

冷間薄板圧延プロセスにおける 計算機制御技術の高度化に関する研究

大 井 俊 哉

目 次

第 1 章 緒論	1
1. 1 本研究の背景と目的	1
1. 2 冷間薄板圧延機の概要	2
1. 3 冷間薄板圧延機の計算機制御装置の概要	6
1. 4 本研究の概要	7
付録.1A 記号の定義	8
参考文献	17
第 2 章 タンデムミルの板厚・張力制御	19
2. 1 緒言	19
2. 2 板厚制御特性の定式化	21
2. 2. 1 冷間圧延機板厚・張力制御の基本関係式	21
2. 2. 2 状態方程式と伝達関数行列表現	28
2. 3 静特性（影響係数）の解析	35
2. 4 動特性（周波数特性）の解析	38
2. 4. 1 動特性解析のための構造化	38
2. 4. 2 プロセスの分割とその特徴	40
2. 5 板厚・張力の非干渉化制御	51
2. 5. 1 前置補償装置による非干渉化	51
2. 5. 2 ミル内プロセスの非干渉補償とフィードバック制御	56
2. 5. 3 外乱に対するフィードフォワード制御	66
2. 6 最終スタンドの非干渉化制御	72
2. 6. 1 最終スタンドの課題と定式化	72
2. 6. 2 モード別の非干渉化制御則	80
2. 7 ミル内プロセス制御則の実機タンデムミルへの適用例	94
2. 7. 1 中間スタンド AGC への適用	96
2. 7. 2 最終スタンド AGC への適用	100
2. 8 結言	104
付録.2A 数値例の前提条件	106
付録.2B 圧延理論式 一圧延トルク、圧延荷重、先進率の関数表現	107
付録.2C 冷間圧延プロセスの数値的特徴	109
付録.2D 式変形の証明	115
参考文献	125

第3章 シングルスタンドミル／

タンデムミル第1スタンドの板厚・張力制御	127
3. 1 緒言	127
3. 2 リール張力の推定と制御	129
3. 2. 1 ミル入側プロセスの定式化	129
3. 2. 2 オブザーバを用いた張力推定	132
3. 2. 3 張力フィードバックによる応答改善	136
3. 3 板厚・張力の非干渉制御	138
3. 3. 1 従来方式の課題と静的な非干渉補償	138
3. 3. 2 動的な非干渉補償	141
3. 3. 3 実機への適用例	145
3. 4 ILQ 制御の適用	147
3. 4. 1 ILQ 制御則の導出	147
3. 4. 2 ILQ 制御則の解析	151
3. 4. 3 ILQ 制御則によるミル入側プロセス動特性改善	157
3. 5 結言	163
付録3A 式変形の証明	164
参考文献	166

第4章 セットアップモデルと学習

4. 1 緒言	167
4. 2 冷間圧延機のセットアップモデル	169
4. 2. 1 操作量のプリセット	169
4. 2. 2 プリセット以外のセットアップモデルの役割	170
4. 2. 3 ドラフトスケジュールと圧延速度	173
4. 3 セットアップモデル学習の高度化	176
4. 3. 1 従来の圧延荷重予測モデル学習とその課題	176
4. 3. 2 変形抵抗モデルと摩擦係数モデルの分離学習法	178
4. 3. 3 新しい学習方式の適用例	185
4. 4 結言	190
付録4A 式変形の証明	191
参考文献	193

第5章 結論

謝辞

本論文に関係した発表論文

第1章

緒論

1. 1 本研究の背景と目的

本論文は鋼板の冷間圧延機の計算機制御、特に板厚制御のためのモデリングと制御系設計に関するものである。本論にはいる前に、本研究の背景と目的について簡単に述べる。

わが国ではめざましい経済発展に伴って鋼板が大量に使用されてきた。中でも、冷延鋼板はその用途が自動車、鉄道車両、家電製品、鋼製家具などの日常生活に密接に結びついたものであり、それだけに表面の美しさ、加工性のよさ、寸法精度などの品質と、大量使用における価格、すなわち生産性に対する要求がますます厳しいものになっている。また、近年は海外ミルの追い上げもあり、高寸法精度鋼板など付加価値の高い製品を供給していくことがより重要となっている。

冷間圧延機分野では板厚、張力制御装置が早くから実用化されてきたが、冷間圧延プロセス動特性の一般論について、昔から十分な議論が行われてきたというわけではない。これには、圧延理論にもとづく定常特性モデルの確立^{*1)}と精緻化が、冷間圧延機計算機制御の研究の主流であったという歴史的背景や、制御装置やアクチュエータなどのハードウェア能力に限界があった、という事情もある。プロセス個別の課題については、それぞれ数値モデルが組み立てられ、これにもとづく制御系設計が進められてきた。

タンデムミルのプロセス動特性に議論の重点が移り始めたのは、計算機ハードウェアの能力が大幅に進歩し、またアクチュエータ、センサの能力も改善されてきた、ここ10数年程度のことであり^{*2)*3)*4)}、冷間圧延プロセス制御の長い歴史から見れば比較的最近のことといつてよい。冷間圧延におけるプロセス動特性について、制御技術者以外の冷間圧延技術者の間でもようやく重要性が認識され始めたという段階である^{*5)}。

鉄鋼プロセス分野、特に圧延プロセス分野では、実機適用に即した理論構築が進められてきたこともあり、制御理論は数多く生産ラインに適用され効果をあげている^{*6)*7)*8)*9)}。一方、制御系が生産ラインに定着し継続的に効果を発揮していくためには、製造現場の保守技術者や操業を担当する技術者、オペレータが、制御系のもつ意味を理解し使いこなすことを容易にすることが重要である。このためにも、対象プロセスの本質をモデリングという形で的確に把握し、これにもとづいた実装のための適切な改善（単純化など）を制御則に施すことが、企業サイドで制御技術の研究開発に携わる者の大きな役割と考える。

本稿では、以上のような背景のもとに取り組んできた、鋼板の冷間圧延プロセスの板厚・張力制御の高度化に関する研究についてまとめる。冷間圧延プロセスの動特性を一般的に通用する形で記述することによりその普遍的な特徴を明らかにし、その知見にもとづいた適切な制御則を確立することが、本研究の目的である。

1. 2 冷間薄板圧延機の概要

冷間薄板圧延機は、板厚数mm程度、板幅600mm～1800mm程度の母材を、0.1mm～3.0mm程度の製品板厚まで常温で圧延することにより、さらに薄く、板厚精度や表面性状などの品質に優れた鋼板を製造するものである。コイル状に巻かれた母材（鋼帯）を入側で巻戻し、出側で再び巻取りながら、圧延機の圧下力と張力で鋼帯を所定の厚みまで薄くしていく。冷間薄板圧延機には、複数の圧延スタンドを直列に配置して一気に高圧下率の圧延を行うタンデムミルと、単一の圧延スタンドで左右双方向に圧延を繰り返すことにより所定のサイズに仕上げていくレバースミルの2種類がある（図.1.2.1）。

特にタンデムミルでは、高生産性を目的に圧延機の入口で母材コイルを接合し、この接合された鋼板をタンデムミルで連続的に圧延する完全連続圧延が最近の主流である。

図.1.2.2は、日本国内の代表的な完全連続式冷間圧延機の1つである、住友金属工業（株）鹿島製鉄所の第2冷間圧延設備（以下 鹿島第2冷延）の概観図である^{*10}。入側には2つのペイオフリールと溶接機が、出側には2つのテンションリールとフライングシャーが設置され、入側で連続するコイルを接合し、ミル出側でその接合部を切断することにより、ミルでは先端、後端を意識することなくエンドレスに圧延を続けるものである。

表.1.2.1は、国内各社の冷間圧延設備の一覧である^{*11}。1994年のデータであり若干古いですが、最近は新規設備投資が抑制されていることもあり、現在も大きな変化はない。上述の鹿島第2冷延も含め、タンデムミル、レバースミルあわせて40基近くの圧延機が国内で稼働しており、併せて年間2千数百万トンの冷延鋼板を需要家に供給している。

表.1.2.1 国内の冷間薄板圧延機 ーその1

会社	新日本製鐵			
事業所	八幡		広畑	
ミル基名	No. 4	NCM	1TCM	2TCM
種別	連続タンデムミル	連続タンデムミル	タンデムミル	連続タンデムミル、連続焼直結
ミル形式	6スタンド(No.1,2,6:6重 No.3,4,5:4重)	5スタンド(6重)	5スタンド(No.1~4:4重、No.5:6重)	4スタンド(6重)
稼働年月	1962.5	1990.8	1954.1	1982.8
メーカー	MESTA/三菱電機	日立、新日本製鐵/日立	UE/東芝	日立/東芝
公称能力(Ton/月)	86,100	147,000	67,500	91,000
最高速度(m/分)	2,170	1,800	1,560	600
入側/出側板厚(mm)	1.8~3.5/0.1~1.0	1.6~6.0/0.25~3.2	2.0~4.2/0.15~1.7	2.0~5.0/0.4~2.3
板幅(mm)	508~1,300	600~1,880	580~1,290	700~1,650
コイル重量(Ton)	27.3/27.3	40/27.3	24.0/24.0	35/35(センターリール)

会社	新日本製鐵			
事業所	名古屋		君津	
ミル基名	No. 2	No. 3	No. 2	No. 3
種別	連続タンデムミル	連続タンデムミル	酸洗直結タンデムミル	酸洗直結タンデムミル
ミル形式	5スタンド(No.1:NMR、No.2~5:4重)	6スタンド(No.1,6:6重、No.2~4:4重)	5スタンド(4重)	6スタンド(No.1~5:4重、No.6~6重)
稼働年月	1967.11	1971.1	1968.5	1971.3
メーカー	三菱重工、新日本製鐵、日立/東芝	IHI/三菱電機	日立/日立	日立/三菱電機
公称能力(Ton/月)	178,000	84,800	154,000	132,600
最高速度(m/分)	1,500	2,300	1,800	2,320
入側/出側板厚(mm)	1.8~6.0/0.3~3.2	1.8~3.2/0.15~1.0	2.0~6.5/0.25~3.4	1.5~5.5/0.15~2.0
板幅(mm)	700~1,620	508~1,070	508~2,080	500~1,320
コイル重量(Ton)	42/42	25/25	60/60	45/45

会社	NKK		川崎製鉄	
事業所	福山		千葉	
ミル基名	No. 2	No. 3	TCM	2TCM
種別	連続タンデムミル	酸洗直結タンデムミル	タンデムミル	連続タンデムミル
ミル形式	5スタンド(4重)	4スタンド(No.1~3:4重、No.4:6重)	5スタンド(No.1~4:4重、No.5:6重)	6スタンド(4重)
稼働年月	1971.6	1987.7	1961.4	1958.5
メーカー	IHI/三菱電機	日立/三菱電機	UE/東芝(改造IHI/東芝)	UE/三菱電機
公称能力(Ton/月)	105,000	150,000	100,000	50,000
最高速度(m/分)	1,870	1,320	2,100	1,687
入側/出側板厚(mm)	1.6~4.5/0.15~1.6	2.0~5.3/0.35~2.3	1.6~4.0/0.15~1.6	2.0~6.0/0.23~3.2
板幅(mm)	610~1,270	600~1,650	600~1,305	508~1,290
コイル重量(Ton)	34/34	29.5/45	45/45	21/21

会社	川崎製鉄		住友金属	
事業所	千葉	水島	鹿島	和歌山
ミル基名	3TCM	No. 1	No. 1	No. 1
種別	連続タンデムミル	酸洗直結タンデムミル	連続タンデムミル	連続タンデムミル
ミル形式	5スタンド(No.1~4:4重、No.5:6重)	5スタンド(No.1~4:4重、No.5:6重)	5スタンド(4重)	5スタンド(No.1~4:4重、No.5:6重)
稼働年月	1972.9	1969.10	1971.11	1993.4
メーカー	三菱重工、川崎重工/日立	日立/日立	三菱重工/東芝	三菱重工・川崎重工/東芝
公称能力(Ton/月)	134,000	154,000	183,500	100,000
最高速度(m/分)	1650	1,930	1,812	1,300
入側/出側板厚(mm)	1.8~6.0/0.3~3.2	1.6~6.0/0.15~3.2	1.6~6.0/0.25~3.2	2.0~6.0/0.35~2.4
板幅(mm)	600~1,850	600~1,600	600~1,625	600~1,880
コイル重量(Ton)	42/42	45/50(圧延単独では入50)	45/45	33.0/46.5

出典: 日本鉄鋼協会「わが国におけるコールドストリップミル設備仕様と工場レイアウト」1994

表.1.2.1 国内の冷間薄板圧延機 ーその2

会社	神戸製鋼	日新製鋼		東洋鋼板	
事業所	加古川	堺		下松	
ミル基名	タンデムミル	4TM	5TM	No. 1TM	No. 2TM
種別	タンデムミル	酸洗直結タンデムミル	タンデムミル	タンデムミル	タンデムミル
ミル形式	5スタンド(No.1~4:4重、No.5:6重)	4スタンド(6重)	5スタンド(No.1~4:4重、No.5:6重)	5スタンド(4重)	5スタンド(No.1,2:6重、No.3~5:4重)
稼働年月	1972.4	1984.12(改造1989.10)	1963.5(改造1968.8)	1959.4	1976.3
メーカー	~No.4 IHI / 東芝 No.5 IHI・日立 / 東芝	日立 / 日立	IHI (改造 日立) / 東芝	MESTA / 東芝	IHI / 東芝
公称能力(Ton/月)	128,000	123,000	98,000	60,000	68,000
最高速度(m/分)	1,800	1,650	1,250	1,440	2,130
入側 / 出側板厚(mm)	1.8~6.0 / 0.15~3.2	0.2~5.0 / 0.1~2.6	2.0~4.5 / 0.2~2.3	1.8~4.0 / 0.15~2.3	1.6~4.5 / 0.15~2.3
板幅(mm)	600~1,600	600~1,610	600~1,310	476~1,219	508~1,270
コイル重量(Ton)	50 / 50	25 / 25	23 / 23	18 / 18	36 / 36

会社	東洋鋼板	川崎製鐵	住友金属	神戸製鋼
事業所	下松	千葉	和歌山	加古川
ミル基名	DRM	80" レバースミル	No. 2レバースミル	RCM
種別	タンデムミル	レバースミル	レバースミル	レバースミル
ミル形式	2スタンド(6重or4重+4重)	4重	6重CVC / 6重MKW	6重
稼働年月	1984.1(改造)	1965.11	1988.2	1985.10
メーカー	IHI / 東芝	日立 / 日立	川崎重工・SMS / 東芝	三菱重工 / 三菱電機
公称能力(Ton/月)	8,000	12,000	17,000	14,000
最高速度(m/分)	670	580	900	1,400
入側 / 出側板厚(mm)	1.1~0.6 / 0.03~0.3	2.0~6.0 / 0.4~3.2	0.4~4.5 / 0.15~3.2	1.2~6.0 / 0.4~3.2
板幅(mm)	457~1,067	800~1,880	610~1,320	610~1,880
コイル重量(Ton)	15 / 15	42 / 42	33.0 / 33.0	33.0 / 33.0

会社	日新製鋼	イゲタ鋼板	大同鋼板	大洋製鋼
事業所	大阪	堺	尼崎	船橋
ミル基名	No. 1	レバースミル	新ミル	No. 2
種別	レバースミル	レバースミル	レバースミル	レバースミル
ミル形式	4重	4重可逆式圧延機	6重	4重
稼働年月	1954.8	1966.4	1993.4	1956.9
メーカー	日立 / 日立	IHI / 東芝	日立 / 日立	UE / 東芝
公称能力(Ton/月)	13,000	16,000	37,000	20,000
最高速度(m/分)	800	1,400	1,400	1,000
入側 / 出側板厚(mm)	1.6~3.2 / 0.08~1.6	0.3~2.8 / 0.03~1.6	1.8~4.0 / 0.23~2.0	1.8~3.8 / 0.19~1.6
板幅(mm)	450~1,030	610~1,100	610~1,250	635~1,265
コイル重量(Ton)	15 / 15	17 / 17	20 / 20	14 / 14

会社	淀川製鋼		
事業所	市川	呉	
ミル基名	No. 3RM	No. 1	No. 2
種別	レバースミル	レバースミル	レバースミル
ミル形式	4重	4重	4重
稼働年月	1952.5	1954.5	1960.4(改造 1993.4)
メーカー	日立 / 日立	BLISS / 東芝	BLISS・日立 / 日立
公称能力(Ton/月)	30,000	12,000	30,000
最高速度(m/分)	1,220	1,000	1,380
入側 / 出側板厚(mm)	1.6~4.5 / 0.11~2.3	1.8~3.2 / 0.11~2.0	1.8~4.5 / 0.14~3.2
板幅(mm)	610~1,290	600~1,270	600~1,270
コイル重量(Ton)	25 / 25	19.6 / 19.6	19.6 / 19.6

出典: 日本鉄鋼協会「わが国におけるコールドストリップミル設備仕様と工場レイアウト」1994

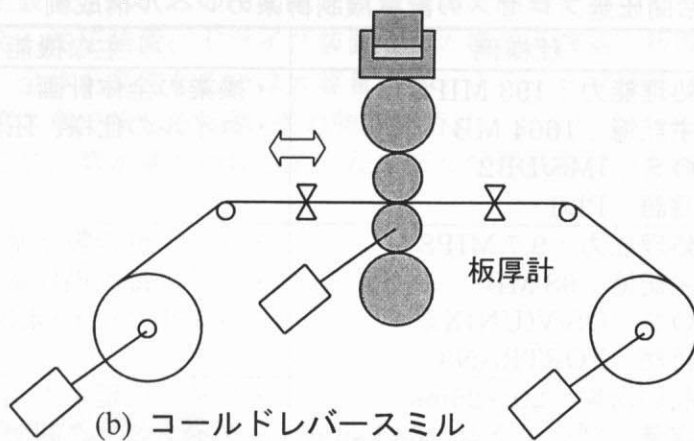
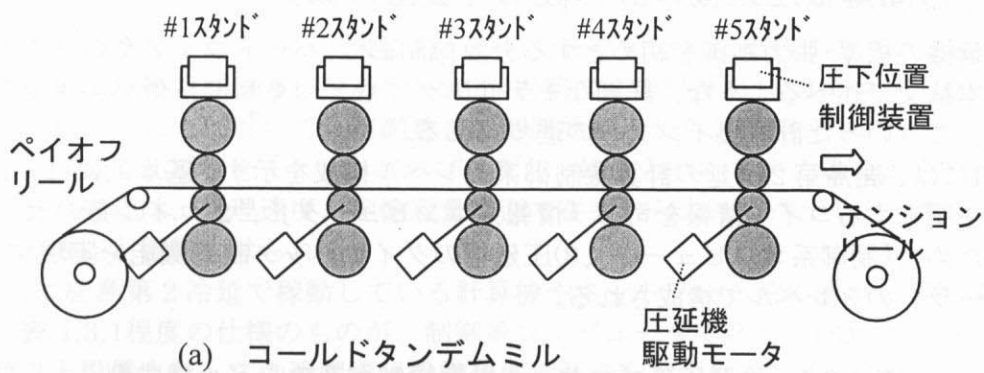


図.1.2.1 冷間薄板圧延機

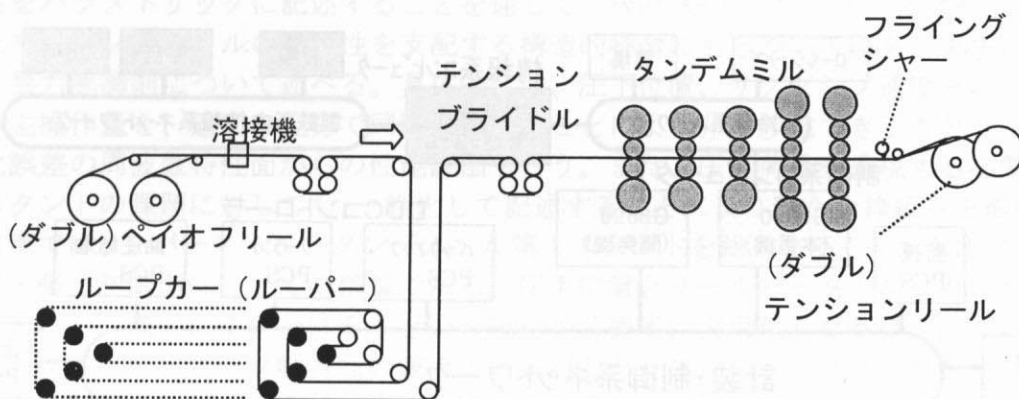


図.1.2.2 完全連続式コールドタンデムミル

1. 3 冷間薄板圧延機の計算機制御装置の概要

冷間圧延機の板厚・張力制御を初めとする計算機制御は、ハードウェアやOSの上で実現される。本論文で述べるような、詳細なモデリングにもとづく制御技術が実現できた要因の一つに、こういった計算機インフラの進歩がある。

表.1.3.1には、鹿島第2冷延の計算機制御系のレベル構成を示す。基本的には、1)操業の全体計画や圧延するコイル情報を司る「情報系コンピュータ」、2)コイル毎のセットアップ機能のための「制御系コンピュータ」、3)圧延中のダイナミック制御機能を実現する「DDCコントローラ」の3レベルで構成される。

表.1.3.1 冷間圧延プロセスの計算機制御系のレベル構成例

レベル	仕様例	主な機能
情報系コンピュータ	<ul style="list-style-type: none">・処理能力：193 MIPS・主記憶：1664 MB・OS：IMS/DB2・言語：PL/I	<ul style="list-style-type: none">・操業の全体計画・コイルの仕様、圧延順の決定
制御系コンピュータ	<ul style="list-style-type: none">・処理能力：9.7 MIPS・主記憶：98 MB・OS：OS/V(UNIX系)・言語：FORTRAN/C	<ul style="list-style-type: none">・コイル毎の製造基準条件設定・コイル毎の操作量の初期設定（プリセット・走間設定変更）
DDCコントローラ	<ul style="list-style-type: none">・制御周期：20～25ms・容量：プログラム 64 kstep データ 192kword・命令セット：ラダー・ダイヤグラム	<ul style="list-style-type: none">・コイル圧延中のダイナミック制御・設備・機器のシーケンス制御

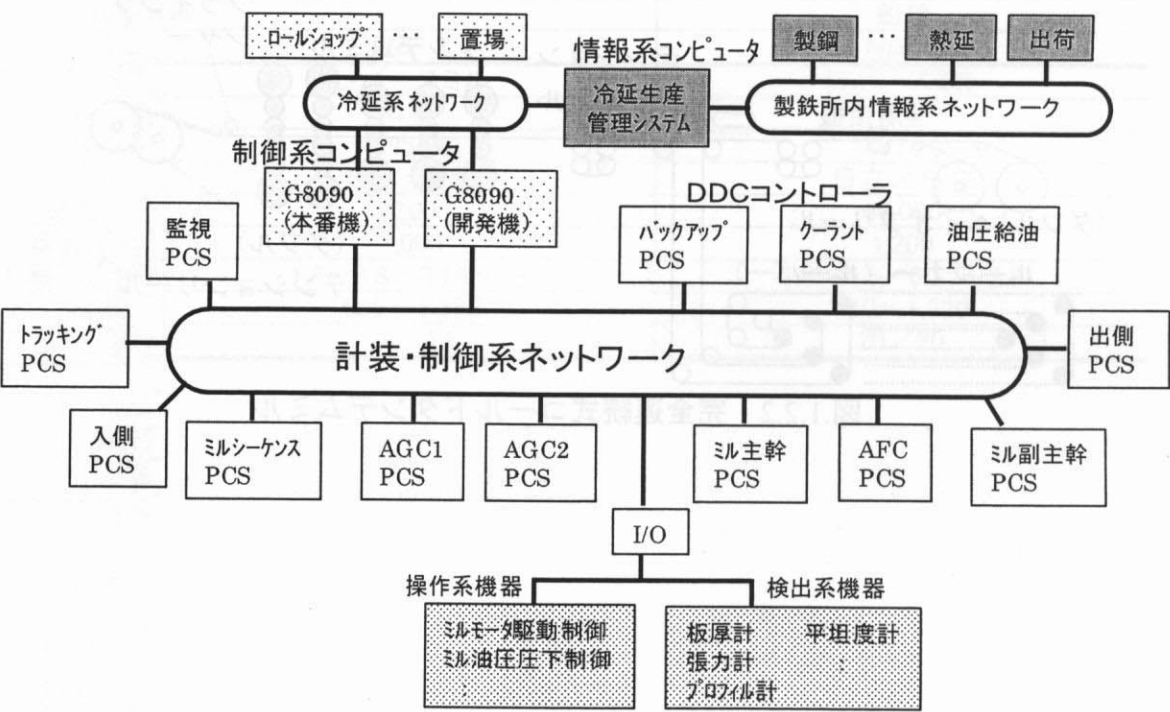


図.1.3.1 冷間圧延設備の計算機制御システムネットワーク系構成例

多くの製造プロセスと同じく鋼板の冷間圧延においても、その制御機能は「プリセット」機能と「ダイナミック制御」機能の2つに分類される。「ダイナミック制御」は、板厚、張力などの制御量を圧延中の検出量にもとづいて目標値通りに維持するため、操作量を連続的に修正する狭義の「制御」であり、20ms周期の高速処理が「DDCコントローラ」の上で実現される。これに対して、制御量を制御開始時点から目標値通りにするために、コイル毎の操作量の初期値を「セットアップモデル」にもとづいて決めるのが「プリセット」である。この機能は、処理速度、記憶容量の面で従来から大きく進歩した「制御系コンピュータ」の機能と位置づけられる。

図.1.3.1は鹿島第2冷延で稼動している計算機やネットワーク系の簡単な装置構成例であるが、表.1.3.1程度の仕様のものが、制御系コンピュータで2台、DDCコントローラでは10台以上設置され、この冷間圧延設備全体の制御を実現している。この3レベルの計算機群に加え、油圧装置、ドライブ装置などの操作系機器、板厚計、圧力計などの検出系機器も含め、全体が高速あるいは大容量のネットワークで接続されている。

第2章、第3章で論じる板厚・張力制御技術は、主として「DDCコントローラ」上で実現されているが、第4章で触れるようなモデル学習技術は「制御系コンピュータ」との関わりが深い。

1. 4 本研究の概要

第1章では緒論として、本研究の背景、目的について述べた。

第2章では、タンデムミルからレバースミルまで含めた冷間圧延の板厚・張力プロセスの動特性をパラメトリックに記述することを通して、板厚・張力プロセスの特徴を解析する。その上で、タンデムミルの動特性を支配する構造的特徴にもとづいて開発、実用化した、板厚・張力制御則について述べる。具体的には、圧下位置、サクセシブ速度といったいくつかの主操作量を、適切な配分で同時操作することにより非干渉化できることを示し、非干渉化誤差の周波数特性面からの性能評価も行う。また、圧延荷重を重視する必要がある最終スタンドの課題に対しても、一般化して記述することにより新たな枠組みを提案する。

第3章では、レバースミルとタンデムミル第1スタンドを総称する“ミル入側プロセス”の板厚・張力制御則についての議論である。圧下位置とリールモータトルクという2つの操作量をいかに適切に使い分けるかという視点から提案、実用化した制御則について述べる。一つはアクチュエータ動特性の観点から検討しクロスコントローラで簡易設計を実現した非干渉制御、もう一つはプロセス動特性の改善を狙ったILQ (Inverse Linear Quadratic) 制御で、それぞれ実機導入され狙い通りの効果を発揮している。

第4章では、近年、役割の変化しているセットアップモデルと、そのために必要となってきたセットアップモデル学習の高度化について述べる。第2章、第3章で述べるような詳細なモデリングにもとづくAGC (Automatic Gage Control) がその能力を発揮するためには、計算機に内蔵されるセットアップモデルやその学習技術の高度化が不可欠である。モデル学習高度化のポイントは、従来の学習手法では困難であった、摩擦係数や変形抵抗といった影響因子となるパラメータを直接学習することであり、これを関数学習手法の導入などにより実現した。

第5章では結論として、各章で得られた結論を総括する。

【付録.1A 記号の定義】

本論文中、第2，3章を中心に共通して用いる主要な記号の定義を纏める。<付録.1A.1 変数><付録.1A.2 定数>は、この付録の記述を定義とする。<付録.1A.3 影響係数>以降の各記号、表記の定義は、本文中に随時記載しており、本付録は一覧表として整理したものである。

<付録.1A.1 変数>

n	スタンド数	
V_0	入側リール (or ミル入側ブライドルロール。以下同じ) 速度	[m/s]
V_i	第 <i>i</i> スタンドロール速度	($1 \leq i \leq n$) [m/s]
V_n	出側リール速度	[m/s]
$V_{r,i}$	第 <i>i</i> スタンドロール速度指令	($1 \leq i \leq n$) [m/s]
T_0	入側リール~#1スタンド間張力	[N]
T_i	# <i>i</i> ~# <i>i</i> +1スタンド間張力	($1 \leq i \leq n-1$) [N]
T_n	# <i>n</i> スタンド~出側リール間張力	[N]
σ_0	入側リール~#1スタンド間張力応力	[MPa]
σ_i	# <i>i</i> ~# <i>i</i> +1スタンド間張力応力	($1 \leq i \leq n-1$) [MPa]
σ_n	# <i>n</i> スタンド~出側リール間張力応力	[MPa]
v_0	入側リール~#1スタンド間板速度	[m/s]
v_i	# <i>i</i> ~# <i>i</i> +1スタンド間板速度	($1 \leq i \leq n-1$) [m/s]
v_n	# <i>n</i> スタンド~出側リール間板速度	[m/s]
$v_{in,i}$	# <i>i</i> スタンド入側板速度	($1 \leq i \leq n$) [m/s]
$v_{out,i}$	# <i>i</i> スタンド出側板速度 (= v_i)	($1 \leq i \leq n$) [m/s]
μ_i	# <i>i</i> スタンド摩擦係数	($1 \leq i \leq n$) [-]
$k_{m,i}$	# <i>i</i> スタンド変形抵抗	($1 \leq i \leq n$) [MPa]
H_i	# <i>i</i> スタンド入側板厚	($1 \leq i \leq n$) [mm]
h_i	# <i>i</i> スタンド出側板厚	($1 \leq i \leq n$) [mm]
$\sigma_{b,i}$	# <i>i</i> スタンド入側張力応力	($1 \leq i \leq n$) [MPa]
$\sigma_{f,i}$	# <i>i</i> スタンド出側張力応力	($1 \leq i \leq n$) [MPa]
P_i	# <i>i</i> スタンド圧延荷重	($1 \leq i \leq n$) [N]
f_i	# <i>i</i> スタンド先進率	($1 \leq i \leq n$) [-]
S_i	# <i>i</i> スタンド圧下位置	($1 \leq i \leq n$) [mm]
$S_{r,i}$	# <i>i</i> スタンド圧下位置指令	($1 \leq i \leq n$) [mm]
τ_0	入側リールモータ駆動トルク	[Nm]
τ_i	# <i>i</i> スタンドモータ負荷トルク	[Nm]
τ_{n+1}	出側リールモータ駆動トルク	[Nm]
W_i	# <i>i</i> スタンドモータパワー	($1 \leq i \leq n$) [kw]
b	板幅	[mm]
$\Delta V_i^{(s)}$	# <i>i</i> スタンドサクセシブロール速度指令	($1 \leq i \leq n-1$) [-]

尚、本文中、変数の前に Δ を付したものは基準値（設定値）からの偏差であることをあらわし、変数の右肩に d を付したものは外乱をあらわす。

<付録.1A.2 定数>

M_i	#iスタンدمル剛性係数	$(1 \leq i \leq n)$	[N/mm]
L_0	入側リール~#1スタン্ড間距離		[m]
L_i	#i~#i+1スタン্ড間距離	$(1 \leq i \leq n-1)$	[m]
L_n	#nスタン্ড~出側リール間距離		[m]
L_{Xi}	#iスタン্ড~板厚計間距離	$(1 \leq i \leq n)$	[m]
R_0	ブライドルロール径 あるいは 入側リール径		[m]
R_i	#iスタンッドワークロール径	$(1 \leq i \leq n)$	[m]
R_{n-1}	出側リール径		[m]
J_0	入側リール(orブライドルロール)慣性モーメント		[kg・m ²]
J_{n+1}	出側リール慣性モーメント		[kg・m ²]
E	鋼板のヤング率		[MPa]

<付録.1A.3> 影響係数、その他主要パラメータ

記号		意味	単位	定義式番号
γ_{Si}	$1 \leq i \leq n$	圧下位置変化が出側板厚に及ぼす影響係数	[1/mm]	(2.2.27)
γ_{bi}	$1 \leq i \leq n$	入側張力変化が出側板厚に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.28)
γ_{fi}	$1 \leq i \leq n$	出側張力変化が出側板厚に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.29)
γ_{Hi}	$1 \leq i \leq n$	入側板厚変化が出側板厚に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.30)
γ_{mi}	$1 \leq i \leq n$	摩擦係数変化が出側板厚に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.31)
γ_{ki}	$1 \leq i \leq n$	変形抵抗変化が出側板厚に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.32)
φ_{bi}	$1 \leq i \leq n$	入側張力変化が出側板速度に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.33)
φ_{fi}	$1 \leq i \leq n$	出側張力変化が出側板速度に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.34)
φ_{mi}	$1 \leq i \leq n$	摩擦係数変化が出側板速度に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.35)
φ_{ki}	$1 \leq i \leq n$	変形抵抗変化が出側板速度に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.36)
π_{Si}	$1 \leq i \leq n$	圧下位置変化による出側板厚変化が圧延荷重に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.37)
π_{hi}	$1 \leq i \leq n$	(圧下位置変化以外の要因による)出側板厚変化が圧延荷重に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.38)
α_i	$1 \leq i \leq n$	出側板厚変化によるマスバランス変化の入側／出側速度変化吸収比	[-]	(2.2.39)
β_i	$1 \leq i \leq n$	入側板厚変化によるマスバランス変化の入側／出側速度変化吸収比	[-]	(2.2.43)
p_i	$1 \leq i \leq n$	板両端の速度差変化が張力変化率に及ぼす影響係数	[1/s]	(2.2.47)
δ_0	—	入側リール張力（トルク）変化がリール速度の変化率に及ぼす影響係数	[1/s]	(2.2.48)
δ_n	—	出側リール張力（トルク）変化がリール速度の変化率に及ぼす影響係数	[1/s]	(2.2.49)
χ_i	$1 \leq i \leq n-1$	スタン্ড間の材料移送ムダ時間(#iスタン্ড～#i+1スタン্ড)	[s]	(2.2.50)

\mathcal{X}_{xi}	$1 \leq i \leq n$	スタンド～板厚計間の材料移送ムダ時間	[s]	(2.2.51)
t_{ij}	$0 \leq i, j \leq n$	張力変化が板両端速度差に及ぼす影響係数	[-]	(2.2.79) ~(2.2.83)
\hat{t}_{ii}	$0 \leq i \leq n$	張力変化が板両端速度差に及ぼす(板厚変化を介した影響を除いた)影響係数	[-]	(2.4.57)
ω_0	—	ミル入側プロセスの固有周波数	[1/s]	(2.4.64)
ζ_0	—	ミル入側プロセスの減衰係数	[1/s]	(2.4.65)
ω_{ci}	$1 \leq i \leq n-1$	ミル内プロセスの遮断周波数	[1/s]	(2.4.66)
d_k	$1 \leq k \leq 3$	最終スタンド3モード制御時の非優先制御量の影響度	[-]	(2.6.91)
$\underline{\omega}_0$	—	張力フィードバック時のミル入側プロセスの固有周波数	[1/s]	(3.2.35)
$\underline{\zeta}_0$	—	張力フィードバック時のミル入側プロセスの減衰係数	[1/s]	(3.2.36)
$\hat{\omega}_0$	—	ILQ制御時のミル入側プロセスの固有周波数	[1/s]	(3.4.49)
$\hat{\zeta}_0$	—	ILQ制御時のミル入側プロセスの減衰係数	[1/s]	(3.4.50)
κ_1, κ_2	—	ミル入側プロセスILQ制御の漸近調整ゲイン	[-]	—
$\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_2$	—	ミル入側プロセスILQ制御の漸近指定極	[-]	—

<付録.1A.4> 影響係数行列・変換行列・係数行列

記号	次元	意味	定義式番号
P	$[(n+3) \times (n+3)]$	板両端速度差変化が張力変化率に及ぼす影響係数行列	(2.2.62)
A_T	$[(n+3) \times (n+3)]$	張力変化が板両端速度差に及ぼす影響係数行列	(2.2.63)
Φ_T	$[n \times (n+1)]$	張力変化が出側板速度に及ぼす影響係数行列	(2.2.68)
A_r	$[(n+3) \times (n+3)]$	リール張力変化とリール速度変化の相互影響係数行列	(2.2.64)
Γ_T	$[n \times (n+1)]$	張力変化が出側板厚に及ぼす影響係数行列	(2.2.66)
Q	$[(n+1) \times (n+3)]$	状態変数ベクトル x_1 から張力のみを取り出す行列	(2.2.69)
B_r	$[(n+3) \times 2]$	リールトルク変化がリール速度変化率に及ぼす影響係数行列	(2.2.71)
B_V	$[(n+3) \times n]$	出側板速度変化、ロール速度変化が板両端速度差に及ぼす影響係数行列	(2.2.67)
B_S	$[(n+3) \times n]$	出側板厚変化が板両端速度差に及ぼす影響係数行列	(2.2.65)
Γ_S	$[n \times n]$	圧下位置変化が出側板厚に及ぼす影響係数行列	(2.2.70)
Φ_d	$[n \times 2n]$	摩擦係数変化、変形抵抗変化が出側板速度に及ぼす影響係数行列	(2.2.74)
B_H	$[(n+3) \times n]$	入側板厚変化が板両端速度差に及ぼす影響係数行列	(2.2.76)
Γ_d	$[n \times 2n]$	摩擦係数変化、変形抵抗変化が出側板厚に及ぼす影響係数行列	(2.2.75)
Γ_H	$[n \times n]$	入側板厚変化が出側板厚に及ぼす影響係数行列	(2.2.77)

U_V	$【n \times n】$	ロール速度アクチュエータの遮断周波数行列	(2.2.72)
U_S	$【n \times n】$	圧下位置アクチュエータの遮断周波数行列	(2.2.73)
T_u	$【(2n+2) \times (2n+2)】$	サブプロセス分割のための操作量ベクトル変換行列	(2.4.32)
T_y	$【(2n+1) \times (2n+1)】$	サブプロセス分割のための制御量ベクトル変換行列	(2.4.37)
R_m	$【(n+2) \times (n+3)】$ $1 \leq m \leq n$	板両端速度差修正指令から操作量への変換行列	(2.5.8)
T_{yM}	$【(2n-2) \times (2n+1)】$	T_y による制御量ベクトル変換行列で、ミル内プロセスに対応する行を取り出す行列	(2.5.21)
T	$【n \times (n-1)】$	サクセシブ速度操作導入のためのロール速度操作量ベクトル変換行列	(2.5.27)
M	$【(2n+2) \times (2n+1)】$	非干渉化前置補償行列	(2.5.7)
\bar{M}_M	$【(2n+2) \times (2n-2)】$	ミル内プロセスのための非干渉化前置補償行列	(2.5.21)
M_{ME}	$【2 \times (2n-2)】$	非干渉化前置補償行列 \bar{M}_M のミル入側プロセス操作部分	(2.5.24)
M_M	$【(2n-1) \times (2n-2)】$	非干渉化前置補償行列 \bar{M}_M のミル内プロセス操作部分	(2.5.25)
M_{hV}	$【n \times (n-1)】$	非干渉化前置補償行列 M_M による板厚制御のためのロール速度操作行列	(2.5.26)
M_{hS}	$【(n-1) \times (n-1)】$	非干渉化前置補償行列 M_M による板厚制御のための圧下位置操作行列	(2.5.28)
M_{TV}	$【n \times (n-1)】$	非干渉化前置補償行列 M_M による張力制御のためのロール速度操作行列	(2.5.29)
M_{TS}	$【(n-1) \times (n-1)】$	非干渉化前置補償行列 M_M による張力制御のための圧下位置操作行列	(2.5.30)
N	$【(2n+2) \times 3n】$	外乱フィードフォワード制御行列	(2.5.61)
\bar{N}	$【(2n+2) \times 3n】$	サブプロセス分割のための変換を施した外乱フィードフォワード制御行列	(2.5.69)
N_E	$【2 \times 3n】$	外乱フィードフォワード制御行列 \bar{N} のミル入側プロセス操作部分	(2.5.71)
N_M	$【(2n-1) \times 3n】$	外乱フィードフォワード制御行列 \bar{N} のミル内プロセス操作部分	(2.5.72)
N_{mV}	$【n \times n】$	外乱フィードフォワード制御行列 N_M による摩擦係数外乱補償のためのロール速度操作行列	(2.5.73)
N_{mS}	$【(n-1) \times n】$	外乱フィードフォワード制御行列 N_M による摩擦係数外乱補償のための圧下位置操作行列	(2.5.74)
N_{kV}	$【n \times n】$	外乱フィードフォワード制御行列 N_M による変形抵抗外乱補償のためのロール速度操作行列	(2.5.75)
N_{kS}	$【(n-1) \times n】$	外乱フィードフォワード制御行列 N_M による変形抵抗外乱補償のための圧下位置操作行列	(2.5.76)
N_{HV}	$【n \times n】$	外乱フィードフォワード制御行列 N_M による入側板厚外乱補償のためのロール速度操作行列	(2.5.77)
N_{HS}	$【(n-1) \times n】$	外乱フィードフォワード制御行列 N_M による入側板厚外乱補償のための圧下位置操作行列	(2.5.78)

Π_T	$[1 \times (n+1)]$	張力変化が圧延荷重に及ぼす影響係数行列	(2.6.8)
Π_S	$[1 \times n]$	圧下位置変化が圧延荷重に及ぼす影響係数行列	(2.6.9)
Π_H	$[1 \times (n+1)]$	入側板厚変化が圧延荷重に及ぼす影響係数行列	(2.6.11)
v	$[1 \times n]$	最終スタンドの情報を取り出すベクトル	(2.6.6)
\tilde{T}_u	$[(2n+2) \times (2n+2)]$	拡張系のサブプロセス分割のための操作量ベクトル変換行列	(2.6.28)
\tilde{T}_y	$[(2n+2) \times (2n+2)]$	拡張系のサブプロセス分割のための制御量ベクトル変換行列	(2.6.31)
$T^{(k)}$	$[3 \times 3]$	最終スタンド3制御量の優先順入替行列	(2.6.53)
$M_{L1}^{<a>}$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス中間スタンドAGC拡張モード時の非干渉化前置補償ゲイン	(2.6.65a)
$M_{L2}^{<a>}$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス中間スタンドAGC拡張モード時のフィードフォワード補償ゲイン	(2.6.65b)
$M_{L1}^{}$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス張力AGC拡張モード時の非干渉化前置補償ゲイン	(2.6.75a)
$M_{L2}^{}$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス張力AGC拡張モード時のフィードフォワード補償ゲイン	(2.6.75b)
$M_{L1}^{<c>}$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス安定操業重視モード時の非干渉化前置補償ゲイン	(2.6.84a)
$M_{L2}^{<c>}$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス安定操業重視モード時のフィードフォワード補償ゲイン	(2.6.84b)
K_I^0	$[2 \times 2]$	ミル入側プロセスのオリジナルILQ制御積分ゲイン	(3.4.20)
K_F^0	$[2 \times 3]$	ミル入側プロセスのオリジナルILQ制御状態FBゲイン	(3.4.21)
$K_I^{(1)}$	$[2 \times 2]$	ミル入側プロセスの（圧下位置アクチュエータ高応答時の）ILQ制御積分ゲイン	(3.4.37)
$K_F^{(1)}$	$[2 \times 2]$	ミル入側プロセスの（圧下位置アクチュエータ高応答時の）ILQ制御状態FBゲイン	(3.4.38)
$K_I^{(2)}$	$[2 \times 2]$	ミル入側プロセスの解析用ILQ制御積分ゲイン	(3.4.40)
$K_F^{(2)}$	$[2 \times 2]$	ミル入側プロセスの解析用ILQ制御状態FBゲイン	(3.4.41)
$K_I^{(3)}$	$[2 \times 2]$	ミル入側プロセスの改良型ILQ制御積分ゲイン	(3.4.45)
$K_F^{(3)}$	$[2 \times 2]$	ミル入側プロセスの改良型ILQ制御状態FBゲイン	(3.4.46)

<付録.1A.5> 変数ベクトル

記号	次元	意味	定義式番号
x	$[3n+3]$	状態変数ベクトル	(2.2.53)
x_1	$[n+3]$	状態変数ベクトル（リール速度、張力）	(2.2.53a)
x_2	$[n]$	状態変数ベクトル（ロール速度）	(2.2.53b)
x_3	$[n]$	状態変数ベクトル（圧下位置）	(2.2.53c)
u	$[2n+2]$	操作量変数ベクトル	(2.2.54)
u_1	$[2]$	操作量変数ベクトル（リールトルク）	(2.2.54a)

u_2	$[n]$	操作量変数ベクトル（ロール速度指令）	(2.2.54b)
u_3	$[n]$	操作量変数ベクトル（圧下位置指令）	(2.2.54c)
y	$[2n+1]$	制御量変数ベクトル	(2.2.55)
y_1	$[n]$	制御量変数ベクトル（出側板厚）	(2.2.55a)
y_2	$[n+1]$	制御量変数ベクトル（張力）	(2.2.55b)
y_{1d}	$[n-1]$	入側板厚ベクトル	(2.2.55c)
w	$[3n]$	外乱変数ベクトル	(2.2.56)
w_1	$[2n]$	外乱変数ベクトル（摩擦係数、変形抵抗）	(2.2.56a)
w_{21}	$[1]$	外乱変数ベクトル（母材板厚）	(2.2.56c)
w_{22}	$[n-1]$	外乱変数ベクトル（入側板厚）	(2.2.56d)
u_E	$[2]$	ミル入側プロセスの操作量変数ベクトル	(2.4.29)
u_M	$[2n-1]$	ミル内プロセスの操作量変数ベクトル	(2.4.30)
u_{M1}	$[n]$	ミル内プロセスの操作量変数ベクトル（ロール速度指令）	(2.4.30a)
u_{M2}	$[n-1]$	ミル内プロセスの操作量変数ベクトル（圧下位置指令）	(2.4.30b)
u_D	$[1]$	ミル出側プロセスの操作量変数ベクトル	(2.4.31)
y_E	$[2]$	ミル入側プロセスの制御量変数ベクトル	(2.4.34)
y_M	$[2n-1]$	ミル内プロセスの制御量変数ベクトル	(2.4.35)
y_{M1}	$[n]$	ミル内プロセスの制御量変数ベクトル（出側板厚）	(2.4.35a)
y_{M2}	$[n-1]$	ミル内プロセスの制御量変数ベクトル（張力）	(2.4.35b)
y_D	$[1]$	ミル出側プロセスの制御量変数ベクトル	(2.4.36)
$y^\#$	$[2n+1]$	非干渉化前置補償時の操作量変数ベクトル	(2.5.5)
$y_1^\#$	$[n]$	非干渉化前置補償時の操作量変数ベクトル（出側板厚）	(2.5.5a)
$y_2^\#$	$[n+1]$	非干渉化前置補償時の操作量変数ベクトル（張力）	(2.5.5b)
$u_2^{(s)}$	$[n-1]$	操作量変数ベクトル（サクセシブロール速度指令）	(2.5.32)
\hat{u}	$[2n+1]$	サクセシブ速度操作を含む操作量変数ベクトル	(2.6.1)
\tilde{y}	$[2n+2]$	拡張系の制御量変数ベクトル	(2.6.2)
\tilde{u}	$[2n+2]$	拡張系の操作量変数ベクトル	(2.6.3)
\tilde{u}_0	$[2n+2]$	遅れを考慮した拡張系操作量変数ベクトル	(2.6.17)
u_L	$[3]$	最終スタンドプロセスの操作量変数ベクトル	(2.6.24)
y_L	$[3]$	最終スタンドプロセスの制御量変数ベクトル	(2.6.25)
$u_{L,0}$	$[3]$	遅れを考慮した最終スタンドプロセス操作量変数ベクトル	(2.6.38)
$\lambda_0, \lambda_S, \lambda_V, \lambda_H$	$[3]$	最終スタンドプロセス制御量空間上での初期状態および各制御モード操作量ベクトル	(2.6.86) ~(2.6.88)
x_E	—	ミル入側プロセスの状態変数	(3.2.12)

<付録.1A.6> 伝達関数及び伝達関数行列

記号	次元	意味	定義式番号
$G(s)$	$[(2n+1) \times (2n+2)]$	純粋プロセスの伝達関数	(2.2.86)
$G_w(s)$	$[(2n+1) \times 3n]$	外乱影響特性の伝達関数	(2.2.87)
$U(s)$	$[(2n+2) \times (2n+2)]$	アクチュエータ特性の伝達関数	(2.2.88)
$Z(s)$	$[(n-1) \times n]$	スタンド間の材料移送時間遅れの伝達関数	(2.2.89)
$A_S(s)$	$[(n+1) \times (n+3)]$	張力変化起点の動特性	(2.4.4)
$A_P(s)$	$[(n+1) \times (n+1)]$	隣接スタンドへの張力変化伝播の動特性	(2.4.8)
$A_R(s)$	$[(n+1) \times (n+1)]$	蓄積した張力変化伝播の動特性	(2.4.17)
$A_E(s)$	$[1 \times 2]$	ミル入側プロセスにおける張力変化起点の動特性	(2.4.5)
$A_M(s)$	$[(n-1) \times (n-1)]$	ミル内プロセスにおける張力変化起点の動特性	(2.4.6)
$A_D(s)$	$[1 \times 2]$	ミル出側プロセスにおける張力変化起点の動特性	(2.4.7)
$a_i(s)$	— $0 \leq i \leq n$	自スタンド張力変化発生時の特性	(2.4.9) ~(2.4.11)
$b_i(s)$	— $1 \leq i \leq n$	上流スタンドからの張力伝達特性	(2.4.12) ~(2.4.13)
$c_i(s)$	— $1 \leq i \leq n$	下流スタンドからの張力伝達特性	(2.4.14) ~(2.4.15)
$G_S(s)$	$[(2n+1) \times (2n+2)]$	プロセス伝達関数の「変化の起点」支配分	(2.4.26)
$G_R(s)$	$[(2n+1) \times (2n+2)]$	プロセス伝達関数の「変化の伝播」支配分	(2.4.27)
$G_{SE}(s)$	$[2 \times 2]$	ミル入側プロセスの変化起点動特性	(2.4.58)
$G_{SM}(s)$	$[(2n-1) \times (2n-2)]$	ミル内プロセスの変化起点動特性	(2.4.60)
$G_{SD}(s)$	—	ミル出側プロセスの変化起点動特性	(2.4.62)
$L(s)$	$[(2n+1) \times (2n+1)]$	非干渉化誤差行列	(2.5.9)
$A(s)$	$[(2n+1) \times (2n+1)]$	非干渉化前置補償時のトータルプロセス動特性	(2.5.10)
$A_G(s)$	$[(n+1) \times n]$	板厚制御時の非干渉化誤差起点動特性（サクセシブ速度操作の影響）	(2.5.12)
$A_F(s)$	$[(n+1) \times (n+1)]$	張力制御時の非干渉化誤差起点動特性（サクセシブ速度操作の影響）	(2.5.13)
$A_Q(s)$	$[(n+1) \times (n+1)]$	張力制御時の非干渉化誤差起点動特性（自スタンド発生の張力誤差）	(2.5.14)
$L_M(s)$	$[(2n-2) \times (2n-2)]$	ミル内プロセスの非干渉化誤差行列	(2.5.38)
$A_M(s)$	$[(2n-2) \times (2n-2)]$	ミル内プロセス非干渉化前置補償時のトータルプロセス動特性	(2.5.39)
$A_{GM}(s)$	$[(n+1) \times (n-1)]$	板厚制御時のミル内プロセス非干渉化誤差起点動特性（サクセシブ速度操作の影響）	(2.5.41)
$A_{FM}(s)$	$[(n+1) \times (n-1)]$	張力制御時のミル内プロセス非干渉化誤差起点動特性（サクセシブ速度操作の影響）	(2.5.42)
$A_{QM}(s)$	$[(n+1) \times (n-1)]$	張力制御時のミル内プロセス非干渉化誤差起点動特性（自スタンド発生の張力誤差）	(2.5.43)

$G_C(s)$	$[(2n-2) \times (2n-2)]$	ミル内プロセス非干渉化前置補償後のフィードバック制御コントローラ	(2.5.47)
$A_d(s)$	$[(n+1) \times 2n]$	摩擦係数外乱、変形抵抗外乱のフィードフォワード制御誤差起点動特性	(2.5.65)
$A_H(s)$	$[(n+1) \times n]$	入側板厚外乱のフィードフォワード制御誤差起点動特性	(2.5.66)
$S(s)$	$[(2n+1) \times 3n]$	フィードフォワード制御誤差行列	(2.5.64)
$\tilde{G}(s)$	$[(2n+2) \times (2n+2)]$	最終スタンド拡張系のプロセス伝達関数行列	(2.6.13)
$\hat{U}(s)$	$[(2n+1) \times (2n+1)]$	サクセシブ速度操作を考慮したアクチュエータ特性の伝達関数	(2.6.14)
$\tilde{U}(s)$	$[(2n+1) \times (2n+1)]$	拡張系のアクチュエータ特性の伝達関数	(2.6.20)
$\varsigma(s)$	—	第 $n-1$ スタンド板厚制御系動特性	—
$\xi(s)$	—	第 $n-1$ スタンド板厚目標値修正指令から第 n スタンド入側板厚への伝達関数	(2.6.16b)
$G_L(s)$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセスの伝達関数行列	(2.6.37)
$M_L(s)$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセスの非干渉化前置補償行列	(2.6.54)
$A_L(s)$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセスの非干渉化前置補償後のトータルプロセス動特性	(2.6.46)
$G_L^0(s)$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセスの伝達関数行列（分割表現）	(2.6.48)
$M_L^0(s)$	$[3 \times 3]$	$G_L^0(s)$ に対応する最終スタンドプロセスの非干渉化前置補償行列	(2.6.49)
$A_L^0(s)$	$[3 \times 3]$	$G_L^0(s)$ に対応する最終スタンドプロセスの非干渉化前置補償後のトータルプロセス動特性	(2.6.50)
$M_L^{<a>}(s)$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス中間スタンドAGC拡張モード時の非干渉化前置補償行列	(2.6.58)
$A_L^{<a>}(s)$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス中間スタンドAGC拡張モード時の非干渉化前置補償後のトータルプロセス動特性	(2.6.61)
$M_L^{}(s)$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス張力AGC拡張モード時の非干渉化前置補償行列	(2.6.69)
$A_L^{}(s)$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス張力AGC拡張モード時の非干渉化前置補償後のトータルプロセス動特性	(2.6.72)
$M_L^{<c>}(s)$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス安定操業重視モード時の非干渉化前置補償行列	(2.6.78)
$A_L^{<c>}(s)$	$[3 \times 3]$	最終スタンドプロセス安定操業重視拡張モード時の非干渉化前置補償後のトータルプロセス動特性	(2.6.81)
$\tilde{A}_p(s)$	$[(n+1) \times (n+1)]$	下流スタンドへの張力変化伝播の動特性	(2C.7)
$\tilde{A}_r(s)$	$[(n+1) \times (n+1)]$	上流スタンドへの影響を無視したときの蓄積した張力変化伝播動特性	(2C.11)
$\bar{G}_E(s)$	$[2 \times 2]$	ミル入側プロセスの伝達関数行列	(3.2.11)

M_{E0}	【2×2】	ミル入側プロセスの0次非干渉化前置補償行列	(3.3.7)
$A_{E0}(s)$	【2×2】	ミル入側プロセスの0次非干渉化前置補償後のトータルプロセス動特性	(3.3.8)
$M_{E1}^*(s)$	【2×2】	ミル入側プロセスの（仮置）非干渉化前置補償行列	(3.3.9)
$M_{E1}(s)$	【2×2】	ミル入側プロセスの1次非干渉化前置補償行列	(3.3.11)
$A_{E1}(s)$	【2×2】	ミル入側プロセスの1次非干渉化前置補償後のトータルプロセス動特性	(3.3.12)
$A_{EQ}^{(0)}(s)$	【2×2】	ミル入側プロセスのオリジナルILQ前置補償後のトータルプロセス動特性	(3.4.22)
$A_{EQ}^{(1)}(s)$	【2×2】	ミル入側プロセスの（圧下位置アクチュエータ高応答時の）ILQ前置補償後のトータルプロセス動特性	(3.4.25)
$\underline{G}_E(s)$	【2×2】	（圧下位置アクチュエータ高応答時の）ミル入側プロセスの伝達関数行列	(3.4.35)
$A_{EQ}^{(2)}(s)$	【2×2】	ミル入側プロセスの解析用ILQ前置補償後のトータルプロセス動特性	(3.4.42)
$A_{EQ}^{(3)}(s)$	【2×2】	ミル入側プロセスの改良型ILQ前置補償後のトータルプロセス動特性	(3.4.47)
$a_0^{\kappa 1}(s)$	—	ILQ制御時のミル入側プロセス張力動特性	(3.4.58)

参考文献

- *1 美坂佳助：コールドタンデムミルの影響係数，塑性と加工，8(1967)，75，p.143/155
- *2 服部正志，谷口政隆，小野寺有司，植山高次，吉野英樹，蔵田喜輝，大西忠治，寺崎忠男：冷間圧延機の最新圧延制御システム，製鉄研究，339(1990)，p46/p55
- *3 大井俊哉，西村文生，吉岡大祐，柳多徹郎，江藤学，伴誠一：鹿島第2冷延板厚制御技術の概要，材料とプロセス，7(1994)，p1444
- *4 山下道雄，磯辺邦夫，鎌田征雄，斉藤輝弘，山田恭裕：動的影響係数モデルによる冷間タンデムミルの板厚変動解析，平成6年度塑性加工春季講演会予稿集，1994，p21/24
- *5 鎌田正誠：冷間タンデム圧延の板厚制御の考え方，材料とプロセス，12-5(1999)，p976/979
- *6 G.F.Bryant, I.G.Cumming, W.J.Edwards, J.H.Westcott: Research in Tandem Mill Operation, Journal of The Iron and Steel Institute, 11(1971), p869/875
- *7 星野郁弥，木村英紀：オブザーバを用いたアルミニウム圧延機の板厚制御，計測と制御，27-4(1988)，p325/332
- *8 北村章，小西正躬，内藤雪夫：冷延タンデム圧延機の分散型多変数板厚制御，システム制御情報学会論文誌，4-4(1991)，p140/154
- *9 大井俊哉，西村文生，柳多徹郎，伴誠一，関義朗：I L Q設計理論に基づく冷間圧延機の高精度板厚制御，システム制御情報学会論文誌，9(1996)，6，p.274/286
- *10 野下杲平，松重武彦，西村文生，金子亨，大井俊哉，富沢淳：鹿島新冷間圧延設備，住友金属，47-1(1995)，p111/116
- *11 日本鉄鋼協会共同研究会鋼板部会コールドストリップ分科会：わが国におけるコールドストリップ設備仕様と工場レイアウト，日本鉄鋼協会，1994

