圧延前までの材質や工程のばらつきにより一定ではない。また、鋼板とロール間の摩擦係数は、鋼板・ロールの表面粗さや潤滑油等の条件に依存する。



第 2.24 図 圧延条件によるばらつきの例

2つめは、パラメータテーブルを利用することによるばらつきである。パススケジュールについて、第 2.20 図のようなパラメータテーブルを利用するとき、複数の鋼板の鋼種、最終板厚、板幅が同一の升目に含まれる場合、同一のパラメータにより圧延されることとなる。このとき、既述のように、同一の升目の鋼種、最終板厚、板幅の範囲は、全冷延鋼板の鋼種、最終板厚、板幅の範囲より小さく、小さな範囲に対する冷延鋼板に対してパラメータを設定すればよいので、制御性能が向上している。さらに制御性能を向上させようとする、同一の升目内の、最終板厚や板幅のばらつきを考慮する必要がある。例えば、第 2.25 図に示すように、同一の升目に含まれる仕様の鋼板を冷間圧延する場合、圧延荷重にはばらつきが生じる。



第 2.25 図 パラメータテーブルを利用することによるばらつきの例

2 冷間圧延における最適化に関する課題

このため、本論文では、冷間圧延では過去のデータが蓄積されていることを利用して、過去のデータを用い、かつ、圧延モデルを鋼板ごとに補正することにより、確率分布の仮定を不要とし、複数のピークを有するような分布にも対応可能とする。さらに、各制約条件の確率を個別に緩和することで、制約の優先順位付けを可能とする。

本論文では、第3章において、パススケジュール〔板厚目標値〕の最適化を詳説する。

2.4.2 制御パラメータのテーブルの段階的な最適化

最適化の分野においては、近年の航空機の設計のように構造、制御、流体等の複数の領域で最適化を行う複合領域の最適化問題等において、段階的な最適化が行われている。これにより、解の収束性改善や計算時間の短縮が可能となっている。また、応答曲面法のように最適化の途中で近似関数を利用する方法がある。

一方、テーブル化されている制御パラメータを最適化する場合、各升目のパラメータが制約条件を満たし最適化されていることが必要である。さらに、テーブル内の隣接する升目において制御応答が大きく異なることは望ましくないことから、隣接する升目のパラメータ変化が小さい必要がある。また、データの不足等により、一部の升目のパラメータが得られない場合もある。

しかし、このようなテーブル化されている制御パラメータの最適化の例は少なく、実用的な最適化方法の確立が望まれている。

そこで、本論文では、各升目のパラメータを最適化する第1段階と、升目全体のテーブルを最適化する第2段階の2段階とした最適化の一手法を提案する。まず、1段階目として、過去のデータがある各升目において、共通の評価関数と制約条件を用いて、パラメータを最適化する。そして、1段階目の最適化結果に基づき、升目全体のテーブルでのパラメータの近似関数を求める。このとき、過去のデータがない升目のパラメータを、近似関数により求める。次に、このテーブル全体の評価関数や制約条件を設けて、2段階目の最適化を行う。ここで、多段階の最適化の手法としては、モデル調整法³⁰⁾の考え方を採用し、2段階目の最適化で1段階目の評価関数の重みを調整する。

以下に、加減速時の張力目標値の最適化の場合を概説する。テーブル化されているパラメータは、張力目標値と圧延速度の関係である張力カーブである。具体的には、第2.17図のような張力カーブのパラメータが、第2.23図のようにテーブルとして格納されている。この張力カーブテーブルを段階化により最適化する。

本論文では、第4章において、パススケジュール〔張力目標値〕の最適化を詳説する。

2.4.3 圧延機での多変数カスケード最適制御

航空機においては、位置や姿勢を制御するフライトコントロールの上位系として、飛行経路を制御⁷⁾するフライトマネジメントシステム⁸⁾が設けられている。

一方、制御系の構成としてカスケード制御系がある。メジャーループとマイナーループを設け、多重ループの制御系を構成する制御系である。多くの場合、1入出力系のカスケード制御系である。例えば、モータの速度ループ(メジャーループ)の内側に電流ループ(マイナーループ)を設ける場合のように、1入出力系のメジャーループの速応性や外乱抑制等の制御性の向上を目的として、メジャーループの内側に、1入出力系のマイナーループを設けている。

しかし、これらのカスケード制御の場合、外側のループは、1入出力の制御器の組み合わせが多く、多変数制御系として統一的に設計した例は少ない。

そこで、本論文では、多変数制御のマイナーループが存在する場合に、上位系として多変数制御のメジャーループを設け、多変数のカスケード制御を構成する。メジャーループの多変数制御系設計には、最適制御の一手法であるILQ設計法^{43,44,45)}を用いる。ILQ設計法を用いることで制御則のオンライン計算が可能となる。また、多変数制御とすることで、マイナーループでは制御しない複数の状態量をバランスよく制御することができる。ここで、「バランスよく」とは、一部の状態量が過大、過小とならないように他の状態量も調整するように制御することを意図している。

以下に、多変数のカスケード制御の具体例である冷間圧延のミルバランス制御について概説する。

冷間圧延において、板厚張力制御系は複数のスタンド出側板厚とスタンド間張力を制御する多変数制御系であるが、スタンドの圧延荷重とモータ電流は制御しない。このため、圧延荷重が過大または過小となると、鋼板の形状が悪化する場合がある。また、一部のスタンドのモータ電流が定格値を超えると圧延速度を増加できず、生産性の上限となる場合がある。ここで、これらの圧延荷重やモータ電流のスタンドごとの分布は「ミルバランス」と呼ばれ、適切な値に保持することが重要である。そこで、マイナーループとなる板厚張力制御系の外側に、スタンドの圧延荷重とモータ電流を制御する新たなメジャーループを設ける。なお、外側のメジャーループの操作量は、内側のマイナーループの板厚張力制御系の目標値である目標板厚と目標張力、すなわち、パススケジュールの値となる。

5スタンド圧延機の場合、圧延荷重が5つあり、モータ電流も5つある。これらの圧延荷重とモータ電流を制御する新たな制御系を構成する。操作量は、No.1～No.4 スタンド出側板厚目標値とNo.12～No.45 スタンド間張力の合計8つとし、制御量は、隣接するスタンドでの圧延荷重差とモータ電流差の合計8つとする。この場合、圧延荷重やモータ電流そのものは制御しないが、差を制御することとなる。利点として、例えば、徐々に硬くなる鋼板を圧延するときに、特定スタンドの圧延荷重だけが過大になることなく、全スタンドの荷重が許容できる範囲で増加するような制御を実現できる。すなわち、外乱を全スタンドに分散できるという利点がある。

ここで、付加する新たな制御系は、8入力8出力であり、板厚張力制御系の上位系となり、カスケ

2 冷間圧延における最適化に関する課題

ード制御系を構成する。制御系の安定性の保証、設計・実装・調整の容易さを考慮し、制御則として上述の最適制御の一手法であるILQ設計法を用いることとする。この際に、圧延機の動特性モデルとして、カスケード制御に十分な低次元モデルを採用している。さらに、フィードフォワード補償を付加することにより2自由度制御系を構成する。

本論文では、第 5 章において、ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）を詳説する。

2.5 本章のまとめ

本章では、冷間圧延における最適化に関する課題について、冷間圧延、パススケジュール、圧延モデル、最適化に関する課題と提案手法概要 を説明した。課題に対する提案手法として、過去データを確率分布として利用した機会制約条件計画問題、制御パラメータのテーブルの段階的な最適化、圧延機での多変数カスケード最適制御 の3つのテーマを扱う。第 3～5 章において、各テーマについて詳説する。

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化

3.1 緒言

鉄鋼プロセスにおける冷間タンデム圧延機(TCM: Tandem Cold Mill)は、熱間圧延された鋼板を、複数のスタンドに設置されたロールで所定の最終板厚まで連続的に冷間圧延し、表面品質の良好な鋼板を製造する設備である。

本論文では、最終スタンド以外の各スタンド出側の板厚目標値とスタンド間張力目標値をパススケジュールと呼んでいる。このパススケジュールの値は圧延前に設定され、圧延中には、パススケジュールを維持するように、板厚張力制御系が制御を行う。

生産性や鋼板の板厚精度・品質を確保するためには、パススケジュールを適切に設定することが重要である。パススケジュールが不適切であると、一部のスタンドでの圧延荷重が過大または過小となり、鋼板の蛇行や形状不良を生じ得る。また、圧延機のモータ電流が過電流となり、最悪の場合には圧延停止となり得る。さらに、パススケジュールは板厚制御系の目標値であるため、不適切なパススケジュールは、板厚のオフゲージ長さの増加となる。このため、パススケジュールの適正化が必要である。

一方、近年、自動車の軽量化に必要な高強度の高張力鋼板の製造が増加している。高張力鋼板は、圧延が難しく、圧延設備の性能の限界近くで圧延する場合が増えている。このため、圧延時の鋼板の性質や圧延状態のばらつきを無視できなくなってきた。

そこで、圧延荷重、モータ電流等を適正化するパススケジュール設計問題を、機会制約条件計画問題として扱い、過去の実績圧延入出力データと圧延モデルを用いることで、変数の確率分布を仮定することなく、ばらつきを考慮したパススケジュール設計を可能とした。シグモイド関数で制約条件を近似し、逐次2次計画法(SQP)^{46,47)}による求解を可能とし、さらに、各制約条件の確率を個別に緩和することで、制約の優先順位付けを可能とした。高張力鋼のパススケジュール設計に本手法を適用し、実機での適用により、板厚公差外れ長さ低減効果・生産性向上効果を確認した。

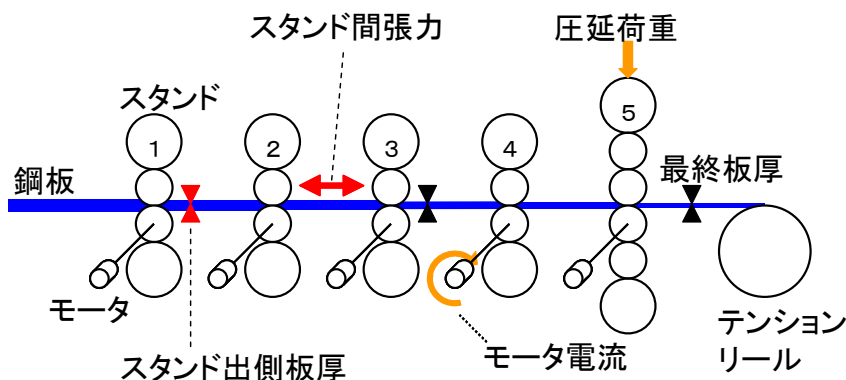
本章では、第 3.2 節で、最適化の対象であるパススケジュール [板厚目標値]を説明し、第 3.3 節で、改善すべき最適化前の圧延状態を示す。続いて、第 3.4 節で、ばらつきを考慮した最適化の手法を提案し、パススケジュール設計に適用する。第 3.5 節で、最適化の手順をまとめ、第 3.6 節で、実機適用結果を示す。

3.2 パススケジュール [板厚目標値]

3.2.1 テーブル

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化

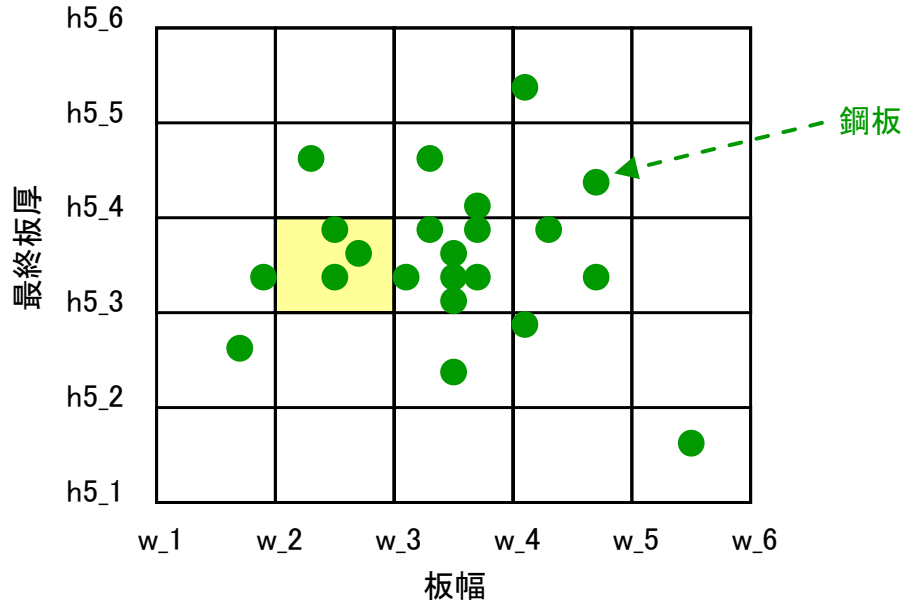
パススケジュールを最適化する対象は、第 2.8 図と同じ5スタンドの冷間タンデム圧延機(第 3.1 図)である。



第 3.1 図 冷間タンデム圧延機

パススケジュールは、第 2.16 図に示される最終スタンド以外のスタンドの出側板厚目標値とスタンド間張力目標値を意味しており、最終板厚や板幅等によってグループ分けされた一群の鋼板に対して設定されている。すなわち、鋼板は、最終板厚、板幅に応じて、第 2.19 図のように、テーブルによりグループ分けされている。テーブルの一部を取り出し、第 3.2 図のテーブルの網掛けされた升目を考える。この升目には、板幅が w_2 以上 w_3 未満であり、最終板厚が h_{5_3} 以上 h_{5_4} 未満の鋼板3つが属する。そして、次項で説明するように、スタンド出側板厚目標値については、この升目に対して、一組の対数歪式のパラメータがプロセスコンピュータのテーブル値として保存されている。そして、3つの各鋼板のパススケジュールが、対数歪式のパラメータから、それぞれの原板板厚と最終板厚に応じて、プロセスコンピュータ内においてオンラインで算出される。したがってこの場合には、3つの鋼板は同一の対数歪式パラメータに基づいて、異なるスタンド出側板厚目標値で圧延されることとなる。

なお、最大圧延速度時のスタンド間張力目標値については、適切な値がすでに得られていると考え、本章においては、従来から設定されている値をそのまま用いるか、一部変更した値を用いることとした。理由は、実際の圧延において、最大圧延速度時の張力目標値は現状の値が好ましいとの意見が多かったためである。なお、一部の変更すべき張力目標値については、例えば +10% のように、オペレータの意見を反映して、最適化計算は行わずに、設定した。したがって、本章の以降では、パススケジュールのうち、板厚目標値のみを最適化する。



第 3.2 図 冷延鋼板の仕様に基づいたグループ分け(一部)

3.2.2 規定方法

テーブルの各升目で、パススケジュール(スタンド出側板厚目標値。本章において、以下同じ。)を規定する方法について詳しく述べる。本論文の対象となる圧延機では、テーブル値として保存される値は、スタンド出側板厚目標値であるパススケジュールそのものではなく、スタンド出側板厚目標値の対数歪 $\ln(h_i / H_1)$ を用いて、(2.1)式で既述のように、次式で規定している。

$$\ln\left(\frac{H_1}{h_i}\right) = a_i \cdot \ln\left(\frac{H_1}{h_5}\right) + b_i \quad (i=1, \dots, 4) \quad (3.1)$$

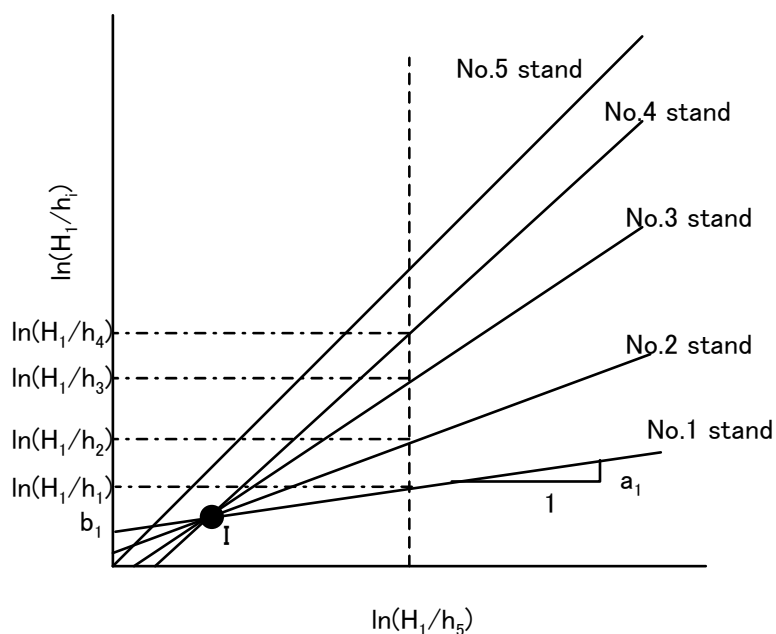
ここで、添字の i は No. i スタンドの値を示す。各変数は、 a_i 、 b_i :パススケジュールの基となる対数歪式パラメータ、 H_1 :No.1 スタンドの入側板厚である原板板厚、 h_i :スタンド出側板厚(h_5 は最終板厚)である。

パススケジュールを決定することは、この a_i 、 b_i のパラメータを決定することと等価となる。なお、(3.1)式を用いる理由は、原板板厚や最終板厚に関わらず、 a_i 、 b_i を用いて、同一の升目内の鋼板のパススケジュールを決定できるという利便性のためである。

第 3.3 図で、対数歪式とパススケジュールの関係を具体的に説明する。実線が各スタンドにおける対数歪に関する(3.1)式の一例を示す。No. i スタンドに対応する(3.1)式は、傾きが a_i 、切片が b_i の直線である。原板板厚 H_1 と最終板厚 h_5 により、横軸の値が図における縦の破線のように

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化

決定される。そして、実線との交点から、 $\ln(H_1/h_i)$ が決まり、 $h_1 \sim h_4$ が求められることとなる。

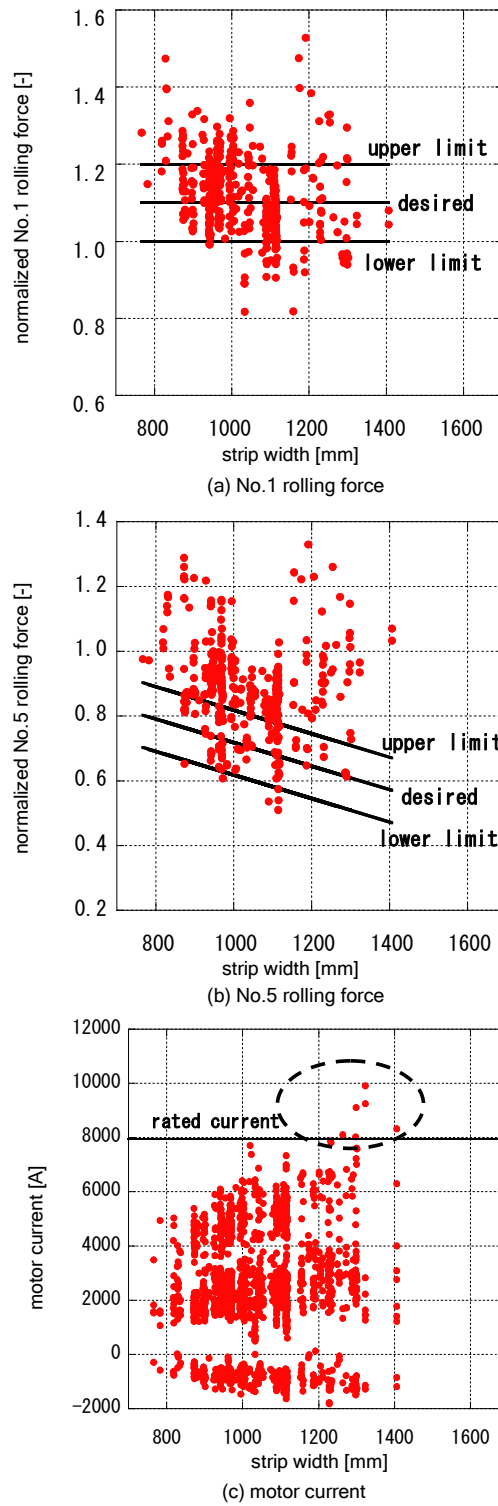


第 3.3 図 対数歪により規定されるパススケジュール[板厚目標値]

3.3 最適化前の圧延状態

No.1 スタンドの圧延荷重が過小または過大であると、鋼板の中伸びによる絞りや蛇行を生じ、安定操業の阻害要因となる。また、鋼板の表面品質や形状品質に影響を与える No.5 スタンドの圧延荷重もさらに適正化する必要があった。

最適化前の圧延実績の調査結果を第 3.4 図に示す。なお、用いているデータは、高張力鋼の一種での全升目のデータであり、最高圧延速度に達したときの実績値を示している。また、圧延荷重は正規化した値を示している。



第 3.4 図 最適化前の No.1,5 圧延荷重とモータ電流の実績

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化

第 3.4 図(a)(b)(c)は、それぞれ、No.1 スタンド、No.5 スタンドの圧延荷重、モータ電流の実績を示す。

第 3.4 図(a)(b)の No.1、No.5 スタンド圧延荷重のグラフにおける3本の実線は、上からそれぞれ、圧延荷重の上限値、理想値、下限値である。ここで、理想値とは、良好な圧延状態を実現するための圧延荷重の値を意味し、過去の圧延実績や、オペレータのノウハウや、圧延理論を考慮して決定している。上下限値は理想値から一定の幅を持つ値で、圧延荷重の望ましい許容範囲を示す。理想値と実績値の誤差の平均である平均誤差 (ME: Mean Error) と、理想値と実績値との誤差の2乗平均の平方根である2乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) を求めると、No.1 スタンドの圧延荷重の平均誤差は 0.023、2乗平均平方根誤差は 0.104 であり、制約内に 71% が入る。また、No.5 スタンドの圧延荷重については、それぞれ、0.173、0.219 であり、制約内には、23%しか入っていない。また、上限を大きく超える場合があることがわかる。

第 3.4 図(c)の各スタンドのモータ電流のグラフにおける実線は、モータ電流の定格を示し、8000[A]であるが、定格を超える鋼板があることがわかる。この場合には、モータの破損の可能性があるため、モータ電流の適正化を図る必要があった。

圧延荷重やモータ電流は、パススケジュールの設定に大きく依存する。さらに、パススケジュールは板厚張力制御系の目標値であることから、パススケジュール設定は、板厚公差外れ長さに影響を与える。

そこで、圧延荷重等を適正化するようにパススケジュールを最適化することとした。

3.4 ばらつきを考慮した最適化

3.4.1 最適化に用いる圧延モデル

パススケジュール設計に用いる圧延荷重やモータ電流のモデル式として、第 2.3 節に記載したように、圧延理論に基づいてモデル化した(2.9)式、(2.17)式を用いる⁴¹⁾。なお、本章における圧延荷重は、鋼板の単位幅当りの圧延荷重に変更している。

$$p_i = p_i(H_1, H_i, h_i, q_{fi}, q_{bi}, k_i, \mu_i, w) \quad (i=1, \dots, 5) \quad (3.2)$$

$$G_i = G(H_1, H_i, h_i, q_{fi}, q_{bi}, k_i, \mu_i, w) \quad (i=1, \dots, 5) \quad (3.3)$$

ここで、各変数は、 p_i : 圧延荷重 ($p_i = P_i/w$)、 G_i : モータ電流、 H_i : スタンド入側板厚 ($H_i = h_{i-1}$ ($i=2, \dots, 5$))、 q_{fi} : 前方張力、 q_{bi} : 後方張力、 k_i : 変形抵抗、 μ_i : 摩擦係数、 w : 板幅である。

なお、鋼種の違いや圧延ロールの磨耗の影響は、変形抵抗(硬さ)や、摩擦係数の変化として、

圧延荷重やモータ電流に間接的に反映される。

3.4.2 機会制約条件計画問題

今後圧延する鋼板に対し、圧延荷重・モータ電流・圧下率に関して、制約条件を確率的に満たしながら評価関数を最小化し、良好なパススケジュールを実現することを考える。ここで、圧下率とは、スタンドでの板厚低減率（[スタンド入側板厚－スタンド出側板厚]／スタンド入側板厚）を意味する。

本論文では、テーブルの升目ごとに、ばらつきを考慮したパススケジュール最適化を行う。すなわち、最終的には、(3.1)式の対数歪のパラメータ a_i 、 b_i ($i=1, \dots, 4$)を決定する。

パススケジュール設計を、機会制約条件計画問題として次のように設定する。

$$\begin{aligned} &\text{find } x \\ &\text{which minimizes } J(x, \zeta) \\ &\text{subject to} \\ &Prob(g_k(x, \zeta) \geq 0) \geq R_k \quad (k=1, \dots, M) \end{aligned} \quad (3.4)$$

ここで、

$$x = [h_1, h_2, h_3, h_4] \quad (3.5)$$

であり、今後圧延される鋼板のパススケジュールである。また、 ζ は、確率変数ベクトル²¹⁾であり、ばらつきを表わす。 J は評価関数であり、 g_k は一定確率で満足されるべき条件であり、 M は制約条件の数である。 $Prob()$ は、()内の条件を満たす確率を意味し、 R_k は指定する確率であり、今後、信頼率と呼ぶこととする。

(3.4)式の評価関数 J や条件 g_k はオペレータの経験や圧延実績から、ヒアリングと実験を繰り返し、次のように決定した。

ここで、評価関数 J や条件 g_k の計算には、第2.3節に記載したように、圧延モデルに基づいた(3.2)式((2.9)式相当)、(3.3)式((2.17)式相当)の圧延荷重式とモータ電流式を用いる。

$$J(x, \zeta) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \times (r_i - r_{di})^2 + \sum_{i=1}^5 \beta_i \times (p_i - p_{di})^2 + \sum_{i=1}^4 \gamma_i \times (G_i - G_{i+1})^2 \quad (3.6)$$

$$g_1(x, \zeta) = p_1 - \underline{p_1} \quad (3.7)$$

$$g_2(x, \zeta) = \overline{p_1} - p_1 \quad (3.8)$$

$$g_3(x, \zeta) = p_5 - \underline{p_5} \quad (3.9)$$

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化

$$g_4(x, \zeta) = \overline{p_5} - p_5 \quad (3.10)$$

$$g_5(x, \zeta) = p_1 - p_5 \quad (3.11)$$

$$g_{i+5}(x, \zeta) = G_i - \underline{G_i} \quad (i=1, \dots, 5) \quad (3.12)$$

$$g_{i+10}(x, \zeta) = \overline{G_i} - G_i \quad (i=1, \dots, 5) \quad (3.13)$$

$$g_{16}(x, \zeta) = r_2 - \Delta r_{23} - r_3 \quad (3.14)$$

$$g_{17}(x, \zeta) = r_3 - \Delta r_{34} - r_4 \quad (3.15)$$

$$g_{18}(x, \zeta) = r_4 - \Delta r_{45} - r_5 \quad (3.16)$$

$$g_{19}(x, \zeta) = r_5 - \underline{r_5} \quad (3.17)$$

ここで、

$$r_i = (H_i - h_i)/H_i \quad (3.18)$$

であり、各変数の内容は以下の通りである。 r_i : 圧下率 ($r_i = (h_{i-1} - h_i)/h_{i-1}$)、 $*_{di}$: No. i スタンドの理想圧延変数値、 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$: 重み、 $\overline{}$: 上限値、 $\underline{}$: 下限値、 $\Delta r_{i \ i+1}$: No. i スタンドと No. $i+1$ スタンドの理想圧下率差。

(3.6) 式第1項は理想パススケジュールの近傍で新パススケジュールを求めることを意味する。第2項は、理想圧延荷重に近づけるための項であり、第3項は、No.2、No.3、No.4 スタンドのモータ電流を揃えるための項である。

(3.7)～(3.11) 式は、圧延荷重を適正化するための制約条件であり、(3.12)、(3.13) 式は各スタンドのモータ電流の設備制約を満たすための条件である。

(3.14)～(3.17) 式は、圧下率の制約条件であり、過去の経験から良好な圧延状態が得られることが知られている圧下率バランスを保持するための条件である。

3.4.3 冷間圧延におけるばらつき

ばらつきには主に2種類あり、1つめは、同一仕様の鋼板であっても存在するものであり、例えば、鋼板の硬さのばらつきや、ロールと鋼板間における摩擦係数等の圧延条件のばらつきが挙げられる。そして、このばらつきにより、場合によっては過大圧延荷重等が発生する。

2つめのばらつきとしては、需要家のニーズによる最終板厚、板幅等のばらつきがある。パススケジュールは、最終板厚や板幅等によって分類された一群の鋼板に対して設定されることが多い。

この分類はマトリクス状のテーブルにより行われ、パススケジュールの値は、テーブル内の升目ごとにテーブル値として保存される。そして、1つの升目においては、複数の仕様の鋼板が同一のパススケジュールに基づいて圧延されることとなり、最終板厚、板幅等のばらつきが圧延荷重やモータ電流のばらつきとして現れる。

したがって、パススケジュール設計では、上記2種類のばらつきを考慮することが必要となる。ここで、確率計画法や最適信頼性設計においては、変数が所定の確率分布に従うものとして、制約条件を満たす確率を所定の値以上としながら最適化するものである。その際に、正規分布等の確率分布を仮定して最適化を行うことが多いが、圧延のパススケジュール設計の場合には、確率分布の仮定が困難である。例えば、製造される鋼板の硬さや、鋼板とロール間の摩擦係数は、直接測定できるものではなく、確率分布を求めることは困難である。また、同一の升目内の鋼板の最終板厚や板幅は、需要家のニーズにより定まるものであり、正規分布やワイブル分布等の確率分布として規定できない。また、ピークを複数持つような場合もあり、上述のような確率分布に変換することも難しく、無理に近似した場合には、適切な解が得られない場合がある。

確率分布を近似した場合に適切な解が得られない例を以下に示す。一例として、 $x = (x_1, x_2)$ が、2つの2次元正規分布からなる確率密度関数 $f(x_1, x_2)$ を取り上げる。

$$f(x) = \alpha \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{|S_{r1}|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu_{r1})^T S_{r1}^{-1} (x - \mu_{r1})\right) + (1 - \alpha) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{|S_{r2}|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu_{r2})^T S_{r2}^{-1} (x - \mu_{r2})\right) \quad (3.19)$$

ここで、

$$\alpha = 0.8 \quad (3.20)$$

$$S_{r1} = \begin{bmatrix} \sigma_{r1_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{r1_2}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4^2 & 0 \\ 0 & 1^2 \end{bmatrix}, \mu_{r1} = \begin{bmatrix} m_{r1_1} \\ m_{r1_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$S_{r2} = \begin{bmatrix} \sigma_{r2_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{r2_2}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1^2 & 0 \\ 0 & 1^2 \end{bmatrix}, \mu_{r2} = \begin{bmatrix} m_{r2_1} \\ m_{r2_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 \\ -4 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

この確率密度関数の分布を、モンテカルロ法⁴⁸⁾により、 $N_{data} = 1000$ 点求めた結果を第 3.5 図の青点で示す。また、2つの正規分布の等確率線の例を青線で示す。

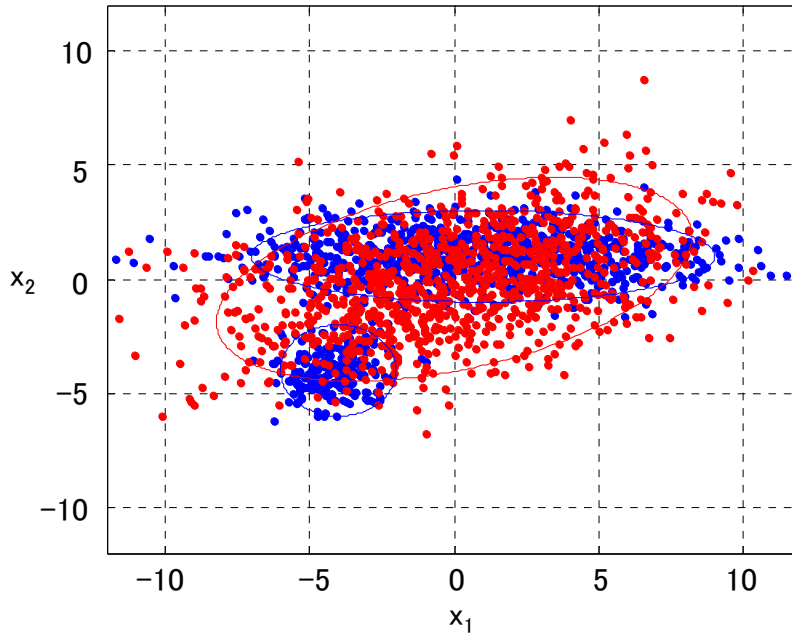
次に、青点のデータから、分散共分散行列を求めることにより、1つの2次元正規分布で近似する。結果を以下に示す。

$$f_a(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{|S_a|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu_a)^T S_a^{-1} (x - \mu_a)\right) \quad (3.23)$$

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化

$$S_a = \begin{bmatrix} \sigma_{a_{11}} & \sigma_{a_{12}} \\ \sigma_{a_{21}} & \sigma_{a_{22}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16.9 & 3.9 \\ 3.8 & 5.0 \end{bmatrix}, \mu_a = \begin{bmatrix} m_{a_{11}} \\ m_{a_{22}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

この確率密度関数の分布を、モンテカルロ法により、 $N_{data} = 1000$ 点求めた結果を第 3.5 図の赤点で示す。また、等確率線の例を赤線で示す。



第 3.5 図 $x = (x_1, x_2)$ が、2つの正規分布からなる分布(青点)である場合に、
1つの正規分布(赤線、赤点)で近似した結果

続いて、2つの方法、すなわち、1つの正規分布で近似した分布(赤点)を用いる方法⁴⁹⁾と、2つの正規分布そのもの(青点)を用いる方法で、機会制約条件計画問題を確定問題に変換した次の問題を解く。赤点あるいは青点の各点の座標を $(x_{1i}, x_{2i}) (i=1, \dots, N_{data})$ とする。

$$\begin{aligned} &\text{find } p_1, p_2 \\ &\text{which minimize } J(p_1, p_2) \\ &J = \frac{1}{N_{data}} \sum_{i=1}^{N_{data}} [(x_{1i} + p_1)^2 + (x_{2i} + p_2 - 1)^2] \\ &\text{subject to} \\ &\frac{N((x_{1i} + p_1 + x_{2i} + p_2 + 5) > 0)}{N_{data}} \geq 0.9 \end{aligned} \quad (3.25)$$

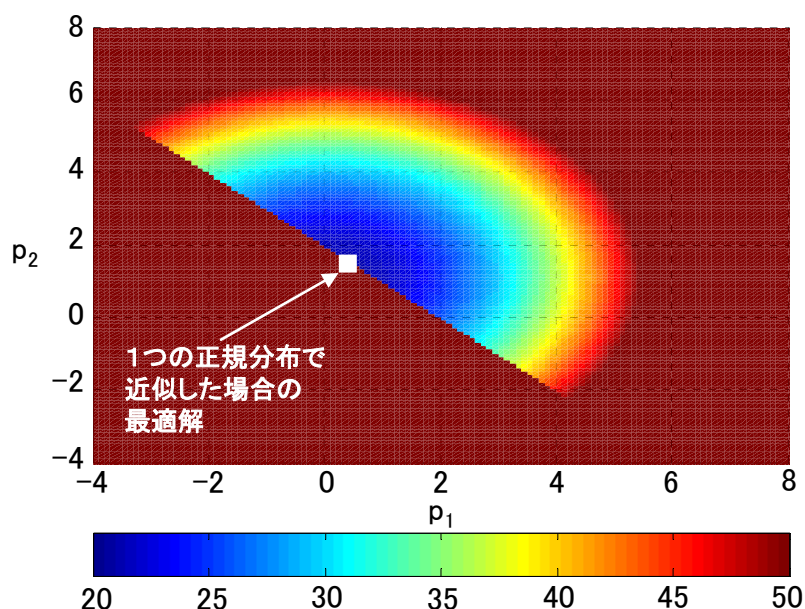
ここで、 $N(\cdot)$ は制約を満たす点の数を示す。

求解には、グリッドサーチ法を用い、 $-10 \leq p_1 \leq 10$ 、 $-10 \leq p_2 \leq 10$ の範囲で、それぞれ 0.1 刻みで計算を行った。

1つめの1つの正規分布で近似した分布(赤点)を用いる方法での評価関数値と最適解を第 3.6

図に示す。茶色から青色になるにつれて評価関数の値が小さくなる。なお、制約を満たさない場合は、評価関数の値を ∞ として表示している。

1つの正規分布で近似した場合の最適解は、第 3.6 図中の白四角の $(p_1, p_2) = (0.4, 1.5)$ となっている。

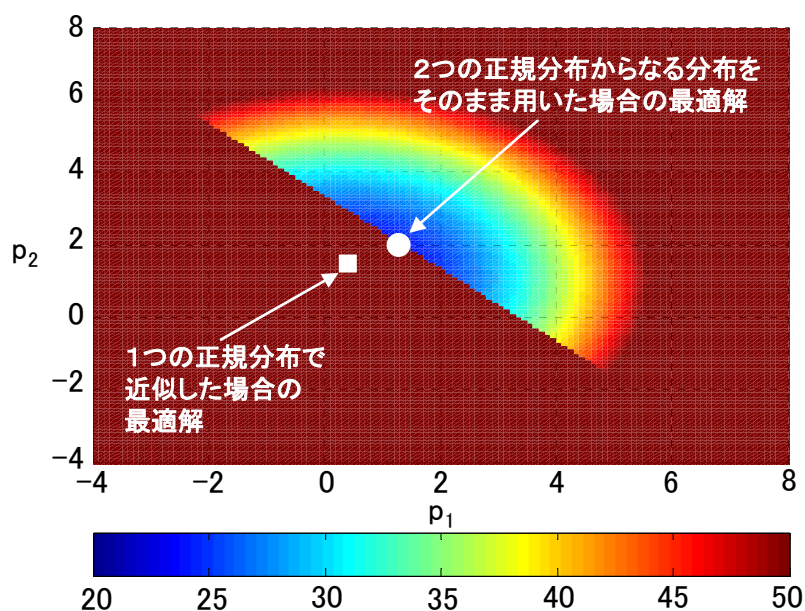


第 3.6 図 2つの正規分布からなる $x = (x_1, x_2)$ の分布を、1つの正規分布で近似した場合に、近似した1つの正規分布を用いてパラメータ p_1, p_2 を最適化したときの評価関数値

次に、2つの正規分布(青点)をそのまま用いる方法での評価関数値と最適解を第 3.7 図に示す。茶色から青色になるにつれて評価関数の値が小さくなる。なお、制約を満たさない場合は、評価関数の値を ∞ として表示している。

2つの正規分布をそのまま用いた場合の最適解は、第 3.7 図中の白丸の $(p_1, p_2) = (1.3, 2.0)$ となっている。ここで、1つの正規分布で近似した場合の最適解(第 3.7 図中の白四角)は、評価関数値が ∞ の領域にあり、制約条件を満たさない実現不可能な領域にあることがわかる。

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化



第 3.7 図 2つの正規分布からなる $x = (x_1, x_2)$ の分布を、そのまま用いて
パラメータ p_1, p_2 を最適化したときの評価関数値

以上より、1つの正規分布に近似した場合には、近似が不適切なために実現不可能な解を導出する場合があることがわかる。

さらに、従来の確率分布を仮定する方法を用いようとしても、受注量の少ない仕様の鋼板ではデータ数が少なく、確率分布の規定はさらに困難となるという問題がある。

一方、圧延においては、過去の入出力データおよび圧延モデルが既に得られているため、同一仕様の鋼板のばらつきやテーブルを用いることによるばらつきを、確率分布として代用することが可能である。

そこで、本論文では、パススケジュール最適化問題を機会制約条件計画問題として設定し、入出力データと圧延モデルを用いた確定問題に変換することとした。

3.4.4 確率分布として過去データを用いた確定問題への変換

確率計画法では、確率変数ベクトルにおける確率分布があらかじめ定められている必要があり、正規分布等の数学的に扱いやすい分布が採用されることが多い。しかし、圧延においては、ピークが2つ以上ある分布となる場合等があり、確率変数ベクトルを決定することは必ずしも容易ではない。

そこで、過去の実績データを、確率分布、すなわちばらつきの代わりに用いて、確定問題へと変換することとした。

ばらつきは、第2章で述べたように、主に2種類あり、1つめは、同一仕様の鋼板であっても存在する硬さや圧延条件等のばらつきであり、2つめは、テーブルを用いることによる仕様(最終板厚や板幅等)のばらつきである。以下に2種類のばらつきについて説明し、最適化の際に考慮する方法について概説する。

まず、1つめの同一仕様の鋼板における硬さ等のばらつきは、第2.24図に示すように、圧延荷重等の出力データのばらつきとして現れる。そこで、最適化の際に用いる圧延モデルを、入出力データを用いて、鋼板毎に補正する。補正式としては、次のように求めることとした。すなわち、あるテーブルの升目について過去の実績圧延データが N_{all} 個あるとし、 j 番目のデータの No. i スタンドについて、原板板厚・板幅・鋼種等の圧延条件を入力し、(3.2)、(3.3)式より、計算圧延荷重 $p_{j,i}$ と計算モータ電流 $G_{j,i}$ を求める。そして、これらと、実績圧延荷重 $p_{actual\ j,i}$ 、実績モータ電流 $G_{actual\ j,i}$ とを比較して、下記の式により、その誤差分を補正する補正係数 $\alpha_{pj,i}$ 、 $\alpha_{Gj,i}$ を求める。

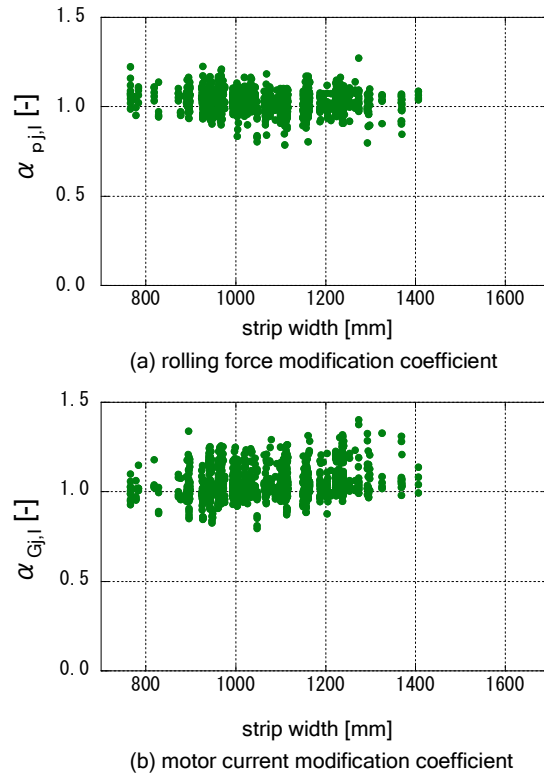
$$\alpha_{pj,i} = (p_{actual\ j,i} + 1.0 \times 10^3) / (p_{j,i} + 1.0 \times 10^3) \quad [-] \quad (3.26)$$

$$\alpha_{Gj,i} = (G_{actual\ j,i} + 1.0 \times 10^4) / (G_{j,i} + 1.0 \times 10^4) \quad [-] \quad (3.27)$$

ここで、(3.26)、(3.27)式中の定数は、圧延荷重やモータ電流の計算値が 0 近傍の場合に補正係数が大きくなることを防ぐために導入した。

$\alpha_{pj,i}$ 、 $\alpha_{Gj,i}$ の例を、特定鋼種のテーブルの全升目、全スタンドのデータについて、第3.8図に示す。各点は、1つの鋼板での値を示す。鋼板の硬さや摩擦係数等のばらつきが、補正係数のばらつきとして現れている。

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化



第 3.8 図 圧延荷重とモータ電流の補正係数のばらつきに表れる
鋼板の硬さや摩擦係数等のばらつき

そして、最適化計算に際して(3.2)、(3.3)式の圧延荷重やモータ電流の値を計算する場合に、鋼板・スタンド毎に補正する。すなわち、 $\alpha_{pj,i} \cdot p_{j,i}$ 、 $\alpha_{Gj,i} \cdot G_{j,i}$ を、補正された新たな $p_{j,i}$ 、 $\alpha_{Gj,i}$ とする。

$$\alpha_{pj,i} \cdot p_{j,i} \rightarrow p_{j,i} \quad (3.28)$$

$$\alpha_{Gj,i} \cdot G_{j,i} \rightarrow G_{j,i} \quad (3.29)$$

例えば、テーブルのある升目内の j 番目の鋼板の No. i スタンドで、実績荷重 $p_{actual\ j,i}$ が計算圧

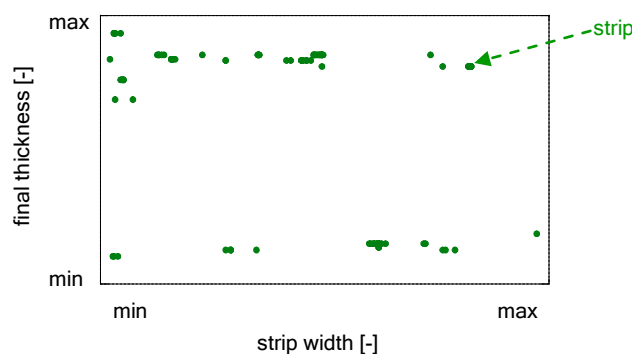
延荷重 $p_{j,i}$ より大きく、鋼板が硬い場合、大きな補正係数 $\alpha_{pj,i}$ の値が得られる。このように、 $\alpha_{pj,i}$

は硬さや摩擦係数等のばらつきを反映しているため、最適化の際に鋼板ごと・スタンドごとに圧延荷重式(3.2)式を補正することにより、硬さや摩擦係数のばらつきが圧延荷重に反映される。そして、ばらつきを反映する圧延荷重を用いてパススケジュール最適化を行うことで、ばらつきを考慮

したパススケジュール設計が可能となる。

次に、2つめのばらつき、すなわち、テーブルを用いることによる仕様(最終板厚や板幅等)のばらつきを考える。なお、本来、今後圧延する鋼板ごとに最適化すれば、仕様によるばらつきを考慮することは不要である。しかし、パススケジュールを計算するプロセスコンピュータの制約により1鋼板ごとの最適化計算が難しいこと、最適化計算により得られたパススケジュールを実機適用する前に、オペレータの評価が必要なことから、1鋼板ごとの最適化は行わずに、テーブルの升目ごとの最適化を行うこととした。そこで、ある升目で次にどのような鋼板が圧延されるかも、ばらつきとみなすこととした。

テーブルを用いることにより、最終板厚や板幅がばらついた場合に、圧延荷重がばらつく概念図は、前掲の第 2.25 図のとおりである。最終板厚等のばらつきは、鋼板の需要家のニーズにより定まるものであり、第 3.9 図のテーブル内の1つの升目での最終板厚と板幅の仕様のばらつきの実例に示すように、離散的であり、また、ピークを複数持つ場合も多い。ここで、各点は、1つの鋼板を示す。そこで、升目内の過去の実績データの最終板厚や板幅等のデータをすべて用いることで、仕様によるばらつきを最適化の際に反映させることとした。



第 3.9 図 テーブル内の1つの升目での最終板厚と板幅の仕様のばらつきの実例

例えば、生産量の多い最終板厚・板幅の鋼板数は多く、生産量の少ない最終板厚・板幅の鋼板数が少なくなるため、すべての鋼板について圧延荷重等を計算し、分布を評価すると、テーブルの同一升目内の仕様のばらつきに応じて、生産量の多い鋼板に対する圧延荷重に分布が偏った結果が自然に得られる。

これにより、最適化計算時に、対象鋼板の仕様によるばらつきを考慮できることとなる。

以上より、最適化は升目ごとに行うものとし、対象の升目で過去に圧延された N_{all} 個の鋼板の実績データを用いることにより、硬さや仕様について過去の N_{all} 個の実績データと同じばらつきを持つ鋼板が今後も圧延されると考え、第 3.4.2 項のパススケジュール最適化問題を次のように確定的な問題に変換した。

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化

$$\begin{aligned} & \text{find } \{x_j\} \ (j=1, \dots, N_{all}) \\ & \text{which minimizes } \frac{1}{N_{all}} \sum_{j=1}^{N_{all}} J_j(x_j) \end{aligned} \quad (3.30)$$

subject to

$$\frac{N(g_k(x_j) \geq 0)}{N_{all}} \approx \frac{\sum_{j=1}^{N_{all}} \text{sigmf}(g_k(x_j), \xi_k)}{N_{all}} \geq R_k \quad (3.31)$$

$$(k=1, \dots, M)$$

ここで、

$$x_j = [h_{j,1}, h_{j,2}, h_{j,3}, h_{j,4}] \ (j=1, \dots, N_{all}) \quad (3.32)$$

$$\ln\left(\frac{H_{j,1}}{h_{j,i}}\right) = a_i \cdot \ln\left(\frac{H_{j,1}}{h_{j,5}}\right) + b_i \ (i=1, \dots, 4, j=1, \dots, N_{all}) \quad (3.33)$$

$$\text{sigmf}(g_k(x_j), \xi_k) = \frac{1}{1 + \exp(-g_k(x_j) \cdot \xi_k)} \ (k=1, \dots, M, j=1, \dots, N_{all}) \quad (3.34)$$

(3.30)、(3.31) 式中の x_j ((3.32) 式) が最適化されるべきパススケジュールである。 x_j は、過去の N_{all} 個の鋼板中の j 番目の鋼板と同じ仕様(原板板厚、最終板厚等)で、将来鋼板を圧延するとした場合の、パススケジュール値を示す。各鋼板に対しては、原板板厚 $H_{j,1}$ と最終板厚 $h_{j,5}$ が定まっているので、(3.33) 式の対数歪式のパラメータ a_i 、 b_i ($i=1, \dots, 4$) が定まっていれば、 x_j が計算できることになる。なお、(3.33) 式は、既述の (3.1) 式を複数の鋼板に対応して書き換えたものであり、 a_i 、 b_i ($i=1, \dots, 4$) は升目内の鋼板すべてに共通に用いられる。なお、4つの変数であるパススケジュール(スタンド出側板厚目標値) $x_j = [h_{j,1}, h_{j,2}, h_{j,3}, h_{j,4}]$ と、8つの変数である対数歪式パラメータ a_i 、 b_i ($i=1, \dots, 4$) を相互に変換可能なように、補遺に示すように、対数歪式に4つの条件を設けて、独立変数を低減した。これは、硬い材料では、鋼板の蛇行防止や形状確保に重要な No.1、No.5 スタンドの圧延荷重を、原板板厚によらず一定にするためであり、また、鋼板の数が少なく $N_{all} = 1$ であるときでも、 a_i 、 b_i ($i=1, \dots, 4$) を一意に決定できるようにするためである。

評価関数の (3.30) 式は、各鋼板の評価関数値である $J_j(x_j)$ の平均値を最小化することを意味する。 $J_j(x_j)$ は、以下のように表される。

$$J_j(x_j) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \times (r_{j,i} - r_{j,di})^2 + \sum_{i=1}^5 \beta_i \times (p_{j,i} - p_{j,di})^2 + \sum_{i=1}^4 \gamma_i \times (G_{j,i} - G_{j,i+1})^2 \quad (j=1, \dots, N_{all}) \quad (3.35)$$

ここで、 i は No. i スタンド ($i=1, \dots, 5$) を意味し、 j は j 番目 ($j=1, \dots, N_{all}$) の鋼板を意味する。そして、 $*_{j,i}$ は j 番目の鋼板の No. i スタンドの圧延変数値を意味する。

(3.31) 式の制約条件は、 N_{all} 個の鋼板データに基づいて設計されたパススケジュール

x_j ($j=1, \dots, N_{all}$) が $g_k(x_j) \geq 0$ を満たす割合が、指定した信頼率 R_k よりも大きいことを意味す

る。ここで、 $N()$ は () 内の制約条件を満たす鋼板の数であり、 $\text{sigmf}()$ は シグモイド関数であり、 ξ_k は (3.34) 式で定義されるシグモイド関数のパラメータである。制約条件に関しては、ヒンジロス関数⁵⁰⁾等の適用も考えられる。ここで、シグモイド関数を用いた理由は、(3.31) 式の左辺のままでは、制約条件が離散値となり微分不可能であるため、離散値に対する最適化手法を用いなければならないが、(3.31) 式の中辺のように、制約条件を滑らかな関数で近似して微分可能とすれば、演算が高速な逐次 2 次計画法 (SQP) を適用可能とできるためである。なお、

$$g_k(x_j) \rightarrow \pm\infty \quad (k=1, \dots, M) \text{ のとき } \frac{N(g_k(x_j) \geq 0)}{N_{all}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{all}} \text{sigmf}(g_k(x_j), \xi_k)}{N_{all}} \text{ となることから、元の}$$

制約条件の近似となっていることがわかる。続いて、シグモイド関数による近似の効果を説明する。簡単のため、 $N_{all}=1$ 、 $R_k=0.7$ の例を考える。第 3.10 図は、(3.31) 式の近似の一例を示す。第

3.10 図(a)において、(3.31) 式の左辺 \geq 右辺で、70%以上の確率を満たす x_j は、 $g_k(x_j) \geq 0$ を満

たす x_j となる。第 3.10 図(b)は、(3.31) 式の中辺 \geq 右辺を示す。制約条件が近似により微分可能

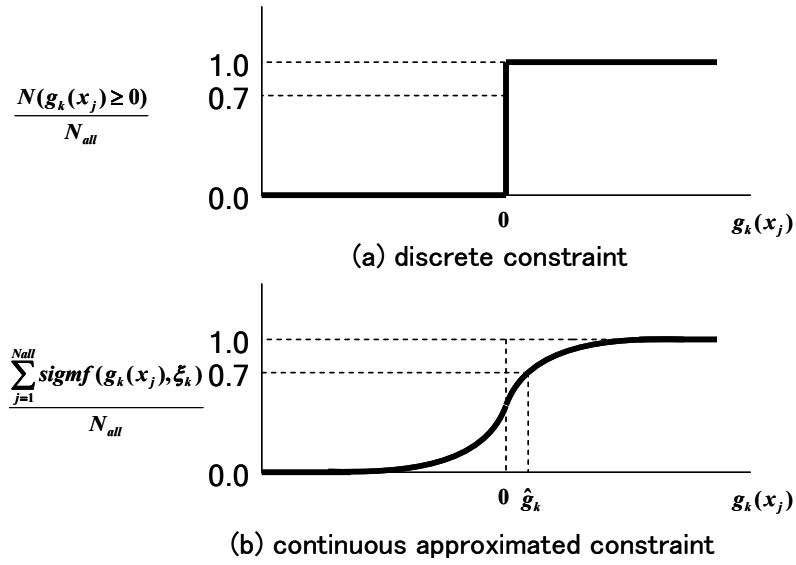
な関数となり、SQP の利用が可能となる。制約条件を満たす解は、 $g_k(x_j) \geq \hat{g}_k$ を満たす x_j であ

る。 $g_k(x_j)$ として $g_k(x_j)=0$ 近傍で大きく変化しない関数を選んでいれば、 $g_k(x_j) \geq \hat{g}_k$ を満たす

x_j は、 $g_k(x_j) \geq 0$ を満たす x_j の近似解となる。なお、シグモイド関数のパラメータである ξ_k は、

SQP で求解可能な範囲で、できるだけ小さく選ばばよい。

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化



第 3.10 図 シグモイド関数による制約条件の近似

ここで、(3.31) 式の制約条件内の $g_k(x_j)$ は、(3.7) ～ (3.17) 式から変換され、次のようになる。

$$g_1(x_j) = p_{j,1} - \underline{p_{j,1}} \quad (3.36)$$

$$g_2(x_j) = \overline{p_{j,1}} - p_{j,1} \quad (3.37)$$

$$g_3(x_j) = p_{j,5} - \underline{p_{j,5}} \quad (3.38)$$

$$g_4(x_j) = \overline{p_{j,5}} - p_{j,5} \quad (3.39)$$

$$g_5(x_j) = p_{j,1} - p_{j,5} \quad (3.40)$$

$$g_{i+5}(x_j) = G_{j,i} - \underline{G_{j,i}} \quad (i = 1, \dots, 5) \quad (3.41)$$

$$g_{i+10}(x_j) = \overline{G_{j,i}} - G_{j,i} \quad (i = 1, \dots, 5) \quad (3.42)$$

$$g_{16}(x_j) = r_{j,2} - \Delta r_{23} - r_{j,3} \quad (3.43)$$

$$g_{17}(x_j) = r_{j,3} - \Delta r_{34} - r_{j,4} \quad (3.44)$$

$$g_{18}(x_j) = r_{j,4} - \Delta r_{45} - r_{j,5} \quad (3.45)$$

$$g_{19}(x_j) = r_{j,5} - \underline{r_{j,5}} \quad (3.46)$$

ここで、

$$r_{j,i} = (H_{j,i} - h_{j,i}) / H_{j,i} \quad (3.47)$$

以上より、(3.31)式の中辺 \geq 右辺の制約条件を満たし、(3.30)式の評価関数値を最小にする N_{all} 個のパススケジュール x_j ((3.33)式を介して決定される)を最適化すればよいこととなる。な

お、前述のように、(3.32)式の x_j と(3.33)式の a_i 、 b_i ($i = 1, \dots, 4$) の変換方法を補遺に示している。

以上の手法によれば、確率分布を仮定する必要はなく、現実のばらつきに対応したパススケジュール[板厚目標値]を得ることができる。

3.4.5 信頼率の緩和による優先順位付け

制約条件が厳しい場合、最適化問題の解が得られない場合がある。これは、物理的に不可能な条件、例えば、高圧下率かつ低圧延荷重の制約条件を与えた場合である。特に、高張力鋼の場合には、すべての制約条件を満足することが難しい。

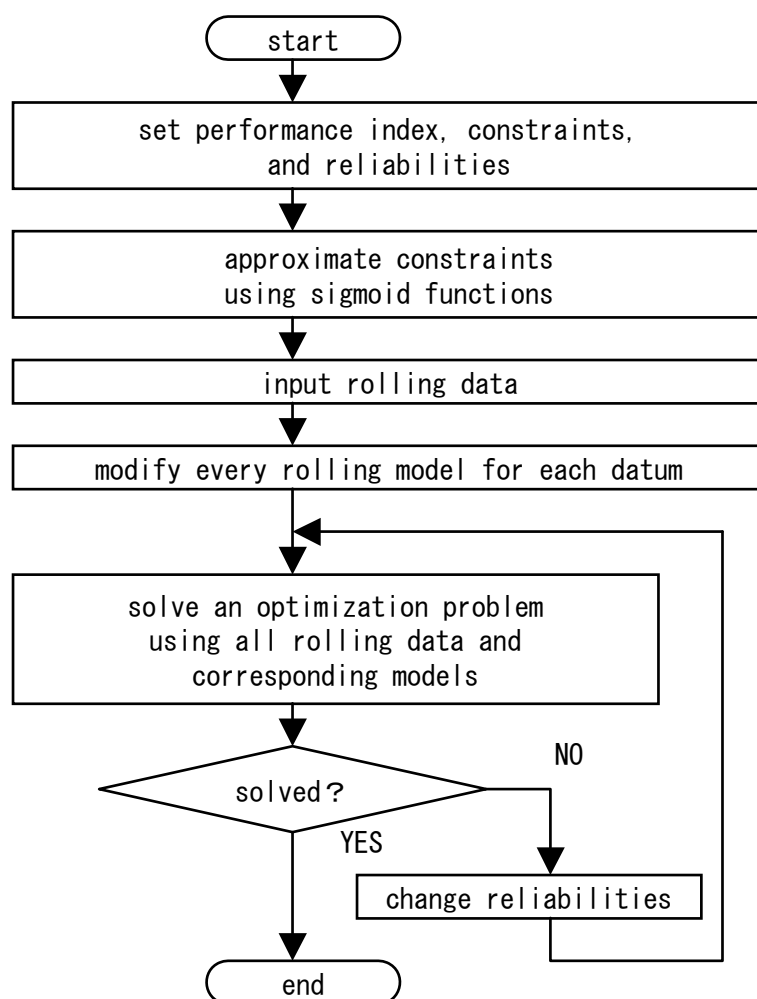
一方、現実には、必ず満足すべき制約と、できるだけ満足したい制約が存在する。そこで、優先度に応じて、信頼率 R_k を個別に緩和し、これらの信頼率により解が得られるまで小さくしていくというもう一つのループで最適化を行うことで、優先順位付けを行った。これにより、圧延機の実操業に適した現実的なパススケジュール設計が可能となる。

3.5 最適化の手順

前節より、パススケジュール[板厚目標値]の最適化フローは、第 3.11 図のように示される。

まず、評価関数((3.30)(3.35)式)、制約条件((3.31)、(3.36)～(3.46)式)、信頼率((3.31)式)を設定し、制約条件を、シグモイド関数((3.34)式)を用いて近似する。次に、対象の升目の鋼板のデータを入力し、鋼板ごとに圧延モデルを補正する((3.26)～(3.29)式)。そして、上述のように信頼率を緩和していきパススケジュールの最適解((3.33)式の対数歪式のパラメータ a_i 、 b_i ($i = 1, \dots, 4$)、または、(3.32)式 of 各鋼板のパススケジュールそのもの $x_j = [h_{j,1}, h_{j,2}, h_{j,3}, h_{j,4}]$)を得る。

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化



第 3.11 図 パススケジュール[板厚目標値]の最適化フロー

3.6 実機適用結果

3.6.1 設計例

対象は、高張力鋼の一種である。まず、2種類のばらつきであるが、1つめの鋼板の硬さ等の圧延条件のばらつきについて、モデル誤差を表す $\alpha_{pj,i}$ 、 $\alpha_{Gj,i}$ の分布は、第 3.8 図に示した通りである。なお、この図は全升目に対するものである。圧延荷重の補正係数 $\alpha_{pj,i}$ は、0.88～1.27、モータ電流の補正係数 $\alpha_{Gj,i}$ は 0.79～1.56 となっており、コイル毎に補正した。また、2つめの鋼板の仕

様によるばらつきは、第 3.9 図に示した通りである。なお、この図は、1つの升目に対するものである。

評価関数と制約条件中の変数の値は、圧延荷重とモータ電流の理想値を含めて下記のように、決定した。

$$\alpha_1 = 0.1$$

$$\alpha_i = 0.01 \quad (i = 2, \dots, 5)$$

$$\beta_i = 96 \quad (i = 1, 5)$$

$$\beta_i = 0.0 \quad (i = 2, 3, 4)$$

$$\gamma_i = 0.1 \quad (i = 2, 3)$$

$$\gamma_i = 0.0 \quad (i = 1, 4)$$

$$\overline{p_{j,1}} = 1.2 \quad [-]$$

$$p_{j,d1} = 1.1 \quad [-]$$

$$\underline{p_{j,1}} = 1.0 \quad [-]$$

$$\overline{p_{j,5}} = -0.000363 \cdot w + 1.18 \quad [-]$$

$$p_{j,d5} = -0.000363 \cdot w + 1.08 \quad [-]$$

$$\underline{p_{j,5}} = -0.000363 \cdot w + 0.98 \quad [-]$$

$$\overline{G_{j,1}} = 5400 \quad [\text{A}]$$

$$\overline{G_{j,i}} = 8000 \quad (i = 2, \dots, 5) \quad [\text{A}]$$

$$\underline{G_{j,i}} = 0.0 \quad (i = 1, \dots, 5) \quad [\text{A}]$$

$$\Delta r_{23} = 0.02$$

$$\Delta r_{34} = 0.02$$

$$\Delta r_{45} = 0.0$$

$$\underline{r_{j,5}} = 0.01$$

ここで、評価関数の重みは、オフラインでの最適化結果に対するオペレータの評価に基づき、調整した。圧延荷重制約のそれぞれの上下限値は、オペレータの経験から決定した

また、(3.34) 式のシグモイド関数のパラメータは、次のように、SQP で求解可能な範囲で小さな値とした。

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化

$$\xi_k = 0.01 \quad (k = 1, \dots, 5)$$

$$\xi_k = 0.001 \quad (k = 6, \dots, 15)$$

$$\xi_k = 100 \quad (k = 16, \dots, 19)$$

なお、理想パススケジュール $r_{j,di}$ ($j = 1, \dots, N_{all}$, $i = 1, \dots, 5$) は、従来通りの値とした。従来のパススケジュールは最適ではなくとも、安定操業や品質の観点から良好な圧延を確保できるパススケジュールとなっていると考えられることから、従来のパススケジュールに近いパススケジュールを求めようとするものである。これにより、評価関数や制約条件に組み込むことが難しい条件、例えば、ヒートスクラッチを発生しにくい条件を考慮することができる。

次に、各制約条件の信頼率を、基本の信頼率を R_{base} として、ヒアリングと実験結果に基づいて、第 3.12 図のように緩和していくこととした。すなわち、圧延荷重、モータ電流、圧下率の信頼率を次のように緩和していく。

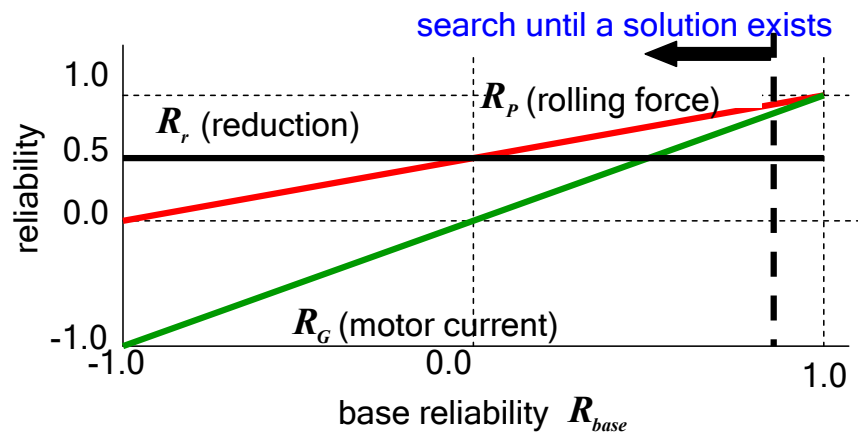
$$R_k = R_p = 0.5 + 0.5 \cdot R_{base} \quad (k = 1, \dots, 5) \quad (3.48)$$

$$R_k = R_G = R_{base} \quad (k = 6, \dots, 15) \quad (3.49)$$

$$R_k = R_r = 0.5 \quad (k = 16, \dots, 19) \quad (3.50)$$

圧延荷重はモータ電流より重要と判断し、圧延荷重の信頼率をモータ電流の信頼率より高く設定した。また、圧下率については、制約条件を満たす必要性が高いことから、常に 0.5 の信頼率とした。

そして、基本の信頼率 R_{base} を 1.0 から 0.1 刻みで -1.0 まで、最適解が得られるまで、繰り返し計算を行った。本例では、対象鋼種の 1 つの升目を取り上げる。鋼板数は $N_{all} = 129$ であり、得られた信頼率は $R_{base} = -0.1$ 、 $R_p = 0.45$ 、 $R_G = -0.1$ 、 $R_r = 0.5$ であった。ここで、計算される各信頼率は実際の信頼率より小さな値となっている場合があることに注意する必要がある。



第 3.12 図 制約条件の信頼率の緩和

パススケジュールを規定する(3.33)式の対数歪式パラメータの値は次のように得られた。

$$a_1 = 0.0392 \quad , \quad b_1 = 0.0753$$

$$a_2 = 0.4282 \quad , \quad b_2 = 0.0325$$

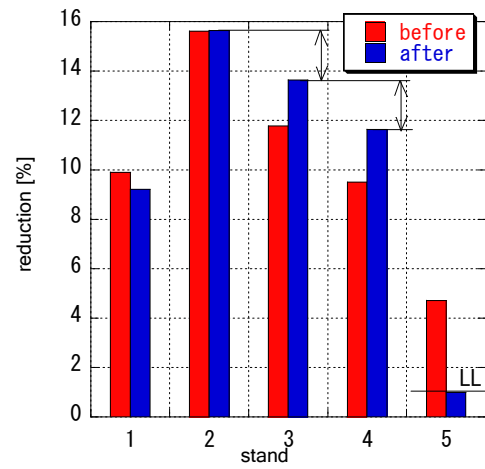
$$a_3 = 0.7635 \quad , \quad b_3 = -0.0043$$

$$a_4 = 1.0464 \quad , \quad b_4 = -0.0354$$

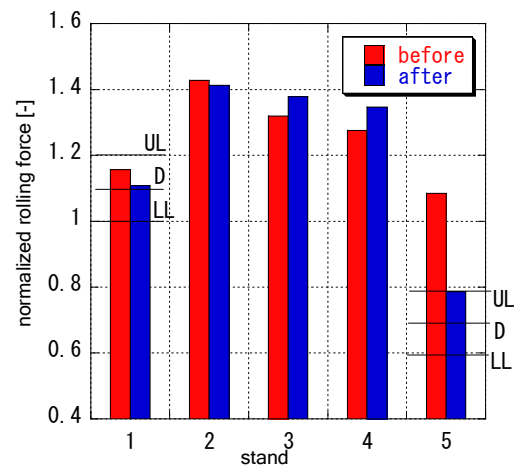
なお、本例の鋼板数 $N_{all} = 129$ の1つの升目についての計算はパーソナルコンピュータ DELL Workstation Precision 690 (Xeon 3GHz)で約 5 秒であり、また、本例とは別の例で、 $N_{all} = 966$ の升目でも 2 分 24 秒で最適化可能であった。SQP の求解の高速性を利用し、評価関数や制約条件の調整のための試行錯誤や、新データによるパススケジュール再設計に実用上十分耐えるものとなっている。

第 3.13 図に、対象鋼種の1つの升目についての最適化前後の圧下率、圧延荷重、モータ電流の平均値の変化を示す。図中の UL、D、LL はそれぞれ、上限値、理想値、下限値を示す。

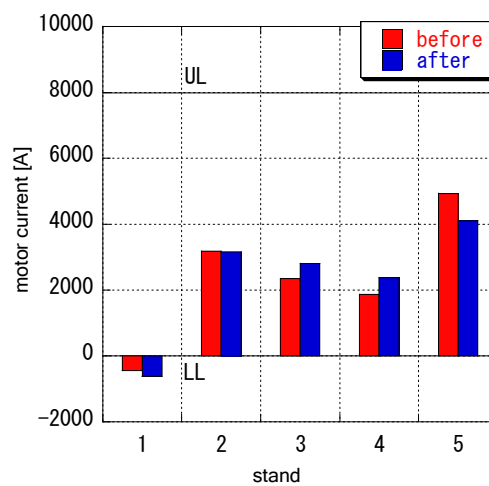
3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化



(a) change of reductions



(b) change of rolling forces



(c) change of motor currents

第 3.13 図 最適化前後の圧下率、圧延荷重、モータ電流の
平均値の変化(設計値)

圧下率平均の変化(第 3.13 図(a))は以下の通りである。

圧下率 平均値[%]	最適化前		最適化後
r_1	9.90	→	9.22
r_2	15.62	→	15.64
r_3	11.78	→	13.64
r_4	9.51	→	11.64
r_5	4.71	→	1.00

最適化後の No.2、No.3、No.4 スタンドの圧下率差は制約条件で設定した下限の 2%であり、No.5 スタンドの圧下率も下限の 1%であり、設定した通りとなっている。

圧延荷重の平均値の変化(第 3.13 図(b))は以下の通りである。

圧延荷重 平均値[-]	最適化前		最適化後	下限値	理想値	上限値
p_1	1.16	→	1.11	1.00	1.10	1.20
p_5	1.09	→	0.79	0.59	0.69	0.79

No.1 スタンドの圧延荷重平均値は理想値に近づき、No.5 スタンドの圧延荷重平均値は上限値に近づいていることがわかる。

モータ電流平均の変化(第 3.13 図(c))は以下の通りである。

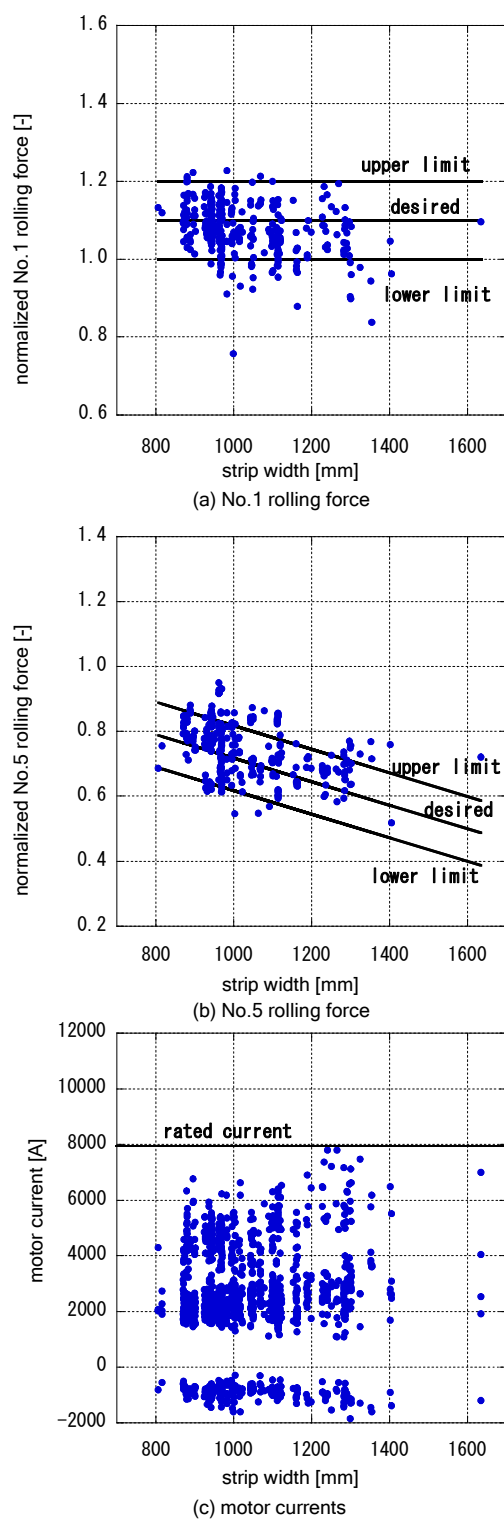
電流 平均値[A]	最適化前		最適化後
G_1	- 443	→	- 620
G_2	3182	→	3162
G_3	2353	→	2805
G_4	1868	→	2385
G_5	4929	→	4103

No.1 スタンドの電流は下限値を下回っている。これは、電流の信頼率が負の値であることに対応し、圧下率と圧延荷重が優先された結果である。

3.6.2 実機適用結果

高張力鋼の一種について、第 3.6.1 項の 1 つの升目を含む全升目について、第 3.6.1 項と同様の設計を、パーソナルコンピュータを用いてオフラインで行い、升目ごとに a_i 、 b_i ($i=1, \dots, 4$) をプロセスコンピュータのテーブル値として設定し、実圧延機に適用した。結果を第 3.14 図に示す。

3 パススケジュール [板厚目標値] の最適化



第 3.14 図 最適化後の No.1,5 圧延荷重とモータ電流の実績

第 3.14 図(a)は、No.1 スタンド圧延荷重を示し、平均誤差は -0.024 となり、2乗平均平方根誤差は 0.071 へと減少した。そして、制約を満たす鋼板は、 87% へと増加した。

また、第 3.14 図(b)は、No.5 スタンド圧延荷重を示し、平均誤差は 0.036 となり、2乗平均平方根誤差は 0.086 へと減少した。そして、制約を満たす鋼板は、 76% へと増加した。

さらに、第 3.14 図(c)より、最高圧延速度でのモータ電流が、定格の $8000[A]$ を超える場合がなくなったことがわかる。

このようにパススケジュールが適正化され、同時に他の制御系の改善を行った結果、特に高張力鋼の対象材では、形状悪化や生産性低下の原因となる圧延荷重やモータ電流の異常値が減少し、板厚公差外れ長さが $13\sim 35\%$ 低減したことが確認された。

3.7 結言

パススケジュール設計問題を、機会制約条件計画問題として扱い、過去の実績圧延入出力データと圧延モデルを用いることで、変数の確率分布を仮定することなく、ばらつきを考慮したパススケジュール設計を可能とした。シグモイド関数で制約条件を近似し、逐次2次計画法による求解を可能とし、さらに、各制約条件の確率を個別に緩和することで、制約の優先順位付けを可能とした。パススケジュール設計に本手法を適用し、特に高張力鋼の板厚公差外れ長さについて、 $13\sim 35\%$ の低減効果を確認した。

4 パススケジュール [張力目標値] の最適化

4 パススケジュール [張力目標値] の最適化

4.1 緒言

第 3 章の最大圧延速度時のパススケジュールの最適化により、定常部の圧延状態が改善される。しかし、加減速時には、圧延速度変化により、圧延材とロール間の摩擦係数等が変化し⁵¹⁾、圧延荷重や板厚が変動する⁵²⁾。そして、最終スタンド出側板厚の変動を防止するために、板厚張力制御系が導入されている。この板厚制御系には種々の形態が考えられるが、対象の圧延機に応じた適切な制御則を見出す必要がある⁵³⁾。当社の冷間タンDEM圧延機においても、板厚・形状品質の確保および安定生産のため、全スタンドの出側板厚および全スタンド間張力を制御する板厚張力制御系を採用している^{39, 40)}。ここで、張力制御に関しては、圧延速度が0近傍の極低速になる場合があることから、圧延荷重の大きな変動を防止するため、張力目標値を圧延速度に応じて変更することとしている。ここで、パススケジュールのうちの張力目標値と圧延速度の関係を張力カーブと呼んでいる。板厚精度を改善するため、この張力カーブの最適化を行うこととした。

まず、板厚張力制御系の特性を利用し、最適化問題を、静的な圧延モデルのみを用いた部分問題とすることにより計算時間を短縮し、安定して最適解が得られるようにした。また、張力カーブは板厚と板幅でテーブル化されており、テーブルの升目毎に設定されているが、テーブル全体、すなわち、全升目での張力カーブの代表値の近似曲面を用いることにより、段階的な最適化を行った。これにより、テーブル全体で滑らかな張力カーブ代表値を持つような設計が可能となった。実機適用の結果、板厚公差外れ長さを確認した。

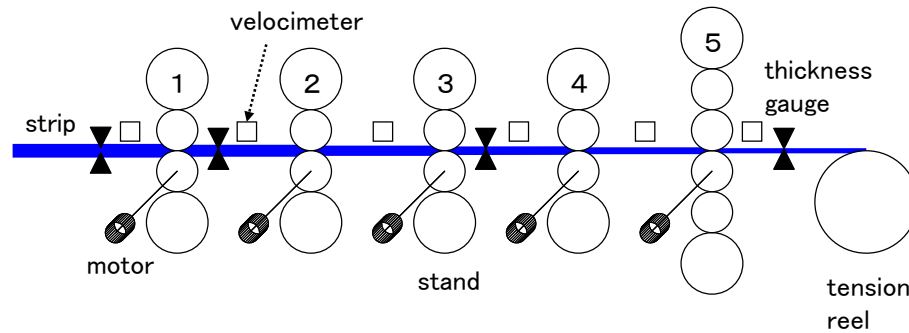
本章では、第 4.2 節で、最適化の対象であるパススケジュール [張力目標値]を説明し、第 4.3 節で、提案する張力カーブのテーブルの段階的な最適化の方法を示す。続いて、第 4.4 節で、最適化の手順をまとめ、第 4.5 節で実機適用結果を示す。

4.2 パススケジュール [張力目標値]

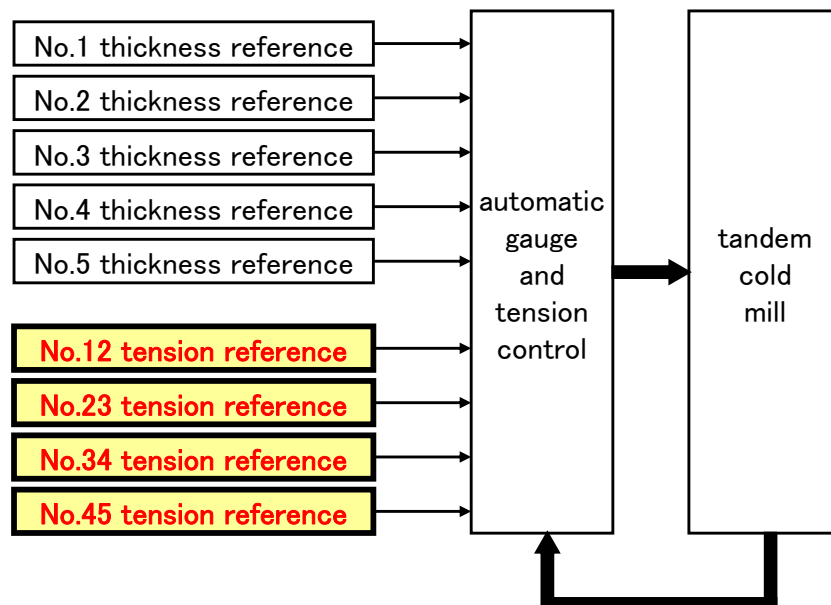
4.2.1 張力カーブ（張力目標値の圧延速度依存特性を示すカーブ）

対象となる圧延機は、第 2.8 図と同じ5スタンドの冷間タンDEM圧延機である(第 4.1 図)。板厚張力制御の手法としては、種々の手法が考えられるが⁴¹⁾、全スタンドの出側板厚および全スタンド間張力を制御する板厚張力制御系^{39,40)}を採用しており(第 4.2 図)、板厚張力制御系の目標値がパススケジュール、すなわち、スタンド出側板厚目標値とスタンド間張力目標値となる。ここで、全スタンド出側の板厚目標値は、一定に保たれるが、スタンド間張力の目標値は、圧延速度に応じて変更することとしている(第 4.3 図)。そして、前述のように、張力目標値と圧延速度の関係を張力カーブと呼んでいる。張力カーブを設ける理由は、加減速による摩擦係数等の変化のために生

じる圧延荷重変動や板厚変動を防止するためである。すなわち、張力目標値が、低速時にも高速時と同じ値であると、圧延荷重が増大することから、圧延荷重変動を張力変更により緩和し、荷重変動により生じる板厚変動を防止しようとするものである。

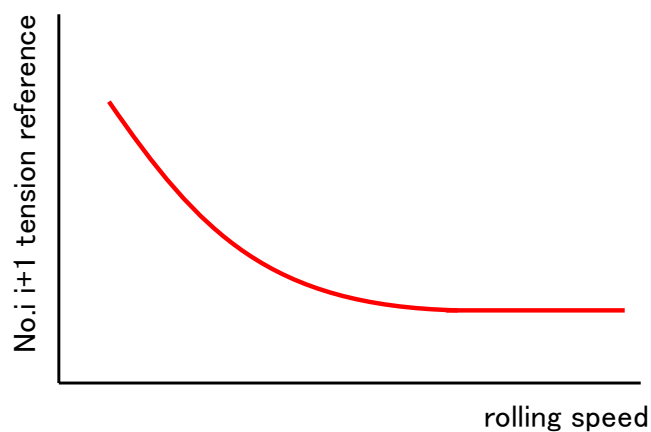


第 4.1 図 冷間タンデム圧延機



第 4.2 図 全スタンド出側板厚および全スタンド間張力を制御する板厚張力制御系

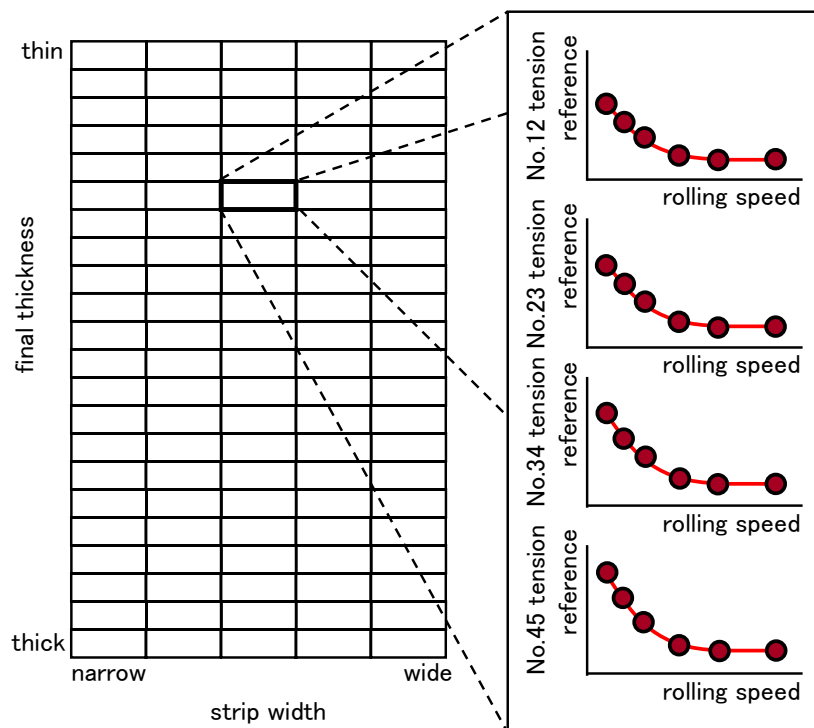
4 パススケジュール [張力目標値] の最適化



第 4.3 図 張力カーブ(圧延速度に応じて変更される張力目標値)

4.2.2 テーブル

張力カーブは第 4.4 図に示すように、板厚と板幅で分類されたテーブルに格納されている。具体的には、張力カーブの横軸、縦軸はそれぞれ、圧延速度、張力目標値となるが、第 4.4 図内の丸印で表される座標の値がテーブルの升目ごとに格納されている。



第 4.4 図 テーブルに格納された張力カーブ(張力目標値)

張力カーブは、基本的には低速時に大きくなるように設定する。これは、主に、摩擦係数が低速時に大きくなる⁵¹⁾からである。したがって、摩擦係数の変化に応じて適切に張力カーブを設定することが必要である。

一方、圧延材の強度を考慮すると、張力値には上限がある。このため、全ての升目において取り得る張力の上限、すなわち、低速時の張力の上限を制限する必要がある。

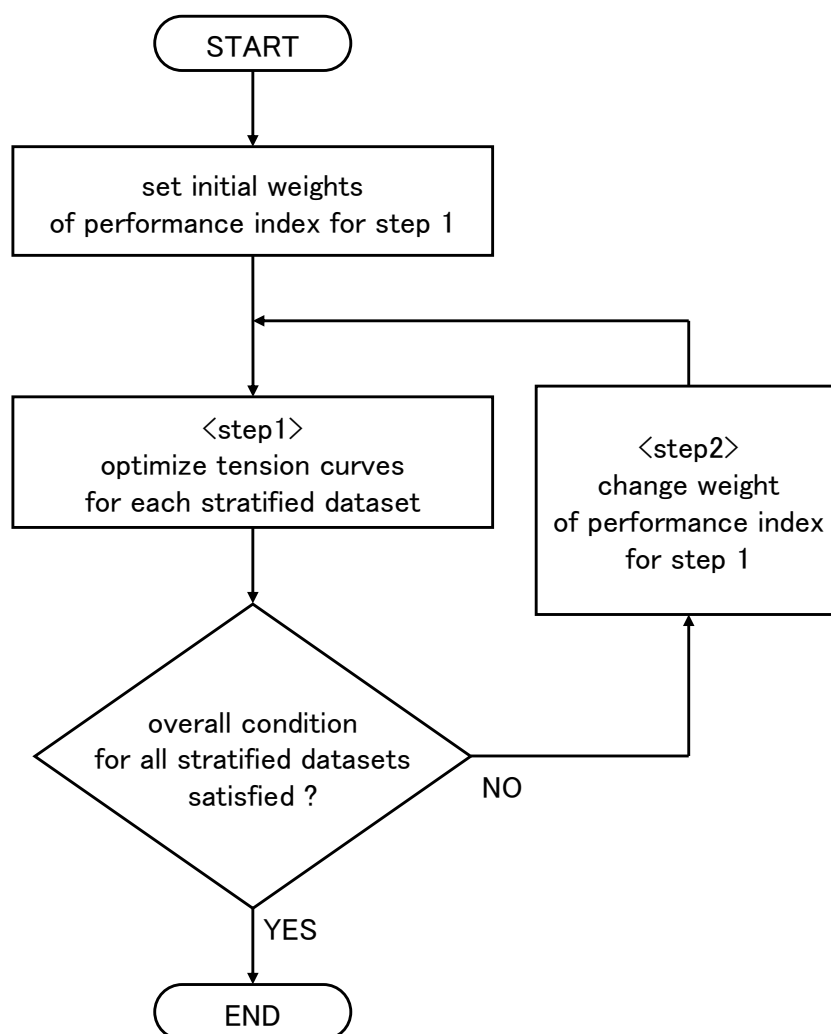
4.3 張力カーブのテーブルの段階的な最適化

張力カーブの最適化は2段階で行う(第 4.5 図)。1段階目では、板厚変動と荷重変動を含む評価関数の重みを仮に決定し、テーブルの各升目において、摩擦係数等の変化に対応した張力カーブを求める。ここでは、板厚張力制御系の特徴を利用し、圧延速度変化時の一定区間の時間での最適化を各時刻の最適化に部分問題化⁵⁴⁾し、最適化計算の時間短縮および安定化を図る。

2段階目では、テーブルの全升目の張力カーブが所定の条件を満たすように、1段階目の評価関数の重みを調整する。この重みがグローバルなパラメータとなり、全升目においても、張力目標値が上限を超えず、かつ、隣接する升目で張力カーブが類似し似た制御応答となる、等の条件を満たすように調整されることとなる。

以下、各段階の最適化について説明する。

4 パススケジュール [張力目標値] の最適化



第 4.5 図 2段階の張力カーブ(張力目標値)最適化フロー

4.3.1 各升目での最適化 <1段階目>

・最適化に用いる圧延モデル

冷間タンデム圧延機の場合、板厚精度だけでなく、操業の安定性や形状品質の観点からも、各スタンドの圧延荷重が重要である。

各スタンドの圧延荷重のモデル式は、第 2.3 節に記載したように、圧延理論に基づいてモデル化した(2.9)式を用いる⁴¹⁾。

$$P_i = P(H_1, H_i, h_i, q_{fi}, q_{bi}, k_i, \mu_i, w) \quad (4.1)$$

ここで、添字の i は No. i スタンドの値を示すものとする。 P_i : 圧延荷重、 H_1 : 原板板厚、 H_i : スタンド入側板厚、 h_i : スタンド出側板厚、 q_{fi} : 前方張力、 q_{bi} : 後方張力、 k_i : 変形抵抗、 μ_i : 摩擦係

数、 w : 板幅を示す。

なお、後述のように、減速時の荷重計算に(4.1)式((2.9)式相当)を用いるが、その際に、過去実績の減速パターンで得られているデータを基に、圧延荷重式を補正するものとする。具体的には、過去実績の減速パターンで、予め各時刻の圧延荷重の計算値を求めておき、各時刻の圧延荷重の実績値／計算値を、減速時の各時刻の圧延荷重計算時に、(4.1)式に乗じることとする。これにより、摩擦係数等を含んだ圧延モデルの誤差を補正することができる。

・1 圧延材での最適化

各升目での最適化は、圧延材ごとの最適化、升目内の全圧延材での平均化、関数近似の順に行う。

ここでは、減速時の板厚変動や荷重変動を低減することを考える(第 4.6 図)。理由は、低速から加速する加速時に比べて、定常から減速する場合の方が、板厚偏差が 0 近傍であるため、評価関数の計算が安定するからである。次の最適化問題を考える。

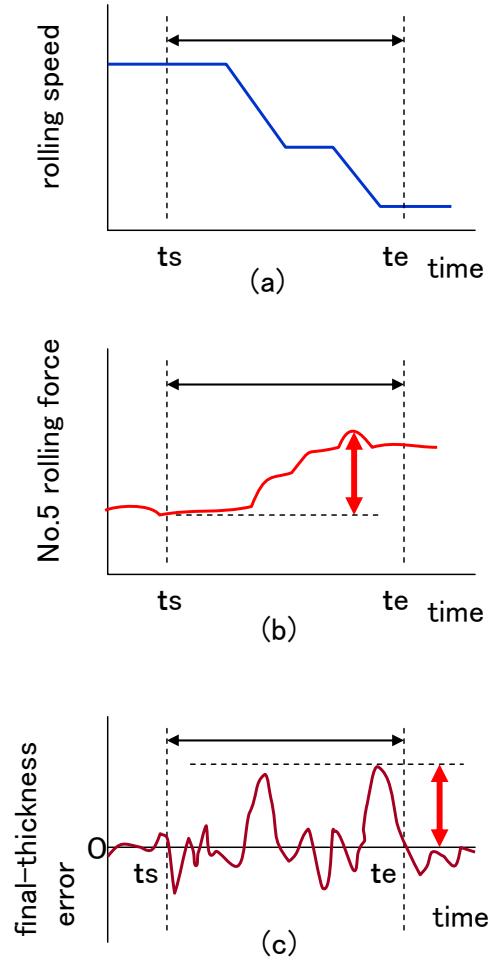
$$\begin{aligned} & \text{find } \{q_{fi d}(v_i)\} \\ & \text{which minimizes } J(q_{fi d}(v_i)) \\ & J = \int_{ts}^{te} \left(w_{hi} \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta h_i^2 + w_{pi} \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta P_i^2 + \sum_{i=1}^3 w_{qfi i+1} \cdot (q_{fi d} - q_{fi+1 d})^2 \right) dt \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで、添え字の d は、目標値を示す。また、 w_* は重みであり、 ts 、 te はそれぞれ、評価区間の開始、終了時刻である。

(4.2)式の評価関数 J は、減速時の各スタンドの圧延荷重変動(第 4.6 図)および出側板厚変動(第 4.6 図)を小さくすることを目的とする。なお、(4.2)式には、隣接するスタンド間張力目標値(張力カーブ)の差の項を含めている。これは、全スタンド間張力が加減速時に一様に変化するようにするためである。

この(4.2)式の評価関数 J を求める際には、上述の補正した圧延荷重式((4.1)式((2.9)式相当))や、スタンド出側板厚の式((2.4)式)、張力の式((2.29)(2.30)式)等の圧延モデルを用いる必要がある。

4 パススケジュール [張力目標値] の最適化



第 4.6 図 減速時の No.5 圧延荷重と最終板厚偏差

(4.2)式をサンプリング周期 Δt で、離散化すると、評価関数は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & \text{find } \{q_{fi\ k\ d}(v_i)\} \\
 & \text{which minimizes } J(q_{fi\ k\ d}(v_i)) \\
 & J = \sum_{k=1}^K \left(w_{hi} \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta h_{i\ k}^2 + w_{Pi} \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta P_{i\ k}^2 + \sum_{i=1}^3 w_{qfi\ i+1} \cdot (q_{fi\ k\ d} - q_{fi+1\ k\ d})^2 \right) \cdot \Delta t \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

ここで、添え字の k は、 k 番目のサンプリング時刻での値を示す。

この評価関数を用いた最適化では、評価関数値を計算するために、本来、減速区間の圧延のシミュレーションを行う必要がある。すなわち、圧延材の移送((2.31)式)、張力((2.29)(2.30)式)、板厚張力制御系^{39,40)}の動特性が存在するため、張力カーブを変更して評価関数を1回計算する毎に、評価する時間の最初から最後まで各時刻のスタンド出側板厚 $h_{i\ k}$ と圧延荷重 $P_{i\ k}$ を求める必要がある。

ところが、このシミュレーションには時間を要するため、最適化計算に要する時間が長くなる。また、シミュレーションに用いる圧延荷重式((4.1)式((2.9)式相当))、先進率式((2.5)式)等の圧延モデル式は、不連続であり、例えば、圧下率が負の場合は計算不能となる。このため、最適解探索の

場合、特に、連続性を前提とした最適化手法の場合には、不連続な領域に入った場合、計算が停止する場合がある。これは、評価区間の最初から最後まで時間の動的なシミュレーションを繰り返して、張力カーブを決定するため、シミュレーションの途中で計算不能となった場合、最適化計算が停止するからである。

一方、最適化問題においては、元の問題を関連性の低い小さな部分問題に分割することで、高速に安定して最適解を得られる場合がある^{32, 54)}。

そこで、板厚張力制御系を適用することを前提として、(4.3)式を近似することにより、部分問題に分割することを考える。

板厚張力制御系を適用する場合、理想的な条件として、制御系の応答の遅れを無視できるとして、また、(4.3)式における板厚偏差の項は荷重や張力の項より小さいことから、板厚と張力は常に目標値と一致すると近似する。

$$h_i = h_{id} \quad (i=1, \dots, 5) \quad (4.4)$$

$$q_{fi} = q_{fid} \quad (i=1, \dots, 4) \quad (4.5)$$

ここで、添え字の d は、目標値を示す。

このとき、(4.3)式は次のように近似できる。

$$\begin{aligned} & \text{find } \{q_{fikd}(v_i)\} \\ & \text{which minimizes } J(q_{fikd}(v_i)) \\ J &= \sum_{k=1}^K \left(w_{Pi} \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta P_{ik}^2 + \sum_{i=1}^3 w_{qfi+1} \cdot (q_{fikd} - q_{fi+1kd})^2 \right) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (4.6)$$

(4.6)式の評価関数 J は、動特性を含まない静的なモデル式である(4.1)式((2.9)式相当)のみから求められる。したがって、各時刻(サンプリング周期)で、(4.6)式の \sum の括弧内の成分を求めることができるため、(4.6)式は次の部分問題に分割される。

$$\begin{aligned} & \text{find } q_{fikd}(v_i) \\ & \text{which minimizes } J_k(q_{fikd}(v_i)) \\ J_k &= w_{Pi} \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta P_{ik}^2 + \sum_{i=1}^3 w_{qfi+1} \cdot (q_{fikd} - q_{fi+1kd})^2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

ここで、

$$J = \sum_{k=1}^K J_k \quad (4.8)$$

すなわち、各時刻のスタンド間の張力目標値を変数として、(4.7)式の最適化問題を解けばよいこととなる。この場合、張力目標値を各時刻のみで計算するため、最適化問題が小さくなっており、最適解を安定して得ることができる。また、この方法では、動的なシミュレーションを行う必要がな

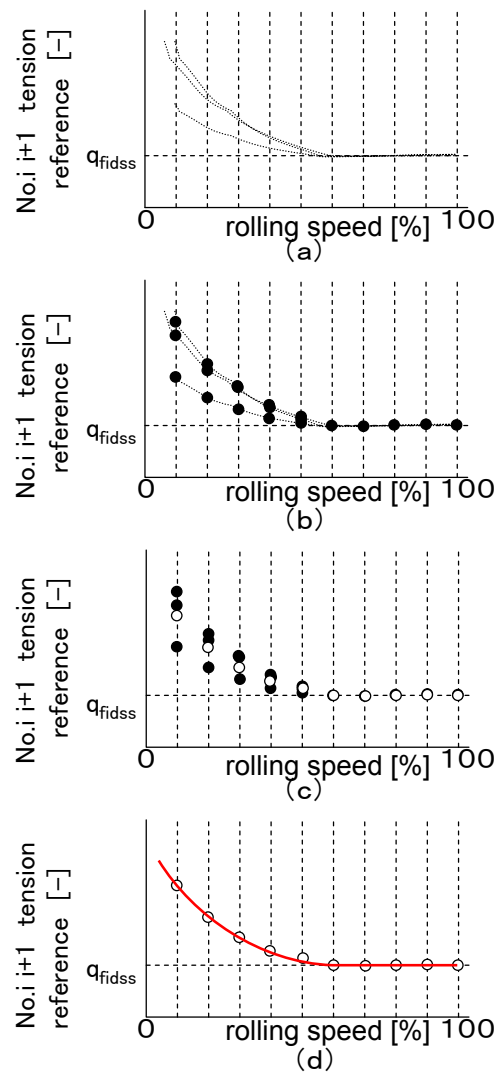
4 パススケジュール〔張力目標値〕の最適化

いため、最適化の計算時間を短縮できる。なお、もし一部の時刻で最適化不能な場合であっても、他の時刻の最適化計算に影響を及ぼさず、後でその時刻の結果のみを除去等すればよい。

ここで、制約条件として、上流側から下流側へ張力目標値が昇順になる条件を設けることとした。最適化には逐次2次計画法を用いた。

・1つの升目内での張力カーブの導出

1つの升目に3圧延材がある場合の例で説明する。上述の最適化により、圧延材ごとの、張力目標値と圧延速度の関係が求められる(第 4.7 図)。なお、図中の q_{fidss} は、既定の高速時の張力目標値である。所定の圧延速度時の張力目標値を内挿・外挿により求め(第 4.7 図(a)(b))、圧延速度ごとに平均を求め(第 4.7 図(c))、最後に平均の点を3次の曲線で近似する(第 4.7 図(d))。No.12、No.23、No.34、No.45 張力について同様の計算を行うことにより、圧延材が存在する升目の張力カーブが求められる。

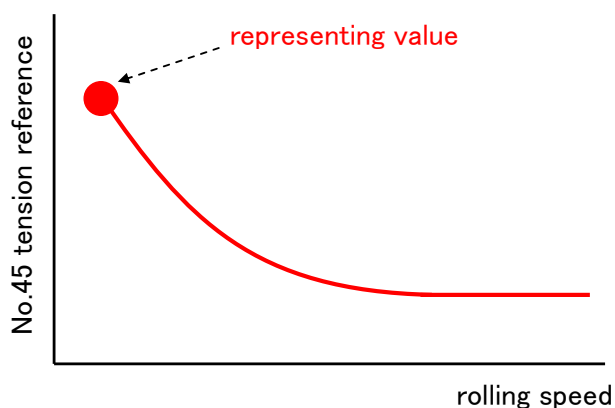


第 4.7 図 張力カーブ(張力目標値)テーブルの1つの升目での
張力カーブ(張力目標値)の導出手順

4.3.2 全升目での最適化 <2段階目>

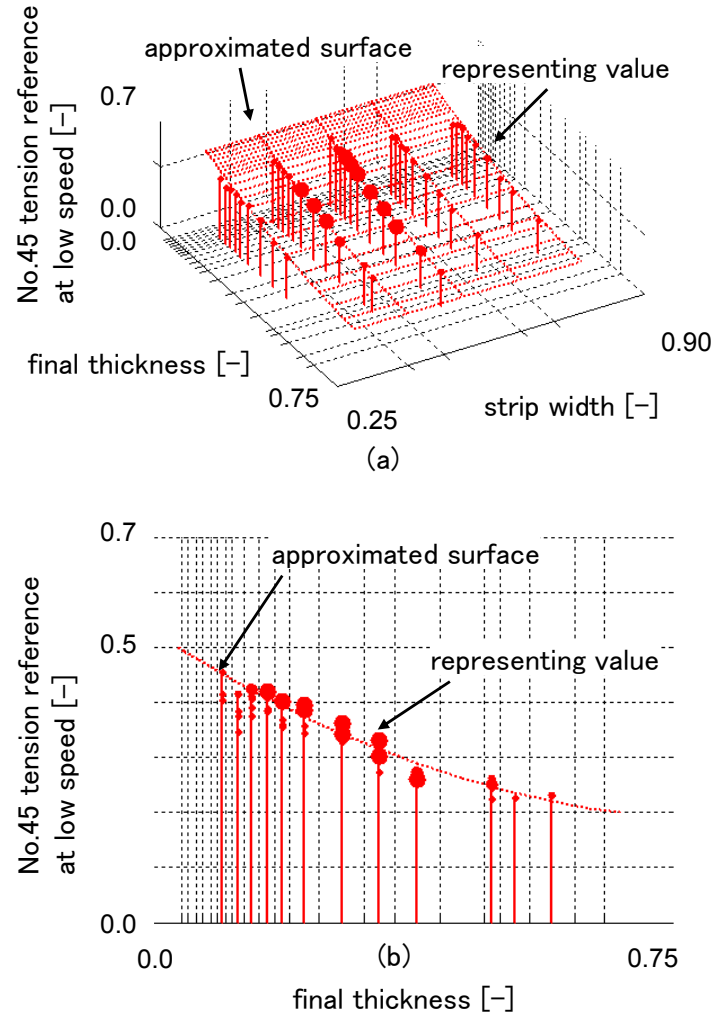
第 4.3.1 節で圧延材が存在する升目について、張力カーブが得られたが、升目の中には、圧延材のデータがない升目が存在する。現在はデータがない升目でも、将来に圧延される場合があるため、これらの升目に対する張力カーブを求めることが必要である。また、テーブルの端部である、薄板厚・厚板厚、狭板幅・広板幅の升目で圧延材のデータがないことが多いため、内挿だけでなく、外挿が必要である。そこで、第 4.8 図のように、最終スタンドの低速時の後方張力、すなわち No.45 張力カーブの低速時の値を、代表値として、全升目の代表値の近似曲面を作成することを考える。

4 パススケジュール [張力目標値] の最適化



第 4.8 図 張力カーブ(張力目標値)の代表値

第 4.9 図中の丸印は、全升目で、第 4.3.1 節の各升目での張力カーブ最適化で得られた代表値、すなわち、No.45 張力カーブの低速時の値の 3 次元プロットを 2 方向から見た図である。丸印の大きさは、各升目内の圧延材の数を示す。この丸印の代表値を、圧延材数の重みをつけて 3 次の曲面で近似した。この近似曲面は、第 4.9 図(a)(b)では、それぞれ、曲面と曲線で表わされている。ここで、全升目での最適化の試行により、代表値の板幅依存性が小さいことが判明したため、板幅には依存しないとしている。なお、図中の板幅、板厚、代表値はそれぞれ無次元化した値である。



第 4.9 図 張力カーブの代表値 (No.45 張力の低速時の値) の曲面近似

次に、近似曲面をさらに最適化することを考える。代表値である低速時の No.45 張力が最大となるのは、板厚が最小の升目での張力である。張力カーブ変更により、圧延荷重増大や板厚変動を抑制可能であるが、過大な張力は板破断等の原因となる場合がある。そこで、最薄板厚の升目での代表値を、2段階目の最適化により適正化することとした。最適化においては、簡単のため、(4.7)式の評価関数の重みの1つである w_{qf34} のみを、調整することとした。

2段階目の最適化の評価関数は次のように設定した。

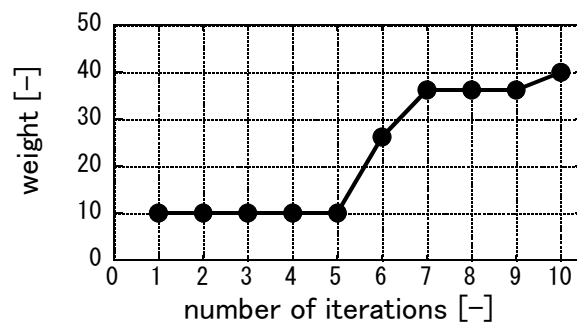
$$\begin{aligned} &\text{find } w_{qf34} \\ &\text{which minimizes } J'(w_{qf34}) \end{aligned}$$

4 パススケジュール [張力目標値] の最適化

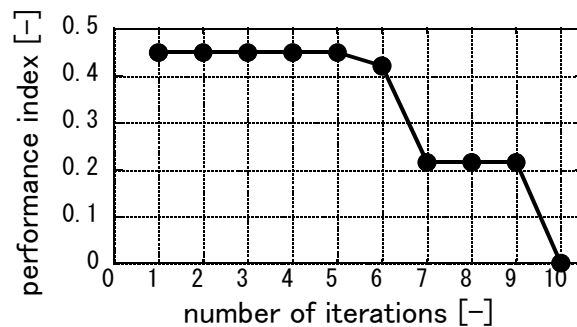
$$J' = (q_{f4 \text{ thin lowspeed}} (w_{qf34}) - 0.54)^2 \quad (4.9)$$

ここで、 $q_{f4 \text{ thin lowspeed}}$: 最薄板厚での升目の代表値(低速時張力)である。また、0.54 は、最薄板厚での升目の低速時張力として設定したい値(無次元)である。最適化手法としては、1変数であるため、黄金分割法⁵⁵⁾を用いた。

重みと評価関数の収束のようすを第 4.10 図に示す。10回の反復計算で収束している。また、全升目の代表値の近似曲面の最適化結果を第 4.11 図に示す。

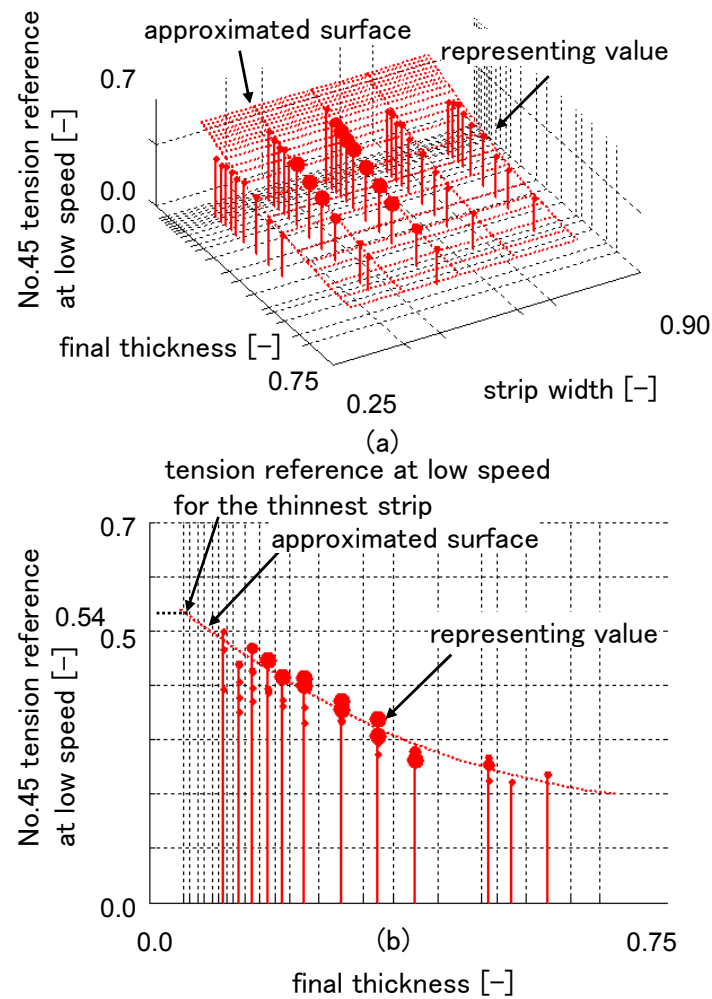


(a)



(b)

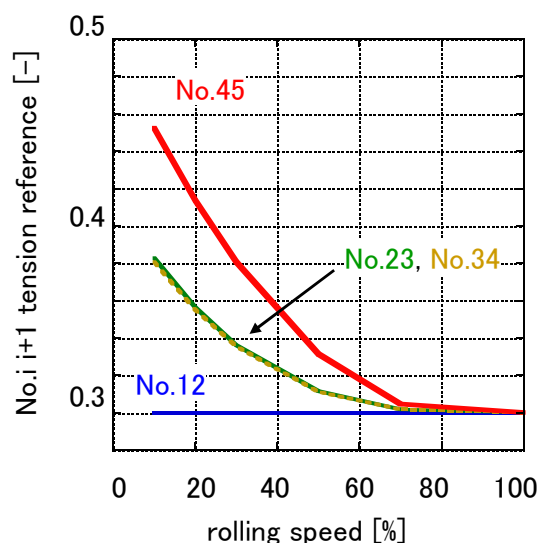
第 4.10 図 1 段階目の最適化の評価関数の重み(2段階目の最適化変数)の収束と、
2段階目の最適化の評価関数の収束



第 4.11 図 全升目の張力カーブの代表値 (No.45 張力の低速時の値) の近似曲面の最適化結果
(2段階目の最適化)

最薄板厚での升目の低速時張力が設定通りの 0.54 となっていることがわかる。この場合の、ある1つの升目の張力カーブを第 4.12 図に示す。例えば、No.45 張力が、低速時は高速時の約 1.5 倍に設計されていることがわかる。

4 パススケジュール [張力目標値] の最適化



第 4.12 図 最適化された張力カーブ(張力目標値)の例
(2段階の最適化の結果)

また、過去の実績データがない升目の張力カーブについては、低速時の張力目標値が近似曲面により与えられ、高速時の張力目標値は別途設定されているため、これらの値と、張力カーブが得られている近傍の升目の張力カーブとから、縦軸方向に拡大・縮小することにより決定した。

4.4 最適化の手順

以上より、パススケジュール[張力目標値]、すなわち、張力カーブの設計手順は次のようになる。

第 4.5 図に基づき、2段階の最適化を行う。

1段階目の最適化では、各升目について、(4.7)式の最適化問題を解く(このときの(4.7)式中の重み w_{gf34} は、2段階目の最適化での最適化変数となる。)。そして、第 4.7 図の手順により、各升目での張力カーブ(張力目標値)を求める。

次に、2段階目の最適化では、各升目で求められた張力カーブの代表値(第 4.8 図)を用いて近似曲面(第 4.9 図)を求め、その近似曲面を、(4.9)式の最適化問題を解くことにより最適化する。このときの最適化変数は、上述のように、1段階目の最適化の評価関数(4.7)式中の重み w_{gf34} であり、2段階目の最適化では、1段階目の最適化を繰り返し行うこととなる。

2段階目の最適化により、すべての升目において、張力カーブの代表値が得られる。また、実績

データがある升目については、張力カーブが得られる。

過去の実績データがない升目の張力カーブについては、第 4.3.2 節に記載のように、高速時の張力目標値は別途設定されているため、これらの値と、張力カーブが得られている近傍の升目の張力カーブとから、縦軸方向に拡大・縮小することにより決定する。

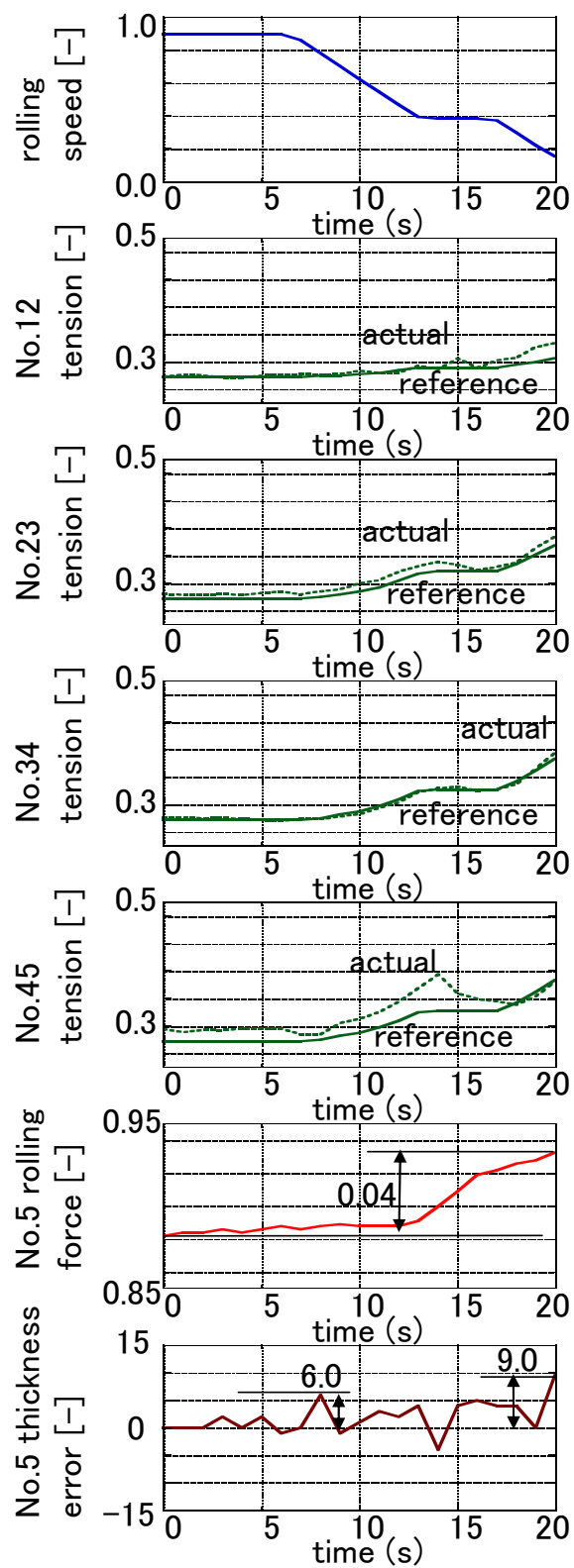
以上より、全升目の張力カーブを計算でき、全升目の全速度範囲で No.45 張力目標値が一定の値以下に抑制されることとなる。

4.5 実機適用結果

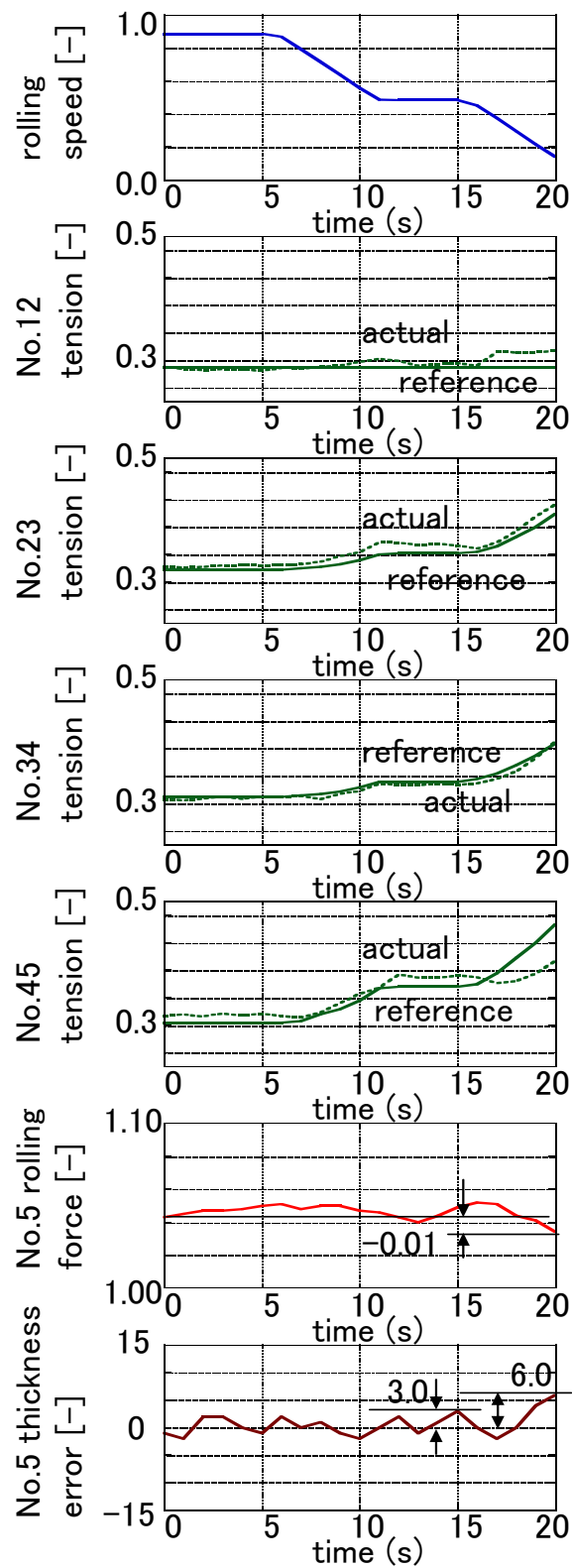
冷間タンデム圧延機における新張力カーブ適用前後の圧延実績を、第 4.13 図と第 4.14 図に示す。減速時の No.5 荷重変動が抑制され、減速開始時や減速終了時の板厚精度が向上していることがわかる。また、ある升目での No.5 圧延荷重とオフゲージ長さ(板厚公差外れ長さ)のヒストグラムを第 4.15 図に示す。なお、オフゲージ長さは、無次元化している。新張力カーブ適用により、減速時のオフゲージ長さが平均で37%減少した。

また、設計時に実績データがなかった升目での圧延実績を第 4.16 図に示す。圧延荷重変動が抑制され、板厚変動が小さいことがわかる。なお、今後、さらにデータを蓄積してオフゲージ長さの定量的な評価を予定している。

4 パススケジュール [張力目標値] の最適化

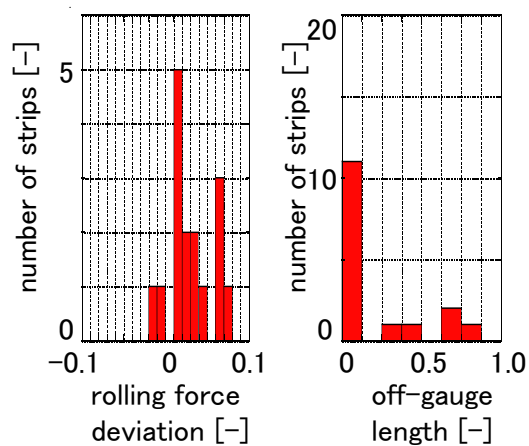


第 4.13 図 張力カーブ(張力目標値)最適化前の圧延実績

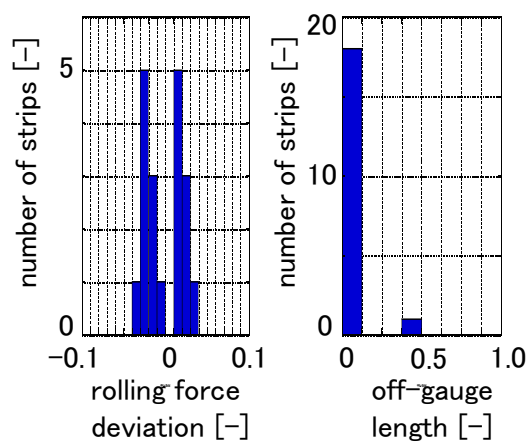


第 4.14 図 張力カーブ(張力目標値)最適化後の圧延実績

4 パススケジュール [張力目標値] の最適化

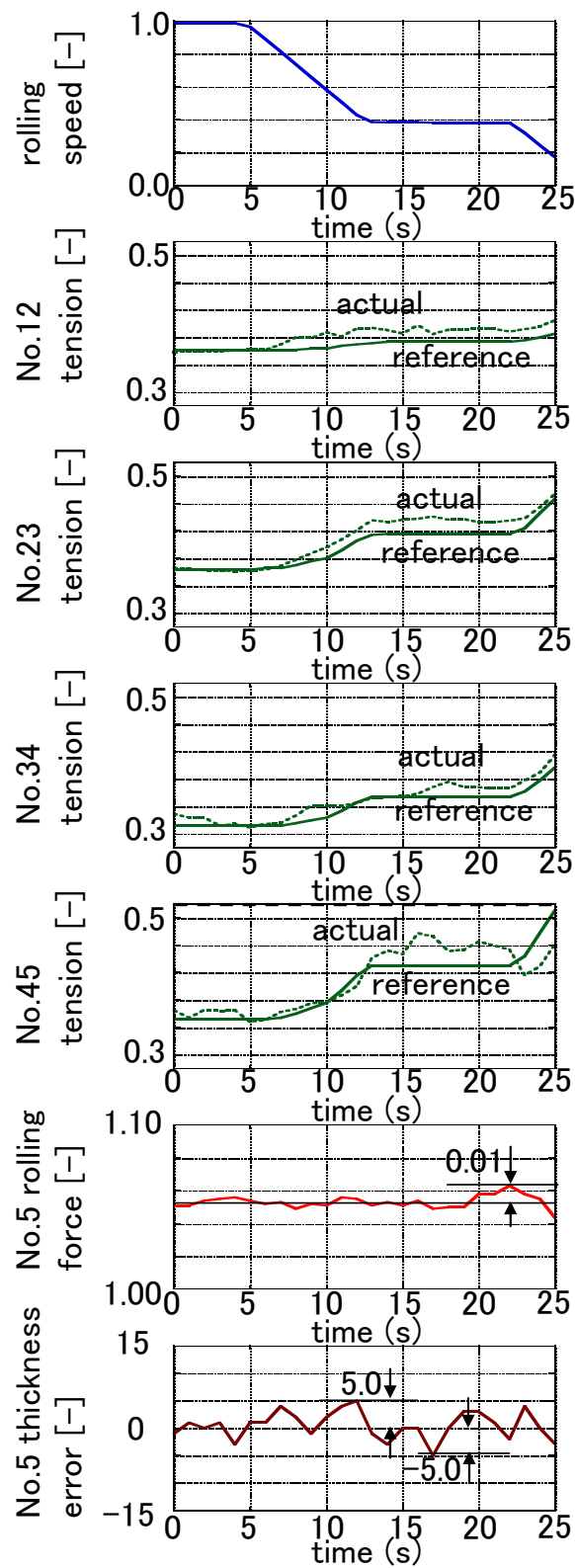


(a) before optimization



(b) after optimization

第 4.15 図 張力カーブ(張力目標値)最適化前後の圧延荷重とオフゲージ長さのヒストグラム



第 4.16 図 張力カーブ(張力目標値)最適化後の圧延実績
(設計時に実績データがなかった升目での結果)

4 パススケジュール〔張力目標値〕の最適化

4.6 結言

板厚張力制御系の張力目標値について、圧延速度に依存した張力目標値(張力カーブ)を最適化した。板厚張力制御系の特性を利用し、最適化問題を、静的な圧延モデルのみを用いた部分問題とすることにより計算時間を短縮し、安定して最適解が得られるようにした。また、最終スタンド上流側張力の張力カーブの最大値を代表値と定め、テーブル全体の張力カーブの代表値の近似曲面を用いることにより、段階的な最適化を行った。これにより、テーブル全体で滑らかな張力カーブ代表値を持つような設計が可能となり、加減速時においても、パススケジュール(スタンド出側板厚目標値とスタンド間張力目標値)が適正化された。

実機適用の結果、減速時のオフゲージ長さが平均で37%減少することを確認した。

5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）

5.1 緒言

第3章、第4章の最適化により、定常部、加減速部のパススケジュールの初期設定値が最適化され、圧延状態が適正化される。しかし、パススケジュール設計に用いた圧延モデルと、実際に圧延される鋼板の性質や実際の圧延状態との間には、必ず誤差が存在する。また、鋼板が徐々に硬くなる等により、圧延中にモデルとの誤差が大きくなる場合も存在する。板厚張力制御系^{1,2,3,4,39,40)}は板厚や張力を制御するが、各スタンドの圧延荷重やモータ電流は直接的には制御されず、板厚や張力の値に依存して定まることとなる。したがって、誤差により圧延荷重やモータ電流が適切でない場合や、鋼板の硬度の長手方向の変化により圧延中に圧延荷重やモータ電流が不適切になる場合がある。

このため、次のような課題が残っていた。

1つめは、圧延荷重の変動による形状品質の劣化である。原板の変形抵抗が長手方向に変動する場合や、摩擦係数が圧延中に変化する場合には、各スタンドの圧延荷重が変動し、急峻度等の形状品質の劣化を招き、さらに変動が過大な場合には、中伸びや耳波等の形状不良を生じる。この場合、板厚や張力を適切に変更し、圧延荷重変動を他スタンドに分散し低減できれば、形状不良を防止することができる。

2つめは、モータ電流が定格値を超えることによる生産性の制限である。原板の変形抵抗のばらつき等によって、初期設定した板厚や張力のままであると、最高圧延速度に達する前に、全スタンドのモータ電流の一部が定格値を超える場合があり、圧延速度を増加できず、生産性の上限となる。従来は、初期設定される板厚や張力の精度を高める方法や、熟練オペレータが板厚張力制御系(AGTC)を一時的に切り、手動操作により板厚や張力を直接変更する方法により対応していたが、精度向上には限界があり、また、手動操作では最終板厚の変動を生じることもあった。この場合に、定格を超えていない他スタンドのモータに負荷を分散することができれば、圧延速度を増加することができる。

そこで、板厚張力制御系(AGTC)を前提とした上で、AGTCでは制御しなかった圧延荷重やモータ電流の全スタンドにおける分布パターン(ミルのバランス)を制御する手法を新たに開発した。本論文では、この手法をミルバランス制御(MBC: Mill Balance Control)と呼ぶこととする。

ミルバランス制御は、従来の板厚張力制御系に新たな制御ループを付加し、多変数のカスケード制御系を構成するものである。

設計手法としては、最適性が保証された解が解析的に得られ調整が容易なILQ設計法を用いた。8入力8出力の制御系を構成し、実機適用の結果、圧延条件の誤差等により一部のスタンドのモータ電流が過大な場合であっても、圧延速度の減速なしにモータ電流を低減でき、生産性を高く維持することができ、また、圧延荷重変動を抑制し良好な板形状を確保し、最終板厚の精度が維持されることを確認した。

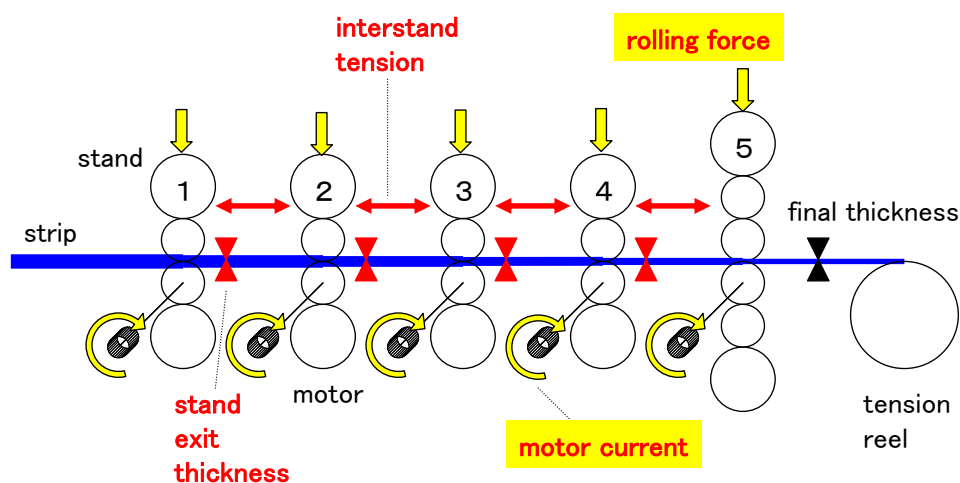
5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）

本章では、まず、第 5.2 節で、ミルバランス制御の概要を述べ、次に、第 5.3 節で、ILQ設計法を用いたミルバランス制御の設計について設計手法を提案し設計する。続いて、第 5.4 節で、実機適用結果を示す。

5.2 ミルバランス制御の概要

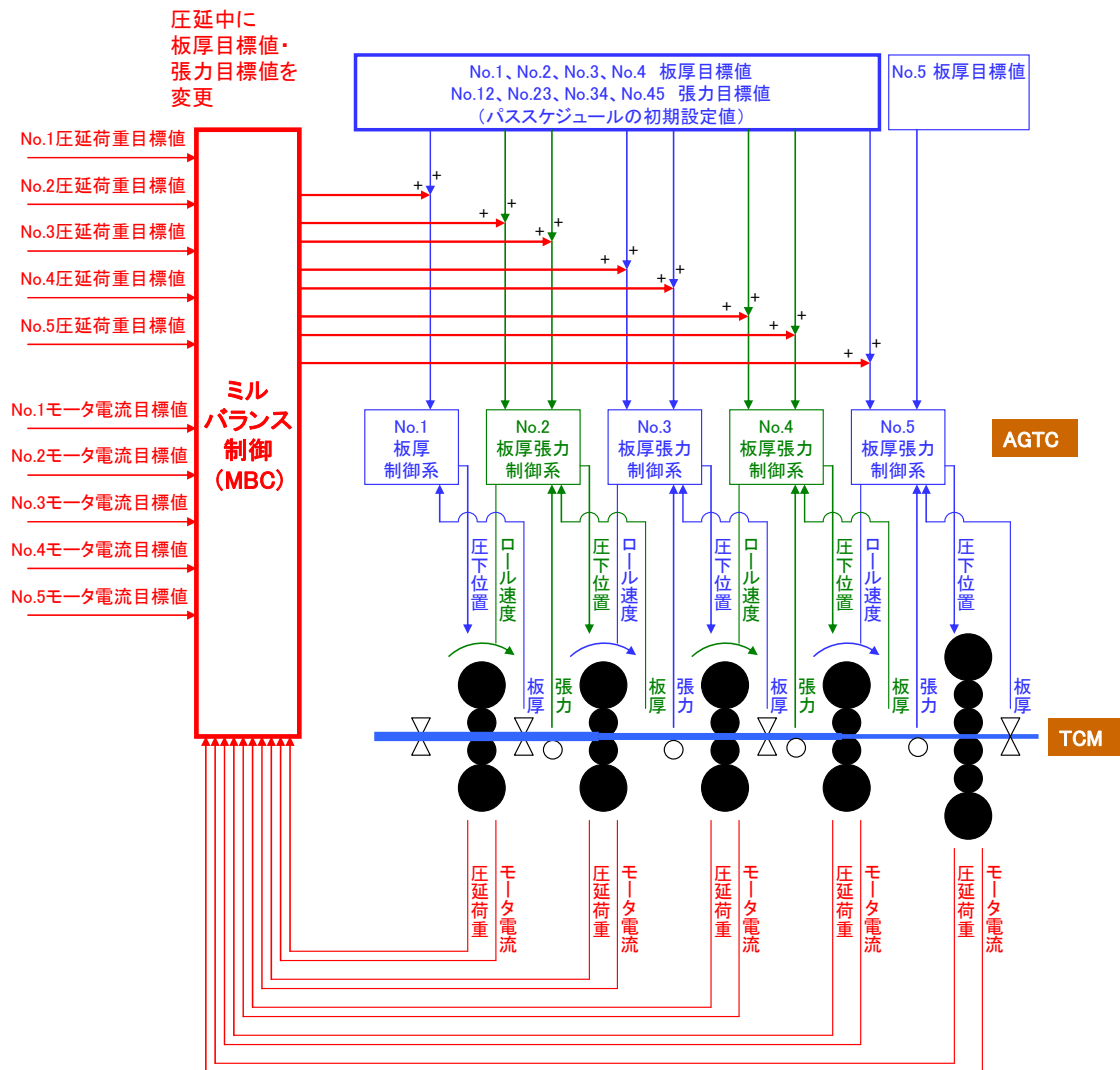
第 5.1 図は、制御対象の5スタンドの冷間タンデム圧延機を示す。第 2.8 図と同じである。板厚張力制御系 (AGTC) が最終板厚を含む全スタンド出側板厚と、全スタンド間張力とを、目標値に制御する。そして、望ましい圧延荷重やモータ電流に制御するために、AGTCループに新しい制御ループを付加し、カスケード制御系⁵⁶⁾を構成し(第 5.2 図)、この制御系をミルバランス制御 (MBC)⁵⁷⁾と呼ぶ。

ミルバランス制御は、最終板厚以外のスタンド出側板厚と全スタンド間の張力の目標値を変更する。



第 5.1 図 冷間タンデム圧延機

5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）



第 5.2 図 ミルバランス制御系の概要

5.3 ILQ設計法を用いたミルバランス制御の設計

5.3.1 設計に用いる制御対象のモデル

ミルバランス制御(MBC)の制御対象は、冷間タンデム圧延機と板厚張力制御系(AGTC)からなる。モデルの作成に際しては、MBCに適したモデルを作成することとした。

圧延荷重やモータ電流等の全変数は、スタンド間張力および板厚張力制御系により互いに干渉し、最も遅い応答時定数は共通である。これは、どのスタンド出側板厚や、どのスタンド間張力を操作しても、その影響がNo.1スタンドに及び、No.1スタンド直下で生じた板厚変化部分が最終スタンドであるNo.5スタンドを通過し、AGTCにより制御された後に、全スタンドの圧延荷重およびモー

5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）

タ電流が整定することとなるからである。したがって、最も遅い応答の時定数は、鋼板の移送による変動や、板厚張力制御系の応答による変動が収束する時定数となる。

ここで、圧延機とAGTCからなる系は、厳密には2次以上の高次系であり、本来は2次以上の動特性を考慮したモデルとすべきであるが、次の理由により、1次遅れのモデルとした。

すなわち、MBCでは、カスケード制御ループを構成するが、制御の安定性確保の観点から、主ループにあたるMBCの帯域幅は、副ループにあたるAGTCの帯域幅の数分の1以下に設定する必要がある^{58,59)}。このため、副ループに2次系の固有周波数が存在したとしても、主ループの緩やかな入力に対しては応答の大きさは小さく十分に整定すると考えられる。ここで、制御対象をモデル化する際には、モデルに取り込めない無数の寄生的要素を考慮し、制御目的に応じて近似のレベル(モデルの次数)を決定する^{60,61,62)} 必要がある。MBCの設計に際しては、前述のようにMBCの応答が緩やかであることから、制御対象の1次遅れの応答が支配的であり、2次以上の応答はほとんど現れず、寄生的な要素と考えることができ、制御対象を1次遅れと近似できる。

また、制御対象は非線形な系であるが、線形化を行った。これにより、圧延機とAGTCの物理的な特性を記述しMBC設計に適したモデルが得られることになる。

$T_{m\&c}$ を上記1次遅れの時定数とすると、制御対象のモデルは、状態方程式として以下のように得られた。

$$\dot{x}_{m\&c} = A \cdot x_{m\&c} + B \cdot u \quad (5.1)$$

ここで、

$$x_{m\&c} = \left[\frac{\Delta P_1}{P_1}, \frac{\Delta P_2}{P_2}, \frac{\Delta P_3}{P_3}, \frac{\Delta P_4}{P_4}, \frac{\Delta P_5}{P_5}, \frac{\Delta G_1}{G_1}, \frac{\Delta G_2}{G_2}, \frac{\Delta G_3}{G_3}, \frac{\Delta G_4}{G_4}, \frac{\Delta G_5}{G_5} \right]^T$$

$$u = \left[\frac{\Delta h_1}{h_1}, \frac{\Delta h_2}{h_2}, \frac{\Delta h_3}{h_3}, \frac{\Delta h_4}{h_4}, \frac{\Delta q_{f1}}{q_{f1}}, \frac{\Delta q_{f2}}{q_{f2}}, \frac{\Delta q_{f3}}{q_{f3}}, \frac{\Delta q_{f4}}{q_{f4}} \right]^T$$

$$A = -\frac{1}{T_{m\&c}} \cdot I \quad (5.2)$$

$$B = \frac{1}{T_{m\&c}} \cdot A_{u_to_x} \quad (5.3)$$

$$A_{u-to-x} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} & a_{15} & 0 & 0 & a_{18} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} & a_{25} & a_{26} & 0 & a_{28} \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} & a_{37} & a_{38} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 & a_{47} & a_{48} \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & 0 & 0 & 0 & a_{58} \\ a_{61} & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} & 0 & 0 & a_{68} \\ a_{71} & a_{72} & 0 & a_{74} & a_{75} & a_{76} & 0 & a_{78} \\ 0 & a_{82} & a_{83} & a_{84} & 0 & a_{86} & a_{87} & a_{88} \\ 0 & 0 & a_{93} & a_{94} & 0 & 0 & a_{97} & a_{98} \\ 0 & 0 & 0 & a_{10,4} & 0 & 0 & 0 & a_{10,8} \end{bmatrix}$$

P_i : 第 i スタンドの圧延荷重

G_i : 第 i スタンドのモータ電流

h_i : 第 i スタンド出側板厚

q_{ji} : 第 i 、 $i+1$ スタンド間張力

a_{ij} : 圧延モデルと板厚張力制御方法から定まる係数

ΔG_i は i 番スタンドのモータ電流偏差であり、 ΔP_i は i 番スタンドの圧延荷重偏差である。

なお、 $x_{m\&c}$ 、 u の各要素の分母の G_i と P_i は、正規化のための公称値であり、最大圧延速度で
の値を用いる。

このように、圧延荷重およびモータ電流のすべてのバランスを考慮することで、圧延荷重とモータ電流の両方を制御できる。

操作量 u は8要素であり、独立に制御可能な変数は8要素であるため、制御量 $y_{m\&c}$ も8要素とし、10要素の変数からなる $x_{m\&c}$ から $y_{m\&c}$ への変換行列を C とする。このとき、出力方程式は下記のようになる。

$$y_{m\&c} = C \cdot x_{m\&c} \quad (5.4)$$

C 行列の具体的な選定方法については、後述する。

5.3.2 ILQ設計法によるフィードバック補償

最適レギュレータ(LQ)設計法においては、評価関数の重みを指定するが、閉ループ応答などの工学的な仕様と明確に結びついていないのでその選定が本質的に難しく、実用上の難点となっている。

ILQ設計法^{43, 44, 45)} は、最適制御の逆問題の結果を応用し、入出力応答波形を設計仕様として与え、何かの重みに関して最適であるような状態フィードバック制御則を求める設計法であり、各

5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）

入出力応答波形を独立に指定でき、フィードバックゲインが解析的に得られる等の利点がある。

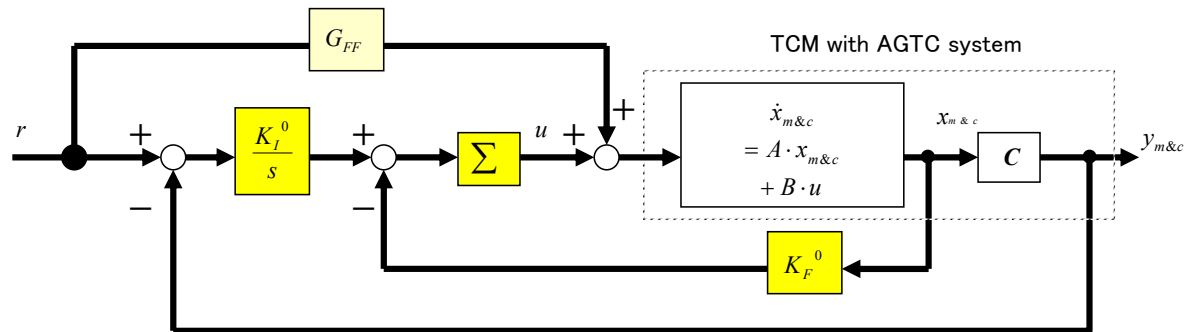
ILQ設計法では、まず、非干渉化制御理論より、応答波形の時定数を設計パラメータとして、対象システムの係数行列から基準最適ゲインと呼ばれる K_F^0 、 K_I^0 を決定し、次に、操作量と制御量のトレードオフにより、ゲイン調整パラメータと呼ばれる σ_i を対角要素にもつ $\Sigma = \text{Diag}(\sigma_i)$ を決定することとなる。

(5.1)、(5.4)式で表される制御対象は干渉のある多変数系である。多変数制御系としては、LQ制御、 H^∞ 制御、非干渉PI制御等が考えられるが、最適性と安定性の確保および調整の容易さを目的として、前述のILQ設計法を用いた。本設計法は、圧延プロセス以外にも広く用いられており⁶³⁾、モデルベースの多変数制御に有効である。

特に、ミルバランス制御においては、カスケード制御系の主ループの応答性を指定する必要があることから、応答波形の時定数を設計仕様として決定できるILQ設計法が適している。

ILQ設計法における相対次数⁴⁵⁾ はすべて1であり、非干渉化行列⁴⁵⁾ は正則である。また、制御対象の動特性を1次遅れで近似したので、不安定零点はなく、ILQ設計法適用の前提条件を満たしている。

第 5.3 図は、ILQ設計法に基づいたMBCのブロック図を示す。なお、本図では、ILQ設計法によるフィードバック補償以外に、後述のフィードフォワード補償も記載している。



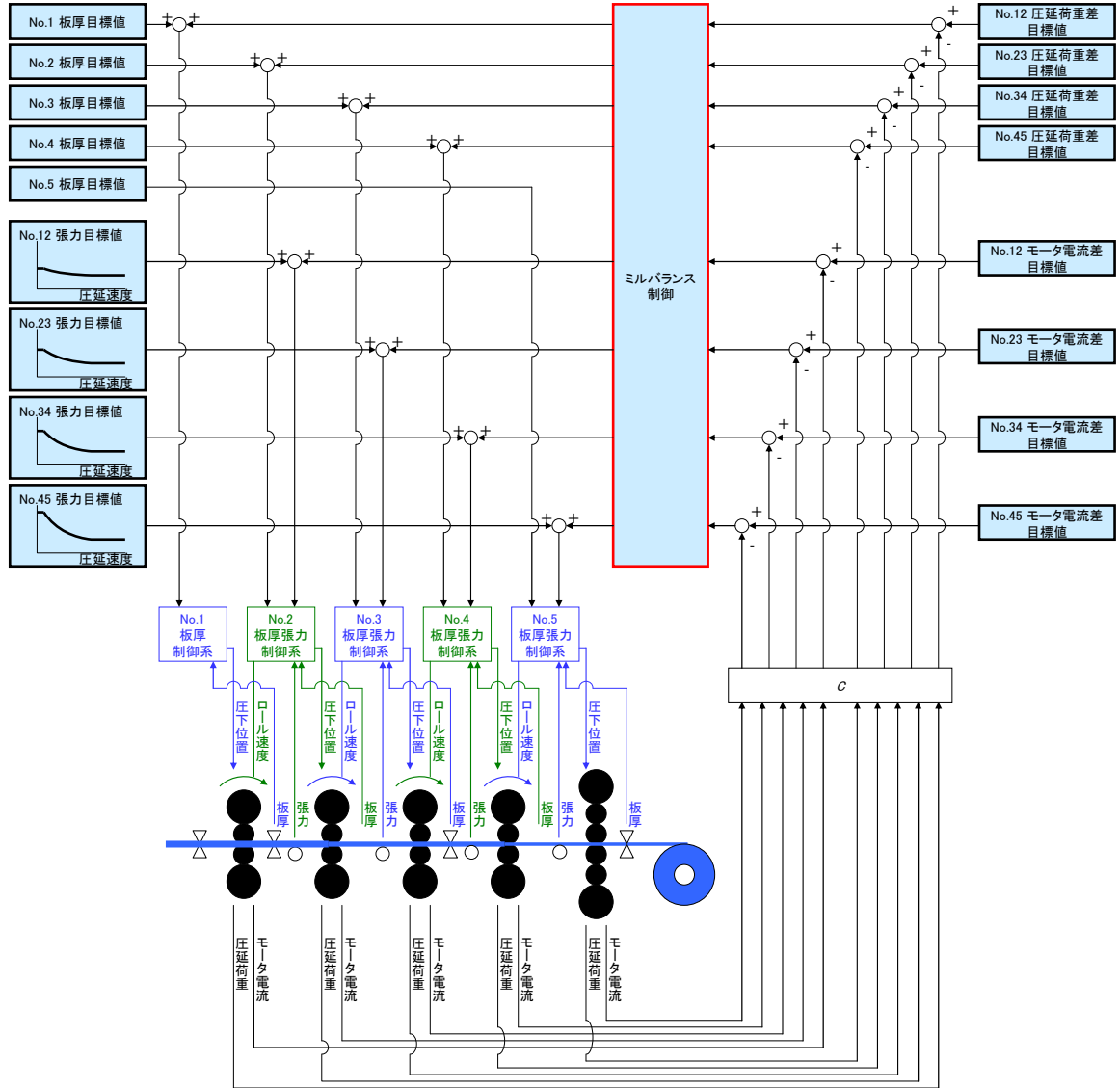
第 5.3 図 ILQ設計法に基づいたミルバランス制御系のブロック図

ミルバランス制御を含めた制御系全体図は、第 5.4 図のようになる。なお、従来の制御系は、第 2.15 図である。ミルバランス制御により、パススケジュール(板厚目標値と張力目標値)がオンラインで変更される。

ここで、No.12 圧延荷重差目標値とは、No.1 スタンド圧延荷重と No.2 スタンド圧延荷重の差を意味する。No.23～No.45 圧延荷重差目標値、No.12～No.45 モータ電流差目標値についても同様である。

なお、圧延荷重差目標値とモータ電流差目標値については、後で詳説するが、差を求めるときに、圧延荷重やモータ電流について、正規化や定数倍を行う。

5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）



第 5.4 図 ミルバランス制御を含めた制御系全体図

ここで、第 i 操作量から、第 i 制御量までの応答時定数を T_{mbci} ($i=1, \dots, 8$) とする。これらの値は後で設計仕様として指定する。

基準最適ゲイン K_F^0 と K_I^0 は、下記のように陽な形で得られる。

$$K_F^0 = T_{m\&c} \cdot [C \cdot A_{u_to_x}]^{-1} \cdot C \quad (5.5)$$

$$K_I^0 = T_{m\&c} \cdot [C \cdot A_{u_to_x}]^{-1} \cdot \text{Diag}\left(\frac{1}{T_{mbc1}}\right) \quad (5.6)$$

なお、 $\text{Diag}\left(\frac{1}{T_{mbc1}}\right) = \text{Diag}\left(\frac{1}{T_{mbc1}}, \frac{1}{T_{mbc2}}, \dots, \frac{1}{T_{mbc8}}\right)$ である。

K_F^0 と K_I^0 は、それぞれ 8×10 、 8×8 の行列となる。LQ設計法のように、リカッチ方程式を解く

必要はなく、 H^∞ 制御のように制御器の次数が増大することもない。また、非干渉PI制御と異なり、最適性や安定性が保証された制御器となる。

なお、フィードバック制御則は、第 5.3 図、(5.5)(5.6)式より、次のようになる。

$$\begin{aligned} u &= -\Sigma \cdot K_F^0 \cdot x_{m\&c} - \Sigma \cdot \frac{K_I^0}{s} \cdot y_{m\&c} \\ &= -\Sigma \cdot [C \cdot A_{u_to_x}]^{-1} \cdot T_{m\&c} \cdot \left[I + \text{Diag}\left(\frac{1}{T_{mbci}s}\right) \right] \cdot y_{m\&c} \end{aligned} \quad (5.7)$$

ここで、安定性確保の観点から、MBCの応答が、圧延機とAGTCの応答の数倍以上緩やかになるように^{58,59)}、ILQ設計パラメータである時定数 T_{mbci} ($i=1, \dots, 8$)とゲイン調整パラメータ σ_i ($i=1, \dots, 8$)を調整するものとする。この場合、 σ_i を大きくすると指定する応答に近づくという特長を利用することができる。

次に、出力方程式(5.4)式の行列 C の決定方法について述べる。制御すべき圧延荷重とモータ電流は、合計10個であるが、非干渉化条件を満たすため、制御量ベクトル $y_{m\&c}$ は、操作量ベクトル u と同じ8要素でなければならない。そこで、外乱の影響を全スタンドに分散させるという観点から $y_{m\&c}$ の要素を選択し、行列 C を決定することとした。

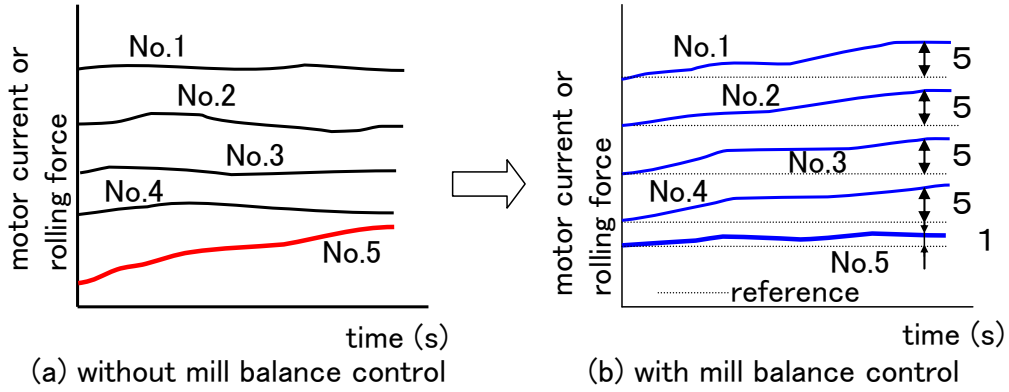
外乱としては、例えば、原板の変形抵抗や板厚の変動や摩擦係数の変化等が挙げられる。板厚だけでなく張力をも制御するとき、張力制限制御が行われる場合がある。しかし、外乱が大きく張力制限を超える場合には、外乱の影響は圧延荷重の変動として現れる⁴¹⁾。MBCがないときには、荷重変動が抑制されない。実際の圧延においては、第 5.5 図の概略図に示すように、最終スタンドの荷重が変動する場合があった。この場合には、最終スタンドの荷重変動は板形状の悪化を招くことから、外乱の影響を全スタンドに分散させ、特に最終スタンドへの影響を低減させることが望ましい。このことは、最終スタンド近傍の板厚目標値や張力目標値の変更量を小さくすることに相当することから、モータ電流についても圧延荷重に整合させ、同様に分散させることとし、数通りの行列 C を用いて実験を行った結果、 $y_{m\&c}$ の8要素を次のように選択した。

$$\begin{aligned} &\frac{1}{5} \frac{\Delta G_1}{G_1} - \frac{1}{5} \frac{\Delta G_2}{G_2}, \quad \frac{1}{5} \frac{\Delta G_2}{G_2} - \frac{1}{5} \frac{\Delta G_3}{G_3}, \quad \frac{1}{5} \frac{\Delta G_3}{G_3} - \frac{1}{5} \frac{\Delta G_4}{G_4}, \quad \frac{1}{5} \frac{\Delta G_4}{G_4} - \frac{\Delta G_5}{G_5}, \\ &\frac{1}{5} \frac{\Delta P_1}{P_1} - \frac{1}{5} \frac{\Delta P_2}{P_2}, \quad \frac{1}{5} \frac{\Delta P_2}{P_2} - \frac{1}{5} \frac{\Delta P_3}{P_3}, \quad \frac{1}{5} \frac{\Delta P_3}{P_3} - \frac{1}{5} \frac{\Delta P_4}{P_4}, \quad \frac{1}{5} \frac{\Delta P_4}{P_4} - \frac{\Delta P_5}{P_5} \end{aligned}$$

行列 C は次のように選択されたこととなる。

$$C = \begin{bmatrix} 0.2 & -0.2 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.2 & -0.2 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.2 & -0.2 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.2 & -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.2 & -0.2 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.2 & -0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.2 & -0.2 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.2 & -1.0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

このような選択により、外乱の影響が、全スタンドに5:5:5:5:1の比率で分散され、最終スタンドの圧延荷重やモータ電流の変動を小さく抑制することができる(第 5.5 図)。



第 5.5 図 ミルバランス制御による外乱影響の分散

さらに、圧延速度が小さいときには、圧延機とAGTCの応答が遅くなるため、MBCの応答も遅くする必要がある。そこで、制御ゲインが(5.5)(5.6)式のように、解析的に得られることを利用して、 $T_{m\&c}$ 、 T_{mbci} 、 σ_i を圧延速度に適応させることとした。

v_{\max} を最大圧延速度とし、 T_{pass} を最大圧延速度での圧延材が圧延機を通過する時間とする。 $T_{m\&c}$ は主にスタンド間の板の移送時間により長くなると考え、圧延速度 v のときの $T_{m\&c}$ 、 T_{mbci} 、 σ_i を下記のように決定した。

$$T_{m\&c}(v) = T_{m\&c}(v_{\max}) + \left(\frac{v_{\max} - v}{v} \right) \cdot T_{pass} \quad (5.9)$$

$$T_{mbci}(v) = \frac{T_{m\&c}(v)}{T_{m\&c}(v_{\max})} \cdot T_{mbci}(v_{\max}) \quad (i = 1, \dots, 8) \quad (5.10)$$

$$\sigma_i(v) = \frac{T_{m\&c}(v_{\max})}{T_{m\&c}(v)} \cdot \sigma_i(v_{\max}) \quad (i = 1, \dots, 8) \quad (5.11)$$

このように設定することで、圧延速度が最高速度に達しない場合でも、ミルのバランスを確保することができる。

5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）

5.3.3 フィードフォワード補償の付加

第 5.3.2 項で求められたフィードバック制御系は、圧延材の長手方向の緩やかな変形抵抗の変動等に対するモータ電流や圧延荷重変動の抑制には適している。

しかし、原板のばらつきに起因するモータ電流等のバランス崩れを修正したい場合には、応答が遅いことが問題となる場合がある。そこで、フィードフォワード補償を付加し、2自由度制御系とした(第 5.3 図)。

(5.1)(5.4)式より、 $\dot{x}_{m\&c} = 0$ とおくと、次式を得る。

$$y_{m\&c} = C \cdot A_{u_to_x} \cdot u \quad (5.12)$$

そして、フィードフォワード則を次式のように決定した。

$$u = G_{FF} \cdot r \quad (5.13)$$

$$G_{FF} = [C \cdot A_{u_to_x}]^{-1} \quad (5.14)$$

これにより、原板の変形抵抗のばらつき等によるパススケジュールの誤差を、フィードフォワード補償により、速やかに補償することができる。そして、フィードフォワード補償で完全に補償できない場合であっても、フィードバック補償で目標値に制御できる。

5.4 実機適用結果

5.4.1 圧延荷重制御

ミルバランス制御を、5スタンド冷間タンデム圧延機に適用した。

第 5.6 図は、圧延の際、ミルバランス制御がない場合に、外乱により最終スタンド(No.5)の圧延荷重が増加している圧延実績データを示す。

圧延条件は、下記の通りである。

圧延速度: 696.4[m/min]

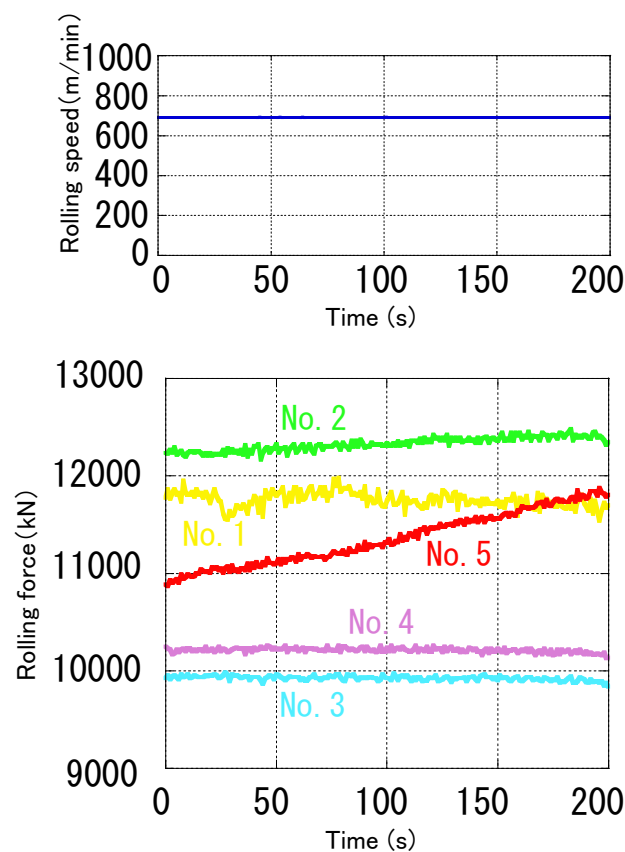
原板板厚: 2300[μm]

最終板厚: 605[μm]

板幅: 1185[mm]

このような場合には過大な圧延荷重により形状品質が劣化する場合があった。

5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）



第 5.6 図 外乱が印加した場合の圧延実績
(ミルバランス制御がない場合)

第 5.7 図はミルバランス制御を適用した場合の、圧延実績データである。

圧延条件は、下記の通りである。

圧延速度: 483.7[m/min]

原板板厚: 2800[μm]

最終板厚: 1780[μm]

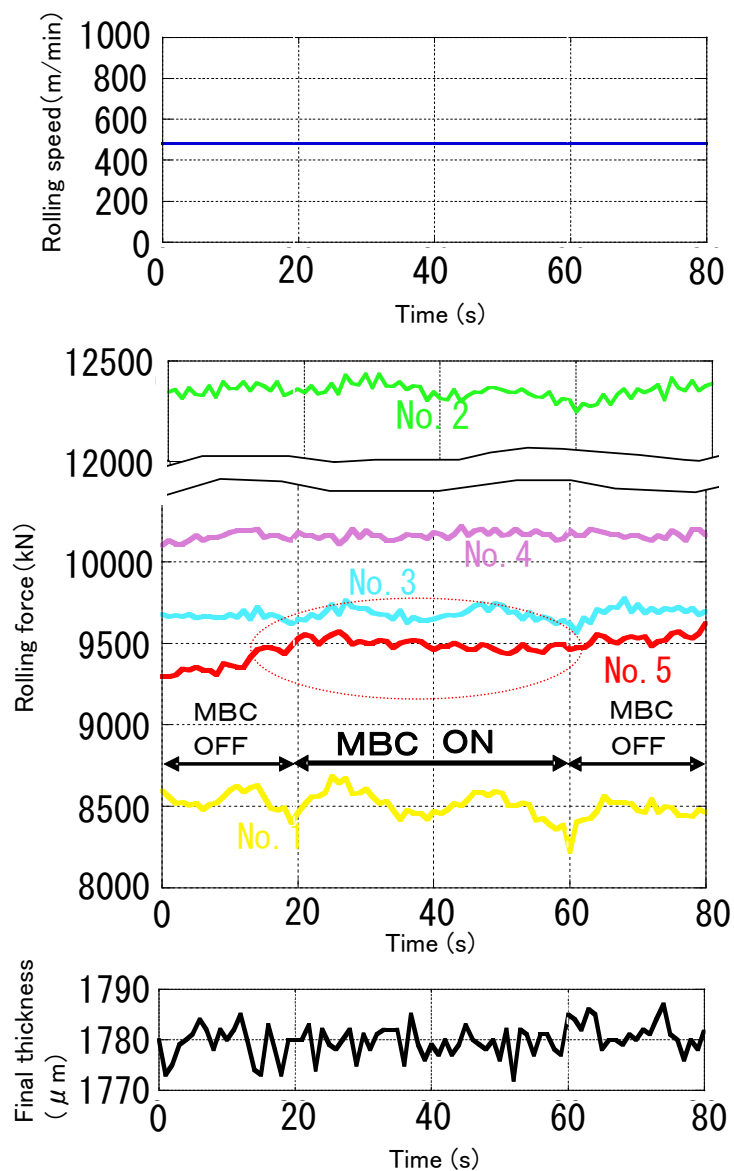
板幅: 1209[mm]

最終スタンド(No.5)の圧延荷重増加が、ミルバランス制御動作中は抑制されていることがわかる。

(なお、ここで、No.1～3 スタンドの圧延荷重については、スキッドマークと呼ばれる硬い部分による周期約20秒の成分を除去した結果を示している。)

実験では、形状品質の指標の一つである急峻度(圧延材の長手方向の波状の変形において、波高さ／波ピッチ)は 0.6%であり、形状不良は発生せず、板厚精度も維持された。

5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）



第 5.7 図 外乱が印加した場合の圧延実績
(ミルバランス制御を適用した場合)

5.4.2 モータ電流制御

次に、モータ電流の制御結果を示す。

圧延条件は下記の通りである。

原板板厚: 4000[μm]

板幅: 1224[mm]

最終板厚: 1010 [μm]

圧延速度: 962.8 [m/min]

板幅: 1224 [mm]

このとき、(5.3)式中の係数行列 $A_{u_to_x}$ は下記の通りである。

$$A_{u_to_x} = \begin{bmatrix} -1.73 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & -0.10 & 0.00 & 0.00 & 0.01 \\ 0.50 & -0.99 & 0.00 & 0.01 & -0.21 & -0.11 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.74 & -1.04 & 0.00 & 0.00 & -0.20 & -0.11 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.80 & -1.02 & 0.00 & 0.00 & -0.19 & -0.10 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 4.18 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.24 \\ -9.59 & 0.00 & 0.00 & 0.18 & -1.58 & 0.00 & 0.00 & -0.01 \\ 2.67 & -3.30 & 0.00 & 0.16 & 0.59 & -0.57 & 0.00 & -0.01 \\ 0.00 & 3.19 & -3.67 & 0.16 & 0.00 & 0.60 & -0.59 & -0.01 \\ 0.00 & 0.00 & 3.39 & -3.64 & 0.00 & 0.00 & 0.54 & -0.55 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 7.12 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.89 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

MBCは、一定速度の定常部で動作させることとし、MBCの初期目標値は、一定速度の定常部になった直後の値を用いることとする。なお、サンプリング周期は 1 秒である。

ステップ応答テストにより、最大圧延速度で $T_{m\&c} = 1.0[\text{s}]$ と決定した。次に、 T_{mbci} ($i = 1, \dots, 8$) と σ_i ($i = 1, \dots, 8$) をシミュレーションおよび実験により決定した。

具体的には、まず、MBCの応答を圧延機とAGTCの応答の 10 倍の 10 秒程度とするため、 $T_{mbci} = 10.0[\text{s}]$ ($i = 1, \dots, 8$) とし、ゲイン調整パラメータ σ_i ($i = 1, \dots, 8$) を増加させながら調整した。ILQ設計法の特長として、 $\sigma_i \rightarrow \infty$ とすれば指定する応答に漸近するという性質があるが、実際には、モデル化誤差があるため、 σ_i を ∞ とし完全な非干渉化をするには限界があり、目標とするMBCの応答が得られなかった。

そこで、 $T_{mbci} = 1.0[\text{s}]$ ($i = 1, \dots, 8$) とし小さめに設定し、ゲイン調整パラメータ σ_i を調整することで、MBCの応答時定数を10秒程度とすることができた。

なお、実圧延機への適用に際しては、安全のために、予期しないモデル化誤差を考慮し、MBCの時定数を15秒程度と遅くし、安定性を十分に確保した。このときのゲイン調整パラメータの値は $\sigma_i = 0.05$ ($i = 1, \dots, 8$) である。

ゲイン調整に際しては、安全のため、徐々に入力数を増やしていくという方法を採用した。ILQ設計法の場合には、例えば、ゲイン調整パラメータ σ_i のうち1つ以外を0近傍の正の値とすれば、近似的に1入力の系となり、制御器実装時の動作確認や調整が容易となるという利点があった。

そこで、出力したくない操作量に対応したゲイン調整パラメータの値を0近傍の正の値とし、近似的な1入力8出力(No.1 スタンド出側板厚目標値のみを操作)、近似的な4入力8出力(No.1～4 スタンド出側板厚目標値4つのみを操作)、完全な8入力8出力の順で、テストを進めた。安定性は、

今回の制御対象では $\sigma_i > 0$ ($i = 1, \dots, 8$) であれば保証される⁴⁵⁾ことが確認できたので、常に安定と予想される制御系でのテストが可能となった。そして、実機でのゲイン調整では、シミュレーションで得られたゲインを上限として、徐々にゲインを上げて行き、安定性を確認した。

このように、ILQ設計法を用いることで、効率的な制御系の調整が可能となった。

基準最適ゲイン K_F^0 と K_I^0 は、次のように得られた。

$$K_F^0 = \begin{bmatrix} -0.372 & 0.303 & 0.061 & 0.010 & -0.008 & -0.035 & -0.049 & 0.029 & 0.048 & 0.032 \\ -0.303 & -0.257 & 0.478 & 0.084 & -0.009 & 0.006 & -0.128 & -0.010 & 0.116 & 0.081 \\ -0.264 & -0.186 & -0.047 & 0.495 & 0.010 & 0.028 & -0.037 & -0.085 & 0.072 & 0.015 \\ -0.018 & -0.012 & -0.003 & 0.00 & 0.165 & 0.002 & -0.001 & -0.004 & -0.005 & 0.041 \\ 2.186 & -1.799 & -0.335 & -0.059 & 0.034 & -0.359 & 0.464 & -0.001 & -0.090 & -0.076 \\ 2.067 & 1.156 & -2.733 & -0.491 & 0.003 & -0.395 & -0.297 & 0.686 & 0.020 & -0.065 \\ 1.913 & 1.047 & 0.188 & -3.117 & -0.154 & -0.379 & -0.319 & -0.049 & 0.740 & 0.036 \\ 0.167 & 0.080 & 0.010 & 0.002 & -1.301 & -0.040 & -0.051 & -0.030 & -0.030 & 0.751 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

$$K_I^0 = \begin{bmatrix} -1.861 & -0.346 & -0.043 & 0.008 & -0.175 & -0.419 & -0.272 & -0.032 \\ -1.512 & -2.798 & -0.410 & 0.009 & 0.027 & -0.613 & -0.662 & -0.081 \\ -1.320 & -2.249 & -2.485 & -0.010 & 0.139 & -0.044 & -0.466 & -0.105 \\ -0.089 & -0.148 & -0.162 & -0.165 & 0.011 & 0.006 & -0.015 & -0.041 \\ 10.928 & 1.934 & 0.259 & -0.034 & -1.794 & 0.526 & 0.523 & 0.076 \\ 10.337 & 16.116 & 2.451 & -0.003 & -1.977 & -3.461 & -0.033 & 0.065 \\ 9.565 & 14.799 & 15.737 & 0.154 & -1.897 & -3.493 & -3.737 & -0.036 \\ 0.837 & 1.237 & 1.289 & 1.301 & -0.201 & -0.453 & -0.603 & -0.751 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

比較のため、第 5.8 図に、ミルバランス制御がなく、モータ電流が定格を超えた場合の圧延実績を示す。

圧延条件は、以下の通りである。

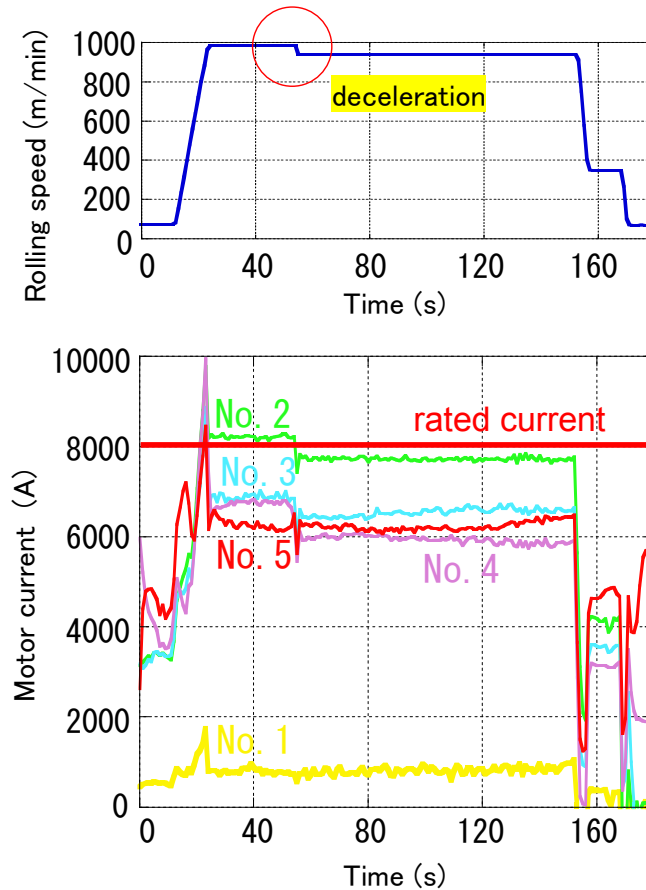
原板板厚: 4000 [μm]

最終板厚: 1213 [μm]

板幅: 1229 [mm]

原板や圧延条件のばらつきによりパススケジュールが不適切となり、最初は No.2 モータ電流が定格の 8000[A]より大きくなっている。そして、定格オーバーによりモータ停止となることを防止するため、No.2 モータ電流を減らす目的で、オペレータが圧延機の全スタンドの圧延速度を一律に減少させている。

これは、全スタンドの干渉を考慮して、板厚精度とバランスを維持しつつ、各スタンドを個別に操作することが困難であるからである。



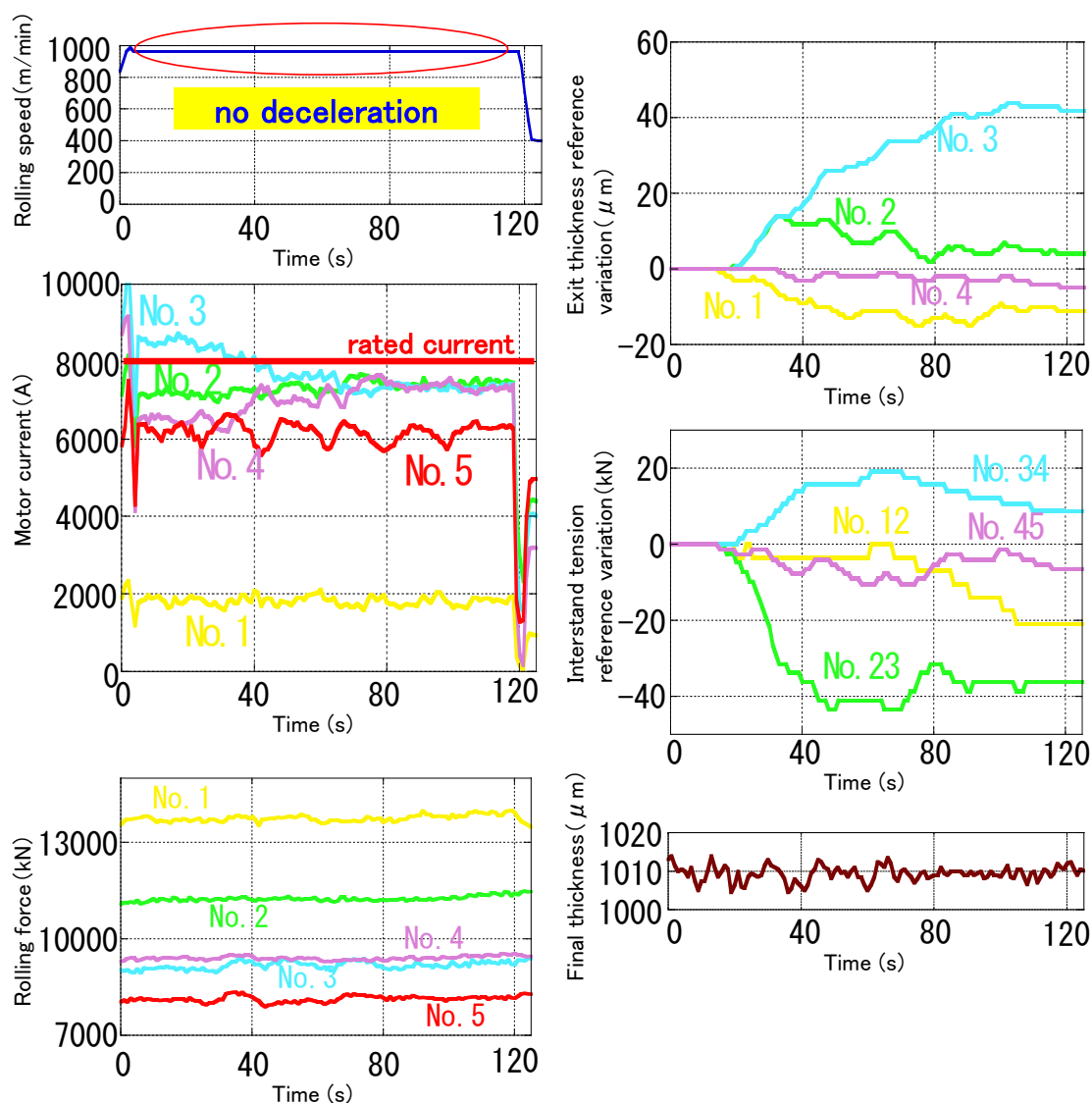
第 5.8 図 モータ電流が定格を超えた場合の圧延実績
(ミルバランス制御がない場合)

第 5.9 図は、ミルバランス制御適用時に、モータ電流が低格を超えた場合の圧延実績を示す。

最初は、No.3モータ電流は定格以上の約8300Aである。MBCは、No.2、No.3、およびNo.4スタンドの目標モータ電流を3モータ電流の平均値に変更する。この結果、最終板厚以外のスタンド出側板厚の目標値およびスタンド間張力の目標値が変更され、圧延速度の減速なしに No.3 モータ電流が定格以下に制御される。外乱の影響は全スタンドに分散され、圧延荷重はほぼ一定に維持されている。MBCの帯域幅は、AGTCの帯域幅と比べて十分小さく、板厚精度に影響は現れていない(第 5.9 図)。

このように、MBCはパススケジュールを圧延中に補正することができ、圧延速度を減少させることなく良好な板厚精度と形状を確保することができる。

5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）



第 5.9 図 モータ電流が定格を超えた場合の圧延実績
(ミルバランス制御を適用した場合)

5.4.3 フィードフォワード補償

原板の性質のばらつきによりパススケジュールが不適切となっている場合は、誤差分を速やかに修正することが望ましい。

そこで、(5.13)式に基づき、フィードフォワード補償を付加し、2自由度制御系とし、目標値応答の高速化を図った。

フィードフォワード補償は、MBCがONとなった直後に動作させることとした。5秒間でランプ状に目標値を変更させた。圧延定常部の途中でMBCをONにした場合の、フィードフォワード補償付ミ

ルバランス制御適用時の圧延実績を示す（第 5.10 図）。

圧延条件は、下記の通りである。

圧延速度：868.9[m/min]

原板板厚：2600[μm]

最終板厚：615[μm]

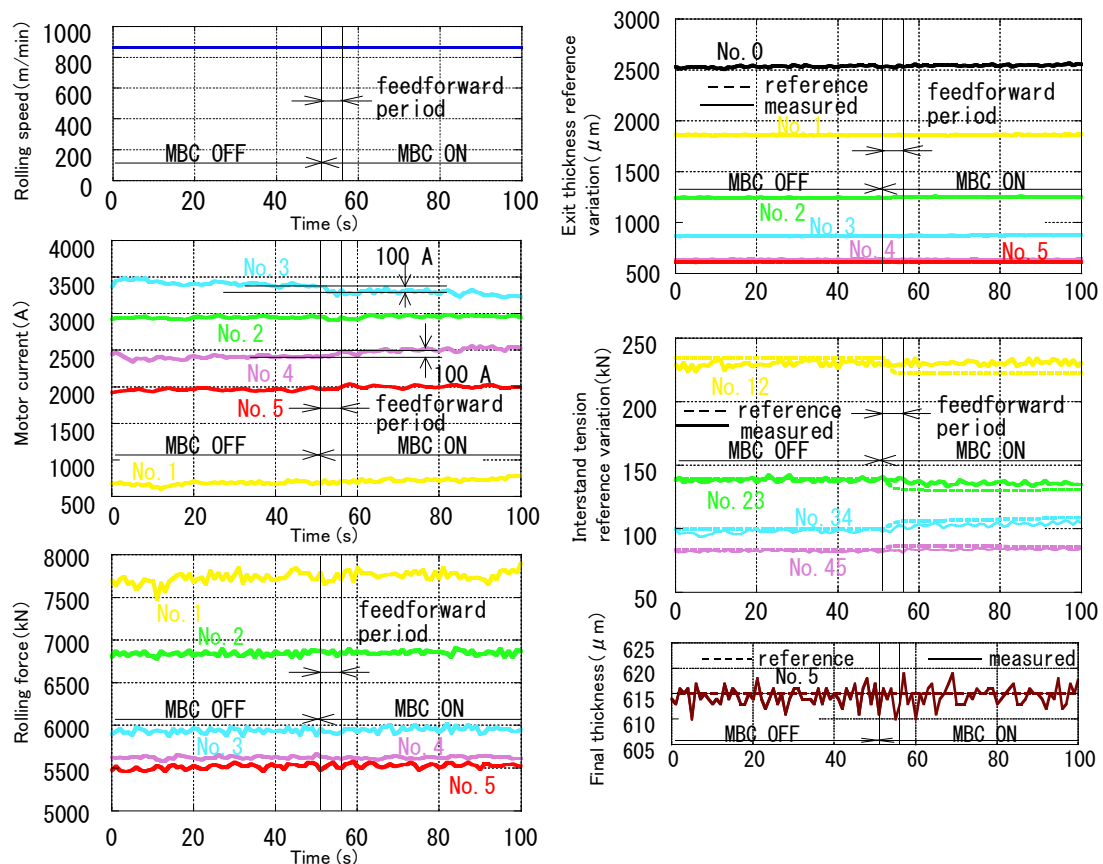
板幅：784[mm]

5 秒間のフィードフォワード補償期間に、No.3 スタンドの目標モータ電流を 100[A]減少させ、No.4 スタンドの目標モータ電流を 100[A]増加させた場合である。

MBCがONの後、No.3 モータ電流は約 100[A]減少し、No.4 モータ電流は約 100[A]増加し、また、板厚精度を維持したまま、速やかにパススケジュールを修正していることがわかる。

これにより、板厚変動を生じることなく、圧延荷重変動を抑制しつつ、モータ電流を変更し、生産性を高めることができる。

実用には、モータ電流変更量を 300[A]に制限し、一定速度になった直後から、フィードフォワード補償とフィードバック補償を動作させる形で実装した。その結果、形状品質と板厚精度を維持しつつ、最大圧延速度が平均で、2.4%増加した。



第 5.10 図 フィードフォワード補償付ミルバランス制御を適用した場合の圧延実績

5 ミルバランス制御（パススケジュールを圧延中に変更する最適制御）

5.5 結言

パススケジュールの設定値の最適化によっても残る誤差や圧延中の材質の変化に対応するため、最終板厚精度を維持しつつ、モータ電流や圧延荷重を制御するミルバランス制御を新たに開発した。ミルバランス制御は従来の板厚張力制御系に新たな制御ループを付加し、多変数のカスケード制御系を構成するものである。

設計手法としては、最適性が保証された解が解析的に得られ調整が容易なILQ設計法を用いた。実機に適用した結果、圧延荷重変動を抑制し良好な板形状が確保できるとともに、最終板厚の精度が維持されることが確認された。また、圧延条件の誤差等により一部のスタンドのモータ電流が過大な場合であっても、圧延速度の減速なしにモータ電流を低減でき、この結果、最高圧延速度が平均で2.4%増加した。

6 結論

本論文では、鉄鋼製造プロセスの1つである冷間タンデム圧延において、板厚精度の高い冷延鋼板を高生産性で製造するために、パススケジュールの最適化手法を提案し、その効果を定量的に確認した。

対象とする冷間圧延機では、原板である熱延鋼板を5スタンドのロールにより連続して薄く圧延し、目標の最終板厚の冷延鋼板を製造する。各スタンドにおいて、適切な圧延荷重を維持し鋼板の良好な形状を保ち、モータ電流を定格範囲内に維持し定格オーバーによる圧延機停止を防止し、鋼板の張力過大による板破断等を防止し、板厚と張力を適切に制御し、板厚精度の高い冷延鋼板を高生産性で製造することが必要となる。

スタンド出側板厚とスタンド間張力を制御するため、従来の板厚のみを制御する板厚制御系に代わって、板厚と張力の両方を制御する板厚張力制御系の適用が進んでいる。板厚張力制御系は、制御量をスタンド出側板厚・スタンド間張力とし、操作量をロールの圧下位置・回転速度とする多入出力制御系となっている場合が多い。

ここで、板厚張力制御系の目標値は、鋼板の圧延前に設定される。一般に、スタンド出側の板厚目標値をパススケジュールと呼ぶが、本論文では、広く、スタンド出側板厚目標値とスタンド間張力目標値を合わせてパススケジュールと呼ぶこととしている。理由は、これらの値が、板厚張力制御系の目標値となっているからである。

板厚張力制御系の目標値であるパススケジュールは、対象とする冷間圧延機では、最大圧延速度に合わせて設計されている。一方、加減速時には、パススケジュールのうち、張力目標値を圧延速度に応じて変化させることとしている。

理由を以下に説明する。冷間圧延では、一定速度での圧延だけでなく、減速と加速が必要となる。これは、原板である熱延鋼板を溶接によって連結し連続的に圧延するが、溶接部分は破断しやすく、破断時の被害を小さくするため、溶接部分が冷間圧延機を通過する時に減速するからである。圧延速度が小さくなるとロールと鋼板の間の摩擦係数が増加し、スタンドの圧延荷重が増加することが知られている。一方、圧延理論によると、スタンド間張力を大きくすることにより圧延荷重が減少する。そこで、圧延速度に応じて張力目標値を変更することとしている。ここで、張力目標値と圧延速度の関係を張力カーブと呼ぶ。なお、板厚目標値は、圧延速度によらず一定としている。

以上をまとめると、パススケジュールのうちの板厚目標値を適切に設定し、かつ、パススケジュールのうちの張力目標値(加減速時に圧延速度に依存して変更される)を適切に設定することにより、板厚や形状の良好な冷延鋼板を高生産性で製造可能となる。

近年、自動車や電気製品に使用される鋼板の板厚精度要求が厳格になるとともに、高張力鋼

板と呼ばれる高強度の鋼板の生産量が増加してきている。そこで、パススケジュールの最適化が重要となっていた。

本論文では、パススケジュールの設定値の最適化(板厚目標値と張力目標値の最適化)と、パススケジュールを圧延中に変更する最適制御の2つの方法で、パススケジュールの最適化を図った。

ここで、パススケジュールの最適化について、次の課題があった。

まず、1つめのパススケジュールの設定値の最適化については、圧延前に、パススケジュールが設定されるが、経験的に、あるいは設備能力を活用する観点から簡便に決定される場合が多く、数理的に決定される段階には達していなかった。このため、高精度な鋼板を生産するには限界があった。

また、加減速時には、スタンドのロールと鋼板の間の摩擦係数が変化する。摩擦係数変化による圧延荷重変化を防止するため、既述のようにパススケジュールのうち張力目標値を圧延速度に応じて変更することとしている。張力目標値の圧延速度依存特性の調整は、圧延機を用いて実験的に行っており、最適化はされていなかった。ここで、張力目標値の圧延速度依存特性、すなわち、張力カーブはパラメータとしてテーブルに格納している。張力カーブに限らず、鉄鋼製造プロセスにおいては、航空機や自動車と同様、パラメータテーブルが多用されているが、近年の鋼種の変化や設備変更に対応して、パラメータ調整の容易化のニーズがあった。

次に、2つめのパススケジュールの圧延中における変更については、次のような課題があった。

パススケジュールの初期値を設定し、圧延を開始した後に、鋼板の硬さや板厚、摩擦係数等が予想と異なると、圧延荷重やモータ電流が不適切となる場合があった。すなわち、各スタンドの圧延荷重とモータ電流には、経験・圧延理論・仕様等から適切な範囲があるが、一部のスタンドの圧延荷重やモータ電流が望ましい範囲を超え、板厚精度や板形状が悪化したり、生産性が低下したりする場合があった。この場合、従来は主に圧延機のオペレータの手動操作により、板厚・張力目標値を変更していた。オペレータは、全スタンドの圧延荷重とモータ電流の分布をミルバランスと呼び、適切な範囲となるように手動操作を行っていた。

一方、自動でパススケジュールを変更する方法として、最終スタンドの圧延荷重の変動等を抑制するために、上流側のスタンドの板厚目標値を変更する制御手法が開発されている。しかし、全スタンドの圧延荷重やモータ電流を適正化する制御については実現されていなかった。

これらの課題に対して、本論文では、第3章から第5章において、最適化の手法を提案し、その効果を確認した。

第3章において、パススケジュールのうち板厚目標値の最適化について述べた。すなわち、最大圧延速度時のパススケジュールの設定値を最適化する。数理計画法を用い、ばらつきがある場合のパススケジュール設計手法を提案した。すなわち、パススケジュール設計において、すべての制約を満足することは難しいことから、機会制約条件計画問題として扱う。機会制約条件計画問題では、ばらつきについて確率分布を仮定する場合が多いが、実際のばらつきを直接的に反映するため、過去の実績圧延入出力データと圧延モデルを用いることにより、変数の確率分布を仮定することなく、ばらつきを考慮してパススケジュールを最適化する手法を提案した。連続的な確率分布ではなく、実績データを用いることから、シグモイド関数で制約条件を近似し、逐次2次計画法による求解を可能とし、さらに、各制約条件の確率を個別に緩和することで、制約の優先順位付けを可能とした。パススケジュール設計に本手法を適用し、パススケジュールのうちの板厚目標値を最適化し、特に高張力鋼板の板厚公差外れ長さについて、13～35%の低減効果を確認した。本手法は、対象モデルと過去データが存在する場合の、ばらつきを考慮した制御パラメータの最適化一般に広く適用可能と考えられる。

第4章において、パススケジュールのうち張力目標値の最適化について述べた。すなわち、加減速時に圧延速度に依存する張力目標値の設定値を最適化する。板厚張力制御系の特性を利用し、最適化問題を、静的な圧延モデルのみを用いた部分問題とすることにより計算時間を短縮し、安定して最適解が得られるようにした。また、テーブル全体の張力カーブの代表値の近似曲面を用いることにより、段階的な最適化を行った。これにより、テーブル全体で滑らかな張力カーブ代表値を持つような設計が可能となり、加減速時において、パススケジュールがさらに適正化された。実機適用の結果、減速時のオフゲージ長さが平均で37%減少することを確認した。本手法は、鉄鋼プロセスに限らず航空機や自動車においても、制御パラメータがテーブル化されている場合の最適化の一手法となると考えられる。

第5章において、パススケジュールを圧延中に変更する最適制御(ミルバランス制御)について述べた。パススケジュールの初期設定値の最適化によっても残る誤差や圧延中の鋼板の硬さの変化等に対応するため、最終板厚精度を維持しつつ、圧延荷重やモータ電流を制御するミルバランス制御を新たに開発した。ミルバランス制御は従来の板厚張力制御系に新たな制御ループを付加し、多変数のカスケード制御系を構成する。

設計手法としては、最適性が保証された解が解析的に得られ調整が容易なILQ設計法を用いた。実機に適用した結果、圧延荷重変動を抑制し良好な板形状が確保できるとともに、最終板厚の精度が維持されることが確認された。また、圧延条件の誤差等により一部のスタンドのモータ電流が過大な場合であっても、圧延速度の減速なしにモータ電流を低減でき、この結果、最高圧延速度を平均で2.4%増加することができ、生産性を高く維持することができた。本手法は、鉄鋼プロセスの熱間圧延機や、アルミニウムや銅の圧延機にも適用可能と考えられる。

6 結論

冷間圧延では、加速・一定速度・減速の速度パターンで圧延され、また、多品種生産により圧延条件が多様であり、さらに、鋼材の硬さが変化するなど外乱が存在する。本論文では、これらの課題に対応して、パススケジュールの設定値の最適化、および、パススケジュールを圧延中に変更する最適制御の手法を提案し、実圧延機において板厚精度向上および生産性向上の効果を確認した。これらの手法は、鉄鋼の冷間圧延に限らず、他のプロセスや装置での最適化・最適制御による制御性向上にも寄与するものと考えられる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、終始、親切丁寧なご指導とご高見を賜りました 東京大学大学院工学系研究科 鈴木真二教授 に深く感謝申し上げます。

また、数々の貴重なご助言とご指導を賜りました東京大学大学院工学系研究科 堀浩一教授、東京大学大学院工学系研究科 矢入健久准教授、東京大学大学院工学系研究科 土屋武司准教授、東京大学大学院 情報理工学系研究科 津村幸治准教授 に謹んで感謝いたします。特に、津村幸治准教授には、専門的なお立場からご指導を賜りましたことにお礼申し上げます。

本論文をまとめる機会を与えていただき、数々のご配慮とお力添えを賜りました (株)神戸製鋼所生産システム研究所 後藤有一郎所長、制御技術研究室 西野都室長、また、普段からお世話になりました制御技術研究室員を始め、技術開発本部の方々に深く感謝いたします。

そして、本研究の推進にあたり、数々のご指導とご助力を賜りました (株)神鋼リサーチ 中山万希志博士 に心から感謝いたします。また、労をおしماずご協力とご助言を賜りました(株)神戸製鋼所 佐野研一主任部員、岡本充央主任部員、安彦要次主任部員、澤田護主任部員、土橋智也主任部員、種部和明主任部員、前田恭志研究首席、福井工業大学 新谷教授 に感謝いたします。

本研究は、生産設備である圧延機を対象とし、実用化に至るまで多くの調査、解析および実験を行いました。これらの場を与えていただき、ご協力を賜りました、(株)神戸製鋼所 加古川製鉄所 薄板部冷延室、制御部の方々に感謝いたします。

A. 1 対数歪式の独立なパラメータ数の低減

(3.33)式では、 a_i 、 b_i ($i=1, \dots, 4$) の8パラメータが独立変数であるが、4つの条件を設け、独立変数を4つに低減する。具体的には、(i) 原板板厚が変化しても、No.1、No.5 スタンドの圧延荷重が変化しないという条件、および(ii) No.1～No.4 スタンドの対数歪の(3.33)式が一点(第3.3図の点I)を通るという条件を追加することとした。以下、(3.33)式の元となった(3.1)式で説明する。 $h_5 = \text{const}$ として、 $dH_1, dh_1, dh_2, dh_3, dh_4$ の板厚変化があったとき、 i スタンドの圧延荷重変化 dp_i ($i=1, \dots, 5$) があったとする。まず、(3.1)式(または、(3.33)式)より、

$$dh_i = (1 - a_i) \cdot \frac{h_i}{H_1} \cdot dH_1 \quad (i=1, \dots, 4) \quad (\text{A.1})$$

(3.2)式より、 $H_i = h_{i-1}$ であることを考慮して、次式を得る。

$$dp_i = \frac{\partial p_i}{\partial H_1} \cdot dH_1 + \frac{\partial p_i}{\partial h_{i-1}} \cdot dh_{i-1} + \frac{\partial p_i}{\partial h_i} \cdot dh_i \quad (i=1, \dots, 5) \quad (\text{A.2})$$

(A.1)(A.2)式より、No.1 スタンドの圧延荷重変化を0として、

$$0 = dp_1 = \frac{\partial p_1}{\partial H_1} \cdot dH_1 + \frac{\partial p_1}{\partial h_1} \cdot dh_1 = \left(\frac{\partial p_1}{\partial H_1} + \frac{\partial p_1}{\partial h_1} \cdot (1 - a_1) \cdot \frac{h_1}{H_1} \right) \cdot dH_1 \quad (\text{A.3})$$

$$\therefore a_1 = 1 + \frac{H_1}{h_1} \cdot \frac{\partial p_1 / \partial H_1}{\partial p_1 / \partial h_1} \quad (\text{A.4})$$

同様に、No.5 スタンドの圧延荷重変化を0として、

$$0 = dp_5 = \frac{\partial p_5}{\partial H_1} \cdot dH_1 + \frac{\partial p_5}{\partial h_4} \cdot dh_4 = \left(\frac{\partial p_5}{\partial H_1} + \frac{\partial p_5}{\partial h_4} \cdot (1 - a_4) \cdot \frac{h_4}{H_1} \right) \cdot dH_1 \quad (\text{A.5})$$

$$\therefore a_4 = 1 + \frac{H_1}{h_4} \cdot \frac{\partial p_5 / \partial H_1}{\partial p_5 / \partial h_4} \quad (\text{A.6})$$

パススケジュール最適化の前に、対象とする升目の鋼板すべてに対して、圧延実績データを用い(3.2)式の数値微分により、鋼板ごとの偏微分係数 $\partial p_1 / \partial H_1$ 、 $\partial p_1 / \partial h_1$ 、 $\partial p_5 / \partial H_1$ 、 $\partial p_5 / \partial h_4$ を計算する。そして、鋼板ごとに a_1 、 a_4 の平均値を求め、全鋼板の平均値を当該升目での a_1 、 a_4 として採用する。

b_1 、 b_4 は、(3.1)式(または(3.33)式)、(A.4)(A.6)式より次のように求められる。

$$b_i = \ln\left(\frac{H_1}{h_i}\right) - a_i \cdot \ln\left(\frac{H_1}{h_5}\right) \quad (i=1,4) \quad (\text{A.7})$$

また、(3.1)式(または(3.33)式)で $i=1,4$ の場合を連立して解き、第3.3図の交点Iの座標は、次のように得られる。

$$\text{交点 I:} \left(-\frac{b_1 - b_4}{a_1 - a_4}, \frac{a_1 b_4 - a_4 b_1}{a_1 - a_4} \right) \equiv (ls_x, ls_y) \quad (\text{A.8})$$

$i=2,3$ に対する対数歪式(3.1)式(または(3.33)式)の直線が、交点Iを通るとしていることから、次式を得る。

$$a_i = \left[\ln\left(\frac{H_1}{h_i}\right) - ls_y \right] / \left[\ln\left(\frac{H_1}{h_5}\right) - ls_x \right] \quad (i=2,3) \quad (\text{A.9})$$

$$b_i = ls_y - a_i \cdot ls_x \quad (i=2,3) \quad (\text{A.10})$$

以上より、(A.4)(A.6)式から a_1 、 a_4 が固定値となり、(A.9)(A.10)式で2つの条件式が追加されたことから、 a_i 、 b_i ($i=1, \dots, 4$)の8パラメータのうち、独立変数は4つに低減された。

A. 2 スタンド出側板厚目標値と対数歪式パラメータの変換方法

対数歪式パラメータの独立変数が4つになったため、スタンド出側板厚目標値と対数歪式パラメータの相互の変換が可能となる。

まず、1つの升目に含まれる鋼板のスタンド出側板厚目標値 $[h_1, h_2, h_3, h_4]$ ((3.1)式(または(3.33)式)から、対数歪式パラメータを求める方法を以下に述べる。

原板板厚 H_1 、最終板厚 h_5 、スタンド出側板厚目標値 $[h_1, h_2, h_3, h_4]$ を用い、 a_1 、 a_4 は既に得られているので、 b_1 、 b_4 を(A.7)式から求める。(A.8)式により、交点Iを求め、(A.9)(A.10)式から、 a_2 、 a_3 、 b_2 、 b_3 を求めることができる。

次に、逆に a_i, b_i ($i=1, \dots, 4$)から、 $[h_1, h_2, h_3, h_4]$ を求めるには、(3.1)式(または(3.33)式)を変形した次の式で求めればよい。

$$h_i = \exp[(1 - a_i) \cdot \ln(H_1) + a_i \cdot \ln(h_5) - b_i] \quad (i=1, \dots, 4) \quad (\text{A.11})$$

以上より、升目内の鋼板のスタンド出側板厚目標値から対数歪式パラメータを求めることができ、逆も可能となる。

これにより、(3.33)式で1つの x_j 、例えば、 $j=j_0$ の場合の x_j が決まれば、 a_i 、 b_i

補遺

$(i=1, \dots, 4)$ が決まり、 $j = j_0$ 以外の場合の x_j を決定できるため、 $j = 1, \dots, N_{all}$ の全鋼板を用いた最適化が可能となる。

参考文書

- 1) 山田武、木村英紀： 冷間圧延機の板厚制御，計測自動制御学会論文集，Vol.15，No.5，1979.9 (pp.647-653)
- 2) 水島成人、深谷敏弘、鞍掛浩： 冷間タンデムミルにおける全長・全幅板厚制御技術，川崎製鉄技報，Vol.31，No.4，1999 (pp.240-245)
- 3) 大井俊哉、西村文生、柳多徹郎、伴誠一、関義朗： ILQ設計理論に基づく冷間圧延機の高精度板厚制御，システム制御情報学会論文誌，Vol.9，No.6，1996.6. (pp.274-286)
- 4) 関義朗、堀川徳二郎、岡本博： ILQ設計理論に基づくタンデム冷間圧延機多変数板厚張力制御の開発，電気学会論文誌D，Vol.122，No.11，2002 (pp.1034-1044)
- 5) 日本鉄鋼協会共同研究会 圧延理論部会 編： 板圧延の理論と実際，日本鉄鋼協会，1984.9.1 (pp.292-302)
- 6) 鎌田正誠： 薄板連続圧延，地人書館，1997.3 (p.15)
- 7) 鈴木真二： 誘導制御問題における最適化技術，第10回誘導制御基礎講習会テキスト，計測自動制御学会，1995.7 (pp.87-102)
- 8) 高瀬忠明： 飛行機のフライト・マネジメント・システム，計測と制御，Vol.43，No.3，2004.3. (pp.235-239)
- 9) 日本鉄鋼協会編： 鉄鋼便覧 第3巻1 圧延基礎・鋼板，丸善，1980.5 (p.568)
- 10) AVITZUR,B： Pass Reduction Schedule for Optimum Production of a Hot Strip Mill, Iron and Steel Engineer, December, 1962 (pp.104-114)
- 11) 鈴木弘、鎌田正誠： タンデム圧延機のパススケジュールの新しい計算法(第1報)，塑性と加工，Vol.8，No.80，1967.9 (pp.460-466)
- 12) 鈴木弘、鎌田正誠： タンデム圧延機のパススケジュールの新しい計算法(第2報)，塑性と加工，Vol.9，No.85，1968.2 (pp.86-92)
- 13) 岡戸克、鈴木弘： パススケジュールの最適化理論および圧延作業の評価関数，塑性と加工，Vol.10，No.106，1969.11 (pp.808-816)
- 14) 岡戸克、鈴木弘： ホットタンデムミルおよびコールドタンデムミルの最適パススケジュール，塑性と加工，Vol.10，No.106，1969.11 (pp.817-826)
- 15) 小川茂、米田年、浜渦修一、藪田俊樹、田中晃、菊間敏夫： ホットストリップ仕上圧延における最適設定制御法—DPによる最適パススケジュール計算法—，塑性加工春季講演会講演論文集，1984.4 (pp.29-32)
- 16) 豊福達生、竹腰篤尚、山本正治、田中一： ニューラルネットを用いたタンデムミルにおけるドラフトスケジュールの決定方法，材料とプロセス，Vol.4，No.5，1991.9 (p.1496)
- 17) 告野昌史、関口邦男、安部可治： 荷重比配分に基づくオンラインパススケジュール計算法の実用化，塑性と加工，Vol.37，No.430，1996.11 (pp.1207-1212)
- 18) 鎌田正誠： 前掲書 (p.65)

参考文献

- 19) 石井博昭: 数理計画法の展開をさぐるⅣ－確率計画法－, システムと制御, Vol.24, No.11, 1980.11 (pp.742-749)
- 20) Rao,S.S.: Engineering Optimization, Theory and Practice Third Edition, Wiley-Interscience, 1996 (p.715)
- 21) Charnes,A. and Cooper,W.W.: Chance-Constrained Programming, Management Science, Vol.6, No.1, 1959 (pp.73-79)
- 22) 久保幹雄、田村明久、松井知己: 応用数理計画ハンドブック, 朝倉書店, 2002.5. (p.714)
- 23) Shiina,T.: Numerical solution technique for joint chance-constrained programming problem – An application to electric power capacity expansion –, Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol.42, No.2, 1999.6. (pp.128-140)
- 24) 山川宏: 最適化デザイン, 培風館, 1993.4. (pp.303-305)
- 25) Thanedar,P.B. and Kodiyalam,S.: Structural Optimization Using Probabilistic Constraints, /ASME/ACE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1991 (pp.205-212)
- 26) Chen,X, K.Hasselman,T. and Neill,D.J.: Reliability Based Structural Design Optimization for Practical Applications, 38th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1997 (pp.2724-2732)
- 27) 日本航空宇宙学会編: 航空宇宙工学便覧 第2版, 丸善, 1992.10 (p.435)
- 28) Astrom,K.J. and Wittenmark B.: Adaptive Control second edition, Addison-Wesley, 1995 (p.28,p.415)
- 29) 山川宏: 前掲書 (p.149)
- 30) Kirsh,U.: Optimum Structural Design, McGraw-Hill, 1981 (p.198)
- 31) 鈴木克幸、大坪英臣: 多段階最適化手法による船体構造最適設計, 日本造船学会論文集, No.178, 1995.12. (p.405)
- 32) 土屋武司、鈴木真二: 大規模最適制御問題の分散処理に向けて, 計算工学講演会論文集, Vol.3, 1998.5. (p.683)
- 33) 韓晶、伊藤隆一、西山貞雄、山崎光悦: 多段階最適化法による2ピース飲料用アルミボトル底部の最適設計, 日本機械学会論文集(A編), Vol.71, No.701, 2005.1. (pp.43-50)
- 34) 吉村允孝、濱田年男、由良憲二、野池清文、人見勝人: 機会構造システムの多層最適設計, 日本機械学会論文集(C編), Vol.50, No.452, 1984.4. (pp.724-732).
- 35) 山川宏、荒川雅生、鈴木真二他編: 最適設計ハンドブック, 朝倉書店, 2003.2. (p.162)
- 36) Washikita,Y, Okamoto,M., Ooi,T., Mori,Y. and Hitotsumatsu E. : Renewal of Automatic Gage Control System for a Cold Tandem Mill with Electric Screwdowns, ISIJ International, Vol.38, No.9, 1998.9. (pp.977-984)
- 37) 岡村義英、星野郁弥: ロバスト制御を用いた熱間仕上げ圧延機の板厚制御, システム制御情報学会論文誌, Vol.12, No.8, 1999.8. (pp.480-488)

- 38) 鈴木真二： 航空機設計における最適化，システム／制御／情報，Vol.37, No.4, 1993.4. (pp.200-205)
- 39) Tezuka,T., Yamashita,T., Sato,T., Abiko,Y., Kanai,T. and Sawada,M. : Application of a New Automatic Gauge Control System for the Tandem Cold Mill, IEEE Transactions on Industry Application, Vol.38, No.2, 2002 (pp.553-558)
- 40) 金井智洋、安彦要次、澤田護、手塚知幸、山下隆： 冷延タンデムミル高精度板厚制御技術の開発，電気学会研究会資料(金属産業研究会)，MID-01-8, 2001.3. (pp.41-44)
- 41) 日本鉄鋼協会共同研究会 圧延理論部会 編： 前掲書 (pp.1-222)
- 42) R. ヒル著，鷺津久一郎，山田嘉昭，工藤英明訳： 塑性学，培風館，1954.4. (p.195)
- 43) Fujii,T.: A New Approach to LQ Design from the Viewpoint of the Inverse Regulator Problem, IEEE Transactions, Vol.AC-32, No.11, 1987 (pp.995-1004)
- 44) 藤井隆雄、水島成人： LQ設計への新しい試み—最適サーボ系設計への応用—，計測自動制御学会論文集，Vol.23, No.2, 1987
- 45) 木村英紀、藤井隆雄，森武宏： ロバスト制御，コロナ社，1994.2 (pp.109-156)
- 46) 山川宏、荒川雅生、鈴木真二他編： 前掲書 (p.30)
- 47) 茨木俊秀、福島雅夫： FORTRAN77 最適化プログラミング，岩波書店，1991.4. (pp.167-207)
- 48) 津田孝夫： モンテカルロ法とシミュレーション，培風館，1977.6. (p.1)
- 49) Siddall,J.N.: Probabilistic Engineering Design, Marcel Dekker, 1983. (pp.385-386)
- 50) Gentile,C. and Warmuth, M.: Linear hinge loss and average margin, Advances in Neural Information Systems, 1998 (pp.225-231)
- 51) 左海哲夫、斉藤好弘、岡本昭治、加藤健三： 板の表面観察による鋼の高速冷間圧延における潤滑状態の推定，塑性と加工、Vol.19, No.214, 1978.11 (pp.972-979)
- 52) 鈴木弘： 圧延百話，養賢堂，2000.3.30 (p.255)
- 53) 日本鉄鋼協会共同研究会 圧延理論部会 編： 前掲書 (p.137)
- 54) 宮代隆平、松井知己： ここまで解ける整数計画，システム／制御／情報，Vol.50, No.9, 2006.9. (pp.363-368)
- 55) Press,W.H., Teukolsky,S.A., Vetterling,W.T. and Flannery,B.P.: NUMERICAL RECIPES in C Second Edition, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Cambridge, 1992.10. (p.397)
- 56) Astrom,K.J. and Hagglund,T.: PID Controllers : Theory, Design, and Tuning, Instrument Society of America, 1995.1 (p.274)
- 57) Murakami,A., Nakayama,M., Kitamura,A., Abiko,Y., Sawada,M. and Fujii,H. : Mill-balance Control Technique for Tandem Cold Mill , ISIJ International , Vol.42 , No.6 , 2002.6. (pp.624-628)
- 58) 須田信英： PID制御 システム制御情報ライブラリー6，朝倉書店，1992.7 (pp.65-66)

参考文献

- 59) 計測自動制御学会編：自動制御ハンドブック 機器・応用編，オーム社，1983.1 (pp.439-440)
- 60) 北森俊行：モデリングと制御系設計の整合性，自動車技術会学術講演会前刷集，No.932，1993.4 (pp.1-6)
- 61) 北森俊行：PID制御系設計の理論と実際，フルイドパワーシステム，Vol.32，No.7，2001.11 (pp.436-440)
- 62) 北森俊行：化学プロセスに対する制御理論のあり方について，ケミカル・エンジニアリング，Vol.38，No.9，1993.9 (pp.737-746)
- 63) 関義朗：ILQ設計理論を応用したエレベータの振動抑制制御，システム／制御／情報，Vol.42，No.11，1998.11 (pp.599-606)

関連文書

学会誌論文

- 1) 村上晃、中山万希志、岡本充央、佐野研一： 機会制約条件計画による冷間タンデム圧延機のパススケジュール最適化, システム制御情報学会論文誌, Vol.21, No.2, 2008.2. (pp.48-59)
- 2) 村上晃、中山万希志、岡本充央、安彦要次、佐野研一、土橋智也： 冷間タンデム圧延機のパススケジュール最適化, 鉄と鋼, Vol.90, No.11, 2004.11. (pp.953-957)
- 3) 村上晃、中山万希志、前田恭志、佐野研一、岡本充央、澤田護、種部和明： 冷間タンデムミルの板厚張力制御系における張力目標値の最適化, 鉄と鋼, Vol.96, No.10, 2010.10. (pp.601-607)
- 4) 村上晃、新谷裕和、中山万希志、岡本充央、佐野研一： ILQ設計法を用いた冷間タンデム圧延機のミルバランス制御, システム制御情報学会論文誌, Vol.17, No.10, 2004.10. (pp.426-434)

口頭発表論文

- 1) Murakami,A., Nakayama,M., Okamoto,M., Sano,K., Tsuchihashi,T. and Abiko,Y.: Pass Schedule Optimization for a Tandem Cold Mill, 16th IFAC World Congress, 2005
- 2) 村上晃, 中山万希志, 岡本充央, 佐野研一： 冷間タンデム圧延機のパススケジュール最適化, システム制御情報学会 研究発表講演会講演論文集, 2008.5. (pp.87-88)
- 3) 村上晃、中山万希志、前田恭志、佐野研一、岡本充央、澤田護、種部和明： 冷間タンデムミルの板厚張力制御系における張力目標値の最適化, 材料とプロセス, Vol.22, No.2, 2009 (p.1059)
- 4) 村上晃, 中山万希志, 前田恭志、佐野研一、岡本充央、澤田護、種部和明： 冷間タンデムミルにおける板厚張力制御系の張力目標値の最適化, システム制御情報学会 研究発表講演会講演論文集, 2011.5. (pp.247-248)
- 5) 村上晃、中山万希志、北村章、安彦要次、澤田護、金井智洋： 加古川冷間タンデムミルにおけるミルバランス制御技術の開発, 材料とプロセス, Vol.12, No.5, 1999 (pp.992-995)
- 6) 村上晃、中山万希志、岡本充央、佐野研一、澤田護、安彦要次： 冷間タンデムミルのバランス制御, 材料とプロセス, Vol.16, No.2, 2003 (p.304)
- 7) 村上晃、中山万希志、岡本充央、佐野研一、澤田護、安彦要次： 冷間タンデムミルのバランス制御, 第46回自動制御連合講演会, 2003.11. (pp.1257-1260)