

局所回帰モデルを用いた
鉄鋼製品の品質設計と品質制御

2013年

茂森 弘靖

目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	研究の位置づけ	2
1.2.1	鉄鋼製品の品質設計と品質制御の特徴	2
1.2.2	従来型鉄鋼品質予測モデル	4
1.2.3	Just-In-Time モデリングに関するこれまでの研究内容	6
1.2.4	局所回帰モデルによる品質設計と品質制御の実機プラントでの検証	7
1.3	論文の構成	8
1.4	まとめ	10
第 2 章	鉄鋼製品の品質設計と品質制御	11
2.1	はじめに	11
2.2	鉄鋼の製造プロセスと製品	12
2.2.1	製造プロセスの概要	12
2.2.2	鉄鋼製品の概要	15
2.2.3	鉄鋼製品の流通システム	18
2.3	鉄鋼製品の品質設計	19
2.3.1	品質管理業務フローにおける品質設計の位置付け	19
2.3.2	品質設計の目的と制約条件	19
2.3.3	品質設計業務の課題	21
2.3.4	品質設計業務の課題へのこれまでの取り組みとモデルベース設計への期待	21
2.4	鉄鋼製品の材質制御	23
2.4.1	材質制御の対象プロセス	23
2.4.2	材質制御の目的と制御構成	25
2.4.3	従来の材質予測モデルとその課題	26
2.5	鉄鋼製品の寸法制御	28
2.5.1	寸法制御の対象プロセス	28
2.5.2	厚み寸法の制御	29
2.5.3	幅寸法の制御	31

2.5.4	従来の寸法制御モデルとその課題	32
2.6	鉄鋼製品の形状制御	34
2.6.1	形状制御の対象プロセス	34
2.6.2	板クラウンおよび平坦度の制御	37
2.6.3	平面形状の制御	39
2.6.4	従来の形状制御モデルとその課題	41
2.7	まとめ	42
2.8	記号説明	43
第3章	局所回帰モデルによる鉄鋼製品の品質設計	45
3.1	はじめに	45
3.2	熱延ラインパイプ素材の品質設計	46
3.2.1	対象プロセス	46
3.2.2	顧客要求製品仕様と製造仕様	47
3.2.3	品質予測モデルの入出力変数	48
3.3	提案手法およびシステム	49
3.3.1	Just-In-Time モデルを用いた品質設計システム	49
3.3.2	データベース	49
3.3.3	製造条件初期値選択機能	51
3.3.4	局所回帰モデル作成機能	52
3.3.5	最適製造条件導出機能	55
3.4	実機適用結果	56
3.4.1	品質設計問題の定式化	56
3.4.2	データマイニングツールの利用	56
3.4.3	ヒューマンインターフェースと最適製造条件導出の意思決定	57
3.4.4	品質予測モデルの精度	59
3.4.5	品質設計精度の改善	60
3.5	まとめ	62
3.6	記号説明	63
第4章	局所回帰モデルによる鉄鋼製品の材質制御	65
4.1	はじめに	65
4.2	厚鋼板の材質制御	66
4.2.1	対象プロセス	66
4.2.2	材質制御の目的と制御変数	66
4.2.3	材質予測モデルの入出力変数	66
4.2.4	材質制御の操作変数	67

4.3	提案手法およびシステム	68
4.3.1	Just-In-Time モデルを用いた品質制御システム	68
4.3.2	実績データベース	68
4.3.3	変数選択機能	69
4.3.4	局所回帰モデル作成機能	70
4.3.5	操作量決定機能	71
4.3.6	局所回帰モデルの調整方法	72
4.4	実機適用結果	74
4.4.1	材質予測精度	74
4.4.2	材質制御精度	74
4.5	まとめ	78
4.6	記号説明	79
第 5 章	局所回帰モデルによる鉄鋼製品の寸法制御	81
5.1	はじめに	81
5.2	厚鋼板の幅寸法制御	82
5.2.1	対象プロセス	82
5.2.2	幅寸法制御の目的と制御変数	83
5.2.3	幅寸法予測モデルの入出力変数	83
5.2.4	幅寸法制御の操作変数	84
5.3	提案手法およびシステム	85
5.3.1	Just-In-Time モデルを用いた品質制御システム	85
5.3.2	実績データベース	85
5.3.3	変数選択機能	85
5.3.4	局所回帰モデル作成機能	85
5.3.5	操作量決定機能	85
5.3.6	局所回帰モデルの調整方法	86
5.4	実機適用結果	90
5.4.1	寸法予測精度	90
5.4.2	寸法制御精度	90
5.5	まとめ	93
5.6	記号説明	94
第 6 章	局所回帰モデルによる鉄鋼製品の形状制御	95
6.1	はじめに	95
6.2	厚鋼板の平面形状制御	96
6.2.1	平面形状予測モデルの入出力変数	96

6.2.2	平面形状制御の目的	98
6.3	提案手法およびシステム	99
6.3.1	Just-In-Time モデルを用いた品質制御システム	99
6.3.2	実績データベース	99
6.3.3	変数選択機能	100
6.3.4	局所回帰モデル作成機能	100
6.3.5	操作量決定機能	101
6.3.6	調整パラメータの決定方法	102
6.3.7	制約付き局所回帰を用いる理由	102
6.4	実機適用結果	105
6.4.1	平面形状予測精度	105
6.4.2	平面形状制御精度	106
6.5	まとめ	109
6.6	記号説明	110
第7章	結論	111
	謝辞	115
	参考文献	117
	本研究論文に関する著者の研究業績	129

第 1 章

序論

1.1 はじめに

計算機技術の発展により、多くの製造業の現場において、品質管理や操業改善のために、大量の製造実績がデータベースに蓄積されるようになってきた。そのデータを有効活用して、より精密なモデルを構築する技術として、Just-In-Time モデリングと呼ばれる手法に近年関心が集まっている。Just-In-Time モデリングは、モデルパラメータの値をあらかじめ定めず、過去の大量の入出力データを蓄積し、予測の必要が生じる毎に、要求点に近い過去のデータを重視して局所的な予測モデルを構築する方法である。

本論文では、Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰 (Locally Weighted Regression) を用いた、鉄鋼プラントにおける製品の品質設計および品質制御の実用化研究について論ずる。

本章ではまず、1.2 節で、検討対象プロセスの特徴、従来技術、および、その課題を概説し、Just-In-Time モデリングに関する従来の産業応用研究について述べ、本研究の意義と位置づけを明確にする。次に、1.3 節で論文構成と内容について概説し、次章以降への導入部とする。最後にまとめを行う。

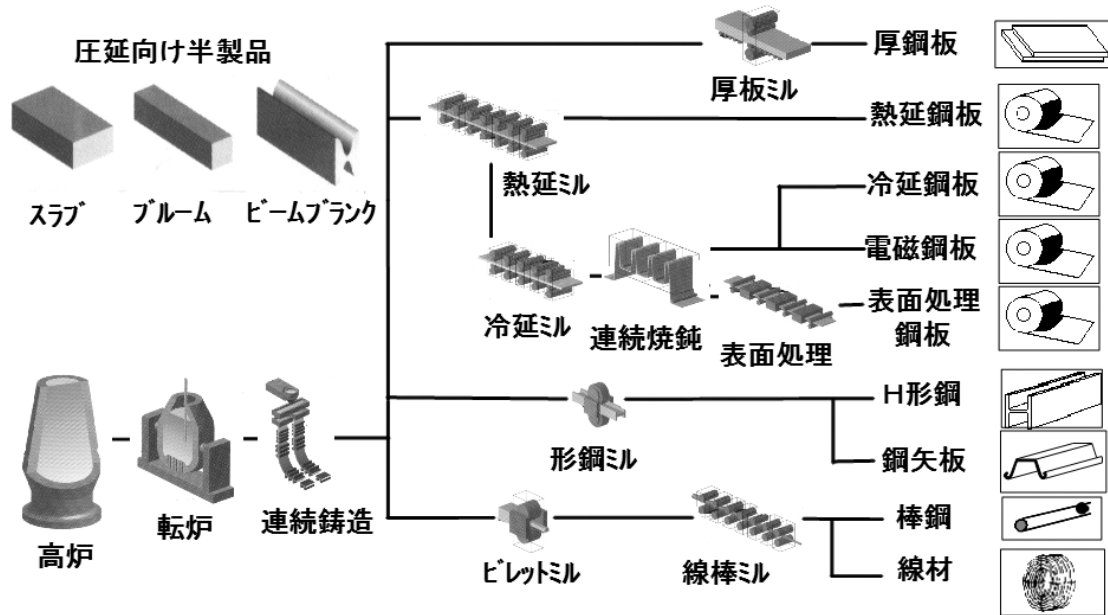


図 1.1 鉄鋼製品の製造プロセスの概要

1.2 研究の位置づけ

1.2.1 鉄鋼製品の品質設計と品質制御の特徴

鉄鋼製品の製造プロセス

鉄鋼業は巨大な装置産業であり、鉄鋼特有の製造設備により製品が作られる。図 1.1 に鉄鋼製品の製造プロセスの概要を示す。

採掘された鉄鉱石は高炉において還元反応により銑鉄が作られる。銑鉄は転炉において炭素など微量な化学成分を調整することにより溶鋼が作られる。溶鋼は、連続鋳造設備において冷却され、スラブ、ブルーム、ビームブランクなどと呼ばれる圧延向けの半製品が製造される。鉄鋼製品の製造工程はさまざまな種類があり、厚鋼板、熱延鋼板、冷延鋼板、電磁鋼板、表面処理鋼板、H形鋼、鋼矢板、棒鋼、線材などの鉄鋼製品が製造される。また、製品完成までに多くの製造工程を経由して製品が作られる。

鉄鋼製品は注文に基づく生産が基本であり、さまざまな顧客の要求に対応できるよう、多品種・小ロット生産への対応が可能な設備やシステムとなっている。製造にあたっては、製品仕様、および設備制約など様々な条件を考慮して、適切に各製造設備の運転条件を設定する必要がある。

鉄鋼製品の製造プロセスの一例として、図 1.2 に厚鋼板の製造プロセスを示す。

製鋼工程で化学成分を調整され、鋳造されたスラブは、加熱工程において所定の温度に加熱され、圧延工程においてリバース圧延により所定の寸法および形状に加工される。そして、冷却工程において所定の温度に冷却されることにより、鋼材の組織および材質が作りこまれる。製品の種類によっては、さらに熱処理工程において鋼材の組織および材質が調整されるものもある。

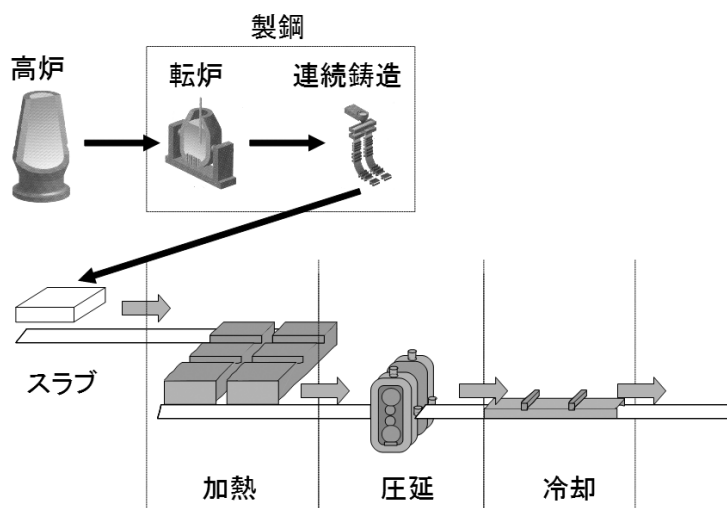


図 1.2 厚鋼板の製造プロセス（文献 [1] から引用）

鉄鋼製品の品質設計

鉄鋼製品の品質指標としては、強度・伸び・靱性などの材質，厚み・幅・長さの寸法，形状，および，微量に含まれる鉄以外の化学成分の量などがある。

品質設計とは，顧客要求の製品仕様を満足する製造条件を決定する意思決定プロセスである．製品仕様には，製品のサイズ，強度（引張強度，降伏点，伸び），靱性（吸収エネルギー，遷移温度），および，化学成分の含有量などがある．製造条件には，製鋼工程で調整される化学成分，加熱工程，圧延工程，冷却工程のそれぞれの温度などがある．品質設計はこれまで知識と経験が豊富な設計者により行われてきた．設計者は顧客要求の品質を満足するだけでなく，製造コストを最小化するための製造条件を決定する必要があり，一種の最適化問題を解いている．この最適化を行うために，製造条件から品質を精度よく予測するモデルが必要となる．

鉄鋼製品の品質制御

品質設計の段階において，対象プロセスに関する知識が豊富な熟練者により，顧客の要求品質を満足するように各製造条件の基準値が製造前に決定されている．製造段階において，製造条件が基準値どおりに運転されるように各製造設備でレギュレーション制御が行われるが，外乱により実績値が基準値から乖離するため，その結果として製品の品質に目標値からのずれ，すなわち，品質制御誤差が生じる．品質制御誤差を低減するために，すでに処理が終了した工程の製造条件実績値をもとに，まだ処理が開始していない工程の適切な製造条件を導出し，そのように操作することで，品質を目標値に近づけるフィードフォワード制御が行われてきた．これを品質制御と呼んでいる．このフィードフォワード制御を行うために，製造条件から品質を精度よく予測するモデルが必要となる．

近年の鉄鋼製品の品質に対する課題

鉄鋼製品の品質に対する顧客要求はますます厳しく，かつ多様化してきている．それに応じて製造条件も精密化し，要求品質を満たさない製品が製造される確率が増加してきている．また，同一製品の生産において

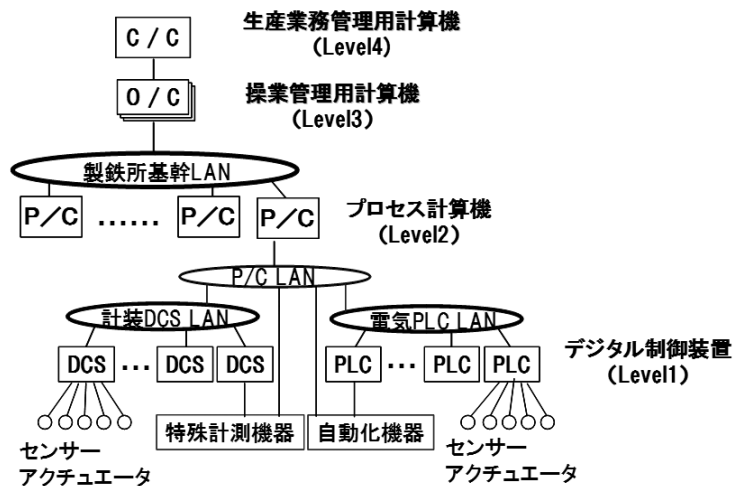


図 1.3 製鉄所の計算機システム

も、原材料の価格変動に応じ、品質を維持しつつ製造コストが上昇しないように製造条件を変更する必要がある。さらに、製造技術の進歩、製造設備の変更、設備特性の経年変化等により、品質と製造条件との関係が変化するため、その変化に応じて適切に製造条件を変更する必要がある。上記のような環境変化に迅速に対応しながら、多種多様な製品の品質を維持することができる技術、ならびに、さらなる品質向上を行うことができる技術の確立が求められている。

近年のプロセスモデルメンテナンスに対する課題

製鉄所には、さまざまな製造設備を動かすための多くの計算機がある。これらの計算機は、図 1.3 に示すように、次の4段階の計算機システムが階層状に結びついている。生産業務管理用計算機 (Level4)、操業管理用計算機 (Level3)、主にフィードフォワード制御や最適化を行うプロセス計算機 (Level2)、および、センサーやアクチュエータに直結し、フィードバック制御やシーケンス制御を行うデジタル制御装置 (Level1) がある。

鉄鋼産業は、労働生産性の向上を目的に計算機による自動化を最も古くから推進してきた産業の一つである。1980年以降、これらの計算機システムに実装される計算機ソフトウェア量が飛躍的に増大し、それに伴い、フィードフォワード制御や最適化を行うためにプロセス計算機 (Level2) に実装されてきたプロセスモデルの数も大幅に増加してきている。現状、これらのモデルのメンテナンス負荷増大が課題となっており、高度制御技術の開発と同時に、その負荷を低減するための開発が求められている。

1.2.2 従来型鉄鋼品質予測モデル

物理モデリングによる品質予測モデル

鉄鋼製品の品質と製造条件との関係は、複雑かつ非線形であるため、厳密に物理現象を表現するモデルの構築が困難である。また、物理モデルが作成できたとしても、測定できる変数が少ないため、環境変化に応じて物理モデルを迅速に合わせこむことが困難である。そのため、物理モデルに基づく精度の高い設計や制御の実現が困難である特徴をもつ。これを品質指標の一つの材質を例に説明する。

鉄は他の金属素材と比較して、変幻自在な素材であり、加える成分、熱処理の方法を変えることにより、

フェライト，セメンタイト，パーライト，マルテンサイト，ベイナイトなどと呼ばれる金属組織が変化し，その材質は大きく変化する．引張強度は 200～1500 [MPa] の範囲の素材が開発されており，現状でも新しい材質の開発が活発に行われている．

冶金現象を模倣した物理モデルを構築し，それを用いて材質予測を行う研究は従来から行われてきた．しかし，下記の理由で実用的な物理モデルを構築し維持することが困難である．まず，鉄鋼製品の材質は，中間製品のスラブの化学成分，加熱工程，圧延工程および冷却工程におけるそれぞれの製造条件により決定される．鉄鋼製品の材質を予測するための物理モデルを構築するためには，各工程での金属組織の状態を予測するためのサブモデルを構築する必要がある．しかし，各工程出側での金属組織をオンラインで計測する技術が確立されていないため，各サブモデルをフィッティングするための実績データの収集が非常に困難である．次に，冶金現象を厳密に表現するモデルを構築することは困難である．そのため，調整パラメータをもつ非線形の簡易モデル式が物理モデルとして用いられてきた．この簡易モデル式の調整パラメータは実機での実験データを用いて合わせこむ必要がある．簡易モデル式は，一種類のモデルパラメータだけでは，多様な製品の全てに対して予測精度が十分に良くない．そのため，製品の種類毎に複数の区分に分割して簡易モデル式のモデルパラメータを持つ必要がある．しかし，製造技術の進歩，製造設備の変更，顧客要求特性の変化，設備特性の経年変化，および原材料価格変動等の環境変化により，所定の材質を得るための製造条件を変更する必要が頻繁に生じる．このとき，過去に調整したパラメータではうまくモデルが合わなくなるので，再調整が必要になる．しかし，モデルパラメータの数が非常に多く，また，モデル式が非線形であるため，モデルパラメータの同定のための計算が難しい．そのため，モデル調整に非常に手間がかかってしまう．

線形回帰による品質予測モデル

以上の理由で，製造現場においては，物理モデルではなく，入力データと出力データから直接的に予測モデルを作成するブラックボックスモデリングが用いられてきた．その中でも最小二乗法による簡易なパラメータ同定方法が確立している線形回帰モデルが予測モデルとして多用されてきた．

品質制御を目的とした品質予測モデルとしては，これまで簡易な数式が用いられてきた．しかし，複雑かつ非線形なプロセスを対象に，多様な製造条件と製品品質の関係をモデルパラメータの固定された簡易式で表現することは困難であるため，十分な予測精度が得られなかった．そこで，モデルの精度を確保するために，製造条件を複数の区分に分割し，区分ごとにモデルパラメータを持つことが一般的に行われてきた．

製造プロセスでは，操業状況の解析やさまざまな品質管理・改善のため，大量の製造実績データをデータベースに蓄積している．従来からこのデータベースを用いて，上記予測モデルのパラメータテーブルの値が決められていた．しかし，製造技術の進歩，製造設備の変更，顧客要求特性の変化，設備特性の経年変化，ならびに原材料価格変動に対応した製造条件の変更などの環境変化が頻繁に生じる場合，過去のデータから構築したモデルでは対象をうまく表現できず，十分な予測精度を得ることができない．このような場合でも，新たなデータをもとに，一定期間ごとにモデルパラメータテーブルの値の調整や区分の見直しを行えば，経時変化に対応できる．しかしながら，この予測モデルの調整は人の手に頼らざるを得ず，その作業負荷が高いことから，頻繁な調整ができず精度の維持が困難という問題があった．そして，このような精度の低いモデルを用いて品質設計や品質制御を行っていたため，品質ばらつきの低減に限界があった．

従来の品質予測モデルの課題

1.2.1 節において、鉄鋼製品の品質設計と品質制御を行うためには、製造条件と品質との間の因果関係を精度良く表現するモデルが必要であり、環境変化により生じる品質と製造条件との関係の変化に対応して、モデルを迅速に修正する必要があるが、また同時に、そのメンテナンス負荷を低減する必要があることを述べた。

しかしながら、従来から検討されてきた物理モデリングによる品質予測モデルも線形回帰による品質予測モデルも、その要求に十分に答えることができていない。

1.2.3 Just-In-Time モデリングに関するこれまでの研究内容

計算機技術の発展で大量データの蓄積と高速検索が可能となったことにより、そのデータを有効活用してより精密なモデルを構築する技術として、Just-In-Time モデリング [2, 3, 4]、Lazy Learning [5, 6, 7, 8, 9, 10]、または、Model on demand [11, 12] と呼ばれるモデリング手法に近年関心が集まっている。これらは、図 1.4 に示すように、モデルパラメータの値をあらかじめ定めず、過去の大量の入出力データを蓄積し、予測の必要が生じる毎に、要求点に近い過去のデータを重視して局所的な予測モデルを構築する方法である。

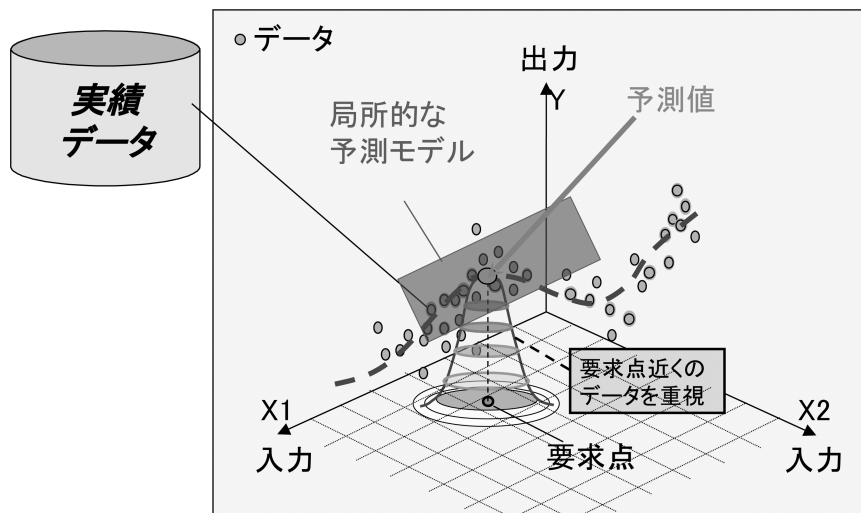


図 1.4 Just-In-Time モデリング

図 1.5 に、Just-In-Time モデリングの従来研究について示す。Cleveland らは 1988 年に局所回帰について示した [18]。これを基に、Stenman らはプロセスモデル同定への適用研究を行った [2, 11]。Lazy Learning [5, 6, 7, 8, 9, 10] は、機械学習への適用研究である。

Just-In-Time モデリングの実用化研究は、これまで化学・鉄鋼プラントなどの複雑かつ非線形なプロセスを対象になされてきた。Zheng らは、Just-In-Time モデリングと準大域モデル (Quasi-Global Model) とを組み合わせた「k-BN2 (k Bipartite Neighbors)」と呼ばれる方法を提案し、熱延鋼板の幅寸法および板厚、ならびに厚鋼板の変形抵抗に対する予測精度向上を確認した [3, 4]。岸らは、Just-In-Time モデリングを鉄鋼製品の熱間圧延時の実測寸法に対する冷間での実測寸法の収縮率の予測に適用し、予測精度の向上を確認した [12, 13]。伊藤らは、Just-In-Time モデリングを高炉から出銑される溶銑の温度推定に適用し、推定精度の向上を確認

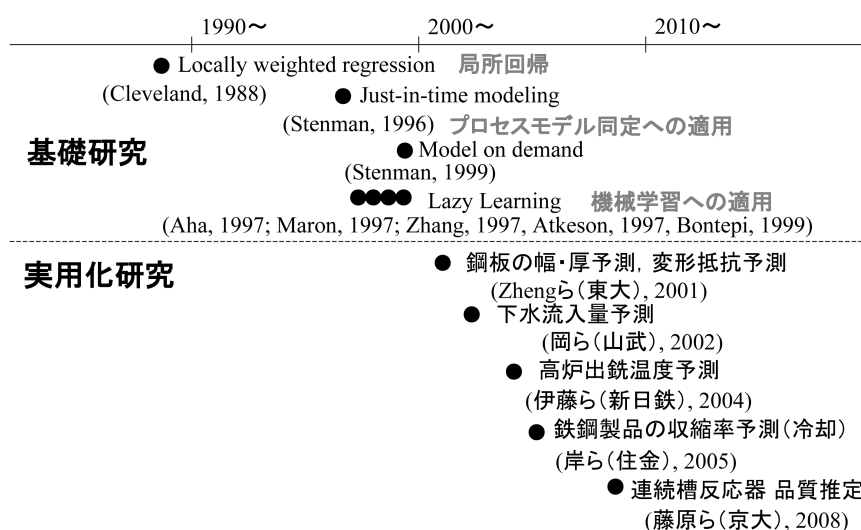


図 1.5 Just-In-Time モデリングの従来研究

した [14]。藤原らは、入出力変数間の相関関係に基づいて局所モデル構築用サンプルを選択する「相関型 Just-In-Time モデリング」と呼ばれる方法を提案し、触媒の劣化と再生を考慮した連続槽型反応器のケーススタディを通して、急激なプロセス特性の変化に適応することができるとともに、非線形性にも対応できることを示した [15]。岡らは、事例ベース推論の枠組みを利用した「TCBM (Topological Case Based Modeling)」 [16] と呼ばれる手法を、下水処理場の下水流入量予測に適用して実用的な予測精度が得られることを確認している [17]。

これらの従来研究は、将来の推移の予測、ならびに、計測困難な指標の推定であった。これらの研究の焦点は、いかにモデルの予測または推定精度を上げるかにあり、そのためのさまざまな工夫が検討されてきた。

1.2.4 局所回帰モデルによる品質設計と品質制御の実機プラントでの検証

1.2.3 節で述べたように、Just-In-Time モデリングのこれまでの実用化研究は、プロセスの自動制御の実現を目標にした研究においても、モデルの作成方法、予測または推定方法までに研究対象が留まっていた^{*1}。

Just-In-Time モデリングを用いて、複数の工程にまたがる各製造条件を最適化する方法、あるいは、自動的に目標の品質になるようにプロセス制御を行う方法は、検討課題として残っていた。Just-In-Time モデリングを用いて、実際の鉄鋼製品の製造プロセスに対し、品質設計や品質制御を行った事例の報告は無い^{*2}。

そこで本研究では、Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰 (Locally-weighted Regression) [18] を応用した鉄鋼製造プロセスの製造条件最適化手法、ならびに、オンライン自動制御手法を提案し、これらを実機プラントに適用する。そして、商用プラントでの品質のばらつきの低減結果により、本研究での提案手法の有効性を実証する。

*1 従来研究は、入力から出力の計算方法、すなわち、入力値が与えられたときに出力の予測値または推定値をいかに精度良く計算するかに関心がある。

*2 品質設計や品質制御の研究は、従来研究とは逆に出力から入力の計算方法、すなわち、出力の目標値が与えられたときに目標の出力が得られる入力値をいかに精度良く計算するかに関心がある。

1.3 論文の構成

本論文は7つの章で構成されている。

本章と第2章で、研究の目的と内容を明確にする。第2章では適用対象と従来技術について説明する。

第3章から第6章は、個別の課題に対する詳細な検討内容を示す。第3章では品質設計に対する検討を行う。第4章から第6章は品質制御に対する検討を行う。第4章では材質の制御、第5章では寸法の制御、第6章では形状の制御について論ずる。

最後に第7章でまとめを行い、研究成果を総括する。

各章で述べる内容は次のとおりである。

第2章

第2章では、本研究の対象である、鉄鋼製品の品質設計と品質制御について説明する。

鉄鋼製品の品質管理における、品質設計と品質制御の位置づけについて述べる。

品質設計について、設計の目的と制約条件を明らかにする。従来から行われている品質設計手法とその課題について説明する。

品質制御について、材質制御、寸法制御、形状制御、成分制御、それぞれについて、プロセスを詳細に説明する。制御目的と制御構成を説明する。従来の制御手法とその課題について説明する。

以上により、本研究の検討対象の特徴を明らかにする。

第3章

第3章では、Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰を用いた鉄鋼製品の品質設計システムについて提案する。本研究で対象とする設計問題の特徴を示し、提案手法を述べる。さらに、開発したシステムを熱延鋼板の品質設計に対し適用し、有効性を検証する。

第4章

第4章では、鋼材の材質制御を対象に、局所回帰を用いたオンライン自動制御システムを提案する。対象とする制御問題の特徴を示し、提案手法を述べる。さらに、開発したシステムを厚鋼板の材質制御に対し適用し、有効性を検証する。

第5章

第5章では、鋼材の寸法制御を対象に、局所回帰を用いたオンライン自動制御システムを提案する。対象とする制御問題の特徴を示し、提案手法を述べる。さらに、開発したシステムを厚鋼板の幅寸法制御に対し適用し、有効性を検証する。

第6章

第6章では、鋼材の形状制御を対象に、局所回帰を用いたオンライン自動制御システムを提案する。対象の物理特性に関する先見情報と局所回帰を組み合わせた制約付き局所回帰を用いた自動制御手法を提案する。対

象とする制御問題の特徴を示し，提案手法を述べる．さらに，開発したシステムを厚鋼板の平面形状制御に対し適用し，有効性を検証する．

第 7 章

最後の第 7 章は結論で，本研究の成果を総括する．それぞれの章で述べた項目を整理し，全体の成果を確認する．

1.4 まとめ

本章では、序論として本研究の目的を示し、またその意義を明らかにした。また、後に続く各章の関係を述べた。

本研究は、鉄鋼製品の品質の向上と製造コストの低減を実現するために重要な意味をもつ、品質設計と品質制御に対し、局所回帰モデルを応用したシステムを開発することを目的としたものである。本論文で述べる品質設計システム、および品質制御システムは、鉄鋼業界で初めて実機の商用プラントに適用したものである。本研究により、鉄鋼製品の品質の制御性向上に大きく貢献することができたと考えている。

第 2 章

鉄鋼製品の品質設計と品質制御

2.1 はじめに

本章では、本研究の対象である鉄鋼製品の品質設計と品質制御について説明し、鉄鋼製品の品質管理における研究対象の位置づけを明確にする。

本節に続く 2.2 節では、鉄鋼の製造プロセス、および、鉄鋼製品の概要について述べ、以降で説明する品質設計と品質制御への導入部とする。

品質設計については、2.3 節で述べる。品質設計について、設計の目的と制約条件を明らかにする。従来から行われている品質設計手法とその課題について説明する。

品質制御については、2.4 節、2.5 節、および、2.6 節で述べる。本研究では品質制御について、材質制御、寸法制御、形状制御を対象にしている。それぞれについて、プロセスを詳細に説明し、制御目的と制御構成を説明する。また、従来の制御手法とその課題について説明する。

最後に、2.7 節でまとめを行う。

以上により、本研究の検討対象の特徴を明らかにする。

2.2 鉄鋼の製造プロセスと製品

品質設計および品質制御は、品質管理業務の一部である。鉄鋼製品の品質管理業務を理解するためには、鉄鋼の製造プロセス、鉄鋼製品の種類および流通について理解する必要がある。

本節では、鉄鋼の製造プロセス、および鉄鋼製品の概要について述べる。2.3 節以降で説明する製鉄所における鉄鋼製品の品質設計業務、ならびに、製造段階での品質制御への導入部とする。

製造プロセスの概要については、2.2.1 節で説明する。ここでは、鉄鉱石から銑鉄をつくる高炉プロセス、銑鉄の化学成分を調整し固めて鋼片をつくる製鋼プロセス、および、鋼片を塑性加工して様々な鉄鋼製品をつくる圧延プロセスについて述べる。なお、製鋼プロセスは、銑鉄の化学成分を調整して溶鋼をつくる精錬プロセス、溶鋼を固めて鋼片をつくる連続鋳造プロセスの2つから成り立つ。

鉄鋼製品の概要については、2.2.2 節で説明する。条鋼（形鋼、棒鋼、線材）、鋼板（厚鋼板、熱延鋼板、冷延鋼板、亜鉛めっき鋼板、ブリキ、電磁鋼板）、および鋼管（溶接鋼管、シームレス鋼管）、ならびに、特殊鋼の製品について用途などの概要を述べる。

さらに、2.2.3 節で、鉄鋼製品の流通システムについても触れる。

2.2.1 製造プロセスの概要

鉄は、科学的純鉄と工業用鉄類の2つに分類される。工業用鉄類は炭素の含有量によって、工業用純鉄、鋼、および銑鉄の3つに分類される。科学的純鉄は不純物を全く含まない鉄であり、実際に製造するのは極めて困難である。実用上製造されるものは0.007%以下の炭素が含まれており、工業用純鉄と呼ばれる。0.007~2.0%の炭素を含むものを鋼、2.0~4.5%の炭素を含むものを銑鉄と分類される [19]。

純鉄は、軟らかくかつもろい性質をもつ。磁性材料、高級特殊鋼、粉末冶金、触媒など極めて特殊な用途に利用される [20, 21]。

銑鉄は、溶鉱炉からつくられたままの鉄であり、珪素、燐、硫黄などが不純物として10%程度含まれる。硬く、もろく、また、展延性に乏しい性質をもつ。しかし、融点が低く、溶けたものは流動性が大きく、凝固の際の収縮がほとんどない。そのため、そのまま鋳型に流し込んで固め、製品にされる。その大部分は、鋼をつくる原料となる。

一方、鋼は加工に耐える伸びが出てくる。粘り気が生じ、強靱な鉄になる。ほとんどの鉄鋼製品は鋼を加工する形で実用に供される。この鋼は工業的には銑鉄から炭素の含有量を減らす工程を経て造られる [22]。

鉄鋼製品の製造プロセスは、まず、銑鉄を作る工程である高炉から始まる。

高炉

鉄鋼製品の原料は、鉄鉱石という鉱物である。酸化鉄が沈殿、堆積した赤鉄鉱の鉱床から採掘される。その鉄鉱石を還元し、溶解して取り出された鉄分が銑鉄である。銑鉄をつくる工程を製銑という。

高炉は、鉄鉱石に含まれる酸素を効率的に除去（還元）する装置で、一挙に溶解まで行う反応プロセスである。その高さは50m以上にも及び、製鉄所のシンボルである。形状は炉断面単位面積当たりの生産性とエネルギー効率を追求した結果、円筒の徳利型になった。製銑プロセスにおいて、用いられる原燃料は鉄鉱石と

コークスである。高炉の最上部（炉頂）から鉄鉱石とコークスを交互に層を作るように装入し、その層状態をなるべく崩さないように炉内を下降させる。炉下部にある送風羽口からは熱風とコークスの補完還元材である微粉炭などを吹き込む。この熱風で微粉炭やコークスが燃焼し、一酸化炭素や水素などの高温ガス（還元ガス）が発生する。そしてその還元ガスが激しい上昇気流となって炉内を吹き昇り、炉内を下降する鉄鉱石を昇温させながら酸素を奪い取っていく（間接還元）。溶けた鉄分はコークス層内を滴下しながらコークスの炭素と接触してさらに還元（直接還元）され、炭素 5 % 弱を含む溶銑となり炉底の湯溜まり部に溜まる。これが銑鉄である。この銑鉄は炉底横に設けられた出銑口から取り出され、次の製鋼プロセスへと運ばれる [23]。

銑鉄の生産効率を高め、かつ安定させるために、高炉の炉体周りには熱やガス圧力の状況を計測するセンサーが 1 千点以上設置されており、ガスが均等に上昇しているか、装入物が安定して下降しているか等を知るために必要な情報をマップにし、装入条件の変更や送風温度の調整を行っている。また、原燃料の品質管理も必要である。特に鉄鉱石やコークスの粒度が不揃いの場合や、鉄鉱石の脈石や灰分、品質低下の根源となるアルミナ分が多いと、鉄鉱石が十分還元されないまま炉床部に落ちるといった問題が起こる [24]。

原燃料の品質を決める重要な工程は、焼結機とコークス炉での事前処理である。使用する鉄鉱石は、5 mm 以下の粉状になった粉鉱石が主体となる。産地も性質もバラバラな粉鉱石の配合を揃え、なるべく同じになるようにブレンドする。しかし、この粉鉱石をそのまま高炉に装入すると高炉は目詰まりを起こし、炉内の下から上に向かう還元ガスの流れを阻害してしまう。そこで事前に少量の石灰粉を混ぜ、粉鉱石を一定の大きさに焼き固めて鉱石の塊成物を造るのが焼結機である。また、焼き固められた鉄鉱石と一緒に装入されるコークスには、鉄鉱石を還元して鉄分を取り出す役割や鉄鉱石と石灰石を溶解する役割に加えて、還元ガスや溶けた銑鉄の通路を確保する重要な役割をもつ。そのためには、粘りの出方が違う色々な石炭を所定の粒度に粉碎した後、うまく組み合わせるコークス炉で蒸し焼きにし、簡単に割れたりしない強さと粒度を持たせることが必要となる [25]。

硬く脆い銑鉄から、次の工程である製鋼において粘り気があり、かつ強靱な鋼が造られる。

精錬

製鋼プロセスには 3 つの方法がある。転炉法、電炉法、平炉法である。転炉は溶けた銑鉄を主材料とする。電炉はスクラップが主材料で、平炉は銑鉄とスクラップの両方を用いる。転炉と平炉の違いは炉を傾けて溶鋼を出すことができるようになっているかどうかにある。傾けて溶けた溶鋼を出すように回転可能なとっくり型の炉が転炉で、それができないのが平炉である。戦後、転炉を用いた革命的な製鋼法が発明された。それが LD 転炉である。この LD 転炉には、スクラップをほとんど用いない、銑鉄に含まれる炭素自体の燃焼で操作するため特に燃料を必要としない、製鋼に必要な時間が大幅に短縮される（平炉がほぼ 5 時間なのに 40 分程度ですむ）、という特色があり、平炉や LD 転炉以前のトーマス転炉、ベッセマー転炉などを駆逐し、製鋼法の主流となった。1959 年以降、日本の鉄鋼業界で転炉と呼ばれるものはすべて LD 転炉である。LD 転炉の原理は簡単である。転炉に酸素を吹き込み、燃焼を促進させるその働きによって、銑鉄に含まれる炭素を燃焼させる。酸素の燃焼促進作用によって炭素が燃焼するため燃料が不要になる [22]。

転炉法による製鋼プロセスは、脱炭精錬前に溶銑中の燐や硫黄を取る溶銑予備処理と、炭素を取る転炉の一次精錬、そしてその後、溶鋼中に残った水素や窒素などの気体を抜き、必要に応じてさらに硫黄を取り、かつ

成分調整の合金添加を行う真空脱ガスによる二次精錬で成り立つ [19] .

溶銑予備処理工程では、まず、脆さの原因となる硫黄を取り除く。この処理には、溶銑が入った取鍋に酸化カルシウムを主体とする脱硫剤を加えて、耐火物でできた羽根で攪拌し、硫黄を取り除く KR (Kanbar Reactor) 法という手法と、窒素ガスをキャリアーガス (粉体吹き込み用のガス) として、取鍋に酸化カルシウムなどの脱硫剤を吹き込み、溶銑中の硫黄を固定して取り除く方法などがある。次に、脱炭の前に上から酸素を吹きつけ、珪素と燐を酸化させ取り除く予備処理が行われる。これらの溶銑予備処理は、トープードカー (溶銑を運ぶ車) 内で行うこともある [26] .

製鋼プロセスの中心となる転炉はつぼ型 (洋梨型) で、この中で銑鉄が鋼に精錬される。まず、少量の鉄スクラップが装入され、次に高炉から出銑された溶銑が溶銑鍋 (溶銑を運搬する容器) から流し込まれ、炭酸カルシウム (生石灰) を主成分としたスラグ原料を加え転炉内の精錬が始まる。1 cm^2 当たり約 10kg の大きな圧力で酸素を吹き込み、攪拌し、その酸素が銑鉄中の炭素、珪素、燐、マンガンなどと急速に反応し、燃焼による高熱が発生する。ここで生じた酸化物は炭酸カルシウムと結びつき、スラグとして安定化する。この酸化反応によって炭素が除去されるとともに、燐や珪素は比重が軽く上部に浮上するスラグに取り除かれ、低炭素で不純物の少ない鋼が生まれる [19] .

スラグは酸化カルシウムの濃度が高いほど燐酸を安定化させることができ、燐を除去しやすい。また、反応速度を上げるためには、スラグの融点を下げて液状化する必要がある。スラグの成分である酸化物は、多成分系にすることによって融点が下がる。そこで、主として酸化カルシウム、酸化シリコン、酸化鉄の3成分系として融点を下げ、低い温度でスラグを液体にしている。ただし、燐酸を安定化させる酸化カルシウムの濃度を下げないためには、あまり酸化シリコン成分を増やすことはできない。燐酸を安定化させると同時に、融点を低くして液体にし反応を早く進めるといった、相反する条件を両立させることにスラグ生成の難しさがある [26] .

鋼はこうしてつくられるが、それでもまだ微量の酸素や不純物が残る。そこでこれらの成分をさらに取り除いて成分を調整する (二次精錬)。不純物の少ない高級鋼を製造するためには不可欠な工程である。二次精錬の方法は多様であるが、真空の容器に溶鋼を吸い上げ、またはアルゴンガスなどの不活性ガスを吹き込んで還流させて、炭素、酸素、窒素、水素などの不要な成分をガスとして抜いてしまう真空脱ガス技術が広く用いられている [19] .

こうして、4.5 %程度の炭素成分を含んでいた銑鉄は炭素成分 2.0 %以下の強靱な鋼に生まれ変わる。精錬が終わった鋼は、合金を添加して成分を調整後、鑄造プロセスに送られる。

連続鑄造

転炉によって精錬され、さらに必要な合金を添加された粗鋼は、まだ単なる鉄の塊である。それを後述する圧延の工程によって製品に仕上げられる。しかしながら、溶けた鋼の状態の粗鋼をそのまま圧延することはできない。そこで、転炉から出てきた溶鋼を固め、圧延しやすいように成型する必要が生じる。その工程が鑄造である [22] .

ここで鋼は固められて鋼片となり、鋼板、棒線、形鋼などの鋼材の半製品となる。1960年代までは分塊圧延機によって鋼片をつくっていた。鑄型に溶鋼を流し込み、自然に冷やして固めた鋼の塊を再び加熱して、分

塊圧延機で伸ばし鋼片をつくっていた。しかし、1970年代からは、溶けた状態の粗鋼から直接、鋼片をつくる連続鋳造機の導入が進み、今や、日本の鉄鋼業界における鋳造工程は、そのほとんど連続鋳造機により行われている。

連続鋳造機では、溶鋼が最上部の鋳型に注がれ、側面が凝固したものが鋳型の底から引き出されていく。連続鋳造機は、タンディッシュ、モールド、冷却装置などから構成されている。タンディッシュとは、転炉や電炉のつくった溶けた状態の粗鋼が連続鋳造機の鋳型に注がれるとき、それを一時的に受け止める装置である。この設備で受け止めて、粗鋼の中にまだ残っている不純物が取り除かれる。モールドは、純銅製で底がついていない鋳型である。ここで不純物の除去がすんだ溶鋼が成型される。鋼は成型された状態のまま冷却装置に送られ、ピンチロール、ダミーバー、切断装置などによって連続的に加工成型され、スラブ、ブルーム、ビレットなどの半製品が製造される。分塊工程の省略による生産性向上と、溶鋼の熱を効率的に活用できる省エネルギー効果から、1983年には連続鋳造の適用率が90%を超え、現在ではほぼ100%になった[22, 27]。

圧延

完成品である鉄鋼製品をつくる圧延工程とは、簡単に言えば鋼片をロールで挟み、物理的な圧力を加えることで製品としての成型を行う工程である。製品としては、鋼板だけでなく、ロールの種類によっては中が空洞になった鋼管や細長い鉄鋼製品である線材、棒鋼なども製造される。鉄鋼製品の生産としてはこれが最終工程になる。後は、二次加工メーカーやユーザーに納入され、そこで成型やプレス加工などを受け、自動車の部品などの消費者の目にふれる個別の製品になる[22]。

圧延には加熱した鋼片を加工成型する熱間圧延と、常温の鋼片を加工成型する冷間圧延がある。まず、鋼板について説明する。厚板製品は加熱炉で1000℃以上に熱したスラブを圧延機にかけて必要な薄さまで延ばしていく。薄板製品の場合も最初は熱間圧延によりつくられる。それにより、最大1.2mmまで薄くすることができる。さらに飲料水の缶のようにもっと薄い鋼板が求められるときは冷間圧延による再加工を行い、1mm未満というきわめて薄い鋼板を製造する。線材や棒鋼といった条鋼類の多くは、求められる製品の断面形状と同じ孔型を刻んだ圧延ロールにかける。そこに熱した鋼片を通し圧延することで適切な形と大きさの条鋼類を製造する。H型鋼の場合も理屈は同じで、H型になるように組み合わせた水平ロールと垂直ロールによって熱した鋼片を挟みつけるように圧延して製造する。鋼管の場合は、継ぎ目なしのシームレス鋼管と継ぎ目のある溶接鋼管とで圧延の方法が異なる。シームレス鋼管の場合は断面の丸い鋼片を加熱し、その中を穿孔機でくりぬく。そしてくりぬいた中に長い心金を差し込み、外と内とから同時に圧力を加えて薄く延ばす。それに対し、溶接鋼管は、薄い鋼板を丸く折り曲げて鋼管の形にし、その接触したところを溶接か鍛接によってつなぐ[22]。

2.2.2 鉄鋼製品の概要

鉄鋼製品は、普通鋼と特殊鋼に大別される。普通鋼とは高炉や電炉によって生産された鋼のことであり、特殊鋼はその普通鋼にクロムやモリブデンを主とした合金鉄を加えたものである。特殊鋼は普通鋼に比べて強靱性や耐錆性、耐熱性に優れている。特殊鋼は一般に普通鋼よりも高価で、特殊な用途に用いられる[22]。

2010年度の統計によると、日本で生産された鉄鋼製品の中の79.6%が普通鋼であり、20.3%が特殊鋼で

あった [28] .

普通鋼は、主として建材として用いられる条鋼、鋼板、および鋼管に分類される。2010年度の統計によると、鋼板類が70.4%で条鋼類は23.8%、その他は鋼管や鉄道用の車輪などとなっている [29]。汎用性が高いのが普通鋼の特色であり、用途別受注を業種ごとに見ると、建設向けが33.4%と最も多く、次いで自動車向け31.6%、機械向け12.2%となっている [28]。

特殊鋼は工具類、自動車や機械に用いられる構造鋼、軸受鋼やピアノ線などの特殊用途に分類される。特殊鋼の用途別受注を見ると、自動車向けが60.6%、産業機械向けが23.0%、建設用が8.3%となっている [28]。

条鋼

(1) 形鋼

建築物をはじめ機械、車両、船舶などの構造材などに使用されることが多い細長い鋼材が形鋼である。その使用目的に応じて断面がH型だったりL型だったり、さまざまな断面形状があるのが特徴となっている。代表的な製品はH形鋼である。建築や橋梁、船舶、車両などの強靱性を実現させるための構造材用に用いられ、また、岸壁や高速道路などを支える基礎杭用にも用いられる。H形鋼という名称は断面がH字の形になっているからである。それに対し、断面がL字の形になっているのが山形鋼である。建築物や鉄塔、身近では門や柵の枠、ロッカーの取り付け金具などにも使用される。断面がコノ字の形をしているのが溝形鋼である。車体のフレームなどに用いられる。その他、形鋼としては断面がIの字をしたI形鋼やトンネル工事の坑道に用いられる杭形鋼などがある。

(2) 棒鋼

条鋼の仲間である棒鋼の最もポピュラーな用途はボルトやナットの構造部材としての使用であろう。この棒鋼は断面が円形の丸棒であり、ボルトやナットのほか自動車や産業機械用のエンジン駆動系の部品、船舶用のチェーンなど多様な用いられ方をしており、きわめて汎用性が高い。棒鋼の仲間にはその他、異形棒鋼や平鋼、角鋼などがある。異形棒鋼は表面を凸凹状にすることで、コンクリートとの付着性を高め、コンクリート補強材として用いられる。建築物を解体したときなど、割れたコンクリートの中から出てくる凸凹表面の棒鋼が異形棒鋼である。平鋼や角鋼は構造部材や二次製品用として用いられる。

(3) 線材

同じく条鋼の仲間である線材は、ロープのように細長くなった線状の条鋼である。針金や金網、鉄線、釘、ボルト、ナットなどの素材になったり、ワイヤーロープやタイヤ用コードに加工されたりする。さらに、溶接用の材料にもなる。2種の線材があり、普通線材は針金や金網などに用いられる。もうひとつの線材である特殊線材には、自動車用のエンジンバルブ・サスペンションなどに用いられるばね鋼線材や産業機械のばねなどに使用されるピアノ線材等がある。

鋼板

(1) 厚鋼板

熱間圧延された厚さ6mm以上の鋼板が厚鋼板である。厚いだけに堅牢性があり、零下165℃の低温に耐えるLNG（液化天然ガス）タンク用の鋼板や高温高压に耐えなければならない中高圧力容器の材料など、高い信頼性が必要な構造物に使用される。ただし、用途はきわめて多様性に富み、その他、船舶、海洋構造物、

橋梁，建築物，建設機械など実にさまざまところで用いられている。

(2) 熱延鋼板

1000 以上に加熱した鋼片はローラーにかけられて薄板になり，最終段階でトイレットペーパーのように巻かれる。こうしてコイル状に巻かれた帯鋼をホットコイルと総称する。ホットコイルは厚さと幅の両面から区別される。まず厚さによる区分だが，厚さが 3mm 未満のホットコイルが熱延薄板である。3mm 以上 6mm 未満のホットコイルが熱延中板である。次に幅による分類だが，幅が 600mm 未満のホットコイルが熱延狭幅帯鋼，600mm 以上で最大なら 2100mm 近くあるものを熱延広幅帯鋼と呼ぶ。バスやトラックなどの大型車両や鉄道車両，各種の容器，屋根材，ガードレールなどに用いられている。また，次に紹介する冷延鋼板の原板になったりもする。

(3) 冷延鋼板

熱延鋼板を常温でさらに薄く圧延したのが冷延鋼板である。その厚さは 0.15mm から 3.2mm である。薄いだけでなく表面が美しく滑らかなので，鋼製家具や自動車，家電製品などにも用いられ，また，ブリキや亜鉛めっきの素材としても用いられる。

(4) 亜鉛めっき鋼板

冷延鋼板に亜鉛をめっきした亜鉛めっき鋼板は，開発当初は屋根材や壁材などと用途が限定されていた。だが，最近では自動車のボディ材などさまざまな形で用いられるようになってきた。

(5) ブリキ

冷延鋼板に錫をめっきしたのがブリキである。その最もポピュラーな使い方はコーヒーなどの飲用缶や缶詰の素材である。

(6) 電磁鋼板

かつては珪素鋼板と呼ばれていたように，冷延鋼板に 3 %程度の珪素を添加した鋼板である。磁気特性や電導性に優れており，発電機や変圧器，家電製品のモーターなどの鉄心に用いられる。

鋼管

パイプに見るように中が中空になっている鋼材が鋼管である。その製造法の違いにより，継ぎ目のある溶接鋼管と継ぎ目の無いシームレス鋼管に分類される。

(1) 溶接鋼管

溶接鋼管の一種である継ぎ目が縦長についている電縫鋼管は中小径管であり，鋼管全体の 50 %以上の比率を占めている。自動車用管や構造管，プラント用管，ラインパイプなど用途も広く最もポピュラーな鋼管である。他に継ぎ目を内と外の両方から溶接した大型の UO 鋼管，広幅帯鋼をらせん状に巻きながら溶接したスパイラル鋼管などがある。

(2) シームレス鋼管

シームレス鋼管は石油や天然ガスの掘削用パイプや，その運輸用パイプ，高圧容器など，堅牢性を要求される用途に用いられることが多い。

特殊鋼

普通鋼にクロムやモリブデンなどの合金鉄を添加してつくられた特殊鋼は、その用途も普通鋼よりは特殊である。たとえば、工具鋼の素材として用いられる。金属やその他の物質を切断し、削るための切削用の工具の素材になり、金型用途などに用いられる。また、自動車部品をはじめ、建築用機械・工作機械・農業用機械などの部品としての構造鋼としても用いられる。さらには、ばね鋼や軸受鋼、快削鋼、耐熱鋼、ピアノ線などの材料になる特殊用途鋼としても用いられる。

特殊用途鋼の一種に区分されるステンレス鋼は、鉄に 11 %以上のクロムを添加した特殊鋼である。添加すると鉄の表面にきわめて薄いクロムの酸化膜ができる。この酸化膜が鉄の腐食を防いでくれる。実は「ステンレス」は「錆びにくい」という意味をもつ言葉であり、ステンレス鋼の防錆性はきわめて高いものがある。防錆性だけではない。ステンレス鋼の表面にきずができた場合、つまりは酸化膜がはがれた場合もすぐに空気中の酸素と結合して新しい酸化膜ができあがる。酸化膜の再生であり、そのためステンレス鋼は常に光沢が保たれる。ステンレス鋼はその金属組織からオーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系に分類される。オーステナイト系は厨房用品や車両に、フェライト系は厨房器具や建築内装に、マルテンサイト系は機械部品や刃物に活用されている。

2.2.3 鉄鋼製品の流通システム

鉄鋼製品の流通には 2 つのシステムがある。ひも付き販売と店売り販売である。

ひも付きは鋼材取引の中心で、鉄鋼メーカーと自動車、電機など大口顧客との直接交渉で規格、数量、価格などが決まる。店売りは、鉄鋼メーカーから製品を仕入れた販売業者が自由に売るもので、価格は市場の需給で決まる [30]。

ひも付き販売は、鉄鋼製品が流通経路に乗る以前に、鉄鋼メーカーと個々のユーザーが、普通なら年に 1 度の個別交渉で販売数量や販売価格などを決めてしまうという流通のシステムのことである。鉄鋼製品の国内流通の場合、このひも付き販売のケースが圧倒的な比率を占める。高炉メーカーの場合なら国内向け流通の 70 ~ 80 %がひも付き販売である。こうした特殊な流通システムが成り立つのは、鉄鋼生産に必要な変動経費の大半を占める鉄鉱石と石炭の国際価格が年単位で事前に決定されるからである。この原料の国際価格をベースに鉄鋼メーカーとユーザーは鉄鋼製品の受発注量と価格を取り決めていくのである [22]。

店売りでは、JIS などの規格に沿った寸法と品質で販売される。一方、ひも付きは、一般的に JIS の規格より厳しい品質レベルが課せられる。それぞれの顧客の要求に応じた特定の品質を保障して製造する、ひも付きは、店売りよりも高品質の製品が多いため価格が高いものが多い。しかし、量が多いため品質の割合には安価である。最低でも一品種が一度に 10 トン以上の注文になり、通常は年間契約で数百トン単位の注文になる。

2.3 鉄鋼製品の品質設計

本節では、まず、鉄鋼製品の品質管理における品質設計の位置づけについて、2.3.1 節で説明する。ここでは、顧客からの受注から製品の納入まで、品質管理の一連の流れを説明し、その中の品質設計業務の位置づけについて述べる。

次に、品質設計の目的と制約条件について、2.3.2 節で説明する。

次に、従来から行われている品質設計手法とその課題について 2.3.3 節で説明する。

最後に、その課題に対するこれまでの取り組みと本論文で提案するモデルベース設計への期待について 2.3.4 節で述べる。

2.3.1 品質管理業務フローにおける品質設計の位置付け

図 2.1 に品質管理業務フローを示す。営業部門が実施している受注活動において顧客が要求する製品の品質を把握する。その要求品質を明確化したものを製品仕様と呼ぶ。

次に、その製品仕様の品質を満足する製品を製鉄所において製造することができるかを検討する。その検討過程を品質検討と呼ぶ。品質検討結果、ならびに、受注量、納期、および、コストをもとに受注可否を顧客に回答する。顧客から注文を受けた場合、製鉄所における各製造プロセスの製造条件の設定値を検討する。その検討過程を製造仕様検討と呼ぶ。品質検討と製造仕様検討をまとめて、品質設計と呼ぶ。品質設計において、各製造プロセスの製造条件の基準値が決定される。

品質管理業務には、製造段階において、設定された製造条件通りに製造されているかを管理する製造実績管理がある。また、製品の出荷段階において、製品の品質が顧客要求を満足しているかを管理する品質実績管理がある。さらに、顧客サービスにおいて、客先で製品の品質に異常が発見された場合の業務として、製品の製造実績の提供、クレーム対応がある。

2.3.2 品質設計の目的と制約条件

品質設計は、顧客の要求品質を満足しながら、より製造コストの低い製造条件を決定することである。品質設計は、一種の最適化問題と捉えることができる。その最適化問題の目的関数は製造コストである。

制約条件は、製品のサイズ、化学成分と材質について規定された顧客要求の製品仕様である。制約条件はまず、規格により定められる。

鉄鋼製品の規格には、日本工業規格 (JIS)、日本鉄鋼連盟規格 (JFS)、外国規格 (BS, DIN, ASTM 等)、船級協会規格などの公的規格、ならびに製鉄メーカーが定める自社規格がある。

規格では、製品のサイズ、含有化学成分、材質 (強度、靱性) などについて製品仕様について定められている。厚鋼板を一例に規格で定められる製品仕様について説明する。

厚鋼板は、まず、用途で構造用鋼板、低温用鋼板、耐候性鋼板、ボイラ・圧力容器用鋼板に大別される。次に強度で分類される。例えば、構造用鋼板は、普通鋼板と強度を高めた高張力鋼板に分類される。高張力鋼板は、さらに、強度の低いものから 490N 級、540N 級、570N 級、590N 級、610N 級、690N 級、710N 級、

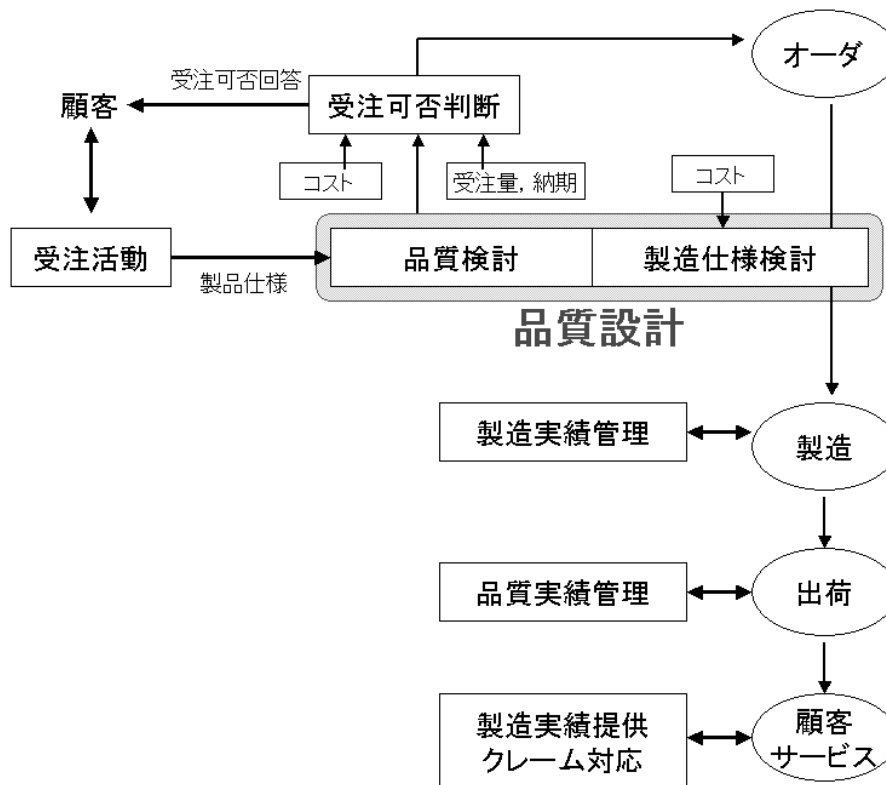


図 2.1 品質管理業務フロー

780N 級，980N 級に分類される．710N 級高張力鋼板の一規格である JFE-HITEN710M を例に，規定されている仕様について説明する．まず，製造可能板厚は 6～100mm と定められている．次に，含有化学成分（C, Si, Mn, P, S, Cu, Ni, Cr, Mo, V, Ceq）について定められている．C は 0.14 % 以下，Si は 0.35 % 以下，Mn は 1.20 % 以下，P は 0.015 % 以下，S は 0.015 % 以下，Cu は 0.40 % 以下，Ni は 0.30 % 以上かつ 1.30 % 以下，Cr は 0.70 % 以下，Mo は 0.50 % 以下，V は 0.05 % 以下，および，炭素当量 Ceq は板厚 50mm 以下においては 0.53 % 以下，板厚 50mm 超においては 0.57 % 以下と定められている．次に，材質について，引張試験，曲げ試験（180°），衝撃試験（2mm V シャルピー）の特性値について規定されている．引張試験の降伏点は板厚 75mm 以下で 620MPa 以上，板厚 75mm 超で 600MPa 以上と定められ，引張強さは 710MPa 以上 840MPa 以下と定められ，伸びは板厚 16mm 以下で 17 % 以上，16mm 超 50mm 以下で 25 % 以上，50mm 超で 17 % 以上と定められている．180 度曲げ試験の曲げ半径は，板厚 32mm 以下で 1.5t，板厚 32mm 超で 2.0t と定められている．深さ 2mm の 45 度 V 字溝を入れた試験片を用いたシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーは，シャルピー吸収エネルギーと呼ばれ，靱性を表す指標である．板厚 12mm 超 32mm 以下では試験温度-15 で 47J 以上，板厚 32mm 超 50mm 以下では試験温度-20 で 47J 以上，板厚 50mm 超では試験温度-25 で 47J 以上と定められている [31]．

店売りではこれらの規格に準拠した種々の鉄鋼製品が，製造され販売される．一方，ひも付きでは，各々の顧客の要求に応じた特別な製品仕様が付加されて，規格で定められた製品仕様よりも厳しい品質条件で製造され，販売される．

2.3.3 品質設計業務の課題

品質設計業務には、従来から次の課題があった。

熟練者のノウハウの技術伝承の容易化と品質設計の属人性排除

品質設計を行うためには、対象の製造プロセスでの物理現象である冶金的要因のみならず、製造設備の制約、製造コストなどのさまざまな要因を含む広い専門知識が必要となる [32]。

品質設計を行う各担当者は、品質設計業務で長年の経験を積んだ専門家の仕事の手順、情報の処理方法、判断基準などを体得することから始めなければならない。しかし、このいわゆるノウハウと呼ばれる分野については、効果的な技術伝承、共有化の方法はなく、それぞれの企業において、OJTおよび業務マニュアルの作成などの試行錯誤を繰り返してきた [33]。

そのため、品質設計担当者の交代の際、その技術伝承が大きな課題となっていた。また、設計の質も個人の経験に大きく依存するため、品質設計精度に個人によるバラツキが大きいという問題があった [34]。

品質設計負荷の低減と設計時間の短縮

鉄鋼製品の要求品質は、JIS、ASME などの公的規格により定められているが、実際の注文の際は用途、加工条件などにより種々の要求が特殊仕様として公的規格に付加されることが多い [32]。このように、鉄鋼製品は各々の顧客要求に応じた注文生産が基本であるため、顧客からの引き合いがある毎、および、注文を受ける毎に担当者が新たな製品に対する品質設計を頻繁に行う必要がある。

製品品質に影響を与える製造条件の数が多く、製造プロセスの中で起こっている物理現象のメカニズムが未解明の部分が多い [34]。要求品質が多岐に渡り、それらを全て満足するように設計することは難しく、設計作業に 1~2 日を要する場合もある [34]。注文 1 件のあたりの設計時間の短縮が課題となっていた。

2.3.4 品質設計業務の課題へのこれまでの取り組みとモデルベース設計への期待

ルールベース品質設計システムの開発

前 2.3.3 節で説明した課題に対して、これまで、AI（人工知能）を活用して品質設計を自動化する取り組みが行われてきた。

鉄鋼産業では 1980 年代以降、計算機による自動化を活発に推進してきており、労働生産性の大幅な向上を達成してきた。しかしながら、品質設計や生産計画など熟練の専門家により行う作業の計算機による自動化は遅れていた。さらなる労働生産性の向上のため、1980 年代末から 2000 年代前半において AI 技術は大いに注目され、実用化研究が活発に行われた。

鉄鋼製品などの金属材料の品質設計に対しては、If-Then ルールやファジー論理を用いたシステムが提案され、使用されてきた [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]。1980 年後半に、知識ベースを用いた鉄鋼製品の品質設計システムが提案された [33]。その後、If-Then ルールに基づく品質設計エキスパートシステムの実用化研究が行われてきた。1990 年代前半に、鋼管 [34, 35]、形鋼 [36]、ならびに、厚鋼板 [32, 37] に対して品質設計エキスパートシステムが開発された。1990 年代の終わりから 2000 年代の前半に、ファジィ論理に基づくシステムが提案され、それを用いた製鋼プロセスにおける中間製品 [38]、ならびに、厚鋼板 [39] の品質設計システムが

開発された。これらのシステムは、熟練専門家の知識をルールで表現し、それらを計算機に蓄積した知識ベースを用いることで、品質設計業務を自動化しようとするものである。

ルールベース品質設計システムの近年の利用状況

鉄鋼製品の品質に対する顧客要求は近年ますます厳しく、かつ多様化してきている。それに応じて製造条件も精密化し、要求品質を満たさない製品が製造される確率が増加してきている。また、同一製品の生産においても、原材料の価格変動に応じ、品質を維持しつつ製造コストが上昇しないように製造条件を変更する必要がある。さらに、製造技術の進歩、製造設備の変更、設備特性の経年変化等により、品質と製造条件との関係が変化するため、その変化に応じて適切に製造条件を変更する必要がある。

品質設計者は、上記のような環境変化に迅速に対応する必要があるため、品質設計者がもつノウハウはますます高度化し、複雑化している。その変化の速度は近年ますます大きくなっているため、品質設計システムに必要なルールを頻繁にメンテナンスする必要がある。一方、品質設計の専門家知識の暗黙知を形式知化するには、システムに関する専門知識が必要で、かつ、多大な時間が必要である。そのため、ルールのメンテナンスが追いつかず、知識ベースの品質設計システムが使われなくなってしまう。

それゆえ、鉄鋼製品の品質設計に対して、モデルベースの設計手法の開発のニーズが高まっている。

モデルベース設計の品質設計への適用

近年、自動車・航空機・宇宙等の制御システム開発/設計において、モデルベース設計(Model-Based Design) [40, 41] と呼ばれる設計手法が注目されている。モデルベース設計とは、対象プロセスの挙動を数式で記述して、計算機内においてシミュレーションを行い、設計変数を決定する手法である。機械設計においては、モデルベース設計により設計時間が大幅に短縮できる効果が確認されている [41]。

本論文で提案する品質設計手法は、このモデルベース設計の範疇に該当する。

鉄鋼製品の品質設計においてモデルベース設計を適用することにより、品質設計時間の短縮と設計者の負荷低減が大いに期待できる。また、体系的な設計をすることができるようになり、品質設計における属人的な部分の大幅な削減とともに技術伝承の容易化が期待できる。

2.4 鉄鋼製品の材質制御

本節では、品質制御のひとつである材質制御について、対象とするプロセスを詳細に説明し、制御目的と制御構成を説明する。また、材質制御について、従来の制御手法とその課題について説明する。

まず、対象とするプロセスについて、2.4.1 節で説明する。ここでは、本論文で述べる材質制御の適用対象の厚鋼板の製造プロセスと、材質の作りこみの概要について述べる。

次に、材質制御の目的と制御構成について、2.4.2 節で説明する。

最後に、材質制御の従来手法とその課題について、2.4.3 節で述べる。

2.4.1 材質制御の対象プロセス

本研究で対象としたのは、厚鋼板製造プロセスである。厚鋼板の製品品質の指標としては、強度・伸び・靱性などの材質、厚み・幅・長さの寸法、形状、および外観などがあるが、ここでは、厚鋼板の材質制御を対象とする。

鋼材の組織と材質

顧客において、燃費向上のための軽量化、および衝突安全性の向上を図るため、加工・成形性を確保するとともに、より薄くより軽く、かつ、より強度のある鉄鋼製品（ハイテン材：High Tensile Strength Steel）が求められている。それに対応するため、鉄鋼業界において材質の造り込み技術が進歩し、さまざまな種類の材質特性をもつ製品が開発されている。

物質を形づくる結晶は、通常、原子が規則正しく配列をつくって並んでいるが、鉄の結晶には並び方が乱れた転位と呼ばれる部分がある。鉄を変形させるために力を加えると、構造的に不安定な転位が押されて原子のつなぎ替えが起こる。そして、この転位がずれて移動していくことで変形していく。もし仮に結晶がきちんと並んで構造が安定していれば、全体を一気にずらす必要があり、一度に大きな力を加えなければ変形させることができない。すなわち、ハイテン材のように硬く強くするためには、この転位部分を動きにくくしてやればよい。その方法には次のようなものがある。

- 固溶強化

転位部分で鉄原子に置き換わるシリコン（Si）やマンガン（Mn）などの元素を入れて転位を動きにくくする。

- 析出強化

より大きい析出物を入れて転位をさらに動きにくくする。

- 変態強化

熱処理を加えて結晶格子を伸ばした部分に炭素や窒素を多量に入れて転位部分を埋めて結晶構造を安定化させる。

鉄および鉄の固溶体は、温度によって結晶構造が変わる非常に珍しい元素である。その性質を利用した材質の作りこみも行われる。

純鉄の場合、常温では鉄の結晶構造は体心立方格子をしている。この結晶構造をもつものはフェライトまたは鉄と呼ばれる。フェライトは軟らかく延性に優れている。温度を上げて911以上になると面心立方格子になる。この結晶構造をもつものはオーステナイトまたは鉄と呼ばれる。さらに温度を上げて1392以上になると再び体心立方格子になる。この結晶構造をもつものはフェライトまたは鉄と呼ばれる。

炭素は鉄原子で作られている格子の隙間に入り込む浸透固溶をする。オーステナイトよりフェライトの方が隙間は広いが、隙間の形がフェライトでは細長いため炭素原子が入り込めないのに対し、オーステナイトでは3方向同じ隙間で炭素原子が入り込みやすい。そのため、温度を上げてフェライトからオーステナイトに金属結晶が変化すると、固溶できる炭素の量が増える。炭素を固溶したオーステナイトをゆっくり冷やすと、オーステナイトがフェライト組織になるときに炭素を追い出して、炭素は鉄組織の外で鉄との化合物 Fe_3C を析出する。この結晶はセメントイトと呼ばれる。セメントイトは金属光沢を有し硬くてもろい。

一方、炭素を固溶したオーステナイトを急冷した場合、炭素を追い出す間もなく炭素を固溶したまま鉄原子は体心立方となる。本来炭素を固溶出来ないのに無理やり炭素を固溶するため、体心立方格子は歪んでいる。この歪んだ結晶格子はマルテンサイトと呼ばれる。マルテンサイトは、鋼の結晶の中で最も硬くてもろい。

炭素の質量%が0.77においてオーステナイトから727以下へ徐冷したときに、非常に薄い板状のフェライトとセメントイトが交互に並んだ組織（共析組織）が形成される。光沢が真珠に似ているためにパーライトと呼ばれる。

ハイテン材に使用される組織制御された代表的な鋼には、DP鋼ならびにTRIP鋼がある。DP(Dual Phase: 二層)鋼は、軟らかいフェライトと硬いマルテンサイトが混在する組織をもつ。これにより、DP鋼は強度をもちながら加工しやすさもあわせもつ。TRIP(Transformation Induced Plasticity: 変態誘起塑性)鋼は、力を加えたときに結晶格子が伸びて一瞬変形するがすぐに硬くなる性質をもつ。鋼材を約900に加熱してオーステナイトにする。その温度をうまく常温にまで下げると安定した硬いマルテンサイトになるが、その際すべてもとに戻るのではなく、鋼材にオーステナイトが残った状態になる。その残存した軟らかいオーステナイトは結晶格子が少し伸縮しただけでマルテンサイトに変化するので、変形部分の強度が高まる(加工誘起変態)。

このように、添加元素の成分調整や加熱および冷却により温度調整を行うことで、さまざまな材質の鉄鋼製品を作り込んでいくことができる[42]。

厚鋼板の製造プロセスと材質の作りこみ

厚鋼板は、次の製造プロセスにより製品の材質の作りこみが行われる。製鋼工程にて化学成分を調整され、鑄造されたスラブと呼ばれる中間製品が、加熱工程において所定の温度に加熱され、圧延工程においてリバース圧延により所定の寸法に加工される。そして、冷却工程において所定の温度に冷却されることにより、鋼材の組織および材質が作りこまれる。製品種類によっては、オフラインの熱処理工程においてさらに鋼材の組織および材質が調整されるものもある。

厚鋼板には強度が高い材料が求められると同時に、粘り強い、すなわち、靱性の高い材料が求められる。材料に力を加えると、初めは弾性変形し、その後、塑性変形して、ついに破断する。靱性が大きさは、破断までに加えられたエネルギーの大きさで表現される。靱性の高い構造物は壊れにくいので、構造材に多く使用される厚鋼板は、高強度かつ高靱性の材料が求められる。一般に、材料の強度が大きくなると加工しにくくなり、

かつ靱性が低くなるが、結晶粒を小さく（微細化）することにより、強度と靱性の両方を高めることができる。高強度かつ高靱性の厚鋼板を製造する方法には、次の2つがある。

- オフラインの熱処理を用いる。
- CR（Controlled Rolling：制御圧延）を用いる。
- TMCP（Thermo-Mechanical Control Process：加工熱処理・熱加工制御）[43]を用いる。

オフラインの熱処理を用いる場合は、圧延材を900℃付近まで加熱してオーステナイトにし、徐冷する焼ならし（焼準：normalizing）が行われる。オーステナイト組織を微細化し、その後、変態によって得られる組織（フェライト-パーライト組織など）を微細化する。

CRの場合は、圧延時の温度を低温側に制御して行う制御圧延を行い、オーステナイトの結晶粒を微細化させる。これにより、徐冷により温度が下がると微細なフェライト組織が形成される。CRでは、低い温度で圧延するので、圧延工程の途中で所定の温度になるまで圧延材を待機させる。

TMCPの場合は、制御圧延を行った後、引き続き、加速冷却を適用する。制御圧延により、オーステナイトの結晶粒を微細化すると同時に、加工ひずみを蓄積させて、引き続き行われる変態の核生成サイトの密度を増加させる。その後、加速冷却すると、CRした状態のまま放冷した場合と比較して、変態の生じる温度が低温側に移行する。変態の駆動力が大きくなる一方で、原子の拡散速度は小さくなるので、より均一かつ微細にフェライトが生成する[44, 45]。

2.4.2 材質制御の目的と制御構成

2.4.1節で述べたように、鉄鋼製品の材質には、製鋼工程、加熱工程、圧延工程、冷却工程および熱処理工程における製造条件が影響している。製造前の品質設計の段階において、対象プロセスに関する知識が豊富な熟練者により、顧客の要求品質を満足するように各製造条件の基準値が決定されている。しかしながら、製造条件から材質を高精度に予測する手段が確立されていないため、目標品質を得るための製造条件を精度良く求めることが困難である。設計者が決定した基準値の精度に限界があるため、製品の材質にずれが生じる。また、製造段階において、製造条件が基準値通りに運転されるようにレギュレーション制御が行われるが、外乱により実績値が基準値から乖離するため、その結果として製品の材質にばらつきが生じる。

図2.2は、CRで作られる引張強度480MPa級の高張力厚鋼板の製造条件と引張強度の分布である。製造条件は、炭素当量 C_{eq} 、加熱温度、ならびに、圧延の仕上温度であり、CRで作られる厚鋼板の引張強度に非常に大きな影響を与える。ここで、 C_{eq} （equivalent carbon content：炭素当量）は、鉄の合金の成分元素の配合比率から得られる最大の強度と溶接性を見積もる方法であり、炭素と他の合金成分の配合量が多いほど硬さは向上し、溶接性は劣化する。それぞれの影響の大きさは元素によって異なるが、炭素の影響度に換算して比較する。なお、日本工業規格[46]で規定されている炭素当量を算出する式は

$$C_{eq} = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 \quad (2.1)$$

である。図2.2に示すように、各製造条件のばらつきため製品の材質がばらつく。必要な強度を確保するために、製造において余分な合金を投入したり、圧延時の温度を余分に下げる必要が生じる。そのため、製造コスト

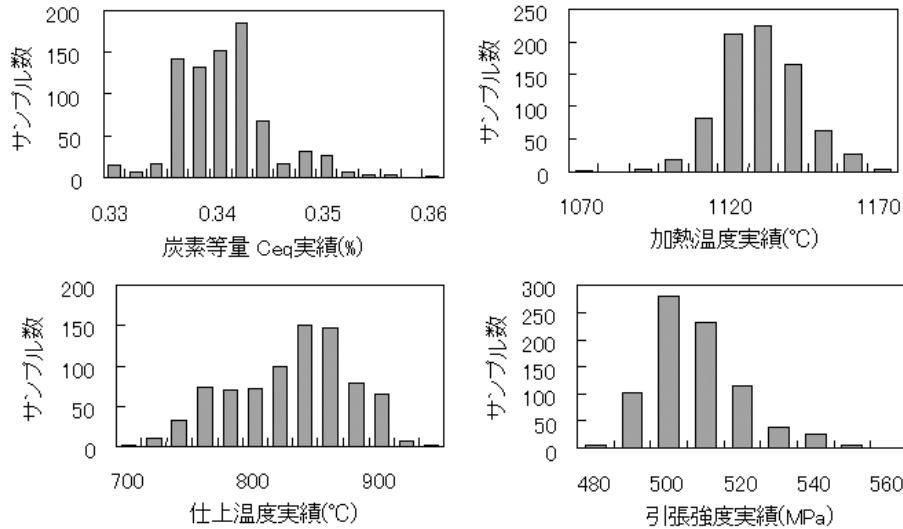


図 2.2 厚鋼板の製造条件および材質のばらつき

トの増加や生産能率の低下が発生する。

材質の制御誤差を低減するために、製造条件と材質の因果関係をモデル化し、そのモデルと既に処理が終了した工程の製造条件実績値をもとに、まだ処理を開始していない工程の適切な製造条件を導出し、そのように操作することで、材質を目標値に近づけるフィードフォワード制御を行う取り組みが行われてきた。例えば、CR で作られる厚鋼板の場合は、化学成分および加熱温度の実績値をもとに、目標の材質にするための圧延の仕上温度をモデルに基づいて算出して設定する。

2.4.3 従来の材質予測モデルとその課題

材質予測モデルとして冶金現象を模倣した物理モデルを構築する研究は従来から行われてきた [47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65]。物理モデルの一例を図 2.3 に示す。この物理モデルを構築するためには、各工程での金属組織の状態を予測するためのサブモデルを構築する必要がある。しかしながら、各工程出側での金属組織をオンラインで計測する技術が確立されていないため、実用的な物理モデルを構築し維持することは難しい状況にある。

そこで、製造現場においては、物理モデルではなく、入出力データから直接的に予測モデルを作成するブラックボックスモデリングが用いられてきた。その中でも最小自乗法による簡易なパラメータ同定方法が確立している線形重回帰モデルが材質予測モデルとして多く用いられてきた。

このように、材質制御を目的とした材質予測モデルとしては、これまで簡易な数式が用いられてきた。しかし、複雑かつ非線形なプロセスを対象に、多様な製造条件と製品品質の関係をモデルパラメータの固定された線形式で表現することは困難であるため、十分な予測精度が得られなかった。

そこで、モデルの精度を確保するために、製造条件を複数の区分に分割し、区分ごとにモデルパラメータを持つことが一般的に行われてきた。材質予測についても、スラブや製品の寸法、材質、温度などにより区分されたモデルパラメータテーブルが利用されてきた。

製造プロセスでは、操業状況の解析やさまざまな品質管理・改善のため、大量の製造実績データをデータ

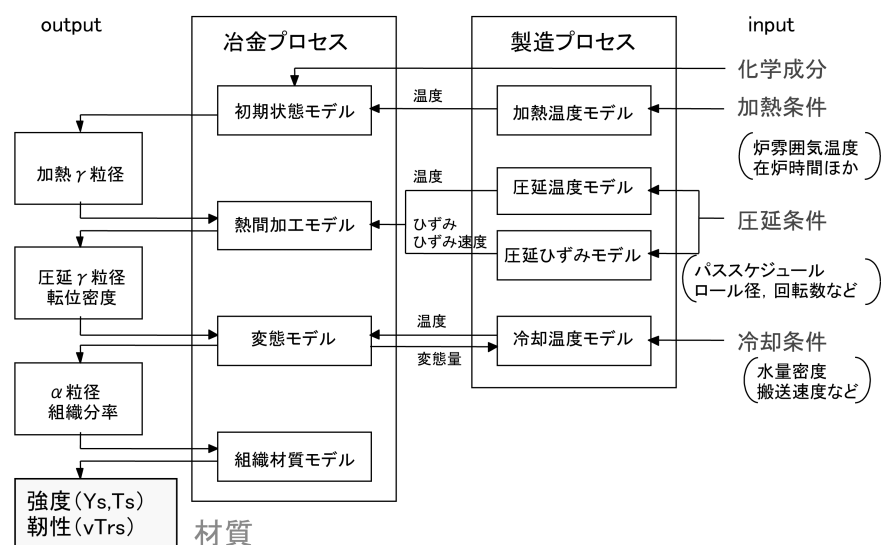


図 2.3 冶金現象を模倣した材質予測モデルの一例

ベースに蓄積している。従来からこのデータベースを用いて、上記予測モデルのパラメータテーブルの値が決められていた。しかし、製造技術の進歩、製造設備の変更、顧客要求特性の変化、設備特性の経年変化、ならびに原材料価格変動に対応した製造条件の変更などの環境変化が頻繁に生じる場合、過去のデータから構築したモデルでは対象をうまく表現できず、十分な予測精度を得ることができない。このような場合でも、新たなデータをもとに、一定期間ごとにモデルパラメータテーブルの値の調整や区分の見直しを行えば、経時変化に対応できる。しかしながら、この予測モデルの調整は人の手に頼らざるを得ず、その作業負荷が高いことから、頻繁な調整ができず精度の維持が困難という問題があった。そして、このような精度の低いモデルを用いてフィードフォワード制御を行っていたため、材質制御精度の向上に限界があった。

2.5 鉄鋼製品の寸法制御

本節では、品質制御のひとつである寸法制御について、対象とするプロセスを詳細に説明し、制御目的と制御構成を説明する。また、寸法制御について、従来の制御手法とその課題について説明する。

まず、対象とするプロセスについて、2.5.1 節で説明する。ここでは、本論文で述べる寸法制御の適用対象の厚鋼板の圧延プロセスと、寸法の作りこみの概要について述べる。

厚鋼板の寸法制御には、厚み寸法制御と幅寸法制御があるが、厚み寸法の制御のためのモデル、制御目的、および、制御構成について、2.5.2 節で説明する。

そして、幅寸法の制御のためのモデル、制御目的、および、制御構成について、2.5.3 節で説明する。

最後に、従来の寸法制御モデルとその課題について、2.5.4 節で述べる。

2.5.1 寸法制御の対象プロセス

本研究で対象としたのは、厚鋼板製造プロセスである。厚鋼板の製品品質の指標としては、強度・伸び・靱性などの材質、厚み・幅・長さの寸法、形状、および外観などがあるが、ここでは、厚鋼板の寸法制御を対象とする。

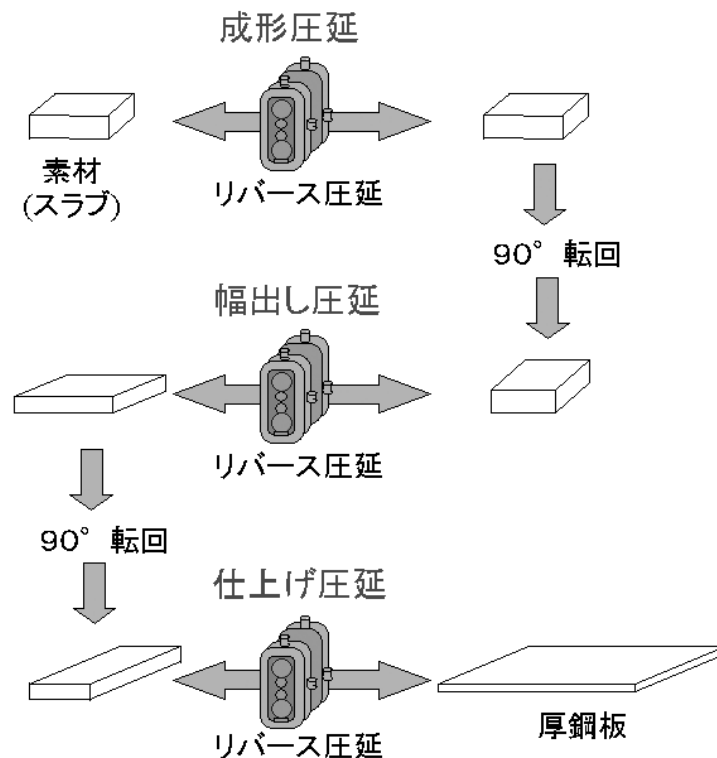


図 2.4 厚鋼板の寸法の作りこみ（文献 [1] から引用）

厚鋼板の圧延プロセスは、スラブを製品として所定の寸法に作りこむプロセスである。圧延プロセスにおいて作りこまれる厚鋼板の板厚は 6～360mm，最大板幅は 5350mm，最大板長さは 27m である [66]。粗圧延機

および仕上圧延機それぞれ1スタンド，または，仕上圧延機1スタンドの4段式熱間圧延機による往復繰り返し圧延（リバース圧延）によって製造される．厚鋼板用圧延機はロールの正逆転が可能であり，ロールの前後にスラブを90°回転させる機構を持っている．薄鋼板用圧延機と比べてより幅広くかつ強力であること，スラブの幅より広い幅の製品の圧延ができることなどの特徴がある [67]．

厚鋼板は，図 2.4 に示すように，成形圧延，幅出し圧延，仕上げ圧延の3つの過程に分けて圧延機で製品寸法が作りこまれる．まず，第1段階の成形圧延において，スラブの表面手入れの影響を除去し，所定のスラブ厚に整える．次に，第2段階の幅出し圧延において，スラブを平面内で90度転回し，圧延機でリバース圧延し，幅方向の寸法を製品幅に近づける．さらに，第3段階の仕上げ圧延において，再び材料を90度転回し，圧延機でリバース圧延し，長さ方向に所定の厚みまで圧延される．

2.5.2 厚み寸法の制御

2次元圧延理論と厚み寸法制御のモデル

円筒形状の上下ロールの間を，ロールを回転させながら材料を通過させ材料の厚みを減少させる金属加工においては，板幅方向の材料の変形が無いものと仮定して，板厚方向と圧延方向の2次元変形として取り扱うことができる．この仮定に基づいて，圧延荷重，圧延トルクなどを計算する論理が2次元圧延理論である．

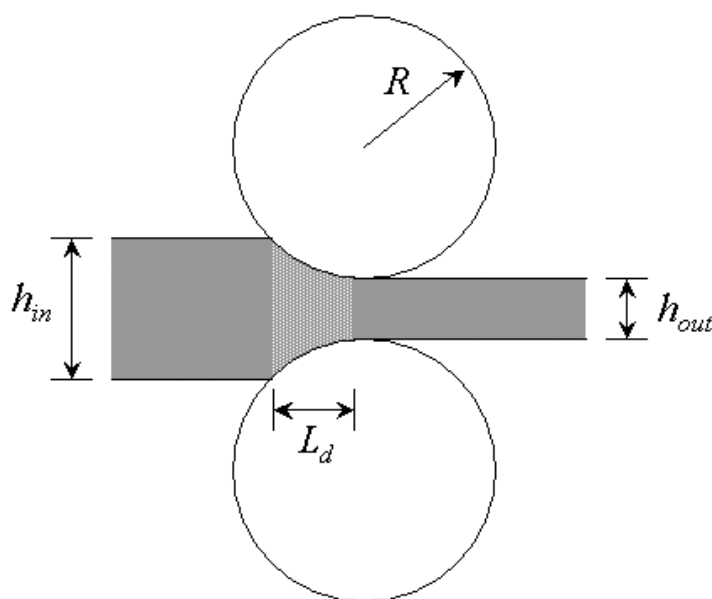


図 2.5 2次元圧延理論における圧延プロセスを特徴づけるパラメータ

図 2.5 は，板厚方向・圧延方向の断面図である． h_{in} は入側板厚， h_{out} は出側板厚， R はロール半径である． L_d は接触弧長と呼ばれ，ロールと材料が接触している領域の圧延方向成分の長さであり，実機での生産においては，ロール半径に対して入側板厚と出側板厚の差は十分に小さく，簡単な数式

$$L_d \approx R \sqrt{h_{in} - h_{out}} \quad (2.2)$$

でよく近似表現できる [68]．これらは，2次元圧延理論における圧延プロセスを特徴づけるパラメータである．圧延荷重は，圧延機の変形や出側板厚の決定に際して最も基礎となる値である．圧延荷重 P は，しばしば

次の式で計算される [69, 70] .

$$P = Q k_m L_d b \quad (2.3)$$

ここで, k_m は2次元変形抵抗, b は圧延幅である. Q は圧下力関数と呼ばれ, 実機実験によりあわせこまれる. 変形抵抗 k_m は, 材料中微量元素の濃度, 圧延温度, ひずみ, ひずみ速度の関数で表現され, そのモデルパラメータは実機実験によりあわせこまれる. 変形抵抗予測式には美坂の式 [71] または志田の式 [72] がよく用いられる. これらのモデルにより圧延荷重が見積もられる.

圧延機を構成する各部品は圧延荷重によって弾性変形する. 圧延機全体の垂直方向の変形量に対する圧延荷重の比は, ミル定数と呼ばれる. ミル定数は厚板圧延機では 500 ~ 1,000 ton/mm あり, 圧延中, 1,000 ton のオーダーの圧延荷重が発生するので, 圧延機には 1mm 以上の変形が生じる [67]. 無負荷時, すなわち圧延する前のロール開度 S_0 と圧延機の出側板厚 h_{out} の関係を表現する次式をゲージメータモデルと呼ぶ.

$$h_{out} = S_0 + f(P) + \Delta_H \quad (2.4)$$

ここで, $f(P)$ は圧延荷重 P のときの圧延機の弾性変形の影響による板厚変動で, 圧延荷重にはほぼ比例するので, ミル定数 M を用いて $f(P) = P/M$ でよく近似される. また, Δ_H はそれ以外の影響であり, ロール磨耗, ロール熱膨張などの影響による板厚変動である [73]. ゲージメータモデルは, 実機圧延実験によりあわせこまれる [74].

厚み寸法制御の目的と制御構成

厚み寸法制御の目的は, 目標の厚みに制御することである. ここでは, 目標の厚みに制御するための圧延機のロール間隔の設定方法について述べる.

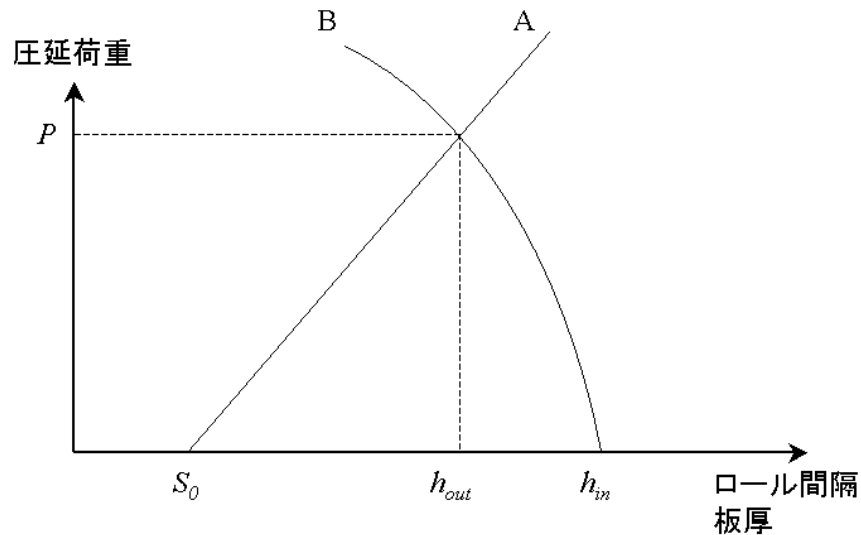


図 2.6 弾性特性曲線および塑性特性曲線

無負荷時のロール間隔 S_0 から材料を圧延機に噛み込ませてロールを押し開いたときの, ロール間隔と圧下力との間には, 式 2.4 に示すような直線的な関係が成立し, 図 2.6 の A 線のように表される. これを圧延機の弾性特性曲線と呼ぶ. 一方, 圧延される材料の側からみると, 入側板厚 h_{in} の材料を圧延して薄くするときの

圧延力は、薄くするほど大きくなり、式 2.2 および式 2.3 から求められる関係があり、図 2.6 の B 線のように表される。これを材料圧延の塑性特性曲線と呼ぶ。圧延中には弾性特性と塑性特性の両方を満足させなければならないので、図 2.6 の 2 つの曲線の交点で圧延条件が決まり、その交点の座標が出側板厚 h_{out} および圧延荷重 P である [75]。

圧延機のセットアップ計算は、出側板厚 h_{out} の目標値を満足するための無負荷時のロール間隔 S_0 を求める計算であり、式 2.2、式 2.3、および、式 2.4 を連立させて解くことにより決めることができる。

圧延中に、圧延温度や圧延速度の変化による変形抵抗の変動、または、入側板厚の変動が生じると、出側板厚が変動する。それを相殺するようにロール間隔を圧延中に操作することにより、出側板厚を常に一定にする自動板厚制御 (AGC: Automatic Gauge Control) が行われている。自動板厚制御にはいくつかの方法があるが、代表的なものに次の 2 つがある。

出側板厚が変動すると、それとともに圧延荷重も変動するので、圧延荷重を連続計測することによって、出側板厚の変化を即時に把握することが可能である。式 2.4 のゲージメータモデルを用いて、圧延荷重の変動による圧延機の弾性変形量の変動分を相殺する分だけロール間隔を操作することにより、出側板厚を常に一定に制御することができる。この方法はゲージメータ AGC [76, 77, 78]、または、絶対値 AGC [79, 80, 81] と呼ばれる。

圧延機後面に板厚計を設置し、これにより板厚を実測して、ロール間隔の操作にフィードバックすることによって、出側板厚を所定の値に制御することができる。この方法はモニター AGC と呼ばれる [82, 83]。

上述のように、2次元圧延理論に基づくモデルベースのセットアップ、ならびに、自動板厚制御により、厚み寸法の作りこみを行っている。

2.5.3 幅寸法の制御

厚鋼板の幅寸法は、図 2.4 の第 2 段階の幅出し圧延において作りこまれる。幅出し圧延においては、材料の厚みを減少させながら、圧延方向に材料を伸ばして、材料の幅寸法を目標の製品幅に近づける。幅寸法制御は、モデルベースで行われ、次に示すモデルが用いられる。

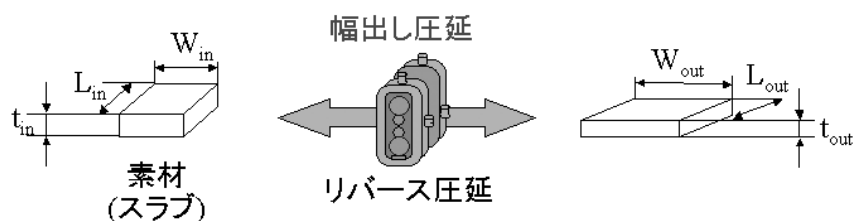


図 2.7 幅出し圧延 (文献 [1] から引用)

幅寸法制御のモデル

幅寸法制御モデルには次に説明する簡単な物理モデルが用いられる。図 2.7 に示すように、幅出し圧延前のスラブの寸法を t_{in} , W_{in} , L_{in} とし、幅出し圧延終了直後の材料の寸法を t_{out} , W_{out} , L_{out} とする。塑性変形は、体積一定則の条件のもとで起こる [84]。したがって、次式のように圧延機入側と出側の材料の体積は等しい。

$$t_{in} W_{in} L_{in} = t_{out} W_{out} L_{out} \quad (2.5)$$

2次元圧延理論のロール幅方向には材料が変形しない ($L_{in} = L_{out}$) という仮定のもとでは、

$$W_{out} = t_{in} W_{in} / t_{out} \quad (2.6)$$

が導かれる。ここで注意しなければならないのが、第3段階の仕上げ圧延における幅変動である。円筒形状の上下ロールの間を、ロールを回転しながら材料を通過させ材料の厚みを減少させる金属加工においては、ロール幅方向にはほとんど寸法が変化しないが、実際には若干変動する。この幅変動量を加味するため、調整パラメータ p_1 および p_2 を用いて、

$$W_{out} = (t_{in} W_{in} + p_1) / t_{out} + p_2 \quad (2.7)$$

で表現される幅寸法予測モデルが用いられる [85]。

幅寸法制御の目的と制御構成

幅寸法制御の目的は、目標の幅寸法に制御することである。ここでは、目標の幅寸法に制御するための圧延機のロール間隔の設定方法について述べる。

幅の作り込みのための圧延機のセットアップ計算は、次のように行われる。板圧延においては、圧延機のロール間隔を操作して材料の厚みを制御することが容易であるため、幅出し圧延終了直後の厚み寸法を求めることが行われる。式 2.7 の幅予測モデルを、 t_{out} について解いた逆モデル

$$t_{out} = (t_{in} W_{in} + p_1) / (W_{out} - p_2) \quad (2.8)$$

を用いて、 t_{in} および W_{in} に実測されるスラブの寸法を代入し、 W_{out} に目標の製品幅を代入することで、幅出し圧延終了直後の厚み寸法を計算する。そして、2.5.1 節で説明したゲージメータモデル (式 2.4)、ならびに、圧延荷重予測式 (式 2.3 および式 2.2) によって、ロール間隔の設定値が計算され、圧延機のロール位置が設定される [86]。

2.5.4 従来の寸法制御モデルとその課題

厚み寸法制御については、フォードフォワード制御のモデルベースセットアップ、および、圧延荷重および板厚の実測値に基づくフィードバック制御である自動板厚制御を用いることで、精度の高い厚み寸法の作りこみが実現されている。

一方、幅寸法制御はモデルベースセットアップのフィードフォワード制御のみで行われている。モデルの精度が幅寸法の制御精度の直接影響する。このプロセスでは、顧客の多様なニーズに対応するため、さまざまな寸法・材質の製品を一つの圧延機で作り込んでいる。そのため、一つ一つの製品の圧延過程で起こる現象を予測し、それに合わせて圧延機の操作を行う必要がある。2次元圧延理論で表現できない幅変動現象は、複雑かつ非線形であるが、3次元有限要素法等を用いて精密な物理モデルを構築する研究開発が進められている [87]。セットアップ計算は、圧延機の前工程までの製造実績を用い、圧延される直前のタイミングで短時間に行う必要がある。計算時間の制約から、その精密な物理モデルをオンライン生産システムのセットアップ計算に用いることは難しい状況にある。以上の理由により、これまでセットアップ計算に実装されるモデルとしては、圧延実績データを解析して作成した簡易な回帰式が用いられてきた [86]。

幅変動量はスラブ寸法，製品寸法などにより異なり，その現象は複雑・非線形であるので，一種類のモデルパラメータで表現することは困難である．このような場合には，モデルの精度を確保するために，複数の区分に分割してモデルパラメータを持つことが一般的に行われている．従来，幅予測についても，モデルの精度を維持するため，スラブおよび素材の寸法，材質などにより区分されたテーブルを作成し，変動量を補正してきた．

2.5.4 節で述べた材質制御モデルの課題と同様の課題が幅寸法制御モデルにもある．

幅寸法制御においても，大量の実績データから，上記予測モデルのパラメータテーブルの値が決められていた．しかし，製造技術の進歩，製造設備の変更，顧客要求特性の変化，設備特性の経年変化，ならびに原材料価格変動に対応した製造条件の変更などの環境変化が頻繁に生じる場合，過去のデータから構築したモデルでは対象をうまく表現できず，十分な予測精度を得ることができない．このような場合でも，新たなデータをもとに，一定期間ごとにモデルパラメータテーブルの値の調整や区分の見直しを行えば，経時変化に対応できる．しかしながら，この予測モデルの調整は人の手に頼らざるを得ず，その作業負荷が高いことから，頻繁な調整ができず精度の維持が困難という問題があった．そして，このような精度の低いモデルを用いてフィードフォワード制御を行っていたため，寸法制御精度の向上に限界があった．

2.6 鉄鋼製品の形状制御

本節では、品質制御のひとつである形状制御について、対象とするプロセスを詳細に説明し、制御目的と制御構成を説明する。また、形状制御について、従来の制御手法とその課題について説明する。

まず、対象とするプロセスについて、2.6.1 節で説明する。ここでは、本論文で述べる寸法制御の適用対象の厚鋼板の圧延プロセスと、形状の作りこみの概要について述べる。

厚鋼板の形状には、板クラウン、平坦度、ならびに、平面形状があるが、板クラウンおよび平坦度の制御のためのモデル、制御目的、および、制御構成について、2.6.2 節で説明する。

そして、平面形状の制御のためのモデル、制御目的、および、制御構成について、2.6.3 節で説明する。

最後に、従来の形状制御モデルとその課題について、2.6.4 節で述べる。

2.6.1 形状制御の対象プロセス

本研究で対象としたのは、厚鋼板製造プロセスである。厚鋼板の製品品質の指標としては、強度・伸び・靱性などの材質、厚み・幅・長さの寸法、形状、および外観などがあるが、ここでは、厚鋼板の形状の制御を対象とする。厚鋼板の形状を表す指標としては、板クラウン、平坦度、および、平面形状がある。本節では、これらの定義と発生のメカニズムについて述べる。

板クラウンと平坦度

厚鋼板を圧延するとき、1,000ton のオーダーの圧延荷重が発生する。その大きな荷重により、圧延機の部品であるロールが弾性変形して曲がってしまう。それにより、製品の形状の作り込みに様々な影響を与える。

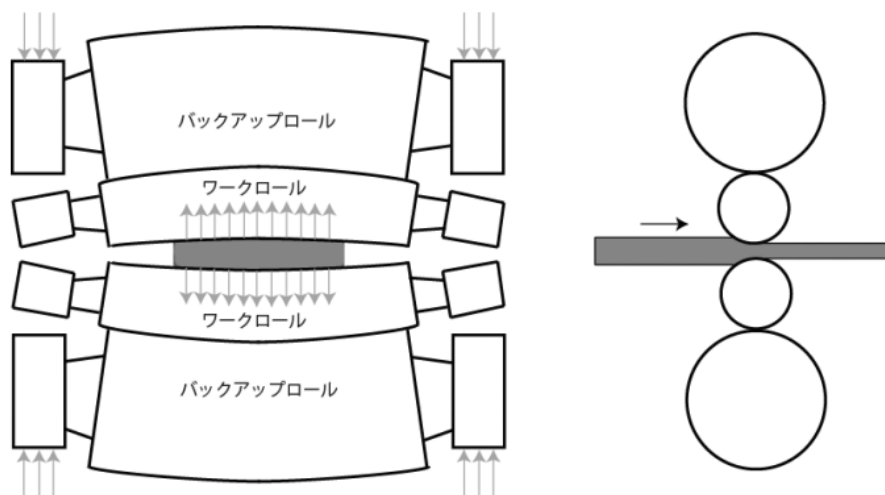


図 2.8 4 段式熱間圧延機のロールベンディング (文献 [88] から引用)

これを、図 2.8 に示す厚鋼板用の圧延機によく用いられる 4 段式熱間圧延機で説明する。この圧延機は、鋼材と接する上下のワークロール、ならびに、それらを支えるバックアップロールの計 4 本のロールで構成されている。板を薄くするために圧下を大きくすると大きな荷重が発生し、4 本のロールは弾性変形して曲がる。

その変形したロール形状によって、鋼板も幅方向で中央部が厚く端部が薄くなる。このようにして発生した板幅方向の板厚差は、板クラウンと呼ばれる。鋼板の板厚が許容範囲を下回った端の薄い部分は、切り捨てられる。歩留まりを向上させるために、この板クラウンが小さくなるように制御する必要がある [89]。板クラウン cr は、板幅中央部の板厚 h_c と板端部の板厚 h_e の差で定義される指標で評価される [90]。クラウンメータ [91] と呼ばれる 3 ヘッドの線板厚計により、図 2.9 に示すように、板幅中央部の板厚 h_c と両板端所定位置 (25 ~ 100mm) の板厚 h_{e1} , h_{e2} を計測し、

$$cr = h_c - h_e \quad (2.9)$$

から板クラウン cr が計算される。ここで、 $h_e = (h_{e1} + h_{e2})/2$ である。

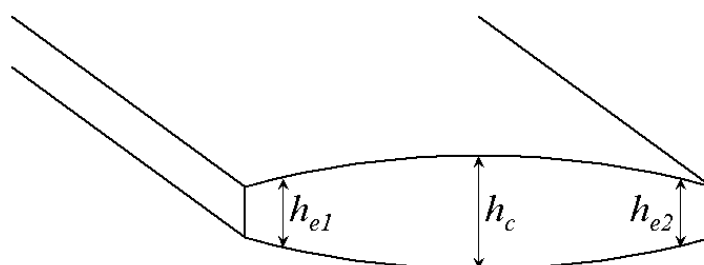
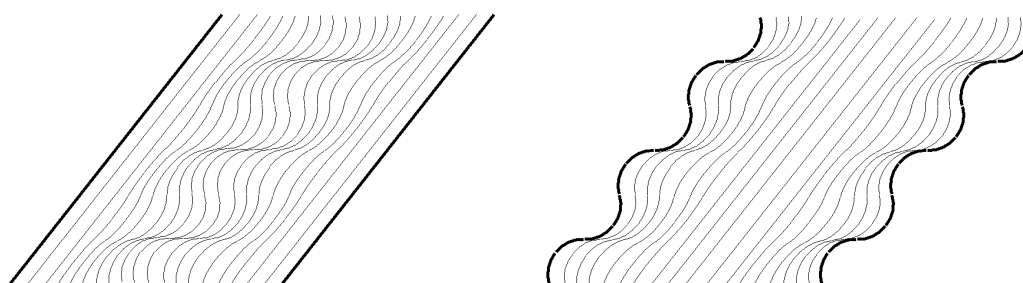


図 2.9 板クラウン (文献 [88] から引用)



(a) 中伸び/腹伸び

(b) 端伸び/耳伸び

図 2.10 板幅方向の不均一な伸び (文献 [88] から引用)

鋼板は圧延機により圧下され薄くなった部分は、長手方向に伸びていく。圧延機で板幅中央部の圧下力を高めて、板クラウンを小さくしようとするとき、鋼板は圧下力の強い中央部が余分に長手方向に伸びてしまい、図 2.10(a) のように中央部が波を打つ。これは、中伸び、または、腹伸びと呼ばれる [90]。逆に、板幅方向全体をより薄くしようと圧下量を大きくした場合、または、硬い鋼板を圧下した場合は、大きな圧延荷重が発生することによりロールが大きくたわみ、板幅中央部と比較して、板端部の圧下量が大きくなって長手方向に伸びるため、図 2.10(b) のように板端部が伸びて波を打つ。これは、端伸び、または、耳伸びと呼ばれる [90]。こうした不均一な伸びが生じると、最悪の場合、圧延機の途中で鋼板が引っかかり、ロールを破損したり板が切

れることがある [89]。このようなトラブルは、生産性の大幅な低下を招くので、均一に伸びるように制御する必要がある。これらの不均一な伸びは、平坦度と呼ばれ、板幅方向の伸び差で定義される指標で評価される [92]。平坦度を求めるためには、板幅方向各部の波の形を定量化する必要がある。波の形は、図 2.11 に示すように、急峻度と呼ばれる指標で評価される。ここで δ および L はそれぞれ歪の高さと長さであり、急峻度 λ は、 $\lambda = \delta/L$ で計算される。そして、平坦度 λ^* は、板幅中央部の急峻度 λ_c と板端部の急峻度 λ_e の差で定義される指標で評価される。平坦度計 [93] により、板幅方向中央部と両板端所定位置 (25~100mm) における鋼板の走行速度と上下変位量を計測し、板幅中央部の急峻度 λ_c と両板端所定位置の急峻度 λ_{e1} , λ_{e2} を求め、

$$\lambda^* = \lambda_c - \lambda_e \quad (2.10)$$

から平坦度 λ^* が計算される。ここで、 $\lambda_e = (\lambda_{e1} + \lambda_{e2})/2$ である。

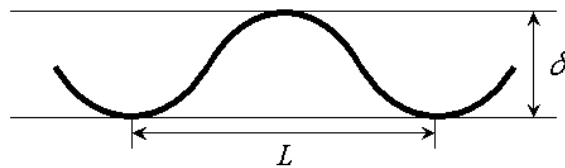


図 2.11 急峻度 $\lambda = \delta/L$ (文献 [88] から引用)

平面形状

厚鋼板は、2.5.1 節の図 2.4 で示したように、成形圧延、幅出し圧延、仕上げ圧延の 3 つの過程に分けて圧延機で製品寸法が作りこまれる。

これらの圧延の際、圧延ロールに対して鋼材を真っ直ぐに通さないと、不均一塑性変形が起こり、鋼材が矩形からずれてしまう。矩形からずれた部分は製品とならず、最終的に切り捨てられ、歩留まりロスとなる。これを減らすことは、製造コスト低減のために重要である。

圧延ロールに対して鋼材を真っ直ぐに通すため、圧延機前後にサイドガイドを設けるなどの機械的な工夫や、圧延機のセットアップを正確に行うなどのオペレータの努力により、鋼材の平面形状を矩形に近づける努力がなされてきた。しかし、鋼材の先後端部で起こる不均一塑性変形についてはこれらの工夫では解決できない。鋼板端部に生じる不均一塑性変形は、板厚が大きい圧延初期の成形圧延、幅出し圧延の段階で顕著に起こる。仕上げ圧延終了時の平面形状は、図 2.12 に示すように、製品先端部が凸の形状となる [94, 95]。この先端部の矩形からずれた部分はクロップ (crop) と呼ばれ、切り捨てられる。また、その切り捨てられる部分の長さはクロップ長さと呼ばれる。クロップ長さを短くするように制御することは、歩留まり向上のために重要である。

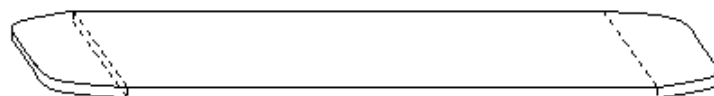


図 2.12 仕上げ圧延終了時の平面形状と先端部のクロップ (文献 [88] から引用)

2.6.2 板クラウンおよび平坦度の制御

板クラウンおよび平坦度不良は、板厚減少率が幅方向で異なることによって生じる。これを小さくするための方法には、以下のような方法がある。

板クラウンおよび平坦度の制御機構

まず、ワークロールを曲がりにくくする機械的工夫として、バックアップロールではさむ4段式圧延機、ワークロールとバックアップロールの間に中間ロールを挟んだ6段式圧延機、さらに多くのロールを用いる多段式圧延機がある。

次に、ワークロールを凸形の形状にするロールクラウン [96, 97, 98]、ロールをあらかじめ板クラウンと逆方向に曲げておくロールベンダー [99] がある。これらはいずれも、ロールに材料がかみ込む前に、ワークロール間の間隙を板幅中央が薄い凹形にしておき、材料がかみ込んだ時点で圧延荷重によって、上下のワークロール表面が平行になることを意図したものである。

さらに、ロールを幅方向にシフトするロールシフト圧延機と、ロールの軸をクロスさせるロールクロス圧延機がある。ロールシフト圧延機には、ワークロールをシフトさせる方式と、中間ロールをシフトさせる方式がある。ワークロールシフト方式は、特殊な形状を持つロールをシフトすることで、広範囲の板幅に対し板厚の均一化や平坦度の向上を図る [90, 100, 101, 102, 103]。中間ロールシフト方式は、中間ロールの胴端が圧延材の端近くになるようにシフトすることで、ロールベンディングによる板厚の均一化や平坦度の向上をより効果的に行おうとするものである [104, 105]。ロールクロス圧延機では、上下それぞれのバックアップロールとワークロールをペアでロール軸を互いに1度前後交差させることによって、幅方向の上下ロール間の間隔を調整し、板クラウンを小さくすることができる [106, 107, 108]。

以上のように、板クラウンと平坦度を小さくする方法は、圧延機の機構によって様々である。以降は、一例として、4段式圧延機でワークロールベンダーによる制御を前提に議論する。

板クラウンおよび平坦度制御の目的

上述の圧延機構を操作することにより、板幅方向ワークロールプロフィールを変化させ、板幅方向圧下力分布を変化させることができる。理想的には、板クラウンおよび平坦度を0にすることが望ましい。しかしながら、板クラウンと平坦度は大きな相関関係があるため、双方を同時に0に近づけるよう制御することは容易ではない。板クラウンが0になるようにリバース圧延各パスの板幅方向中央部の圧下力を高めると、中央部が伸びすぎてしまい平坦度が悪くなる。逆に、平坦度が0になるためには、原理的には圧延前のクラウン比（すなわち、鋼板中央厚と板クラウンの比率）と圧延後のクラウン比が同じになるようにすればよいが、そのようにリバース圧延各パスの板幅方向ワークロールプロフィールを調整すると、板クラウンは小さくならない。したがって、操作変数と板クラウンおよび平坦度の因果関係をモデル化し、板クラウンおよび平坦度の許容範囲を満足しながら、それらを0に近づけるような操作変数の値を決定する制御が行われる。

板クラウンおよび平坦度制御のモデル

板クラウンおよび平坦度制御のためのモデルは圧延実験を重ねて構築されてきた。圧延実験により次のような知見が得られている [89]。

- 長手方向だけでなく幅方向にもわずかに圧延によって伸びるため、クラウン比が変わるように板幅方向圧下力分布を変化させても、圧延後の長手方向の伸びは幅方向の伸び分だけ小さくなり板形状は若干改善される。
- 板幅が大きい、板厚が小さい、または、ロール径が小さいと幅方向の伸びが小さくなるため形状の改善代が小さく、クラウン比を少し変えただけで平坦度不良が発生しやすい。
- クラウンの遺伝と呼ばれる現象が起こる。例えば、圧延前のクラウンが大きな鋼板をクラウンを減少させるために、板幅方向圧下力分布を変化させた場合、鋼板の中央部が端部よりも余分に伸びようとして、圧延機を出た後に中伸びの波が出る傾向の圧延となる。しかし、圧延機の中では鋼板はロールに押さえつけられていて波が出ることは許されない。そのため中央部の鋼板はロールと周辺材料に拘束された状態になり、中央部の圧延荷重が大きくなってその部分のロール変形が大きくなって鋼板のクラウンが若干大きくなる。すなわち、伸びを抑えようとする内部応力によって入側のクラウンが少し残る現象が発生する。

上述のような知見をもとに、板クラウンおよび平坦度制御のモデルが構築されている。例えば、以下のようなモデルが提案されている [109]。

板クラウンモデルは、クラウン遺伝係数と呼ばれる調整パラメータをもつロールの変形状態を表す物理モデルである。シミュレーションによりモデルパラメータが調整される。出力変数（制御変数）は、出側板クラウンである。入力変数には、操作変数であるベンディング力、入側板クラウン、圧延荷重、板幅、板厚、圧下率、ワークロールのイニシャルクラウン、サーマルクラウン、および、摩耗量、ならびに、バックアップロールクラウンがある。サーマルクラウンは熱膨張により生じるロールクラウンであり、圧延時の増加と冷却時の減少を表す時間積分式と幅方向分布形状を表す簡易式で構成される [110]。摩耗量は、ロール負荷、すなわち、圧延荷重 / 板幅 × 圧延長さの累積値にほぼ比例する [111]。これに、幅方向圧延荷重分布の影響を考慮した簡易式で構成される。

平坦度モデルは、クラウン比率の変化や板幅、板厚、ロール径の違いによって生じる形状変化を示す形状変化係数 [112]、ならびに、入側形状が出側形状に及ぼす影響を表現するための入側伸び率差遺伝係数 [113] と呼ばれる調整パラメータをもつ物理モデルである。形状変化係数と入側伸び率差遺伝係数は実機実験により調整される [114]。出力変数（制御変数）は、出側平坦度である。入力変数は、出側板クラウン、入側板クラウン、出側板厚、入側板厚、入側伸び率差、出側伸び率差である。

板クラウンおよび平坦度の制御構成

板クラウンおよび平坦度は、次のような構成のシステムで制御される [109]。

ハードウェア構成は、次の通りである。

- センサ

圧延機直近に板厚計，クラウンメータ，および，平坦度計を配して，各パスの実績値を計測する．

- アクチュエータ

油圧駆動のワークロールベンディング装置により，板幅方向の圧下力分布を変化させる．

- コントローラ

プロセス計算機により，センサ情報から制御目標を達成するためのアクチュエータ設定値を計算する．

コントローラの制御ロジックを以下に示す．

まず，各パスの目標板クラウン比率を決定する．最終パスにおいて目標板クラウン比率になるように，少しずつ板クラウンを変化させるようにする．板厚が小さい最終パス付近においては，大幅にクラウン比率を変化させると平坦度不良が発生しやすいので，クラウン比率の変化率を小さくし，それまでの途中パスにおいては，板厚が比較的大きいのでクラウン比率の変化率を比較的大きくなるようにする．

各パスのベンディング力設定値は次のようにして計算する．

1. 板厚計，クラウンメータ，および，平坦度計により，前パスの板厚，板クラウン，平坦度の実績収集を行う．
2. 平坦度モデルにより次パスの平坦度を計算し，許容平坦度を超えると予想される場合には，次パス目標板クラウンを変更する．
3. 平坦度計の情報をを用いた最終数パスでは，許容平坦度の値を小さくし，最終の平坦度が良好となる次パス目標板クラウンとする．
4. 次パス予測荷重をもとに板クラウンモデルを用いて，次パスの板クラウンが目標値となるようなベンディング力設定値を算出する．

最終の数パスにおいては，平坦度計の実測データに基づき平坦度が良好となるようにベンディング力を設定する．それまでの途中パスにおいては，各パスの目標板クラウンに一致させるようにベンディング力を設定する．

2.6.3 平面形状の制御

平面形状制御の目的と制御構成

平面形状制御の目的は，先端部の平面形状を矩形に近づけことである．

それを実現するために，1970年代後半，MAS (Mizushima Automatic plan view pattern control System) 圧延法 [94]，差厚幅出し圧延法 [95]，または，DBR (Dog Bone Rolling) 法 [115, 116, 117, 118, 119] と呼ばれる平面形状制御技術が実用化され，製品歩留まりの向上に貢献してきた．

MAS 圧延法は，圧延終了後の鋼材の平面形状を定量的に予測し，その不良形状に相当する部分の体積をあらかじめ減らしておくことにより平面形状を矩形に近づけようとする圧延法である．すなわち，図 2.13 に示すように，幅出し圧延終了時の板厚分布を操作することにより，仕上げ圧延後の先端部平面形状を制御するフィードフォワード制御手法である．先端部の平面形状が凸状になると予測される場合は中央部を薄くし，逆

に凹状になると予測される場合は中央部を厚くするように操作される．その操作量を決めるためのセットアップ計算は，幅出し圧延終了時の板厚分布と先端部の平面形状の関係を表現する平面形状予測モデルを用いて行われる．その計算は，圧延機の前工程までの製造実績を用い，圧延される直前のタイミングで短時間に行う必要がある．

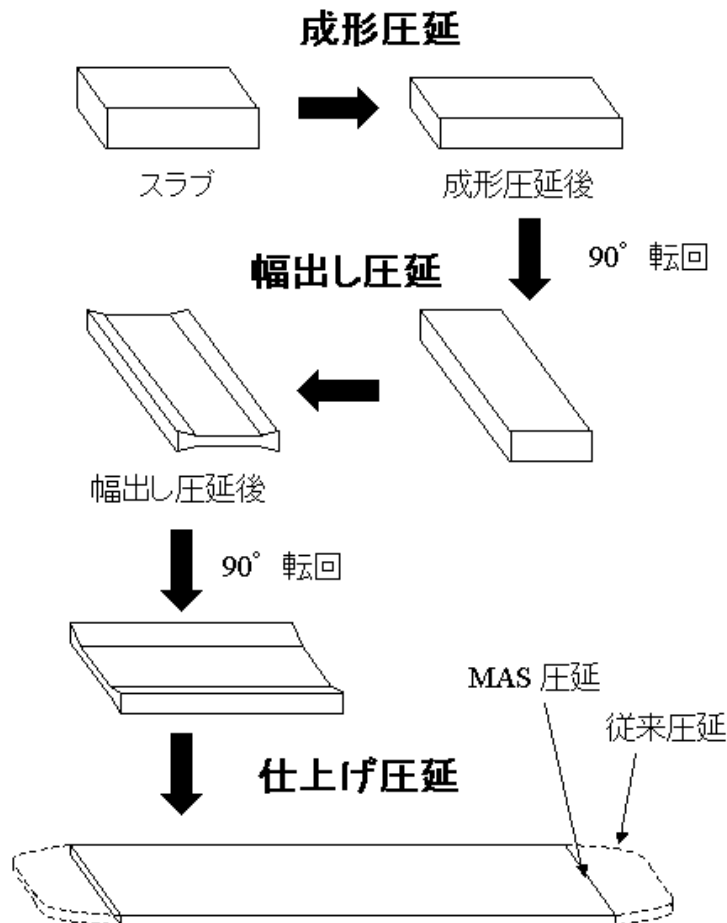


図 2.13 MAS 圧延法 (文献 [88] から引用)

平面形状制御のモデル

幅出し圧延終了時の板厚分布と先端部の平面形状との関係は，非常に複雑かつ非線形であるが，3次元有限要素法などを用いて精密な物理モデルを構築する研究開発が行われてきた [120, 121]．しかし，計算時間の制約から，その精密な物理モデルをオンライン生産システムのセットアップ計算に用いることは難しい．

以上の理由により，これまでセットアップ計算に実装されるモデルとしては，簡易な回帰式が用いられてきた．

鋼板先端部のクランプ形状予測モデルとして，柳沢ら [94] は，次のようなものを提案している．出力変数（制御変数）は，幅方向各位置のクランプ長さである．入力変数は，幅出し比（製品幅 / スラブ幅），長さ方向圧延比（製品長 / スラブ長），成形圧延圧下量，幅出し圧延圧下量，ならびに，操作変数である幅出し圧延終了時の各位置板厚変更量である．

升田ら [115] は、次のようなものを提案している。出力変数（制御変数）は、幅方向各位置のクロップ長さである。入力変数は、幅出し圧延終了時の中央部厚み、幅出し圧延終了時の鋼板断面積、ならびに、操作変数である幅出し圧延終了時の DB 部断面積である。

これらのモデルパラメータは、圧延実験を繰り返して実績データを収集し、統計解析を行って調整されている。

2.6.4 従来の形状制御モデルとその課題

板クラウンおよび平坦度、ならびに、平面形状予測モデルとしては、これまで上述のような簡易な数式が用いられてきた。しかし、複雑かつ非線形なプロセスを対象に、多様な製造条件と製品品質の関係をモデルパラメータの固定された簡易な数式で表現することは困難であるため、十分な予測精度が得られなかった。

板クラウンおよび平坦度の制御においては、2.6.2 節で述べたように、圧延機直近のセンサーにより各パスの実績値を計測し、その値をもとに次パスの設定値を計算する制御構成となっている。そのため、モデルの誤差が制御性能へ与える影響は比較的小さい。

一方、平面形状制御においては、板クラウンおよび平坦度制御のように圧延機直近のセンサーで逐次修正することはできない。仕上げ圧延終了時の平面形状を予測して、幅出し圧延終了時の時点の板厚分布を決定する必要がある。したがって、モデルの誤差が制御性能に大きく影響する。そこで、モデルの精度を確保するために、製造条件を複数の区分に分割し、区分ごとにモデルパラメータを持つことが一般的に行われてきた。平面形状予測についても、スラブや製品の寸法、材質、温度などにより区分されたモデルパラメータテーブルが利用されてきた。

製造プロセスでは、操業状況の解析やさまざまな品質管理・改善のため、大量の製造実績データをデータベースに蓄積している。従来からこのデータベースを用いて、上記予測モデルのパラメータテーブルの値が決められていた。しかし、製造技術の進歩、製造設備の変更、顧客要求特性の変化、設備特性の経年変化、ならびに原材料価格変動に対応した製造条件の変更などの環境変化が頻繁に生じる場合、過去のデータから構築したモデルでは対象をうまく表現できず、十分な予測精度を得ることができない。このような場合でも、新たなデータをもとに、一定期間ごとにモデルパラメータテーブルの値の調整や区分の見直しを行えば、経時変化に対応できる。しかしながら、この予測モデルの調整は人の手に頼らざるを得ず、その作業負荷が高いことから、頻繁な調整ができず精度の維持が困難という問題があった。

そして、このような精度の低いモデルを用いてフィードフォワード制御を行っていたため、平面形状制御精度の向上に限界があった。

2.7 まとめ

本章では、研究の対象である鉄鋼製品の品質設計と品質制御について、特徴をまとめた。

まず、鉄鋼の製造プロセス、および、鉄鋼製品の概要を説明し、その中の鉄鋼製品の品質管理の位置づけを明確にした。鉄鋼製品は多種多様であり、顧客要求に応じたオーダーメイドによる生産が基本である。顧客の要求品質に応じて、製品のつくりわけをする必要があることを示した。

品質設計は、製造前の段階において顧客要求品質を満足する各製造プロセスの製造条件を決定する意思決定プロセスである。従来は、製造プロセスと製品についての知識が豊富な熟練設計者が試行錯誤により決定していた。品質に対してより厳格化する顧客要求に対応するため、より精密な品質設計が必要となっている背景があり、モデルベースの品質設計の開発のニーズが高まっていることを示した。

品質制御は、製造段階において品質ばらつきを低減するための機能であり、すでに処理が終了した工程の製造条件実績値をもとに、まだ処理が開始していない工程の適切な製造条件を導出し、そのように操作することで、品質を目標値に近づけるフィードフォワード制御である。鉄鋼製品の品質指標の中で重要な材質、寸法、および、形状の制御を対象に、品質制御の目的、および制御構成の概要を説明した。これらは、モデルベースの自動制御が行われているが、品質ばらつきをより低減するためには、モデルの精度を向上させる必要がある。寸法制御には板厚制御、および、幅寸法制御があり、また、形状制御には板クラウン・平坦度制御、および、平面形状制御がある。板厚制御、および、板クラウン・平坦度制御については、フィードバック制御を併用することで制御性能を改善している。一方、材質制御、幅寸法制御、および、平面形状制御については、フィードフォワード制御のみであるため、品質制御精度を向上させるためには、モデルの精度向上が必須である。

品質設計、材質制御、幅寸法制御、および、平面形状制御に用いるモデルとしては、物理モデルの構築があるため、簡易な回帰式が用いられてきた。環境変化に対応して、モデルの精度を維持し、また、さらに向上させるためには、それらのモデルのメンテナンスが非常に重要であることを示した。

以上により、本章では研究の適用対象と解決すべき技術課題について説明した。

2.8 記号説明

C	炭素含有量	[%]
C_{eq}	炭素等量	[%]
Cr	クロム含有量	[%]
L	歪の長さ	
L_d	接触弧長	
L_{in}, L_{out}	幅出し圧延前の材料長	
M	ミル定数	
Mn	マンガン含有量	[%]
Mo	モリブデン含有量	[%]
Ni	ニッケル含有量	[%]
P	圧延荷重	
Q	圧下力関数	
R	ロール半径	
S_0	無負荷時ロール開度	
Si	珪素含有量	[%]
V	バナジウム含有量	[%]
W_{in}, W_{out}	幅出し圧延前後の材料幅	
b	圧延幅	
cr	板クラウン	
$f(P)$	圧延機の弾性変形の影響による板厚変動	
h_c, h_e	板幅中央部および板端部の板厚	
h_{e1}, h_{e2}	両板端所定位置の板厚	
h_{in}, h_{out}	入側および出側板厚	
k_m	変形抵抗	
p_1, p_2	幅寸法予測モデル調整パラメータ	
t_{in}, t_{out}	幅出し圧延前後の材料厚	
Δ_H	圧延機の弾性変形以外の影響による板厚変動	
δ	歪の高さ	
λ^*	平坦度	
λ_c, λ_e	板幅中央部および板端部の急峻度	
$\lambda_{e1}, \lambda_{e2}$	両板端所定位置の急峻度	

第3章

局所回帰モデルによる鉄鋼製品の品質設計

3.1 はじめに

本章では、2.3 節で述べた鉄鋼製品の品質設計の課題を解決するために、Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰を用いた鉄鋼製品の品質設計システムについて提案する。

本節に続く 3.2 節では、提案手法の適用対象の一例として、熱延ラインパイプ素材の品質設計について説明する。その製造プロセス、設計目的と制約条件、ならびに、従来の品質設計手法について述べる。

局所回帰モデルを用いた品質設計手法について、3.3 節で述べる。また、提案手法を実装した品質設計システムについて説明する。

実機適用結果について、3.4 節で述べる。

最後に、3.5 節でまとめを行う。

以上により、提案手法およびシステムの有効性を検証する。

3.2 熱延ラインパイプ素材の品質設計

3.2.1 対象プロセス

製造プロセスの概要

本研究で品質設計の対象とする製造プロセスの概要について説明する。製鋼プロセスにおいて、素材の化学成分が調整され、スラブと呼ばれる中間製品が鋳込まれる。これらのスラブは、加熱プロセスにおいて所定の温度に加熱される。そして、圧延プロセスにおいて、所定の寸法と形状に塑性加工される。次に、冷却プロセスにおいて所定の温度まで冷却されて、鉄鋼材料の組織と材質が作りこまれて、製品となる。製品の種類によっては、調質圧延や熱処理プロセスにおいて、製品の組織と材質がさらに調整されることもある。鉄鋼製品の品質指標には、強度、伸び、靱性などの材質、厚み、幅、長さなので寸法などがある。

様々な品質指標の中で、材質が最も重要であるから、本研究においては、材質の設計のみを対象に品質設計について議論する。鉄鋼製品の種類には、厚鋼板、熱延鋼板、冷延鋼板、条鋼など様々あり、提案する品質設計手法はそれらにも適用可能であるが、本章では熱延鋼板のみを対象に議論する。

熱延鋼板の製造プロセス

図 3.1 に、熱延鋼板の製造プロセスの概要を示す。加熱炉において所定の温度に加熱されたスラブは、サイジングプレスで所定の幅寸法に成形される。粗圧延機において、所定の厚みまで薄く圧延される。スラブを粗圧延機で圧延した鋼材は、シートバーと呼ばれ、厚さ 30mm ~ 60mm の半製品である。仕上圧延機の入側において所定の温度まで空冷されたシートバーは、次の仕上圧延機で製品厚まで薄く延ばされる。仕上圧延機においては、圧延速度などを操作することにより、仕上圧延機出側の鋼材温度が所定の温度になるように制御される。そして、冷却設備で所定の温度まで水冷される。最後に、巻取機でコイル状に巻き取られて製品になる。

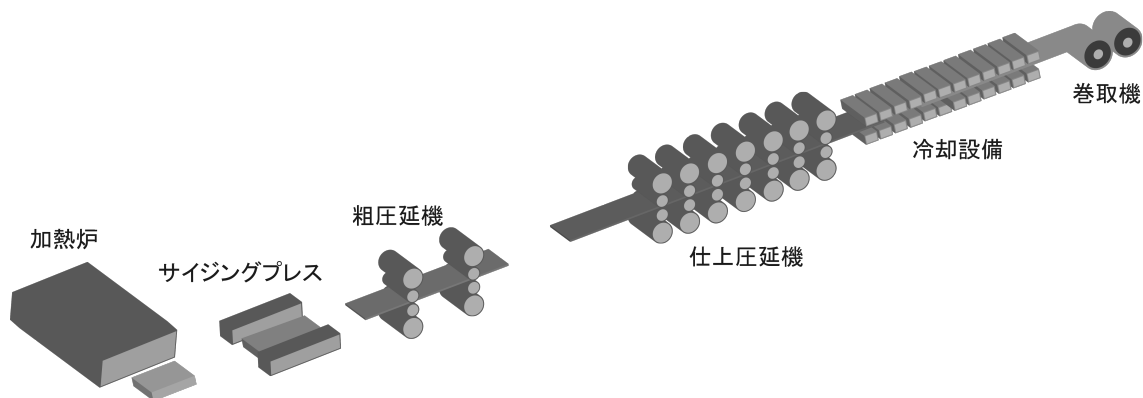


図 3.1 熱延プロセスの概要

ラインパイプ素材

石油、天然ガスなどを輸送するために油田、製油所、港湾などの間を結ぶパイプラインに用いられる鋼管は、ラインパイプと呼ばれる。ラインパイプは主に、コイル状の熱延鋼板を連続的に引き出しながら円形に成形し、継ぎ目部分を電気抵抗溶接によって接合して製造される。このような方法で製造された鋼管は電縫鋼管

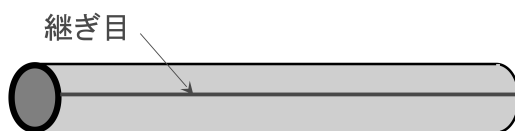


図 3.2 電縫鋼管

と呼ばれる（図 3.2）。このラインパイプは、鉄鋼製品受注の観点で、

- パイプライン敷設工事毎に品質要求が異なる。
- 顧客の要求品質が決まれば、同じ仕様の製品が大量に注文される。

という特徴をもち、顧客の要求がある度に品質設計が行われ、顧客が満足する品質が得られるまで繰り返し品質設計が行われる。ラインパイプ素材は、熱延鋼板の他の製品種類に対して、品質設計が行われる頻度が圧倒的に高い。よって、3.4 節の実施例では、ラインパイプ素材を対象に議論する。

3.2.2 顧客要求製品仕様と製造仕様

顧客要求製品仕様

ここでの顧客は、電縫鋼管工場をもつ鋼管メーカーである。

顧客からは、製品品質について次の仕様が与えられる。

- 製品サイズ（製品厚，製品幅）
- 材質特性値（引張強度，降伏点，伸び，シャルピー吸収エネルギー）の上限値および下限値
- ラインパイプ素材に含まれる微量元素の濃度（化学成分）の上限値および下限値

なお、シャルピー吸収エネルギーは、2.3.2 節で述べたように、靱性を表す指標で、シャルピー衝撃試験の吸収エネルギーのことである。

製造仕様

品質設計者が設定すべき各プロセスの製造条件は、次の通りである。

- 化学成分（C, Si, Mn, ……）
- 加熱工程出側温度
- シートバー厚
- 仕上圧延機入側温度
- 仕上圧延機出側温度
- 巻取温度

3.2.3 品質予測モデルの入出力変数

従来から次に示す入出力変数をもつモデルを用いて品質予測を行っている。従来は、線形重回帰モデルを用いて予測モデルを構築していた。

出力変数

品質予測モデルの出力変数は、製造の結果得られる製品の材質特性値であり、次の4つである。

- 引張強度
- 降伏点
- 伸び
- シャルピー吸収エネルギー

入力変数

入力変数は、出力変数に影響を与える各プロセスの製造条件であり、次の通りである。

- 製品サイズ（製品厚，製品幅）
- 化学成分（C, Si, Mn, ……）
- 加熱工程出側温度
- シートバー厚
- 仕上圧延機入側温度
- 仕上圧延機出側温度
- 巻取温度

入出力変数と製造プロセスの関係を図 3.3 に示す。

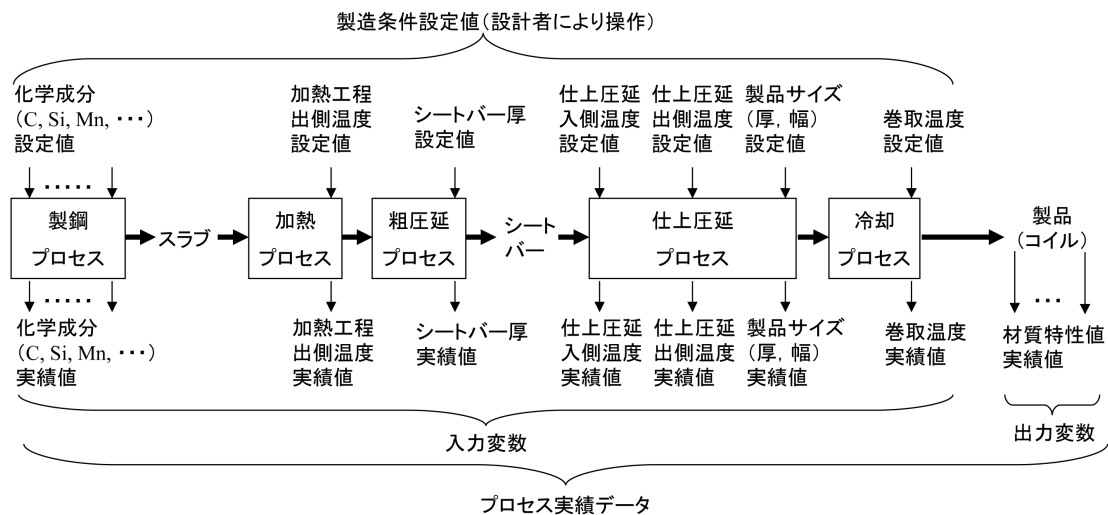


図 3.3 入出力変数と製造プロセスの関係

3.3 提案手法およびシステム

3.3.1 Just-In-Time モデルを用いた品質設計システム

品質設計システムの目的は、与えられた品質要求を実現する最適な、すなわち、最も経済的な製造条件を決定することである。開発した品質設計システムの概要を図 3.4 に示す。本システムは、実プロセスデータを蓄積するデータベース、製造条件初期値選択機能、局所回帰モデル作成機能、および、最適製造条件導出機能から構成される。

まず、製造条件初期値選択機能において、与えられた製品品質の目標値 y^o に対し、ある目的関数を最小化する製造条件 x^k がデータベースの中から選択される。その目的関数は、製品品質の目標値からの乖離の大きさと製造コストから導出される。選択された製造条件は、局所回帰モデル作成機能に与える要求点 \bar{x} の初期値として用いられる。

次に、局所回帰モデル作成機能において、製造条件と品質との間の因果関係を表現する局所的な予測モデルが作成される。対象プロセスは非線形であるが、要求点近傍の過去のデータを重視することにより、要求点 \bar{x} 近傍においては十分な精度の局所的線形予測モデルを構築することができる。その作成したモデルにより、要求点 \bar{x} における出力予測値 \hat{y} を計算する。その作成したモデルのパラメータが θ_l である。

最後に、最適製造条件導出機能において、局所回帰モデルを用いて、二次計画法により与えられた制約条件のもとで目的関数の値を最小化する製造条件 x^* が計算される。

導出された最適な製造条件 x^* は、製造条件初期値選択機能から与えられた初期値 x^k とは異なるので、開発した品質設計システムにおいては、最適な製造条件が収束するまで、局所回帰モデル作成および最適製造条件導出が繰り返し行われる。この繰り返し計算は、局所的線形予測モデルが導出された最適製造条件の近傍で十分な精度が得られるために必要である。製造条件初期値選択機能の役割は、この収束計算の初期値を与えることである。最適製造条件導出機能において、最終的に得られた製造条件の値 \hat{x} が、製造プロセスに対して設定される。

鉄鋼製品は多くのプロセスを通過して製造されるので、この品質設計システムは、製造開始前にその全てのプロセスの最適製造条件を計算するように構成されている。

1.2.3 節で説明したように、従来の Just-In-Time モデリング研究の目的は予測または推定であり、要求点 \bar{x} における出力予測値 \hat{y} を計算することであった。しかしながら、本研究で対象とする品質設計においては、与えられた製品品質の目標値 y^o に対して、最適な製造条件 x^* を計算する必要がある。局所回帰モデルを用いてこれを実現する手法ならびにシステムを開発することが本研究の要点である。局所回帰モデルを作成するためには、まず、要求点 \bar{x} が与えられる必要があるため、上記のような機能と手順が必要となる。

データベースおよび3つの主要機能について、以下でより詳細に説明する。

3.3.2 データベース

データベースには、鉄鋼製品の製造が完了する毎に、当該製品の製造条件と品質特性値の実績値が格納される。 $y^n \equiv [y_1^n \ y_2^n \ \cdots \ y_L^n]^T$ 、および、 $x^n \equiv [x_1^n \ x_2^n \ \cdots \ x_M^n]^T$ は、それぞれ、 L 個および M 個の変数をもつ出力お

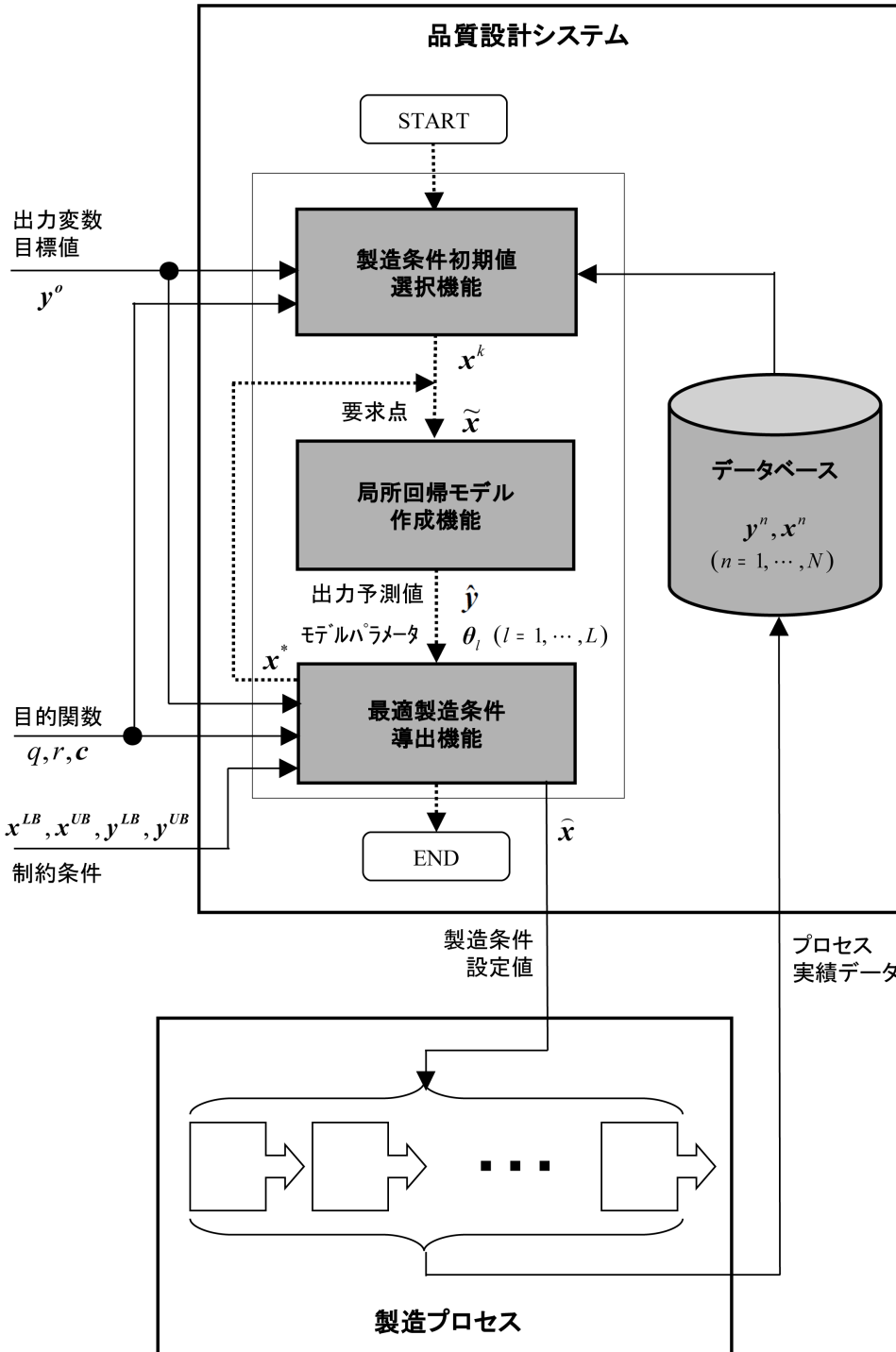


図 3.4 品質設計システムの概要

よび入力の n 番目のサンプルである。データベースに蓄積されるサンプル数は N である。実機適用例の熱延鋼板の一種のラインパイプ素材においては、データベースに蓄積されるサンプル数は約 10000 であり、出力および入力の変数の数は、それぞれ、4 と 18 である。

実績値はセンサーにより計測されるが、センサーの故障やオペレータによる手動介入により、異常値または欠損値が格納されることがある。したがって、実績データが下記の 3 つの条件のいずれかを満足する場合は、

異常と見なし、データベースに格納しないようにする。

1. センサー計測値が、その計測範囲から決まる上限値または下限値を超える場合。
2. 出力の予測誤差（実績値と予測値の差）が、予測モデルの RMSE（根平均二乗誤差）の値から決まる制御範囲を外れる場合、すなわち、予測誤差が RMSE の 3 倍を超える場合、その実績データはデータベースに格納しない。ただし、対象データの近傍に実績データが全くない場合は、この条件は適用しない。
3. 対象データの一部に欠損が存在する場合。

データベースに蓄積されるデータ数は、対象プラントの生産サイクルから決まる。データベースの中にほとんど全ての製造条件が揃うようにする。また、最近の実績データに基づいて予測モデルが作成されるように、データベースは先入れ先出し法により更新される。すなわち、データベースの中の最も古いデータが削除された後、新しいデータが格納される。

データベースに格納されるサンプル数を適切に決めることは、提案システムにとって重要である。経年変化により生じる予測誤差を小さくするためには、データベースのサンプル数は小さい方が望ましい。一方、サンプル数を小さくすると、データベースの中の要求点近傍のデータが少なくなり、モデル化誤差により生じる予測誤差が大きくなる。データベースのサンプル数は、過去数年分の大量の製造履歴データを用いたシミュレーションにより決定される。製造履歴データの一部がデータベースにセットされ、それ以外の製造履歴データは予測誤差の評価に用いられる。シミュレーションにより、RMSE（根平均二乗誤差）が最も小さくなるサンプル数を求め、その値をデータベースのサンプル数の初期値として用いる。本システムでは、モデル作成のためにあらかじめデータを選択することはしない。先入れ先出し法により更新されるデータベースの全てのデータが、局所回帰モデルの作成のために用いられる。シミュレーションにおいて制御範囲を超えるような異常に大きな予測誤差が発生しない場合、データベースのサンプル数は充分で、対象プラントの生産サイクルにおける全ての製造条件に対応する実績データがデータベースに格納されていると一般的に考えることができる。まれにしか生産されない特殊な製品に対しては、データベースのサンプル数が限られているため、高精度な予測モデルの作成は困難である。この場合は、従来の方法によって品質設計が行われる。

局所回帰により良い精度のモデルを作成するためには、充分に多様性のあるデータを収集して多重共線性 [122] の問題の発生を防止することも重要である。これを行うために、以下のようにして入力変数の数を限定する。品質設計のためにモデルを構築するのであるから、出力変数は設計者が操作できない製造条件にも影響されるが、入力変数には設計者が操作できる製造条件だけを用いる。対象とするプロセスにおいては、多品種の製品が生産されるので、幸運にも、特別なデータ収集処理を行わなくても、充分に多様性のあるデータを収集することができる。このことが、この品質設計システムに対して、局所回帰を用いる動機になっている。シミュレーションにおいては、モデルが正常に作成されるかを確認するため、予測誤差と入力データ行列の特異値がチェックされる。

3.3.3 製造条件初期値選択機能

この機能の目的は、データベースの中から、製造コストが小さく、かつ、目標の出力変数 y^o の値に近いサンプルを選定し、それに対応する製造条件、すなわち、入力変数の値を求めることである。この機能により、

データベースの中から選定された k 番目のサンプルの入力変数の値 x^k は、式 3.1 で表現される離散最適化問題の解であり、3.3.4 節で説明する次の機能の要求点の初期値として用いられる。

$$\min_n q (y^n - y^o) \Psi (y^n - y^o) + r c^T x^n \quad (3.1)$$

ここで、 $y^o \equiv [y_1^o y_2^o \cdots y_L^o]^T$ であり、 $c \equiv [c_1 c_2 \cdots c_M]^T$ である。 c は、製造コスト係数を表し、管理会計において計算される経理指標である。 Ψ は、出力変数を適切にスケールリングするための重みであり、対角行列 $\Psi \equiv \text{diag}(\psi_1^2 \psi_2^2 \cdots \psi_L^2)$ で定義される。ここで、 ψ_l は、 l 番目の出力変数の標準偏差の逆数である。目的関数の重み q および r により、出力変数の目標値からの乖離と製造コストは、目的関数に結合される。

3.3.4 局所回帰モデル作成機能

この機能においては、データベースに蓄積されたデータから、要求点 $\tilde{x} \equiv [\tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \cdots \tilde{x}_M]^T$ における局所的な予測モデルが作成される。この機能において計算されたモデルパラメータは、3.3.5 節で説明する次の最適製造条件導出機能で使用される。

局所回帰式

l 番目の出力に対する局所回帰モデルは、次式で表現される。

$$\hat{y}_l = b_l + \sum_{m=1}^M a_{ml} x_m \quad (l = 1, 2, \dots, L) \quad (3.2)$$

ここで、 \hat{y}_l は、 l 番目の出力の予測値であり、 x_m は m 番目の入力である。 $\theta_l \equiv [b_l a_{1l} a_{2l} \cdots a_{Ml}]^T$ はモデルパラメータである。非線形プロセスにおいて、要求点近傍のデータをうまくフィッティングする局所的なモデルを構築するために、この局所的な線形回帰モデルは次の手順により作成される。このモデルパラメータ θ_l は、重み付き二乗和 J_l を最小化するように決定される。

$$J_l = (y_l - \Omega \theta_l)^T \Pi_l (y_l - \Omega \theta_l) \quad (3.3)$$

ここで、 $y_l \equiv [y_l^1 y_l^2 \cdots y_l^N]^T$ であり、 y_l^n は n 番目のサンプルの l 番目の出力である。 Ω および Π_l は、次のように定義される。

$$\Omega \equiv \begin{bmatrix} 1 & x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_M^1 \\ 1 & x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_M^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1^N & x_2^N & \cdots & x_M^N \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\Pi_l \equiv \text{diag}(W_l^1 W_l^2 \cdots W_l^N) \quad (3.5)$$

重み W_l^n は類似度と呼ばれ、要求点 \tilde{x} と、 n 番目のサンプルの入力 x^n の間の類似度を表す。

類似度

類似度 W_l^n は次式で定義される。

$$W_l^n \equiv \exp\left(-\frac{\Gamma_l^n}{p \sigma_{\Gamma_l}}\right) \quad (3.6)$$

ここで、 p は調整パラメータである。これについては、後ほど詳細に説明する。 Γ_l^n は、要求点 \tilde{x} と、データ

ベースにおける n 番目のサンプルの入力 x^n の間の距離であり，次式で定義される．

$$\Gamma_l^n \equiv \sum_{m=1}^M |\lambda_{ml}| |x_m^n - \tilde{x}_m| \quad (3.7)$$

ここで， λ_{ml} は，例えば温度と寸法など異なる種類の入力を適切にスケールリングするための重みである． σ_{Γ_l} は，距離 Γ_l^n の標準偏差である．

システムをより使いやすくするために，計算時間を短縮することが求められている．本実施例の実装にあたっては，計算負荷を低減するために，距離としてユークリッド距離ではなく絶対値の和を用いている．スケールリング重み λ_{ml} として，局所回帰モデルの偏回帰係数 a_{ml} を用いた．この偏回帰係数は，大域的な線形重回帰モデルの偏回帰係数を初期値として，距離，類似度，局所回帰式の繰り返し計算により導くことができる．しかしながら，計算時間を短縮するため，この計算を 1 回だけ行うようにした．品質設計システムの実装において，この近似による予測精度の悪化は許容できる程度であることを確認した．

2.4.1 節で述べたように，鉄は温度によって結晶構造が変わる非常に珍しい元素である．この結晶構造の変化は変態と呼ばれる．変態が起こる製造条件においては，入力と出力の関係は非常に強い非線形性をもつため，変態が生じる製造条件の近傍においては，この近似による予測誤差の悪化は許容できないケースがある．しかし，3.4 節で述べるように，実施例においては，入力の操作範囲は鋼の変態が生じる製造条件を含まないように与えられるので，強い非線形領域を避けることができる．

3.6 式で定義される類似度は，局所回帰モデル作成のための重みであり，これを用いることにより，局所的な予測モデルは要求点近傍のデータをうまくフィッティングできる．

局所回帰モデルの調整

式 3.6 の中で用いられるパラメータ p は，次のように調整される．

調整パラメータ p は，要求点からデータベースのサンプルの入力変数の値までの距離と類似度との間の関係を表する指数窓関数のバンド幅と見なすことができる．式 3.6 により定義される類似度は，要求点からの距離 L が増加すると，減少し 0 に近づく．そして， p が大きくなると減少が緩やかになる性質をもつ． $p = \infty$ とすると，全てのサンプルの類似度が 1 に等しくなり，局所回帰モデルは単純な線形重回帰モデルと同等となる． p を小さくしすぎると，オーバーフィッティングになり，計算された局所回帰モデルの信頼性が低下する．さらに，正規方程式の係数行列 $\Omega^T \Pi \Omega$ の条件数が非常に大きくなり，モデルパラメータの精度が大幅に悪化する．逆に， p を大きくしすぎると，モデルが単純な線形重回帰モデルとほとんど同じになり，局所回帰モデルを用いるメリットがなくなる．

提案手法においては，調整パラメータ p の適切な値を，データベースからランダムに 1000 件のサンプルを抽出し，フルクロスバリデーションにより決定する．フルクロスバリデーションにおいては，予測誤差と局所回帰モデルパラメータの安定性が評価される．図 3.5 および図 3.6 は，ラインパイプ用の熱延鋼板の生産実績データを用いて行ったフルクロスバリデーションの結果である．図 3.5 は，予測精度を評価するため，調整パラメータ p と，引張強度予測の RMSE（根平均二乗誤差）の関係を表したものである．図 3.6 は，局所回帰モデルパラメータの安定性を評価されるため，調整パラメータ p と，引張強度に対するコイル巻取温度の偏回帰係数 $a_{18,1}$ の関係を表したものである．予測誤差を最小にする調整パラメータの値は， $p \approx 1.2$ である．

しかしながら、実装においては局所回帰モデルパラメータの安定性を考慮して、 $p = 1.5$ を選択した。コイル巻取温度が増加すると引張強度は増加するという物理的知見があり、引張強度に対するコイル巻取温度の偏回帰係数 a_{181} は正の値でなければならない。予測精度を多少犠牲にしても、物理的知見と一致するモデルパラメータが安定的に得られるように選択した。

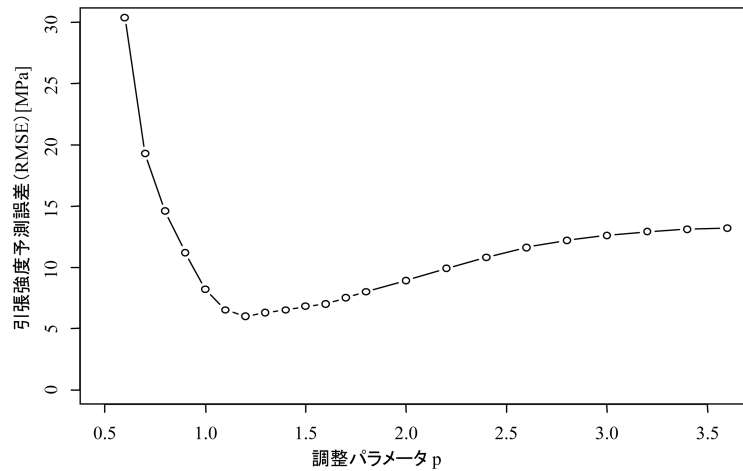


図 3.5 フルクロスバリデーションの結果 (1): 調整パラメータ p と引張強度予測誤差 (RMSE) の関係

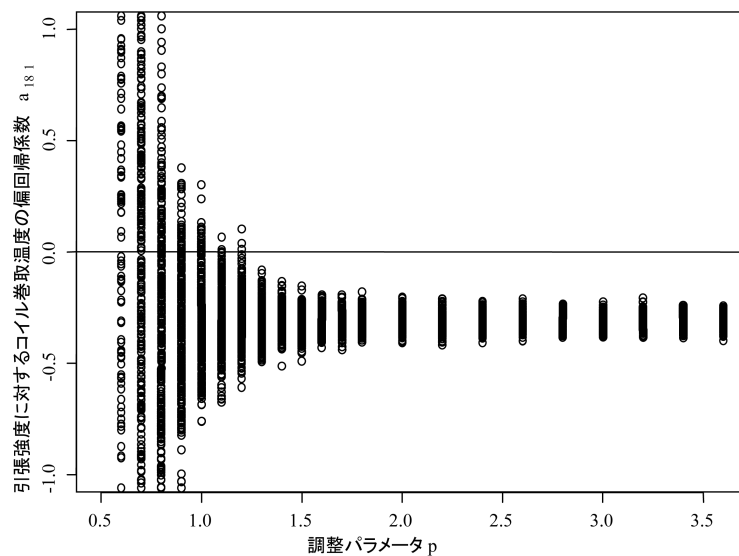


図 3.6 フルクロスバリデーションの結果 (2): 調整パラメータ p と引張強度に対するコイル巻取温度の偏回帰係数 a_{181} の関係

さらに、対象プロセスにおいて様々な製品を製造しているので、式 3.4 の入力行列 Ω の多様性が充分にあり、多重共線性の問題を回避して、安定的なモデルパラメータを得ることができた。入力変数間に強い相関があり多重共線性の問題が発生する場合は、線形重回帰の代わりに、主成分回帰や部分的最小二乗法 (PLS) などの方法を用いるとよい。PLS は化学工業におけるソフトセンサーとして広く用いられている [123]。また、主成分回帰は鉄鋼製造プロセスの歩留まり改善にうまく応用した事例がある [124]。

3.3.5 最適製造条件導出機能

3.3.4 節では、要求点 \hat{x} 近傍における、製造条件と製品品質の因果関係をモデル化した。次のステップでは、下記に示す二次計画問題を解くことにより、製造条件 x を最適化する。この最適化問題の目的関数は、式 3.1 と同様である。

$$\min_x q(\hat{y} - y^o) \Psi(\hat{y} - y^o) + rc^T x \quad (3.8)$$

subject to

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} b_1 & a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{M1} \\ b_2 & a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{M2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_L & a_{1L} & a_{2L} & \cdots & a_{ML} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$x^{LB} \leq x \leq x^{UB} \quad (3.10)$$

$$y^{LB} \leq \hat{y} \leq y^{UB} \quad (3.11)$$

ここで、 $x \equiv [x_1 \cdots x_M]^T$ 、 $\hat{y} \equiv [\hat{y}_1 \cdots \hat{y}_M]^T$ である。 x^{LB} 、 x^{UB} 、 y^{LB} 、および、 y^{UB} は、それぞれ、入力変数と出力変数の下限値および上限値である。この最適化問題の目的は、出力変数の目標値 y^o と予測値 \hat{y} の差を最小化すると同時に、製造コストを最小化することである。

この最適化問題を解くことにより得られる最適製造条件 x^* は、初期値 x^k とは異なると考えられる。したがって、3.3.4 節および 3.3.5 節で述べたモデリングと最適化を収束するまで繰り返し計算を行う。収束した時の製造条件 \hat{x} が、実機の製造プロセスに設定される。

出力変数に対する制約は、顧客品質要求、すなわち、材質特性値の上下限值から決定される。入力変数に対する制約は、製造設備仕様、および、合金成分の含有量の範囲などの顧客要求から決定される。また、製品品質特性が大幅に変化する相変態を避けるように、入力変数の上下限值が決定される。変態が生じる製造条件においては、入力と出力は強い非線形の関係があるので、変態が生じる製造条件近傍において繰り返し計算の収束しないことがある。しかし、入力変数の範囲は変態が生じる製造条件を含まないように与えられるので、この繰り返し計算は安定的に収束する。

3.4 実機適用結果

本節では、開発したシステムを熱延鋼板の一種のラインパイプ素材の品質設計に適用した結果について述べる。

3.4.1 品質設計問題の定式化

適用対象の品質設計においては、顧客要求に応じて引張強度の目標値が決定されている。その他の出力変数の目標値は決められていないが、上限値および下限値が決定されている。顧客の品質要求は二次計画問題の制約条件として与えることができるので、目的関数として製造コストのみを考慮すればよい。

設計方針は、引張強度の予測値を目標値に制御し、その他の出力変数の予測値をそれぞれの許容範囲内に制御しながら、製造コストを最小化することである。すなわち、式 3.8 から 3.11 の品質設計問題のパラメータを次のように設定したときと等価であり、線形計画問題を解いていることになる。

$$q = 0, \quad r = 1 \quad (3.12)$$

$$\mathbf{y}^{LB} = [y_1^o \ y_2^{LB} \ \cdots \ y_L^{LB}]^T \quad (3.13)$$

$$\mathbf{y}^{UB} = [y_1^o \ y_2^{UB} \ \cdots \ y_L^{UB}]^T \quad (3.14)$$

3.4.2 データマイニングツールの利用

品質設計を行うために、本提案手法は、大量の過去の実績データを必要とする。実機システムの開発には、データ収集において次の3点を考慮する必要がある。

1. 製品品質は様々なプロセスの運転条件に影響され、製造プロセスは多岐に渡るため、通過する複数の製造プロセスから得られるデータを紐付けて統合することが重要である。
2. 製造技術の進歩、製造設備の改造、顧客品質要求の変化、製造プロセス特性の経年変化、および、原料の価格や品質の変動などの環境変化によって、品質に対して影響が大きい説明変数が変化し、品質予測に必要なデータが変化するので、その環境変化に対応して、迅速かつ容易に必要なデータを収集する必要がある。
3. 設計者は冶金現象や製造プロセスに精通しているが、計算機科学やプログラミングの専門家ではないので、品質設計システムは、設計者が容易にモデルの維持と改善を行えるように開発する必要がある。

上記を考慮し、品質設計システムは、商用の汎用データマイニングツールを利用して実装した。

局所回帰モデル作成機能は、汎用的に利用できるようにプログラミングされ、図 3.7 に示すようにデータマイニングツール上のアイコンとして登録するようにした。このようにすることで、アイコンを複写および転写するだけで、様々な目的に対する予測モデルを作成できるようにした。結果として、新システムのこの特徴によって、特に、環境変化に対するシステムの維持が容易になったので、モデルの作成と維持の負荷を大幅に低減できた。同様に、製造条件初期値選択機能と最適製造条件導出機能も汎用的に利用できるように設計して実

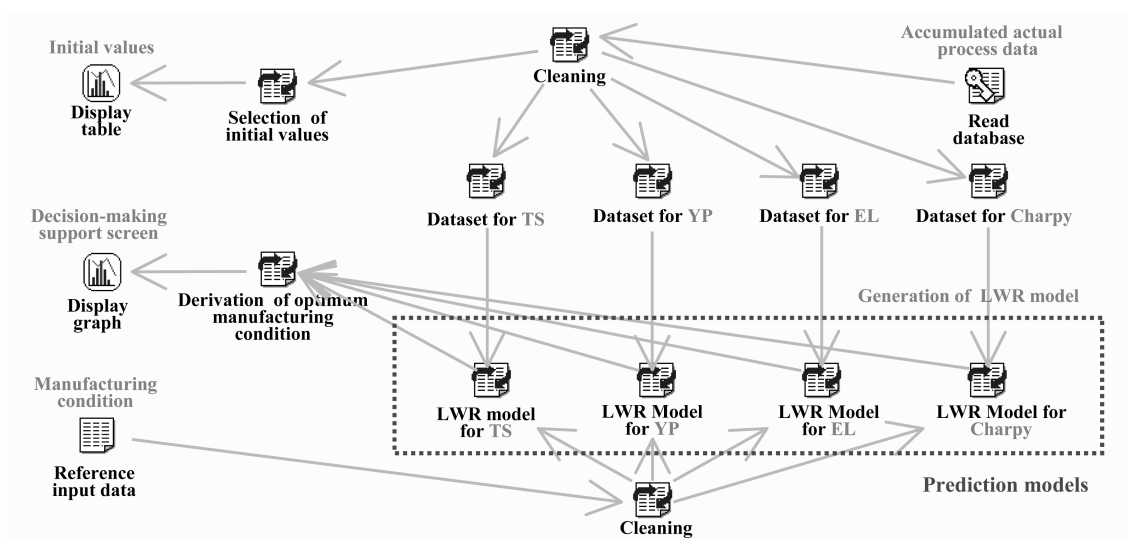


図 3.7 データマイニングツールの画面例

装した。

図 3.7 において、アイコン‘Read database’は、データベースからプロセス実績データを読み込む機能であり、アイコン‘Cleaning’は、異常データの有無をチェックして除去する機能である。アイコン‘Selection of initial values’は、3.3.3 節で説明した製造条件初期値選択機能に該当する機能である。アイコン‘Dataset for TS’、‘YP’、‘EL’、および、‘Charpy’は、それぞれ、引張強度、降伏点、伸び、および、シャルピー吸収エネルギーの予測モデルを作成するためのデータセットを抽出する機能である。アイコン‘LWR model for TS’、‘YP’、‘EL’、および、‘Charpy’は、3.3.4 節で説明した局所回帰モデルを作成する機能である。アイコン‘Derivation of optimum manufacturing condition’は、3.3.5 節で説明した最適な製造条件を導出する機能である。アイコン‘Display table’をクリックすると、品質設計者は製造条件初期値選択機能の結果を確認することができる。アイコン‘Display graph’をクリックすると、品質設計者は、次節で説明する意思決定支援画面を見ることができる。アイコン‘Reference input data’をクリックすると、品質設計者は、要求点の値を入力することができる。

3.4.3 ヒューマンインターフェースと最適製造条件導出の意思決定

本システムの実装においては、局所回帰モデル作成と最適製造条件導出の繰り返し計算により自動的に最終的な結果が導出されるわけではない。設計者が予想される品質、コスト、ならびに、その他の要因の観点から計算結果を評価して、設計者自身の判断により製造条件の値を調整する。

対象プロセスのモデリングと品質設計問題の定式化を完璧に行うのは困難であるため、全自動の意思決定システムよりもむしろ、このような対話式システムを構築するほうが望ましい。例えば、入力変数および出力変数の上下限值にはどうしても不確かさが存在する。また、目的関数および制約条件に重要な要因を考慮することができない場合がある。例えば、過去の製造条件と大きく異なると、品質予測値の誤差が非常に大きくなるので、そのような製造条件の設定を避けなければならない。また、材質特性値以外の品質特性についてはモデル化されていない。さらにまた、顧客によっては特別な要求がなされることがあり、設計の標準化が困難な

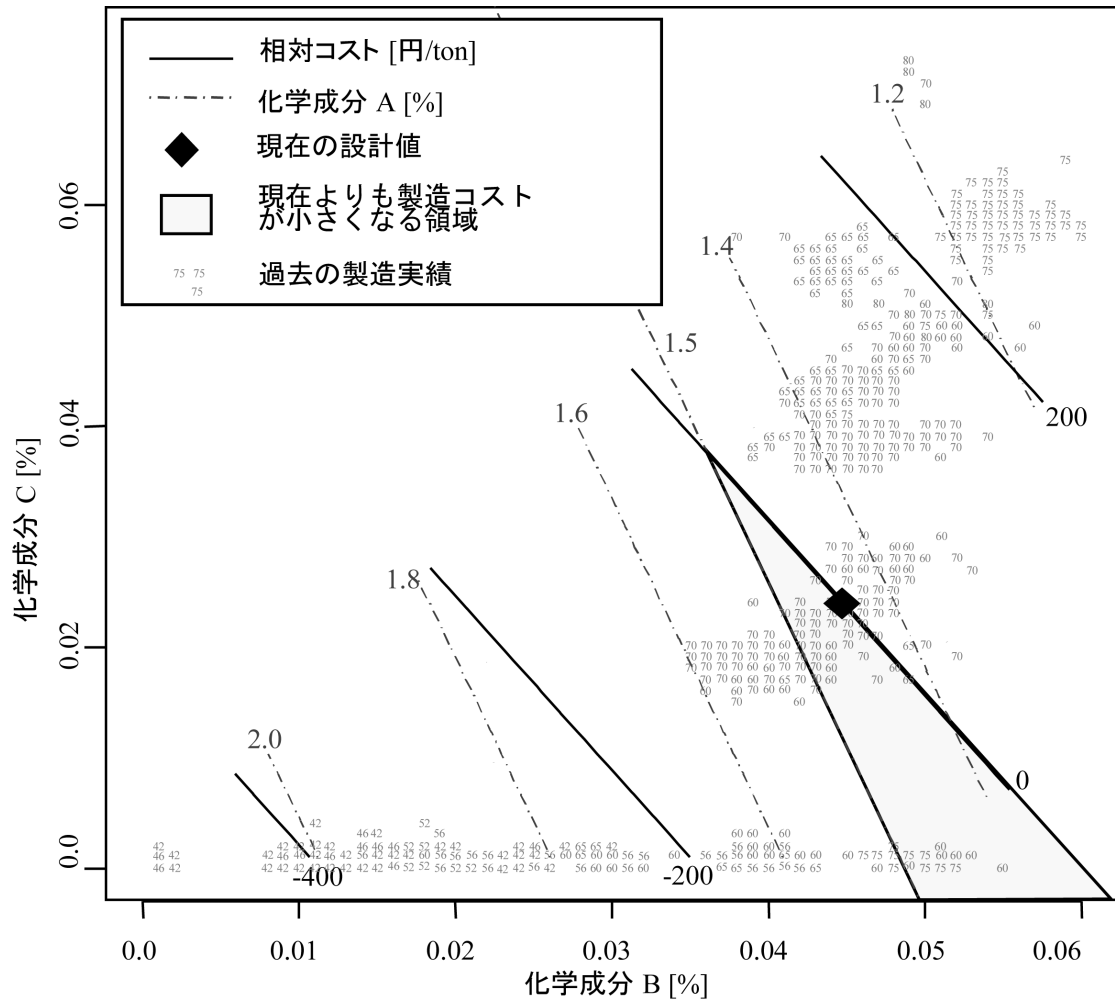


図 3.8 意思決定支援画面例

ケースがあるため、品質設計者の経験が重要となる場合がある。以上のような理由で、対話式の最適化システムを採用している。

図 3.8 に、設計者への意思決定支援画面の一例を示す。この図は 2 つの製造条件の散布図であり、これらの製造条件は両方とも化学成分である。この散布図の点は過去の製造実績を表している。実線の等高線は相対コストを表している。一点鎖線の等高線は、目標の品質を満足するための他の製造条件の値の等高線を表している。この散布図は、目標品質などの制約条件を満足しながら、よりコストの低い製造条件の領域を示している。この領域の中の最もコストが低い点が、二次計画問題を解くことにより得られる最適製造条件に等しい。この散布図から、製造条件を変化させたときにそれに合わせてどのように製造コストが変化するか、また、目標の品質にするために、他の製造条件をどのように変化させなければならないかがわかる。さらに、散布図の中の過去の製造実績が存在するかを確認することで、品質不良の発生確率を低減させることができる。

この画面は、品質要求を満足しながら製造コストを低減させるような製造条件を、設計者が効率的に探索することを支援する。その結果として、設計時間は従来 30 分から 60 分かかっていたが、このシステムにより 10 分から 15 分に短縮することができた。

出力変数の値を精度良く予測するためには外挿を避けなければならない。言い換えると、モデルの信頼性は

入力変数，すなわち，製造条件の値に依存する．予測の信頼性をオンラインで確認するために，PLS に基づいた推定モデルと多変量統計的プロセス管理（MSPC）を組み合わせられた方法が提案され，化学工業において適用された事例が報告されている [125]．しかしながら，本システムの実装においては，判断が非常に複雑で自動化が困難であるため，設計者の意思決定の支援にはこのような散布図を用いている．

3.4.4 品質予測モデルの精度

ラインパイプ素材の引張強度の予測に対して過去の製造実績データを用いて局所回帰モデルを作成した．このモデル作成にあたり，化学成分，加熱温度，圧延温度，および，冷却温度から出力変数に対して物理的な因果関係が明確な 18 の入力変数を選択した．

入力変数の一つであるニオブ（Nb）含有量の引張強度に対する偏回帰係数を，図 3.9 に示す．ここで，横軸はニオブ（Nb）含有量であり，縦軸はニオブ（Nb）含有量の引張強度に対する偏回帰係数である．従来の品質設計で用いていた線形重回帰においては，ニオブ（Nb）含有量の値に関わらず偏回帰係数の値は一定である．したがって，図 3.9 において，線形重回帰の偏回帰係数の値は直線で表される．しかしながら，引張強度と製造条件の関係は実際には非線形であるので，偏回帰係数の値は製造条件によって変化する．モデル化対象の非線形性の一例として，次のようなものがある．Nb，バナジウム（V）などの合金元素を添加すると，2.4.1 節で説明した固溶強化により，引張強度は増加するが，これらを添加しすぎると，結晶格子の中の鉄原子に置き換わりにくくなり，強度の増加は飽和する．局所回帰モデルでは，このような非線形の現象をうまく表現することができる．Nb および V の含有量を大きくしすぎると，引張強度に対する偏回帰係数の値は減少している．

次に，従来法である単純な線形重回帰モデルと提案法である局所回帰モデルの予測精度の比較をフルクロス

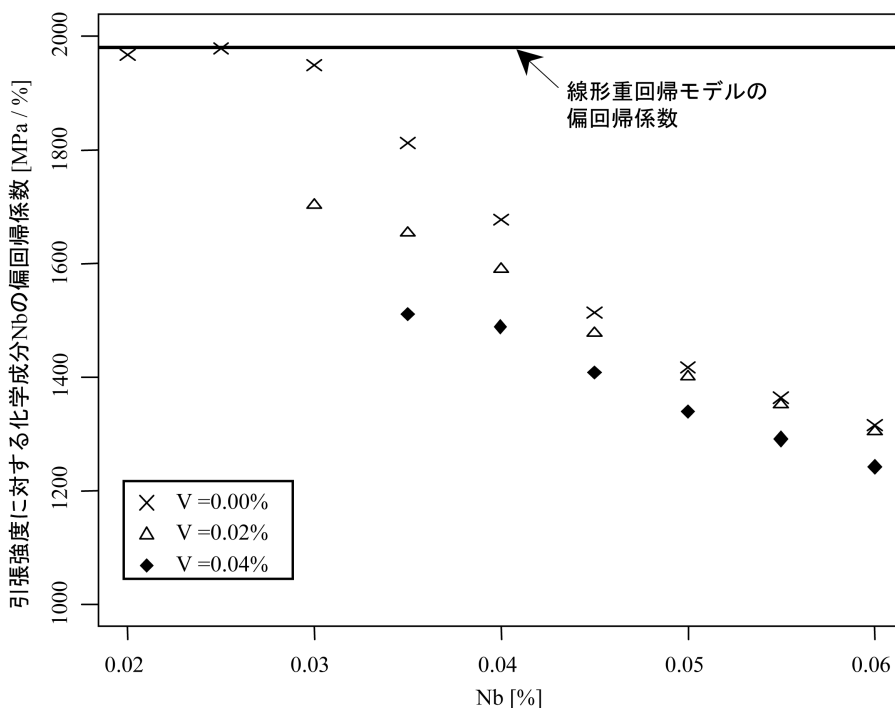


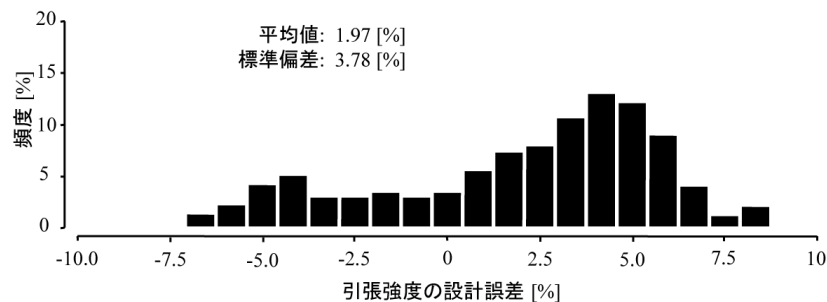
図 3.9 回帰係数の比較

バリデーションにより行った．単純な線形重回帰モデルと局所回帰モデルの RMSE（根平均二乗誤差）は、それぞれ、2.16[%]と 1.11[%]であった．ここで、これらの値は目標強度に対する相対的な比率である．この結果から、局所回帰モデルにより予測精度は大幅に改善されることを確認した．

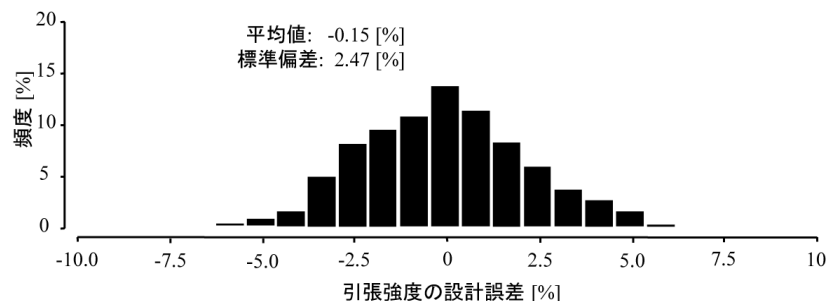
3.4.5 品質設計精度の改善

従来の品質設計手法と、提案する局所回帰モデルに基づく品質設計手法とで、設計誤差の比較を行った．ここで、設計誤差とは、目標の品質特性値と、製造後の実績の品質特性値との差である．設計誤差は、モデル化誤差により生じるだけではない．製造における変動、すなわち、製造条件の実績値と設定値の差によっても生じる．従来法と提案法の引張強度の設計誤差の平均値と標準偏差、ならびに、ヒストグラムを図 3.10 に示す．この図において、設計誤差は目標強度に対する相対的な比率を表示している．

従来法と比べて、提案法により設計誤差の標準偏差は大幅に低減することができた．それにより、引張強度が許容上限または許容下限を超える確率を大きく低減することができた．また、従来法では設計誤差のばらつきが非常に大きかった．鉄鋼製品の引張強度が許容下限値を外れないことを保証するために、実績の引張強度が高めに外れるようにわざと製造条件を補正していた．そのため、設計誤差の平均値は 0 から高めに大きく乖離している．しかし、提案法においては設計誤差が小さいので、このような故意の製造条件の補正は不要となり、設計誤差の平均値はほぼ 0 になっている．このように、提案手法を用いることにより、従来手法では最低



(a) 従来法



(b) 提案法

図 3.10 材質特性値の設計精度

限の品質を保証するために余分に投入していた原料，エネルギー，時間を減らすことができるようになった。

3.5 まとめ

目標の品質を保証するための最適な製造条件を効率的に決定するために、鉄鋼製品の品質設計手法を開発した。提案手法は Just-In-Time モデリングの一種の局所回帰に基づくものである。提案手法を用いた品質設計システムを開発し、様々な鉄鋼製品の品質設計問題に適用した。本章では、熱延鋼板に対して開発したシステムの実機適用結果について報告した。

開発したシステムは、JFE スチール株式会社西日本製鉄所において、2003 年 3 月から使用されている。提案手法に基づいて最適な製造条件を決定することにより、製品の品質制御精度が向上し、品質不良が発生するリスクを低減することができた。さらに、品質不良発生を防止するために余分に投入していた原料、エネルギー、および、時間を減らすことができ、製造コストを低減することができた。

設計者は提案システムを用いることで、品質要求を満足しながら製造コストをより小さくする製造条件を、効率的に探索できるようになった。品質設計には従来は 30 分から 60 分の時間がかかっていたが、本システムにより、10 分から 15 分に大幅に短縮することができた。

局所回帰モデルを構築し、それをうまく利用できるようにするために、事前にオフラインのシミュレーションにおいて、予測誤差およびモデルパラメータの値の妥当性を考慮しながら、類似度関数の調整パラメータ p を適切に決定しておく必要がある。品質設計の段階においては、予測モデルの作成の必要が生じる毎に、最適な局所回帰モデルパラメータの値を自動的に計算するようにした。それにより、スタッフにより手動で行う必要があった膨大なモデルパラメータテーブルをメンテナンスする負荷を大幅に低減することができた。このように、開発したシステムは、従業員満足度の向上に寄与している。

提案システムの有効性は、9 年以上の実プラントへの適用で確認している。したがって、本システムは様々な対象に適用可能であると期待できる。今後は、物理モデルの構築が困難、または、環境変化によりモデル精度の維持が困難な他の様々なプロセスの品質設計問題に対して、本提案手法の適用を拡大していく予定である。

3.6 記号説明

J	目的関数の値（局所回帰モデルパラメータ導出のための最適化問題）
L	出力変数（品質特性値）の数
M	入力変数（製造条件）の数
N	データベースに蓄積されるサンプルの数
W	データベースの中のサンプルと要求点との間の類似度
a	局所回帰モデルパラメータ（偏回帰係数）
b	局所回帰モデルパラメータ（切片項）
c	製造コスト係数
p	局所回帰モデルの調整パラメータ
q, r	品質設計問題のパラメータ
x	入力変数（製造条件）
\tilde{x}	局所回帰モデルの要求点
x^k	製造条件初期値選択機能によりデータベースの中から選定されたサンプルの入力変数（製造条件）
x^{LB}	入力変数の下限値（品質設計問題の制約条件）
x^{UB}	入力変数の上限値（品質設計問題の制約条件）
x^*	最適製造条件
\hat{x}	実機の製造プロセスに設定される最適製造条件
y	出力変数（品質特性値）
\hat{y}	出力変数の予測値
y^o	出力変数（品質特性値）の目標値
y^{LB}	出力変数の下限値（品質設計問題の制約条件）
y^{UB}	出力変数の上限値（品質設計問題の制約条件）
Γ	データベースの中のサンプルと要求点との間の距離
Π	類似度行列
Ψ	出力変数間のスケーリング重み
Ω	入力行列
θ	局所回帰モデルパラメータ
λ	入力変数間のスケーリング重み
σ_Γ	距離の標準偏差
l	出力変数インデックス（下添字）
m	入力変数インデックス（下添字）
n	データベースサンプルインデックス（上添字）
T	行列の転置（上添字）

第 4 章

局所回帰モデルによる鉄鋼製品の材質制御

4.1 はじめに

本章では、2.4 節で述べた鉄鋼製品の材質制御の課題を解決するために、Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰を用いた鉄鋼製品の材質制御システムについて提案する。

本節に続く 4.2 節では、提案手法の適用対象の一例として、厚鋼板の材質制御について説明する。その製造プロセス、制御目的、ならびに、制御のためのモデルの入出力変数について述べる。

局所回帰モデルを用いた材質制御手法について、4.3 節で述べる。また、提案手法を実装した材質制御システムについて説明する。

実機適用結果について、4.4 節で述べる。

最後に、4.5 節でまとめを行う。

以上により、提案手法およびシステムの有効性を検証する。

4.2 厚鋼板の材質制御

4.2.1 対象プロセス

本章においては、図 1.2 に示した厚鋼板の製造プロセスにおいて生産される制御圧延材および加速冷却材の材質制御を対象に議論する。

制御圧延材は、鋼材の加熱温度、圧延温度および圧下率を厳格に管理し制御することによって、鋼の結晶組織を微細化し、材質を改善した鉄鋼製品である。

加速冷却材は、TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) によって、制御圧延と制御冷却を併用して、制御圧延材よりもさらに材質を改善した鉄鋼製品である [45, 126, 127, 128] 。

加熱工程、圧延工程、冷却工程の製造条件を適切に設定することにより、製鋼工程において添加する合金成分割合を低く抑えながら、より強度が高く、かつ、溶接しやすさを合わせ持つ製品を作ることができるようになる。

4.2.2 材質制御の目的と制御変数

対象である厚鋼板の制御圧延材と加速冷却材については、引張強度と降伏点の2つの材質特性値を目標値に制御することが望まれている。

しかしながら、これらの制御変数に影響を与える製造条件は共通であるため、2つの変数を同時に目標値に制御することはできない。鉄鋼製品は引張強度または降伏点が不足すると出荷することはできない。一方、引張強度または降伏点が高めに外れることはある程度許容されている。したがって、2つの制御変数のうち、どちらか一つは目標値通りに制御し、他方は目標値以上になるように制御する。

4.2.3 材質予測モデルの入出力変数

従来から次に示す入出力変数をもつモデルを用いて品質予測を行っている。従来は、線形重回帰モデルを用いて予測モデルを構築していた。

出力変数

材質予測モデルの出力変数は、制御変数である次の2つの材質特性値である。

- 引張強度
- 降伏点

入力変数

入力変数は、出力変数に影響を与える各プロセスの製造条件である。

制御圧延材の場合は、次の通りである。

- 製品厚

- 化学成分 (C, Si, Mn, . . .)
- 加熱工程出側温度 (加熱条件)
- 圧延工程待機時板厚 (圧延条件)
- 圧延工程待機時温度 (圧延条件)
- 圧延工程出側温度 (圧延条件)

加速冷却材の場合は、次の通りである。

- 製品厚
- 化学成分 (C, Si, Mn, . . .)
- 加熱工程出側温度 (加熱条件)
- 圧延工程待機時板厚 (圧延条件)
- 圧延工程待機時温度 (圧延条件)
- 圧延工程出側温度 (圧延条件)
- 冷却開始温度 (冷却条件)
- 冷却停止温度 (冷却条件)

4.2.4 材質制御の操作変数

操作変数は、入力変数の中で最も下流にあるものを選択する。制御圧延材の場合は圧延工程出側温度であり、加速冷却材の場合は冷却停止温度である。

それらよりも上流の製造条件の実績値をもとに、制御目的を実現する操作変数の値を計算する。

4.3 提案手法およびシステム

4.3.1 Just-In-Time モデルを用いた品質制御システム

2.4 節で説明した課題を解決するため、Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰モデルを用いた品質制御システムを開発した。本システムは、本章の材質制御だけでなく、次章の寸法制御に対しても適用した。

開発した品質制御システムの概要を図 4.1 に示す。本システムは、実績データベース、変数選択機能、局所回帰モデル作成機能、操作量決定機能から構成される。

鉄鋼製品は複数の工程を経て製造されるが、本システムは製造の途中でも計算できるように設計されている。既に実績値が存在する前工程とこれから操作することが可能な後工程に分け、制御変数の値が目標値に一致するように後工程の操作変数の値を計算する構成にしている。なお、第3章で説明した品質設計の段階において、対象プロセスに関する知識が豊富な熟練者により、顧客の要求品質を満足するように入力変数の基準値が製造前に決定され与えられている。

1.2.3 節で説明したように、従来の Just-In-Time モデリング研究の目的は予測または推定であり、要求点における出力予測値を計算することであった。しかしながら、本研究で対象とする品質制御においては、与えられた制御変数の値が目標値に一致するように後工程の操作変数の値を計算する必要がある。局所回帰モデルを用いてこれを実現する手法ならびにシステムを開発することが本研究の要点である。局所回帰モデルを作成するためには、まず、要求点が与えられる必要があるため、上記のような機能と手順が必要となる。

以下、順に実績データベース、変数選択機能、局所回帰モデル作成機能、操作量決定機能について説明する。

4.3.2 実績データベース

実績データベースには、鋼材の製造が完了する毎に、その製造条件および品質特性の実績値が格納され、蓄積される。 $y^n \equiv [y_1^n, y_2^n, \dots, y_L^n]^T$ 、および、 $x^n \equiv [x_1^n, x_2^n, \dots, x_M^n]^T$ は、それぞれ、 L 個および M 個の変数をもつ出力および入力の n 番目のサンプルである。データベースに蓄積されるサンプル数は N である。

実績データベースに格納される製造条件および品質特性の実績値はセンサーの計測値であるが、センサーおよび実績収集用計算機の故障や、オペレータの手介入などにより対象鋼材がセンサーの前を通過しないなどの原因で、まれに正しい実績値を収集できない場合がある。観測データの中に次の3つのいずれかの条件を満足するものがあるとき、異常データとみなし、その観測データはデータベースに格納しない。

1. センサー計測値それぞれについて上下限管理を行い、計測値が上下限値を超えたとき。
2. 新たな観測データ近傍に実績データが存在する場合で、入力値を予測モデルに代入して計算した予測値と出力値の差が、管理範囲を超えたとき。なお、近傍内に実績データがなければこの項目は考慮しない。
3. 計測できなかった情報が存在するとき。

蓄積する観測データの数は約 10000 に設定した。これは、工場の生産サイクルにあわせて、ほぼ全ての製造条件のデータが格納されるように決めている。また、最近の製造実績により予測モデルを作成できるよう、先入れ先出し法により古い観測データを除去する。

時点で既に実績データのある変数はその値を，また実績が存在しない変数は製品ごとに定められた基準値を用いる．

本機能では，実績データベースから出力変数と選択された入力変数を抽出したものをモデル構築用データセットとして新たに登録すると共に，要求点の情報を，次の局所回帰モデル作成機能に送付する（図4.1参照）．

材質制御においては，制御変数である出力変数は引張強度と降伏点の2つであり，それぞれについて局所回帰モデルを作成する．引張強度に対する入力変数と降伏点に対する入力変数は同じであり，制御変数に対して物理的な因果関係があることが明白なものを十数個選択している．入力変数の中の操作変数は，最終段の冷却温度である．

4.3.4 局所回帰モデル作成機能

局所回帰モデル作成機能においては，与えられた要求点 $\tilde{x} \equiv [\tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \cdots \tilde{x}_M]^T$ の情報とモデル構築用データセットをもとに，要求点に近い過去のデータを重視して局所的な予測モデルを構築し，そのモデルパラメータを計算する．局所回帰モデルは以下の手順で作成される．

局所回帰式

l 番目の出力に対する局所回帰モデルは，次式で表現される．

$$\hat{y}_l = b_l + \sum_{m=1}^M a_{ml} x_m \quad (l = 1, 2, \dots, L) \quad (4.1)$$

ここで， \hat{y}_l は， l 番目の出力の予測値であり， x_m は m 番目の入力である． $\theta_l \equiv [b_l a_{1l} a_{2l} \cdots a_{Ml}]^T$ はモデルパラメータである．非線形プロセスにおいて，要求点近傍のデータをうまくフィッティングする局所的なモデルを構築するために，この局所的な線形回帰モデルは次の手順により作成される．このモデルパラメータ θ_l は，重み付き二乗和 J_l を最小化するように決定される．

$$J_l = (y_l - \Omega\theta_l)^T \Pi_l (y_l - \Omega\theta_l) \quad (4.2)$$

ここで， $y_l \equiv [y_l^1 y_l^2 \cdots y_l^N]^T$ であり， y_l^n は n 番目のサンプルの l 番目の出力である． Ω および Π_l は，次のように定義される．

$$\Omega \equiv \begin{bmatrix} 1 & x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_M^1 \\ 1 & x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_M^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1^N & x_2^N & \cdots & x_M^N \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\Pi_l \equiv \text{diag}(W_l^1 W_l^2 \cdots W_l^N) \quad (4.4)$$

重み W_l^n は類似度と呼ばれ，要求点 \tilde{x} と， n 番目のサンプルの入力 x^n の間の類似度を表す．

類似度

類似度 W_l^n は次式で定義される．

$$W_l^n \equiv \exp\left(-\frac{\Gamma_l^n}{p\sigma_{\Gamma_l}}\right) \quad (4.5)$$

ここで， p は調整パラメータである． p の調整方法については，4.3.6 節で説明する． Γ_l^n は，要求点 \tilde{x} と，デー

データベースにおける n 番目のサンプルの入力 x^n の間の距離であり、次式で定義される。

$$\Gamma_l^n \equiv \sum_{m=1}^M |\lambda_{ml}| |x_m^n - \tilde{x}_m| \quad (4.6)$$

ここで、 λ_{ml} は、例えば温度と寸法など異なる種類の入力を適切にスケールリングするための重みである。 σ_{Γ_l} は、距離 Γ_l^n の標準偏差である。

システムをより使いやすくするために、計算時間を短縮することが求められている。本実施例の実装にあたっては、計算負荷を低減するために、距離としてユークリッド距離ではなく絶対値の和を用いている。スケールリング重み λ_{ml} として、局所回帰モデルの偏回帰係数 a_{ml} を用いた。この偏回帰係数は、大域的な線形重回帰モデルの偏回帰係数を初期値として、距離、類似度、局所回帰式の繰り返し計算により導くことができる。しかしながら、計算時間を短縮するため、この計算を 1 回だけ行うようにした。品質制御システムの実装において、この近似による予測精度の悪化は許容できる程度であることを確認した。

4.3.5 操作量決定機能

前節で求められた局所回帰モデルのパラメータ θ と操作変数以外の入力変数値をもとに、品質特性（出力変数）が目標値 $y^o \equiv [y_1^o \ \cdots \ y_L^o]^T$ となるよう、対象鋼材の操作変数の値を計算する。

本システムは製造の途中でも計算できるように、既の実績値が存在する前工程の入力変数と、これから操作することが可能な後工程の操作変数の 2 種類に入力変数を分割した。以下では、式 4.1 の 1 番目から K 番目の入力変数 $\mathbf{u} \equiv [x_1 \ \cdots \ x_K]^T$ を後工程の操作変数として説明する。要求点 \tilde{x} は、あらかじめ外部から与えられる後工程の操作変数の基準値 $\tilde{\mathbf{u}} \equiv [\tilde{x}_1 \ \cdots \ \tilde{x}_K]^T$ と、既の実績値が存在する前工程の入力変数の値 $\tilde{\mathbf{v}} \equiv [\tilde{x}_{K+1} \ \cdots \ \tilde{x}_M]^T$ に分割することができ、要求点 \tilde{x} と $\tilde{\mathbf{u}}$ 、 $\tilde{\mathbf{v}}$ は次の関係がある。

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{u}} \\ \tilde{\mathbf{v}} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

操作量決定にあたっては、まず、それぞれの出力変数について、目標値 y_l^o となる操作変数の値 u_l^* を求める。未知の操作変数 u_l^* の値は、次の二次計画問題を解くことにより得る。

$$u_l^* = \arg \min_{\mathbf{u}} (\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}) \Lambda_l (\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}})^T \quad (4.8)$$

subject to

$$y_l^o = b_l + [a_{1l} \ \cdots \ a_{Kl}] \mathbf{u} + [a_{(K+1)l} \ \cdots \ a_{Ml}] \tilde{\mathbf{v}} \quad (4.9)$$

この最適化問題の目的関数は、基準値からのずれの重み付き 2 乗和を用いている。式 4.8 の重みは、例えば、

$$\Lambda_l = \text{diag}((\lambda_{1l})^2 \ (\lambda_{2l})^2 \ \cdots \ (\lambda_{Kl})^2) \quad (4.10)$$

のように入力変数のスケールリング重みを用いる。なお、後工程の操作変数が一つ ($K=1$) しかない場合、すなわち $\mathbf{u} = x_1$ のとき、未知の操作変数 u_l^* は、次式で計算できる。

$$u_l^* = \frac{1}{a_{1l}} \{y_l^o - (b_l + a_{2l} \tilde{x}_2 + \cdots + a_{Ml} \tilde{x}_M)\} \quad (4.11)$$

材質制御の操作変数の値 $\hat{\mathbf{u}}$ は、次式により決定する。

$$\hat{\mathbf{u}} = \min_l u_l^* \quad (4.12)$$

材質制御の場合は、制御変数は引張強度と降伏点の2つ、操作変数は最終段の冷却温度（制御圧延材の場合は圧延工程出側温度、加速冷却材の場合は冷却設備での冷却停止温度）であり、この1つの操作変数で2つの変数を制御する。本問題に対しては、変数の持つ特徴を利用し式 4.12 に示すような構成とした。このような構成にした理由は、製造コストの観点から材質は目標値通りに制御することが望ましいが、材質は下限保証することが最も重要であり、冷却温度を低くすれば引張強度および降伏点は共に高くなる物理的特性をもつからである。

4.3.6 局所回帰モデルの調整方法

類似度の計算におけるパラメータ p は、3.3.4 節で説明した品質設計システムの局所回帰モデル作成機能と同様に、次のように調整した。

本研究では、オフラインにおいて、データベースに蓄積されている実績データを用いて、フルクロスバリ

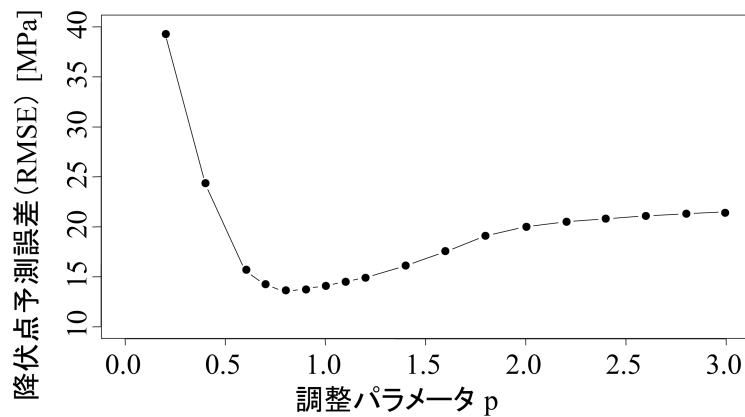


図 4.2 フルクロスバリデーションの結果 (1): 調整パラメータ p と降伏点予測誤差 (RMSE) の関係

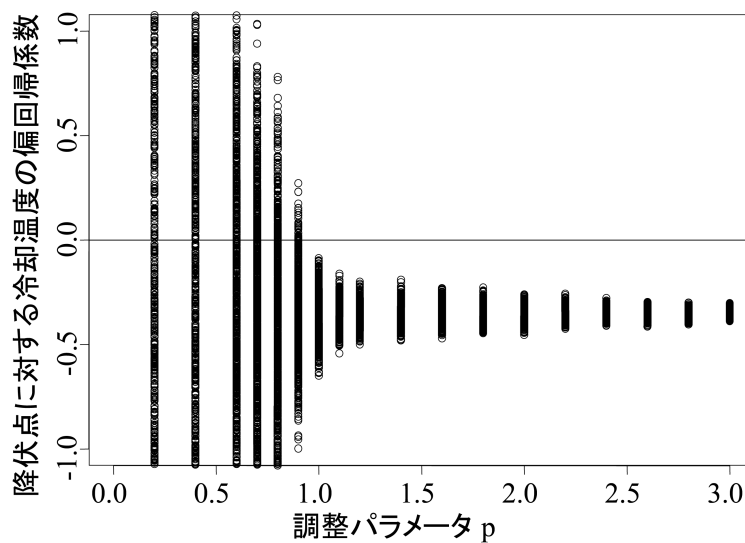


図 4.3 フルクロスバリデーションの結果 (2): 調整パラメータ p と降伏点に対する冷却温度の偏回帰係数の関係

レーションにより，予測誤差および局所回帰モデルパラメータの安定性を考慮して，適切な p の値を求めた．これを厚鋼板の制御圧延材の製造実績データを用いて説明する．フルクロスバリレーションにより計算した降伏点予測の根平均二乗誤差 (RMSE) と p の関係を図 4.2 に，また，入力変数の一つである冷却温度の偏回帰係数との関係を図 4.3 に示す．予測誤差が最小になるのは $p \approx 0.8$ であるが，冷却温度を大きくすると降伏点が小さくなるという物理的先見情報に反しないモデルパラメータ (負の偏回帰係数) が安定的に得られ，かつ予測誤差が十分小さくなる $p \approx 1.2$ を選択した．

モデルパラメータの中で，特に，操作変数に対応するパラメータ，すなわち式 4.9 の $[a_{1l} \ \dots \ a_{kl}]$ に留意する必要がある．これらのモデルパラメータが大きく変動する，または対象の物理的先見情報に反するときは，フィードフォワード制御が有効に機能しないことが懸念される．なお，実施例においては，単純線形重回帰モデルと比較して予測誤差を十分小さくしながら，物理的特性に関する事前情報とも一致し，かつ安定的なモデルパラメータを求めることができた．

4.4 実機適用結果

上記の品質制御システムを実機の材質制御に適用した結果について述べる。

4.4.1 材質予測精度

局所回帰モデルによる精度改善を評価するため、厚鋼板の調質鋼と呼ばれる品種を対象に材質予測精度の評価を行った。調質鋼は、オフラインの熱処理工程によりさらに材質の改善を行う製品である。

出力変数は引張強度である。入力変数は、出力変数に対して物理的な因果関係があることが明白な化学成分、加熱、圧延、冷却および熱処理条件から次を選択している。

- 製品厚
- 化学成分 (C, Si, Mn, . . .)
- 加熱工程出側温度 (加熱条件)
- 圧延工程待機時板厚 (圧延条件)
- 圧延工程待機時温度 (圧延条件)
- 圧延工程出側温度 (圧延条件)
- 冷却開始温度 (冷却条件)
- 冷却停止温度 (冷却条件)
- 焼きならし温度 (熱処理条件)
- 焼き戻し温度 (熱処理条件)

これらの製造実績データをもとに、フルクロスバリデーションにより、単純線形重回帰モデルの予測精度と提案した局所回帰モデルの予測精度を比較した。

単純線形重回帰モデルおよび局所回帰モデルによる予測値と実績値の散布図をそれぞれ図 4.4 に示す。単純線形重回帰モデルおよび局所回帰モデルの根平均二乗誤差は、それぞれ、3.57[%] と 1.71[%] であった。ここで、これらの値は目標強度に対する相対的な比率である。この結果から単純線形重回帰モデルよりも局所回帰モデルの方が予測精度を向上させられることを確認した。

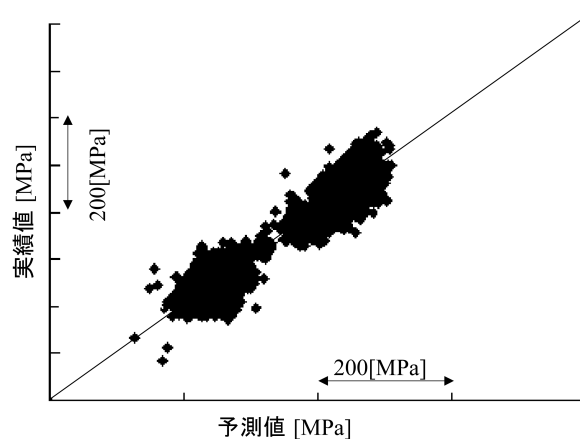
4.4.2 材質制御精度

材質制御に対して本システムを適用し、鋼材を製造した結果について述べる。

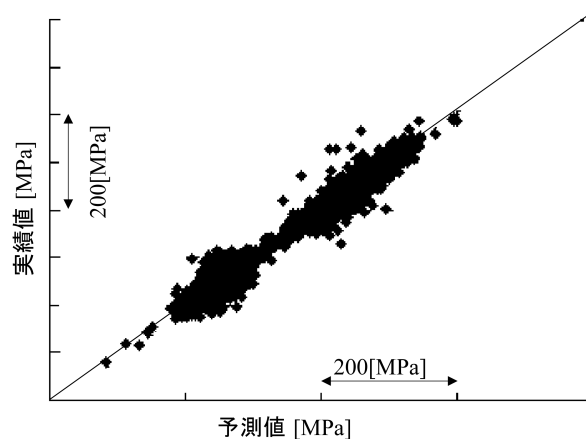
厚鋼板の制御圧延材のある品種のデータセットを用いて、従来システムと提案システムを用いた制御の根平均二乗誤差の比較を行った結果を表 4.1 に示す。ここで、これらの値は目標強度または目標降伏点に対する相対的な比率である。このデータセットにおいては、引張強度および降伏点の目標はすべて同一である。図 4.5 に従来システムによる引張強度の制御実績、および提案システムによる引張強度の制御実績のヒストグラムを示す。また、図 4.6 に従来システムによる降伏点の制御実績、および提案システムによる降伏点の制御実績のヒストグラムを示す。左右対称でなく正の歪度の分布であるのは、引張強度と降伏点の両方が下限を超えない

ようにオーバーライド型の制御を行っているためである。提案システムでは、根平均二乗誤差を従来システムに比べて約 30 % 低減することができた。

別の適用例として、制御圧延材および加速冷却材それぞれについて、引張強度の制御誤差の平均と標準偏差を従来システムと提案システムとで比較した結果を表 4.2 に示す。ここで、制御誤差とは（実績値 - 目標値）である。また、これらの値は目標強度に対する相対的な比率である。この結果からも提案手法が品質制御誤差の低減に有効であることがわかる。なお、平均値が常に正にバイアスしているのは、引張強度と降伏点の両方が下限を超えないようにオーバーライド型の制御を行っているためである。



(a) 単純線形回帰モデル

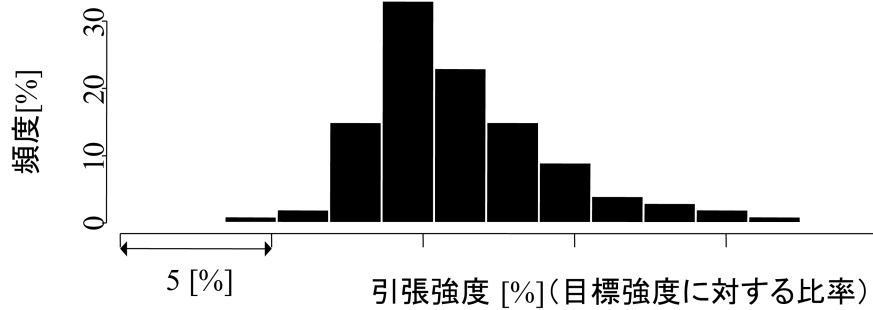


(b) 局所回帰モデル

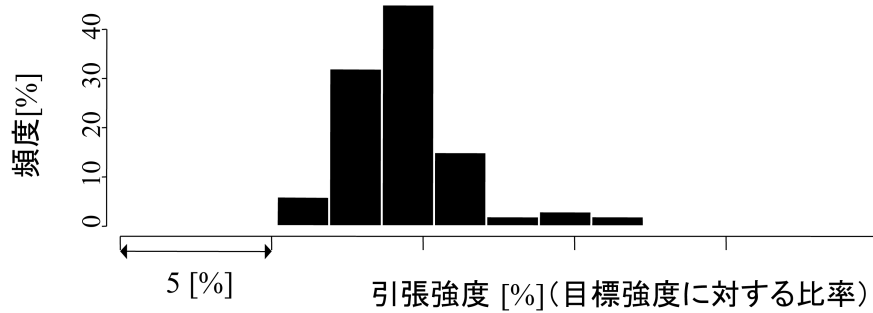
図 4.4 単純線形回帰モデルと局所回帰モデルの比較：引張強度の実績値と予測値の散布図

表 4.1 制御圧延材の材質制御結果

	引張強度	降伏点
従来システム	2.73[%]	5.89[%]
提案システム	1.92[%]	4.11[%]



(a) 従来システム

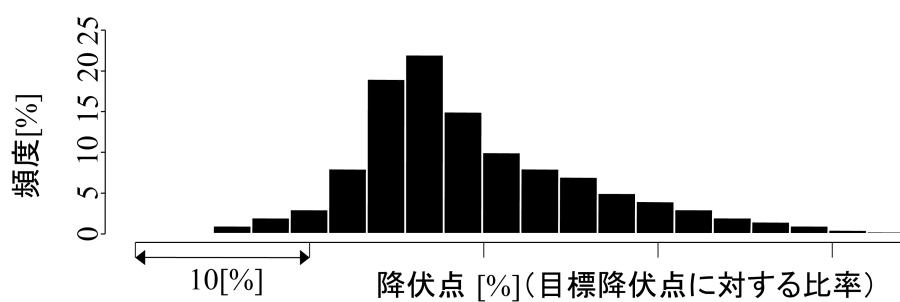


(b) 提案システム

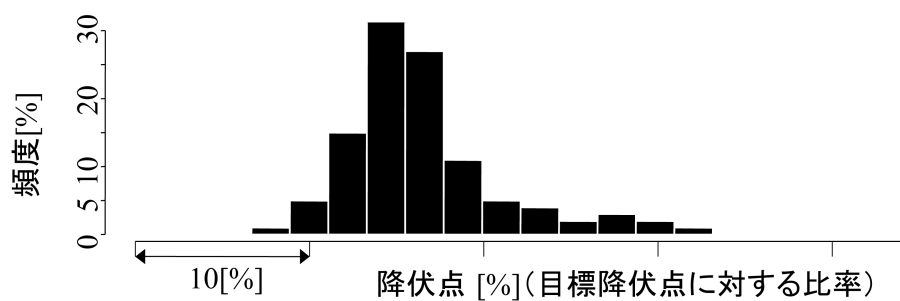
図 4.5 引張強度の制御結果のヒストグラム：従来システム (a), および, 提案システム (b)

表 4.2 制御圧延材および加速冷却材の引張強度の制御誤差の平均と標準偏差

	平均	標準偏差
[制御圧延材]		
従来システム	1.37 [%]	2.12 [%]
提案システム	0.98 [%]	1.39 [%]
[加速冷却材]		
従来システム	0.80 [%]	2.61 [%]
提案システム	0.52 [%]	2.25 [%]



(a) 従来システム



(b) 提案システム

図 4.6 降伏点の制御結果のヒストグラム：従来システム (a), および, 提案システム (b)

4.5 まとめ

複雑かつ非線形なプロセスに対して、Just-In-Time モデルの一種である局所回帰モデルを応用した鉄鋼製品の品質制御手法を提案した。また、本制御手法を用いた品質制御システムを開発し、厚鋼板の材質制御へ適用した結果について報告した。本システムは、JFE スチール株式会社西日本製鉄所において製品の生産に使用されており、安定稼働している。局所回帰モデルに基づいて、既の実績値が存在する前工程の情報から、これから操作することが可能な後工程の最適な操作変数を決定することにより、製品の品質制御精度を向上でき、品質不良の発生リスクを低減できた。また、品質不良発生を防止するため余分に投入していた原材料・エネルギー・時間を削減でき、製造コストを低減できた。さらに、提案手法においては、実装前に対象プロセスの実績データを用いて類似度関数を調整する1つのパラメータを決定するだけでよく、実装後は最適なモデルパラメータをリアルタイムに自動計算できる。

従来、スタッフが行う必要のあった膨大なモデルパラメータテーブルのメンテナンス作業の負荷を大幅に低減でき、従業員満足度の向上にも大きく貢献している。

制御圧延材と加速冷却材の2つの品種に対して提案手法を用いた材質制御が有効に機能することを実機の製品生産で確認できたので、本手法は汎用性があるものと大きく期待できる。よって、今後は、物理モデルの構築が困難、または環境変化によりモデルの精度の維持が困難な他のさまざまなプロセスの品質の自動制御に対して、本手法の適用範囲を拡大していく予定である。

4.6 記号説明

M	入力変数の数
N	データベースの実績データの数
W	要求点からの類似度
a	局所回帰モデルパラメータ（偏回帰係数）
b	局所回帰モデルパラメータ（切片項）
p	局所回帰モデルの調整パラメータ
u	後工程の操作変数
\tilde{u}	後工程の操作変数の基準値
\tilde{v}	前工程の入力変数の実績値
x	入力変数（製造条件）
\tilde{x}	局所回帰モデルの要求点
y	出力変数（品質特性値）
y^o	出力変数（品質特性値）の目標値
Γ	要求点からの距離
Λ	入力変数間のスケーリング重み行列
Π	類似度行列
Ω	入力行列
λ	入力変数間のスケーリング重み
σ_{Γ}	距離の標準偏差
θ	局所回帰モデルパラメータ
n	データベースサンプルインデックス（上添字）
m	入力変数インデックス（下添字）
m	出力変数インデックス（下添字）
T	行列の転置（上添字）

第 5 章

局所回帰モデルによる鉄鋼製品の寸法制御

5.1 はじめに

本章では、2.5 節で述べた鉄鋼製品の寸法制御の課題を解決するために、Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰を用いた鉄鋼製品の幅寸法制御システムについて提案する。

本節に続く 5.2 節では、提案手法の適用対象の一例として、厚鋼板の幅寸法制御について説明する。その製造プロセス、制御目的、ならびに、制御のためのモデルの入出力変数について述べる。

局所回帰モデルを用いた幅寸法制御手法について、5.3 節で述べる。また、提案手法を実装した幅寸法制御システムについて説明する。

実機適用結果について、5.4 節で述べる。

最後に、5.5 節でまとめを行う。

以上により、提案手法およびシステムの有効性を検証する。

5.2 厚鋼板の幅寸法制御

5.2.1 対象プロセス

厚鋼板の幅寸法は、リバース圧延により作り込まれるが、圧延機の設定値は、次のセットアップ計算により求められる。

厚鋼板のセットアップ計算

厚鋼板のセットアップ計算は、次のような最適化問題と捉えることができる。

- 目的関数
 - 生産性を最大化するため、パス数を最小化する。
- 制約条件
 - 圧延後の板厚が目標値通りになる。
 - 圧延後の幅寸法が目標値通りになる。
 - 圧延後の板クラウンおよび平坦度が許容範囲を超えない。
 - 各パスの圧延荷重が上限値を超えない。
- 決定変数
 - 各パスのロール隙を決定する。

決定変数と目的変数および制約条件との関係は、次のモデルにより表現される。

- 鋼材温度予測モデル
- 圧延荷重予測モデル
- 板クラウン平坦度予測モデル
- 幅寸法予測モデル
- ゲージメータモデル

セットアップ計算は圧延開始直前に行われ、また、圧延途中においても各パスの実績値に基づいて逐次修正計算される。セットアップ計算は、歩留りの向上に大きな役割を果たしている [129]。

圧延中にミル直近の板厚計によりフィードバック制御が行われる板厚、ならびに、各パスの実績値に基づき逐次計算される板クラウンおよび平坦度とは異なり、幅寸法の制御精度に対して、圧延開始直前のセットアップ計算で用いられる幅寸法予測モデルの精度が極めて大きな影響を与える。すなわち、寸法制御の中で幅寸法の予測モデルの精度向上は、歩留りの改善にとって非常に重要である。

エッジ不使用材とエッジ使用材

幅寸法制御精度を改善するための機械的工夫として、図 5.1 に示すような水平ロール直近に垂直ロールを配したものがあ。この垂直ロールはエッジと呼ばれる。圧延機直近に垂直ロールを配することで、幅方向に材料を拘束することができ、良好な幅寸法を得ることが容易になる [130, 131, 132]。

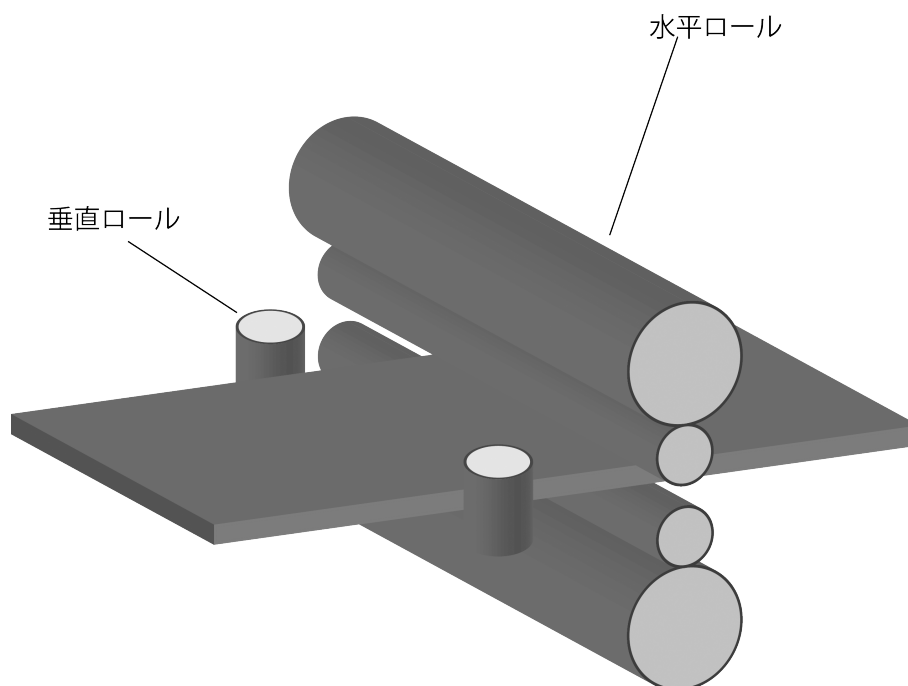


図 5.1 エッジ設備

本章で説明する幅寸法制御の実施例においては、エッジヤを用いずに寸法が作り込まれる製品（以下、エッジヤ不使用材と呼ぶ）と、エッジヤを用いて寸法が作り込まれる製品（以下、エッジヤ使用材と呼ぶ）の2通りについて論ずる。

5.2.2 幅寸法制御の目的と制御変数

第4章の材質制御においては、制御変数が2つあった。一方、本章で説明する厚鋼板の幅寸法制御においては、制御変数は圧延終了後の幅寸法であり、この一つの制御変数を目標値通りにすることが本制御の目的である。

5.2.3 幅寸法予測モデルの入出力変数

従来から次に示す入出力変数をもつモデルを用いて寸法予測を行っている。従来は、式 2.7 を用いて予測モデルを構築していた。本章では、次に示す入出力変数をもつ局所回帰モデルを提案する。

出力変数

幅寸法予測モデルの出力変数は、制御変数である圧延終了後の幅寸法である。

入力変数

入力変数は、次に示すような出力変数に影響を与える製造条件である。

エッジヤ不使用材の場合は、次の通りである。

- 幅出し圧延開始直前の板厚

- 幅出し圧延開始直前の幅寸法
- 幅出し圧延終了直後の板厚
- スラブ厚
- スラブ幅
- スラブ長
- 仕上圧延終了後の板厚
- 仕上圧延温度
- 成型圧延での板厚減少量
- 化学成分 (C, Si, Mn, . . .)

エッジ使用材の場合は、次の通りである。

- 幅出し圧延開始直前の板厚
- 幅出し圧延開始直前の幅寸法
- 幅出し圧延終了直後の板厚
- スラブ厚
- スラブ幅
- スラブ長
- 仕上圧延終了後の板厚
- 仕上圧延温度
- 成型圧延での板厚減少量
- 化学成分 (C, Si, Mn, . . .)
- 仕上圧延でのエッジロール隙

5.2.4 幅寸法制御の操作変数

エッジ不使用材の場合の操作変数は、幅出し圧延終了直後の板厚である。

エッジ使用材の場合の操作変数は、幅出し圧延終了直後の板厚と、仕上圧延でのエッジロール隙の2つである。

圧延機に対して設定できるのは、ロール隙である。幅出し圧延終了直後の板厚は、直接設定できないので、ゲージメータモデルにより、ロール隙を計算し、圧延機をセットアップする。

5.3 提案手法およびシステム

5.3.1 Just-In-Time モデルを用いた品質制御システム

2.5 節で説明した課題を解決するため、Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰モデルを用いた品質制御システムを開発した。本システムは、本章の材質制御だけでなく、次章の寸法制御に対しても適用した。

開発した品質制御システムについては、4.3 節の材質制御への適用で述べたように、実績データベース、変数選択機能、局所回帰モデル作成機能、操作量決定機能から構成される。本節では、寸法制御への適用において 4.3 節と異なる部分について述べる。なお、入力変数の基準値は、圧延工程に進入する前にあらかじめ、2.5 節および 2.6 節で説明した簡易回帰式を基に、目標の寸法（厚，幅）・形状（板クラウン，平坦度，平面形状）が得られ、かつ、生産性が最大となるような値が決定され与えられている。

5.3.2 実績データベース

実績データベースに蓄積する観測データの数は、工場の生産サイクルにあわせて、ほぼ全ての製造条件のデータが格納されるように決めている。寸法制御においては、50000 に設定した。

5.3.3 変数選択機能

前章までは、様々な変数からルールを用いて変数選択をしていた。寸法制御においては、エッジ不使用材かエッジ使用材かによって、必要な入力変数を選択する。

5.3.4 局所回帰モデル作成機能

類似度 W^n は次式で計算する。最後に忘却要素が加えられているところが、4.3 節の式 4.5 と異なる。プロセス特性の経時変化に対してより迅速に対応するため、調整パラメータとして、類似度関数を調整するパラメータに加えて、過去の実績データの重みを調整する忘却パラメータを加えた。

$$W_i^n \equiv \exp\left(-\frac{\Gamma_i^n}{p \sigma_{\Gamma_i}}\right) (\lambda)^{(N-n)} \quad (5.1)$$

ここで、 λ は 0 から 1 の実数の調整パラメータである。寸法制御においては、 p と λ の 2 つの調整パラメータをもつようにした。これらの調整方法については、5.3.6 節で説明する。

この類似度を重みとする重み付き最小自乗法を用いてモデルパラメータを計算することにより、類似度が高い、すなわち、新しくかつ要求点に近い実績データをより良くフィッティングする局所的な予測モデルが得られる。

5.3.5 操作量決定機能

実施例の幅寸法制御の操作量決定方法について説明する。

エッジ不使用材の場合は、操作変数は 1 つ（幅出し圧延終了直後の板厚）であり、式 4.11 を用いて計算する。一方、エッジ使用材の場合は、操作変数は幅出し圧延終了直後の板厚と仕上げ圧延でのエッジロール

隙の 2 つであり，式 4.8 および式 4.9 の最適化問題を解くことにより求める．

5.3.6 局所回帰モデルの調整方法

類似度の計算におけるパラメータ p ，および λ は，次のように調整した．

オフラインにおいて，データベースに蓄積されている実績データを用いて，予測誤差および局所回帰モデルパラメータの安定性を考慮して，適切な p および λ の値を求めた．評価方法は次の通りである．

データベースに蓄積されている 50000 件の実績データの中で， k 番目を評価用データとし，1 から $k-1$ 番目をモデル作成用データとする．インデックス k の初期値は 40001 とした．評価用データの入力変数の値を要求点 $\tilde{x} = x^k$ とし，モデル作成用データ $y^n, x^n, (n = 1, \dots, k-1)$ を用いて局所回帰モデルを作成し，要求点に対する出力予測値 \hat{y} ，ならびに，局所回帰モデルパラメータ θ を計算する．この予測値 \hat{y} と実績値 y^k を比較することにより，予測誤差を計算する．これを， k の値を 40001 から 50000 まで変化させて 10000 回繰り返し行うことにより，予測誤差の根平均二乗誤差 (RMSE)，ならびに，局所回帰モデルパラメータの分布を計算する．以上の処理を p ならびに λ を変化させて繰り返し行う．

エッジ不使用材のパラメータ調整結果

エッジ使用材についてパラメータ p および λ を調整した．エッジ不使用材について，計算した圧延終了後幅寸法予測の根平均二乗誤差 (RMSE) と， p および λ の関係を図 5.2 に示す．図 5.3 に，操作変数である幅出し圧延終了直後板厚の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値と， p および λ の関係を示す．図中の黒丸は，予測誤差および偏回帰係数の計算を行った p および λ の組み合わせである． p を 1.5 から 2.1 まで 0.05 刻みで変化させ， λ を 0.952 から 1.000 まで 0.004 刻みで変化させて，予測誤差および偏回帰係数の計算を行った．図 5.2 中の等高線は，予測誤差 (RMSE) の 3 次多項式のトレンド曲面で，最小二乗法によりフィッティングしている．図 5.3 中の等高線は，偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値の 3 次多項式のトレンド曲面で，

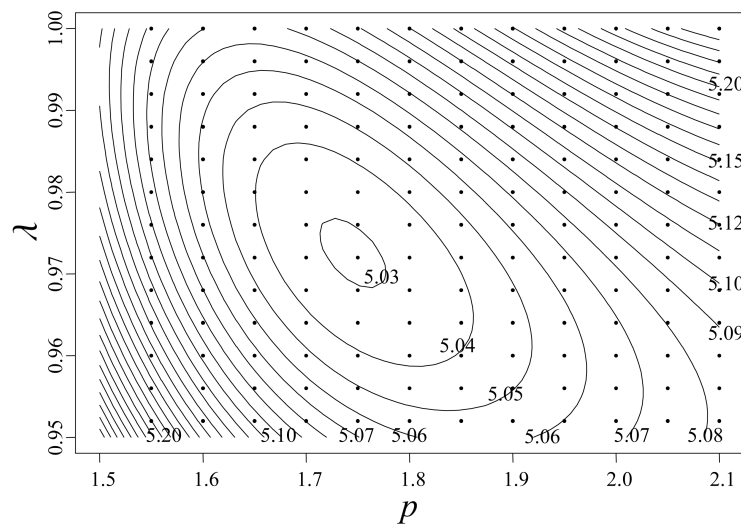


図 5.2 エッジ不使用材のパラメータ調整の結果 (1)：調整パラメータ p および λ と，圧延終了後幅寸法予測誤差 (RMSE) の関係

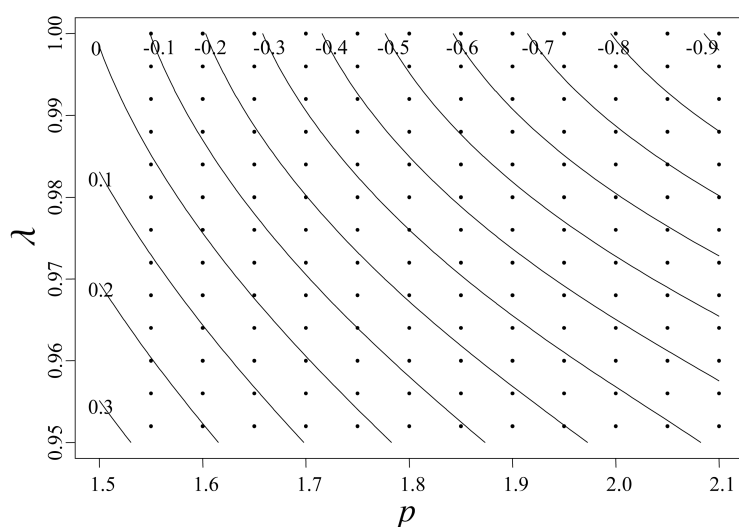


図 5.3 エッジ不使用材のバリデーションの結果 (2): 調整パラメータ p および λ と、圧延終了後幅寸法に対する幅出し圧延終了直後板厚の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値の関係

最小二乗法によりフィッティングしている。なお、図 5.2 および図 5.3 は、3 次より大きい多項式のトレンド曲面でもほとんど同じ結果が得られることを確認している。図 5.2 に示すように、予測誤差が最小になるのは $p \approx 1.75$, $\lambda \approx 0.972$ である。このとき、図 5.3 に示すように、偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値は負の値となっている。幅出し圧延終了直後板厚を大きくすると圧延終了後幅寸法が小さくなるという物理的先見情報に反しないモデルパラメータ（負の偏回帰係数）が安定的に得られると判断できるので、予測誤差が最小になる $p = 1.75$ および $\lambda = 0.972$ を選択した。

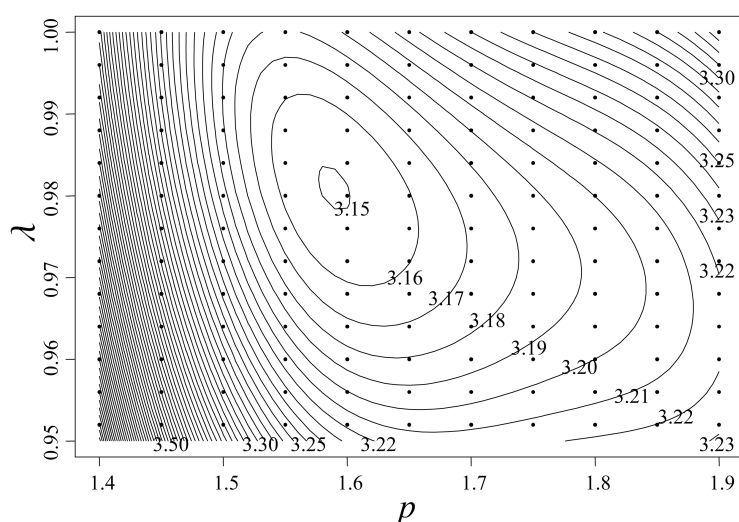


図 5.4 エッジ使用材のバリデーションの結果 (1): 調整パラメータ p および λ と、圧延終了後幅寸法予測誤差 (RMSE) の関係

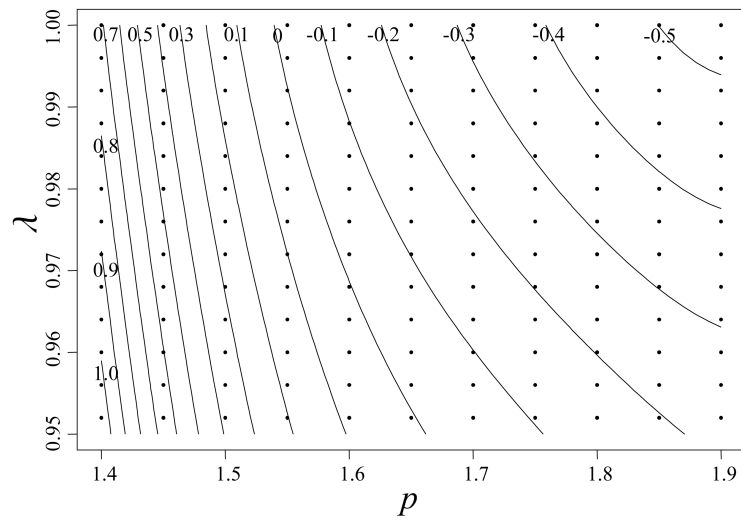


図 5.5 エッジ不使用材のバリデーシヨンの結果 (2): 調整パラメータ p および λ と、圧延終了後幅寸法に対する幅出し圧延終了直後板厚の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値の関係

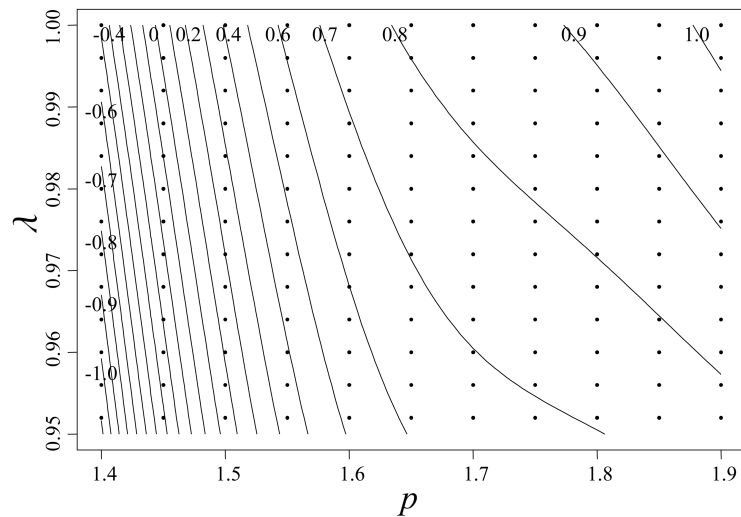


図 5.6 エッジ不使用材のバリデーシヨンの結果 (3): 調整パラメータ p および λ と、圧延終了後幅寸法に対する仕上圧延エッジロール隙の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値の関係

エッジ使用材のパラメータ調整結果

エッジ使用材についても、エッジ不使用材と同様に、オフラインにおいてパラメータ p および λ を調整した。計算した圧延終了後幅寸法予測の根平均二乗誤差 (RMSE) と、 p および λ の関係を図 5.4 に示す。図 5.5 に、操作変数の一つである幅出し圧延終了直後板厚の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値と、 p および λ の関係を示す。また、図 5.6 に、もう一つの操作変数である仕上圧延エッジロール隙の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の下限値と、 p および λ の関係を示す。図 5.4 に示すように、予測誤差が最小になるのは $p \approx 1.60$ 、 $\lambda \approx 0.980$ である。このとき、図 5.6 に示すように、仕上圧延エッジロール隙の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の下限値は正の値になっている。仕上圧延エッジロール隙を大きくすると圧延終了後幅寸法が大きくなると

いう物理的先見情報に反しないモデルパラメータ（正の偏回帰係数）が安定的に得られると判断できる．一方，図 5.6 に示すように，幅出し圧延終了直後板厚の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値はほぼ 0 となっている．幅出し圧延終了直後板厚を大きくすると圧延終了後幅寸法が小さくなるという物理的先見情報に反しないモデルパラメータ（負の偏回帰係数）が安定的に得られないことが考えられる．物理的先見情報に反しないモデルパラメータを安定的に得られるようにするため，幅出し圧延終了直後板厚の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値が 0 より十分に小さくなり，かつ，仕上圧延エッジロール隙の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の下限値が 0 より十分に大きくなり，かつ，予測誤差が十分小さくなる $p = 1.65$ および $\lambda = 0.984$ を選択した．

5.4 実機適用結果

前説で述べた品質制御システムを実機の寸法制御に適用した結果について述べる。

5.4.1 寸法予測精度

局所回帰モデルによる精度改善を評価するため、厚鋼板のエッジ不使用材とエッジ使用材を対象に幅寸法の予測精度の評価を実機においてオンラインで行った。

提案法である局所回帰モデルの予測精度評価は次のように行った。ある鋼材について、入力変数の実績値がすべてそろった段階で、それらの値を要求点として、実績データベースに蓄積されている実績データをもとに、局所回帰モデルを作成する。その局所的なモデルに要求点の値を入力して出力変数の予測値を計算する。対象の鋼材の出力変数の実績値と比較して、予測誤差を計算する。この処理を 30000 の鋼材について行い、予測誤差の統計量を計算する。

また、比較のため、式 2.7 で表現される従来モデルについても同様に予測誤差を求めた。

エッジ不使用材ならびにエッジ使用材について、従来モデルおよび局所回帰モデルによる予測誤差を表 5.1 に示す。ここで、予測誤差とは予測値 - 実績値であり、根平均二乗誤差 (RMSE) により評価した。また、これらの値は最大製品幅に対する相対的な比率である。エッジ不使用材ならびにエッジ使用材の両方について、従来モデルよりも提案する局所回帰モデルの方が予測精度を向上させられることを確認した。

表 5.1 幅寸法予測誤差 (RMSE)

	エッジ不使用材	エッジ使用材
従来モデル	0.138[%]	0.127[%]
局所回帰モデル	0.097[%]	0.080[%]

5.4.2 寸法制御精度

幅寸法制御に対して本システムを適用し、鋼材を製造した結果について述べる。

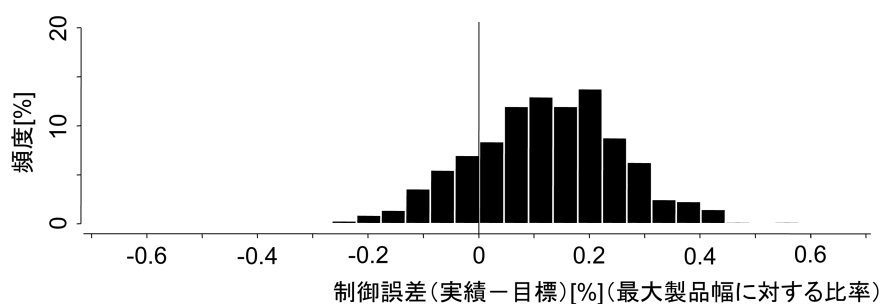
エッジ不使用材の幅寸法制御誤差

エッジ不使用材について、従来システムと提案システムの制御誤差の平均、標準偏差、ならびに、根平均二乗誤差 (RMSE) を表 5.2 に示す。図 5.7 に従来システムによる幅寸法制御誤差、および提案システムによる幅寸法制御誤差のヒストグラムを示す。ここで、制御誤差は実績値から目標値を引いたものである。また、これらの値は最大製品幅に対する相対的な比率である。

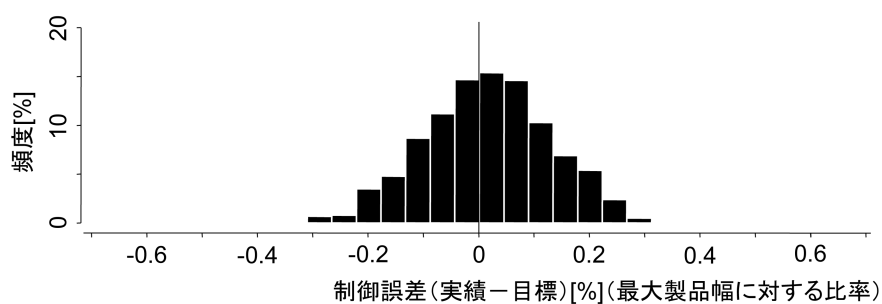
提案システムでは、根平均二乗誤差を従来システムに比べて約 40 % 低減することができた。提案システムは従来システムに比べて品質制御誤差の低減に有効であることが確認された。なお、幅寸法制御において、幅寸法が許容下限を下回ると製品にならないため、制御誤差を考慮して、制御目標を高めに設定している。

表 5.2 エッジ不使用材の幅寸法制御誤差

	平均	標準偏差	根平均二乗誤差
従来システム	0.131[%]	0.146[%]	0.916[%]
提案システム	0.015[%]	0.116[%]	0.118[%]



(a) 従来システム



(b) 提案システム

図 5.7 エッジ不使用材の幅寸法制御結果のヒストグラム：従来システム (a), および, 提案システム (b)

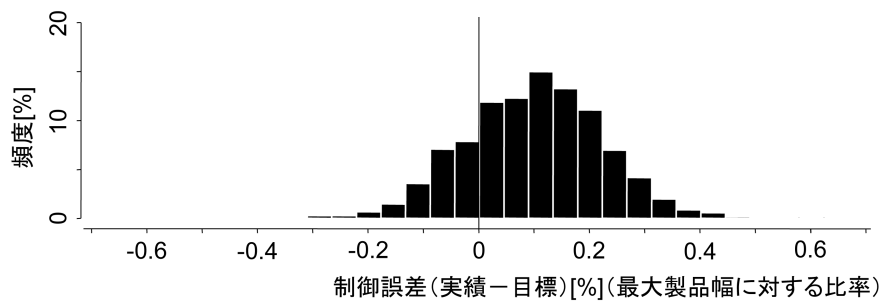
エッジ使用材の幅寸法制御誤差

エッジ使用材について、従来システムと提案システムの制御誤差の平均、標準偏差、ならびに、根平均二乗誤差 (RMSE) を表 5.3 に示す。図 5.8 に従来システムによる幅寸法制御誤差、および提案システムによる幅寸法制御誤差のヒストグラムを示す。ここで、これらの値は最大製品幅に対する相対的な比率である。

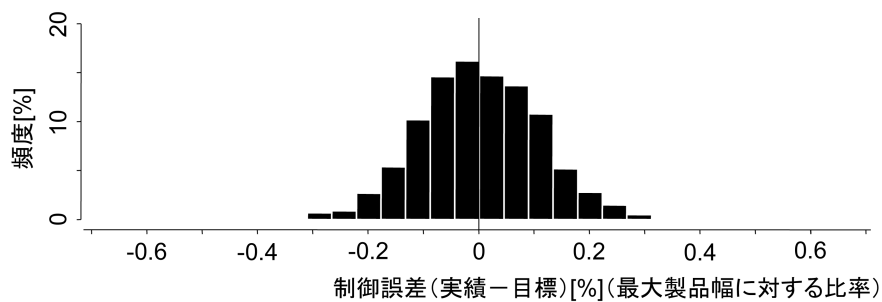
表 5.3 エッジ使用材の幅寸法制御誤差

	誤差平均	誤差標準偏差	根平均二乗誤差
従来システム	0.099[%]	0.131[%]	0.164[%]
提案システム	-0.004[%]	0.110[%]	0.112[%]

提案システムでは、根平均二乗誤差を従来システムに比べて約 30 % 低減することができた。エッジ不使



(a) 従来システム



(b) 提案システム

図 5.8 エッジ使用材の幅寸法制御結果のヒストグラム：従来システム (a), および, 提案システム (b)

用材と同様にエッジ使用材においても, 提案システムは従来システムに比べて品質制御誤差の低減に有効であることが確認された. なお, エッジ使用材は垂直ロールにより幅方向に拘束されるため, エッジ不使用材と比べて幅寸法精度誤差が小さくなる傾向がある.

5.5 まとめ

複雑かつ非線形なプロセスに対して、Just-In-Time モデルの一種である局所回帰モデルを応用した鉄鋼製品の品質制御手法を提案した。また、本制御手法を用いた品質制御システムを開発し、厚鋼板の幅寸法制御へ適用した結果について報告した。本システムは、JFE スチール株式会社西日本製鉄所において製品の生産に使用されており、安定稼働している。局所回帰モデルに基づいて、既の実績値が入力変数の情報から、これから操作することが可能な操作変数の最適値を計算し設定することにより、製品の寸法制御精度を向上でき、品質不良の発生リスクを低減できた。また、品質不良発生を防止するため余分に投入していた原材料を削減でき、歩留を向上できた。さらに、提案手法においては、実装前に対象プロセスの実績データを用いて類似度関数を調整するパラメータと忘却パラメータの2つを決定するだけでよく、実装後は最適なモデルパラメータをリアルタイムに自動計算できる。

従来、スタッフが行う必要のあった膨大なモデルパラメータテーブルのメンテナンス作業の負荷を大幅に低減でき、従業員満足度の向上にも大きく貢献している。

5.6 記号説明

W	要求点からの類似度
p	局所回帰モデルの調整パラメータ (バンド幅)
x	入力変数
\tilde{x}	局所回帰モデルの要求点
y	出力変数
\hat{y}	出力変数の予測値
Γ	要求点からの距離
λ	局所回帰モデルの調整パラメータ (忘却要素)
σ_{Γ}	距離の標準偏差
n	データベースサンプルインデックス (上添字)
m	入力変数インデックス (下添字)
l	出力変数インデックス (下添字)
T	行列の転置 (上添字)

第 6 章

局所回帰モデルによる鉄鋼製品の形状制御

6.1 はじめに

本章では、2.6 節で述べた鉄鋼製品の形状制御の課題を解決するために、Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰を用いた鉄鋼製品の平面形状制御システムについて提案する。

本節に続く 6.2 節では、提案手法の適用対象の一例として、厚鋼板の平面形状制御について説明する。その製造プロセス、制御目的、ならびに、制御のためのモデルの入出力変数について述べる。

局所回帰モデルを用いた平面形状制御手法について、6.3 節で述べる。また、提案手法を実装した平面形状制御システムについて説明する。

実機適用結果について、6.4 節で述べる。

最後に、6.5 節でまとめを行う。

以上により、提案手法およびシステムの有効性を検証する。

6.2 厚鋼板の平面形状制御

6.2.1 平面形状予測モデルの入出力変数

従来から次に示す入出力変数をもつモデルを用いて平面形状の予測を行っている．従来は，2.6節で述べたように，線形回帰モデルを用いていた．本章では，次に示す入出力変数をもつ局所回帰モデルを提案する．

出力変数および制御変数

平面形状制御モデルの制御変数である出力変数は，圧延後の先端部のクロップ長さであり， y_1, y_2, \dots, y_L と表す．ここで， L は出力変数の数を表す．図6.1に出力変数の一例を示す． y_1, \dots, y_4 は，幅方向端部を基準としたクロップ長さで，それぞれ，幅方向1/2位置，幅方向1/4位置，幅方向1/8位置，ならびに幅方向1/16位置のクロップ長さである．

なお，平面形状の非対称成分は，圧延ロールに対して鋼材を真っ直ぐに通すためのさまざまな機械的工夫により小さくすることができおり，対称成分の大きさと比べて十分小さく無視することができる．よって，本研究では平面形状は左右対称として議論する．

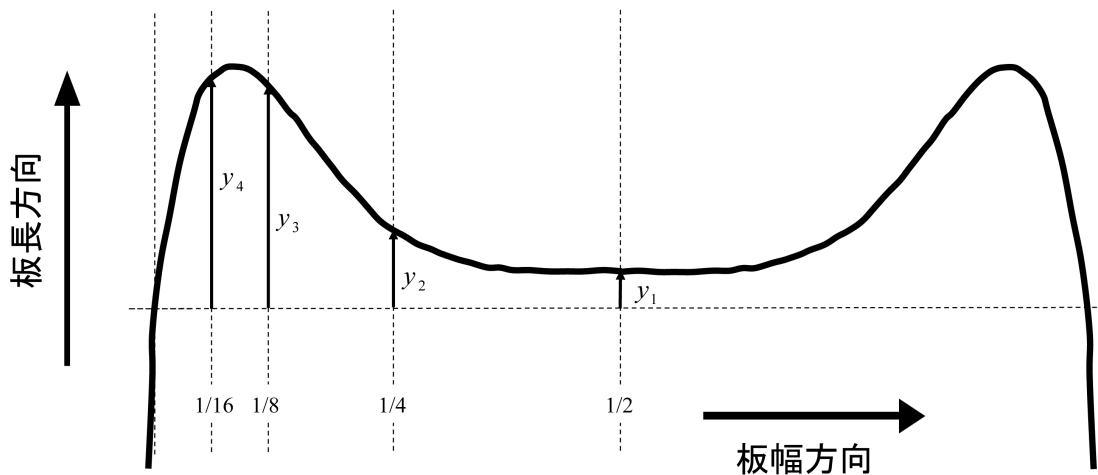


図 6.1 圧延後における先端の平面形状

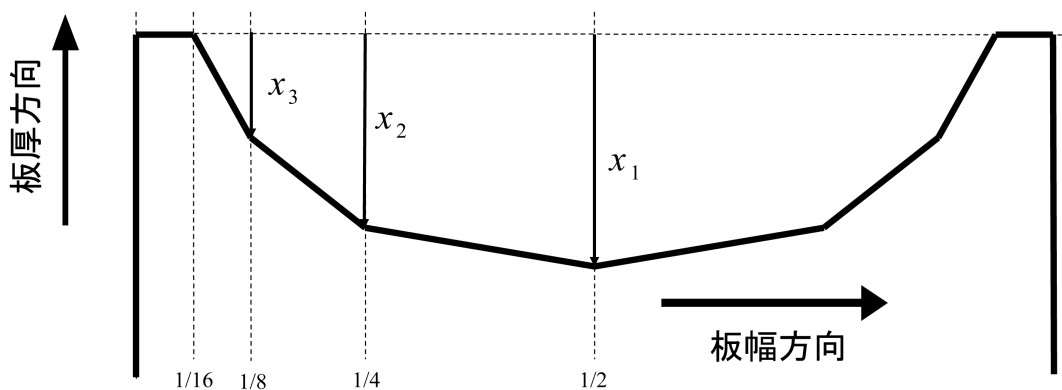


図 6.2 幅出し圧延後における板厚分布

入力変数および操作変数

平面形状制御の入力変数は、平面形状に対して物理的な因果関係がある十数個である。そのうち、操作変数は幅出し圧延終了時の相対板厚で、 $u \equiv [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_K]^T$ と表す。また、操作変数以外の入力変数を $v \equiv [x_{K+1} \ x_{K+2} \ \cdots \ x_M]^T$ と表す。ここで、 M は入力変数の数、 K は操作変数の数、 T は行列の転置を表す。図 6.2 に操作変数の一例を示す。 x_1, x_2, x_3 は、それぞれ、幅方向 1/2 位置、幅方向 1/4 位置、ならびに幅方向 1/8 位置の板厚から幅方向端部位置の板厚を引いたものである。

操作変数以外の入力変数を次に示す。

エッジ不使用材の場合は、次の通りである。

- スラブ厚
- スラブ幅
- スラブ長
- 幅出し圧延開始直前の板厚
- 幅出し圧延開始直前の板幅
- 幅出し圧延開始直前の板長
- 仕上圧延開始直前の板厚
- 仕上圧延開始直前の板幅
- 仕上圧延開始直前の板長
- 仕上圧延終了後の板厚
- 仕上圧延終了後の板幅
- 仕上圧延終了後の板長
- 仕上圧延温度
- 化学成分 (C, Si, Mn, . . .)

エッジ使用材の場合は、次の通りである。

- スラブ厚
- スラブ幅
- スラブ長
- 幅出し圧延開始直前の板厚
- 幅出し圧延開始直前の板幅
- 幅出し圧延開始直前の板長
- 仕上圧延開始直前の板厚
- 仕上圧延開始直前の板幅
- 仕上圧延開始直前の板長
- 仕上圧延終了後の板厚
- 仕上圧延終了後の板幅

- 仕上圧延終了後の板長
- 仕上圧延温度
- 化学成分 (C, Si, Mn, . . .)
- 仕上圧延でのエッジロール隙

6.2.2 平面形状制御の目的

本章で説明する厚鋼板の平面形状制御の目的は、先端部の平面形状を矩形に近づけることである。

目標とする平面形状を図 6.1 を用いて説明する。本章では、幅方向 1/2 位置、幅方向 1/4 位置、幅方向 1/8 位置、ならびに幅方向 1/16 位置のクランプ長さがすべて 0、すなわち、 $y_1 = y_2 = y_3 = y_4 = 0$ を目標とするのではない。両板端部は圧延後に切り捨てられるので、幅方向 1/2 位置、幅方向 1/4 位置、幅方向 1/8 位置、ならびに幅方向 1/16 位置のクランプ長さがすべて等しい状態、すなわち、 $y_1 = y_2 = y_3 = y_4$ を目標の平面形状とする。

6.3 提案手法およびシステム

6.3.1 Just-In-Time モデルを用いた品質制御システム

2.6 節で説明した課題を解決するため、Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰モデルを用いた品質制御システムを開発した。本システムは、本章の形状制御だけでなく、第4章の材質制御、および、第5章の寸法制御に対しても適用した。

開発した品質制御システムについては、4.3 節の材質制御への適用で述べたように、実績データベース、変数選択機能、局所回帰モデル作成機能、操作量決定機能から構成される。本節では、形状制御への適用において4.3 節と異なる部分について述べる。なお、入力変数の基準値は、圧延工程に進入する前にあらかじめ、2.5 節および2.6 節で説明した簡易回帰式を基に、目標の寸法(厚, 幅)・形状(板クラウン, 平坦度, 平面形状)が得られ、かつ、生産性が最大となるような値が決定され与えられている。

第4章の材質制御、および、第5章の寸法制御において、対象の物理特性に合った操作方向および操作量について著者らは、局所回帰の偏回帰係数を利用する方法を提案した。鋼材の材質制御と幅寸法制御を対象とした場合は、入力変数間に強い相関関係が存在することがなく、また、十分に多様かつ多数のデータを得ることができたので、対象の物理特性に合った局所回帰の偏回帰係数を精度良く求めることができた。しかしながら、そのような条件を満足しない場合において、対象の物理特性に合った操作方向および操作量を求める方法は、検討課題として残っていた。

多重共線性が問題となるような場合に、安定的に偏回帰係数を得るためには、主成分回帰や部分的最小二乗法(PLS)などを用いればよい。PLSは主に化学産業においてソフトセンサの構築などに広く利用されている[123]。主成分回帰は鉄鋼プロセスを対象とした製品歩留りの改善などへの適用実績も報告されている[124]。しかしながら、これらの手法は真のパラメータを得ることができないことが知られており、計算された偏回帰係数を用いて自動制御をすることはできない。

本章では、鋼材の平面形状制御を対象に、対象の物理特性に関する先見情報とJust-In-Time モデリングの一種である局所回帰(Locally-weighted Regression)を組み合わせた制約付き局所回帰を用いた自動制御手法を提案する。

6.3.2 実績データベース

実績データベースに蓄積する観測データの数は、工場の生産サイクルにあわせて、ほぼ全ての製造条件のデータが格納されるように決めている。形状制御においては、寸法制御と同様に、50000に設定した。

実績データベースに格納される出力変数 y_1, y_2, \dots, y_L の実績値は、剪断ライン平面形状計[133]の計測値である。材質制御および寸法制御においては、出力変数は2つおよび1つであったが、形状制御においては出力変数の数はより多くなる。

6.3.3 変数選択機能

形状制御においては、寸法制御と同様に、変数選択機能は、エッジ不使用材かエッジ使用材かによって、物理特性等を考慮してあらかじめ設定した入力変数を選択する。

6.3.4 局所回帰モデル作成機能

本章で提案する制約付きの局所回帰モデルは以下の手順で作成される。

距離の定義と計算

n 番目の実績データに対応する入力データ x^n 、および要求点 \tilde{x} を、以下のように表現する。

$$x^n \equiv [x_1^n \quad x_2^n \quad \cdots \quad x_M^n]^T \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (6.1)$$

$$\tilde{x} \equiv [\tilde{x}_1 \quad \tilde{x}_2 \quad \cdots \quad \tilde{x}_M]^T \quad (6.2)$$

ここで、 N は実績データの数を表す。

各入力データ x^n について、次式で定義される要求点からの距離 Γ_l^n を計算する。

$$\Gamma_l^n \equiv \sum_{m=1}^M |\lambda_{ml}| |x_m^n - \tilde{x}_m| \quad (6.3)$$

ここで、 λ_{ml} は、温度と寸法などのように、異なる尺度で測定される入力変数をスケールリングするための重みである。

類似度の定義と計算

要求点から距離 Γ_l^n にある点の類似度 W_l^n を次式で定義する。

$$W_l^n \equiv \exp\left(-\frac{\Gamma_l^n}{p \sigma_{\Gamma_l}}\right) \quad (6.4)$$

ここで、 σ_{Γ_l} は実績データに対する式 6.3 で表される距離の標準偏差、 p は調整パラメータである。

制約付き局所回帰式の導出

与えられた N 個の実績データと類似度を用いて、要求点に近い過去のデータを重視した局所的な予測モデル

$$\hat{y}_l = b_l + \sum_{m=1}^M a_{ml} x_{ml} \quad (6.5)$$

を作成する。モデルパラメータ

$$\theta_l \equiv [b_l \quad a_{1l} \quad a_{2l} \quad \cdots \quad a_{Ml}]^T \quad (6.6)$$

は、次の二次計画問題を $l = 1, \dots, L$ について L 回繰り返し解いて求める。

評価関数は、次式で表されるように類似度を重みとする実測値と予測値の誤差の2乗和である。

$$J_l = (y_l - \Omega \theta_l)^T \Pi_l (y_l - \Omega \theta_l) \quad (6.7)$$

ここで、

$$y_l \equiv [y_l^1 \quad y_l^2 \quad \cdots \quad y_l^N]^T \quad (6.8)$$

$$\Pi_l \equiv \text{diag}(W_l^1 \quad W_l^2 \quad \cdots \quad W_l^N) \quad (6.9)$$

$$\Omega \equiv \begin{bmatrix} 1 & x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_M^1 \\ 1 & x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_M^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1^N & x_2^N & \cdots & x_M^N \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

である。\$y_l^n\$ は \$n\$ 番目の実績データに対応する \$l\$ 番目の出力変数の値であり、\$diag(s)\$ は \$s\$ の要素を主対角要素とする対角行列である。

制約条件として、制御変数に対する操作変数の偏回帰係数

$$\phi_l = [a_{1l} \quad a_{2l} \quad \cdots \quad a_{kl}]^T \quad (l = 1, 2, \dots, L) \quad (6.11)$$

の範囲に次式のように制限を設ける。

$$\underline{\phi}_l \leq \phi_l \leq \overline{\phi}_l \quad (6.12)$$

ここで、下限値

$$\underline{\phi}_l \equiv [\underline{a}_{1l} \quad \underline{a}_{2l} \quad \cdots \quad \underline{a}_{kl}]^T \quad (6.13)$$

および上限値

$$\overline{\phi}_l \equiv [\overline{a}_{1l} \quad \overline{a}_{2l} \quad \cdots \quad \overline{a}_{kl}]^T \quad (6.14)$$

には、3次元有限要素法による計算機シミュレーションならびに実験用圧延機でのオフライン実験により構築された物理モデル [121] を線形式で近似し、その偏回帰係数の区間推定値を与える。なお、物理モデルは、十分多様な操作変数の値を入力として与えて構築されているので、その実験データの操作変数間の相関は十分に小さい。

局所的な予測モデルのパラメータ決定時に、物理モデルから得られる情報を制約条件に加えることが、第4章の材質制御、第5章の寸法制御との違いである。

物理モデルから得られる先見情報に関する線形制約のもとで、予測値と実測値の重み付き2乗和を最小化するモデルパラメータを計算することにより、類似度が高い、すなわち要求点に近い実績データをより良くフィッティングし、かつ、対象の物理特性に合った偏回帰係数を持ち合わせた局所的な予測モデルが得られる。

6.3.5 操作量決定機能

前節で求められた制約付き局所回帰モデルのパラメータ \$\theta_l\$ (\$l = 1, \dots, L\$) と操作変数以外の入力変数の値 \$\nu\$ をもとに、平面形状評価関数

$$\Phi = (\hat{y} - y^o)^T \Psi (\hat{y} - y^o) \quad (6.15)$$

を最小化する操作変数の値を次の二次計画問題を解くことにより求める。

$$\min_u \Phi \quad (6.16)$$

subject to

$$\hat{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{L1} & \cdots & a_{LK} \end{bmatrix} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} a_{1K+1} & \cdots & a_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{LK+1} & \cdots & a_{LM} \end{bmatrix} \mathbf{v} \quad (6.17)$$

$$H\mathbf{u} \leq \mathbf{g} \quad (6.18)$$

ここで,

$$\hat{\mathbf{y}} \equiv [\hat{y}_1 \quad \hat{y}_2 \quad \cdots \quad \hat{y}_L]^T \quad (6.19)$$

である． \mathbf{y}^o は制御変数の目標値であり，すべての要素を同じ値に設定すると，目標の先端部の平面形状は矩形になる．式 6.18 の操作変数 \mathbf{u} に関する制約には，例えば，次のようなものがある．

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

図 6.2 に示すような幅出し圧延終了時の板厚分布を形作るためには，圧延中にロール隙を変化させなければならないが，ロール隙の変更速度には限界があるため， x_1, x_2, x_3 の操作範囲には，式 6.20 のような制約がある．ここで， $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ は、圧延機ロールの回転速度と最大圧下速度から計算される値である．

6.3.6 調整パラメータの決定方法

6.3.4 節の類似度の計算におけるパラメータ p は，以下のように調整した．

式 6.4 の類似度関数は，要求点からの距離 Γ が大きくなると減衰し 0 に近づく．調整パラメータ p を小さくするとその減衰が早くなる． p を小さくし過ぎると，要求点近傍のデータのノイズに対しオーバーフィッティングし，計算したモデルのパラメータが信頼できないという問題が発生する．また，正規方程式の係数行列 $\Omega^T \Pi \Omega$ の条件数が大きくなり過ぎるため，精度良くモデルパラメータを計算できない問題が発生する．逆に p を大きくし過ぎると，非線形な対象をうまくフィッティングできなくなる．

本研究では，オフラインにおいて，データベースに蓄積されている実績データを用いて，フルクロスバリデーションにより，根平均二乗誤差 (RMSE) が最も小さくなる p の値を求めた．

6.3.7 制約付き局所回帰を用いる理由

本研究の目的は，平面形状制御精度を向上させることであるので，予測モデルの精度を向上させるとともに，目標の平面形状に制御するための操作変数の値を精度よく求めることが必要である．予測モデルパラメータの中の操作変数に対応するパラメータ，すなわち，式 6.17 中の

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{L1} & \cdots & a_{LK} \end{bmatrix}$$

の推定値の分散が大きい，または対象の物理的な先見情報に反する値が計算されるときは，信頼できるパラメータの推定値が得られていないと判断できる．このモデルパラメータを用いたフィードフォワード制御は有効に機能しないことが懸念される．

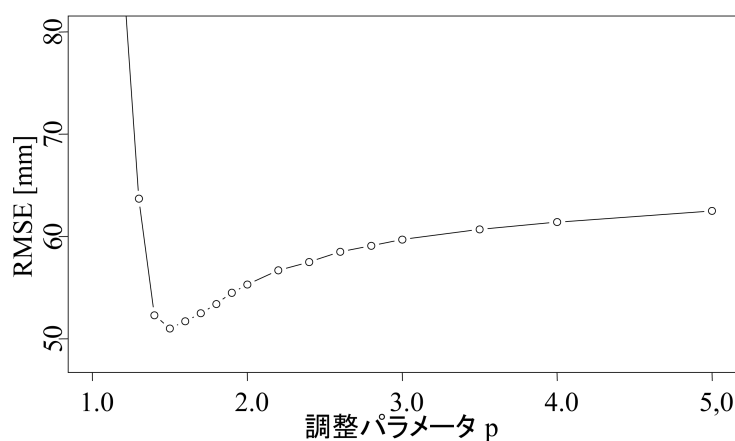
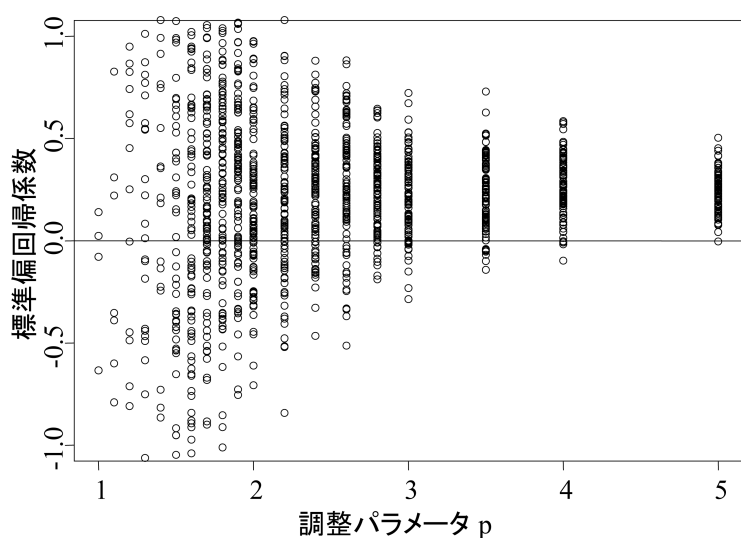
(a) 調整パラメータ p と根平均二乗誤差 (RMSE) の関係(b) 調整パラメータ p 標準偏回帰係数の関係

図 6.3 フルクロスバリデーションの結果

操作変数の偏回帰係数に関する式 6.12 の制約を与えずに、実績データベースに蓄積されたデータを用い、フルクロスバリデーションにより、局所回帰モデルの偏回帰係数の値と根平均二乗誤差 (RMSE) を計算した結果を図 6.3 に示す。(a) は幅方向 1/4 位置クランプ長さ y_2 の RMSE と調整パラメータ p の関係であり、(b) は y_2 に対する幅方向 1/4 位置相対板厚 x_2 の標準偏回帰係数と p の関係である。

第 4 章の鋼材の材質制御と第 5 章の寸法制御を対象とした研究においては、式 6.10 の入力変数データの行列の多様性が十分にあったので、RMSE が十分に小さくなるよう調整したとき、物理的特性に関する事前情報とも一致する偏回帰係数を安定的に計算することができた。

一方、平面形状制御を対象とした場合、実績データベースの操作変数の間には式 6.18 の制約により、線形従属に近い関係がある。このため、 p を小さくすると、正規方程式の係数行列 $\Omega^T \Pi \Omega$ の条件数が大きくなり

過ぎ、妥当な偏回帰係数を計算できない問題が発生する。

幅方向 1/4 位置クランプ長さ y_2 に対する幅方向 1/4 位置相対板厚 x_2 の偏回帰係数は、対象の物理的特性としては、正の値になるはずである。しかし、RMSE が十分に小さくなるよう p を調整したとき、正の偏回帰係数を安定的に得ることができない。このように、物理的先見情報に反しないモデルパラメータを安定的に得ることと、精度のよいモデルを得ることを両立するのが難しい。よって、3次元有限要素法、ならびにオフラインでの実験用圧延機で、多様な操作変数の値の実験データにより構築された物理モデルから、制御変数に対する操作変数の偏回帰係数の区間推定値を計算し、それを制約条件として、局所回帰モデルのパラメータを求めるようにした。

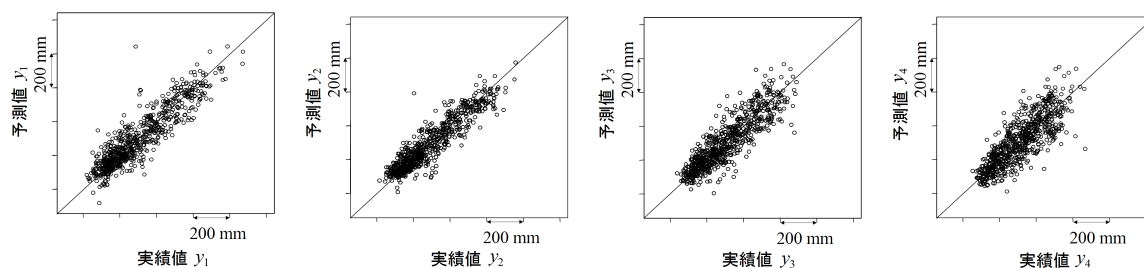
6.4 実機適用結果

JFE スチール株式会社西日本製鉄所の厚板工場の実機圧延データを用いて提案法の有効性を検証した結果を示す。なお、ここでの結果はエッジ不使用材に対するものである。

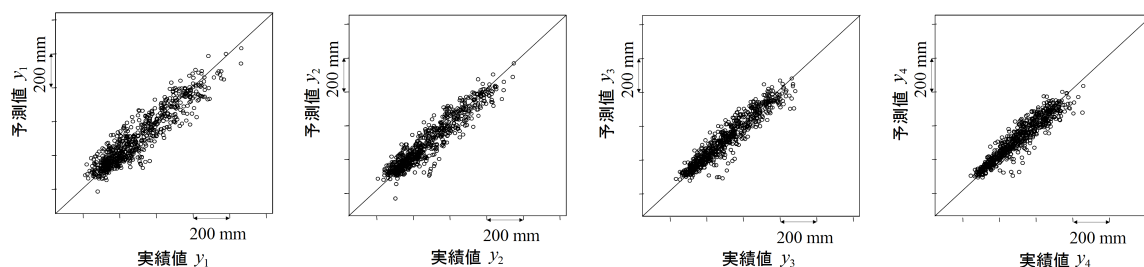
6.4.1 平面形状予測精度

従来法と提案法の平面形状の予測精度を比較した。比較対象の従来法は次の3つである。1つ目は、現状の操業に用いられている方法で、モデルパラメータを複数に区分して持ち線形重回帰によりモデルパラメータを決定する方法（PWLR: Piece-Wise Linear Regression）である。2つ目は、3次元有限要素法などにより構築したモデルをもとに、操作変数と制御変数の間の関係を線形近似した簡易物理モデル（SPM: Simple Physical Model）である。3つ目は、局所回帰（LWR: Locally Weighted Regression）である。提案法は、制約付き局所回帰（CLWR: Constrained Locally Weighted Regression）である。

実績データベースに蓄積された3000件のデータをもとに幅方向1/2位置、1/4位置、1/8位置、および1/16位置のクランプ長さの予測モデルを作成し、モデル用のデータとは別の692件の実績データにより予測精度を評価した。表6.1にRMSEの比較を示す。ここで、これらの値は従来法1（PWLR）による結果に対する相対的な比率である。また、図6.4に簡易物理モデル（SPM）と制約付き局所回帰モデル（CLWR）の各位置の実績値と予測値の散布図を示す。



(a) 従来法2（簡易物理モデル）



(b) 提案法（制約付き局所回帰モデル）

図 6.4 従来法と提案法の比較：平面形状の実績値と予測値の散布図

表 6.1 平面形状予測の根平均二乗誤差 (RMSE)

出力変数	y_1	y_2	y_3	y_4
位置	1/2	1/4	1/8	1/16
従来法 1 (PWLR)	100.0 [%]	100.0	100.0	100.0
従来法 2 (SPM)	95.2 [%]	97.4	96.4	93.9
従来法 3 (LWR)	76.2 [%]	81.5	60.1	49.8
提案法 (CLWR)	81.3 [%]	83.3	60.3	49.7

提案法の CLWR は、PWLR および SPM と比較して予測誤差が低減している。また、LWR と比べて遜色ない精度である。なお、SPM は、操作変数と制御変数の間の関係はうまく表現できていると考えられるが、操作変数以外の影響が考慮できていないため、予測誤差が大きいと考えられる。

6.4.2 平面形状制御精度

オフラインでの評価

実機圧延データを用いて制御シミュレーションを実施し、従来法の PWLR、SPM、LWR、ならびに提案法の CLWR を用いたときの平面形状制御精度の比較を行った。

6.3 節に示す方法で、平面形状を目標に近づけるための操作変数の値を計算し、それを用いてそれぞれの方法で作った平面形状予測モデルにより各位置の制御変数の値を計算し、平面形状の制御精度を評価した。なお、6.4.1 節と同様、平面形状予測モデルは、実績データベースに蓄積された 3000 件のデータにより構築し、モデル用のデータとは別の 692 件の実績データにより平面形状制御精度を評価した。

表 6.2 に平面形状評価関数 Φ の値の平均値を示す。ここで、これらの値は従来法 1 (PWLR) による結果に対する相対的な比率である。また、評価関数の重み行列 Ψ は単位行列とし、目標平面形状 y^o の値は全ての要素とも幅方向 1/4 位置のクロップ長さ \hat{y}_2 である。

評価用データと近い事例が実績データベースの中にあるため、LWR は平面形状予測誤差が最も小さい。しかし、操作変数と制御変数の間の偏回帰係数を精度よく表現できていないため、平面形状評価関数 Φ の値を

表 6.2 平面形状評価関数の平均値

	Φ [%]
従来法 1 (PWLR)	100.0
従来法 2 (SPM)	93.3
従来法 3 (LWR)	111.7
提案法 (CLWR)	87.2

小さくするための操作変数の値をうまく計算することができない．そのため， Φ の値を十分に小さくすることができない．一方，提案法の CLWR は，LWR よりも平面形状予測誤差は多少大きいですが，操作変数と制御変数との間の偏回帰係数を適切に表現できているため，従来法と比較して平面形状評価関数 Φ の値が低減し，より矩形に近づきよう計算できている．

従来操作に用いられている PWLR と，提案法の CLWR について，シミュレーションにより求めた平均クロープ長のヒストグラムを図 6.5 に示す．また，その平均値と標準偏差を表 6.3 に示す．ここで，平均クロープ長さとは，

$$\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_l - \min_l y_l, \quad (L=4) \quad (6.21)$$

である．また，これらの値は従来法 (PWLR) の平均クロープ長の平均値に対する相対的な比率である．従来法と比較して，提案法の方が標準偏差も平均も小さくなるという計算結果を得た．提案法により先端の不良形状部が低減し，歩留まりの向上が期待できる．

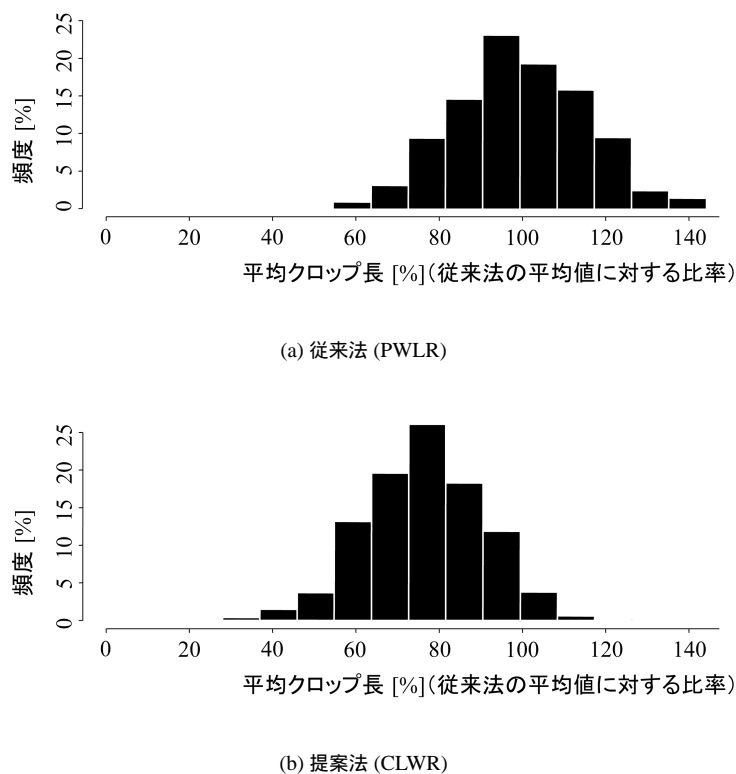


図 6.5 平均クロープ長のヒストグラム

表 6.3 平均クロープ長の平均値および標準偏差

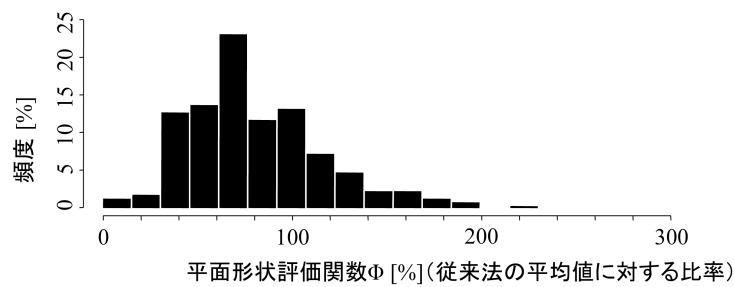
	平均値	標準偏差
従来法 (PWLR)	100.0 [%]	16.4 [%]
提案法 (CLWR)	75.4 [%]	14.3 [%]

なお、6.3.5 節の操作量決定において、二次計画法により容易に解くことができる平面形状評価関数 Φ を目的関数に用いた。目的関数として式 6.21 を用いると解法が比較的複雑になり、実装しにくい。

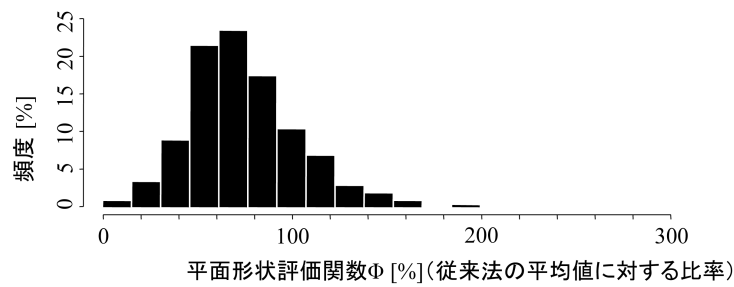
オンラインでの評価

オフラインのシミュレーションにより平面形状の改善が確認できたので、実機において製品を用いた評価を行った。

従来操作に用いられている PWLR と、提案法の CLWR について、平面形状評価関数のヒストグラムを図 6.6 に示す。また、その平均値と標準偏差を表 6.4 に示す。ここで、これらの値は従来法 (PWLR) の平面形状評価関数の平均値に対する相対的な比率である。



(a) 従来法 (PWLR)



(b) 提案法 (CLWR)

図 6.6 平面形状評価関数のヒストグラム

表 6.4 平面形状評価関数の平均値および標準偏差

	平均値	標準偏差
従来法 (PWLR)	100.0 [%]	45.5 [%]
提案法 (CLWR)	90.7 [%]	36.3 [%]

従来法と比較して、提案法の方が平面形状評価関数の標準偏差が約 20 % 低減し、平均値が約 10 % 低減される結果を得た。オンラインでの評価においても、提案法により先端の不良形状部が低減していることが確認できた。

6.5 まとめ

Just-In-Time モデリングの一種である局所回帰と物理モデリングを組み合わせたグレーボックスモデリング手法の一つとして、対象の物理特性に関する先見情報を制約条件とし、局所回帰モデルのパラメータを決定し、そのモデルを用いて自動制御する方法を提案した。本手法を鋼材の平面形状制御に適用し、実機圧延データを用いたシミュレーション、ならびに、実機圧延により、先端部平面形状の不良部分の低減に対する有効性を確認した。

局所回帰モデルを用いたフィードフォワード制御の実用化にあたり、目標の制御変数の値にするための操作変数の値を精度よく求めるためには、操作変数と制御変数の間の関係を適切に表現することが不可欠である。操作変数の間に強い相関関係が存在する場合、または十分に多くのデータを得ることができない場合には、実績データのみからその関係を求めることは困難である。しかし、対象の物理特性に関する先見情報がある場合は、その情報を有効活用することで、その課題を解決できると考える。本提案により局所回帰モデルを用いた制御の適用範囲をさらに拡大できるものと期待している。

今後も、精密な物理モデルの構築が困難、または環境変化によりモデルの精度の維持が困難な他のさまざまなプロセスの自動制御に対して、本手法の適用範囲を拡大する予定である。

6.6 記号説明

H	操作変数に関する制約条件の係数行列
J	目的関数の値 (局所回帰モデルパラメータ導出のための最適化問題)
K	操作変数の数
L	出力変数の数
M	入力変数の数
N	データベースの実績データの数
W	要求点からの類似度
a	局所回帰モデルパラメータ (偏回帰係数)
b	局所回帰モデルパラメータ (切片項)
g	操作変数に関する制約条件の切片ベクトル
p	局所回帰モデルの調整パラメータ
u	操作変数 (幅出し圧延終了時の相対板厚)
v	操作変数以外の入力変数
x	入力変数
\tilde{x}	局所回帰モデルの要求点
y	出力変数 (クロップ長)
y^o	出力変数の目標値
Γ	要求点からの距離
Π	類似度行列
Φ	平面形状評価関数
Ψ	出力変数間のスケーリング重み行列
Ω	入力行列
δ	操作変数に関する制約条件切片ベクトル各要素
θ	局所回帰モデルパラメータ
λ	入力変数間のスケーリング重み
σ_{Γ}	距離の標準偏差
$\underline{\phi}$	操作変数の偏回帰係数の下限値
ϕ	操作変数の偏回帰係数
$\overline{\phi}$	操作変数の偏回帰係数の上限値
T	行列の転置 (上添字)
l	出力変数インデックス (下添字)
m	入力変数インデックス (下添字)
n	データベースサンプルインデックス (上添字)

第7章

結論

本研究では、鉄鋼製品における品質の精度向上と維持を目的に、Just-In-Time モデリングの一種の局所回帰モデルを品質設計と品質制御へ適用し、実用化することを検討した。

第1章では、研究の概要について紹介した。

まず、検討対象が鉄鋼製品の品質に重要な役割を果たす品質設計と品質制御であり、それらの中で用いられている品質予測モデルの精度向上と維持、ならびに、それらを用いた設計システムおよび制御システムの開発について取り組むことを述べた。次に、技術分野としては、近年活発に産業応用研究がなされている Just-In-Time モデリングを品質設計と品質制御へ適用する検討を行うことを示した。また、Just-In-Time モデリングに関する従来の実用化研究は、推定または予測への応用であり、いかに設計や自動制御に対して実用化するかは検討課題として残っていたことを述べた。さらに、論文全体の構成と各章の内容を簡単にまとめ、各章の関連を説明した。すなわち、第1章において、研究の動機付けと進め方について総括した。

第2章では、本研究の対象プロセスである鉄鋼製品の品質設計と品質制御について説明した。

まず、鉄鋼製品の品質管理業務の一部である品質設計と品質制御の役割を明確にするために、鉄鋼の製造プロセス、鉄鋼製品の種類および流通についてまとめた。鉄鋼製品は多くの種類があり、それらの品質特性も様々ある。また、多くの複雑な製造プロセスを経て作られ、顧客の様々な要求に対応するため、製造条件を細かく設定する必要があることを示した。

次に、品質設計について、品質管理業務における位置付け、ならびに、設計の目的と制約条件を明らかにし、従来から行われている品質設計手法とその課題について述べた。品質設計とは、顧客要求の製品仕様に記載されている品質特性を満足する各製造プロセスの製造条件を決定する意思決定プロセスであり、製品仕様を制約条件とし、製造コストを最小化する最適化問題と捉えることができることを示した。従来は、品質設計の効率化のために知識ベースの品質設計システムの開発が進められてきたが、環境変化に対してルールメンテナンスが追いつかず、使われなくなってしまう、結果的に熟練者による試行錯誤で設計が行われている問題があることを示した。また、モデルベースの品質設計が求められていることを述べた。

続いて、品質制御について説明した。本論文では、鉄鋼製品の様々な品質特性の中で、重要な指標である材質、寸法、形状を対象とすることを述べた。それぞれの品質特性の制御について、品質を作りこむプロセスを詳細に説明し、制御目的と制御構成、ならびに、従来の制御手法とその課題について述べた。品質制御は、品

質を目標値に制御することを目的に、前工程の製造条件の実績値が設定値からずれることにより生じる品質制御誤差を補償するために、製造条件と品質との関係を表現するモデルを基に、後工程の製造条件を操作するフィードフォワード制御であることを示した。これらの対象プロセスは、複雑かつ非線形であり、現象を模倣する精密な物理モデルを構築することが困難である。そのため、制御のためのモデルとしては、製造現場においては、製造条件により多数に区分された領域毎に線形回帰モデルまたは簡易物理モデルを作成して用いていることを述べた。環境変化により製造条件と品質との関係が変化するため、品質制御精度が悪化するのを防止するために、スタッフが膨大な数のモデルパラメータをメンテナンスする必要がある。しかしながら、その作業負荷が高いことから、頻繁な調整ができず精度の維持が困難という問題があることを明らかにした。そして、このような精度の低いモデルを用いてフィードフォワード制御を行っていたため、品質制御精度の向上に限界があることを示した。

以上により、本研究の検討対象の特徴を明らかにし、第3章から第6章までの研究内容で解決すべき技術課題を明確にした。

第3章では、品質設計の精度向上のために、局所回帰モデルを適用する検討を行った。

まず、過去の大量の入出力データを蓄積し、予測の必要が生じる毎に、要求点に近い過去のデータを重視して局所的な予測モデルを構築する局所回帰のアルゴリズムについて説明した。また、この局所回帰モデルを用いた品質設計システムについて示した。次に、熱延鋼板の一種であるラインパイプ素材の品質設計を例に、提案する品質設計システムの実機適用結果について論じた。製品の生産において、設計精度の向上、設計時間の短縮などの有効性を確認した。

第4章では、品質制御の一つの材質制御の精度向上のために、局所回帰モデルを適用する検討を行った。

まず、局所回帰のアルゴリズムについて説明し、この局所回帰モデルを用いた品質制御システムについて示した。実装前に対象プロセスの実績データを用いて類似度関数を調整する1つのパラメータを決定するだけでよく、実装後は最適なモデルパラメータをリアルタイムに自動計算できることを述べた。次に、厚鋼板の材質制御を例に、提案する品質制御システムの実機適用結果について論じた。製品の生産において、材質制御精度の向上を確認した。

第5章では、品質制御の一つの寸法制御の精度向上のために、局所回帰モデルを適用する検討を行った。

第4章で説明した局所回帰モデルを用いた品質制御システムをベースに、プロセス特性の経時変化に対してより迅速に対応するため、調整パラメータとして、類似度関数を調整するパラメータに加えて、過去の実績データの重みを調整する忘却パラメータを加えた。厚鋼板の幅寸法制御を例に、提案する品質制御システムの実機適用結果について論じた。製品の生産において、寸法制御精度の向上を確認した。

第6章では、品質制御の一つの形状制御の精度向上のために、局所回帰モデルを適用する検討を行った。

第4章で説明した局所回帰モデルを用いた品質制御システムをベースに、対象の物理特性に関する先見情報を制約条件とし、局所回帰モデルのパラメータを決定し、そのモデルを用いて自動制御するようにした。厚鋼

板の平面形状制御を例に、提案する品質制御システムの実機適用結果について論じた。実機実験により、形状制御精度の向上を確認した。

第3章から第6章までの検討によって、鉄鋼製品の品質設計および品質制御の全体に対し、品質の精度を向上させる実用的な手法およびシステムが開発された。

すなわち、実プラントにおける品質設計、ならびに、品質制御、すなわち、材質制御、寸法制御および形状制御に対し本開発システムを適用することで、鉄鋼製品における品質の設計誤差および制御誤差が低減した。品質精度が向上したことにより、従来、最低限の品質を確保するために余分に投入していた原料、エネルギー、時間を削減することができ、製造コストの低減、生産性の向上などの効果を出すことができた。また、従来、スタッフが多くの工数をかけて行っていたモデルメンテナンスの負荷低減も実現でき、従業員満足度の向上にも寄与できた。これにより、開発した品質設計システムは2003年から、品質制御システムは2002年から、JFEスチール株式会社において十年近く継続して使用されており、環境変化に対して対応できると考える。以上のように、提案手法および開発システムの有効性を実プラントで実証できた。

このように、本研究は鉄鋼製品の品質設計および品質制御における品質の制御性向上と維持に大きく寄与し、併せて、商用プラントにおける製品の生産に対して適用実績を作り、その意義は大きいと考える。鉄鋼製造現場では、古くからモデルベース制御が数多く実装されており、現在も増え続けている。高精度な制御対象モデリング、制御システムの開発、ならびにそれらのメンテナンスと性能向上を効率的に行うための技術の進展が、製品品質の向上と製造コスト低減、ひいては競争力の強化のために必要不可欠であり、今後もますます重要になっていくと予想される。様々なプロセスならびに品質における設計および自動制御に対して、本研究成果を継続して適用拡大していくことで、製造現場の改善に寄与すると同時に、本技術分野の発展に今後も貢献していきたい。

また、本研究の適用対象のモデリングにあたっては、入力データの多様性が充分にあり、多重共線性が問題になることはほとんどなかった。多重共線性が問題になるケースにおいても、対象の物理特性に関する先見情報がある場合は、その情報を有効活用することで、その課題を解決できることを示した。しかしながら、鉄鋼製造現場にはそのような先見情報がなく、かつ、入力変数間に強い相関がある対象も数多くあるので、それらに対する品質設計と品質制御問題を解決する手法およびシステムの開発を継続して行いたい。

謝辞

本論文を作成するにあたり，指導教官の長谷部伸治先生から，丁寧かつ熱心なご指導を賜りました．

加納学先生には，本研究の学術雑誌投稿にあたり，親身かつ細部に渡るご助言を賜りました．

大嶋正裕先生，山本量一先生には，数々の有用なご助言，ご指導を賜りました．

JFE スチール株式会社の上司ならびに同僚には，本研究に携わる機会を与えてもらい，また，製造現場における本研究の実施等にあたり多大なご支援ご協力を頂きました．

妻には，博士課程入学のきっかけを与えてもらい，また，いつも論文執筆を陰から支えてくれました．

皆様のお陰で学位論文をまとめることができました．

ここに感謝の意を表します．

参考文献

- [1] 茂森弘靖: 局所回帰モデルによる鋼材の品質制御の実用化, 計測と制御, **49**-7, 439/443 (2010)
- [2] A. Stenman, F. Gustafsson and L. Ljung: Just in time models for dynamical systems, 35th IEEE Conference on Decision and Control, 1115/1120 (1996)
- [3] Q. Zheng and H. Kimura: Just-In-Time modeling for function prediction and its applications, Asian Journal of Control, **3**-1, 35/44 (2001)
- [4] 鄭秋宝, 木村英紀: Just-In-Time モデリングの新しい手法とその圧延セットアップモデルへの応用, 計測自動制御学会論文集, **37**-7, 640/646 (2001)
- [5] G. Bontempi, M. Birattari and H. Bersini: Lazy Learning for Local Modelling and Control Design, International Journal of Control, **72**, 643/658 (1999)
- [6] C. G. Atkeson, A. W. Moore and S. Schaal: Locally Weighted Learning, Artificial Intelligence Review, **11**, 11/73 (1997)
- [7] J. Zhang, Y. Yim and J. Yang: Intelligent selection of instances for prediction functions in lazy learning algorithms, Artificial Intelligence Review, **11**, 175/191 (1997)
- [8] D. Maron and A. W. Moore: The Racing Algorithm: Model Selection for Lazy Learners, Artificial Intelligence Review, **11**, 193/225 (1997)
- [9] M. Birattari, G. Bontempi and H. Bersini: Lazy Learning Meets the Recursive Least Squares Algorithm, Advances in Neural Information Processing Systems, **12**, 375/381 (1999)
- [10] D. W. Aha: Lazy Learning, Boston, London: Kluwer Academic Publishers (1997)
- [11] A. Stenman: Model on Demand: Algorithms, Analysis and Applications, Sweden: Linus & Linnea AB (1999)
- [12] M. Kishi, K. Kimura, J. Ohta and S. Yamamoto: Shrinkage prediction of a steel production via model on demand, 11th Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, 447/450 (2004)
- [13] 岸真友, 木村和喜, 山本茂: Just-In-Time モデリング技術による鉄鋼製品の収縮率予測, 計測と制御, **44**-2, 116/119 (2005)
- [14] 伊藤雅浩, 松崎眞六, 大貝晴俊, 大館尚記, 内田健康, 斎藤信一, 佐々木望: 高炉操業における大規模データベースオンラインモデリング, 鉄と鋼, **90**-11, 917/924 (2004)
- [15] 藤原幸一, 加納 学, 長谷部伸治: 相関型 Just-In-Time モデリングによるソフトセンサの設計, 計測自動制御学会論文集, **44**-4, 317/324 (2008)
- [16] 筒井宏明, 黒崎淳, 佐藤友彦: 履歴データを事例として使用する非線形モデリング技術, 計測自動制御学会

- 論文集, **33-9**, 947/954 (1997)
- [17] 岡利明, 筒井宏明, 近田智洋, 山縣謙一: 事例ベースモデリングを用いた下水処理場向け下水流入量予測システム, EICA, 環境システム計測制御学会誌, **7-2**, 11/14 (2002)
- [18] W. S. Cleveland and S. J. Delvin: Locally weighted regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting, Journal of the American Statistical Association, **83-403**, 596/610 (1988)
- [19] 松宮徹: 鋼を生み出す その1 製鋼法の主流 転炉法, NIPPON STEEL MONTHLY, **138** 11/14 (2004)
- [20] 千葉政道, 鹿磯正人: 純鉄系軟磁性材料, 神戸製鋼技報, **52-3** 66/69 (2002)
- [21] 藤田耕一郎, 井上正, 江本秀樹: 純鉄系磁気シールド材料の高透磁率化とその磁気シールド性能, JFE 技報, **8** 22/25 (2005)
- [22] 小泉俊一郎: 鉄鋼業界大研究, 産学社 (2007)
- [23] 奥野嘉雄: 鉄鉱石から鉄を生み出す (上), NIPPON STEEL MONTHLY, **135** 11/14 (2004)
- [24] 奥野嘉雄: 鉄鉱石から鉄を生み出す (中), NIPPON STEEL MONTHLY, **136** 11/14 (2004)
- [25] 奥野嘉雄: 鉄鉱石から鉄を生み出す (下), NIPPON STEEL MONTHLY, **137** 5/8 (2004)
- [26] 松宮徹: 鋼を生み出す その2 進化する精錬技術, NIPPON STEEL MONTHLY, **139** 13/16 (2004)
- [27] 松宮徹: 鋼を生み出す その3 連続鑄造の役割と挑戦, NIPPON STEEL MONTHLY, **140** 5/8 (2004)
- [28] 受注統計, 日本鉄鋼連盟 (2010)
- [29] 統計表一覧 (鉄鋼), 経済産業省生産動態統計 (2010)
- [30] 毎日新聞: ニュースな言葉, 東京朝刊, 3月19日 (2004)
- [31] 厚鋼板, 製品カタログ, JFE スチール株式会社 (2007)
- [32] H. Ishikawa, H. Tsukamoto, A. Tagane, H. Wada, M. Shibata, K. Iwasa: Development of quality design expert system for steel plate, NKK Technical Review, **142**, 32/37 (1993)
- [33] M. Yamashita: Study on application of knowledge engineering to quality design, Industrial Engineering in Iron and Steel **27-4** 37/41(1989)
- [34] H. Yasuda, Y. Nakatsuka, A. Yamamoto, I. Takeuchi, T. Hashimoto: An expert system for the material design of large diameter steel pipes, The Sumitomo Search **43-1** 28/34 (1991)
- [35] 住友金属工業株式会社: 製品品質設計装置, 特開平 8-335230, 12月17日 (1996)
- [36] M. Watanabe, Y. Iwata, N. Obama, K. Shirahata, K. Suematsu, T. Meiga, H. Yamane: Development of Steel Sections Quality Design Expert System, Nippon Steel Technical Report **343** 25/29 (1992)
- [37] K. Omura, T. Watanabe, M. Konishi, N. Syosaki, K. Maeoka: Application of expert system for quality and process design of steel plates Proceedings of the IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation, 92/98 (1994)
- [38] S.S. Shivathaya, X.D. Fang: Fuzzy-logic-based ranking of steel grades generated by material design KBS, Engineering Applications of Artificial Intelligence, **12** 503/512 (1999)
- [39] T. Watanabe, A. Kitamura, K. Higuchi, H. Ikeda: Intelligent manufacturing database techniques for quality and process design of steel plate, Proceedings of IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 596/603 (2003)

- [40] 高島博, 宅島章夫, 田中明美: MATLAB/Simulink とモデルベース設計による 2 足歩行ロボット・シミュレーション, 毎日コミュニケーションズ (2007)
- [41] 大川善邦: 機械設計のためのモデルベース開発入門, オーム社 (2007)
- [42] 軟らかくて強い鉄への挑戦, NIPPON STEEL MONTHLY, 128 17/20 (2003)
- [43] 小指軍夫: 制御圧延・制御冷却, 地人書館 (1997)
- [44] 関根寛: 厚板製造技術の進歩と材質, 第 86・87 回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 123 (1982)
- [45] 鹿内伸夫, 三田尾眞司, 遠藤茂: 最近の TMCP による厚板組織制御技術の進展と高性能化, JFE 技報, 18 1/6 (2007)
- [46] JISG0203, 鉄鋼用語 (製品及び品質), 日本工業規格 (1984)
- [47] 斉藤良行: 鋼板製造プロセスにおける材質予測制御の現状と課題, 鉄と鋼, 74-4, 19/26 (1988)
- [48] 柳本潤, 劉金山: 鉄鋼の形状・材質制御モデルの現状, 鉄と鋼, 89-2, 11/18 (2003)
- [49] 村上俊夫, 難波茂信, 関勇一: 490MPa 級溶接金属の材質予測シミュレーション技術の開発, R & D 神戸製鋼技報, 58-1, 13/17 (2008)
- [50] 平野伸和, 藤原正尚, 吉田広明, 五十川幸宏: フェライト系ステンレス鋼の材質予測技術の開発, 電気製鋼, 76-2, 87/94 (2005)
- [51] 吉野雅彦: 塑性加工のための材質予測システム, 計算数理工学レビュー 2004-2, 37/49 (2004)
- [52] 加生茂寛: 制御鍛造を適用した F + P 型非調質鋼の材質予測塑性と加工 44, 1183 (2003)
- [53] 小原一浩: 熱間圧延プラントにおける材質予測と制御 鉄鋼の強度を自由に作り分ける材質予測モデル, 東芝レビュー, 58-8, 70/71 (2003)
- [54] 石川孝司: 非調質鋼の熱間鍛造における材質予測, JFA, 4, 12/15, (2003)
- [55] 吉田広明, 五十川幸宏, 石川孝司: 制御鍛造を適用した非調質鋼の材質予測シミュレーション, 材料とプロセス, 15-2, 370 (2002)
- [56] 瀬沼 武秀: 生産技術の IT 化に果たす材質予測制御技術の役割, 材料とプロセス 15-2, 368 (2002)
- [57] 随念貴男, 石川孝司, 吉田広明: オースフォーミングを適用した非調質鋼の材質予測, 材料とプロセス, 14-2, 14 (2001)
- [58] 与語康宏, 石川孝司, 吉田広明: 制御鍛造における非調質鋼の材質予測 I, 材料とプロセス, 14-2, 424 (2001)
- [59] 増井浩昭: 鉄鋼材質予測のためのコンピューターシミュレーション技術, ふえらむ, 6-3, 187/198 (2001)
- [60] 難波茂信: 鉄鋼材料の材質予測シミュレーション技術, R & D 神戸製鋼技報, 51-3, 36/39 (2001)
- [61] 石川孝司, 与語康宏, 吉田広明: 熱間鍛造における材質予測のための数値解析, 材料とプロセス, 13-4, 760/763 (2000)
- [62] 吉野雅彦: 塑性加工のための材質予測法, 塑性と加工 41, 535/540 (2000)
- [63] 柳本潤: FEM 解析を核とした材質予測技術, ふえらむ 5-8, 561/565 (2000)
- [64] 大内千秋: 厚板圧延での加工熱処理技術の進歩と材質予測モデリング, 塑性と加工, 40, 1135/1140 (1999)
- [65] 矢田浩: 21 世紀の鉄と材質予測・制御, 塑性と加工, 40, 1130/1134 (1999)
- [66] 西田俊一, 松岡俊夫, 和田典巳: JFE スチール厚板 3 工場の技術と商品, JFE 技報, 5 1/7 (2004)

- [67] 鉄鋼プロセス工学入門, 第3章 加工・熱処理及び表面処理, JFE 21世紀財団 (2003)
- [68] 川崎製鉄株式会社: 圧延荷重算出方法, 特開 2001-198610, 7月24日 (2001)
- [69] 株式会社神戸製鋼所: 圧延荷重予測方法, 特開平 8-90021, 4月9日 (1996)
- [70] 森本敬治, 竹士伊知郎, 柳本潤: 熱間強圧下連続圧延による細粒薄鋼板・厚板の製造を目的とした圧延負荷・内部組織の解析, 中山製鋼技報, **40**, 21/25 (2005)
- [71] 美坂佳助, 吉本友吉: 落下ハンマ法による普通炭素鋼の熱間平均変形抵抗, 塑性と加工, **8-79**, 414/422 (1967)
- [72] 志田茂: 炭素鋼の変形抵抗に及ぼす炭素含有量・温度・ひずみ速度の影響, 塑性と加工, **9-85**, 127/132 (1968)
- [73] 竹内徹, 大森和郎, 小川隆生, 井上正敏, 岡村勇: 水島厚板圧延における新ゲージメータ式の開発, 鉄と鋼, **71-12**, S1171 (1985)
- [74] 小俣一夫, 那波泰行, 田中明広, 塚本英夫: 厚板圧延におけるゲージメータモデルの精度向上, 鉄と鋼, **67-4**, S341 (1981)
- [75] 鈴木弘: 精密圧延機の構造および特性, 生産研究, **11-11**, 509/514 (1959)
- [76] 友近信行, 西野都, 村上晃, 西田吉晴, 中山万希志: 鉄鋼プロセス制御におけるシミュレーション技術, 神戸製鋼所技報, **51-3**, 23/27 (2001)
- [77] JFE スチール株式会社: 板厚制御方法および装置, 特開 2007-152372, 6月21日 (2007)
- [78] 日本鋼管株式会社: 厚板の板厚制御方法, 特開平 5-50129, 3月2日 (1993)
- [79] 福島賢也, 辻勇一: 熱間圧延における高精度絶対値 A G C の開発, 鉄と鋼, **72-4**, S331 (1986)
- [80] 平明典, 潮海弘資, 藤本隆史, 上村正樹, 上原淳則: 水島ホット仕上ミルへの絶対値 A G C の適用, 材料とプロセス, **4-5**, 1557 (1991)
- [81] 日本鋼管株式会社: 厚鋼板の圧延方法, 特開平 6-63627, 3月8日 (1994)
- [82] 上田一郎, 鈴木和裕, 和田凡平, 古川裕之: 厚板仕上ミル直近線厚み計による A G C, 電気学会金属産業研究会資料, **MID-95-1-6**, 7/16 (1995)
- [83] 川崎製鉄株式会社: 熱間圧延機の板厚制御方法, 特開平 7-39914, 2月10日 (1995)
- [84] 野田直剛, 中村保: 基礎塑性力学, 第1章 塑性変形の物理的概念, 実用理工学入門講座, 日新出版 (1991)
- [85] 茂森弘靖, 平田直人, 南部康司: Just-In-Time モデリングを用いた厚板の幅制御, JFE 技報, **15**, 1/6 (2007)
- [86] (社) 日本鉄鋼協会編: 板圧延の理論と実際, (社) 日本鉄鋼協会, 283/294 (1984)
- [87] 柳本潤, 木内学: ラグランジェ乗数法剛塑性有限要素法に基づく圧延加工の三次元塑性変形解析法: 数値圧延機の開発?, 生産研究, **43-3**, 172/175 (1991)
- [88] 茂森弘靖: 鋼材の形状制御～平坦かつ矩形に延ばす制御技術～, 計測と制御, **51-12**, 1181/1187 (2012)
- [89] 菊間敏夫: 形を作り込む(上), NIPPON STEEL MONTHLY, **131**, 11/14 (2003)
- [90] 佐藤全佳, 口誠寛: 熱間板圧延における形状制御技術の開発 - 板クラウン・平坦度制御システム PFSU の開発 -, IHI 技報, **48-2**, 101/106 (2008)
- [91] 田宮稔士, 御厨尚, 金田欣亮, 佐藤孝, 渡辺秀規, 仲田卓史: 厚板ミルクラウンメータ, 鉄と鋼, **68-12**, S1064 (1982)

- [92] 細川晴行, 高橋俊充, 上杉憲一, 田中雅人: 板形状検出装置 (FI) / 自動形状制御装置 (AFC), 神戸製鋼技報, **59-3**, 61/65 (2009)
- [93] 江端貞夫, 井上利夫, 齊川夏樹: 水流電気抵抗式平坦度検出装置, 川崎製鉄技報, **10-4**, 370/379 (1978)
- [94] 柳沢忠昭, 三芳純, 坪田一哉, 菊川裕幸, 池谷尚弘, 磯山茂, 旭一郎, 馬場和史: 厚板圧延における新平面形状制御方法 (MAS 圧延法), 川崎製鉄技報, **11-2**, 168/181 (1979)
- [95] 饗場満雄, 千貫昌一, 渡辺秀規, 塚原戴司, 高橋祥之, 奥村健人, 金田欣亮: 厚板圧延における新平面形状制御法の開発—差厚幅出し圧延法—, 川崎製鉄技報, **13-2**, 218/227 (1981)
- [96] 吉田寛爾, 安居栄蔵, 益居健, 山田純造: 可変クラウンロールを装備した圧延機の形状制御特性, 鐵と鋼, **67-4**, S356 (1981)
- [97] 長井俊彦, 武田英, 田村詔八郎, 益居健, 滝川敏二: 可変クラウンロールを装備したホットストリップミルでの形状制御, 鐵と鋼, **67-12**, S954 (1981)
- [98] 益居健: 可変クラウンロールによる板の形状・プロフィール制御, 塑性と加工, **23-263**, 1188/1194 (1982)
- [99] 山本治, 伊藤高幸, 西田俊一, 吉井誠, 西崎宏, 大森和郎, 吉里勉: ワークロールベンダーを活用した厚板工場操業改善, 鐵と鋼, **80-2**, T33/T36 (1994)
- [100] 北浜正法: テーパー付ワークロールシフトミルによる熱延鋼板のクラウン制御, 塑性と加工, **23-263**, 1165/1171 (1982)
- [101] 古米孝行, 八子一了, 石原慶明, 柳田正宏, 有泉 孝御: ワークロールシフトミルを利用した厚板圧延技術, 鐵と鋼, **79-3**, T33/T36 (1993)
- [102] 佐藤全佳, 口誠寛, 本城恒, 阿部勇次: 熱間帯鋼仕上圧延設備における鋼板形状制御技術, IHI 技報, **44-5**, 352/357 (2004)
- [103] 本城恒, 佐藤全佳, 口誠寛: 板圧延における IHI 形状制御装置, IHI 技報, **48-2**, 93/100 (2008)
- [104] 安田健一, 志田茂: HC ミルの形状制御特性, 塑性と加工, **22-244**, 460/466 (1981)
- [105] 梶原利幸: 生みの苦しみ—塑性加工技術開発苦心談-7-HC ミル物語, 塑性と加工, **32-370**, 1370/1375 (1991)
- [106] 中島浩衛: ペアクロス圧延機 (PC ミル) の基本特性, 三菱重工技報, **21-6**, 809/815 (1984)
- [107] 葉山安信: ペアクロス圧延機 (PC ミル) 形状制御システムの開発, 三菱重工技報, **21-6**, 816/822 (1984)
- [108] 吉田桂一郎: クロス圧延機の開発, 鐵と鋼, **72-10**, 1637/1640 (1986)
- [109] 磯山茂, 吉井誠, 岡村勇, 大森和郎, 越智潔, 吉里勉: 厚板圧延における平坦度制御技術の開発, 鐵と鋼, **79-3**, 326/331 (1993)
- [110] 北浜正法, 鏝田征雄, 佐々木徹, 成田健次郎, 鴨志田隆, 栗津原博: サーマルクラウンに及ぼすロールシフトの影響の解析 K W R S 圧延によるプロフィール制御 I V, 塑性加工連合講演会講演論文集, **35**, 243/246 (1984)
- [111] 鏝田征雄, 北村邦雄, 吉川吉右衛門, 玉井敏行, 足立明夫, 福島巖, 君島英彦: ホットストリップミルにおける板プロフィールの制御について, 鉄と鋼, **63-9**, A107/A110 (1977)
- [112] 辻邦夫, 平野担, 小久保一郎, 大池美雄, 木川佳明: 板の形状に及ぼす圧延条件の影響, 神戸製鋼技報, **30-1**, 20/24 (1980)

- [113] 吉井誠, 吉里勉, 岡村勇: 厚板圧延における平坦度制御技術, 川崎製鉄技報, **28-2**, 76/81 (1996)
- [114] 中島浩衛, 松本紘美, 木村智明, 梶原利幸, 菊間敏夫, 粟津原博, 志田茂: 6重圧延機による板クラウン制御に関する研究, 塑性と加工, **23-263**, 1172/1180 (1982)
- [115] 升田貞和, 平沢猛志, 市之瀬弘之, 平部謙二, 小川幸文, 鎌田正誠: 厚板圧延における高精度圧延技術, 鉄と鋼, **67-14**, 2433/2442 (1981)
- [116] 升田貞和, 平沢猛志, 市之瀬弘之, 平部謙二, 山脇満: 厚板平面形状制御法(ドッグボーン圧延法の開発) - 第1報 変形の基本特性について -, 鉄と鋼, **68-5**, S363 (1982)
- [117] 升田貞和, 平沢猛志, 市之瀬弘之, 平部謙二, 山脇満: 厚板平面形状制御法(ドッグボーン圧延法の開発) - 第2報 ドッグボーン材の変形 -, 鉄と鋼, **68-12**, S1062 (1982)
- [118] 山脇満, 芳賀行雄, 平部謙二, 村上史敏, 松尾敏憲, 升田貞和: 厚板平面形状制御法(ドッグボーン圧延法の開発) - 第3報 ドッグボーン圧延の実機化 -, 鉄と鋼, **69-5**, S472 (1983)
- [119] 村上史敏, 大西英明, 竹腰篤尚, 山根孝夫, 山脇満, 升田貞和: 厚板平面形状制御法(ドッグボーン圧延法の開発) - 第4報 ドッグボーン圧延制御システム -, 鉄と鋼, **69-5**, S473 (1983)
- [120] 平田健二, 堀江正之, 高嶋由紀雄, 宇田川辰郎: 厚板 DBR における平面形状予測モデルの検討, 塑性加工春季講演会講演論文集, 227/228 (2002)
- [121] 堀江正之, 平田健二, 高嶋由紀雄, 宇田川辰郎: 厚板 DBR における平面形状予測モデルの検討, 材料とプロセス, **16-2**, 431 (2003)
- [122] 佐和隆光: 回帰分析, 朝倉書店, (1979)
- [123] M. Kano, K. Miyazaki, S. Hasebe, and I. Hashimoto: Inferential Control System of Distillation Compositions Using Dynamic Partial Least Squares Regression, Journal of Process Control, **10-2-3**, 157/166 (2000)
- [124] M. Kano and Y. Nakagawa: Data-Based Process Monitoring, Process Control, and Quality Improvement: Recent Developments and Applications in Steel Industry, Computers & Chemical Engineering, **32-1-2**, 12/24 (2008)
- [125] H. Kamohara, A. Takinami, M. Takeda, M. Kano, S. Hasebe, I. Hashimoto: Product quality estimation and operating condition monitoring for industrial ethylene fractionator, Journal of Chemical Engineering of Japan, **37-3**, 422/428 (2004)
- [126] 渡邊之: 鉄鋼新素材, TMCP 鋼の適用分野, 溶接学会誌, **55-1**, 49/55 (1986)
- [127] 大久保英敏, 西尾茂文: 鉄鋼 TMCP における冷却制御, 生産研究, **42-6**, 341/346 (1990)
- [128] 小溝祐一: TMCP 鋼とは何か, また, その特性は溶接によってどう変わるか?, 溶接学会誌, **59-7**, 498/501 (1990)
- [129] 横井玉雄, 角裕之, 久保多貞夫, 川畑友明, 山本康博: 厚板ミル新制御システムの開発 ~ 厚板ミルセットアップ制御システム ~, 鉄と鋼, **70-13**, S1141 (1984)
- [130] 笹治峻, 久津輪浩一, 堀部晃, 野原由勝, 山田稔久, 渡辺和夫: エッジ法による厚板の高歩留り圧延法の開発, 鉄と鋼, **67-15**, 2395/2404 (1981)
- [131] 西崎允, 小久保一郎, 早川初男, 川谷洋司, 福田正彦, 吉間豊: エッジ圧延による厚板の歩留り向上, 鉄と鋼, **67-15**, 2405/2411 (1981)

-
- [132] 岡村勇, 手塚栄, 片山二郎, 井上正敏, 折田朝之, 岡田和彦: 厚板エッジ制御システム: TFP (Trimming Free Plate) 製造技術の開発 (第 2 報), 鉄と鋼, **72**-12, S1117 (1986)
- [133] 穴吹善範, 後藤義人: 熱間圧延環境に耐えるオンライン寸法・形状測定技術, 川崎製鉄技報, **31**-4, 201/204 (1999)

目次

1.1	鉄鋼製品の製造プロセスの概要	2
1.2	厚鋼板の製造プロセス（文献 [1] から引用）	3
1.3	製鉄所の計算機システム	4
1.4	Just-In-Time モデリング	6
1.5	Just-In-Time モデリングの従来研究	7
2.1	品質管理業務フロー	20
2.2	厚鋼板の製造条件および材質のばらつき	26
2.3	冶金現象を模倣した材質予測モデルの一例	27
2.4	厚鋼板の寸法の作りこみ（文献 [1] から引用）	28
2.5	2次元圧延理論における圧延プロセスを特徴づけるパラメータ	29
2.6	弾性特性曲線および塑性特性曲線	30
2.7	幅出し圧延（文献 [1] から引用）	31
2.8	4 段式熱間圧延機のロールベンディング（文献 [88] から引用）	34
2.9	板クラウン（文献 [88] から引用）	35
2.10	板幅方向の不均一な伸び（文献 [88] から引用）	35
2.11	急峻度 $\lambda = \delta/L$ （文献 [88] から引用）	36
2.12	仕上げ圧延終了時の平面形状と先端部のクロップ（文献 [88] から引用）	36
2.13	MAS 圧延法（文献 [88] から引用）	40
3.1	熱延プロセスの概要	46
3.2	電縫鋼管	47
3.3	入出力変数と製造プロセスの関係	48
3.4	品質設計システムの概要	50
3.5	フルクロスバリデーションの結果 (1): 調整パラメータ p と引張強度予測誤差 (RMSE) の関係	54
3.6	フルクロスバリデーションの結果 (2): 調整パラメータ p と引張強度に対するコイル巻取温度の偏回帰係数 $a_{18,1}$ の関係	54
3.7	データマイニングツールの画面例	57

3.8	意思決定支援画面例	58
3.9	回帰係数の比較	59
3.10	材質特性値の設計精度	60
4.1	品質制御システムの概要	69
4.2	フルクロスバリデーションの結果 (1): 調整パラメータ p と降伏点予測誤差 (RMSE) の関係	72
4.3	フルクロスバリデーションの結果 (2): 調整パラメータ p と降伏点に対する冷却温度の偏回 帰係数の関係	72
4.4	単純線形回帰モデルと局所回帰モデルの比較 : 引張強度の実績値と予測値の散布図	75
4.5	引張強度の制御結果のヒストグラム : 従来システム (a), および , 提案システム (b)	76
4.6	降伏点の制御結果のヒストグラム : 従来システム (a), および , 提案システム (b)	77
5.1	エッジャ設備	83
5.2	エッジャ不使用材のバリデーションの結果 (1): 調整パラメータ p および λ と , 圧延終了後 幅寸法予測誤差 (RMSE) の関係	86
5.3	エッジャ不使用材のバリデーションの結果 (2): 調整パラメータ p および λ と , 圧延終了後 幅寸法に対する幅出し圧延終了直後板厚の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値の関係	87
5.4	エッジャ使用材のバリデーションの結果 (1): 調整パラメータ p および λ と , 圧延終了後幅 寸法予測誤差 (RMSE) の関係	87
5.5	エッジャ不使用材のバリデーションの結果 (2): 調整パラメータ p および λ と , 圧延終了後 幅寸法に対する幅出し圧延終了直後板厚の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値の関係	88
5.6	エッジャ不使用材のバリデーションの結果 (3): 調整パラメータ p および λ と , 圧延終了後 幅寸法に対する仕上圧延エッジャロール隙の偏回帰係数の 99 % 信頼区間の上限値の関係	88
5.7	エッジャ不使用材の幅寸法制御結果のヒストグラム : 従来システム (a), および , 提案シス テム (b)	91
5.8	エッジャ使用材の幅寸法制御結果のヒストグラム : 従来システム (a), および , 提案シス テム (b)	92
6.1	圧延後における先端の平面形状	96
6.2	幅出し圧延後における板厚分布	96
6.3	フルクロスバリデーションの結果	103
6.4	従来法と提案法の比較 : 平面形状の実績値と予測値の散布図	105
6.5	平均クロープ長のヒストグラム	107
6.6	平面形状評価関数のヒストグラム	108

表目次

4.1	制御圧延材の材質制御結果	75
4.2	制御圧延材および加速冷却材の引張強度の制御誤差の平均と標準偏差	76
5.1	幅寸法予測誤差 (RMSE)	90
5.2	エッジャ不使用材の幅寸法制御誤差	91
5.3	エッジャ使用材の幅寸法制御誤差	91
6.1	平面形状予測の根平均二乗誤差 (RMSE)	106
6.2	平面形状評価関数の平均値	106
6.3	平均クランプ長の平均値および標準偏差	107
6.4	平面形状評価関数の平均値および標準偏差	108

本研究論文に関する著者の研究業績

学術論文

1. 茂森弘靖, 長尾亮, 平田直人, 南部康司, 池田展也, 水島成人, 加納学, 長谷部伸治, 局所回帰モデルを用いた鋼材の品質制御, 計測自動制御学会論文集, **44**-4, 325/332 (2008). (第4章および第5章に対応)
2. 茂森弘靖, 南部康司, 長尾亮, 荒木義, 水島成人, 加納学, 長谷部伸治, 制約付き局所回帰モデルを用いた鋼材の平面形状制御, 計測自動制御学会論文集, **46**-8, 472/479 (2010). (第6章に対応)
3. H. Shigemori, M. Kano and S. Hasebe, Optimum quality design system for steel products through locally weighted regression model, *Journal of Process Control*, **21**-2, 293/301 (2011). (第3章に対応)

国際会議での発表

1. H. Shigemori, N. Hirata, N. Ikeda, N. Mizushima, Rolling set-up modeling for a steel plate by using just-in-time method, *Proceedings of SICE Annual Conference 2005*, 1114/1117, Okayama, August (2005). (第5章の一部に対応)
2. H. Shigemori, K. Nanbu, R. Nagao, T. Araki, N. Mizushima, Plan view pattern control for steel plates using locally-weighted regression, *Proceedings of 12th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, 125/130, Quebec City, August (2007). (第6章の一部に対応)
3. H. Shigemori, S. Kawamura, Optimum quality design support system for steel products using locally-weighted regression model, *Proceedings of SICE Annual Conference 2007*, 810/815, Takamatsu, September (2007). (第3章の一部に対応)
4. H. Shigemori, Applications of Just-In-Time Modeling to Product Quality Control in Steel Industry, *Advances in Data Mining, Industry Proceedings of 11th Industrial Conference on Data Mining*, 73/77, New York, September (2011). (第4章の一部に対応)

公開特許

1. 特開 2002-236119, 特許第 3943841 号 (2007.4.13 登録)
 発明の名称: 鋼材の材質推定装置
 発明者: 茂森弘靖, 岡村勇 出願人: 川崎製鉄株式会社
 (第3章, 第4章の一部に対応)

2. 特開 2003-268428, 特許第 3738738 号 (2005.11.11 登録)
発明の名称: 鋼材の製品品質制御装置
発明者: 茂森弘靖, 岡村勇 出願人: JFE スチール株式会社
(第4章, 第5章の一部に対応)
3. 特開 2003-328030, 特許第 4365600 号 (2009.8.28 登録)
発明の名称: 鋼材の製品品質設計装置及び鋼材製品の製造方法
発明者: 茂森弘靖, 岡村勇 出願人: JFE スチール株式会社
(第3章の一部に対応)
4. 特開 2004-355189, 特許第 4474847 号 (2010.3.19 登録)
発明の名称: 結果予測装置
発明者: 茂森弘靖 出願人: JFE スチール株式会社
(第3章, 第4章, 第5章, 第6章の一部に対応)
5. 特開 2006-309709
発明の名称: 結果予測装置, 制御装置及び品質設計装置
発明者: 茂森弘靖 出願人: JFE スチール株式会社
(第3章, 第4章, 第5章, 第6章の一部に対応)
6. 特開 2007-257621, 特許第 4623020 号 (2010.11.12 登録)
発明の名称: 最適品質設計支援装置
発明者: 茂森弘靖, 岡村勇 出願人: JFE スチール株式会社
(第3章の一部に対応)
7. 特開 2007-264934
発明の名称: 鋼材の品質設計支援方法
発明者: 茂森弘靖 出願人: JFE スチール株式会社
(第3章の一部に対応)
8. 特開 2008-112288
発明の名称: 予測式作成装置、結果予測装置、品質設計装置、予測式作成方法及び製品の製造方法
発明者: 茂森弘靖 出願人: JFE スチール株式会社
(第3章, 第4章, 第5章, 第6章の一部に対応)
9. 特開 2009-230412
結果予測装置, 及び, これを用いた製品品質予測方法
発明者: 茂森弘靖 出願人: JFE スチール株式会社
(第5章の一部に対応)

解説

1. 茂森弘靖, 鋼材の形状制御 ~ 平坦かつ矩形に延ばす制御技術 ~, 計測と制御, 51-12, 1181/1187 (2012).
(第2章第6節に対応)