

ホットストリップミルの計算法制御
に関する研究

大成幹彦

ホットストリップミルの計算機制御 に関する研究

昭和51年10月

大成 幹彦

DOC
1977
8
電気系

目 次

記号の説明	
第1章 序 論	6
1.1 従来の圧延制御技術とその問題点	6
1.2 本研究の目的	7
1.3 本論文の概要	10
第2章 圧延理論と影響係数	13
2.1 緒 言	13
2.2 熱間圧延理論	13
2.3 影響係数	16
2.4 結 言	25
第3章 偏差計算方式によるミルセットアップ	27
3.1 緒 言	27
3.2 仕上圧延機セットアップ方式の分類	27
3.3 偏差計算方式	28
3.4 標準パターンの個数	29
3.5 標準パターン作成法	30
3.6 補正計算	31
3.7 ミルセットアップ実験	32
3.8 偏差計算方式実験	33
3.9 結 言	35
第4章 絶対値計算方式によるミルセットアップ	37
4.1 緒 言	37
4.2 セットアップ計算	37
4.3 数式モデル	38
4.4 圧延理論式の簡略化	40
4.5 絶対値計算方式実験	46
4.6 結 言	46

第 5 章	偏差計算方式の適応制御	48
5.1	緒言	48
5.2	適応制御の要因	48
5.3	偏差計算方式による適応制御の方法	52
5.4	適応制御数式モデル	53
5.5	ミルセットアップと偏差計算方式適応制御の組合せ	55
5.6	結言	56
第 6 章	絶対値計算方式の適応制御	58
6.1	緒言	58
6.2	絶対値計算方式適応制御の数式モデル	59
6.3	適応制御の誤差吸収機能	61
6.4	適応制御方式の改良	64
6.5	結言	69
第 7 章	ソフトウェアシステムの開発	71
7.1	緒言	71
7.2	ソフトウェア開発過程における配慮	72
7.3	人と機械との協調	74
7.4	支援プログラム	76
7.5	結言	79
第 8 章	結 論	81
	謝 辞	86
	参考文献	87
	付 録	90

記 号 の 説 明

b	板 幅	mm
B _{OT}	圧延温度式定数	℃
C	炭素含有量	%
C _H	偏平ロール半径式定数	mm ² /kg
E	圧延動力	HP
f	先進率	
G	圧延トルク	kg - mm
H	圧延機の入口板厚	mm
H ₁	粗厚(第1スタンド入口板厚) = h ₀	mm
H _M	入口マスフローゲージ	mm
h	圧延機の出口板厚	mm
h ₀	= H ₁ , 粗厚	mm
h _M	出口マスフローゲージ	mm
K	ミル剛性係数(ばね定数)	kg/mm
k _{f m}	平均変形抵抗	kg/mm ²
k _p	= 1.15 k _{f m} , 二次元拘束平均変形抵抗	kg/mm ²
N	ロール回転数	rpm
N _{i j}	影響係数(設定修正)	
N' _{i j}	影響係数(仕上板厚, 回転数変更)	
N'' _{i j}	影響係数(負荷配分変更)	
P	圧延荷重	kg
P _c	圧延荷重計算値	kg
Q _g	圧延トルク算出の圧下力係数	
Q _p	圧下力係数(圧延荷重算出の圧下力係数)	
R	ロール半径	mm
R'	= $R \left(1 + \frac{C_H P}{b(H-h)} \right)$, 偏平ロール半径	mm
r	= 1 - h/H, 圧下率	

S	压下位置（ロール開度零点を問題にしない（ $S_0 = 0$ とみなす）場合には単にロール開度というときもある）	mm
S_0	ロール開度零点	mm
S_{ij}	影響係数（設定修正）	
S'_{ij}	影響係数（仕上板厚，回転数変更）	
S''_{ij}	影響係数（負荷配分変更）	
T	圧延温度	℃
T_F	仕上圧延機出側温度	℃
T_K	圧延温度	°K
T_S	仕上圧延機入側温度	℃
U	体積速度	mm ³ /min
v	出口板速度	mm/min
v_F	圧延速度（最終スタンド出口板速度）	mm/min
v_n	ロール周速	mm/min
Y	中立点板厚	mm
z	塑性曲線適応修正係数	
β_{BOT}	B_{OT} の平滑ゲイン	
β_S	ΔS_0 の平滑ゲイン	
β_z	zの平滑ゲイン	
ϵ	加工度（対数ひずみ）	
$\dot{\epsilon}$	ひずみ速度	1/s
σ	基本方程式偏微係数	
ν	基本方程式偏微係数	
η	基本方程式偏微係数	
Δf	先進率誤差	
Δh	出口板厚誤差	mm
ΔP	圧延荷重誤差	kg
ΔP_A	圧延荷重測定誤差	kg
ΔP_C	圧延荷重計算式誤差	kg
ΔS	压下位置誤差	mm

ΔS_0	零点偏差, 圧下位置修正量	mm
$\Delta\Delta S_0$	零点偏差誤差	mm
ΔT_{DES}	デスクーラ温度降下量	℃
ΔT_{STD}	圧延機列内の温度降下量	℃
Δz	適応係数誤差	
添字 A	測定値, 実績値	
" i	第 i 番スタンド	
" F	最終スタンド	
" -1	前回圧延を意味	

第 1 章 序 論

第 1 章 序 論

1.1 従来の圧延制御技術とその問題点

(1) ホットストリップミルの概要

ホットストリップミルは、帯状鋼板(ストリップ、コイル)の生産形態として、加熱炉、粗圧延機、仕上圧延機、スプレー、ならびに巻取機から構成されている。加熱炉では、スラブ(スラブ厚150~300 mm, 長さ4~10 m, 幅500~1900 mm, 重量5~40 t)を1200~1300℃程度に加熱する。粗圧延機では、加熱炉より抽出されたスラブを複数回圧延(可逆圧延機あるいはタンデム圧延機を使用)し、仕上圧延機で制御可能な圧延材の温度と板厚を確保する。仕上圧延機は、6~7スタンドの圧延機群から構成されており、粗厚20~30 mmの圧延材を仕上板厚1~13 mmのストリップに圧延する。この際、仕上板厚の制御とともに、圧延材が仕上圧延機群を出るときの温度と巻取られるときの温度を制御することが必要となる。

(2) 従来の圧延制御技術と研究の概要

本研究の着手当時(1960年代)のホットストリップミルは手動で制御されていた。すなわち、圧延機運転員は、圧延ライン上を流れる各圧延材を目視により追跡し、各圧延材の流れに応じて各圧延機の圧下位置とロール回転数とを手動で設定(セットアップ)、調整していた。制御装置としては、粗圧延機にプリセット装置が導入されており、仕上圧延機にはルーバー制御装置と自動板厚制御装置(AGC)が設けられ、全スタンド通板後の板厚制御に用いられていた。また一部の仕上圧延機では、圧下位置やロール回転数の設定を容易にするため、アナログサーボ機構によるプリセット装置や自動速度調整装置が導入されつつあった。

当時の研究状況のうち、制御技術に関しては、¹¹⁾ ロール駆動電動機¹¹⁾の速度制御方式やAGCの方式の開発が各所で行なわれ、実用化されつつあった。例えば、タンデム圧延機についてのAGCは実用化段階であったが、各所のタンデム圧延機毎にその方式が異なり、それぞれの特徴を有していた。しかし、いずれもフィードバック制御が技術の中心であった。^{12), 13)}

圧延理論に関しては、小規模単一スタンド圧延機での圧延現象の実験的考察や、各種圧延材の変形抵抗の実験室的な測定とその定式化が中心であった。^{14), 15)}

(3) 課 題

ホットストリップミルで加工されるコイルに要求されることは、コイル全長にわたって均一な板厚を得ることである。板厚精度の確保は、主として仕上圧延機の制御で行なわれる。板厚精度向上のためには、圧延に先だて、仕上圧延機の圧下位置とロール回転数とを適切に設定しなければならない。ミルセットアップが適切であると、コイル先端部からオンゲージが得られるし、そのあとは、AGCがオンゲージを確保する。ミルセットアップが不適切であると、AGCの制御範囲を越えるため、オフゲージ部分が増加する。

当時、ミルセットアップは、プリセット装置により実施することは可能であったが、設定値そのものは、運転員が手計算や経験に基づいて定めていた。これには、熟練を要し、どの運転員でも適切な設定値を得ることは必ずしも容易ではなかった。

熟練した運転員に代るもの、あるいは運転員の負担を軽減するものとして、制御用計算機によるミルセットアップが要請された。当時、制御用計算機は、第2世代から第3世代を迎える時期に当り、各産業分野では、データロギングから計算機制御の実用化への研究開発が進められていた。ホットストリップミルの計算機制御は、世界の二、三の製鉄所で実験的な導入が始まっていた^{16), 17)}。このような背景のもとに、国産技術でもって、ミルセットアップを計算機で行なうには、どのようにすればよいかとの課題が掲げられた。

1.2 本研究の目的

(1) 計算機制御導入の目的

ホットストリップミル計算機制御の導入目的は、生産性と品質の向上¹⁸⁾である。各コイルは注文生産されており、その仕様としては、寸法、材質、強度等が規定されている。この仕様の中で、注文毎に変わる板厚寸法（仕上板厚）を目標値に誤差少なく確保することが、ホットストリップミルの主要な機能となる。なお、材質は製鋼過程で定まり、板幅は、粗圧延時に若干修正できるが、スラブ幅でほぼ決る。圧延材の抗張力は、仕上圧延機の出口温度と巻取温度でも制御される¹⁹⁾。これらの制御については本論文では省略する。

様々な目標寸法（目標板厚、板幅が急変しない生産計画が一般には組まれているが）に対して、圧延材の先端部をオンゲージとする各スタンドの圧下位置とロール回転数

の設定値を求めることが、計算機制御の主目的の一つである。これは、熟練者に代るものとして要請され、特に目標寸法の変更（段取替）の際に、設定値の変更に技術と時間を要していたものが軽減され、生産性向上に貢献する。圧延材の先端部からオンゲージに入れば、すぐAGCの制御に切換えることができ、手動調整の手間がはぶけるため、速やかに加速し、圧延時間を短縮することが可能となる。

(2) 仕上圧延機のミルセットアップ

ホットストリップミルの圧延機能は、粗圧延機と仕上圧延機とに分けられる。粗圧延機の構成形態としては、可逆圧延機（半連続）、タンデム粗圧延機（全連続）、あるいはタンデム粗圧延機の一部に可逆圧延機を使用するもの（準連続）が採られているが、いずれの形態も粗圧延機としては、仕上圧延機で制御可能な圧延材の温度と板厚（粗厚）を確保することが主目的となる。しかし、粗圧延機では、圧延作業は単純化したパススケジュールで実施されるのが普通であり、加熱炉での加熱技術が十分であれば、圧延材毎の温度降下のばらつきも少なく、板厚や板幅への影響も少ない。たとえば、これらの変数が目標値からずれたとしても、仕上圧延機で吸収可能な量であり、粗圧延機においてはこれら変数の監視が主体となる。一方、仕上圧延機では、粗圧延機での偏差を吸収しながら、圧延仕様を満足する板厚精度を確保しなければならない。したがって、ホットストリップミルの制御においては、仕上圧延機の制御の方が、粗圧延機のそれよりも厳しく重要となる。

以上の背景から、本研究の主目的としては、仕上圧延機のミルセットアップを計算機により実施する方式の検討に置いた。^{110)~113)}その具体的な目的は次項以降のようになる。

(3) ミルセットアップ方式

計算機による仕上圧延機のミルセットアップの一つの方式として、過去の操業実績をパターン化して蓄積する方法もあるが、我国では多種類の製品仕様を圧延しているので、このパターン方式は不向きである。ところで、圧延運転員の作業方法を調べると、圧延の進行において圧延材毎の仕様の变化分に応じて設定値の偏差を算出し、偏差分を加えることによりセットアップする方式を採っている。この偏差計算方式は運転員の経験則が容易に取込める一つの方法と考え、まず最初に実験することとした。

タンデム圧延機の計算機制御においては、全スタンドの挙動を認識しておく必要がある。現在では、圧延現象と制御装置のすべての特性を動的に表現し、模擬することも行なわれているが、¹¹⁴⁾本研究着手時には、圧延理論を線形近似して全スタンドの変動を

偏差式で表現する方法（一種の感度解析手法¹¹⁵⁾）の研究が行なわれており、この方法で²⁴⁾求められる影響係数を利用することを考えた。

圧延理論を利用し始めると、圧延理論を直接、ミルセットアップ計算に使ってみようとの意欲が湧き、各圧延仕様に応じる設定値の絶対量を直接求める絶対値計算方式の検討をもあわせて実施することにした。

圧延理論としては、熱間圧延に関して広く解析が行なわれていた R.B.Sims の理論²¹⁾を用いることにした。Sims の理論は比較的よく合りと専門家の間では言われていたので、この理論を忠実に用いることを意図した。しかし、本理論は式の形が複雑であるため、精度を落とすことなく制御用計算機でも扱い易い形に、簡略化を図ることにした。

以上のように、本研究の一つの目的は、計算機によりミルセットアップを行なう場合に、どのような方式を採り、各セットアップ方式ではどのような数式モデルを用いればよいかとの技術的課題を明らかにすることである。具体的には、偏差計算方式と絶対値計算方式のそれぞれの構成ならびに数式モデルを考察することと、両方式の現場での適用性を比較検討することである。

(4) 適応制御方式

どのようなミルセットアップ方式を用いるにしても、そのモデルが常に実際の圧延現象を忠実に表わしているとは限らない。圧延の進行に伴なって、圧延ロールが熱膨張や摩耗を起こすなど圧延状態は時々刻々と徐々に変化していく。このため、適切なミルセットアップを実施するには、適応制御が必要となる。適応制御の目的は、数式モデルの誤差と圧延状態の変動を計算により検出し、再現性のある誤差や変動を逐次修正補償して、以後のセットアップ計算を改善して行くことにある。適応制御の方式と数式モデルをどのように構成するかは、次の技術的な課題である。具体的には、セットアップ計算にとって外乱となる要因を抽出し、その中で適応制御の可能な要因をまず明らかにする。適応制御についても偏差計算方式と絶対値計算方式の2種類を提案し、両方式での外乱要因の吸収機能を解析的に明らかにする。

(5) 圧延理論

従来、圧延理論は、小規模な実験室的な現象解析に基づき研究されていた。操業レベルのタンデム圧延機の解析は、計算機によるデータ採取により可能となった。こういう観点から、本研究は、従来個別にあった圧延理論を総合することにより、タンデム圧延機の挙動の記述にどの程度役立つか、あるいは操業データにより圧延理論の妥

当性をどの程度確認できるかを明らかにすることにもなる。同時に、圧延理論を計算機制御のためにどの程度まで簡略化することが可能かを明らかにすることでもある。

(6) 計算機制御導入の手順

システム工学の面からの一つの技術的課題としては、計算機制御の導入手順の検討^{2.1)}がある。従来、手動操業している圧延機の中に計算機制御を導入するには、操業に支障を与えることなく、実験をしたり、方式や数式モデルを確認したり、あるいは計算機制御が運転員の操業方法と両立するかどうかを確認する必要がある。このため、ミルセットアップの方式や数式モデルの良否の判定と改良が圧延現場で速やかに行なえる方法と、作成中の各種のプログラムの試験と確認が容易に行なえる数種類の支援プログラムについて論じる。

1.3 本論文の概要

本論文は、上述のようなホットストリップミルの計算機制御に関する技術課題を、制御工学ならびにシステム工学の見地からとらえ、圧延理論と収集した操業データに基づいて考察を加え、仕上圧延機のミルセットアップとその適応制御の方式を主として比較検討し、あわせて計算機制御の導入手順等を論じたものである。

各章の内容を以下に簡単に述べる。

第2章では、仕上圧延機のミルセットアップの基礎となる熱間圧延理論式ならびに圧延理論式から感度解析的手法により導出される影響係数について述べる。圧延理論式としては、熱間圧延の場合に広く用いられているR.B.Simsの理論式を基礎とした。影響係数は圧延状態の変数相互の関係を表わすのみならず、圧下位置設定の要求精度計算や、ミルセットアップ計算と適応修正計算にも利用できることを示す。

第3章では、仕上圧延機ミルセットアップの一つの方式である偏差計算方式について論じる。仕上圧延機のミルセットアップ方式は、パターン方式と計算による方式とに大別できる。パターン方式は、圧下位置とロール回転数の設定値をパターンとして計算機内に格納しておく方式である。計算による方式は、圧延現象を数式モデルで表わし、その数式モデルに基づいた計算により、設定値を求める方式である。計算による方式として、偏差計算方式と絶対値計算方式の2種類を、本論文では採り上げ検討する。

偏差計算方式では、圧延条件を標準化し、標準圧延条件に応じて圧下位置とロール回転数の各設定値を標準パターンとして計算機内に格納おく。この場合の標準パターンの個数

と作成法について検討する。圧延仕様が標準圧延条件と異なる場合には、その相違分に応じる補正計算を行なうが、その補正計算に影響係数を用いて行なう方法を検討する。偏差計算方式によるミルセットアップの実験結果についても述べる。

第4章では、絶対値計算方式によるミルセットアップについて論じる。絶対値計算方式は、圧延仕様に依りて、変形抵抗や圧延荷重等の中間変数と、圧下位置とロール回転数の設定値のそれぞれの絶対量を、数式モデルにより算出する方式である。数式モデルの作成方法としては、統計的な方法と、理論を尊重する方法とがあるが、圧延現象記述においては、圧延操業から得られるデータの範囲が狭いため、統計的方法よりも圧延理論式を尊重する方式の方が、実用性が高いことを論じる。しかし、圧延理論式は、必ずしも現象を定量的には正確に記述しているとは限らないため、定性的には理論を尊重し、定量的には、データを重視するアプローチを採り、オンライン制御に適した圧延理論の簡略式の導出について論じる。この結果、絶対値計算方式に用いる各種数式モデルは、理論式の簡略化、実験式、回帰式の3種で構成されることを示す。絶対値計算方式によるミルセットアップの現地実験結果に基づき、この方式の適用範囲と効果を明らかにする。

第5章では、偏差計算方式の適応制御について論じる。適応制御の目的は、ミルセットアップモデルと圧延現象との相違を検出し、その相違に応じてモデルを修正することにある。相違の発生する原因は、圧延機特性の経時変化と、圧延材に関する属性値の予測ないしは設定の誤差であり、これらは適応制御すべき外乱要因となる。しかし圧延現象の観測のために用いられる計測器の種類と数は限定されているので、外乱要因をすべて分離することは困難である。そこで、まず外乱要因の中で、適応制御の可能な要因は何であるかを、圧下位置とロール回転数とのそれぞれの算出過程を逆にたどりながら論じる。

偏差計算方式の適応制御としては、圧延現象の計測値とミルセットアップ値との差から現象変化を検出し、この検出値を基に、各スタンドの圧下位置のみの設定修正で適応制御が実施できる方法を提案する。このとき、圧下位置の修正値は、現象変化検出値に影響係数を用いることにより直接的に算出可能なことを論じ、この簡単な方式により、外乱や誤差が吸収可能なことを理論的に明らかにする。

第6章では、絶対値計算方式の適応制御について論じる。この方式は、偏差計算方式が圧延変動を検出し、操作端に直接フィードバックするものであるのに対し、圧延変動の原因となる要因を可及的に分離し、ミルセットアップの数式モデルのパラメータを個々に修正しようとする方式である。第5章で抽出される外乱要因は8項目あるが、計測点数の制

約からすべての外乱要因は分離できない。そこで、分離可能な次の3つの要因 (1)ロール開度零点、(2)塑性曲線適応修正係数、(3)圧延温度式定数 を適応制御の要因とした場合に、これら以外の外乱要因をも、これら3要因の適応制御過程で吸収可能なことを理論的に究明する。適応制御を実施する場合、観測ノイズ等一過性の雑音を排除し、時系列的に再現性のある誤差を求めなければならない。このための手法として、指数平滑法を用いるが、ロール開度零点と塑性曲線適応修正係数については、それぞれの平滑ゲインを協調させる必要のあることを論じる。適応制御の計算過程において、各スタンドの出口板厚が必要であり、これは計算によって求めるが、体積速度一定の関係式より求める場合、同式に用いる先進率の精度に左右されることを、先進率誤差の感度解析より明らかにする。あわせて、出口板厚算出の代案として、ゲージメータゲージを用いた適応制御方法の改良についても検討する。

第7章では、計算機制御の技術中心であるソフトウェアシステムの開発の過程で配慮しなければならない事項について論じる。計算機制御のスムーズな導入のために特に配慮すべきことは、人と機械との協調と支援プログラムの準備である。人と機械との協調の一つとしては、圧延機の運転員が従来の手動運転から、計算機制御運転に不安なく移行できるようにする必要がある。このための方法として、ミルセットアップ計算値と操業値との比較を運転員が一見してできる方法や、圧延ライン上に圧延材がない場合にでもセットアップ計算を実施できる模擬計算方式について述べる。ソフトウェア開発期間の短縮を図る道具としては、支援プログラムがあり、適切な支援プログラムの用意はその効果を高める。4種類の支援プログラムの設計目的と利用方法について述べる。

第 2 章 圧延理論と影響係数

第 2 章 圧延理論と影響係数

2.1 緒 言

圧延機のセットアップ方式の作成、検討に当っては、操業データのみを用いる場合もあるが、操業データは局所的な特性しか表わさないとの短所があるため、圧延理論に基礎を置くことを方針とする。その理由は、圧延理論は操業状況を定量的に正しく記述していないかも知れないが、多くの基礎実験に基づいて導出されたものであるから、広い範囲にわたって傾向的に正しい特性を表わしているものと考えたことによる。

熱間圧延理論としては、比較的広く用いられている R.B.Sims の理論式を採用する。彼の理論式は、各種の実験に基づき、圧延荷重、圧下力係数、先進率等を定式化しているが、解析や計算機制御用にはかなり複雑な形をしている。しかし、理論式は広い範囲にわたって成立すると考え、個々の理論式で得られる値を尊重することにする。後章では、理論式をミルセットアップの数式モデルとして用いるため、精度を落すことなく簡略化する方法を論じる。

圧延現象を記述する方法としては、圧延理論を忠実に用いる方法以外に、理論式をテーラ-展開してその一次項を選んで線形近似式として扱う方法がある。線形近似法は、ある圧延現象の近傍におけるパラメータ変化の感度を解析するときなどに用いることが可能であり、得られた感度係数を本論文では影響係数と称している。影響係数は、圧下位置、体積速度一定、ならびに所要圧延動力の各式の線形近似式を連立させ、設定条件に応じて未知数と既知数を選択して連立方程式を解くことにより、種々の条件に関して求めることができる。影響係数は、後章で述べる偏差計算方式や適応制御等に利用する。

本章では、ミルセットアップに必要な範囲の熱間²¹⁾圧延理論、ならびに影響係数の算出法²⁴⁾とその利用法について検討を加え、次章以降の考察の基礎を与える。具体例としては、影響係数の数値計算例を示し、その数値を利用して圧下設定の要求精度の計算法を論じる。

2.2 熱間圧延理論

熱間圧延理論に関しては多くの研究が発表されているが、比較的広く用いられている R.B.Sims²¹⁾ の圧延理論式を採用する。彼の理論は圧延温度 900℃ 以上では低炭素鋼から高炭素鋼まで相当信頼性のあることが実験により確かめられている。本論文では、圧延理論式の妥当性を論じることは本旨でなく、むしろその扱い方に重点をおいている。

(1) ゲージメータ

圧延機の基本的な現象は、図 2.1 に示すように、次のゲージメータ式により表わされる。

$$h = (S - S_0) + \frac{P}{K} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、h : 出口板厚

S : 圧下位置

S₀ : ロール開度零時の圧下位置(ロール開度零点)

S - S₀ : 無負荷時ロール開度

P : 圧延荷重

K : ミル剛性係数

なお、S は厳密には、同図に示すように、圧下位置を表わすが、ロール開度零点 S₀ を問題にしないときは、S₀ = 0 とみなし、単にロール開度という場合もある。

(2) 圧延荷重

圧延荷重 P は、R.B.Sims によれば次式で表わされる。

$$P = k_p \cdot b \sqrt{R' (H - h)} Q_p \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、k_p = 1.15 k_{f_m} : 二次元拘束平均変形抵抗

b : 板幅

R' : 偏平ロール半径

H : 入口板厚

Q_p : 圧下力係数

(3) 変形抵抗

変形抵抗の数式モデルとしては、次式を仮定した。

$$k_p = 1.15 \exp(k_1 + k_2 C + k_3 C^2 + \frac{k_4 + k_5 C + k_6 C^2}{T_k}) \epsilon^n \dot{\epsilon}^m \dots (2.3)$$

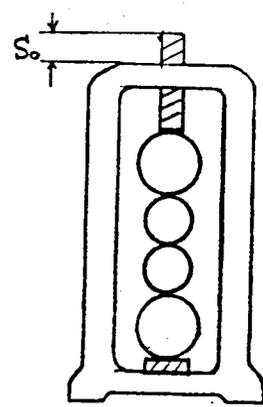
ここで、C : 炭素含有量

T_k : 圧延温度

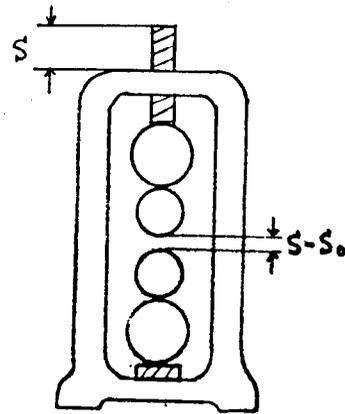
ε : 加工度(対数ひずみ)

ε̇ : ひずみ速度(平均ひずみ速度)

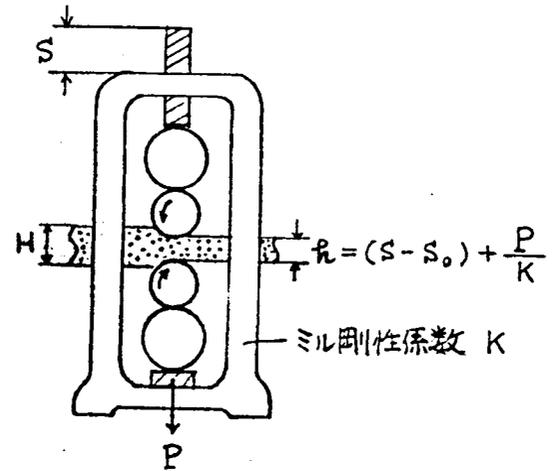
k₁ ~ k₆, m, n : 鋼種により定まる定数



(a) 零点



(b) 圧下設定



(c) 圧延状態

図2.1 圧下位置の説明図

変形抵抗は圧延荷重を予測する場合の基本的パラメータであり、特に絶対値計算方式では重要となる。変形抵抗の詳細については、第4.3節で述べる。

(4) 対数ひずみとひずみ速度

対数ひずみ ϵ は次式で定義される。

$$\epsilon = \log_e \frac{H}{h} \dots\dots\dots (2.4)$$

圧延の場合のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は、材料が入口板厚 H から出口板厚 h まで変形されるときの単位時間当りの対数ひずみを平均ひずみ速度と考えると、W.Dahl により次式で表わされる²²⁾。

$$\dot{\epsilon} = \frac{2\pi}{60} N \frac{R}{\sqrt{R'(H-h)}} \log_e \frac{H}{h} \dots\dots\dots (2.5)$$

(5) 偏平ロール半径

式(2.2)の中の偏平ロール半径 R' は Hitchcock により次のように与えられる。

$$R' = R \left\{ 1 + \frac{C_H P}{b(H-h)} \right\} \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、 R : ロール半径

$$C_H = \frac{16(1-\nu^2)}{\pi E} \quad (\text{ただし、}\nu \text{: ポアソン比、}E \text{: ヤング率})$$

(6) 圧下力係数

圧下力係数 Q_p は、R.B.Sims により次式のように与えられる。

$$Q_p = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1-r}{r}} \left[\pi \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{1-r}} - \sqrt{\frac{R'}{h}} \log_e \frac{Y^2}{H \cdot h} \right] - \frac{\pi}{4} \dots\dots (2.7)$$

ここで、 r : 圧下率

$Y = h(1+f)$: 中立点板厚

(7) 体積速度

タンデム圧延機における圧延現象の一つの特徴は、単位時間に各スタンドを通過する体積が等しいという次の体積速度一定の関係が成り立つことである。

$$U = b h_i v_i = b h_{i+1} v_{i+1} \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで、 U : 体積速度

v : 出口板速度

(8) 板速度とロール回転数

出口板速度 v とロール回転数 N との間にはすべりがあり、次式で表わされる。

$$v = 2 \pi R (1 + f) N \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで、 f : 先進率

N : ロール回転数

(9) 先進率

先進率 f は、R.B.Sims によれば、次式で表わされる。

$$f = \tan^2 \left\{ \frac{1}{2} \sin^{-1} \sqrt{r} + \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{h}{R'}} \log_e (1 - r) \right\} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

(10) 圧延トルク

圧延トルク G は、Sims によれば、次式で表わされる。

$$G = 2 k_g b R R' Q_g \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

ここで、 $k_g = \xi k_p$ 。ただし実際の計算では $\xi = 1$ とした。

$$Q_g = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{H-h}{R'}} - \sqrt{\frac{f h}{R'}} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

(11) 圧延動力

所要圧延動力(モータ馬力) E は、種々の表現法があるが、いずれにしろ次のような要因の関数となる。

$$E = E(R, H, h, k_p, b, N) \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

後述の影響係数算出の場合には、動力式として次式を用いている。

$$E = \zeta G N \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

ただし、 ζ は定数である。

2.3 影響係数

2.3.1 影響係数の解法

ある安定した圧延状態のもとで、操作量を変更したり、あるいは外乱が発生した場合の各スタンドの出口板厚の変化すなわち感度を知るとは制御を検討する上で有効である。圧延における感度を求める方法には、圧延現象式の絶対値計算において、パラメータの値を個々に変化させた結果の差として求める方法と、圧延理論式をテイラー展開してその一次項のみを選び、線形偏差式として扱う方法がある。前者はパラメータを変更するだけで

同一計算を繰返し行なうだけでよい。後者は圧延理論式を全微分する手間が必要であり、しかもある定常状態から他の定常状態への変化としてしか求められないが、多元連立方程式の未知数、既知数を適宜選択することにより、種々の影響係数が求められるとともに、各種制御法の設計、解析が可能となる。以下では、後者の影響係数について述べる。その詳細な導出過程は付録に示す。

前述の3種の圧延理論式(2.8), (2.1), (2.14)を全微分すると、次の基本方程式が得られる。^{23), 24)}

$$\begin{aligned}
 & (1+\sigma_{Ri})\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i + \sigma_{Hi}\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i + (1+\sigma_{hi})\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_i + \sigma_{ki}\left(\frac{\Delta k_p}{k_p}\right)_i + (1+\sigma_{bi})\left(\frac{\Delta b}{b}\right)_i \\
 & \quad + (1+\sigma_{Ni})\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i - \left(\frac{\Delta U}{U}\right)_i = 0 \\
 & \nu_{Ri}\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i + \nu_{Hi}\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i - \left(\frac{\Delta h}{h}\right)_i + \nu_{ki}\left(\frac{\Delta k_p}{k_p}\right)_i + \nu_{bi}\left(\frac{\Delta b}{b}\right)_i + \nu_{Ni}\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i \\
 & \quad + \nu_{si}\left(\frac{\Delta S}{h}\right)_i = 0 \\
 & \eta_{Ri}\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i + \eta_{Hi}\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i + \eta_{hi}\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_i + \eta_{ki}\left(\frac{\Delta k_p}{k_p}\right)_i + \eta_{bi}\left(\frac{\Delta b}{b}\right)_i + (1+\eta_{Ni})\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i \\
 & \quad - \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_i = 0 \qquad (i=1\sim n)
 \end{aligned}$$

..... (2.15)

ここで、 σ, ν, η : 偏微係数。

上式は、美坂の導出した基本方程式であり、この方程式を解くことにより影響係数を求めている。²⁴⁾

この基本方程式では、変形抵抗を一つの変数として扱っている。しかし、圧延仕様としては、変形抵抗の代わりに、炭素含有量と圧延材の温度が与えられる。このため、変形抵抗 k_p の式に含まれる炭素含有量 C と圧延温度 $T_K(^{\circ}K)$ をそれぞれ変数とするように改良を加え、基本方程式を導くと、次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 & (1+\sigma_{Ri})\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i + \sigma_{Hi}\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i + (1+\sigma_{hi})\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_i + \sigma_{Ti}\left(\frac{\Delta T}{T_K}\right)_i + \sigma_{Ci}\left(\frac{\Delta C}{C}\right)_i \\
 & \quad + (1+\sigma_{bi})\left(\frac{\Delta b}{b}\right)_i + (1+\sigma_{Ni})\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i - \left(\frac{\Delta U}{U}\right)_i = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \nu_{Ri} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i + \nu_{Hi} \left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i - \left(\frac{\Delta h}{h}\right)_i + \nu_{Ti} \left(\frac{\Delta T}{T_K}\right)_i + \nu_{Ci} \left(\frac{\Delta C}{C}\right)_i + \nu_{bi} \left(\frac{\Delta b}{b}\right)_i \\
& + \nu_{Ni} \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i + \nu_{Si} \left(\frac{\Delta S}{h}\right)_i = 0 \\
& \eta_{Ri} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i + \eta_{Hi} \left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i + \eta_{hi} \left(\frac{\Delta h}{h}\right)_i + \eta_{Ti} \left(\frac{\Delta T}{T_K}\right)_i + \eta_{Ci} \left(\frac{\Delta C}{C}\right)_i + \eta_{bi} \left(\frac{\Delta b}{b}\right)_i \\
& + (1 + \eta_{Ni}) \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i - \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_i = 0 \quad (i=1 \sim n)
\end{aligned}$$

..... (2.16)

上式の導出過程ならびに偏微係数 σ , ν , η の計算式の詳細を、付録に示す。

この3種の一次方程式は各スタンドにおいて成立し、 n スタンドタンデムミルの場合には $3n$ 元一次連立方程式となる。後述の具体例では $n=6$ (6スタンドタンデム圧延機) の場合を示す。上式は二定常状態間の変数の変動率の相互関係を規制するもので、外乱とそれに応ずる変数の変動率は上式を満足するものでなければならない。上記連立方程式に

含まれる変数は各スタンド毎に6個 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i, \left(\frac{\Delta h}{h}\right)_i, \left(\frac{\Delta T}{T_K}\right)_i, \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i, \left(\frac{\Delta S}{h}\right)_i, \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_i$ と、 $\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_i, \left(\frac{\Delta C}{C}\right)_i, \left(\frac{\Delta b}{b}\right)_i, \left(\frac{\Delta U}{U}\right)_i$ を合せて、 $6n+4$ 個となる。連立方程式を解く場合に、 $3n$ 個の未知数を選ぶことができる。未知数の選び方により各種制御方式の設計、解析が容易に行なえる。

上式をマトリックス形式で表わすと、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \end{bmatrix} \quad \text{..... (2.17)}$$

ここで、 \mathbf{A} は $3n \times 3n$ の偏微係数マトリックス、 \mathbf{Y} は $3n$ の未知数よりなる従属変数である。上式における変数の総数は $6n+4$ である。このうち $3n$ 個を従属変数に割り当てると残り $3n+4$ が独立変数に選べる。したがって \mathbf{B} は $3n \times (3n+4)$ の偏微係数マトリックス、 \mathbf{X} は $3n+4$ の独立変数となる。

上記連立方程式の従属変数として、必要な変数を選び、解くと次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \end{bmatrix} \quad \text{..... (2.18)}$$

電子計算機における解法としては、掃き出し法を用いている。

2.3.2 影響係数の利用法

影響係数は用途に応じて、未知数、既知数の選び方が違うが、以下に例として4種類を6スタンドの場合について、表2.1にしたがって述べる。

(1) 板厚影響係数

板厚影響係数は、圧延状態、とくに各スタンドの出口板厚が、外乱や設定誤差により、どのように影響を受けるかを知る場合に有効である。

外乱としては、ロール半径の変化 $(\frac{\Delta R}{R})_1$ 、圧延温度の変化 $(\frac{\Delta T}{T_K})_1$ 、炭素量の変化 $(\frac{\Delta C}{C})$ 、板幅の変化 $(\frac{\Delta b}{b})$ 、粗厚の変化 $(\frac{\Delta H}{H})_1 = (\frac{\Delta h}{h})_0$ 、ピボットスタンド速度変化 $(\frac{\Delta N}{N})_4$ 、ならびに圧下設定値の誤差 $(\frac{\Delta S}{h})_1$ がある。これらは、上式で既知数として選ばれる。すなわち、独立変数 X は次式となる。

$$X^T = \left[\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_6, \left(\frac{\Delta T}{T_K} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta T}{T_K} \right)_6, \left(\frac{\Delta C}{C} \right), \left(\frac{\Delta b}{b} \right), \left(\frac{\Delta h}{h} \right)_0, \right. \\ \left. \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_4, \left(\frac{\Delta S}{h} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta S}{h} \right)_6 \right] \dots\dots\dots (2.19)$$

上述の外乱の影響は圧延現象として、各スタンドの出口板厚 $(\frac{\Delta h}{h})_i$ 、ロール回転数 $(\frac{\Delta N}{N})_i$ ($i=1\sim 3, 5, 6$)、圧延動力 $(\frac{\Delta E}{E})_i$ 、体積速度 $(\frac{\Delta U}{U})$ に現われる。未知数として、これら18変数を選ぶと、従属変数 Y は次式となる。

$$Y^T = \left[\left(\frac{\Delta h}{h} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta h}{h} \right)_6, \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_3, \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_5, \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_6, \right. \\ \left. \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_6, \left(\frac{\Delta U}{U} \right) \right] \dots\dots\dots (2.20)$$

ロール回転数の変化のうち、第4スタンド $(\frac{\Delta N}{N})_4$ だけは独立変数に入れてある。ロール回転数の制御にはルーバ制御系が用いられ、通常第4スタンドをピボット(キー)スタンドにしている。したがって、外乱が及ぼすロール回転数への影響はルーバ系を介して、第4スタンド以外に現われる。解析上はどのスタンドをピボットに選んでもよい。

板厚影響係数の利用方法としては、独立変数のそれぞれが変化した場合の板厚変化を知る以外に、その結果を逆に用いて、目標の板厚精度を得るための圧下設定精度を

求める（後述）等，精度計算にも利用できる。

(2) 設定修正

$(\frac{\Delta R}{R})_i, (\frac{\Delta T}{T_K})_i, (\frac{\Delta C}{C}), (\frac{\Delta b}{b}), (\frac{\Delta h}{h})_0, (\frac{\Delta h}{h})_6$ 等の外乱ないしは変更に対して，負荷（圧延動力）配分の変化率を各スタンド一様に保つような，圧下位置ならびにロール回転数の設定修正値を求めたい場合には，下記の未知数を選べばよい。

$$Y^T = \left[\left(\frac{\Delta h}{h} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta h}{h} \right)_5, \left(\frac{\Delta S}{h} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta S}{h} \right)_6, \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_5, \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_1 = \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_2 = \dots = \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_6, \left(\frac{\Delta U}{U} \right) \right] \dots \dots \dots (2.21)$$

この解法(2)は，後述の偏差計算方式において，圧延仕様と標準圧延条件が相違する場合に圧延条件の偏差に応ずる圧下位置，ロール回転数の設定値修正に用いる。

(3) 負荷配分変更

仕上板厚は一定に保ちながら，各スタンドの負荷配分を変更したい場合がある。この場合には下記の未知数を選べばよい。

$$Y^T = \left[\left(\frac{\Delta h}{h} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta h}{h} \right)_5, \left(\frac{\Delta S}{h} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta S}{h} \right)_6, \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_6, \left(\frac{\Delta U}{U} \right) \right] \dots \dots \dots (2.22)$$

偏差計算方式において，各スタンドの動力配分を変更する場合に，この解法(3)による偏微係数が用いられる。

(4) 仕上板厚，ロール回転数変更

ロール回転数を一定に保ちつつ，仕上板厚のみを変更したい場合，あるいは仕上板厚を一定に保持しながらロール回転数を変更したい場合の圧下位置の変更量は，次式を未知数に選ぶことにより求めることができる。

$$Y^T = \left[\left(\frac{\Delta h}{h} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta h}{h} \right)_5, \left(\frac{\Delta S}{h} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta S}{h} \right)_6, \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_1 \sim \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_6, \left(\frac{\Delta U}{U} \right) \right] \dots \dots \dots (2.23)$$

この解法(4)は，圧延実験のとき利用価値が高い。例えば，次のような場合である。

- (a) 圧延の流れにおいて，サイズ変更に伴なり修正を，ロール回転数は前回圧延のままとし，圧下位置のみで実施したい場合。
- (b) 手動操業過程で，計算機内の数式モデルの良否を判断したいときに，数式モデル上のロール回転数を手動操業中のロール回転数に一致させることにより，圧下位置

表 2.1 影響係数解法の利用 (6 スタンドの場合)

解 法	未 知 数 (従属変数 Y)	既 知 数 (独立変数 X)
<p>(1) <u>板厚影響係数</u></p> <p>圧延母材, 圧下設定値, 圧延環境における各種外乱・誤差により発生する板厚, ロール回転数, 動力の変動を求める場合.</p>	$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i \quad (i=1\sim 3, 5, 6)$ $\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta U}{U}\right)$	$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta T}{TK}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta C}{C}\right), \left(\frac{\Delta b}{b}\right)$ $\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_1, \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_4$ $\left(\frac{\Delta S}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$
<p>(2) <u>設定修正</u> (S_{ij})</p> <p>負荷配分を一定に保ちつつ, 各種外乱に対し, 仕上板厚を一定量変更するために, 圧下位置とロール回転数の設定修正値を求める場合.</p>	$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 5)$ $\left(\frac{\Delta S}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i \quad (i=1\sim 5)$ $\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_i = \text{const.}$ $\left(\frac{\Delta U}{U}\right)$	$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta T}{TK}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta C}{C}\right), \left(\frac{\Delta b}{b}\right)$ $\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_1, \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_6$ $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_6$
<p>(3) <u>負荷配分変更</u> (S_{ij}'')</p> <p>仕上板厚を一定に保ちつつ, 負荷配分比を変更するために, 圧下位置とロール回転数の設定修正値を求める場合.</p>	$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 5)$ $\left(\frac{\Delta S}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta U}{U}\right)$	$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta T}{TK}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta C}{C}\right), \left(\frac{\Delta b}{b}\right)$ $\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_1, \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_6$ $\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$
<p>(4) <u>仕上板厚, 回転数変更</u> (S_{ij}')</p> <p>ロール回転数を一定に保ちつつ, 仕上板厚を変更するときや, 仕上板厚を一定に保ちつつ, ロール回転数を変更するとき, 圧下設定修正値を求める場合.</p>	$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 5)$ $\left(\frac{\Delta S}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta U}{U}\right)$	$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta T}{TK}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$ $\left(\frac{\Delta C}{C}\right), \left(\frac{\Delta b}{b}\right)$ $\left(\frac{\Delta H}{H}\right)_1, \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_6$ $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i \quad (i=1\sim 6)$

の計算値と実績値のみを比較したい場合。

- (c) 後述の偏差計算方式の適応制御のときに、ロール回転数の計算値と実測値との差を補正したい場合。

2.3.3 影響係数による解析法の妥当性

この影響係数による解析法が妥当かどうかは操業データを用いて確認されている。操業中に行なわれる圧延サイズの変更の前後の圧延は、各種圧延条件の変更であり、一つの定常状態から別の定常状態への移行と考えられる。この間に圧下位置、ロール回転数ならびに仕上板厚が変更される。上記基本方程式を解くことにより圧下位置とロール回転数の変更量に応じた仕上板厚の変化量を求めることができる。図 2.2 ではこれと実際の仕上板厚の変化量とを比較している。両者はきわめてよい一致を示しており、影響係数の手法が実用的であることがわかる。²⁴⁾³⁵⁾

2.3.4 具体例

上述(表 2.1)の解法(1)の数値例を、板幅 $b = 1250\text{mm}$ 、仕上板厚 $h_p = 1.6, 3.2, 4.4, 7.0\text{mm}$ の場合について、以下に示す。さらにこれらの数値を用いて、圧下設定精度の算出法についても述べる。

(1) 基本方程式の係数値例

基本方程式の偏微係数 σ, ν, η の具体的な数値を表 2.2 (a), (b) に示す。上段の入力データを基に、 $R'_1, Y_1, f_1, \dot{\epsilon}_1, k_{p1}, G_1$ 等の値を求め、 σ, ν, η を算出している。

(2) 板厚影響係数の数値例

板厚影響係数(解法(1))の数値例を、表 2.3 (a)~(d) に示す。

その内容を表 2.3 (a) を例にとり説明する。同表の記号は、本論文の記号と次のように対応する。

INPUT DATA

S H(I) : h_i (mm)
R(I) : R_i (rpm)
P(I) : P_i (t)
N(I) : N_i (rpm)

$$\begin{aligned}
TK(I) &: T_{Ki} \quad (^{\circ}K) \\
MI(I) &: K_i \quad (t/mm) \\
HO &: h_0 = 20 \text{ mm} \\
HF &: h_F = 1.6 \text{ mm} \\
B &: b = 1250 \text{ mm} \\
CBON &: C = 0.10 \% \\
TS &: T_S = 1060 ^{\circ}C \\
TF &: T_F = 821.4 ^{\circ}C
\end{aligned}$$

SOLUTION

未知数 (従属変数 Y)

$$DH(1) \sim DH(6) : \Delta h_1 \sim \Delta h_6$$

$$DN/N(1) \sim DN(6) : \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_1 \sim \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_6 \quad (\text{ただし } i=4 \text{ を除く})$$

$$DU/U : \left(\frac{\Delta U}{U}\right)$$

$$DHP/HP(1) \sim DHP/HP(6) : \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_1 \sim \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_6$$

既知数 (独立変数 X)

$$DR/R(1) \sim DR/R(6) : \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 \sim \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_6$$

$$DS(1) \sim DS(6) : \Delta S_1 \sim \Delta S_6$$

$$DTK/TK(1) \sim DTK/TK(6) : \left(\frac{\Delta T}{T_K}\right)_1 \sim \left(\frac{\Delta T}{T_K}\right)_6$$

$$DC/C : \left(\frac{\Delta C}{C}\right)$$

$$DH(0) : \Delta H_1 = \Delta h_0$$

$$DB/B : \left(\frac{\Delta b}{b}\right)$$

$$DN/N(4) : \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_4$$

本表は、粗厚 $H_1 = 20 \text{ mm}$ から $h_F = 1.6 \text{ mm}$ に圧延するスケジュールにおいて、式 (2.19) で示される独立変数 X のいずれかの変数が変化した場合に、式 (2.20) で示される従属変数 Y の各々がどのような影響を受けるかを示している。表の中では、

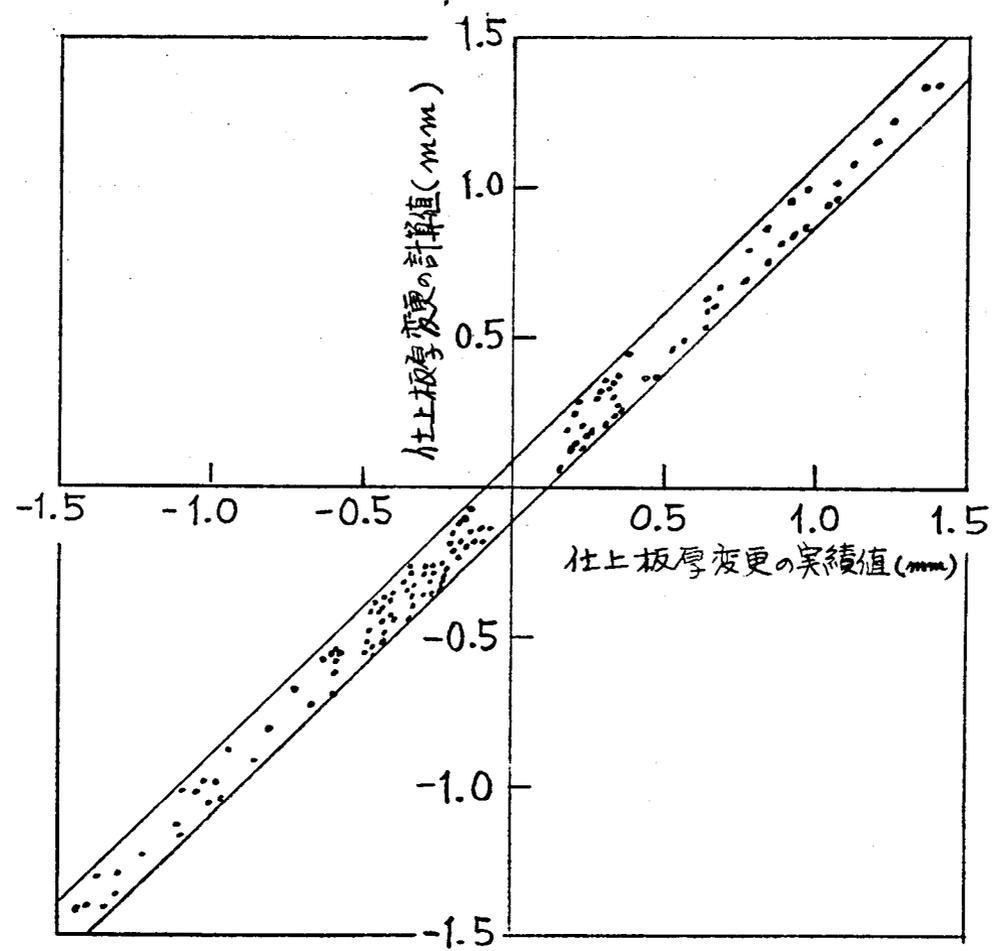


図 2.2 圧延条件変化に対する仕上板厚変更量の実績値と予測値

表 2.3 (b) 板厚影響係數 ($b = 1250 \text{ mm}$, $R_F = 3.2 \text{ mm}$)

TRANSFER COEFFICIENTS OF HOT STRIP MILL, USED STAND 123456									
INPUT DATA		1	2	3	4	5	6		
出口板厚 S : SH(1) (mm)		14.2986	9.1111	6.3088	4.6254	3.7154	3.2000		
出口板寬 B : G(1) (mm)		340.0000	340.0000	340.0000	340.0000	340.0000	350.0000		
入口板厚 P : F(1) (t)		1864.5792	1663.9304	1397.1132	1226.0618	880.0780	619.2772		
入口板寬 N : A(1) (rpm)		43.4425	68.5343	100.1402	137.9636	174.7248	200.0000		
入口溫度 T_i : TK(1) (°K)		1247.0000	1232.3000	1217.6000	1202.9000	1188.2000	1173.5000		
出口溫度 T_o : MI(1) (t/mm)		500.0000	500.0000	500.0000	500.0000	500.0000	500.0000		
粗率 K : HN (mm)		24.00	粗率 K : HF (mm): 3.20	板寬 b : B (mm): 1250.00					
粗率 c : CRON (%)		0.10	入口溫度 T_i : TS (°C): 1050.00	出口溫度 T_o : TF (°C): 885.80					
SOLUTION									
	DH(1)	DH(2)	DH(3)	DH(4)	DH(5)	DH(6)	DN/N(1)	D1/N(2)	FN/N(3)
DR/R(1)	1.789294	0.531822	0.210850	0.102298	0.058990	0.038434	-1.094772	-0.044482	-0.013542
DR/R(2)	0.020268	1.362171	0.540054	0.262019	0.151093	0.098441	0.060894	-1.070811	-0.034686
DR/R(3)	0.036278	0.037327	0.966686	0.469009	0.270453	0.176207	0.109000	0.107341	-1.019617
DR/R(4)	0.386634	0.397803	0.349887	0.981646	0.636129	0.457414	1.161653	1.143979	1.131552
DR/R(5)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.418839	0.264874	0.000000	0.000000	0.000000
DR/R(6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.260898	0.000000	0.000000	0.000000
DS(1)	0.660959	0.195563	0.077931	0.037810	0.021803	0.014205	-0.030169	-0.016441	-0.005005
DS(2)	0.009059	0.541625	0.214736	0.104184	0.060077	0.039142	0.024213	-0.024614	-0.013792
DS(3)	0.015598	0.017077	0.442273	0.214579	0.123736	0.080617	0.049869	0.049110	-0.006388
DS(4)	0.020243	0.020828	0.018319	0.355216	0.203203	0.131392	0.060822	0.059896	0.059246
DS(5)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.287852	0.182038	0.000000	0.000000	0.000000
DS(6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.253091	0.000000	0.000000	0.000000
DTK/TK(1)	-5.943089	-1.767421	-0.700722	-0.339971	-0.195044	-0.127727	0.272251	0.147828	0.045005
DTK/TK(2)	-0.064473	-4.467610	-1.771255	-0.859364	-0.405551	-0.322864	-0.199720	0.204132	0.113761
DTK/TK(3)	-0.119825	-0.122257	-3.166236	-1.536170	-0.885829	-0.577141	-0.357012	-0.351561	0.046806
DTK/TK(4)	-0.132574	-0.135404	-0.119974	-2.320284	-1.527410	-0.859357	-0.398323	-0.392263	-0.388002
DTK/TK(5)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.400300	-0.985550	0.000000	0.000000	0.000000
DTK/TK(6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.996452	0.000000	0.000000	0.000000
DC/C	0.176017	0.187628	0.169833	0.152636	0.132593	0.114986	0.021263	0.012677	0.006081
DN(0)	0.205509	0.061117	0.024231	0.011756	0.006779	0.034417	-0.015225	-0.005112	-0.001556
DR/A	2.587657	2.634260	2.285960	1.058323	1.631928	1.364554	0.256561	0.140878	0.062866
DN/A(4)	0.344911	0.354875	0.312129	0.271804	0.229774	0.194436	1.036294	1.020527	1.009441
	DN/J	DN/V(5)	DN/V(6)	DHP/HP(1)	DHP/HP(2)	DHP/HP(3)	DHP/HP(4)	DHP/HP(5)	DHP/HP(6)
DR/R(1)	0.024244	0.007088	0.011391	-0.207860	0.231012	0.117866	0.073930	0.064761	0.062704
DR/R(2)	0.062098	0.015155	0.029177	0.065346	-0.294211	0.301893	0.189359	0.165719	0.160605
DR/R(3)	0.111153	0.032498	0.052226	0.116967	0.114396	-0.351330	0.338948	0.296634	0.287480
DR/R(4)	1.184606	1.005091	1.035543	1.246565	1.261798	1.263320	0.686657	1.554362	1.574842
DR/R(5)	0.000000	-1.093868	-0.089307	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.622094	0.277637
DR/R(6)	0.000000	0.000000	-1.064492	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.661274
DS(1)	0.009961	0.002620	0.004210	-0.149407	0.085383	0.043564	0.027325	0.023914	0.023176
DS(2)	0.024691	0.007219	0.011601	0.025983	-0.205860	0.120038	0.075293	0.065893	0.063860
DS(3)	0.050854	0.014868	0.023894	0.053514	0.054168	-0.271795	0.156074	0.135714	0.131526
DS(4)	0.062023	0.002798	0.017992	0.065267	0.066055	0.066145	-0.355650	0.202931	0.195075
DS(5)	0.000000	-0.061010	-0.061377	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.508421	0.190809
DS(6)	0.000000	0.000000	-0.061497	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.891433
DTK/TK(1)	-0.080572	-0.023557	-0.037857	-1.028051	-0.767711	-0.391707	-0.245694	-0.215021	-0.208386
DTK/TK(2)	-3.203666	-0.059546	-0.095694	-0.214319	-0.714567	-0.990139	-0.621054	-0.543521	-0.526748
DTK/TK(3)	-0.364067	-0.195442	-0.171060	-0.383109	-0.387799	-0.514020	-1.110175	-0.971580	-0.941597
DTK/TK(4)	-0.406194	-0.019316	-0.118553	-0.427439	-0.432662	-0.433184	-0.225279	-1.328568	-1.275318
DTK/TK(5)	0.000000	0.297529	0.298579	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.393556	-0.928221
DTK/TK(6)	0.000000	0.000000	0.218301	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.542502
DC/C	0.031712	-0.003357	-0.004142	0.059782	0.067311	0.063586	0.065237	0.079543	0.100814
DN(0)	0.002786	0.000815	0.001309	0.078247	0.025548	0.013545	0.000496	0.007435	0.007206
DR/A	1.409773	-0.025187	-0.019007	0.038880	0.946630	0.964659	0.925937	1.114372	1.376571
DN/A(4)	1.055770	0.995668	0.995801	1.112043	1.125631	1.125990	1.120182	1.145640	1.181036

表 2.3 (c) 板厚影響係數 ($b = 1250 \text{ mm}$, $P_F = 4.4 \text{ mm}$)

TRANSFER COEFFICIENTS OF HOT STRIP MILL, USED STAND 123456									
INPUT DATA	1	2	3	4	5	6			
SH(1)	16.6326	11.4542	8.3654	6.3763	5.1368	4.4000			
R(1)	340.0000	340.0000	340.0000	340.0000	340.0000	350.0000			
P(1)	1511.1931	1399.5553	1196.9672	1056.6424	855.4414	630.3957			
N(1)	42.8959	62.4248	86.1842	113.8472	142.7968	164.0000			
TK(1)	1238.0000	1225.8833	1213.7667	1201.6500	1189.5333	1177.4167			
MI(1)	500.0000	500.0000	500.0000	500.0000	500.0000	500.0000			
Hn	25.00	HF	4.40	B	1250.00	500.0000			
CBON	0.10	TS	1040.00	TF	892.30				
SOLUTION									
	DH(1)	DH(2)	DH(3)	DH(4)	DH(5)	DH(6)	DN/N(1)	DN/N(2)	DN/N(3)
DR/R(1)	1.455529	0.411798	0.150004	0.066244	0.034301	0.020247	-1.071702	-0.032445	-0.009315
DR/R(2)	0.009600	1.209618	0.440623	0.194586	0.100755	0.059472	0.034225	-1.060107	-0.027363
DR/R(3)	0.019984	0.021713	0.917241	0.405068	0.209740	0.123803	0.071244	0.070490	-1.022228
DR/R(4)	0.313112	0.340198	0.368744	0.364576	0.584925	0.400373	1.116310	1.104458	1.096726
DR/R(5)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.490992	0.279794	0.000000	0.000000	0.000000
DR/R(6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.322756	0.000000	0.000000	0.000000
DS(1)	0.691014	0.195501	0.071215	0.031449	0.016284	0.009612	-0.029299	-0.015404	-0.004422
DS(2)	0.084748	0.598328	0.217951	0.096250	0.049838	0.029417	0.016929	-0.026023	-0.013535
DS(3)	0.011261	0.012236	0.516889	0.229266	0.118194	0.062766	0.040149	0.039723	-0.009654
DS(4)	0.015457	0.016794	0.015241	0.441583	0.226611	0.132447	0.055106	0.054521	0.054139
DS(5)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.369957	0.210826	0.000000	0.000000	0.000000
DS(6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.329589	0.000000	0.000000	0.000000
DTK/TK(1)	-5.051395	-1.431968	-0.521618	-0.230354	-0.119275	-0.070404	0.215313	0.112824	0.032392
DTK/TK(2)	-0.032881	-4.143193	-1.509225	-0.466497	-0.345106	-0.203705	-0.117228	0.180993	0.093722
DTK/TK(3)	-0.069284	-0.074191	-3.134186	-1.384104	-0.716677	-0.423031	-0.243447	-0.240862	0.059305
DTK/TK(4)	-0.085176	-0.092544	-0.083988	-2.427502	-1.245895	-0.728180	-0.303669	-0.500445	-0.298341
DTK/TK(5)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.691915	-0.964155	0.000000	0.000000	0.000000
DTK/TK(6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.136957	0.000000	0.000000	0.000000
DC/C	0.150557	0.168175	0.156968	0.143749	0.11643	0.014122	0.008691	0.003804	
DH(0)	0.210212	0.059473	0.021664	0.009567	0.004954	0.002924	-0.014900	-0.004666	-0.001345
DP/E	2.161425	2.330448	2.094912	1.844113	1.583512	1.333288	0.171403	0.090915	0.040049
DN/N(4)	0.287158	0.311999	0.283153	0.252109	0.218976	0.186274	1.023779	1.012909	1.005818
	DU/U	DN/N(5)	DN/N(6)	DHP/HP(1)	DHP/HP(2)	DHP/HP(3)	DHP/HP(4)	DHP/HP(5)	DHP/HP(6)
DR/R(1)	0.011817	0.004392	0.006772	-0.180425	0.210931	0.094399	0.052002	0.037217	0.032337
DR/R(2)	0.034712	0.012902	0.019892	0.036836	-0.249395	0.277258	0.152750	0.109320	0.094987
DR/R(3)	0.072259	0.026857	0.041409	0.076682	0.078008	-0.293063	0.317979	0.227571	0.197734
DR/R(4)	1.132172	1.010850	1.036322	1.201472	1.222252	1.228540	0.776468	1.500801	1.473513
DR/R(5)	0.000000	-1.078961	-0.070433	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.516500	0.295286
DR/R(6)	0.000000	0.000000	-1.058692	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.559844
DS(1)	0.005610	0.002095	0.003215	-0.167856	0.100140	0.044811	0.024688	0.017669	0.015352
DS(2)	0.017170	0.006382	0.009839	0.019221	-0.220218	0.137144	0.075557	0.054074	0.046985
DS(3)	0.041720	0.015135	0.023335	0.043212	0.043959	-0.284911	0.129189	0.128242	0.111428
DS(4)	0.055889	0.006709	0.022791	0.059310	0.060335	0.060646	-0.361466	0.225231	0.191661
DS(5)	0.000000	-0.057134	0.053071	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.562544	0.222498
DS(6)	0.000000	0.000000	-0.058398	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.799910
DTK/TK(1)	-0.041092	-0.015273	-0.023548	-1.156700	-0.733432	-0.323224	-0.180829	-0.129415	-0.112447
DTK/TK(2)	-0.113894	-0.044191	-0.068134	-0.126172	-0.893162	-0.947658	-0.523251	-0.374445	-0.325350
DTK/TK(3)	-0.246906	-0.091771	-0.141493	-0.262019	-0.264551	-0.725436	-1.086525	-0.777604	-0.675651
DTK/TK(4)	-0.307984	-0.037622	-0.126022	-0.325836	-0.332458	-0.334199	-0.505491	-1.233933	-1.054392
DTK/TK(5)	0.000000	0.261450	0.242710	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.199419
DTK/TK(6)	0.000000	0.000000	0.202489	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.041814	-1.017548
DC/C	0.021749	-0.002669	-0.003513	0.054940	0.065735	0.069757	0.060240	0.075534	0.092097
DH(0)	0.001707	0.003634	0.000978	0.099256	0.030463	0.013632	0.007510	0.005375	0.004670
DP/E	1.280605	-0.023002	-0.023141	0.772463	0.948987	0.965420	0.951194	1.025296	1.221849
DN/N(4)	1.038326	0.996403	0.995962	1.101882	1.120939	1.126706	1.124201	1.133737	1.160445

表 2.3 (d) 板厚影響係數 ($b = 1250 \text{ mm}$, $t_F = 7.0 \text{ mm}$)

TRANSFER COEFFICIENTS OF HOT STRIP MILL, USED STAND 123456									
INPUT DATA	1	2	3	4	5	6			
SH(I)	20.1540	15.2050	11.8780	9.5345	7.9728	7.0000			
F(I)	340.0000	340.0000	340.0000	340.0000	340.0000	350.0000			
F(I)	1136.4348	1091.5867	956.8523	855.1929	697.7363	517.0416			
N(I)	50.8206	67.3627	86.6687	108.4269	130.6575	146.0000			
TK(I)	1240.0000	1231.9833	1223.9567	1215.9500	1207.9333	1199.9167			
MI(I)	500.0000	500.0000	500.0000	500.0000	500.0000	500.0000			
HO	27.00	HF	7.00	B	1250.00				
CBON	0.10	IS	1040.00	TF	218.90				
SOLUTION									
	DH(1)	DH(2)	DH(3)	DH(4)	DH(5)	DH(6)	DN/N(1)	DN/N(2)	DN/N(3)
DR/R(1)	1.097987	0.283903	0.090561	0.034157	0.014929	0.007422	-1.047328	-0.020274	-0.005272
DR/R(2)	0.003287	0.983200	0.313625	0.118290	0.051732	0.025735	0.014937	-1.043816	-0.018257
DR/R(3)	0.009397	0.002580	0.801344	0.302242	0.132104	0.065678	0.030165	0.037922	-1.020568
DR/R(4)	0.235799	0.267011	0.251429	0.179434	0.475477	0.297675	1.071667	1.064837	1.060962
DR/R(5)	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.488098	0.233414	0.000000	0.000000	0.000000
DR/R(6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.332775	0.000000	0.000000	0.000000
DS(1)	0.723366	0.189280	0.060377	0.022772	0.009953	0.004949	-0.027047	-0.013517	-0.003515
DS(2)	0.042216	0.662797	0.211422	0.079742	0.034854	0.017328	0.010069	-0.025717	-0.012307
DS(3)	0.028343	0.007236	0.605282	0.228223	0.099783	0.049619	0.028827	0.028644	-0.012367
DS(4)	0.010140	0.011569	0.010812	0.549811	0.238099	0.115897	0.046086	0.045792	0.045626
DS(5)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.493146	0.235833	0.000000	0.000000	0.000000
DS(6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.456674	0.000000	0.000000	0.001100
DTK/TK(1)	-3.978583	-1.038186	-0.331165	-0.124905	-0.054594	-0.027142	-0.148796	0.074139	0.019278
DTK/TK(2)	-0.011823	-3.537045	-1.128261	-0.425545	-0.185928	-0.092473	-0.053735	0.137732	0.065678
DTK/TK(3)	-0.030031	-0.034329	-2.871495	-1.083039	-0.473376	-0.235349	-0.136758	-0.135867	0.059143
DTK/TK(4)	-0.043757	-0.049920	-0.046657	-2.367087	-1.025124	-0.503230	-0.198866	-0.197509	-0.196890
DTK/TK(5)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.758640	-0.941019	0.000000	0.000000	0.000000
DTK/TK(6)	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.224572	0.000000	0.000000	0.000000
DC/C	0.115878	0.134802	0.128578	0.119327	0.105863	0.089693	0.007364	0.003867	0.001729
DH(0)	0.210251	0.054864	0.017501	0.006601	0.002885	0.001434	-0.013865	-0.003918	-0.001019
DR/R	1.582981	1.910843	1.775624	1.603124	1.385093	1.143274	0.074499	0.046271	0.019513
DN/N(4)	0.222862	0.254252	0.237634	0.216004	0.187872	0.156280	1.012868	1.006413	1.002751
	DU/U	DN/N(5)	DN/N(6)	DHP/HP(1)	DHP/HP(2)	DHP/HP(3)	DHP/HP(4)	DHP/HP(5)	DHP/HP(6)
DR/R(1)	0.004352	0.002136	0.003120	-0.153341	0.187810	0.070161	0.031684	0.019863	0.014093
DR/R(2)	0.015073	0.007398	0.010804	0.016137	-0.199329	0.242978	0.109726	0.065325	0.048806
DR/R(3)	0.039513	0.018903	0.627605	0.041232	0.042141	-0.230772	0.286360	0.166912	0.124704
DR/R(4)	1.081429	1.015273	1.035284	1.157783	1.183313	1.192835	0.863774	1.479497	1.409062
DR/R(5)	0.000000	-1.050820	-0.039263	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.375763	0.315825
DR/R(6)	0.000000	0.000000	-1.638579	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.411802
DS(1)	0.002902	0.001424	0.002080	-0.196770	0.125237	0.046777	0.021124	0.012576	0.009396
DS(2)	0.010161	0.004987	0.007283	0.010876	-0.241745	0.163797	0.073969	0.044037	0.032901
DS(3)	0.022220	0.014278	0.029851	0.031144	0.031831	-0.302279	0.211766	0.126074	0.094193
DS(4)	0.045506	0.011054	0.027013	0.049789	0.056887	0.051297	-0.376890	0.279484	0.261430
DS(5)	0.000000	-0.049139	-0.039670	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.561706	0.319098
DS(6)	0.000000	0.000000	-0.051202	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.801894
DTK/TK(1)	-0.015916	-0.007812	-0.011408	-1.300029	-0.686752	-0.256567	-0.115862	-0.068978	-0.051535
DTK/TK(2)	-0.054224	-0.026614	-0.038866	-0.058953	-1.109137	-0.974109	-0.394737	-0.235055	-0.175578
DTK/TK(3)	-0.139004	-0.067735	-0.098917	-0.147748	-0.151026	-0.086149	-1.004630	-0.598103	-0.446858
DTK/TK(4)	-0.200678	-0.043545	-0.116749	-0.214847	-0.219594	-0.221351	-0.846176	-1.203722	-0.867707
DTK/TK(5)	0.000000	0.175616	0.141470	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.461034	-1.137956
DTK/TK(6)	0.010300	0.000000	0.137557	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.334284
DC/C	0.012162	-0.000944	-0.000743	0.049565	0.069859	0.059547	0.070003	0.076932	0.091336
DH(0)	0.000841	0.000413	0.000603	0.133894	0.036292	0.013553	0.005123	0.003645	0.002723
DR/R	1.163991	-0.003217	-0.001574	0.721275	0.904758	0.973179	0.908390	1.060173	1.234034
DN/N(4)	1.022094	0.998747	0.999519	1.094259	1.118388	1.127388	1.128264	1.138458	1.162533

最左例に示した各独立変数の及ぼす影響が、係数値として、対応する行に印字されている。たとえば $(\frac{\Delta R}{R})_1$ の Δh_1 に及ぼす影響は、

$$\Delta h_1 = 2.324026 \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1$$

ΔS_1 の Δh_6 に及ぼす影響は、

$$\Delta h_6 = 0.025401 \Delta S_1$$

の関係にあることが読みとれる。

本表から読みとれる特徴的なことは、次の通りである。

- (a) $(\frac{\Delta R}{R})_i, \Delta S_i, (\frac{\Delta T}{T_K})_i$ の板厚 h_i , 回転数 N_i , 圧延動力 E_i への影響は、当該スタンドに一番大きく現われる。またその影響は体積速度一定の関係で、上流、下流のスタンドへ伝搬している。ただし、第5、第6スタンドで発生した外乱の影響は、第4スタンドがキースタンドのため、上流スタンドには伝搬していない。
- (b) 圧下位置変更 ΔS_1 の板厚 h_1 への影響は、 ΔS_1 の Δh_1 へ及ぼす影響が大きく、続いて ΔS_2 の Δh_2 への影響の順になっているが、 Δh_6 への ΔS_1 の影響は、下流スタンドの方が大きい。
- (c) 本表により、独立変数を変化させたときの仕上板厚への影響 Δh_6 が知れる。 ΔS_1 の Δh_6 へ及ぼす影響(表中、枠で示してある)を利用すると、後述のように、圧下設定精度が算出できる。
- (d) 圧延温度が高いと板厚は薄くなり、炭素含有量が多くなると板厚は厚くなる。
- (e) 粗厚 ΔH_1 の影響は、 $\Delta h_1, (\frac{\Delta N}{N})_i, (\frac{\Delta E}{E})_i$ のいずれに関しても、上流スタンドの方が大きい。
- (f) 板幅 $(\frac{\Delta b}{b})$ の影響は、 $\Delta h_1, (\frac{\Delta N}{N})_i$ に関しては、上流スタンドの方が大きい。

(3) 圧下設定精度の算出法

圧下設定精度の求め方を上記数値例を用いて述べる。表2.3(a)~(d)内に記入した枠内には、 ΔS_1 の Δh_F に及ぼす影響係数が載っている。この係数 C_{F1} は、次式のように表わせ、その値は、表2.4のようになる。

$$\Delta h_F = C_{F1} \Delta S_1 \quad (i=1, 2, \dots, F) \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

この表から、仕上板厚への影響 Δh_F は上流スタンドよりも下流スタンドの圧下位置

変化の方が大きいことがわかる。上式は各スタンドの圧下位置変化の影響を表わしているが、全スタンドの影響を考えると、仕上板厚誤差は次式で表わされる。

$$\Delta h_F = \sum_{i=1}^F C_{Fi} \Delta S_i \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

いま、各スタンド同量の圧下設定誤差が発生したと仮定すると、次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_F &= \left(\sum_{i=1}^F C_{Fi} \right) \Delta S \\ \Delta S &= \Delta S_i \quad (i=1, 2, \dots, F) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.26)$$

この式から、仕上板厚の許容誤差 Δh_F を得るための各スタンド共通の圧下設定精度 ΔS は、次式のように得られる。

$$\Delta S = \frac{1}{\sum_{i=1}^F C_{Fi}} \Delta h_F \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

仕上板厚の許容誤差として、(a)圧延寸法にかかわらず、絶対量、例えば $\Delta h_F = 10 \mu$ が要求される場合と、(b)相対誤差、例えば1%が要求される場合の2つを仮定して、圧下設定精度を計算してみる。計算結果を表2.4に示す。

(a) 絶対誤差 $\Delta h_F = 10 \mu$ の場合

表2.4の計算結果の中では、圧下設定精度の厳しいのは、 $h_F = 7.0 \text{ mm}$ の場合で、 $\Delta S = 11 \mu$ となる。

(b) 相対誤差 1% , $\Delta h_F = 0.01 h_F$ の場合

この場合、圧下設定精度の厳しいのは、 $h_F = 1.6 \text{ mm}$ で、 $\Delta h_F = 16 \mu$, $\Delta S = 35 \mu$ となる。

以上は、一つの計算法を示したが、圧下設定精度の求め方に関して、次のことがいえる。

- (a) 上流スタンドの圧下設定精度は、下流スタンドよりもゆるくしてもよい。
- (b) 各スタンドの圧下設定精度は、仕上板厚の精度が絶対誤差で要求される場合は h_F が大きいほど、相対誤差で要求される場合は h_F が小さいほど厳しい。
- (c) 圧下設定精度は、発生誤差が各スタンド同方向、同量と仮定した場合には、上の例のようになるが、誤差がランダムに発生する場合には、設定精度は上の例よりもゆるくなる。

表 2.4 板厚影響係数と压下位置設定精度

板幅 b	1250 mm			
仕上板厚 h_F	1.6 mm	3.2 mm	4.4 mm	7.0 mm
C_{F1}	0.0254	0.0142	0.0096	0.0049
C_{F2}	0.0521	0.0391	0.0294	0.0173
C_{F3}	0.0775	0.0806	0.0698	0.0496
C_{F4}	0.0911	0.1314	0.1324	0.1169
C_{F5}	0.0995	0.1820	0.2108	0.2358
C_{F6}	0.1135	0.2531	0.3286	0.4567
$\sum_{i=1}^6 C_{Fi}$	0.4591	0.7004	0.7806	0.8812
$\Delta S = \frac{0.01}{\sum_{i=1}^6 C_{Fi}}$	0.022 mm	0.014 mm	0.013 mm	0.011 mm
$\Delta S = \frac{0.01 h_F}{\sum_{i=1}^6 C_{Fi}}$	0.035 mm	0.046 mm	0.056 mm	0.079 mm
$C_{Fi} = \frac{\Delta h_F}{\Delta S_i}$				

- (d) 圧下設定装置の精度は、圧延寸法の全範囲にわたって一番厳しい条件をみいだし、必要仕上板厚精度に応じる値を上述のような方法で算出する必要がある。

2.4 結 言

仕上圧延機のミルセットアップに当っては、後述のように各種の方式が考えられるが、いずれの方式でも圧延現象の把握とモデル化が必要である。本章では仕上圧延機のミルセットアップの数式モデルの基礎として、R.B.Simsの熱間圧延理論を中心に、圧延理論を概観するとともに、圧延現象の把握、解析の一手法として、圧延理論式の感度解析法である影響係数について、その利用形態と有効性について述べた。

影響係数の導出に当って、美坂は変形抵抗を一つの変数として扱っていたが、²⁴⁾ 圧延仕様として与えられるのは、変形抵抗ではなく、炭素含有量と圧延材温度であることを考慮し、炭素含有量と圧延温度がそれぞれ変数として扱えるように改良を加えた。その導出の詳細は付録に示した。

具体例として、影響係数の数値例を4例示すとともに、その数値を利用して、各スタンドの圧下設定精度を算出する方法について論じた。板厚影響係数の数値例を考察することにより、次の事項が明らかとなった。

- (1) 各スタンドで現われる圧延条件の変化(ロール半径、圧下位置、圧延温度のそれぞれの変化)の板厚、ロール回転数、圧延動力に及ぼす影響は、変化の発生した当該スタンドに一番大きく現われる。またその影響が、上流、下流スタンドへ伝搬していることが知れる。ただし、第5、第6スタンドで発生した変化の影響は、第4スタンドがキースタンドのため上流スタンドには伝搬していない。
- (2) 圧延温度が高いと、板厚は薄くなり、炭素含有量が多くなると板厚は厚くなる。
- (3) 粗厚および板幅の影響は、概して上流スタンドの方が大きい。

以上のように、板厚影響係数は、圧延時の当然の現象を示しているが、各変化の板厚への影響、特に仕上板厚への影響の定量的な値は、圧延機の制御を考える上で有益である。この板厚影響係数のうち、各スタンドの圧下位置変化の仕上板厚へ及ぼす影響値を利用すると、所要板厚精度を得るための圧下設定精度が算出できる。

圧下設定精度算出の具体的検討によって、次のことが明らかになった。

- (1) 上流スタンドの圧下設定精度は、下流スタンドよりもゆるくてもよい。
- (2) 各スタンドの圧下設定精度は、仕上板厚の精度が絶対誤差で要求される場合は、仕

上板厚が大きいほど、相対誤差で要求される場合は、仕上板厚が小さいほど厳しい。

圧下設定装置の精度は、このような検討方法を用い、設定誤差の発生状況を考慮しながら、圧延寸法の全範囲にわたって一番厳しい条件を見い出して、必要仕上板厚精度に応じる値を算出する必要がある。

本章で述べた圧延理論と、影響係数による解析法は、次章以降の検討の基礎を与えるものである。

第 3 章 偏差計算方式によるミルセットアップ

第3章 偏差計算方式によるミルセットアップ

3.1 緒言

仕上圧延機のミルセットアップ方式としては、各種の方法が考えられる。本章では、まずこれらの方法を分類し、主として偏差計算方式と絶対値計算方式の意味を明確にし、続いて、偏差計算方式に特徴的なことである標準パターンの個数や作成法、ならびに圧延条件と標準パターンの相違に対する補正計算について論じる。補正計算の方法としては、前述の影響係数を用いた偏差計算法を採用する。実験を通して、偏差計算方式によるミルセットアップの長所短所を明らかにする。

ミルセットアップ方式の実験に当っては、最初に偏差計算方式について実施することにした。その理由は、偏差計算方式は運転員の操業に一番近い計算方式であり、運転員の経験則が容易に取り込めると同時に、補正計算式のでき上がった圧延条件から段階的に適用できると考えたからである。実験は、制御用計算機を用い、仕上圧延機の運転室に6スタンド分の圧下位置とロール回転数の計算値を数字管で表示し、その表示値と操業値とを見較べて計算値の良否を確認する方法（表示実験と称す）を採った。良否の確認にも工夫のいることがわかり、3種類の実験方法を案出した。

3.2 仕上圧延機セットアップ方式の分類

ミルセットアップは各圧延機の圧下位置とロール回転数の設定を行なうが、その方式としては操業結果をそのままパターンとして覚えておくパターン方式（Stored schedule setup）と、数式モデルにより設定値と直接計算により求める方式（Calculated setup）の2種に大別される。代表的な圧延機の計算機制御におけるミルセットアップ方式として、開発当初にはパターン方式が用いられ、数年後には計算による方式が採用されるというのが世界的な傾向である。^{3.1)~3.3)}計算よる方式にも種々の変形が考えられる。数値制御の軌跡追従方式として絶対値計算方式（直接法）と偏差計算方式（増分法）があるように、ミルセットアップの計算方式でも両方式が考えられる。しかし、これらの各方式の構成や長短を詳しく論じた文献はほとんどない。

現在用いられているセットアップ方式は通常、次の2種類に分類されている。

- (1) パターン方式（Stored schedule setup）
- (2) 計算による方式（Calculated setup）

これらの方式の境界、定義は明確でないが、本論文では次のように解釈しておく。

パターン方式はミル設定値の圧下位置、ロール回転数をパターンとして計算機内に記憶しておく方式である。この方法は、製品の種類が少ないときには操作実績を計算機内に格納するのみでよく、計算機制御の着手が早いという長所を持つ。しかし、わが国の熱間圧延機の場合には品種が多く、全パターンを計算機内に格納することは容易ではない。格納するパターンを選択し、残りを補間計算で求めることができるが、それは本論文では計算による方式の分類に入れる。パターン方式が計算機制御の着手当初にのみ用いられ、間もなく計算による方式にとって代わられるということは融通性と発展性に欠けることを意味している。

計算による方式は圧延現象を何らかの数式モデルで表わし、計算により設定値を求める方式である。この方式の中には種々の変形が考えられる。われわれは計算機制御の開発過程で次の2種の方法を経験した。^{3.4)~3.5)}第一はパターン方式に偏差計算を加えたもので、圧下位置とロール回転数を層別して標準パターンとして計算機内に格納しておき、圧延条件の違いに対して偏差計算を行なう偏差計算方式である。第二は圧延現象を忠実に記述できる数式モデルを用い、設定値を絶対量で直接求める絶対値計算方式である。

偏差計算方式によるミルセットアップについては、本章で論じ、絶対値計算方式については、次章で論じる。

3.3 偏差計算方式

偏差計算方式のミルセットアップは、圧延条件をその主要な変数である鋼種、仕上板厚、板幅、使用スタンド数により層別して、標準圧延条件を設定して、これに応じる圧下位置とロール回転数の設定値、つまり標準パターンを蓄積スケジュールとして計算機内に記憶しておくものである。

ある圧延仕様が与えられると計算機は、蓄積スケジュールの中から、この仕様に最も近い標準パターンを検索する。圧延仕様中の仕上板厚、板幅、あるいはロール径などが、標準圧延条件と相違する場合には、その相違分に対する補正計算を行なう。

圧延条件の補正の要因としては、ロール半径 R_1 、粗厚 h_0 、板幅 b 、炭素含有量 C 、動力配分 E_1 などがある。

ロット内の共通の補正としては、上記要因について、標準圧延条件 $\underline{R}_1, \underline{h}_0, \underline{h}_F, \underline{b}, \underline{C}, \underline{E}_1$ と圧延条件 R_1, h_0, h_F, b, C, E_1 の差

$$\begin{aligned}
 \Delta R_1 &= R_1 - \underline{R}_1 \\
 \Delta h_0 &= h_0 - \underline{h}_0 \\
 \Delta h_F &= h_F - \underline{h}_F \\
 \Delta b &= b - \underline{b} \\
 \Delta C &= C - \underline{C} \\
 \Delta E_1 &= E_1 - \underline{E}_1
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

により、標準パターン $\underline{S}_1, \underline{N}_1$ の補正が行なわれる。

偏差計算方式のミルセットアップにおいて重要なことは、標準パターンの整備と、圧延条件の標準圧延条件からのずれに対する補正計算法の開発である。

3.4 標準パターンの個数

標準パターンの作成にあたっては、圧延条件をどのように層別するかを検討しなければならない。これにより標準パターンの個数が決まる。圧延条件中の各要因の層別の例として、実験用に設けた標準圧延条件を表3.1に示す。鋼種は低炭素鋼を2種類に分け、特殊鋼を加えて3水準とする。仕上板厚は生産量の多い薄物(1.2mm~7.0mm)を0.2mmおきに30水準に分割する。板幅は600~1800mmの間を150mmおきに9水準に分割する。スタンド個数の分割は1水準に限定する。粗厚、材料温度、圧延速度ならびに圧延動力の配分比は仕上板厚、板幅等圧延スケジュールにより一義的に決まるので、分割数には関与しない。この場合の標準圧延条件の個数は、810個となる。標準パターンの個々を計算機の1語に、その他のコード類を1語に格納すると仮定すると、各標準圧延条件に対応して6スタンド分で13語が必要である。このとき、すべての標準パターンを格納するに必要な記憶容量は810×13=10530語となる。以上は、層別の一例であるが、実用面を考えると、これではまだ圧延条件の範囲が狭い。

実験に際しては、上述のように仕上板厚を等差分割して標準圧延条件を定めたが、偏差計算方式を実用化するためには、標準圧延条件の範囲を広げると同時に、層別を合理的に行ない、パターンの種類と数を減らすのがよい。このためには、仕上板厚を等比分割するのも一法である。

仕上板厚の層別に関し、等差分割と等比分割の場合を比較してみる。上述の層別の例では、 h_F は1.2~7.0mmを0.2mmごとに等差分割して、30点の標本点を選んでいる。この標本点間の補正範囲は、 $h_F = 1.2mm$ の点では8.4%、 $h_F = 7.0mm$ の点では1.5%である。

このように標本点によって補正範囲が異なることは、内挿精度や計算機記憶容量の面で好ましくない。

補正範囲 a を全標本点で一様にするためには、標本点を等比級数的に選べばよい。等比分割の場合の標本点の数は次のようにして求まる。

隣合う標本点 x_i と x_{i+1} との補正範囲の接点は次の関係式を満さなければならない。

$$x_i(1-a) = x_{i-1}(1+a) \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$x_1(1-a) = x_1 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ただし、 x_1 は圧延条件の下限值とする。この式を反覆して用いると次式が得られる。

$$x_i = \left(\frac{1+a}{1-a}\right)^{i-1} x_1 = \left(\frac{1+a}{1-a}\right)^{i-1} \cdot \frac{x_1}{1-a} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

この式で、圧延条件の範囲 $x_1 \sim x_u$ と補正範囲 a を指定することにより、標本点の数が決まる。すなわち標本点の数 L は次式で算出される。

$$L = \left[\frac{\log \frac{x_u(1-a)}{x_1}}{\log \left(\frac{1+a}{1-a}\right)} \right] + 1 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

ただし、 $[]$ は整数部をとることを示す。

仕上板厚の場合には、 $x_1 = 1.2 \text{ mm} \sim x_u = 7.0 \text{ mm}$ の範囲で、補正範囲 $a = 5\%$ では $L = 18$ 、 $a = 10\%$ では $L = 9$ となる。種々の補正範囲に対する標本点数を図 3.1 に示す。ただし、等比分割曲線は、上式の $[]$ 内を表わしている。この図から等比分割の方が、少ない標本点数で、等差分割よりも狭い補正範囲が得られ、内挿精度との関係で優れているといえる。これは圧延条件の圧延現象に及ぼす効果が、絶対偏差よりはむしろ相対偏差に関して一様であることに基づいている。

3.5 標準パターン作成法

標準パターンの作成は、パターン方式の場合と同様の考察が成り立ち、標準圧延条件の数が少ない場合には容易に行なえる。すなわち整備された圧延環境の下で全種類の圧延を行ない実績データを採取し、それを直接標準パターンとし、そのときの圧延条件を標準条件とすればよい。しかし普通には標準圧延条件の数が多く、同一の圧延環境の下で全種の実績データを採取することは困難である。たとえばロール径一つをとっても、ある種のデータは新ロールのとき採られ、他のデータは廃棄直前のロールのときに採られることが起

表 3.1 標準圧延条件の分類例

圧延条件	水準	備考
鋼種 Ω	3	
仕上板厚 r_F	30	1.2 ~ 7.0 mm
板幅 b	9	600 ~ 1800 mm
使用スタンド個数 \times	1	F1 ~ F6 使用
粗厚 r_0	—	スケジュールにより 一義的に決る
材料温度 T	—	
圧延速度 v_F	—	
動力配分 E_i	—	
ロール半径 R_i	1	新ロール値

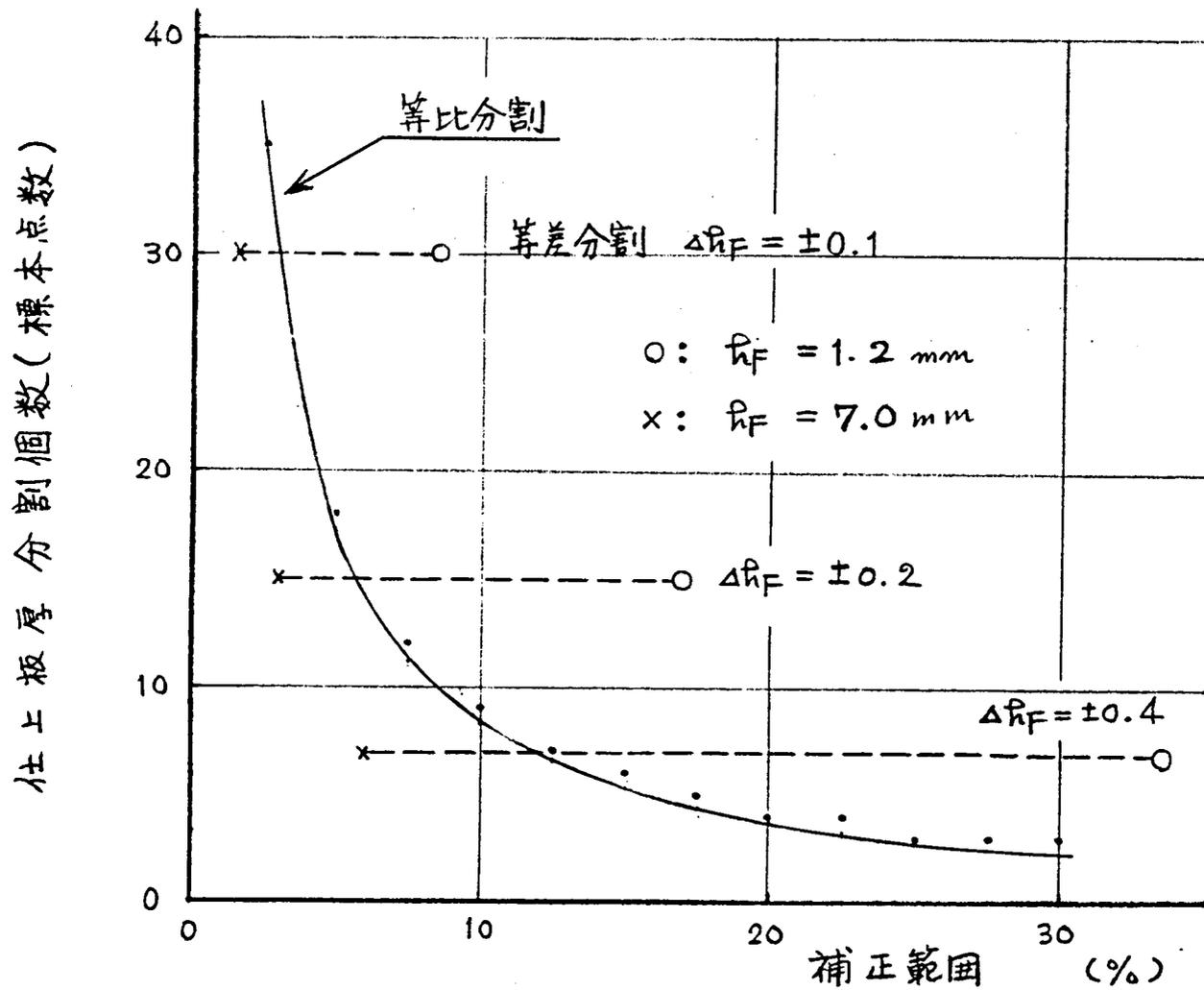


図 3.1 仕上板厚(1.2 ~ 7.0 mm)の補正範囲と分割個数

こる。このため実績データから標準パターンを作る場合には、データ採取時の圧延条件から標準圧延条件に実績データを変換する必要がある。このような圧延条件補正は後述の補正計算を逆の手順で行なえばよく、補正計算と同様の議論が成立つ。

標準パターン $\underline{S}_i, \underline{N}_i$ は、各標準圧延条件の近傍で得られた実績操業データ S_{Ai}, N_{Ai} を後述の偏差量 $\Delta S_i, \Delta N_i$ で補正することにより、次のようにして得られる。

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_i &= S_{Ai} - \Delta S_i \\ \underline{N}_i &= N_{Ai} - \Delta N_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.6)$$

標準パターンの別な求め方は各標準圧延条件に関してオフラインで設定計算を行ない、その結果を利用する方法である。圧延現象を記述する理論式が複雑であってオンライン計算では時間的に厳しい場合や圧延操業のノウハウが数式モデルの中に完全に盛り込まれていないため、設定計算の結果をベテラン運転員がみながら試行錯誤的に設定値を定めて行く場合などにこの方法が用いられる。この方法はロール径などの圧延条件をすべて希望の値に選定できるので、条件補正の計算が不要となるが、事前にオフライン計算式の精度、信頼性を十分確認しておく必要がある。換言するならばオフラインの設定計算の数式モデルの精度が制御システムの精度を支配する。

3.6 補正計算

圧延条件が標準圧延条件と異なる場合にはその違いに応じて標準パターンを補正することにより、所要の設定パターンが得られる。補正のための計算法としてはいわゆる内挿法があるが、内挿法は内挿すべき変数が多いときには、内挿すべき点の周りの多くのデータを用意しなければならない。少くとも一変数について内挿点をはさんで2点、 n 変数の場合には 2^n 点のデータを用意しておかなければならない。たとえば圧下位置設定値の補正の場合には $n=23$ となり、このような多変数の場合の内挿法の使用は実用上困難である。

補間計算の別の方法としては、各標本点における各パラメータに関する偏微係数を用意しておき、これを用いた偏差計算による方法がある。この方式では各圧延条件の相違に対して、圧下位置とロール回転数は次式のように補正される。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta S}{h}\right)_i &= \sum_{j=1}^6 S_{1j} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_j + S_{17} \left(\frac{\Delta h}{h}\right)_0 + S_{18} \left(\frac{\Delta h}{h}\right)_F \\ &+ \sum_{j=9}^{14} S_{1j}'' \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_j + S_{115} \left(\frac{\Delta C}{C}\right) + \sum_{j=16}^{21} S_{1j} \left(\frac{\Delta T}{T_K}\right)_j \\ &+ S_{122} \left(\frac{\Delta b}{b}\right) + S_{123} \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_F \dots\dots\dots (3.7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_i &= \sum_{j=1}^6 N_{1j} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_j + N_{17} \left(\frac{\Delta h}{h}\right)_0 + N_{18} \left(\frac{\Delta h}{h}\right)_F \\
&+ \sum_{j=9}^{14} N_{1j} \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_j + N_{15} \left(\frac{\Delta C}{C}\right) + \sum_{j=16}^{21} N_{1j} \left(\frac{\Delta T}{T_K}\right)_j \\
&+ N_{122} \left(\frac{\Delta b}{b}\right) \dots\dots\dots (3.8)
\end{aligned}$$

ここで、右辺の各変数は標準圧延条件からの変化率を表わす。 $\left(\frac{\Delta E}{E}\right)$ は動力配分の相違、 $\left(\frac{\Delta C}{C}\right)$ は変形抵抗の変化のうち炭素含有量の変化に相当する部分、 $\left(\frac{\Delta T}{T_K}\right)$ は変形抵抗の変化のうち圧延温度の相違に相当する部分を示す。圧延速度の変化 $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_F$ は回転数の補正には影響を及ぼさないので、上式には必要がない。

圧下位置、ロール回転数の設定値 S_1, N_1 は標準パターン $\underline{S}_1, \underline{N}_1$ に上式の補正量 $\Delta S_1, \Delta N_1$ を加えることにより、次のようにして得られる。

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \underline{S}_1 + \Delta S_1 \\ N_1 &= \underline{N}_1 + \Delta N_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.9)$$

式(3.7), (3.8)の係数 S_{1j}, N_{1j} の求め方としては理論的な方法と実績データの回帰分析による方法とがある。理論的な方法は前述の影響係数による解法を用いるものである。理論的に求める場合、式(3.7), (3.8)中の偏微係数は、 $\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_j$ の係数を除き、前述の影響係数の解法(2)で求められる。 $\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_j$ の偏微係数は解法(3)により求められる。

以上をまとめると、本偏差計算方式は標準パターンの作成と補正計算法の開発とからなり、そのおのおのの手法としては表3.2に示すようにそれぞれ2種類ある。実験に当っては、汎用面から圧延理論を尊重し、図3.2に示すようにオフライン計算により標準パターンを作成すると同時に、影響係数による解析法を用いて偏差計算を行なうことにした。

3.7 ミルセットアップ実験

ミルセットアップの実験は住友金属工業和歌山製鉄所の6スタンド熱間仕上圧延機においてHICOM2300(core 4kw, drum 8kw)を用いて行なった。偏差計算方式の実験をまず行ない、続いて絶対値計算方式の実験を実施した。これらセットアップ実験は通常の生産圧延が行なわれているところで実施する必要があり、生産を阻害しない実験方法を案出する必要があった。

この実験方法を「表示実験」と称しており、これは計算機の計算結果である圧下位置 S_1

表 3.2 偏差計算方式の作成法

偏差計算方式の構成	実施方法
標準パターンの作成	(1) 操業データの採取と 迂延条件の補正
	(2) オフライン計算
補正計算	(1) 内挿法
	(2) 偏差計算法 係数值 { 回帰分析 影響係数

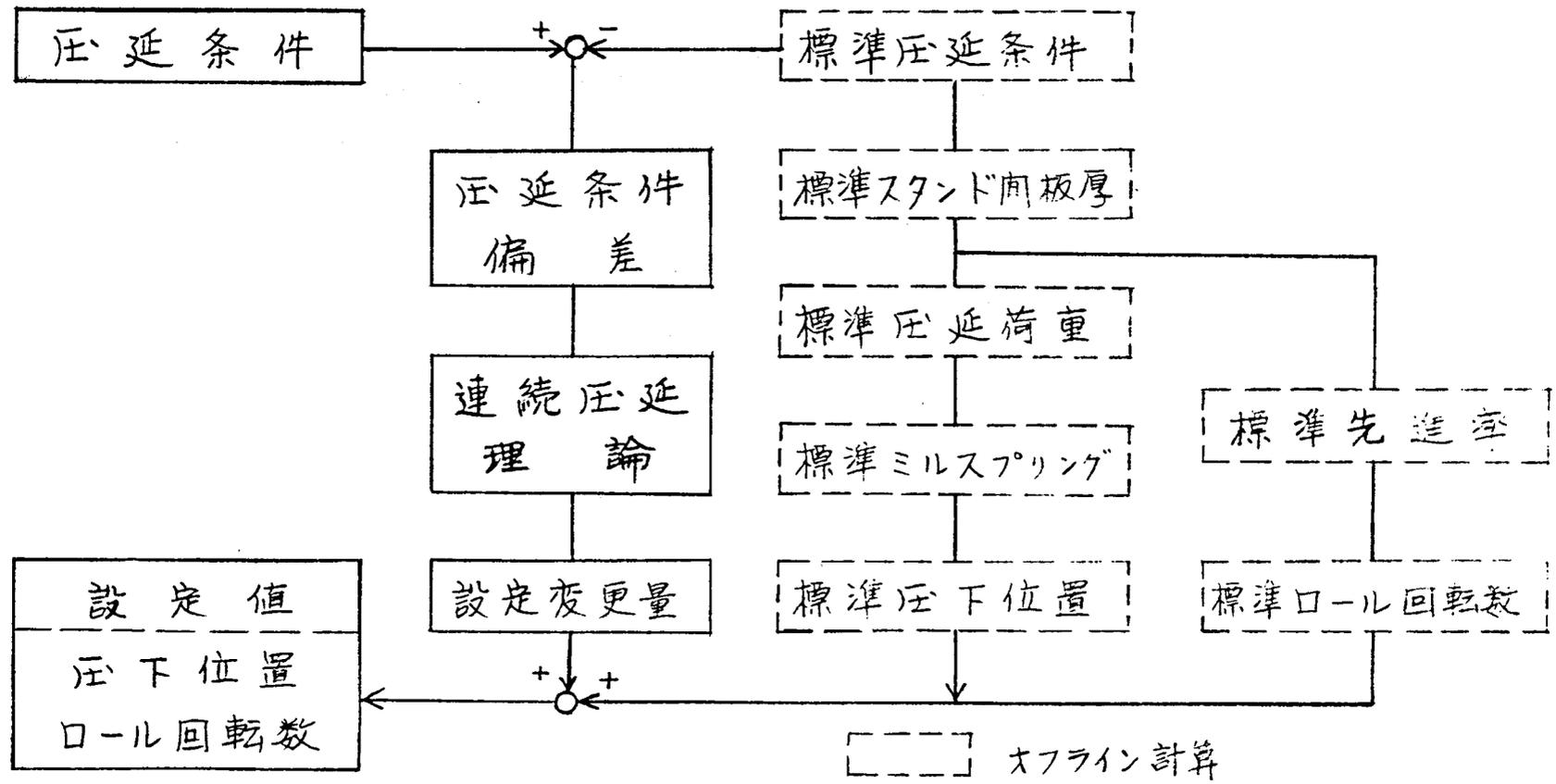


図 3.2 偏差計算方式によるセットアップ計算のフローチャート

ロール回転数 N_1 を表示するだけで、実際の S_1, N_1 の設定は従来通りオペレータに任せる方法である。このときの表示値 S_1, N_1 と実績値 S_{A1}, N_{A1} とを比較することにより計算結果の良否が判定できる。しかし S_1, N_1 合せて12個を一時に比較することは困難だといことがわかり、比較を S_1 と S_{A1} のみにより行なえるよう改善した。

3.8 偏差計算方式実験

偏差計算方式の表示実験は表3.3に示すごとく、3段階に分けて行なった。

3.8.1 表示実験 I

実験 I は計算と実績との比較を圧下位置のみで行なうため、負荷配分変更 ΔE_1 をデスクより入力して、スタンド間の板厚を変更し、計算と実績の回転数を一致させようとするものであるが、コイル毎に適切な ΔE_1 を手計算で選ぶことは困難であった。しかし、ロール替直後は、ほぼ同一仕様の圧延を毎行行なうので、どの程度負荷配分を変更すればよいかもわかり、 ΔE_1 の手計算で、オペレータの負荷配分に一致させることができた。

ロール替直後の計算値と実績値の数例を表3.4に示す。同表の圧下位置の計算値と実績値とはかなり良い一致を示している。圧下位置の両者の差は、大きいところでは、 0.4 mm ある。一方、ロール回転数の計算値と実績値との比較は、両者の圧延速度が異なる場合もあり、直接的には難かしく、体積速度の補正を必要とする。体積速度を補正すると、速度差は大きいところでは、7%程度あるが、ほとんどが2%以内に入っている。速度差の生じるのは、圧延条件の相違、つまり各スタンドの板厚および圧下位置の計算値と実績値との相違に基づく影響であると考えてよい。

圧延条件の相違の影響をみるためには、圧下位置の計算値 S_1 と実績値 S_{A1} の差に応ずる仕上板厚偏差 Δh_{FS} を算出すればよい。圧下位置偏差 ΔS_1 が Δh_F に及ぼす影響 Δh_{FS} は、その影響係数を C_{F1} とすると、次式で求めることができる。

$$\Delta h_{FS} = \sum_{i=1}^F C_{Fi} (S_i - S_{Ai}) \dots\dots\dots (3.10)$$

ただし、 C_{Fi} は基本方程式(2.16)で、板厚偏差 Δh_1 を未知数に、圧下位置偏差 ΔS_1 を既知数に選んで、解くことにより得られる(影響係数解法(1))。

圧下位置偏差に基づく仕上板厚偏差 Δh_{FS} を、表3.5に示す C_{F1} を用いて求めると、表3.4に示すようになる。 Δh_{FS} は 100μ 以内である。 Δh_{FS} に仕上板厚偏差の実績値

を加えると、圧下位置とロール回転数を計算値でもって設定した場合に現われるであろう仕上板厚偏差の計算値が求められる。この計算値により、偏差計算方式によるセットアップの良否が判定できるが、その値は最大 132μ で、小さいところでは 50μ 以内に入る。仕上板厚精度は $50\sim 100\mu$ 以内が要請されている点から考えると、本実験結果は偏差計算方式によるセットアップが精度的には実用可能なことを示している。

3.8.2 表示実験Ⅱ，Ⅲ

実験Ⅱ，Ⅲはロール替直後だけでなく、すべての圧延に対するセットアップを確認するため、負荷配分比の違いを自動的に補正しようとするものである。今回の設定回転数 N_i を、前回圧延の実績回転数 N_{A_i} と自動的に一致させることにより、比較を S_i と S_{A_i} のみにより行なう方法である。実験Ⅱの方式は具体的には図3.3のフローチャートにより計算される。したがってロット内で、しかも前回の回転数と大差ない圧延においては、圧下位置の実際値 S_{A_i} と計算値 S_i の比較だけで、セットアップ計算の良否が判定できる。実験Ⅱにおいては、圧延ロールの熱膨張や摩耗に基づくロール開度零点の移動に対する補正を行っていない。実験Ⅲではこの補正を適応修正として行なう。実験Ⅱでは圧下位置の実測値と計算値との差 $S_{A_i} - S_i$ が連続していればよく、実験Ⅲではその差が常に零近くであればよい。実験Ⅱの結果の一例として、ほぼ同一サイズのコイルに関して $S_{A_i} - S_i$ をコイル毎に図3.4に示す。第1スタンドは、オペレータが、ロール熱膨張などのため、圧下位置を計算値より $200\sim 300\mu$ 上げて運転していると同時にコイルごとには 100μ 程度変動している。他のスタンドは圧下位置の差は比較的安定している。全般的なレベル変動は適応修正（実験Ⅲ）で除去できる。コイルごとの変動は第1スタンドで大きいですが、表3.5に示す影響係数 C_{F1} を考慮すると、この程度の誤差は仕上板厚へほとんど影響しないことがわかる。しかし段取替（圧延サイズの変更）の場合には、負荷配分率が変化するので、圧下位置の差は 1mm 程度変化する場合もある。

3.8.3 表示実験結果の考察

偏差計算方式のオンライン実験は初めての経験であり、要領のよいものではなかったが、実験途上次のことがわかった。

- (1) ロール替直後やロット内での実験結果より、本方式は精度的には実用可能なことが明らかとなった。

表 3.3 偏差計算方式表示実験

	実 験 内 容
実 験 I	ロール回転数の設定値 N_i が、実績値 NA_i に近づくように、手動で動力配分の変更 ΔE_i を行なう。
実 験 II	前回圧延の実績回転数 NA_i を今回圧延の設定値 N_i とした場合の圧下位置設定値 S_i を求める。
実 験 III	実験 II に加えて、ロール角度零点の適応修正を実施する。

表 3.4 偏差計算方式実験結果 (表示実験工)

No.	板幅 (mm)	仕上 板厚 (mm)	压下位置 (mm)						ロール回転数 (rpm)						仕上板厚偏差(μ)			
			スタンド	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	実績	ΔRFS	合計
1	1263	4.30	計算値	14.06	8.98	6.42	4.09	3.21	3.23	46.9	72.1	103	136	169	195		-76.9	-127
			実績値	14.03	9.40	6.27	4.10	3.14	3.60	54.5	78.0	111	147	184	210	-50		-50
2	1027	4.00	計算値	13.66	8.75	6.07	4.01	3.23	3.11	44.6	70.7	100	138	166	186		-12.7	-33
			実績値	13.30	8.50	5.60	4.00	3.05	3.40	45.5	69.6	98	135	168	186	-20		-20
3	1250	3.60	計算値	12.56	7.43	5.32	3.08	2.52	2.62	42.5	67.7	98	136	166	192		-59.2	-49
			実績値	12.16	7.62	5.01	3.32	2.62	2.70	43.6	66.6	95	128	158	188	10		10
4	1298	4.50	計算値	13.91	8.99	6.64	4.34	3.42	3.41	47.3	69.9	100	129	157	180		1.8	132
			実績値	13.53	9.08	6.21	4.21	3.50	3.50	48.5	70.2	102	129	158	177	130		130

表 3.5 压下位置偏差が仕上板厚に及ぼす影響 (C_{Fi})

板幅 (mm)	仕上板厚 (mm)	スタンド	1	2	3	4	5	6
1250	4.4	$C_{Fi} = \frac{\Delta R_F}{\Delta S_i}$	0.00961	0.02942	0.06977	0.13245	0.21083	0.32859

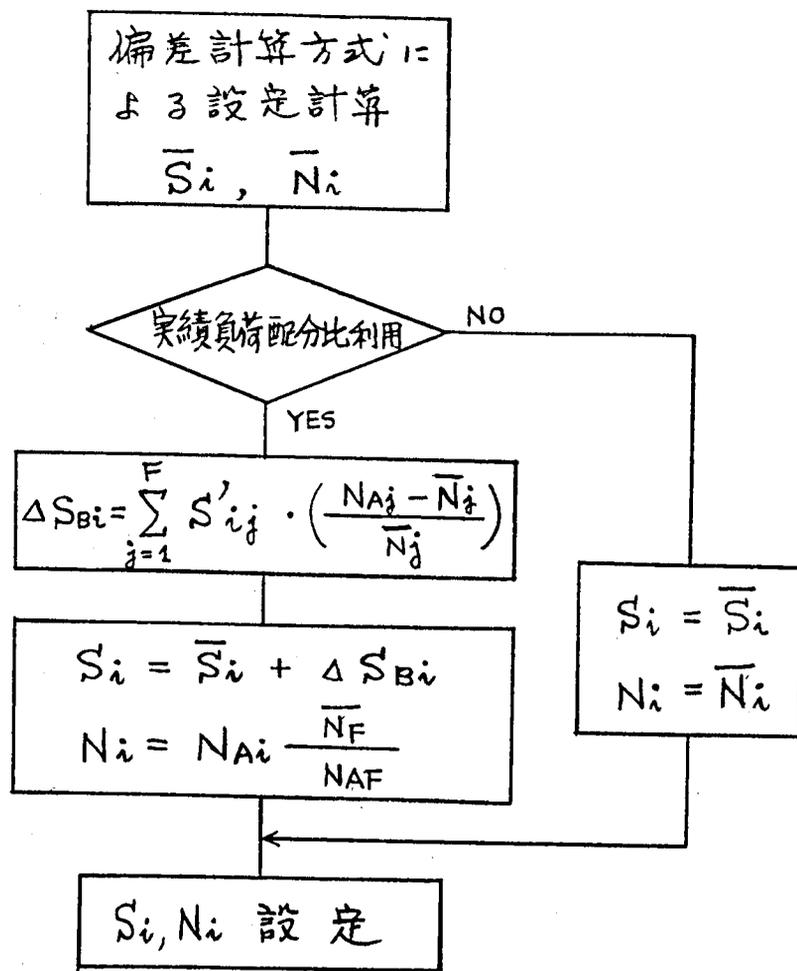


図 3.3 偏差計算方式で前回実績負荷配分比を用いる場合のフローチャート

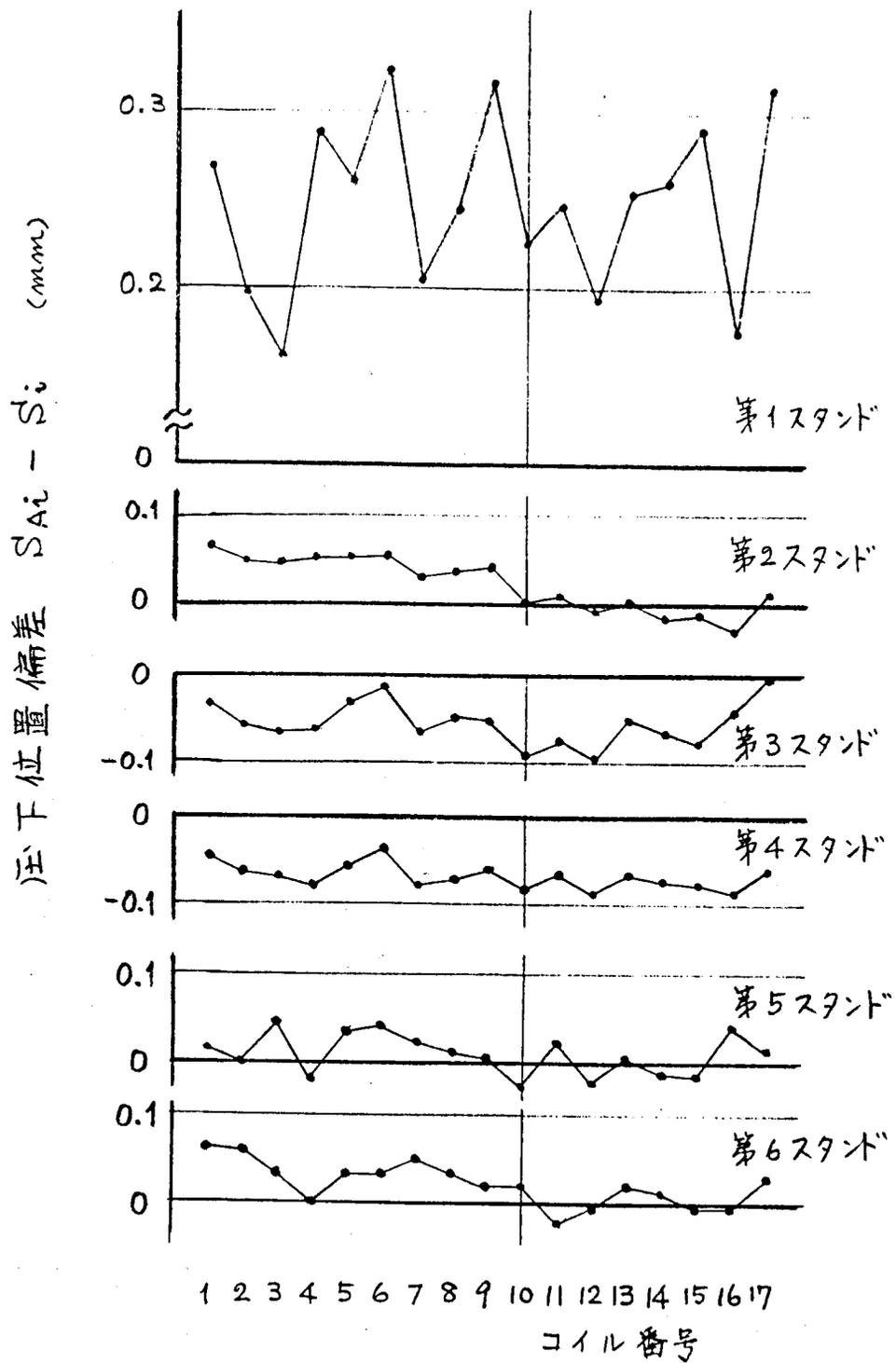


図 3.4 実績負荷配分比を用いた場合の圧下位置の
 実績値と計算値との差 (実験Ⅱ)

- (2) しかし、手法的には実験や、実用の場合に複雑さを有していることが明らかとなった。具体的には次項以下である。
- (3) 標準パターンの選定、その格納方法の問題もさることながら、実験に際し不具合点がある場合、それが標準パターンと偏差計算式のいずれにあるのか、あるいは方式面なのか数値面なのかを究明し改良することが、現場では容易ではない。
- (4) 標準パターンと操業時の負荷配分が大幅に異なっている場合がある。負荷配分の修正量が過大となれば、計算誤差発生心配がある。しかし、これは操業の負荷配分に近い標準パターンを作成しておけば解決する問題である。
- (5) 偏差計算方式では、計算結果としては S_1 と N_1 しかなく、 h_1, P_1 等の変数の中間結果を参考にすることが難かしく、数式モデルの決定がやりづらい面がある。
- (6) 標準パターンの変更が必要なたびごとに、標準パターン作成のためのオフライン計算が必要となり、実験の進行がにぶる場合がある。

上記(3)~(6)項はいずれも本質的な問題ではなく、制御システムの調整過程における難かしさを示しているに過ぎない。本方式の実験は、広範囲な標準パターンと、偏差計算の各係数を正しく決定するのに、相当の日数を必要とすることが明らかとなったため、表示実験が一段落したところで中止し、絶対値計算方式の実験に移行した。

3.9 結 言

仕上圧延機の計算機制御によるミルセットアップの方式としては、わが国の熱間圧延製品のように品種の多い場合には、パターン方式よりは、計算による方式の方が適している。計算による方式のうち、偏差計算方式は、標準パターンと補正計算より構成される。標準パターンの作成方法としては、整備された圧延環境の下で全種類の圧延を行ない実績操業データを採取し、それを直接、標準パターンとする方法と、各標準圧延条件に関して、圧延理論式を利用して設定計算をオフラインで実施する方法とがある。標準圧延条件が多い場合には、後者の方法の方が、圧延条件を揃えることが可能であり実用的である。圧延条件が標準圧延条件と相違する場合、その相違分に関する補正計算方法としては、圧延条件を挟む標準パターンの内挿による方法と、相違分に応じる偏差計算法とがある。偏差計算法の係数値の求め方としては、実績データの回帰分析による方法と、影響係数を利用する方法とがある。偏差計算方式のミルセットアップ実験に当っては、圧延理論を尊重し、広い品種をカバーすることを意図し、オフライン計算で標準パターンを作成し、補正計算に

は、影響係数を用いた偏差計算法を採用した。

標準パターン選定の基準としては、仕上板厚の範囲を等差分割するよりも、等比分割する方が、補正計算の精度の点と標準パターンの個数の点で、適切であることを明らかにした。これは圧延条件の圧延現象に及ぼす影響が、絶対偏差よりも相対偏差の方が一様であることに基づいている。

ミルセットアップの実験は、通常の生産圧延が行なわれているところで実施する必要があるが、計算機の計算結果である圧下位置とロール回転数を表示するだけの表示実験として行なった。このとき、表示値12個と、実績値12個とを一目で比較するのは困難なので、圧下位置のみの表示値と実績値で、ミルセットアップの計算結果の良否の判定比較ができるような方法を案出した。

表示実験は次の3種類を行なった。

実験Ⅰ ロール回転数の設定値 N_1 が実績値 N_{A1} に近づくように、手動で動力配分の変更 ΔE_1 を行なう。

実験Ⅱ 前回圧延の実績回転数 N_{A1} を今回圧延の設定値 N_1 とした場合の圧下位置設定値 S_1 を求める。

実験Ⅲ 実験Ⅱに加えて、ロール開度零点の適応修正を実施する。

これらの実験の結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 偏差計算方式によるミルセットアップは、精度的には実用可能である。
- (2) しかし、手法的には次項以降に示すように繁雑さを有している。
- (3) セットアップの計算値に不具合がある場合、それが標準パターンと偏差計算式のいずれにあるのか、方式面か、あるいは数値面なのかを究明し改良することが現場では容易ではない。
- (4) 標準パターンと操業時の負荷配分が大幅に異なっている場合、負荷配分の修正量が過大となれば計算誤差発生への心配がある。
- (5) h_1, P_1 等の中間変数を参考にすることが難かしく、数式モデルの決定がやりづらい面がある。
- (6) 標準パターンの変更が必要なたびごとに、オフライン計算が必要となり、開発の進展がにぶる。

偏差計算方式は、標準パターンと偏差計算の係数の正しい決定に日数を要することが明らかとなったので、次章の絶対値計算方式の実験に移ることとした。

第 4 章 絶対値計算方式によるミルセットアップ

第4章 絶対値計算方式によるミルセットアップ

4.1 緒言

仕上圧延機のミルセットアップ方式として、前述の偏差計算方式とは、考え方が異なる絶対値計算方式について論じる。偏差計算方式では、標準圧延条件とそれからの偏差計算の組合せとしてセットアップ値を求めたが、絶対値計算方式は、あらゆる圧延条件に対して、ミルセットアップ値の絶対量を数式モデルにより直接求めようとするものである。

絶対値計算方式では、圧延現象のすべてを数式モデルで表現する必要があるが、数式モデルの作成方法として、統計的な方法と、圧延理論を尊重する方法とのいずれが実用的であるかを検討する。圧延理論式を利用する場合、理論式は必ずしも圧延現象を定量的に忠実に表わしていないことから、定性的には理論を尊重し、定量的には実験や操業により採取したデータを重視するモデル作成法について論じる。圧延機のオンライン制御のためには、数式モデルは簡潔なことが望ましい。このため、圧延理論の簡略式の導出についても検討する。

絶対値計算方式によるミルセットアップの現地実験結果に基づき、この方式の適用範囲と効果を明らかにする。

実験に当っては、偏差計算方式のときと同様に6スタンド分の圧下位置とロール回転数を数字表示し、これらを操業値と見較べる表示実験方式を採った。具体的には表示と操業実績のロール回転数を一致させることにより、良否の判定が、6スタンド分の圧下位置の表示値と操業値との比較のみで容易に行なえるようにした。

4.2 セットアップ計算

絶対値計算方式によるセットアップ計算は図4.1に示すような構成をとる。

仕上板厚、仕上板幅などの圧延仕様と鋼種、材質などのスラブの属性とを基にして、所要の負荷配分を得るよう、使用スタンドならびにドラフトスケジュール、つまりスタンド間板厚を決定する。ドラフトスケジュールを算出する基本的な考え方として、圧延に適した動力分配比率を与えこれを満足するようドラフトを決める。この比率は各スタンド圧延後の材料形状に関係する。

ドラフトスケジュールを算出するために動力カーブを用いるが、その表現にはいろいろな方法が発表されている。一例としては、次式のような方法がある。¹⁵⁾

$$E = E_0 \left\{ \left(\frac{H}{h} \right)^m - 1 \right\} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、Eは動力 (horse power hours per ton), Hは圧延前板厚, hは圧延後板厚。

これに対し動力を鋼種, 温度などで正規化する正規化動力曲線 (Normalized Power Curve ; NPC)^{18), 41)}による方法は簡単で使いやすい。他の方法では粗厚によって分類する場合もあるが, この方法はその必要もなく単純な関数で表現される。

次にこのスタンド間板厚が実現されるための各スタンドの圧下位置とロール回転数とを決定する。このためには粗圧延機最終パス板厚 (粗厚) を求めるとともに, 粗圧延機出口および仕上圧延機入口の温度計により仕上各スタンドの圧延温度を推定する。これらより平均変形抵抗, 圧延荷重を算出し, ミルスプリングを考慮して各スタンドの圧下位置の設定値を決定する。一方各スタンドのロール回転数は, 先進率を考慮して体積速度一定の関係より求められる。

4.3 数式モデル

絶対値計算方式は数式モデルの作成方法により次の2種類に分けられる。

- (1) ロギングにより採取した圧延データを統計的に数式化するもので, 数式モデルの形と係数値を共に実験的に求める方法。
- (2) 圧延理論を尊重するもので, 数式モデルの形は理論的に求め, その係数を圧延データにより決定する方法。

統計的な方法は, 実測データを要因分析し, 多重回帰分析等の手法により数式の構造模型を仮定し, 数式の形ならびに実験式を決めるものである。これは解析に用いたデータの範囲内においては現象を比較的正しく表わすが, 用いたデータのレンジを越えて外挿しようとする場合には精度がきわめて悪くなるのが通常である。たとえば, 一つのスタンドの統計的解析結果は, 他のスタンドとは傾向が逆になり, 汎用性のない場合もあった。絶対値計算方式は一つの数式でもって, 実操業上のあらゆる場合に適合できることが望ましいが, 統計的な方法のみでは実用的な結果を得ることが困難なことが若干の試みにより明らかとなり, 理論的な方法を採用することとした。

理論に基礎を置く方法を採用するにしても, 必ずしも理論式が現象を定量的に正確に記述しているとは限らない。そこで数式モデルの開発の方針としては, 定性的には理論を尊

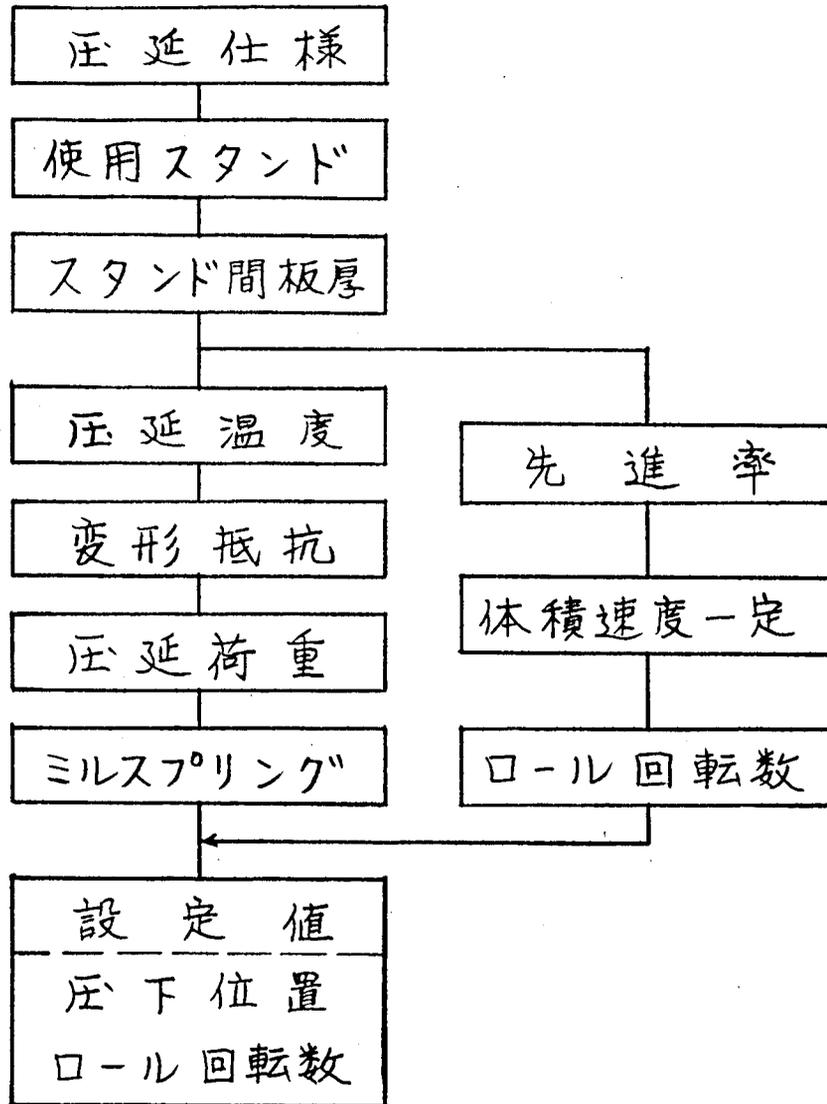


図 4.1 絶対値計算方式によるセットアップ°
計算のフローチャート

重し、定量的には実験あるいは操業データを重視し、データによる裏付けないしは補正を行なうこととした。

この考え方を背景に、個々の数式モデルを主として線形多重回帰分析の手法を用いて決定した。これらの数式モデルは表 4.1 に示すように、3 種類に分類することができる。

- (1) 理論式のあるものは理論式を重視する。しかし圧延理論式はいずれも複雑な形をしており、このままオンライン計算をすると計算時間、記憶容量の面で好ましくない。したがって実用範囲で誤差が少なく理論値が得られる理論式の簡略化を行なう。
- (2) 変形抵抗やミル剛性係数のように、特別な実験により求められるものは実験式を確立する。実験式作成にあたっては理論的な背景を尊重し、できた実験式は操業データにより確認または補正する。
- (3) 上の方法で得られないものは操業データを多重回帰分析等の手法により解析し、数式を定める。この際も定性的に妥当な数式モデルの形を仮定し、この係数を定めるようにする。

これらの方針のもとに開発した数式モデルの具体例を二三示す。

理論式の簡略化については、次節で詳述するが、先進率と圧下力係数に関しては、次の簡略式を導出し、使用している。

先進率 f の理論式は式 (2.10) で示されるが、圧下率 r を 0.1~0.5, R/h を 30~300 の実用範囲に限定して多重回帰分析により簡略式を求めたところ、後述のように、次式が 0.5% 以内の誤差で使用可能なことが明らかとなった。

$$f = 0.001862 + 0.2183r + 0.2008r^2 - 6.503r^2 \left(\frac{h}{R}\right) + 7.397r^2 \left(\frac{h}{R}\right)^2 \quad \dots (4.2)$$

圧下力係数 Q_p は式 (2.7) のように極めて複雑な形をしているため、多重回帰分析により、次の簡略式を導き使用している。

$$Q_p = 0.8062 - 0.3023r + (0.0419 + 0.4055r - 0.2246r^2) \sqrt{\frac{R}{h}} \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

実験式の一つとしては変形抵抗式を作成した。絶対値計算方式の数式モデルのうちで重要なものの一つは、圧延荷重の予測式である。絶対値計算方式では材料の平均変形抵抗を算出して、R.B.Simsの圧延理論により圧延荷重を計算する方法をとった。

このため代表的鋼種約 20 種について、粗圧延の完了した材料よりテストピースを切り出して落下ハンマ法などにより熱間の平均変形抵抗を測定した。試験温度 700~1000℃、

加工度 10~70% (対数ひずみ), ひずみ速度 30~180/s の範囲で, 実測データを回帰分析により整理して, たとえば普通炭素鋼の平均変形抵抗の数式モデルとして次式を得た。

$$k_{fm} = e^{0.126 - 1.75C + 0.594C^2 + \frac{2851 + 2968C - 1120C^2}{T_K}} \cdot \epsilon^{0.21} \cdot \dot{\epsilon}^{0.13} \dots \dots \dots (4.4)$$

- ただし, k_{fm} : 平均変形抵抗 (kg/mm²)
 C : 炭素含有量 (%)
 T_K : 圧延温度 (°K)
 ϵ : 加工度 (対数ひずみ)
 $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度 (1/s)

実際には各種材質の平均変形抵抗を C % のみで表現することはできないから全鋼種を約 15 種に分類して上記のような数式の定数を変更している。

圧延荷重 P_i の予測は, 上述の Q_p と k_{fm} を式 (2.2) に用いることにより実施できる。このようにして求めた圧延荷重の計算値と実測値との比較を図 4.2 に示す。これ以上の精度改善は後述の適応制御により実施される。

絶対値計算方式は, これらの簡略式や実験式から構成している。圧下位置設定値 S_i は, 上述の圧延荷重の予測値を式 (2.1) に用い求められる。ロール回転数設定値 N_i は式 (2.8), (2.9) に式 (4.2) を用い, 次式で求まる。

$$N_i = N_F \frac{R_F h_F (1 + f_F)}{R_i h_i (1 + f_i)} \dots \dots \dots (4.5)$$

4.4 圧延理論式の簡略化

圧延理論式の中には複雑な形をしたものもある。オンライン計算の数式モデルとして利用可能なように, 圧延理論式の簡略化を図る。圧延理論式の簡略化にあたっては以下の事項を留意する必要がある。

- (1) 簡略式は実用範囲において理論値と許容誤差内で一致すること。
- (2) オンライン計算に便利な数式であること。すなわち四則演算で構成されていること。計算機内では指数や対数の演算は多項式による計算に分解されるので, 簡略式では Taylor 展開された多項式の主要な項のみより構成されている方が実用的である。
- (3) 数式モデルの形としては, 多重回帰分析の実施が容易な数式であること。実用範囲

表 4.1 絶対値計算方式数式モデル

数式モデル	理論式の 簡略化	実験式	回帰式
パワーカーブ			○
先進率	○		
圧延温度			○
変形抵抗		○	
圧下力係数	○		
ミル剛性係数		○	

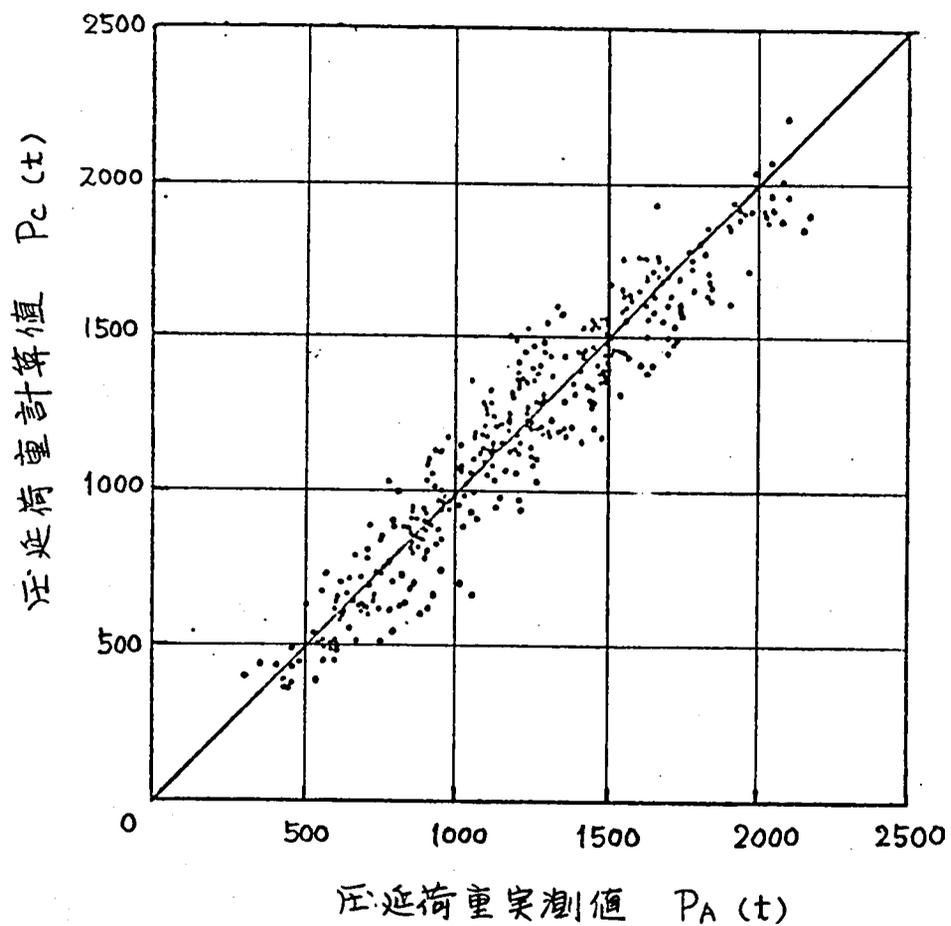


図 4.2 圧延荷重の実測値と計算値との比較

内において簡略式を理論値と最小二乗法的に一致させるためには回帰分析の手法を用いるのが簡便である。

以下では、圧延理論式の簡略化に当って、線形多重回帰分析を用いた具体例として、先進率式の簡略化方法について二種類、ひずみ速度式の簡略化、ならびに圧下力係数式の簡略化についてそれぞれ述べる。

(1) 先進率式の指数関数による簡略化(簡略式(1))

R.B.Simsによる先進率 f は、先に述べたように、次式で示される。

$$f = \tan^2 \left\{ \frac{1}{2} \sin^{-1} \sqrt{r} + \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{h}{R}} \log_e (1-r) \right\} \dots\dots\dots (4.6)$$

ただし、ここでは、表現上の簡潔さを考え、 $R = R'$ として扱うが、簡略上の精度には影響を及ぼさない。

上式による先進率 f の厳密解を、 R/h をパラメータとして、 r に関して全対数グラフに図示すると、図4.3のようになる。この図より推定母数関数の形として次式が予想される。

$$f = \alpha \cdot r^\beta \dots\dots\dots (4.7)$$

ここで、 α 、 β は R/h の関数である。

同図より傾斜 β を読みとり、 $\sqrt{\frac{R}{h}}$ に関しプロットすると、 β は次式で表わせる。

$$\beta = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{\frac{R}{h}} \dots\dots\dots (4.8)$$

一方、係数 α は任意の r について、 $\sqrt{\frac{R}{h}}$ に関しプロットすると、 $\sqrt{\frac{R}{h}}$ の一次式として表わされる。式(4.6)の対数をとって回帰分析することを考慮すると、 α は次式となる。

$$\alpha = e^{a_0 + a_1 \sqrt{\frac{R}{h}}} \dots\dots\dots (4.9)$$

式(4.7)に α および β を代入すると、 f は次の簡略式で表わされる。

$$f = e^{a_0 + a_1 \sqrt{\frac{R}{h}}} r^{\beta_0 + \beta_1 \sqrt{\frac{R}{h}}} \dots\dots\dots (4.10)$$

上式の対数をとる、次式

$$\log_e f = a_0 + a_1 \sqrt{\frac{R}{h}} + (\beta_0 + \beta_1 \sqrt{\frac{R}{h}}) \log_e r \dots\dots\dots (4.11)$$

を推定母数関数として、線形多重回帰分析を行なうと各係数値が得られ、最終的には

次の結果を得た。

$$f = e^{-1.674+0.04202 \sqrt{\frac{R}{h}} r^{0.9098+0.01582 \sqrt{\frac{R}{h}}}} \dots \dots \dots (4.12)$$

この式による計算精度は、式(4.6)の計算値と比較した場合、図4.6(後掲)に示すように最大10%程度である。

この結果は、R.B.Simsの理論式より簡単になったが、オンライン計算に用いるには指数計算のため演算時間が長びき、好ましくない。

(2) 先進率式の多項式による簡略化(簡略式(2))

絶対値計算方式のミルセットアップにおいて先進率は板速度とロール周速との関係式として $1+f$ なる形で用いられるので先進率 f の計算精度はあまり高くなくてもよい。精度よりはむしろ演算時間が短縮されることが重要である。こういう観点からR.B.Simsの理論式を線形多項式により近似したところ、以下のように、上述の簡略式(1)よりも高精度の近似式を得ることができた。

先進率の理論式による厳密解を $\frac{R}{h}$ をパラメータとし、圧下率 r に関してプロットすると図4.4のようになる。この図から f と r との関係を眺めると、 f は r の2次式として表わされるであろう。つまり次式の形となろう。

$$f = k (\beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 r^2) \dots \dots \dots (4.13)$$

一方、 f と $\frac{R}{h}$ との関係は r をパラメータとして、図4.5のようにプロットし、数式の形を検討する。図の実線は f と $\frac{R}{h}$ との関係を示しているが、この曲線は $\frac{R}{h}$ の2次式で近似できそうにはない。そこで $\frac{R}{h}$ の逆数に関して破線のごとくプロットすると、破線は $\frac{h}{R}$ の2次式として表わせそうである。次式の形となろう。

$$f = k' \left\{ \beta_3 + \beta_4 \frac{h}{R} + \beta_5 \left(\frac{h}{R} \right)^2 \right\} \dots \dots \dots (4.14)$$

以上から先進率の推定母数関数として次式を仮定する。

$$\begin{aligned} f &= (\beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 r^2) \left\{ \beta_3 + \beta_4 \left(\frac{h}{R} \right) + \beta_5 \left(\frac{h}{R} \right)^2 \right\} \\ &= a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 \left(\frac{h}{R} \right) + a_4 \left(\frac{h}{R} \right)^2 + a_5 r \left(\frac{h}{R} \right) \\ &\quad + a_6 r \left(\frac{h}{R} \right)^2 + a_7 r^2 \left(\frac{h}{R} \right) + a_8 r^2 \left(\frac{h}{R} \right)^2 \dots \dots \dots (4.15) \end{aligned}$$

上式を回帰分析するにあたり、使用データは実用範囲を考慮して次のように決めた。

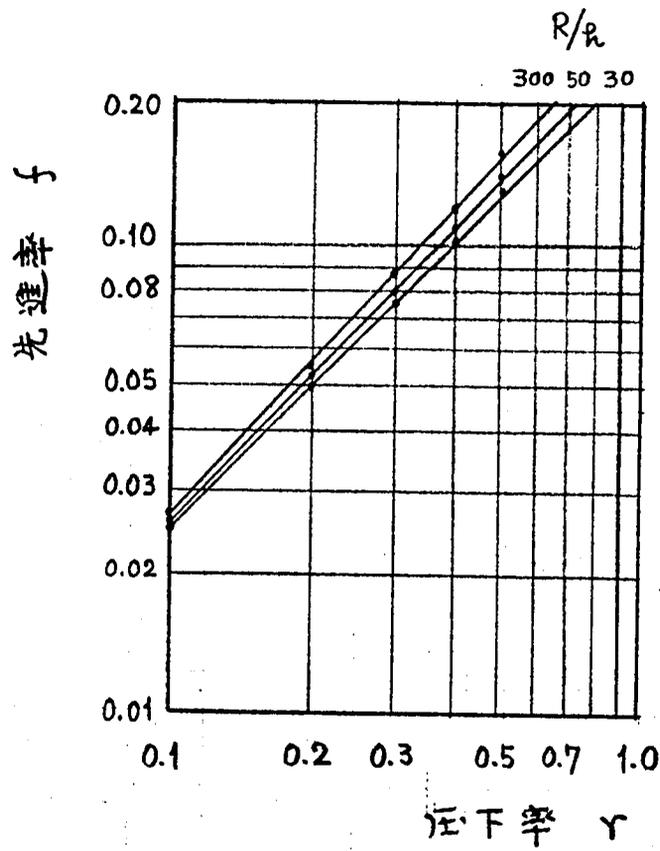


図 4.3 先進率 f と圧下率 r との関係

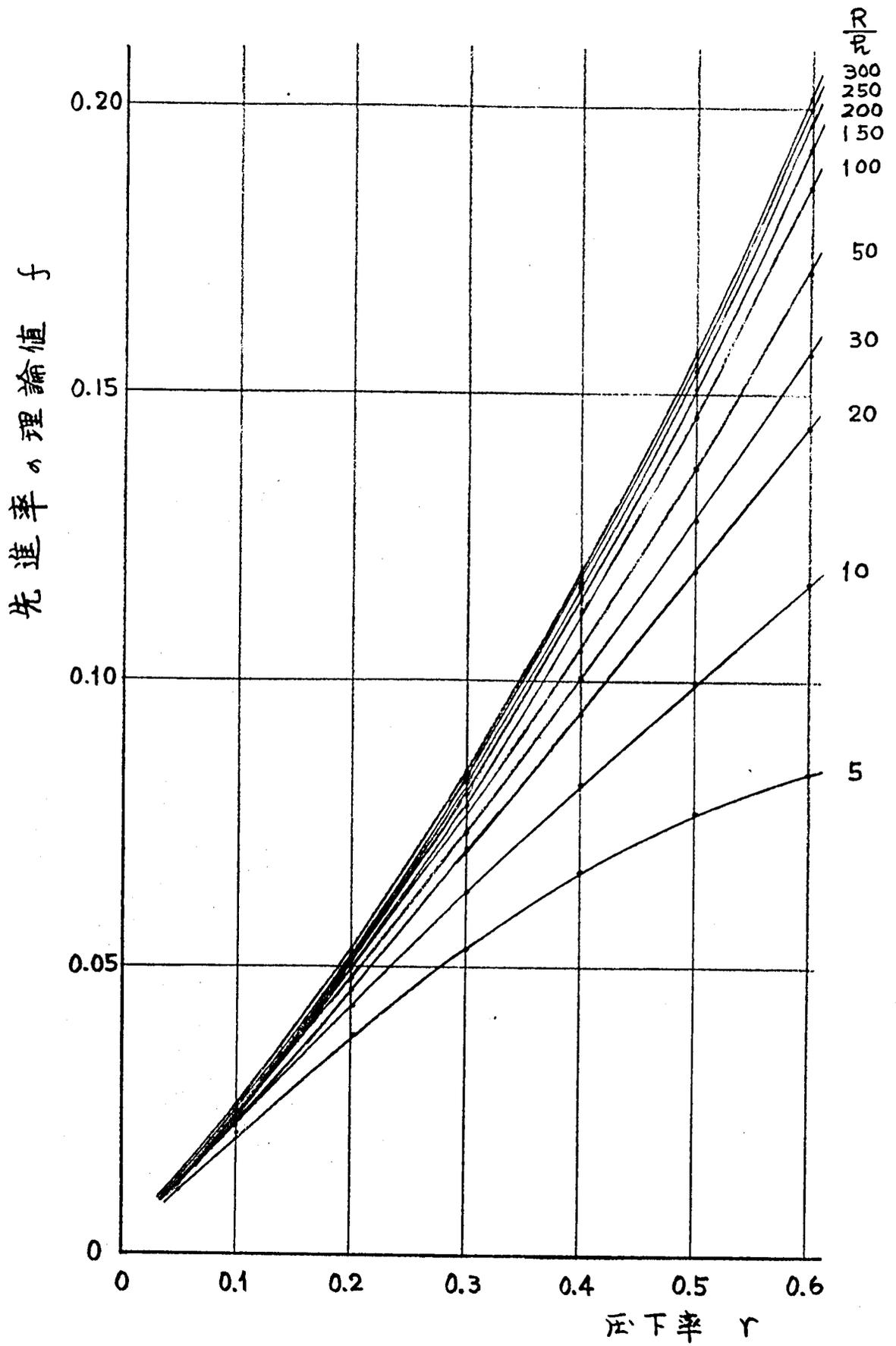


図 4.4 Sims の 先進率

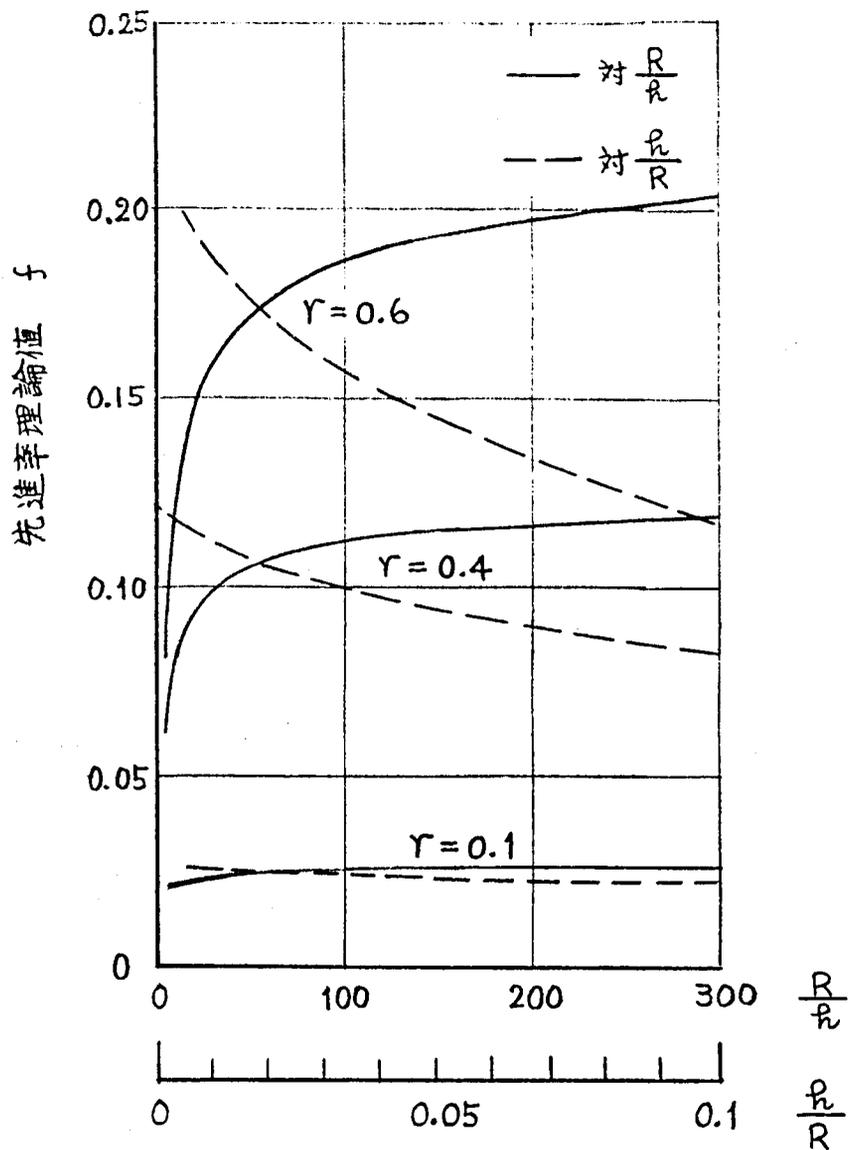


図 4.5 f 対 $\frac{R}{r}$ および f 対 $\frac{r}{R}$

$$\begin{array}{l}
 r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 \\
 \frac{R}{h} = 30, 50, 100, 150, 200, 250, 300 \\
 f : \text{式 (4.6)}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} r \\ \frac{R}{h} \\ f \end{array}} \right\} \dots\dots\dots (4.16)$$

以上を変数減少法による回帰分析^{4.2)}により行なった結果、有意でない項が減少し、最終的に次の結果を得た。

$$\begin{aligned}
 f = & 0.0018623 + 0.21833r + 0.20078r^2 - 6.5030r^2 \left(\frac{h}{R}\right) \\
 & + 7.3969r^2 \left(\frac{h}{R}\right)^2 \dots\dots\dots (4.17)
 \end{aligned}$$

- 不偏分散 U_E^2 : 1.2415×10^{-7}
- 残差平方和 S_E : 3.7245×10^{-6}
- 自由度 ϕ : 30
- 重相関係数 R : 0.99997
- 寄与率 ρ : 0.99994
- 相対誤差 : 0.5%程度

上記2種類の簡略式の計算精度を比較するため、図4.6にR.B.Simsによる先進率の理論値を横軸に、簡略式(1)および(2)の計算値を縦軸にプロットする。同図により簡略式(1)と(2)を比較すると簡略式(2)の方が相対誤差0.5%程度できわめて良好である。そこで、先進率としては簡略式(2)すなわち上式を用いることにする。

簡略式(1)の誤差の大きい原因について、以下に若干の考察を加える。

簡略式(1)の誤差の大きい原因としては、

- (a) 推定母数関数の形が悪い。
- (b) 従属変数に対数を用いると、指数関数に戻した場合相対誤差が増大する可能性がある。

の2点が考えられるが、ここでは(b)について検討を加える。

従属変数に対数型を用いるのは線形多重回帰分析を使用する場合には避けられないが、対数型で算出した相対誤差と指数関数に戻した場合の誤差を比較すると、普通後者の方が大きいことは次の誤差論により容易に説明できる。

$$y = \log_e x \dots\dots\dots (4.18)$$

上式において、相対誤差 $\left(\frac{\Delta y}{y}\right)$ と $\left(\frac{\Delta x}{x}\right)$ との関係は、上式の辺々の変分をとり

次式となる。

$$\left(\frac{\Delta x}{x}\right) = \log_e x \cdot \left(\frac{\Delta y}{y}\right) \dots\dots\dots (4.19)$$

この式で $\log_e x$ の絶対値が1より大きいとき $\left(\frac{\Delta x}{x}\right)$ は $\left(\frac{\Delta y}{y}\right)$ より大きくなる。

この条件は

$$x > e = 2.7183 \quad \text{または} \quad x < \frac{1}{e} = 0.36788 \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

となる。

推定母数関数の従属変数として式(4.18)のような対数型を採ると、その真数 x が上式の条件を満たすところでは、対数型で考えた相対誤差 $\left(\frac{\Delta y}{y}\right)$ よりも真数で考えた誤差 $\left(\frac{\Delta x}{x}\right)$ の方が大となる。

前記簡略式(1)の対数型による相対誤差の最大値は6%であるが、これを指数関数に戻した場合の誤差は、図4.6または式(4.19)から知れるとおり、最大10%と悪くなっている。これは真数 f の値が式(4.20)の範囲内にあることに基因する。

このように数式モデル決定の過程からも指数や対数を含む数式の線形回帰分析はできるだけ避けた方が精度の面でもよいことが結論づけられる。

(3) ひずみ速度式の簡略化

平均ひずみ速度式(2.5)を変形すると次式となる。

$$\dot{\epsilon} = \frac{2\pi}{60} N \frac{R}{\sqrt{R'h}} \sqrt{\frac{1-r}{r}} \log_e \frac{1}{1-r} \dots\dots\dots (4.21)$$

上式の r のみを含む部分

$$y = \sqrt{\frac{1-r}{r}} \log_e \frac{1}{1-r} \dots\dots\dots (4.22)$$

を全対数グラフに描くと勾配は0.5となる。したがって上式は圧下率 r の平方根にて近似することができる。

$$y \approx \sqrt{r} \dots\dots\dots (4.23)$$

式(4.22)と式(4.23)の計算値を比較すると表4.2のようになる。

表4.2 y の値

r	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
\sqrt{r}	0	0.316	0.447	0.547	0.632	0.707
$\sqrt{\frac{1-r}{r}} \log_e \frac{1}{1-r}$	不定	0.316	0.446	0.543	0.626	0.693

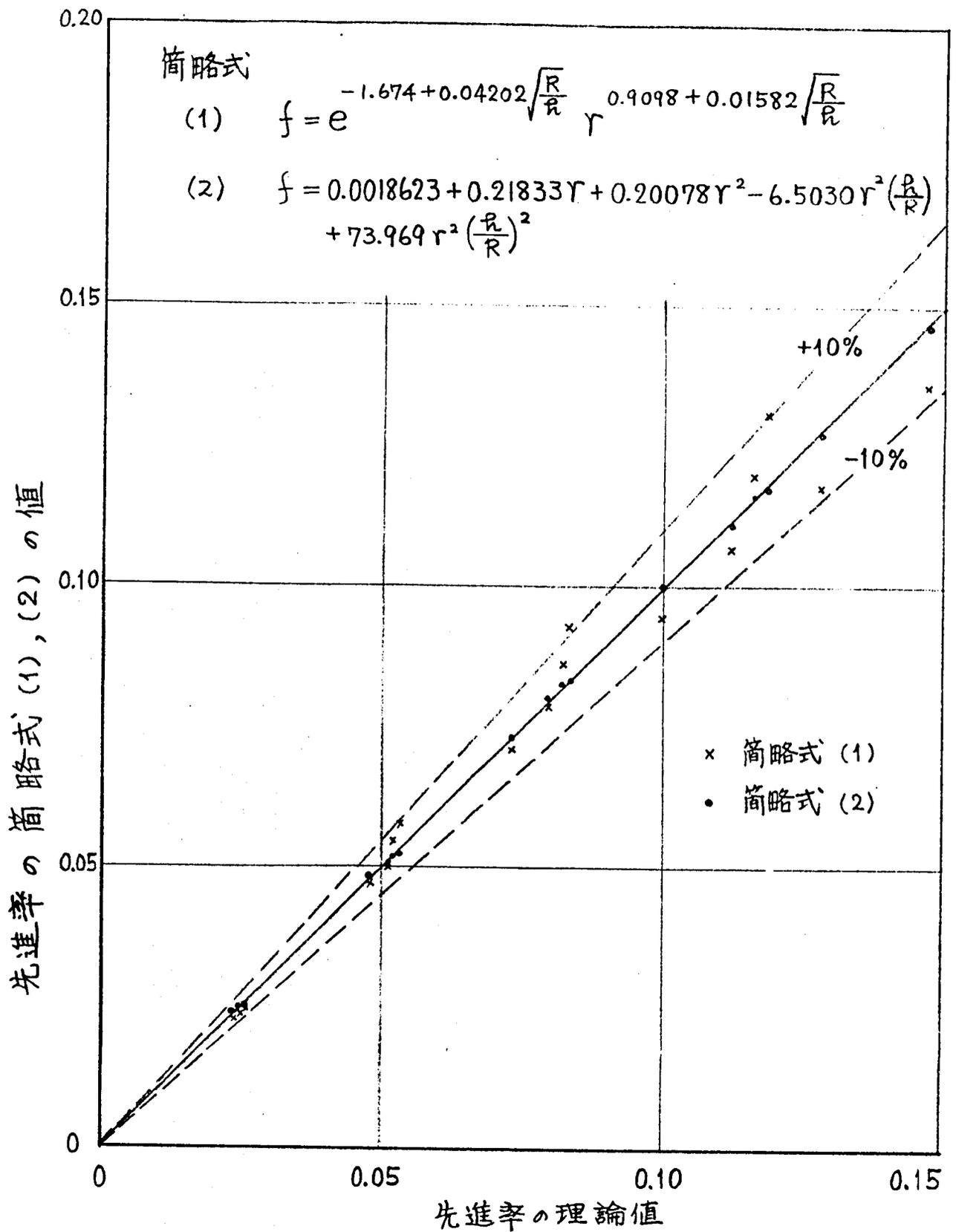


図 4.6 先進率簡略式の精度比較

同表より誤差を検討すると、誤差は最大2%となる。ひずみ速度は変形抵抗算出のときのみ用いられ、しかも変形抵抗はひずみ速度のm乗に比例し、mの値は0.13程度であるので、ひずみ速度算出時の誤差2%程度は問題にならない。したがってひずみ速度式としては、次の簡略式が利用できる。

$$\dot{\epsilon} = \frac{2\pi}{60} NR \sqrt{\frac{r}{R'h}} = 0.10472 NR \sqrt{\frac{r}{R'h}} \dots\dots\dots (4.24)$$

(4) 圧下力係数式の簡略化

R.B.Simsの圧下力係数 Q_p は、式(2.7)で示されるように複雑な形をしているのみならず、中立点板厚 $Y = h(1+f)$ を介して、式(2.10)で表わされる先進率 f を含んでいる。両式から、 Q_p は $\sqrt{\frac{R}{h}}$ および r の関数として表わすことができそうである(Q_p に関しても、 f の場合と同様に、 $R = R'$ として扱う)。

Q_p と $\sqrt{\frac{R}{h}}$ との関係を図示すると図4.7のようになり、 r を固定すると Q_p は $\sqrt{\frac{R}{h}}$ の一次式で表わせることがわかる。同図から、これは近似的に

$$Q_p - 0.85 = A(r) \left(\sqrt{\frac{R}{h}} - 1 \right) \dots\dots\dots (4.25)$$

として表わされ、各 r に関する傾斜 $A(r)$ を読みとり図示すると図4.8のようになる。 $A(r)$ は r の2次式で表わせるであろう。以上より、 Q_p の推定母数関数として

$$Q_p = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + (a_3 + a_4 r + a_5 r^2) \sqrt{\frac{R}{h}} \dots\dots\dots (4.26)$$

を仮定して、次のデータを用い多重回帰分析を行なったところ、第3項は有意でなく減少し、次式の結果を得た。

$$r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$$

$$\frac{R}{h} = 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600$$

$$Q_p = 0.8062 - 0.3023r + (0.0419 + 0.4055r - 0.2246r^2) \sqrt{\frac{R}{h}} \dots (4.27)$$

上式による計算結果と、Sims式とを比較すると、実用範囲において最大誤差は0.5%ぐらいであり、上式はきわめてよい近似度を示している。

以上、圧延理論式の簡略化による数式モデルの作成法を4ケースについて述べた。R.B.Simsの先進率の簡略式としては、式(4.17)が誤差0.5%以内で、W.Dahlの平均ひずみ速度式の簡略式としては、式(4.24)が誤差2%以内で、またR.B.

Sims の圧下力係数の簡略式としては、式(4.27)が誤差0.5%以内で、それぞれ成り立ち、さらにこれらの誤差は絶対値計算方式のセットアップモデルの中ではほとんど影響を与えないことを明らかにした。

4.5 絶対値計算方式実験

絶対値計算方式の表示実験は偏差計算方式と同様に表示と実績のロール回転数を一致させる方式により行なった。具体的には一コイル前の圧延における負荷配分を求め、この比を次の圧延材の設定計算に適用することにより、前コイルの圧延と同一の回転数(厳密には各スタンドの回転数の比が同一)のスケジュールが得られるようにした。絶対値計算方式の表示実験は問題点が抽出されるとすぐその場で直すことができるので、数式モデルの更新、拡張は現場で試行錯誤を繰り返えし、計算方式を確かなものにして行った。この過程において絶対値計算方式の方式的な特徴が次のように明らかになった。

- (1) 制御方式や数式モデルの調整は現地において、容易にしかも実験の成果を採り入れつつ着実に行なえる。
- (2) ステンレスなど特殊鋼についてはセットアップ計算の当初の対象とは考えていなかったが、炭素含有量を適当に大きく設定することによりある程度の計算結果が得られる。つまり鋼種の変更、成分の違いに対して融通性がある。
- (3) 特定スタンドを用いないダミー圧延も当初の対象ではなかったが、プログラミング上の若干の配慮だけで、同一プログラムを用い、第3、第4あるいは第5スタンド仕上の設定計算が可能である。

絶対値計算方式の実用結果の一例を図4.9に示す。これは上記実験後に、計算機制御を実用化したときの操業データの一部である。ダミー圧延(第5スタンドダミー)や全スタンドロール替等を含んでいる。このような特殊な状況下でも、すべての圧延が計算機の指令通りに実施できるため、オンゲージ率が向上するほか、圧延操業が容易になることを示している。

仕上精度としては、同図(b)に示すように、先端部では100 μ 以内に入っており、中央部ではAGCの効果のため、50 μ 以内に入っていることがわかる。

4.6 結 言

絶対値計算方式によるミルセットアップは、圧延仕様に従ってドラフトスケジュール

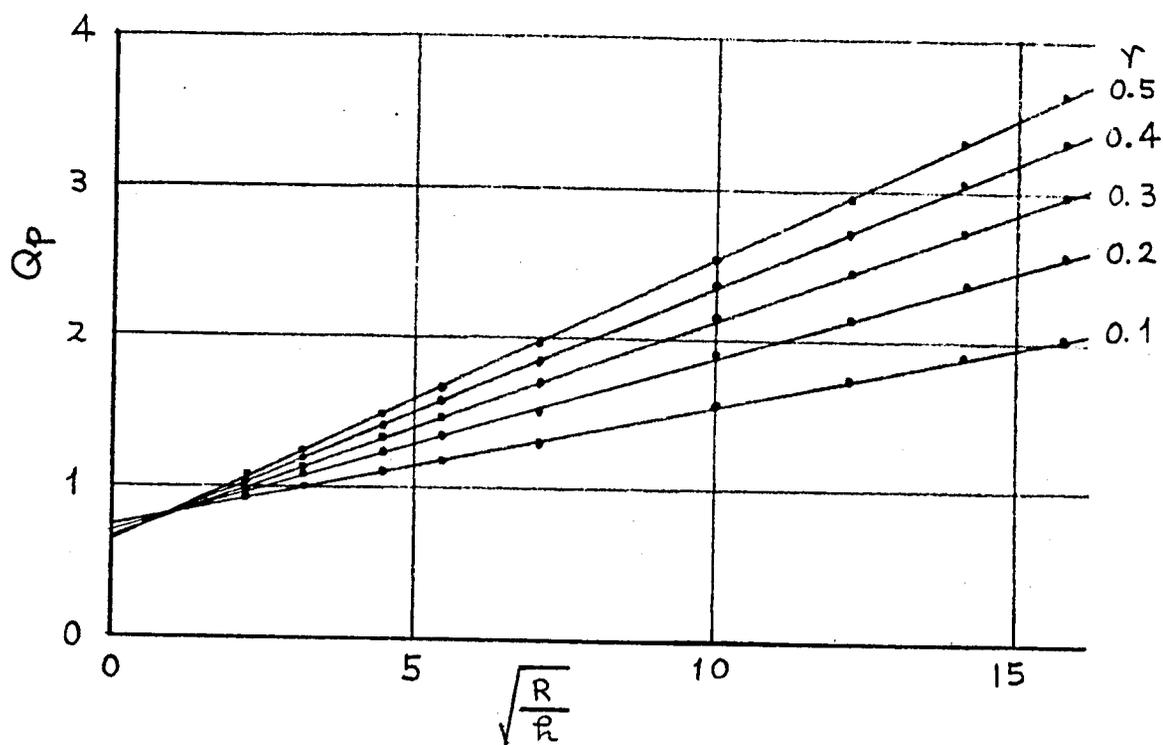


图 4.7 Q_p 对 $\sqrt{\frac{R}{r}}$

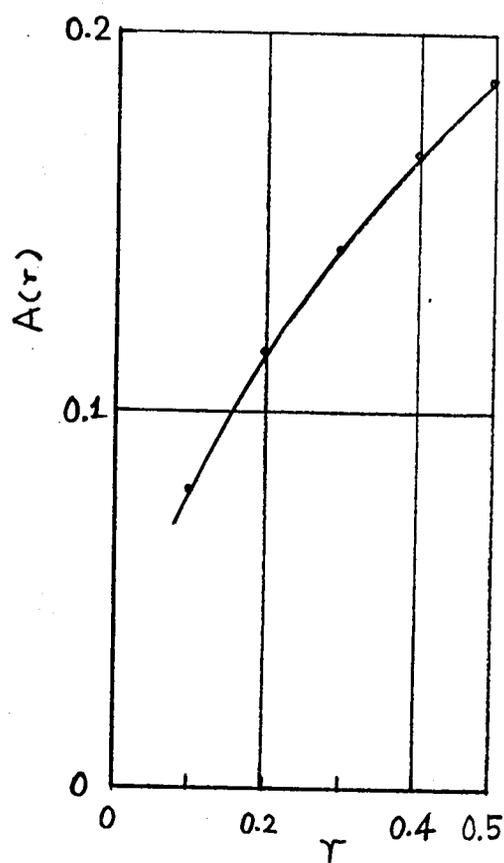


图 4.8 $A(r)$ 对 γ

板幅 (mm)	817	"	"	"	811	811	"	"	785	"	750	"	780	"	1062	"	"	"	"
仕上板厚 (mm)	3.19	"	"	"	9.52	7.93	"	"	3.19	"	3.19	"	2.29	"	4.31	"	"	"	"

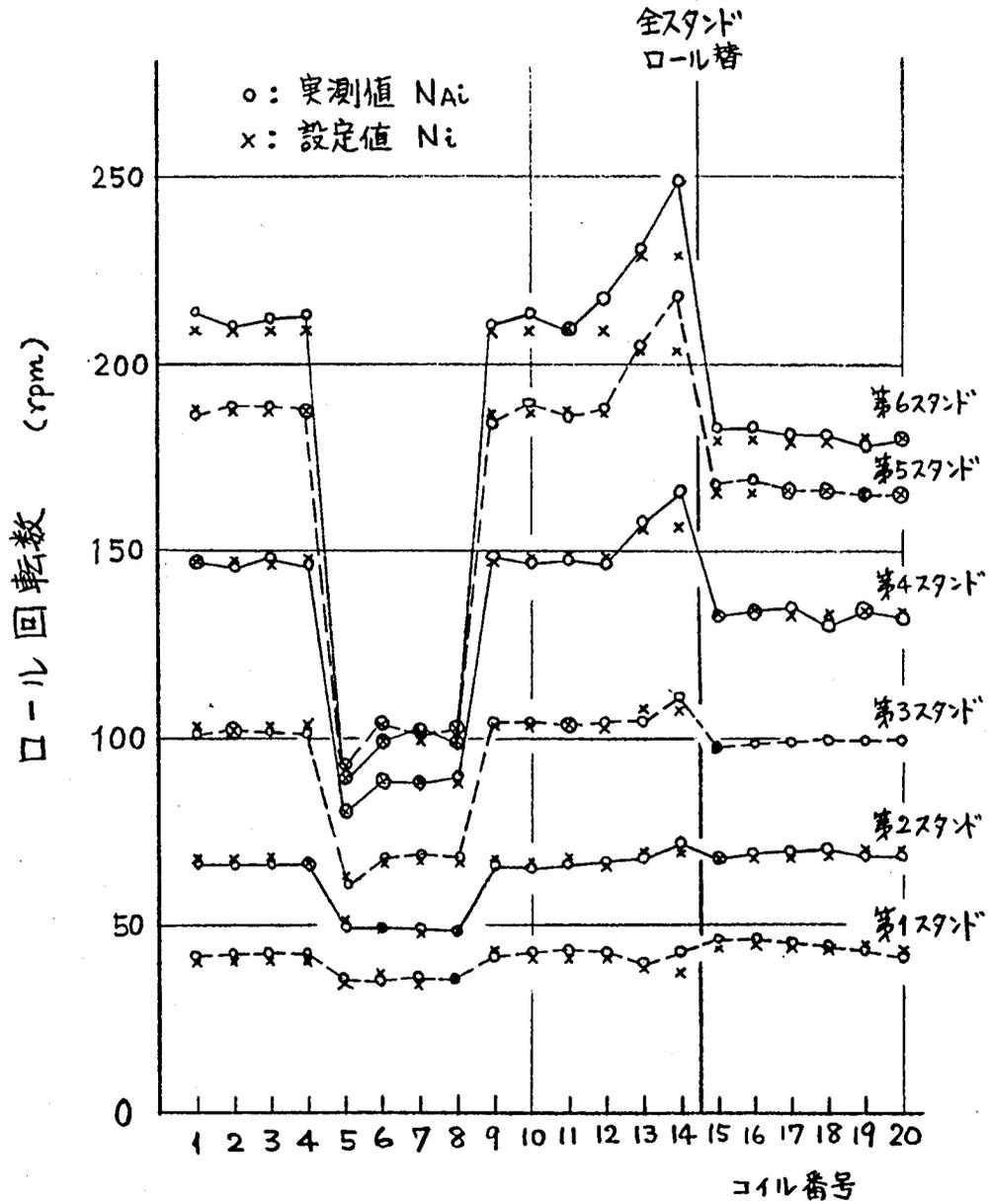


図4.9(a) ロール回転数の実測値と設定値

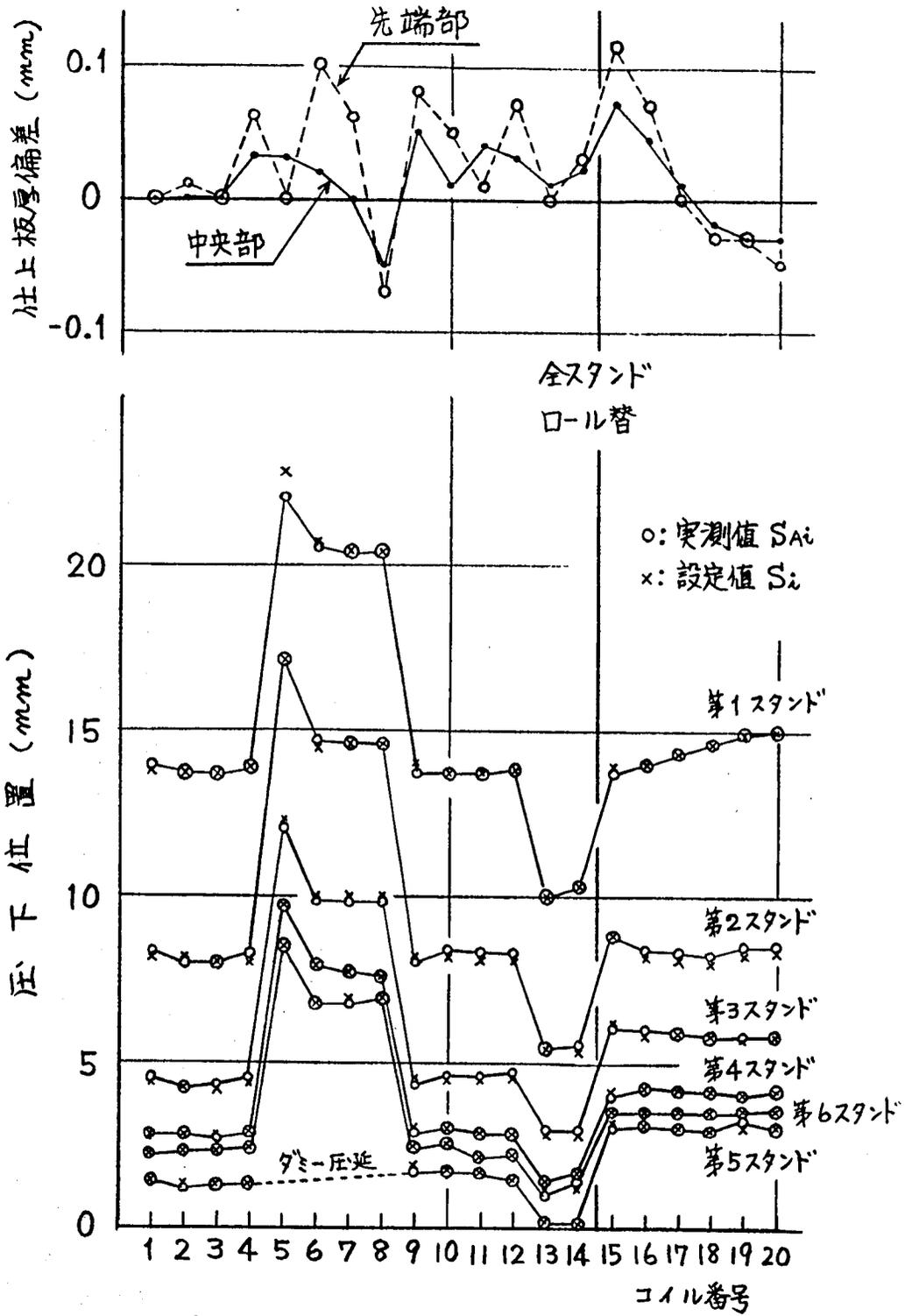


図 4.9(b) 圧下位置の実測値と設定値

を定め、各スタンドの圧延温度、変形抵抗、圧延荷重を算出しミルスプリングを考慮して圧下位置設定値を決定するとともに、先進率を考慮して体積速度一定の関係よりロール回転数設定値を決定する方法である。

これらの設定値の計算過程において、各種の数式モデルを用いるが、いずれの数式モデルも各変数の絶対量が求められるようなモデル化を行なった。その作成方法は大別すると次の3種類となる。

- (1) 先進率、ひずみ速度、圧下力係数等は、圧延理論式があるが、いずれも複雑な形をしているので、圧延理論を尊重しながら、理論式と0.5～2%以内の誤差で一致する簡略式を線形多重回帰分析を用いて導出した。理論式の簡略化に線形多重回帰分析を用いる場合、推定母数関数の構築のしかたにより簡略式とその精度が異なることを具体例によって示した。
- (2) 変形抵抗やミル剛性係数は、圧延材料や圧延機自体の属性により定まるものであるため、変形抵抗は実験室において、ミル剛性係数は圧延機そのものにより、それぞれの実験式を作成し、数式モデルとした。これらの場合も理論を尊重し、実験式の形は理論的に定め、係数値を実験データより求めた。
- (3) パワーカーブや圧延温度目標値は、板の形状や品質に影響するものであるが、形状や品質は直接的にモデル化せず、運転員の判断に委かせることにしたため、過去の操業データの回帰分析により統計的に回帰式を定めた。

絶対値計算方式の表示実験においても、ロール回転数の表示値が実績値に一致するようにし、6スタンド分の圧下位置の表示値と実績値により、本方式のミルセットアップの良否の比較が図かれるようにした。

この表示実験により、絶対値計算方式の方式的な特徴が次のように明らかとなった。

- (1) 制御方式や数式モデルの現地調整が容易である。
- (2) 圧延材の鋼種の追加変更、成分の変更に対して融通性がある。
- (3) 中間スタンドや下流スタンドを使わないダミー圧延において、使用スタンドを任意に選んでセットアップ計算を実施することが可能である。

以上板厚精度としては、先端部で100 μ 以内、中央部で50 μ 以内に入ることが確認された。

第 5 章 偏差計算方式の適応制御

第 5 章 偏差計算方式の適応制御

5.1 緒 言

仕上圧延機の適切なミルセットアップを実施するためには適応制御が重要である。ミルセットアップの数式モデルとしては、パワーカーブ、圧延荷重式、温度予測式、ゲージメータ式などがあげられるが、これらの数式モデルが常に実際の圧延現象を忠実に表わしているとは限らない。また圧延の進行に伴って、圧延ロールが熱膨張や摩耗を起し、圧延状態は時々刻々と徐々に変動して行く。適応制御の目的は、このような数式モデルの誤差と圧延状態の変動をアダプティブ計算により検出し、再現性のある誤差や変動を逐次修正補償して、以後のセットアップ計算を改善して行くことにある。

適応制御の方式も、ミルセットアップと同様に、偏差計算方式と絶対値計算方式との2種類を考えることができる。本章では、両方式の前提として、適応制御すべき外乱要因と其中で適応制御の可能な要因は何かを明らかにし、続いて偏差計算方式の適応制御の方法を論じる。絶対値計算方式の適応制御は次章で論じる。

適応制御の要因の抽出に当っては、ミルセットアップ値である圧下位置とロール回転数の算出過程を逆にたどりながら、セットアップ値に及ぼす外乱の種類と影響度合を定性的に検討する。適応制御の要因として何を選ぶかは、絶対値計算方式の適応制御の主要な課題である。

偏差計算方式の適応制御は、適応制御すべき要因は何であるかを深く追求することなく、ミルセットアップ後、圧延してみた結果から次回圧延時に修正すべきセットアップ値を直接的に求めようとするものである。本方式の要点は次のようになる。ミルセットアップの後、圧延した結果として検出できる量は、各スタンドのロール回転数偏差 ΔN_i と仕上板厚偏差 Δh_F である。これら偏差の原因のすべては、圧下位置の設定値にあると考えれば、次回圧延時にセットアップする圧下位置は修正量 ΔS_{0i} を加味する必要がある。 ΔS_{0i} を ΔN_i と Δh_F で求めようとするのが本方式である。このようなブラックボックス的な修正制御により、適応制御が実施できることを理論的に検討する。

5.2 適応制御の要因

ミルセットアップ値に影響を与えるであろうと思われる各種の外乱要因を、圧下位置とロール回転数のそれぞれの計算過程を逆にたどりながら抽出する。圧延機の制御に用いら

れる計測器の数は圧延環境や設置条件のため限られるので、すべての外乱要因を分離計測することは不可能に近く、適応制御すべき要因の数も限定される。このため、どのレベルで要因をとらえるか、その要因を適応制御することによりあわせて吸収される外乱要因は何かをも明らかにする必要がある。本章では適応制御すべき要因の抽出に重きを置き、抽出された要因の及ぼす効果範囲については次章で詳述する。

5.2.1 圧下位置の算出過程

圧下位置とはロール開度を制御する圧下ねじの位置である。ロール開度は上下ワークロールの間隙であり、これを直接計測し、設定することは実用上困難である。このためロール開度は通常圧下ねじを介して計測、設定、調整される。圧下位置を S 、キスロール時の圧下位置（ロール開度零点、以下略して零点と云う）を S_0 とすると、ロール開度は $S - S_0$ で表わされる。圧下位置、ロール開度ならびに零点の関係はすでに図 2.1 に示した。

出口板厚 h を得るための圧下位置 S は、予測荷重 P を用い、Hooke の法則に従う次のゲージメータ式により求められる。

$$S = h - \frac{P}{K} + S_0 \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

- ここで、
- S : 圧下位置
 - S_0 : ロール開度零点（キスロール時圧下位置）
 - h : 出口板厚
 - P : 圧延荷重
 - K : ミル剛性係数

圧延荷重の計算式 P_c は前述のように次式で表わされる。

$$P_c = k_p b \sqrt{R' (H-h)} Q_p \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

圧延の進行に伴ない、圧延ロールは熱膨張し、ロール表面は摩耗して行く。このため零点は徐々に変化して行く。したがって常に正しいミルセットアップを行なうためには零点の適応制御が必要である。

出口板厚 h は圧延仕様に基づいて、パワーカーブなどからドラフトスケジュールとして決められる目標値である。馬力、荷重、形状の面からドラフトスケジュールをいかに決めるかについては、パワーカーブに関する別の適応制御が必要であるが、これは h の目標値が変わるだけで、オンゲージ率向上の適応制御には直接関係しないので、説明を省略する。

上式中の P/K は圧延機の伸びの項である。ミル剛性係数 K は、圧延機寸法、圧延速度ならびに板幅の関数であり、計算機制御導入の際にあらかじめ実験的に測定し、その関数を定めれば、以後変化するものでなく、適応制御は必要でない。万一、 K が変化しても、次章で述べるように、零点の適応制御で吸収できる。

圧延荷重 P は圧延仕様とドラフトスケジュールより予測され、ミルセットアップのためには特に重要な要因である。圧延荷重 P_C は式 (5.2) で計算されるが、その予測誤差は、図 4.2 で示したように約 200 t である。この予測誤差の原因は、変形抵抗を測定したときの条件と操業時の条件との差違で、次の要因が考えられる。

- (1) 材料温度の評価
- (2) 材質の評価
- (3) 板 幅
- (4) 圧延環境の相違
- (5) 数式モデルの誤差

材料温度の変形抵抗に及ぼす影響はかなり大きく、たとえば温度変化 10℃ が変形抵抗変化の 3% 程度に対応する。したがって圧延温度は独立に適応制御が必要である。しかし仕上圧延機における温度計測は、通常、仕上圧延機の入側と出側に設置された二つの温度計を用いて行なわれるのみである。このため材料温度に関しては、両者の温度差すなわち仕上圧延機における温度降下の一要因しか適応修正はできない。

材質は鋼種と成分に分けて計算機に入力される。材質の誤差は圧延荷重の誤差となるが、材質の誤差を独立に検出することはできない。

仕上圧延機の入側に幅計がない場合には、板幅は公称値が用いられ、誤差を伴うが、その誤差は 0.5% ぐらいであり、圧延荷重ならびに仕上板厚への影響は小さい。適応計算時には、板幅は仕上圧延機出側の幅計実測値を用いるので、適応制御には板幅誤差は関係しない。

圧延環境の相違や数式モデルの誤差は圧延荷重の誤差となるが、その原因を分離することは、オンラインの計算ではできない。

上述のように圧延荷重の変動原因のうち、温度降下量と板幅誤差以外は、要因を分離することはできない。そこで、これら分離不能な要因に基づく誤差を纏めて適応制御せざるを得ない。絶対値計算方式では、これを塑性曲線適応修正係数 (以下、適応係数と略す) α により、適応制御する。適応係数 α_1 は各スタンドごとに設けられ次式のように用いら

れる。

$$P_i = z_i P_{ci} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、 P_{ci} は式(5.2)より求められる圧延荷重の計算値であり、 P_i は設定計算に用いる値である。

以上をまとめると、圧下位置設定時の外乱、誤差としては、ロール開度零点、ミル剛性係数、圧延温度、板幅、圧延環境、数式モデルの誤差が抽出できるが、適応制御の可能な要因としては、零点、温度降下量、適応係数が挙げられる。

5.2.2 ロール回転数の算出過程

各スタンドの出口板厚 h_i を目標値に保つためには、各スタンドの出口板速度 v_i が、 h_i にマッチしたものでなければならない。すなわち任意の時間間隔に圧延スタンドを通過する体積はどのスタンドでも等しくなければならず、板幅の変化を無視するならば次式が満足されねばならない。

$$h_i v_i = h_{i+1} v_{i+1} = h_F v_F \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

板速度 v とロール周速 v_n との関係は、先進率 f を用いて次式で表わされる。

$$v = v_n (1 + f) \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

ロール周速 v_n とロール回転数 N との関係は次式

$$v_n = 2 \pi R N \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

で表わされる。結局、所要の板速度 v_i は次式のロール回転数 N_i を速度制御装置に設定することにより得られる。

$$N_i = N_F \frac{R_F h_F (1 + f_F)}{R_i h_i (1 + f_i)} \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

速度制御装置は、本来、駆動モータの回転数を制御するが、ワークロールとモータとの間に減速ギヤがある場合にそのギヤ比を考慮するならば、ロール回転数の設定と考えるよい。したがって圧延速度に関しては上式のみを考えればよい。

上式で、誤差の原因と考えられる要因は、ロール半径 R と先進率 f である。

ロール直径はロール研磨後正確に測定するので、ロール径の誤差は、計算機への入力時のミスを除けば、ロールの熱膨張と摩耗による変化である。この変化はロール直径約600mmに対し、最大1mmぐらいであり、変化率は0.2%以内と小さい。しかもこの変化は全スタンド同一方向であり、上式で分子、分母相殺されるため、ロール径の変化は無視できる。

先進率 f の実用範囲の値は式 (2.10) で求めると、大体 0.02~0.15 である。先進率 f は $(1+f)$ の形で用いられるので、先進率の誤差を、たとえば 10% とすると、 $(1+f)$ の誤差は 0.2~1.5% となる。しかも $(1+f)$ は、上式で R と同様に、分子、分母に用いられるので誤差は相殺される。したがって先進率の適応修正は不要であり、またオンラインでは不可能であると考えられる。

ただし、先進率の値そのものは、次章で後述のように圧延実験の結果からは、R.B.Sims の理論値は、過大評価であると思われる。

以上より、ロール回転数設定時の外乱、誤差としては、ロール半径と先進率が抽出できるが、これらの誤差の影響は微小なので、適応制御の要因には選ぶ必要のないことが定性的には言える。

5.3 偏差計算方式による^{5.1), 5.2), 5.3)}適応制御の方法

熱間タンデム仕上圧延機の仕上板厚の制御を目的とした設定値は前述の通り、各スタンドの圧下位置 S_1 とロール回転数 N_1 である。圧延に先だって S_1, N_1 を求め、これらの設定値のもとで圧延して板の先端をオンゲージにするのが、ミルセットアップの目的であるが、設定計算の誤差や、圧延状況の変動のため必ずしも所要厚みの板先端を得ることができない。計算機導入の以前より、これらの誤差や変動に伴なり操業の困難さとオフゲージを除去する目的で、ルーバ制御系と自動板厚制御系 (AGC) が設置されている。板の先端が各スタンドを通板して行くとスタンド間に設けられたルーバが作動し、たとえば設定値が正しくなくても、関連するスタンドのロール回転数を修正していき、体積速度一定の関係を保つようにする。全スタンド通板後は、ルーバ制御系のため、ミルセットアップ時に意図した体積速度の値とは異なっているかも知れないが、体積速度一定の関係は保持される。

どのような設定計算方法を用いようとも、設定値 S_1 と N_1 とは基本的には次の 2 式で表わされる。圧下位置 S_1 はパワーカーブ等により各スタンド出口板厚 h_1 を決め、圧延荷重 P_1 を予測し、次のゲージメータ式により決定される。

$$S_1 = h_1 - \frac{P_1}{K} \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

ここで、 K はミル剛性係数を示す。上式でロール開度零点 S_{01} は、簡単のため、零と仮定した。あるいは S_1 をロール開度と解釈してもよい。

一方、ロール回転数 N_i は最終スタンドロール回転数 N_F を定めることにより、次の体積速度一定の関係式で求められる。

$$N_i = N_F \frac{R_F h_F (1 + f_F)}{R_i h_i (1 + f_i)} \dots\dots\dots (5.9)$$

ここで、 R_i はロール半径、 f_i は先進率、添字 F は最終スタンドを示す。

上記設定値 S_i の計算および設定に際して各種の外乱や誤差が混入され得る。式(5.8)の計算に際し、圧延荷重 P_i は圧延温度、鋼種、板幅等の関数であり、特に圧延温度の実測または予測は正確を期し難い。圧下位置設定に際しては、ロールの熱膨張、摩耗等によるロール開度零点のずれに対する修正が必要となる。これらのため、所要の各スタンド出口板厚 h_i を得るための圧下位置の正確な設定は極めて困難である。

一方、ロール回転数 N_i の設定は、式(5.9)から明らかなように分子、分母が同種の要因で構成されているため計算精度も高く、また設定も、直流電動機からなる速度制御系であるため、正確である。

上記の各種外乱、誤差が原因となって通板後の圧延結果は必ずしも所要の通りになっているとは限らない。各スタンドのロール回転数はルーパー制御系のため設定値からずれ、また仕上板厚はAGCが効くまでの過程では偏差が生じる。この現象は、見方を変えれば、各種数式モデルの誤差が、ロール回転数と仕上板厚の実測値と計算値との差から検出できることを示している。

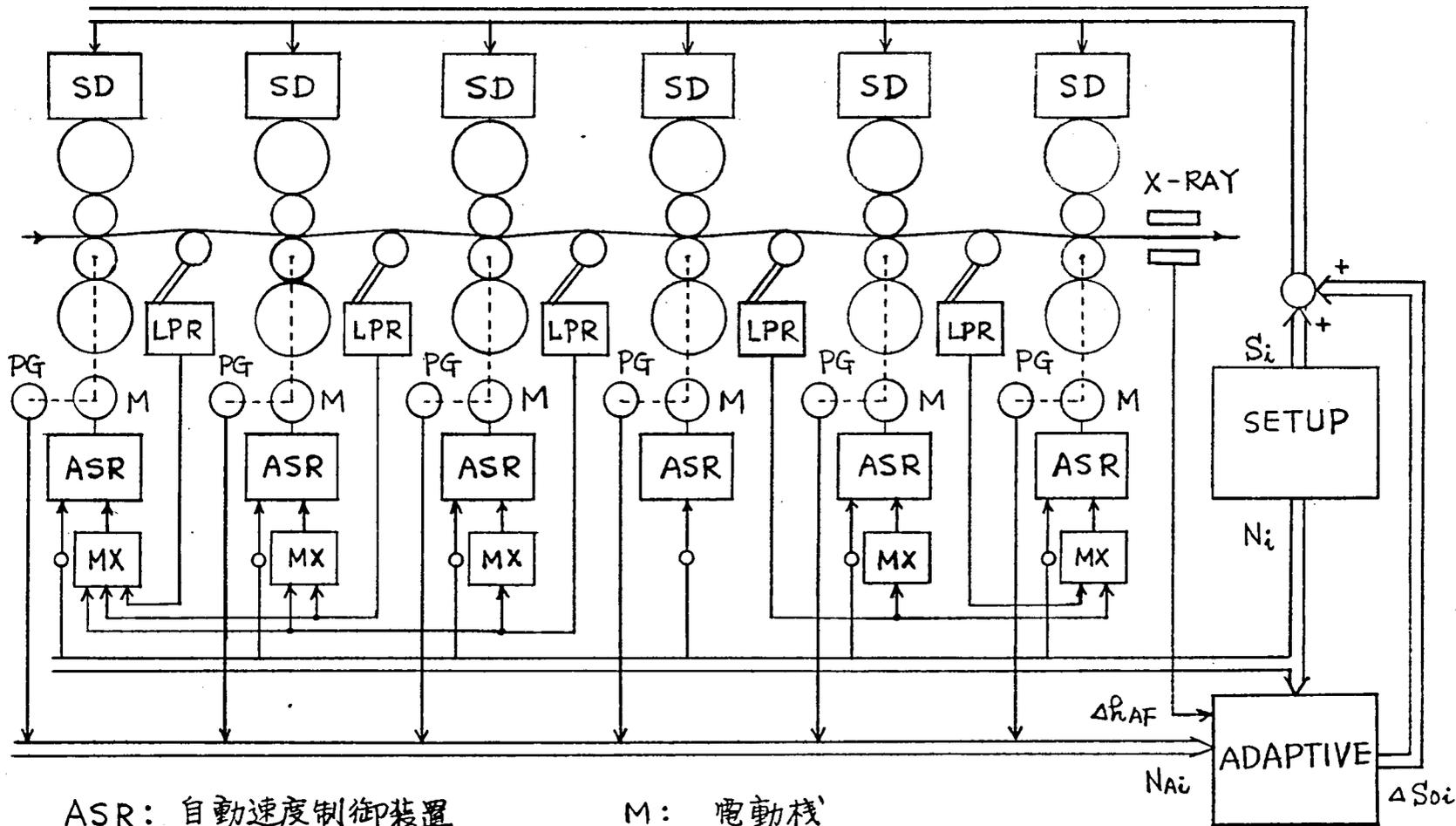
基準値(設定値)からの偏差として検出できる量は各スタンドのロール回転数偏差 ΔN_i と仕上板厚偏差 Δh_F であり、これらの原因のすべては、圧下位置の設定値にあると考えれば、これらの偏差に基づき、次回圧延時の圧下位置修正量 ΔS_{0i} を求めることができる。 ΔS_{0i} は ΔN_i と Δh_F の関数として求めることができる。本適応制御方式の概略構成図を図5.1に示す。

5.4 適応制御数式モデル

上述の適応制御に用いる適応修正式の理論的背景とその導出法を述べる。

タンデム圧延機の圧延現象を表わす式は上記両式であり、両式を板厚 h_i を介して結合すると次式となる。

$$S_i + \frac{P_i}{K} = h_i = h_F \frac{R_F N_F (1 + f_F)}{R_i N_i (1 + f_i)} \dots\dots\dots (5.10)$$



ASR: 自動速度制御装置	M: 電動機
LPR: ループ位置制御装置	MX: 信号合成器
PG: パイロットジネレータ	SD: 圧下制御装置

図 5.1 偏差計算方式適応制御の概略構成

上式で板厚を拘束せず任意な値をとり得ると考え、左辺と右辺の関係が圧延中成立することを考慮すると、 S_i と P_i の誤差は圧延結果として h_F と N_i (厳密には N_i/N_F の比) の変動として現われることがわかる。また逆に、これらの Δh_F と N_i の変動を除去するためには、 S_i を修正すればよいことがわかる。これより圧下位置修正量 ΔS_{0i} は、 Δh_F と ΔN_i との関数として求められることがわかる。逆に、 ΔS_{0i} なる補正を圧下位置に施せば、 Δh_F 、 ΔN_i を発生させた各種外乱が、 ΔS_{0i} の中に吸収され、その結果、各スタンド出口板厚 h_i のみならず、体積速度、動力配分も所要値となる。

圧下位置を介しての適応修正の式としては、実用上簡潔な数式モデルで表わすことが好ましい。適応修正式は各変数の偏差量が微小であるため、偏差計算式で表わすことができる。

適応修正値を求めるに当り、まず、 Δh_F 、 ΔN_i に応じる圧下位置偏差 ΔS_{0Ai} を偏差計算式で求める。影響係数を利用した偏差計算式で求まる ΔS_{0Ai} は、 Δh_F 、 ΔN_i を発生した原因としての圧下位置偏差であり、適応修正検出値と呼ぶ。次回圧延のための適応修正値は、基本的には、適応修正検出値 ΔS_{0Ai} の符号を反転することにより求められる。しかし、このとき、後述のように、圧下位置の実測値と設定値との差違、ならびに各種の外乱や誤差を除去するための時系列的な平滑化を考慮する必要がある。

適応修正検出値 ΔS_{0Ai} は次式で求められる。

$$\Delta S_{0Ai} = S'_{i,8} \left(\frac{\Delta h}{h} \right)_F + \sum_{j=1}^F S'_{i,j} \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_j \quad \dots \dots \dots (5.11)$$

ここで、 $\left(\frac{\Delta h}{h} \right)_F$ は仕上板厚変化分、 $\left(\frac{\Delta N}{N} \right)_j$ は j スタンドにおけるロール回転数変化分。 $S'_{i,8}$ 、 $S'_{i,j}$ は第2章で述べた影響係数である。これらの影響係数値は、操業データを解析するか、あるいは理論的に求めることが可能である。理論的に求める場合には前述の影響係数の解法(4)で得られる。

以上は、圧下位置が設定値の通りに設定されていることを前提に、議論を進めてきたが、実際には、圧下位置決め装置の設定誤差、手動介入、AGC作動等により、圧下位置は、必ずしも設定値通りになっているとは限らない。このため本方式の実用化に際しては、圧下位置の実測値と設定値との差違を、上記 ΔS_{0Ai} から除去し、この差違以外に ΔS_{0Ai} に含まれる、実測時と設定計算時との圧延条件の相違を抽出する必要がある。

圧下位置適応修正量 ΔS_{0i} は、適応修正検出値 ΔS_{0Ai} より、圧下位置の実測値と設定

値との差を除去し、符号を反転して、次式で求められる。

$$\Delta S_{0i} = S_{Ai} - \bar{S}_i - S_{0i} - \Delta S_{0Ai} \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

ここで、 ΔS_{0i} : 圧下位置適応修正量 (記号的にはロール開度零点の修正と表わす)

S_{Ai} : 圧下位置の実測値

\bar{S}_i : ロール開度設定基準値 (圧下位置の零点と適応修正量を含まぬことを意味する)

S_{0i} : ロール開度零点

ΔS_{0Ai} : 式(5.11)で算出される適応修正検出値

適応修正は本来、圧延の進行に伴ない徐々に変化して行く性質のものに適用するのが効果的である。 ΔS_{0Ai} あるいは ΔS_{0i} を求める場合の測定誤差、外乱、計算誤差を除去し、緩慢な変動のみを抽出するため、上式の ΔS_{0i} を時系列的に平滑する必要がある。平滑の方法として指数平滑法を用い累積補正するとき、圧下位置適応修正量 ΔS_{0i} は次式となる。

$$\Delta S_{0i}^{+1} = \Delta S_{0i} + \beta_S \{ (S_{Ai} - \bar{S}_i - S_{0i} - \Delta S_{0Ai}) - \Delta S_{0i} \} \quad \dots\dots\dots (5.13)$$

ここで、 ΔS_{0i} は今回の圧延 (ΔS_{0Ai} を求めた圧延の設定時) に用いた値であり、

ΔS_{0i}^{+1} は次の圧延に用いる圧下位置適応修正量である。 β_S は指数平滑ゲインである。

$\beta_S = 1$ のときは前回の圧延実績より求められる適応修正量を100%用いるもので、上式は式(5.12)と同一となる。

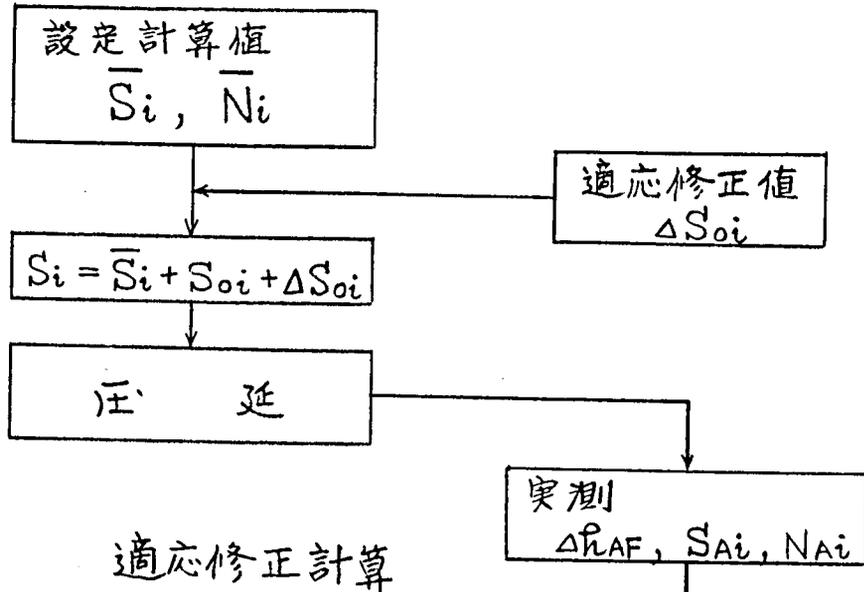
5.5 ミルセットアップと偏差計算方式適応制御の組合せ

偏差計算方式による適応制御方式は、ミルセットアップ計算では補正しがたい圧延状況の変動を吸収することを目的とするため、どのようなミルセットアップ方式とも組合せ使用することが可能である。しかし、絶対値計算方式と偏差計算方式のいずれのセットアップ方式と組合せる場合でも、圧延現象記述のモデルはセットアップと適応制御の両方に統一的に用いて、モデル誤差の発生を最小にすることが望ましい。

ミルセットアップと適応制御の両方に偏差計算方式を組合せて使用する場合を以下に述べる。この場合の計算フローを図5.2に示し、この図で両者の関係ならびにロール回転数の表示と実績とを一致させる方法(第3.8節で述べた前回実績負荷配分比を用いる方法)についても述べる。

図において設定計算値 \bar{S}_i, \bar{N}_i は、偏差計算方式のセットアップ計算で、標準圧延条件から圧延指令に対応する圧延条件に補正したものである。 \bar{S}_i はロール開度設定値で、 ρ

設定計算



適応修正計算

$$\Delta S_{oAi} = S'_{i,8} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{AF} + \delta \cdot \sum_{j=1}^F S'_{ij} \left(\frac{N_A - \bar{N}}{\bar{N}} \right)_j$$

$$\Delta S_{oi}^{+1} = \Delta S_{oi} + \beta_S (S_{Ai} - S_i - \Delta S_{oAi})$$

設定計算(次圧延)

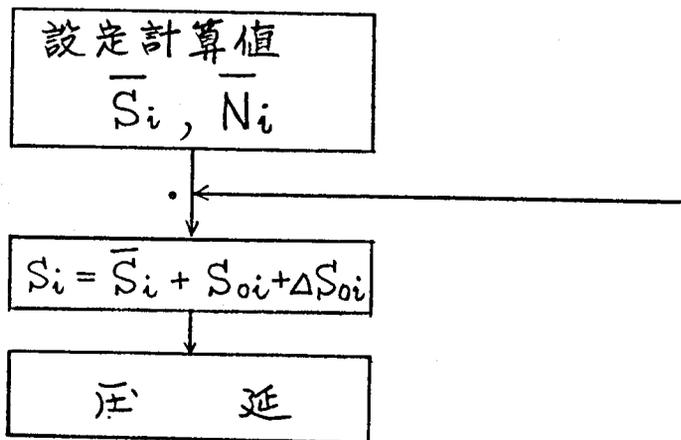


図 5.2 偏差計算方式の設定計算と適応制御

ロール開度零点の補正をまだ施していない値を示す。

圧下位置設定値 S_i は、 \bar{S}_i にロール開度零点 S_{0i} 、圧下位置適応修正値 ΔS_{0i} を加えて求め、設定される。 ΔS_{0i} は前回までの圧延結果に基づき得られた適応修正値である。

全スタンド通板後の圧延データとしては、仕上板厚偏差 Δh_{AF} 、各スタンドの圧下位置 S_{Ai} 、ロール回転数 N_{Ai} を実測し、前述の適応修正計算に用いる。求められた適応修正値 ΔS_{0i}^{+1} は次回の設定計算に用いられる。

圧延実績の負荷配分比を維持して、次回圧延において、ロール回転数の表示と実績とを一致させる方法を用いる場合には、適応修正計算式中の $\sum_{j=1}^F S'_{1j} \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_j$ の項を無視すればよい。図中の式で δ を 0 とすればよい。 δ を 1 にするか、0 にするかにより、この方式の採否をコントロールすることができる。

以上ホットストリップミル計算機制御における適応制御の一方法として、式(5.11)による偏差計算方式が可能なることを述べた。この方法は、各スタンドの速度変化量と、オフゲージ量のみを検出し、これにより調整量をすべて圧下位置に帰することにより、単純に適応制御が実施できる。

5.6 結 言

仕上圧延機の適切なミルセットアップを実施するには、セットアップ計算とセットアップの過程で発生する外乱や誤差、ならびに圧延状況の系時的な変化を検出し、これらを適応的に吸収する適応制御が必要である。このため、これらの誤差や系時の変化を外乱要因として抽出し、その影響度合を定性的に検討し、適応制御すべき要因を選んだ。

外乱要因としては、次があげられる。

- (1) ロール開度零点
- (2) ミル剛性係数
- (3) 圧延温度
- (4) 板 幅
- (5) 圧延環境
- (6) 数式モデル誤差
- (7) ロール半径
- (8) 先進率

適応制御すべき要因、あるいは可能な要因として、次を選んだ。

- (1) ロール開度零点
- (2) 仕上圧延機の入側から出側までの温度降下量
- (3) 圧延荷重式の修正のための適応係数

これら3種類の適応制御要因により、上記8種類の外乱要因のほとんどは吸収可能であることは次章の絶対値計算方式の適応制御で詳述する。

本章で述べた偏差計算方式の適応制御は、外乱要因を分離抽出することにはせず、それらの影響が、圧延状態に表われることに着目し、その状態を、仕上板厚偏差とロール回転数偏差で計測し、計測値に基づき、圧下位置の修正値に影響係数を利用して算出するものである。本方式において、仕上板厚とロール回転数の偏差により、修正すべき圧下位置の補正量が算出できることを理論的に証明した。

本適応制御方式が式(5.11)のように単純な式で表わされるのは、板厚制御のための操作変数が各スタンドの圧下位置とロール回転数であることと、通常の熱間タンデム仕上圧延機には体積速度一定の関係を保つためにスタンド間にルーバーが設けられており、ミルセットアップの誤差や圧延状況の変動があれば、ルーバー制御系がロール回転数を修正することに基づいている。

本適応制御方式の特徴を要約すると、次のようになる。

- (1) 数式モデルは、7項からなる線形一次式で単純である。
- (2) モデルの係数は影響係数の解法を利用して算出できる。実用上、係数はテーブルに格納することも、圧延条件に応じる関数とすることも可能である。
- (3) どのようなセットアップ方式とも組合せることができる。
- (4) セットアップモデルが確立し、同モデルの誤差が僅少になったとき、圧延状況の変動の吸収には本方式が適している。

第 6 章 絶対値計算方式の適応制御

第 6 章 絶対値計算方式の適応制御

6.1 緒 言

偏差計算方式の適応制御は、現象として現われた圧延変動を検出し、操作端（圧下位置）に直接フィードバックする方式で、圧延現象をいわばブラックボックスとしてとらえるものであった。

これに対し、絶対値計算方式の適応制御は、圧延変動の原因となる要因を可及的に分離し、ミルセットアップの数式モデルのパラメータを個々に修正しようとする方式である。ミルセットアップの誤差や圧延状況の変動の検出は、通常の仕上圧延機においては、圧下位置 S_1 、ロール回転数 N_1 、圧延荷重 P_1 、仕上圧延機入側温度 T_s 、同出側温度 T_F および仕上板厚偏差 Δh_p の測定値を用いて実施せざるを得ない。これらの測定値を用いて実施できる適応修正の要因として、次の 3 種類を前章で選んだ。

- (1) ロール開度零点
- (2) 塑性曲線適応修正係数
- (3) 圧延温度式定数

これらの適応修正値を正しく求めるためには、上記測定値だけでは、必ずしも十分ではない。たとえば、各スタンドの出側に板厚計や温度計が設置されると、より正しい数式モデルが得られると同時に、より正しい適応修正値が得られる。しかし多数の計測器を圧延機群の中に設けることは、悪環境に応じる保守、配置、費用の面や、機構上からくる作業上の困難さのため、不可能に近い。このため各スタンドの出口板厚や圧延温度の実績値は計算によって求めなければならない。このような状況のもとで、適応修正値は、測定誤差や計算誤差を除去するために統計的処理が必要である。統計的処理としては、種々の方法があるが、⁶¹⁾ 本論文では主に指数平滑法を用いることを検討する。

本章では、上記 3 種類の適応修正要因の算出法を検討し、続いて、これら適応修正要因によってミル剛性係数、各スタンド入口板厚、出口板厚等の変動も吸収可能であることを論じる。適応制御を行なう場合、時系列的に再現性のある誤差を生かしながら累積的に補正する一つの方法として指数平滑法を用いるが、ロール開度零点と塑性曲線適応修正係数は、それぞれの平滑ゲインを協調させる必要のあることを論じる。

適応修正値算出のための各スタンドの出口板厚は、計算によって求めるが、体積速度一定の関係式によりマスフローゲージとして求める場合、関係式に用いられる先進率が正し

くないと、適応修正値に誤差の生じることを先進率誤差の感度解析より明らかにする。先進率の誤差の影響を軽減して、各スタンドの出口板厚を算出する代案として、ゲージメータゲージを主体としマスフローゲージを併用する方法についても検討する。

6.2 絶対値計算方式適応制御の数式モデル^{6.2)}

6.2.1 ロール開度零点の適応修正

ロール開度零点の実際値 S_{0A} は、前章で述べたゲージメータ式 (5.1) を変形して次式で得られる。

$$S_{0A} = S_A - h_A + \frac{P_A}{K} \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

ここで、 S_A, P_A は実測値である。 h_A は出口板厚の実績値である。

セットアップ計算に用いた零点 S_0 は次式で与えられる。

$$S_0 = S - h + \frac{P}{K} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

ここで、 S, h, P は計算値である。

零点の偏差 ΔS_{0A} は両式の差であり、次式で得られる。

$$\begin{aligned} \Delta S_{0A} &= S_{0A} - S_0 \\ &= S_A - S - (h_A - h) + \frac{P_A - P}{K} \quad \dots\dots\dots (6.3) \end{aligned}$$

上式で各スタンドの出口板厚の実績値 h_{Ai} は、板厚計が通常最終スタンドにしか設置されていないので、最終スタンド出口板厚（仕上板厚）の実測値 h_{AF} は得られるが、他のスタンドの出口板厚は実測できない。したがって、出口板厚の実績値としては、前記の式 (5.7) を変形したマスフローゲージ h_{Mi} を用いる。

$$\left. \begin{aligned} h_{Mi} &= h_{AF} \frac{R_F (1 + f_F) N_{AF}}{R_i (1 + f_i) N_{Ai}} \quad (i = 1 \sim F - 1) \\ h_{MF} &= h_{AF} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.4)$$

ここで、 N_{Ai} はロール回転数の実測値であり、圧延の定常状態であれば高精度に測定できる。先進率 f は板厚 h の関数のため、厳密には上式は先進率式との収束計算が必要であるが、先進率の値としてセットアップ計算時の値を用いても、実績板厚と目標板厚がわずかなので、先進率の誤差の影響は小さいと考えられる。

6.2.2 塑性曲線の適応修正

塑性曲線の適応修正は、思想としては実測荷重と予測荷重の比を適応係数 z として求める^{1.11)}。実用上は、ミルセットアップ時の圧延荷重の予測誤差により出口板厚が目標値と異なるため、これらに対する補正を行なった上で z を求める必要がある。すなわち適応係数の実績値 z_A は次式で求められる。

$$z_A = \frac{P_A}{k_{pA} b_A \sqrt{R'_A (H_A - h_A) Q_{pA}}} \dots\dots\dots (6.5)$$

ここで、 P_A : 実測圧延荷重

b_A : 実測板幅

k_{pA}, R'_A, Q_{pA} : パラメータに実測値を用いて得られる実績値

H_A, h_A : 入口板厚, 出口板厚の真値。式(6.4)で求められるマスフローゲージ H_M, h_M を使用。

次に、塑性曲線の適応修正は零点の適応修正とは干渉しないことを示す。塑性曲線に誤差のある場合を図6.1に示す。圧下設定に誤差がないと仮定するならば次式が成り立つ。

$$S_A = S \dots\dots\dots (6.6)$$

図より出口板厚の実測値 h_A と予測値 h との差は、圧延荷重の差に応じる圧延機の伸びに等しく次式が成立する。

$$h - h_A = \frac{P - P_A}{K} \dots\dots\dots (6.7)$$

両式を式(6.3)に代入すると

$$\Delta S_{0A} = 0 \dots\dots\dots (6.8)$$

が成り立つ。したがって塑性曲線の適応修正は零点の修正とは独立であることが知れる。

6.2.3 圧延温度式の適応修正^{4.3)}

圧延温度の予測は、仕上圧延機の入側に設けられた温度計で材料の入側温度 T_S を実測し、これと圧延スケジュールに基づいて、行なわれる。入側温度 T_S から、仕上出側温度 T_F までの温度降下は、デスクーラによる冷却 ΔT_{DES} と圧延機列内の冷却 ΔT_{STD} とに分けられる。 ΔT_{DES} は T_S ならびに冷却水温度に依存する。 ΔT_{STD} はスタンド間スプレーによる冷却、材料表面からの輻射、ならびに圧延による発熱に依存し、数式モデルとしては、 T_S 、仕上板厚 h_F 、圧延速度 N_F の関数になる。仕上圧延機内での温度降下

は次式で表わされる。

$$T_S - T_F = \Delta T_{DES}(T_S) + \Delta T_{STD}(T_S, h_F, N_F) \quad \dots\dots\dots (6.9)$$

スタンド毎の温度降下量はほぼ同一であるので、各スタンドの圧延温度は ΔT_{DES} をスタンド毎に等分配すればよい。

上式のモデル修正は、実測値として温度降下量 $T_S - T_F$ しかないので、修正できる要因数は一個である。温度変動の一番大きいものはデスクーラ水であることも考慮して、温度降下量の誤差を定数項として次式で求め、適応修正する。

$$B_{\delta TA} = T_{AS} - T_{AF} - \Delta T_{DES}(T_{AS}) - \Delta T_{STD}(T_{AS}, h_{AF}, N_{AF}) \quad \dots (6.10)$$

6.3 適応制御の誤差吸収機能

6.3.1 ミル剛性係数誤差の吸収

ミル剛性係数 K は、各スタンドごとに、アルミ板の圧延等により実験的に求められ、誤差の生じることは少ない。万一、 K に誤差があった場合、その誤差が、零点誤差として適応修正されることを図6.2で示す。図では剛性係数のモデルが真値に対して小さい場合を示す。ある特定スタンドにおいて、第1のバー（圧延材）の所要の出口板厚 h を得るために、圧下位置 $S(1)$ を設定したところ、出口板厚 $h_A(1)$ が得られたとすると、第2のバーの圧延に対する零点の補正は、式(6.3)において、 $S_A = S$ と置くことにより、次式で得られる。

$$\Delta S_{0A} = - (h_A - h) + \frac{P_A - P}{K} \quad \dots\dots\dots (6.11)$$

この補正により第2のバーの圧下位置は $S(2)$ に変更され、出口板厚は $h_A(2)$ となる。この結果をさらに第3のバーに適用すると出口板厚は $h_A(3)$ となり、出口板厚は振動的に逐次所要の値 h に近づく。

逆に剛性係数のモデルが真値より大きい場合には、出口板厚は非振動的に h に収束する。

このように、ミル剛性係数の誤差は、零点の適応修正を介して、バーからバーへと適応修正が行なわれる。

6.3.2 板厚誤差と適応係数との関係

圧延機の入口ないしは出口の板厚に誤差のある場合に、これらの誤差と適応係数 z との関係について述べる。

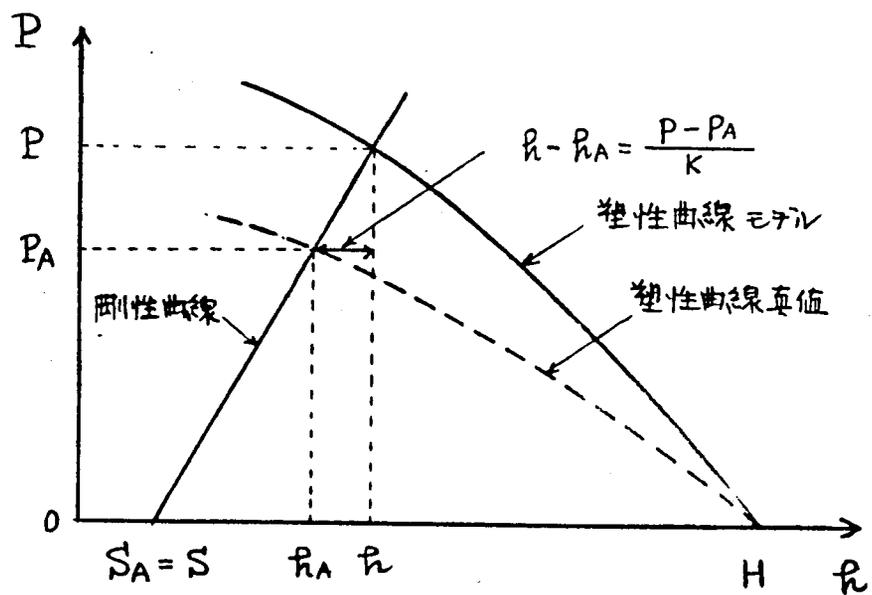


図 6.1 塑性曲線の誤差

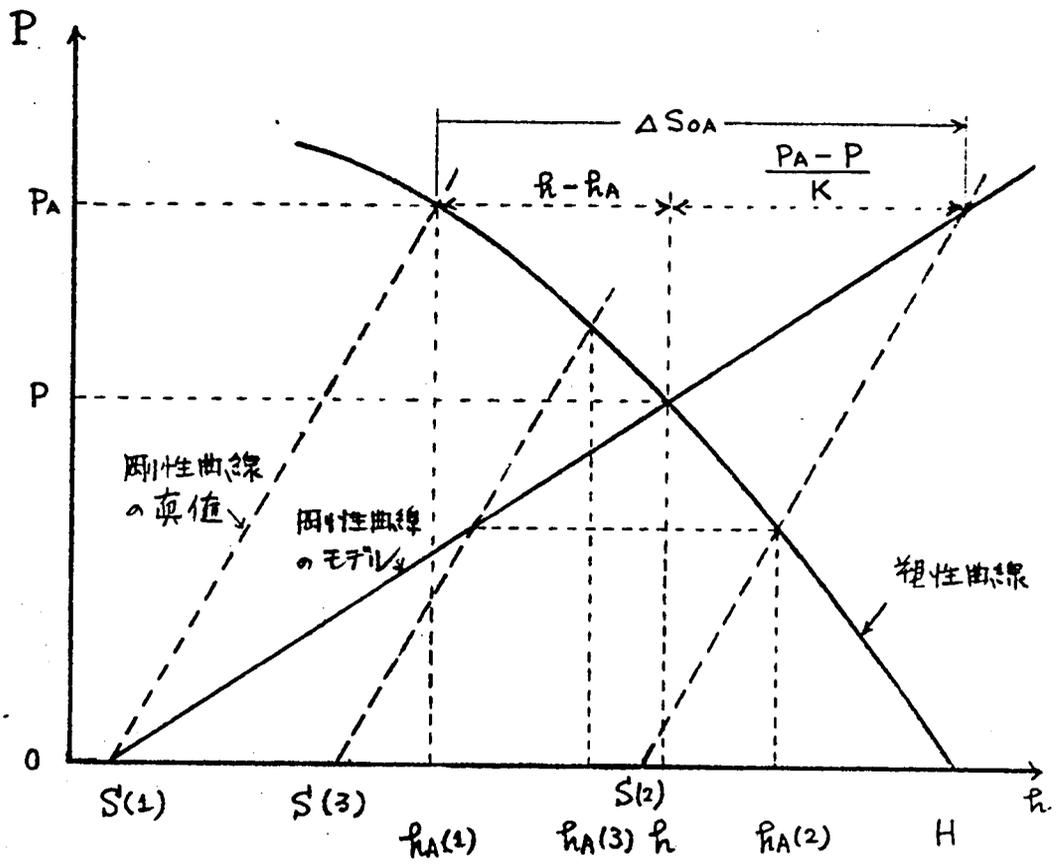


図 6.2 剛性曲線の誤差の補正過程

圧延機の板厚誤差としては、粗厚 H_1 の誤差、スタンド間板厚 h_1 の誤差、ならびに仕上板厚 h_F の偏差が考えられる。特に粗圧延機の出側に厚み計のない場合、つまり粗厚に誤差のある場合に、 H_1 と z との関係が心配である。

一般的に、入口板厚の計算値 H と真値 H_A とが異なる場合は、塑性曲線は図6.3の実線と破線のように示される。セットアップ計算において、所要の出口板厚を得るための圧下位置 S は、 H と h とを用いて圧延荷重 $P(H, h)$ を計算し、これらより次式で求められ、図の実線のようになる。

$$S = h - \frac{P(H, h)}{K} + S_0 \quad \dots\dots\dots (6.12)$$

しかるに、圧延結果は入口板厚が H_A であるため、破線のようになり、出口板厚 h_A は次式の結果となる。

$$h_A = S + \frac{P_A}{K} - S_0 = S + \frac{P(H_A, h_A)}{K} - S_0 \quad \dots\dots\dots (6.13)$$

図から明らかのように入口板厚と出口板厚の真値が知れる場合には、塑性曲線の傾きである適応係数 z は何ら変更を受けない。換言するならば、中間スタンドの入口板厚や出口板厚の真値 H_A, h_A が、目標値 H, h と異なる場合は、その相違の原因が、塑性曲線にない限り、これらの相違は式(6.5)の計算過程で処理され、そのスタンドの適応係数 z は変更を受けない。

同様に、仕上板厚 h_F に板厚偏差がある場合にもその原因が塑性曲線の誤差でない限り、最終スタンドの適応係数 z_F は不変である。

粗圧延機の出側に厚み計のない場合には、粗厚 H_1 は粗圧延最終パスのゲージメータゲージないしは公称値が用いられるが、これにより H_1 に誤差が伴なり。厚み計が存在する場合でも、測定誤差が存在する。このように粗厚 H_1 に誤差のある場合には、適応計算はあたかも、第1スタンドの塑性曲線に誤差があるかのように判断して、塑性曲線を図の点線のようにみなし、適応係数 z_1 を介し、粗厚誤差を吸収する。つまり粗厚に誤差のあるバーの圧延結果は、粗厚誤差の影響で、各スタンドの出口板厚はオフゲージとなるが、適応計算は z_1 のみを変更して、次バー以降の再現性ある粗厚誤差を吸収する。

6.3.3 累積補正

前述の各適応修正要因は適応計算により求められるが、それらには、測定誤差、実績値

推定モデルの誤差ならびに計算誤差を含む。したがって、各適応修正要因はそれに含まれる誤差を考慮して使用されねばならない。適応制御の目的は数式モデルや圧延環境により生ずる再現性のある誤差を補償することである。このための統計的な処理方法としてはKalmanのフィルター理論がある。カルマン・フィルターは測定誤差と推定誤差に基づいて最適の平滑ゲインを定めながら、予測を行なう方式であるが、平滑ゲインを固定化するというゆる指数平滑法となる。オンラインで最適な平滑ゲインを定めることは繁雑なので、指数平滑法を検討した。指数平滑は過去の実績のうち新しいものに重みをつけて用いられ、累積補正となる。

各適応修正要因の指数平滑は次式となる。

$$\Delta S_{0i} = \Delta S_{0i}^{-1} + \beta_{Si} (\Delta S_{0Ai} - \Delta S_{0i}^{-1}) \quad \dots\dots\dots (6.14)$$

$$z_i = z_i^{-1} + \beta_{zi} (z_{Ai} - z_i^{-1}) \quad \dots\dots\dots (6.15)$$

$$B_{0T} = B_{0T}^{-1} + \beta_{B0T} (B_{0TA} - B_{0T}^{-1}) \quad \dots\dots\dots (6.16)$$

ここで、 β_{Si} 、 β_{zi} 、 β_{B0T} は各適応修正要因の平滑ゲインで、 β_{Si} 、 β_{zi} は各スタンド毎に適切な値を選択できるようにしてある。添字の-1は前バーの適応計算で求められ、今回のバーのセットアップ計算で用いられたことを意味する。平滑ゲインは0~1の範囲の値が採れる。ゲインの値は、検出誤差に含まれる再現性のある偏差と雑音との比率に応じて決めなければならない。偏差分が多いときには、ゲインを大きくして修正効果を早めることが可能である。雑音分が多いときには、ゲインを小さくして雑音を除去するようにしなくてはならない。いずれにしろ、ゲインは現地状況に応じて調整しなければならない。

6.3.4 平滑ゲインの協調

平滑ゲインの決定に当っては β_{Si} と β_{zi} とはスタンドごとに同一値を採る必要がある。すなわちゲインは次式を満足するように協調をとらねばならない。

$$\beta_{Si} = \beta_{zi} \quad \dots\dots\dots (6.17)$$

これは圧延荷重の測定値に誤差を含む場合に、次バーの圧下位置設定値 S_i に誤差を生させないためである。

セットアップ計算では次式で圧下位置設定値 S が求められる。

$$P = z^{-1}P_0 \quad \dots\dots\dots (6.18)$$

$$S = h - \frac{P}{K} + S_0 + \Delta S_0^{-1} \quad \dots\dots\dots (6.19)$$

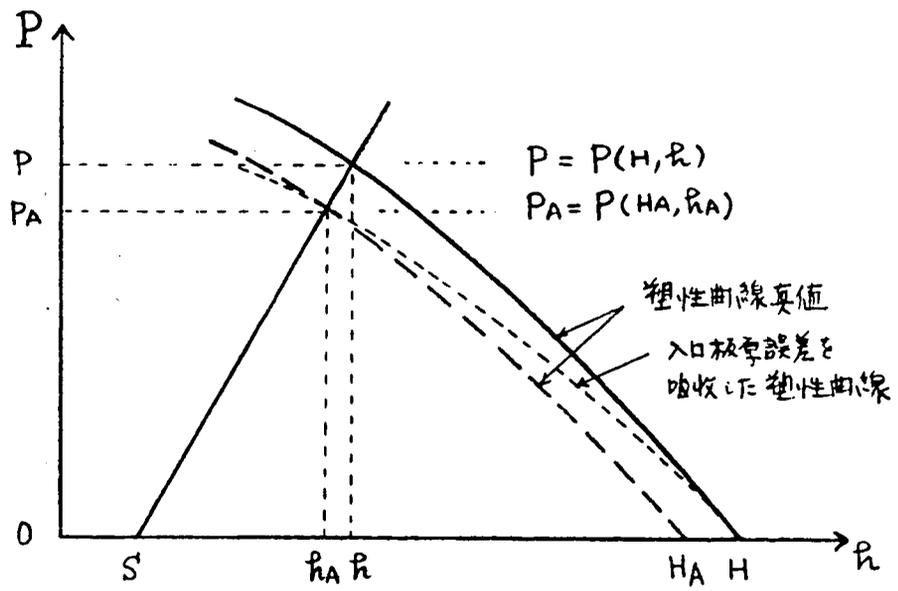


図 6.3 入口板厚の誤差

一方適応計算では ΔS_0 , z は次のように求められる。

$$\Delta S_{0A} = S_A - S - (h_A - h) + \frac{P_A - P}{K} \quad \dots\dots\dots (6.20)$$

$$\Delta S_0 = \Delta S_0^{-1} + \beta_s (\Delta S_{0A} - \Delta S_0^{-1}) \quad \dots\dots\dots (6.21)$$

$$z_A = \frac{P_A}{P_{cA}} \quad \dots\dots\dots (6.22)$$

$$z = z^{-1} + \beta_z (z_A - z^{-1}) \quad \dots\dots\dots (6.23)$$

ここで、 P_A は圧延荷重の実測値である。

圧延荷重の測定値に誤差 ΔP_A が含まれていると仮定する。測定誤差 ΔP_A の影響は ΔS_0 と z の誤差として次式のように現われる。

$$\Delta \Delta S_0 = \beta_s \frac{\Delta P_A}{K} \quad \dots\dots\dots (6.24)$$

$$\Delta z = \beta_z \frac{\Delta P_A}{P_{cA}} \quad \dots\dots\dots (6.25)$$

両式の誤差は、次バーのセットアップにおいて、式(6.18)(6.19)の誤差として、次のように現われる。

$$\Delta P = \Delta z P_c = \beta_z \frac{P_c}{P_{cA}} \Delta P_A \approx \beta_z \Delta P_A \quad \dots\dots\dots (6.26)$$

$$\Delta S = -\frac{\Delta P}{K} + \Delta \Delta S_0 = (\beta_s - \beta_z) \frac{\Delta P_A}{K} \quad \dots\dots\dots (6.27)$$

以上より圧延荷重の測定値に誤差があると、適応係数 z には誤差が残るが、平滑ゲイン β_s と β_z を等しく選ぶことにより、荷重の測定誤差は次バーの圧下設定値には現われなくすることができる。

6.4 適応制御方式の改良

適応制御に関しては前述の方式を、その機能確認を目的として、ミルセットアップの現地表示圧延実験の中で試用してみた。しかし現地実験では仕上板厚の精度が案外に向上しないという結果が生じた。その原因の一端は適応制御にあると考え、以下に示すように適応制御の再検討を行なった。

一般に、適応制御が普遍的であるためには、種々の誤差原因により現われる影響が現象的に検出でき、かつ検出結果に基づいて誤差原因がそれぞれ独立に分離される必要がある。

換言するならば、原因分離は、本来、そのために用いる計算式中の各変数やパラメータが、それぞれ独立に観測されている必要がある。

ミルセットアップの数式モデルの修正のためには、定性的に考えて少なくとも ΔS_{0i} 、 z_i 、 B_{0T} の適応修正が必要である。しかし実際面は、実測データの個数が十分でなく、実績値を計算により推定しなければならない。しかもその計算式は非線形なものが多い。

したがって前述の適応制御方式は、数少ない観測データにより、限られた個数の要因のみを適応修正するという問題となる。残りの要因はオンラインでは固定せざるを得ない。この場合、特定の要因を固定することによる影響を認識するとともに、それらをオフラインで更新する手だてが必要である。

実際上は、適応計算の基礎となるスタンド間板厚 h_i が得られないこと、代りにマスフローゲージを用いる場合には先進率の真値が得られないことが問題となる。

以下圧延実験の結果と、先進率の感度解析とゲージメータゲージについて述べる。

6.4.1 適応制御と板厚算出法

前述のセットアップ方式と適応制御方式による圧延実験の結果、次の現象が現われた。

- (1) 仕上板厚の厚いものほど、板厚偏差が大きい。
- (2) ロット内でも仕上板厚が変動する。

これらの現象は適応制御に起因するのではないかとの疑問が持たれた。適応制御に疑いを持って、圧延結果ならびにシミュレーション結果を眺めると次のことが明らかとなった。

- (1) 零点計算値 S_{0Ai} は、第1スタンドの値が他のスタンドに比して $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 程度大きい(図6.5の○印参照)。
- (2) S_{0Ai} や z_{Ai} はロットごとに変動するが、その変動は、仕上板厚が厚いものほどその変動が大きい傾向がある(図6.6の○印参照)。

以上の現象は各スタンドのマスフローゲージ算出に用いる体積速度一定の関係式に誤差が含まれる結果ではないかとの疑問を持った。そこで、まず先進率の誤差と回転数測定誤差の感度解析を行なう。

6.4.2 先進率誤差の感度解析

先進率や実測回転数に誤差があると、マスフローゲージ h_{Mi} を介して、零点 S_{0Ai} 、適応係数 z_{Ai} に誤差を生じ、結局次バーの設定誤差ならびに仕上板厚偏差を発生させる。こ

の過程を感度解析により定量的に明らかにする。以下では説明の簡単のため平滑ゲインを1とし、平滑化については省略する。

式(6.4)のマスフローゲージ式において、先進率誤差 Δf_i とロール回転数の測定誤差 ΔN_{Ai} により発生する出口板厚誤差 Δh_i は、近似的に次式で求められる。

$$\Delta h_i \doteq h_i \left(\frac{\Delta f_F}{1+f_F} - \frac{\Delta f_i}{1+f_i} \right) + h_i \left(\frac{\Delta N_{AF}}{N_{AF}} - \frac{\Delta N_{Ai}}{N_{Ai}} \right) \dots\dots\dots (6.28)$$

ここで、 h_i は誤差のない場合の出口板厚である。回転数の測定誤差を0.1%のオーダーと考えると、 $\Delta N_{Ai}/N_{Ai}$ は、 $\Delta f_i/(1+f_i)$ の1/10程度であるので、上式の第2項は無視できる。したがって以下では簡単のため先進率のみの感度解析を行なう。

$$\Delta h_i \doteq h_i \left(\frac{\Delta f_F}{1+f_F} - \frac{\Delta f_i}{1+f_i} \right) \dots\dots\dots (6.29)$$

上式で、 $(1+f_i)$ の%誤差は出側板厚の絶対誤差となり、しかも Δh_i は h_i に比例する。 h_i は上流スタンドほど、また仕上板厚が厚いほど大きな値をもつため、結局 Δh_i は上流スタンドで、また厚物ほど大きくなる。操業データを用い、先進率の値を変えて、マスフローゲージを求めた結果を図6.4に示す。先進率の値としては、式(2.10)によるR.B.Simsの理論値と、それに倍率0.5を乗じた値とを用いた。

零点偏差 ΔS_{0Ai} は式(6.3)で求められる。上式で求められるマスフローゲージの誤差 Δh_i は式(6.3)においては零点偏差の誤差 $\Delta \Delta S_{0i}$ となる。すなわち次式となる。

$$\Delta \Delta S_{0i} = -\Delta h_i \dots\dots\dots (6.30)$$

先進率の違いによる零点の変化を図6.5に示す。先進率を小さくすることにより、零点が上流スタンドでかなり小さくなることが知れる。

板厚算出誤差 Δh_i は圧延荷重の予測誤差となり、この予測誤差を通してオフゲージを発生させる。 Δh_i による計算荷重の誤差 ΔP_{0i} は次式で求まる。

$$\Delta P_{0i} = \left(\frac{\partial P}{\partial H} \right)_i \Delta H_i + \left(\frac{\partial P}{\partial h} \right)_i \Delta h_i \dots\dots\dots (6.31)$$

ΔP_{0i} による z_{Ai} の誤差 Δz_i は次式で求まる。

$$\Delta z_i = \frac{P_{Ai}}{P_{0i} + \Delta P_{0i}} - \frac{P_{Ai}}{P_{0i}} = -\frac{P_{Ai}}{P_{0i}} \cdot \frac{\Delta P_{0i}}{P_{0i}} = -z_{Ai} \frac{\Delta P_{0i}}{P_{0i}} \quad (6.32)$$

この式で P_{0i} が小さいほど、 Δz_i が大きくなる。すなわち下流スタンドほど先進率の誤差の影響が大きい。先進率の相違による z_{Ai} の変化を図6.6に示す。この図で、 z_{Ai} は

粗厚 H_1 が固定されているため特別であるが、これ以外には、下流スタンドほど先進率の誤差の影響を受け易いことがわかる。

次バーの圧下位置設定値の誤差 ΔS_i は、零点偏差の誤差 $\Delta \Delta S_{0i}$ と圧延荷重の予測誤差 ΔP_i の両方により生じ、次式で得られる。

$$\Delta S_i = \Delta \Delta S_{0i} - \frac{\Delta P_i}{K} \quad \dots\dots\dots (6.33)$$

ここで、荷重の予測誤差 ΔP_i は Δz_i により生じ次式で示される。

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \Delta z_i \cdot P_{ci} = -z_{Ai} \frac{P_{ci}}{P_{ci}^{-1}} \Delta P_{ci} \\ &= -z_{Ai} W_i \Delta P_{ci} \quad \dots\dots\dots (6.34) \end{aligned}$$

ここで、 $W_i = \frac{P_{ci}}{P_{ci}^{-1}}$ (スケジュール替時) } $\dots\dots\dots (6.35)$
 ≈ 1 (ロット内)

W_i は今回バーと前回バーとの予測荷重の比であり、同一ロット内では圧延状況がほとんど等しいので1とみなせる。

以上を纏めると、圧下位置設定値誤差は次式となる。

$$\begin{aligned} \Delta S_i &= h_{Ai} \left\{ 1 - \frac{z_{Ai}}{K} W_i \left(\frac{\partial P}{\partial h} \right)_i \right\} \left\{ \frac{\Delta f_i}{1+f_i} - \frac{\Delta f_F}{1+f_F} \right\} \\ &\quad - h_{Ai-1} \frac{z_{Ai}}{K} W_i \left(\frac{\partial P}{\partial H} \right)_i \left\{ \frac{\Delta f_{i-1}}{1+f_{i-1}} - \frac{\Delta f_F}{1+f_F} \right\} \quad \dots\dots\dots (6.36) \end{aligned}$$

各スタンドの圧下位置設定値の誤差 ΔS_i によるオフゲージ Δh_F は次式の ΔS_i に上式を代入することにより求められる。

$$\Delta h_F = \sum_{i=1}^F C_{Fi} \Delta S_i \quad \dots\dots\dots (6.37)$$

ここで、 C_{Fi} は表 3.5 に示すような各スタンドの圧下位置変化の仕上板厚に及ぼす影響係数である。

以上の式を用いて、各種の圧延スケジュールについて、先進率の感度を計算した。ロット内における感度解析結果を表 6.1 に示す。先進率の誤差は式(2.10)の50%を仮定した。すなわち、

$$\Delta f_i = 0.5 f_i \quad \dots\dots\dots (6.38)$$

表から Δh_1 、 ΔS_1 はともに第1スタンドが最も大きく、下流スタンドになるに従がい

板幅	1218	1268	1242	1149	1117
仕上板厚	4.5	4.0	4.0	1.9	1.89

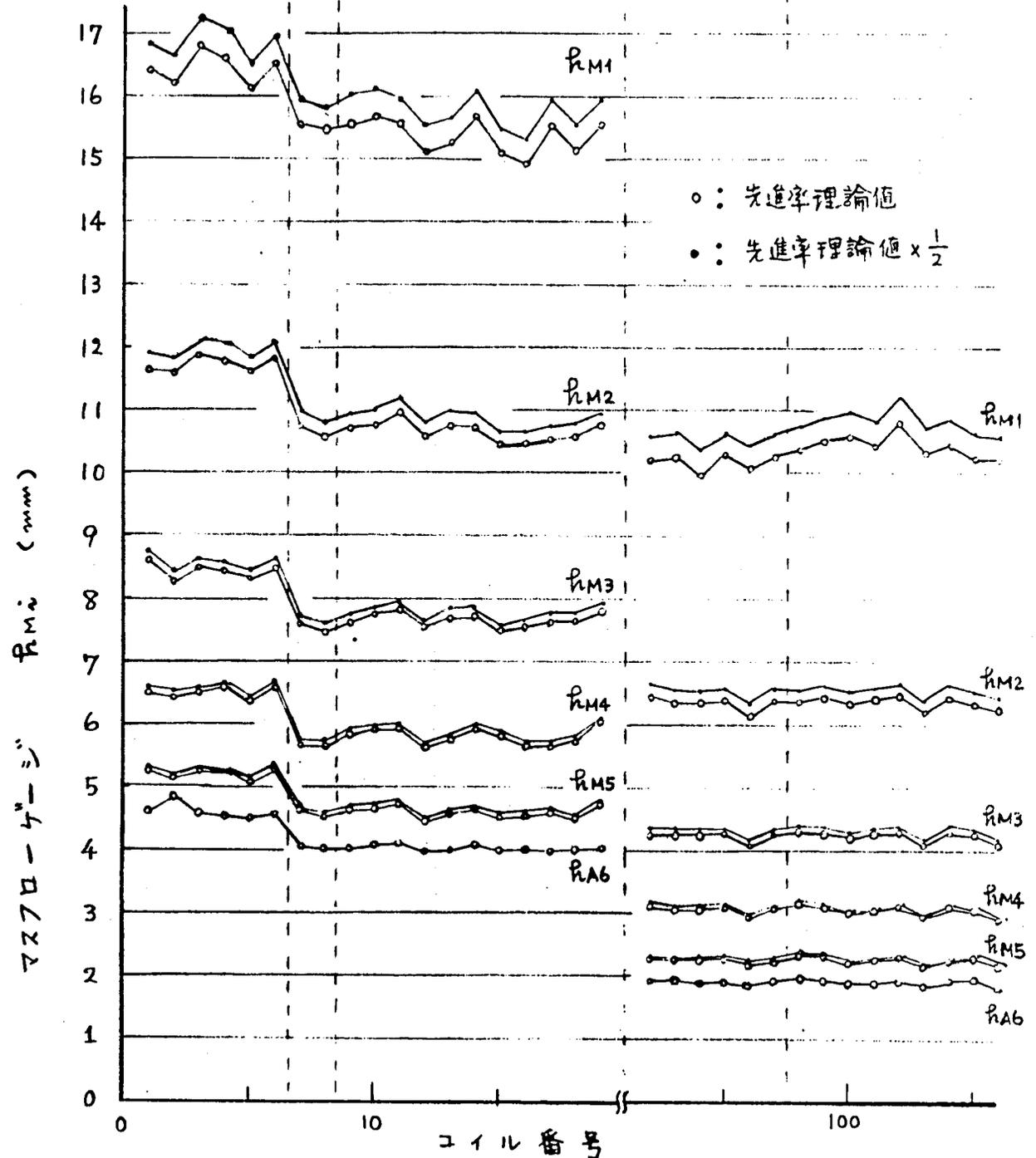


図 6.4 先進率変化によるマスターゲージの变化

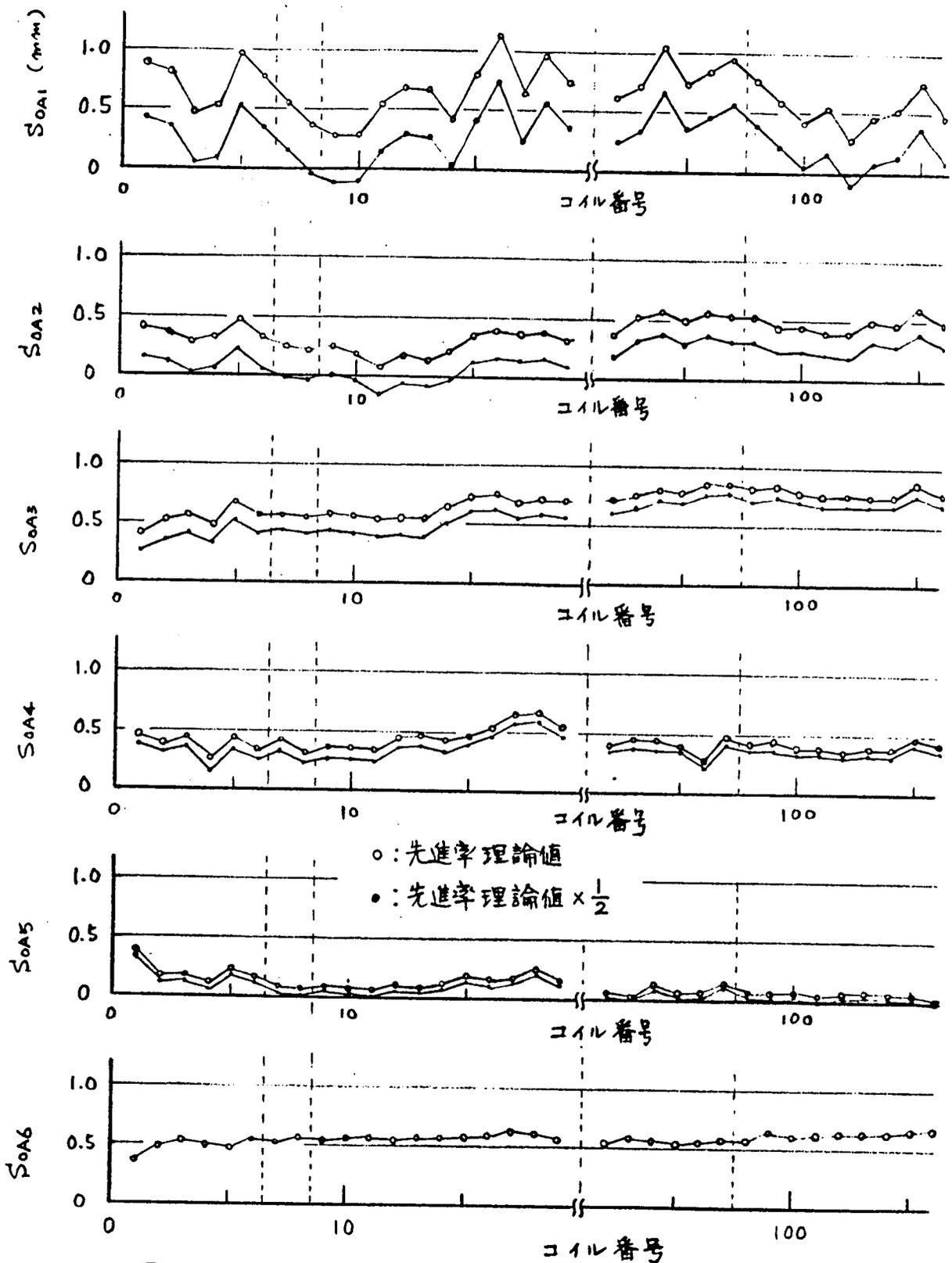


図 6.5 先進率変化による零点の変化

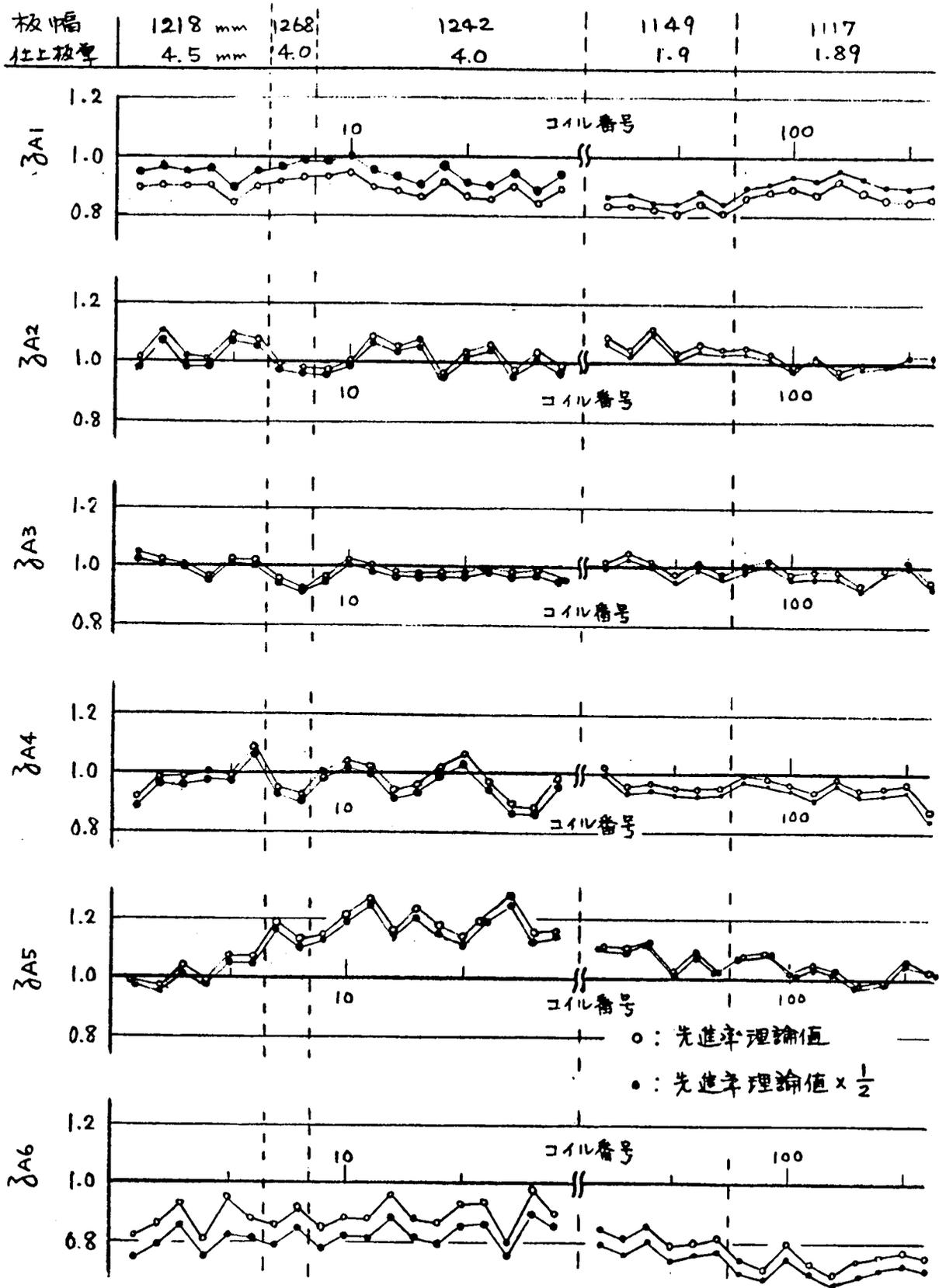


図6.6 先進率変化による道忘れ致変化

表 6.1 先進率誤差の板厚精度に及ぼす影響

スケジュール		仕上板厚		$R_F = 4.0 \text{ mm}$			
		粗厚		$H_1 = 25 \text{ mm}$			
		板幅		$b = 1100 \text{ mm}$			
		炭素量		$C = 0.15$			
先進率誤差		$\Delta f_i = 0.5 f_i$					
項目	単位	スタント ⁱ					
		1	2	3	4	5	6
R_i	mm	15.873	10.576	7.547	5.655	4.605	4.000
f_i		0.0868	0.0830	0.0727	0.0643	0.0472	0.0331
$\frac{\Delta f_i}{1+f_i}$		0.0399	0.0383	0.0339	0.0302	0.0225	0.0160
$(\frac{\partial P}{\partial H})_i$	t/mm	154.4	249.4	383.2	554.4	747.0	944.2
$(\frac{\partial P}{\partial R})_i$	t/mm	-225.4	-354.9	-518.8	-725.1	-906.7	-1080.0
ΔR_i	mm	0.3794	0.2358	0.1351	0.0803	0.0299	—
ΔS_i	mm	0.5517	0.2138	0.0944	0.0468	-0.0361	-0.0567
C_{Fi}		0.0121	0.0334	0.0735	0.1322	0.2128	0.2926
$C_{Fi} \Delta S_i$	mm	0.0067	0.0071	0.0069	0.0062	-0.0077	-0.0166
ΔR_F	μ						2.6

小さくなることがわかる。これらの誤差によるオフゲージは 2.6μ と予想外に小さい。これらの誤差は他のスケジュールについても、同様の傾向を持ち、オフゲージは 3μ 以内である。

しかし、スケジュール替の場合にはオフゲージは大きくなる。一例として $h_F=1.2\text{mm}$ から $h_F=7.0\text{mm}$ へのスケジュール替と、その逆の場合について表6.2に示すが、オフゲージは 20μ 程度発生し、無視できない。

以上の感度解析より先進率の誤差はロット内では無視できるが、スケジュール替では無視できないことが明らかとなった。

実用範囲の先進率を実測することは實際上困難である。先進率の値は前述の簡略式で求めた値では大きすぎるので、同式に倍率を乗じ、その倍率を種々変更して操業データを用いて時系列的にシミュレーションを行なった。その結果、倍率を0.5程度にすると、 S_{0A1} 、 z_{A1} の平均値が圧延現象から考えて妥当であり、しかも分散が小さいことがわかった。

6.4.3 ゲージメータゲージの利用

前述の実験結果では仕上板厚偏差はロット内でも変動する。これは先進率以外の外乱もあることを意味する。図6.5に示す零点もロット内で、特に上流スタンドで変動が大きい。ロールの熱膨張や摩耗により零点は変化するが、各スタンドでその偏差が異なることは物理的にも納得できない。零点算出法は各スタンド同一である。零点偏差の変動の原因としては、零点式に含まれるマスフローゲージが疑われた。

マスフローゲージの計算は圧延データが測定される瞬時においても体積速度一定の関係が常に成立しているとの前提にたっている。しかし圧延の過渡状態にデータを採取したならば、その前提はくずれ、マスフローゲージは誤差を含むことになる。

マスフローゲージに代るものとして、ゲージメータ式による板厚(ゲージメータゲージ)の算出を試みた。両者の比較を図6.7に示す。マスフローゲージ(先進率の値としては理論値の半分を使用)に比較し、ゲージメータゲージの方がかなり安定していることがわかる。

ゲージメータゲージを求める際に問題となるのは、零点である。零点は前述の方法でしか求められない。零点は物理的に徐々に変化するものであるから、平滑ゲインを非常に小さくすることにより、真値に近づけることができると考えられる。カルマン・フィルターの理論によれば、誤差の大きい上流スタンドほどゲインを小さくするのが妥当である。し

たがって平滑ゲインは、圧延結果をみながら、各スタンドごとに現地調整するのがよい。

板厚として、ゲージメータゲージとマスフローゲージを用いた場合のそれぞれの z_{Ai} のシミュレーション結果の比較を図6.8に示す。ゲージメータゲージ使用の方がマスフローゲージを用いたものより安定していることがわかるであろう。ロット内の z_{Ai} の変動は適応修正のモデルだけに依存するものでなく、材質のわずかな相違、材料温度の測定誤差、圧延温度の評価の誤差に影響される。したがって適応制御の改善のみでは、仕上板厚の精度向上には限度があり、ロット内の各圧延材ごとの変動に対してはフィードフォワード制御、フィードバック制御を併用することにより、さらに改善が図られるであろう。

6.5 結 言

絶対値計算方式の適応制御は、圧延現象の変動原因やミルセットアップの誤差を、

- (1) ロール開度零点
- (2) 塑性曲線適応修正係数
- (3) 圧延温度式定数

を介して、適応修正するもので、これら3種類の適応修正要因を算出する数式モデルを導出した。これらの適応修正要因を算出するのに必要な変数としては、圧延仕様として与えられる粗厚 H_i と、圧下位置 S_{Ai} 、ロール回転数 N_{Ai} 、圧延荷重 P_{Ai} 、仕上圧延機入側温度 T_{AS} 、同出側温度 T_{AF} 、および仕上板厚偏差 Δh_{AF} の実測値を用いた。このほかに各スタンドの出口板厚が必要であるが、これには、マスフローゲージを用いることを前提とした。

上記の3種類の適応修正要因により、これら以外の誤差も吸収可能なことを理論的に示した。たとえばミル剛性係数の誤差は零点誤差として吸収でき、圧延機の入口板厚や出口板厚の誤差は塑性曲線適応修正係数で吸収できることを明らかにした。

適応制御すべき圧延変動原因やミルセットアップ誤差は、再現性のあるものにとどめ、過渡的に検出されるものは除外する必要がある。そこで、過去から時系列的に継続する偏差分を生かすよう累積補正を実施し、その具体的な方法としてオンライン計算にも簡単に有効な指数平滑法を利用した。累積補正の度合は指数平滑法の平滑ゲインで決められる。平滑ゲインを定める場合、ロール開度零点と塑性曲線適応修正係数のそれぞれの平滑ゲインは、ともに同一値としなければ、適応制御による誤差が現われることを理論的に明らかにした。

表 6.2 先進率誤差による殺取替時板厚偏差.

スケジュール		$R_F = 1.2$	$R_F = 7.0$ mm					
		$H_1 = 20$	$H_1 = 28$ mm					
		$b = 1100$ mm						
		$c = 0.15$						
先進率誤差		$\Delta f_i = 0.5 f_i$						
仕上板厚	項目	単位	スタンド i					
			1	2	3	4	5	6
1.2 mm	P_i	t	3072	2529	2112	1958	1087	776
7.0			1216	1150	998	882	716	535
1.2 ↓	ΔS_i	mm	0.609	0.161	0.049	0.019	-0.003	-0.080
	$C_{Fi} \Delta S_i$	mm	0.0034	0.0029	0.0025	0.0022	-0.0006	-0.0348
7.0	ΔR_F	μ	-24.4					
7.0 ↓	ΔS_i	mm	0.503	0.182	0.075	0.039	-0.002	-0.058
	$C_{Fi} \Delta S_i$	mm	0.0116	0.0073	0.0040	0.0023	-0.0001	-0.0037
1.2	ΔR_F	μ	21.4					

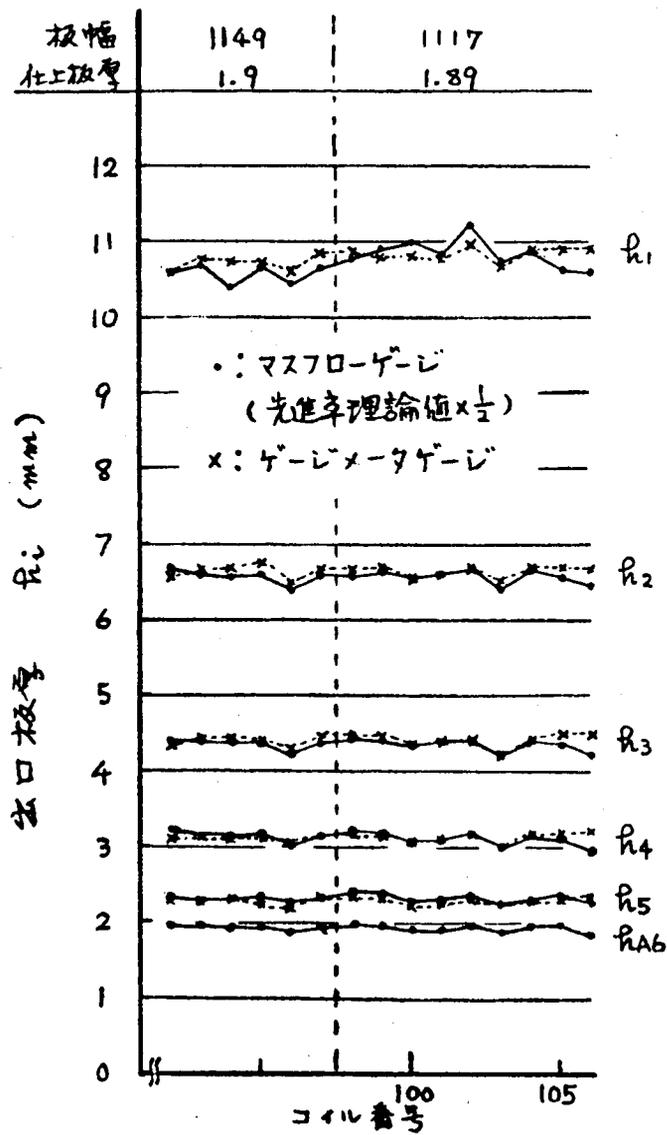


図 6.7 マスフローゲージとゲージメーカーゲージの比較

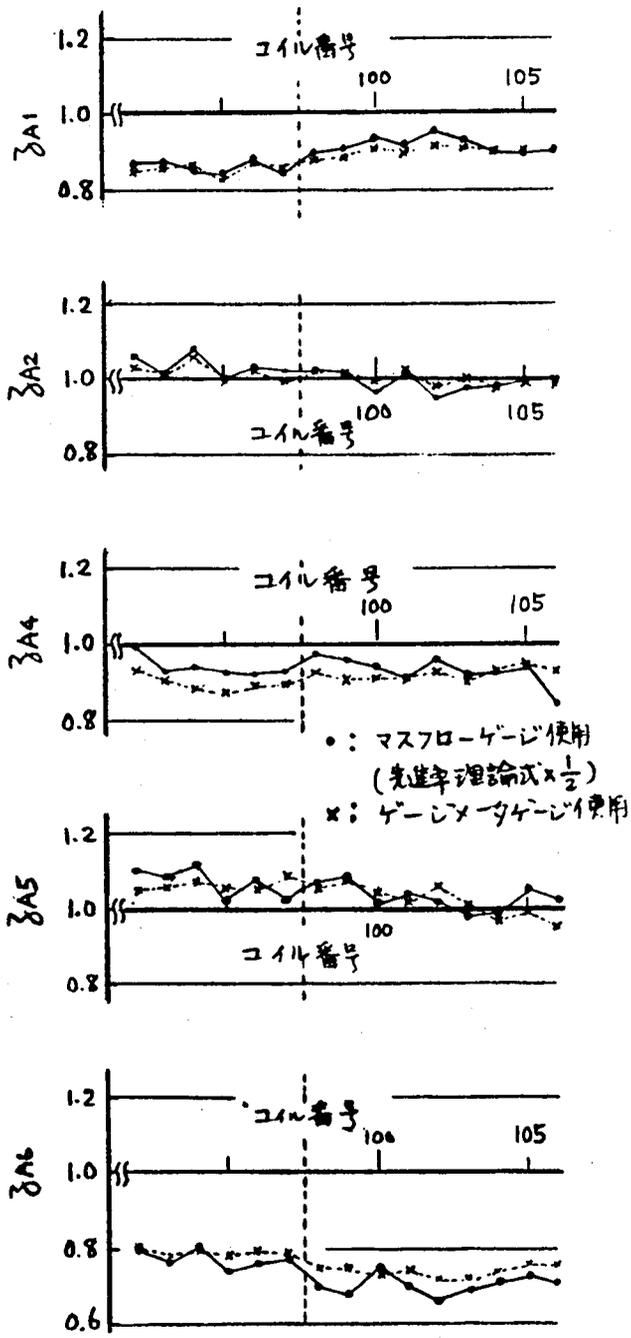


図 6.8 極準算出法の違いによる通気係数の相違

以上の考えのもとで、現地実験を行なったところ、各スタンドの出口板厚の算出値として用いたマフローゲージに疑問が生じ、マフローゲージ算出時に用いる先進率の値の適否を感度解析的に検討した。その結果、先進率の理論値は過大であることが推定された。また、出口板厚としてマフローゲージを用いると、ロール開度零点の算出値が時系列的に変動し、一方物理的には零点が徐々にしか変化しないことから考えて、マフローゲージ算出の基になる体積速度一定の関係が、各スタンドのロール回転数の測定時においても成立しているかどうかの疑問が生じた。

このように出口板厚としてマフローゲージを用いることは、先進率と零点の問題があるので、対策案として、ゲージメータゲージを主体としマフローゲージを併用する方法を検討した。このときの零点としてはマフローゲージを用いて算出するが、平滑ゲインを極力小さくすることにより安定した零点が得られ、出口板厚としてもゲージメータゲージの方が、マフローゲージよりも安定した適応修正要因を導出できることが明らかとなった。

第 7 章 ソフトウェアシステムの開発

第7章 ソフトウェアシステムの開発

7.1 緒言

計算機制御システムの開発過程は、大略、図7.1に示すように、システム設計、ハードウェア製作、ソフトウェア製作、ならびにシステム検査の4種類の過程から構成される。ハードウェアはおもに既開発装置の組合せであるため、システム設計の段階で、システム構成上適切な仕様決定をしておけば、後工程への影響は少ない。ソフトウェアとしては、計算機の機種毎に準備されるオペレーティングシステムプログラム(OS)と、各アプリケーションごとに開発すべきアプリケーションプログラムとがある。このため、計算機制御システムの開発に当っては、アプリケーションプログラムをどのような形に構成するか、その作成過程をどのように管理するか、作成プログラムをどのように検査するか、あるいはプログラム検査のためどのような支援プログラムを準備しておけばよいか、ソフトウェアシステム開発上の重要な課題となる。

ホットストリップミル計算機制御のアプリケーションプログラムのうち主要なものとしては、スラブトラッキング、ミルセットアップ、適応制御、エンジニアリングロギング等の機能に関連するプログラムが挙げられる。これらのプログラムの検査、デバックを効果的にするためには、支援プログラムが必要である。^{7.1)}スラブトラッキングプログラムは、圧延ライン上に存在する複数個のスラブの流れを追跡しながら、個々のプログラムに動作指令を与え、システムの管理を司る。スラブトラッキングのための信号は、圧延ライン上の温度計、鋼材検出器、ロードセンシングリレー等より得られるが、これら検出器の誤動作によってトラッキングを失敗しないように、ソフトウェアとしてもバックアップ構成をとっている。重複する論理によりスラブトラッキングプログラムが構成されているため、そのデバックには、各スラブのライン上から得られる位置信号の履歴を記録しておく必要がある。

ミルセットアップの表示実験においては、圧下位置とロール回転数の表示値と実績値との比較が、圧下位置のみで実施できるようにする必要がある。ミルセットアップの方式ならびに数式モデルの良否や適用範囲を確認するためには、ライン上に圧延材がないときにも、あたかも圧延材が流れているかのように模擬しながら、任意の圧延仕様に応じたセットアップ計算(模擬計算)が実施できることが望ましい。

以上のようなシステムエンジニアリング的要請に対して、本章では、ソフトウェアの開

発過程における配慮，人と機械との協調，ならびに支援プログラムについて述べる。^{7.2), 7.3)}

7.2 ソフトウェア開発過程における配慮

ホットストリップミル計算機制御システム開発の詳しい過程を示すと，図7.2のようになる。ハードウェアの製作とソフトウェアの作成のあと，両者の結合調整の経過をへてシステムは完成し，実操業に供される。

(1) ソフトウェアシステムの設計

ソフトウェアシステムの設計に当っては，人と機械との協調を図るようにマンマシンインターフェースを検討し，その結果をソフトウェアのみならず，ハードウェア設計にも反映させた。支援プログラムの設計に当っては，プログラム単体ならびに総合のデバッグ，工場試験時，ならびに現地調整の各フェーズにおいて有効と考えられる支援プログラムを選択，準備することとした。数式モデルに関しては，その良否の判定が容易な手段を検討し，たとえば模擬計算方式等を開発することとした。このような設計方針のもとで，ソフトウェアの開発を実施した。

(2) フローチャートの作成

ソフトウェアの設計結果は，ドキュメントとしてソフトウェア仕様に纏められるとともに，ソフトウェアの全体的構成がジェネラルフローチャート（GFC）に纏められる。ジェネラルフローチャート上で，計算機制御システムとしての要求仕様を満足しているか，さらに仕様では明らかではない運転上の細かい要求や規制が盛り込まれているかどうかをチェックした。ジェネラルフローチャートにより，ソフトウェア全体の機能構成が明らかになると，ソフトウェアの構成は，タスク（制御用計算機のプログラムの最小単位）単位に分割され，タスク単位のフローチャートが作成される。このタスク単位のフローチャートを纏めたものを，マスターフローチャート（MFC）と称している。

ホットストリップミルの計算機制御においては，アプリケーションプログラムは，機能的にスラブトラッキング，ミルセットアップ等に分けられるが，スラブトラッキングに属するタスクは，トラッキング用の各種検出器からの割込信号や計算機内のタイマーによる起動信号により起動され，データを収集しテーブルに格納後ミルセットアップに属するタスクを起動する。圧延ライン上には，数個の圧延材が流れ，各所でトラッキング用の割込信号が発生する中で，各圧延材毎のデータ収集，ミルセットア

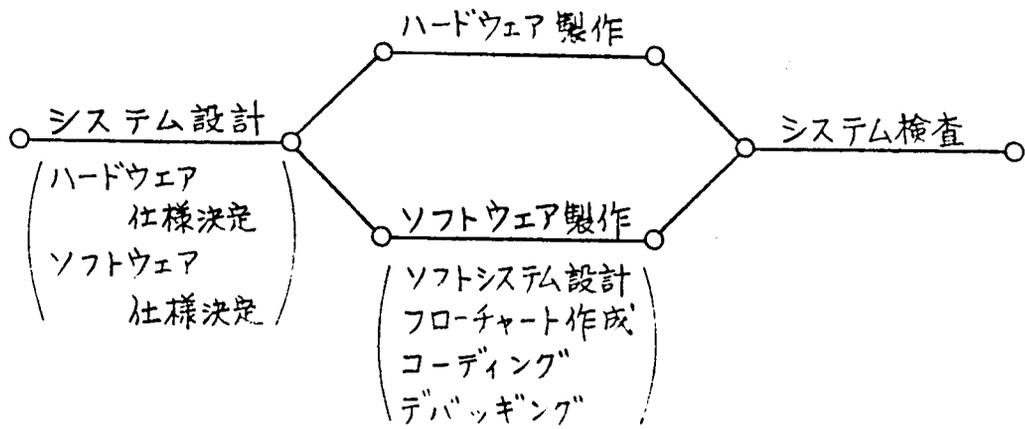


図7.1 計算機制御システムの概略作成過程

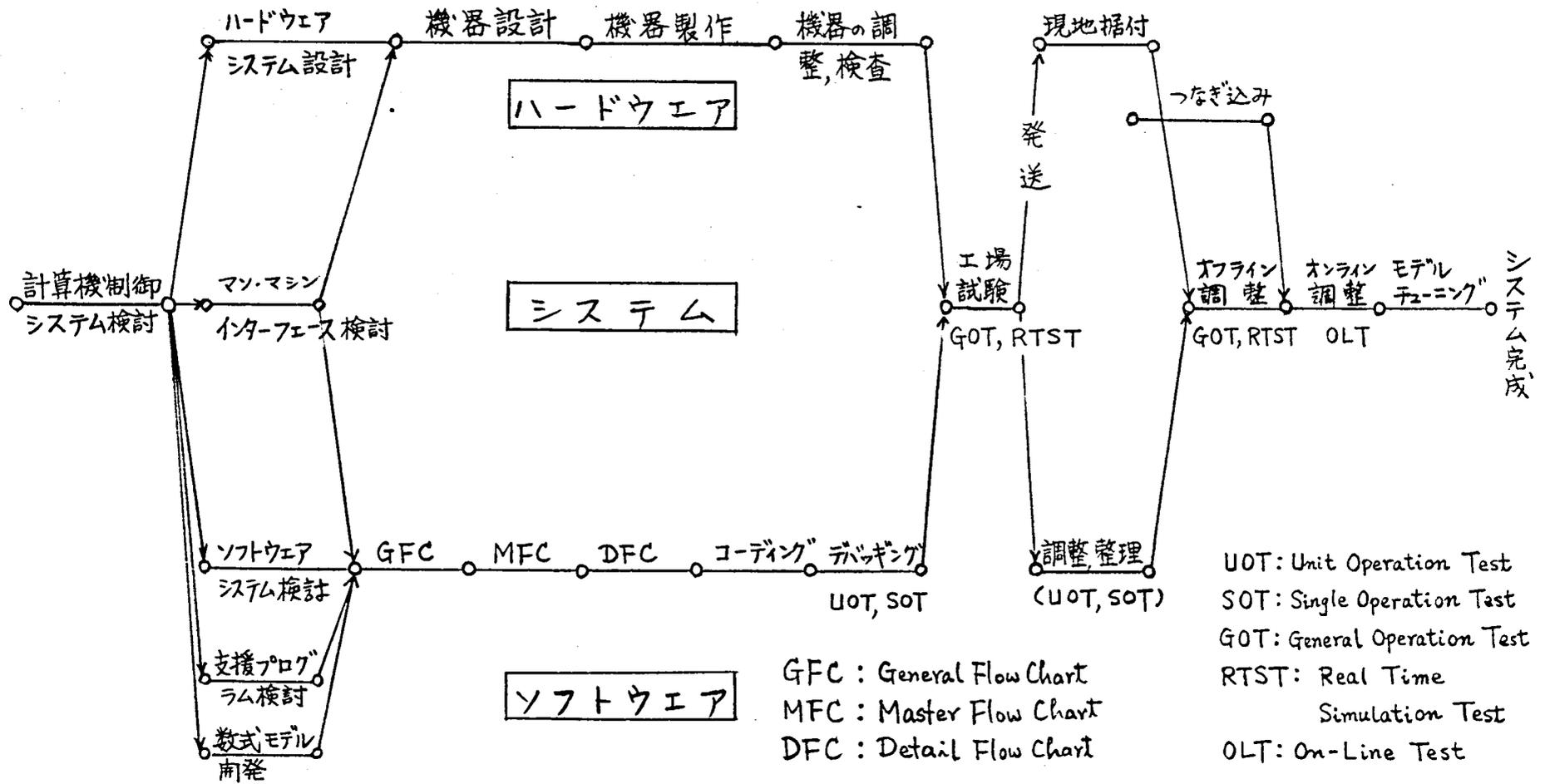


図 7.2 計算機制御システム作成過程

ップを間違いなく実施できるためには、マスターフローチャート作成段階で、計算機制御のあらゆる機能に関して縦横にチェックしておくことが、システム完成の早道であることを経験した。たとえば、圧延ライン上の種々の状況を仮定し、それらに応じる処理の流れを机上でシミュレートすると、処理上の問題点が抽出できる。また、通常の処理では通らないバックアップの処理などは、この段階で、チェックすることにより、オンラインでのトラブルを少なくすることができた。

各タスクの機能や利用するテーブルが明確になると、コーディングが開始される。コーディングに際しては、必要に応じてディテールフローチャート(DFC)が作成されるが、本ソフトウェア開発においては、DFC作成は省き、必要事項を可能な範囲で詳しくマスターフローチャートに記入する方針を採った。これは、ドキュメンテーションの手間と混乱を減らす点で有効であった。当初作成したジェネラルフローチャートも、途中でマスターフローチャートに吸収し、フローチャートは1種類に集約した。システム開発に従事する者が、コーディングまで実施するような場合には、フローチャートを1種類に集約する方が能率的であることを実際に経験した。

(3) プログラムの試験と支援プログラム

アプリケーションプログラムの試験は、1つのプログラムセグメントから始め、順次システム全体の試験へと進めるのが一般的である。われわれも同様の手順で実施した。以下、試験の経過とその過程で用いた支援プログラムを表7.1に応じて述べる。

各タスクのコーディングが完了すると、そのタスクのデバッグが開始される。タスク単体のデバッグをユニットオペレーションテスト(UOT)と称している。続いて行なわれる試験はシングルオペレーションテスト(SOT)であり、これはタスク相互間で実行される単一機能に着目してテストする。SOTの一例を挙げると、データの取込タスク、採取データを用いて行なり計算タスク、およびその計算結果を出力する出力タスクを連系させて、タスク相互でのデータの受け渡しをチェックする。

UOTとSOTはリアルタイムでは実施されず、デバッグ用のシステムプログラム(HITAC 7250ではノン プロセス モニタ システム)の下で実施される。これらのデバッグにおいて用いた支援プログラムは各種のダンプサブルーチンとプロセス入出力シミュレータである。

リアルタイムでのプログラムは、HITAC7250ではプロセスモニタ システム(PMS)と称するシステムプログラムの下で実行される。PMSの下でのプログラム

のデバッグは最初、外部割込を手動により与えることにより1タスク毎逐次起動して行くジェネラル オペレーション テスト (GOT) により全プログラムを総合的に試験した。GOTはプログラムとしてはリアルタイムで動き得るように全プログラムをメモリーに格納しておき、外部割込の代わりに、スナップスイッチ等の手動割込により、タスクを起動する。GOTのあとに実行したリアル タイム シミュレーション テスト (RTST) は手動割込の代わりに、ミルラインシミュレータ (プログラムで構成) により擬似割込を発生し、全タスクのタイミング的検討を含めたテストを行なう。

GOTは圧延ラインを流れる一つの材料の全工程を手動割込で模擬することを目的とし、RTSTは実圧延操業に近い状況を模擬しながら全プログラムをテストすることを目的とする。

以上は全て実際の圧延ラインには接続しないオフラインのテストであり、プログラムならびに計算機に付属する入出力機器 (タイプライタ、カードパンチ) とのリンクージテストが主目的である。

生産現場に計算機制御システムが搬入されると、ハードウェアの現地調整が行なわれ、GOT、RTST によりソフトウェアの再現テストの後、圧延ラインに設置された各種検出器、位置決め装置、出力装置とのリンクージテストが行なわれる。これらのリンクージテストが一応終ると、オンラインテスト (OLT) が開始される。OLTの最初は計算機から圧延ラインへの出力を切っておき、検出器のみを用いてトラッキングの試験を行なった。このトラッキングがうまく行けば、圧延ラインの計算機制御の半分以上は完成したといってもよい。リアルタイムのテストにおける支援プログラムとしてはオンラインモニタやプロセス入出力シミュレータが有効であった。OLTの後半は数式モデルのテストであり、このテストはテスト方法を工夫することにより、効果的に実施できた。

各種支援プログラムの詳細については後述する。

7.3 人と機械との協調

従来より手動運転により操業を続けているミルに、オペレータに不安をいだかせることなく、計算機を導入するためには、マンマシンリンクージを重視する必要がある。

表7.1 アプリケーションプログラムの試験過程

Tests	Comments	Support Programs
1. Unit Operation Test (UOT)	NPMS Debugging	Dump Process Input-Output Simulator
2. Single Operation Test (SOT)	NPMS Debugging Linkage Test	Dump Process Input-Output Simulator
3. General Operation Test (GOT)	PMS Debugging Simulation Debugging	On-Line Monitor Process Input-Output Simulator Dump
4. Real-Time Simulation Test (RTST)	PMS Debugging Simulation Debugging	Mill Line Simulator Process Input-Output Simulator On-Line Monitor Dump
5. On-Line Test (OLT)	PMS Debugging Field Test	On-Line Monitor Dump

(1) オペレータガイド

計算機が導入されても操業の主体はあくまで運転員にあり、したがって運転員は常に圧延ラインの全体と計算機の処理状況を認識できなければならない。このためオペレータガイドとし、トラッキングボードや各種の表示器を設けて、ライン状況、ライン上のスラブの属性や圧延仕様、ならびにアラームなどの表示を実施している。アラームは10種類程度に分類してランプ表示し、そのうち緊急な処置を要するものはブザーをも鳴らしている。アラームはすべて印字し、以後の解析に供するようにしている。

(2) 誤操作の除去

各種設定盤に関するシステム的な考え方は、人間の操作には不安定さとミスが伴うが、それによるオペレータの負担を増加させず、円滑なマンマシンリンケージを確保することである。このため、たとえば、手動による重複操作はソフト的に1回のアクションと限定し、ミス操作に気づいたときにはいつでも訂正が可能ないようにしてある。

(3) セットアップ計算の確認方法

セットアップ計算のおもな出力は6スタンド分の圧下位置と回転数の設定値である。これら12個の設定値の良否は、これら設定値を用いて実際に圧延してみればわかる。しかし実圧延による確認はセットアップ計算が完成していない場合には、ミスロールやオフゲージを発生するので実用的でない。

すでに手動により圧延中のミルでは設定値の良否は、手動操業値と比較することにより判定される。この比較に関しては12個の変数の個々について行なり必要がある。しかし12個の変数を一見して比較することは運転員の負担となる。そこで運転員の負担を軽減する新しいセットアップ計算の確認方法を開発した。この方法は体積速度一定の関係（単位時間に通過する材料の体積はどのスタンドでも等しい）に基づいている。あるスタンドの圧下位置と回転数の設定値は与えられた体積速度を基にして計算されるが、圧下位置と回転数との組合せはいくぶん任意に選ぶことができる。これらの関係により、セットアップ計算は6個のロール回転数設定値を前回圧延時のロール回転数実測値に一致させることができる。これにより本確認方法はロール回転数をノルマライズすることによって比較すべき変数を6個の圧下位置のみとした。

この確認方法により運転員は設定値の良否を直感で確認できるようになり、その結果数式モデルの改良がスピードアップされた。この方法は表示実験時のみならず、表

示圧延実験や手動運転から計算機運転への移行などにおいて有効であった。

(4) 模擬計算

セットアップ計算は圧延ライン上を走行するスラブが特定点にきたときに起動されるのが普通である。しかし現場操業上ならびに数式モデル確認上の要請は、スラブがライン上にないときでもセットアップ計算が実施できることである。この事前の計算により、ミルセットアップのための入力値、その過程、出力値などが確認できる。このためオンラインのタイミングにはよらず、ボタンを押すことによりセットアップ計算を実行し、結果を表示する手段を用意した。

7.4 支援プログラム^{7.2), 7.3)}

事務用、制御用を問わず、計算機システムを取纏める上のキーポイントは“問題点抽出のスピード”にある。特に計算機制御の場合には、未知の問題点を内包している場合が多く、このための配慮を十分行なっておくことが必要である。

この配慮の中にはハード的なものとソフト的なものがある。ハード的なものとしては模擬割込発生装置、測定機器、測定用信号線の配線など、機器ならびに配線の準備が必要である。これらはほとんどハードウェアシステム決定の際に考慮しておかねばならない。ソフトウェアとしては以下に述べる各種支援プログラムを準備しなければならない。

いずれにしてもこれらの準備は先手先手と用意しなければ役に立たず、準備を各種作業工程の中でどのように組み入れるかも重要な課題である。

7.4.1 ダンププログラム

デバッグの過程において、計算機の内容をダンプする必要性は高く、ダンププログラムは、次の目的のために使用される。

- (1) タスク処理結果の確認
- (2) タスク処理状態のトレース
- (3) プログラム内容の確認
- (4) 各種形式のデータの確認

ダンプは常に簡潔な形で出力されるべきである。これらの目的のためには印字されるフォーマットは必要に応じて、ビットパターン、16進数、10進整数、浮動小数表示10進数で出力されるように計画した。本計算機制御システムにおいては各種ダンププログラ

ムを開発したが、一例として、計算機内に格納されているロギングデータテーブルの印字専用の形式を図 7.3 に示す。この図はデバッグ中に、設定計算の中間結果をも知るために印字されるもので、テーブル上の番地と内容が、ビットパターン、整数型、浮動小数点表示で出力されている。

7.4.2 オンラインモニター

圧延機のオンライン計算機制御は、ミルライン上の材料の動きを割込信号により捕え、これに応じて種々の制御が実施される。したがって計算機制御が所望の通り動作するためには、割込信号が正しいタイミングで発生し、これを基点として以後の一連のプログラム処理が正しく行なわれなければならない。タイミングの良否や一連のプログラム処理の良否を判定するためには、計算機内で動く各タスクをモニターしておく必要があり、このためのモニタープログラムを開発し、これをオンラインモニターと名づけた。

オンラインモニターは図 7.4 に示すようにシステムプログラムに結合された一種のサブルーチンであり、各タスクの起動要求時(Q)、起動時(S)、終了時(E)に作動し、そのタスク番号と名称、動作時刻(時分・1/100秒)を図 7.5 のように印字する。図 7.5 からいつどのプログラムがどのような状態にあったかを判断することができる。このオンラインモニターを活用することにより、割込タイミングの良否、センサーの誤動作、タスク単体やタスク相互間の不都合、タスクの動く順序、待たされ具合、コアからドラムへの退避・回復の状態、ならびに所要処理時間が明確にわかり、タイミングの検討、プログラム番号の割付け、コアシェアリングの検討に有効であった。さらに、オンラインモニターにより、総合的な処理時間、システム的な挙動が把握でき、処理時間上苦しい部分に関しては処理順序ないしは処理方法を改良することができた。

7.4.3 プロセス入出力シミュレータ

制御用プログラムの特徴は各種アナログ入力、デジタル入力、デジタル出力を処理することである。しかしこれらのプロセスの入出力はオンラインでしか処理されない。そこでデバッグ期間においてはプロセス入出力は模擬データによりシミュレートした。

プロセス入出力シミュレータはシステムプログラムに結合された一種のサブルーチン形式を採った。そのフローチャートを図 7.6 に示す。各入出力機器が使用可能か否かをコアメモリーの対応する 1 ビットに記憶させておく。各タスクにおいて、プロセス入出力に関

する処理要求がくると、その要求はプロセス入出力シミュレータに送られる。本シミュレータはその要求の入出力機器がオンラインであるか否かをその対応ビットで判定し、オンラインであれば、その機器に関する入出力動作が通常通りに実行される。もしその要求の入出力機器がオフラインであるならば、その入出力機器に関する模擬入出力データをこのシミュレータが入出力する。すなわちその要求が入力であるならば、あらかじめ定められたコアメモリー上の内容をメインプログラムに与え、その要求が出力であるならば、その出力をあらかじめ定められたコア上のエリアに格納する。この特定のコア上の情報の入出力の処理は別に設けられた入出力タスクで行なり。

本シミュレータの利用により、オフラインでのデバッグにおいても、またオンラインで使用不能の機器に関しても、メインルーチンをなんら変更することなく、具体的な数値を与えることができ、全プログラムのデバッグ、タスク相互間のリンケージ上のテストを容易にすることができた。

なお、このプロセス入出力シミュレータは、後述のミルラインシミュレータによる模擬オンラインデバッグを可能にする唯一の手段である。

7.4.4 ミルラインシミュレータ

オンラインシステムでもっとも憂慮すべき点はタイミングの問題であり、しかもこれが現地デバッグに持越される点にある。タスク単体、タスク相互間のテストをいかに完全に行なっても、これらのテストだけではタイミングによって発生する問題は、その糸口さえつかめない。一度タイミング上のトラブルが発生すると、割込の優先順位やプログラムの順序、レベル、コア時分割など基本的な問題にまで発展する可能性が極めて大きい。

ミルラインシミュレータは実時間で、事象の変化を起し、所定のタスクを次々と起動させて、タイミングによって発生する問題を、現地発送前に早期に捕え、ほぼ完璧に近い形で、ソフトウェアを出荷することを目的とした一つのタスクである。

ミルラインシミュレータの特質は

- (1) タイミングの問題を早期に捕えて、これを解決する。
- (2) タイミングを再現することが可能である。
- (3) したがって、現地デバッグ期間を大幅に短縮する。

ことにある。

ミルラインシミュレータは、ミルライン上を複数個のスラブが、順次移動する状況を模

LOGGING DATA TABLE 1 H - 7 2 5 0 PRINT OUT									
0000000000000000010	00010000000100000000	0002	0003	0004	0005	0006	0007	0008	0009
0006	0007	0008	1.0999999E+03	0010	4.0000000E+00	0012	6 111111 6	0013	0123
0014	1150	0015	0095	0016	1.7999999E+02	0018	2.5000000E+01	0020	8.8999996E+02
0024		0026	2113	0027	0000 0 0	0028	0000	0029	0000
0031	000000	0032	000000	0033	12 0750	0034	1.0000000E+03	0036	1.1164996E+03
0040	1.1000000E+00	0042	1.1500000E+00	0044	1.1500000E+00	0046	1.1500000E+00	0048	8.7645540E-01
0052	1.8333333E-01	0054	3.7500000E-01	0056	5.6666665E-01	0058	7.5833330E-01	0060	9.0000000E-01
0064	1.5433719E+01	0066	1.0000000E+01	0068	7.3600000E+00	0070	5.5200000E+00	0072	4.5447373E+00
0076	9.4000000E-02	0078	8.2087278E-02	0080	7.1636753E-02	0082	6.3419880E-02	0084	4.4321875E-02
0088	4.7670000E+01	0090	7.2208000E+01	0092	1.0000000E+02	0094	1.3711147E+02	0096	1.6958790E+02
0100	1.3918620E+02	0102	1.2279998E+03	0104	1.2173000E+03	0106	1.2066000E+03	0108	1.1959067E+03
0112	1.1745116E+03	0114	5.0553822E+05	0116	2.3199949E+06	0118	2.0791480E+06	0120	1.9057251E+06
0124	1.1914658E+06	0126	4.9931988E+05	0128	4.9931988E+05	0130	4.9931988E+05	0132	4.9931988E+05
0136	4.9931988E+05	0138		0140		0142		0144	
0148		0150	1.6069555E+01	0152	1.2244126E+01	0154	9.0557126E+00	0156	6.7241000E+00
0160	5.0961408E+00	0162	2.5525367E+01	0164	8.7093133E+00	0166	7.8508462E+00	0168	5.5711126E+00
0172	3.9733178E+00	0174	2.4578840E+02	0176	2.5821592E+02	0178	2.5200000E+02	0180	1.3711147E+02
0184	1.7999999E+02	0186		0188		0190		0192	
0196		0198		0200		0202		0204	
0208	6.4971456E+01	0210		0212	1.2279998E+03	0214	1.2173000E+03	0216	1.2066000E+03
0220	1.1852092E+03	0222	1.1745116E+03	0224	5.0553822E+05	0226	2.3199949E+06	0228	2.0791480E+06
0232	1.5000000E+06	0234	1.1914658E+06	0236	1.6069555E+01	0238	1.2244126E+01	0240	9.0557126E+00
0244	5.1290000E+00	0246	5.0961408E+00	0248	0000000000000000	0249	0000000000000000	0250	1.4170000E+01
0254	3.7939696E+01	0256	5.5086154E+01	0258	6.3132000E+01	0260	5.8468656E+01	0262	1.7822787E+01
0266	1.9575339E+01	0268	2.0000000E+01	0270	1.9248822E+01	0272	1.7217725E+01	0274	1.0000000E+00
0278	1.0000000E+00	0280	1.0000000E+00	0282	1.0000000E+00	0284	1.0000000E+00	0286	
0290		0292		0294		0296		0298	-2.1057784E+01
0302	-4.4154958E+01	0304	-5.8874000E+01	0306	-7.1511273E+01	0308	-8.6633682E+01	0310	1.4439199E+00
0314	1.6459205E+00	0316	1.7222750E+00	0318	1.6537659E+00	0320	1.5560000E+00	0322	
0325	000000	0326	000000	0327	000000	0328	000000	0329	000000
0331	000000	0332	000000	0333	000000	0334	000000	0335	000000
0337	000000	0338	000000	0339	00 0000	0340	00 0000	0341	00 0000
0343	00 0000	0344	00 0000	0345	00 0000	0346	1.0000000E+00	0348	1.0000000E+00
0352	1.0000000E+00	0354	1.0000000E+00	0356	1.0000000E+00	0358		0360	
0364		0366		0368		0370		0372	
0376		0378		0380		0382		0384	
0388		0390		0392		0394		0396	
0400		0402		0404		0406		0408	00 0000
0410		0412	3.8265120E-01	0414	3.3254873E-01	0416	2.8548126E-01	0418	2.5000000E-01
0422	1.1105995E-01	0424		0426		0428		0430	1.7671676E-01

図 7.3 ログデータテーブルのダンプ形式

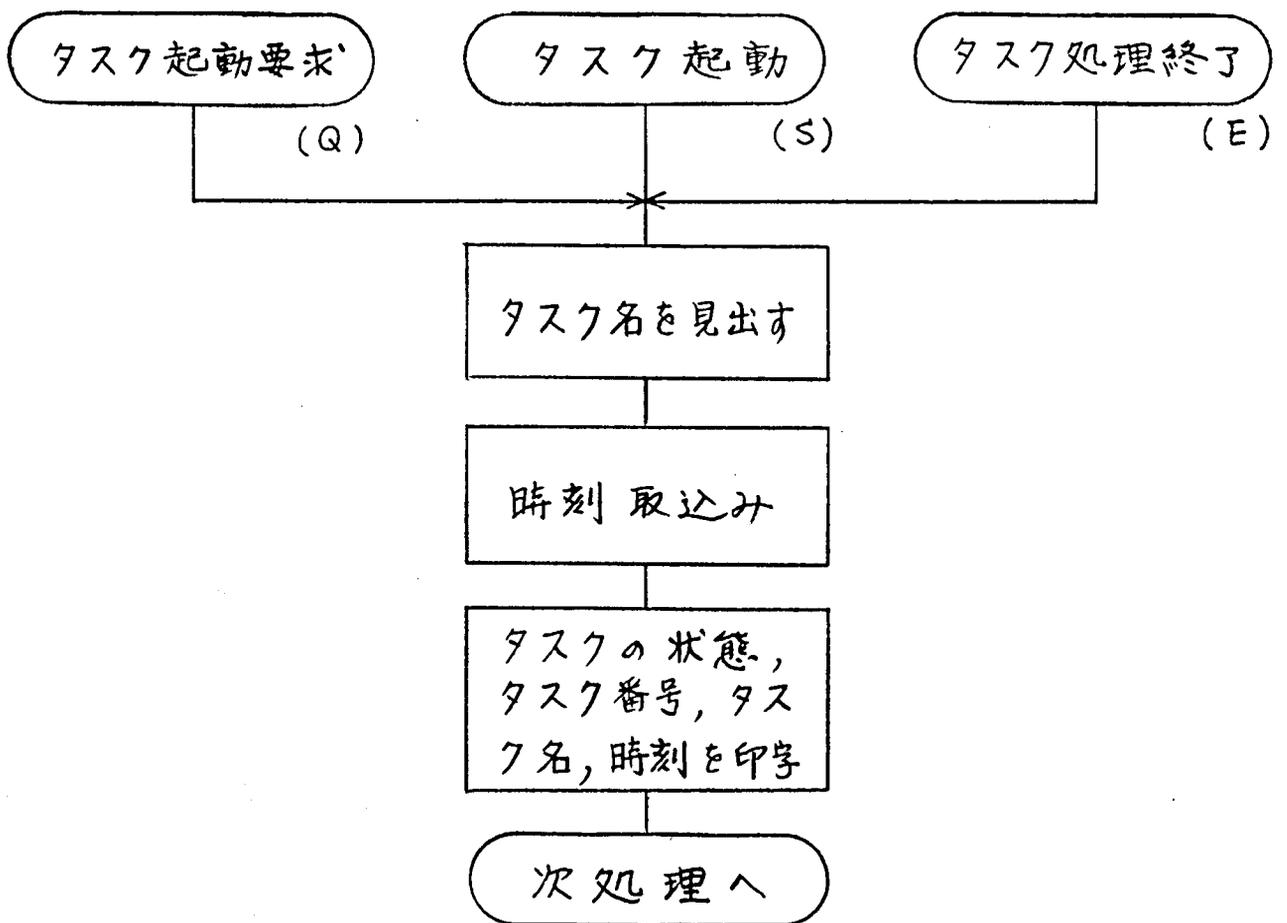


図 7.4 オンラインモーターの概略フローチャート

017	FTC16	2000	1255	S	016	FIKAM	2000	1284	Q	018	TFUPR	2000	1312	Q	017	ETC16	2000	1318
017	FTC16	2000	1321	Q	018	TFUPR	2000	1322	E	016	FIKAM	2000	1323	S	017	ETC16	2000	1338
017	FTC16	2000	1362	S	018	TFUPR	2000	1362	E	025	ETC01	2000	1373	E	018	TFUPR	2000	1398
051	FTC16	2000	1408	Q	018	TFUPR	2000	1427	S	018	TFUPR	2000	1441	E	018	TFUPR	2000	1444
051	FTC16	2000	1452	E	051	ETC10	2000	1466	Q	042	ETC08	2000	1688	S	042	ETC08	2000	1703
025	FTC01	2000	1768	S	025	ETC01	2000	1772	E	042	ETC08	2000	1782	E	025	ETC01	2000	1786
043	ETC09	2000	1788	S	043	ETC09	2000	1801	E	043	ETC09	2000	1819	Q	058	ETC19	2000	1868
058	FTC19	2000	1870	E	058	ETC19	2000	1870	Q	042	ETC08	2000	1878	S	042	ETC08	2000	1897
043	ETC09	2000	1908	Q	038	ENDMY	2000	1968	E	037	ENLOG	2000	1969	Q	037	ENLOG	2000	1969
037	FNLOG	2000	1974	S	038	ENDMY	2000	1992	Q	037	ENLOG	2000	1993	E	038	ENDMY	2000	1993
043	ETC09	2000	2020	E	042	ETC08	2000	2021	S	043	ETC09	2000	2025	E	043	ETC09	2000	2062
042	ETC08	2000	2118	S	042	ETC08	2000	2122	Q	043	ETC09	2000	2158	Q	025	ETC01	2000	2178
025	ETC01	2000	2182	E	025	ETC01	2000	2219	Q	043	ETC09	2000	2228	E	042	ETC08	2000	2229
043	ETC09	2000	2235	Q	059	ADAPT	2000	2248	Q	059	ADAPT	2000	2249	E	043	ETC09	2000	2265
059	ADAPT	2000	2267	E	059	ADAPT	2000	2391	Q	027	TCUPR	2000	2510	S	027	TCUPR	2000	2513
027	TCUPR	2000	2515	Q	027	TCUPR	2000	2569	S	027	TCUPR	2000	2572	Q	010	DOPRG	2000	2580
010	DOPRG	2000	2580	Q	010	DOPRG	2000	2581	E	027	TCUPR	2000	2590	Q	025	ETC01	2000	2618
025	ETC01	2000	2622	E	025	ETC01	2000	2638	E	010	DOPRG	2000	2651	Q	010	DOPRG	2000	2651
010	DOPRG	2000	2651	E	010	DOPRG	2000	2671	Q	027	TCUPR	2000	2948	S	027	TCUPR	2000	2951
027	TCUPR	2000	2953	Q	060	ETC12	2000	2978	S	060	ETC12	2000	2980	E	060	ETC12	2000	3016
025	ETC01	2000	3028	S	025	ETC01	2000	3031	E	025	ETC01	2000	3047	Q	038	ENDMY	2000	3241
037	FNLOG	2000	3241	Q	037	ENLOG	2000	3259	S	038	ENDMY	2000	3261	Q	037	ENLOG	2000	3261
038	ENDMY	2000	3261	S	037	ENLOG	2000	3265	Q	025	ETC01	2000	3438	S	025	ETC01	2000	3455
025	ETC01	2000	3471	Q	023	HMDUP	2000	3813	S	023	HMDUP	2000	3816	E	023	HMDUP	2000	3816

図 7.5 オンライン モーター の 印字 形式

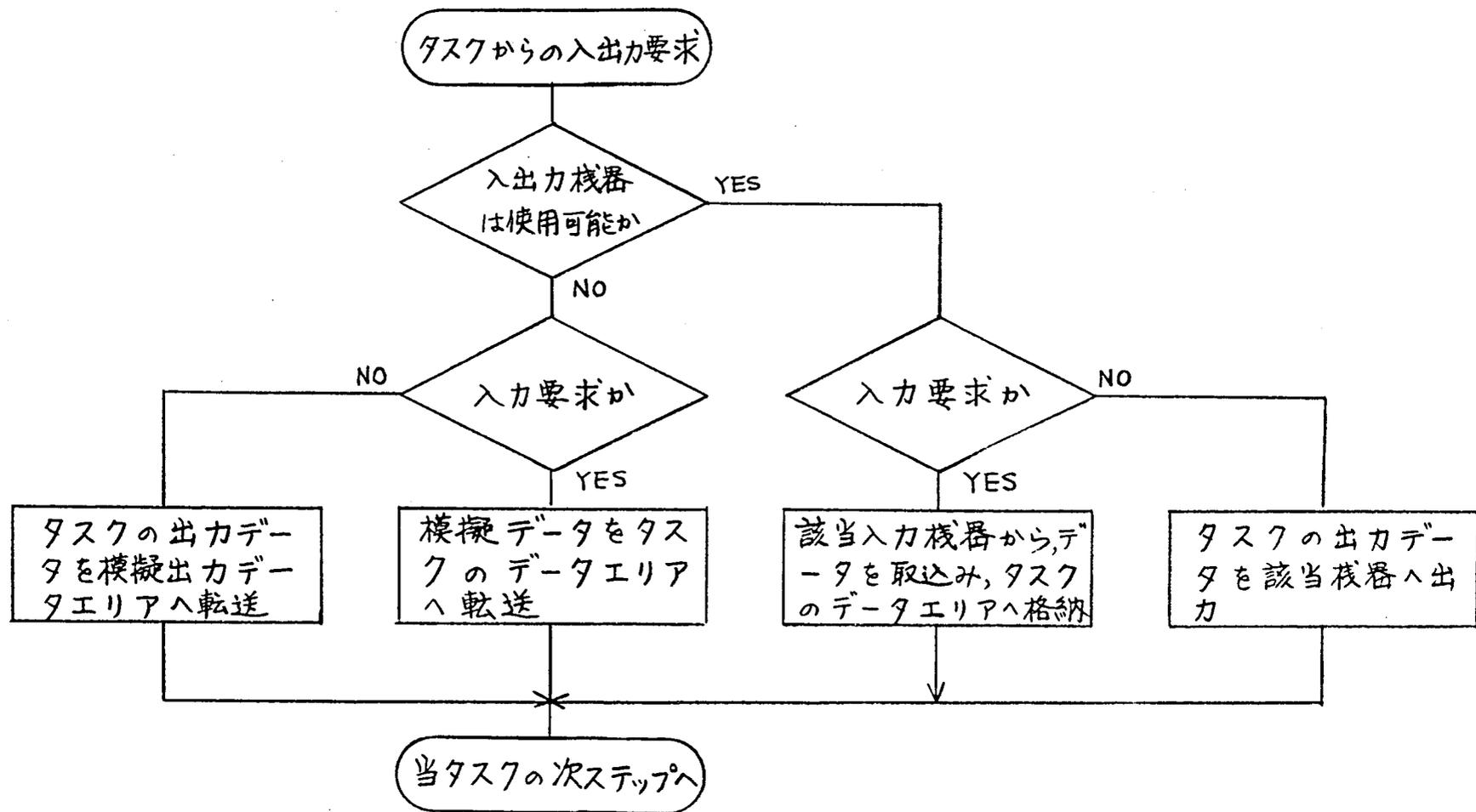


図 7.6 プロセス入出力シミュレータの概略フローチャート

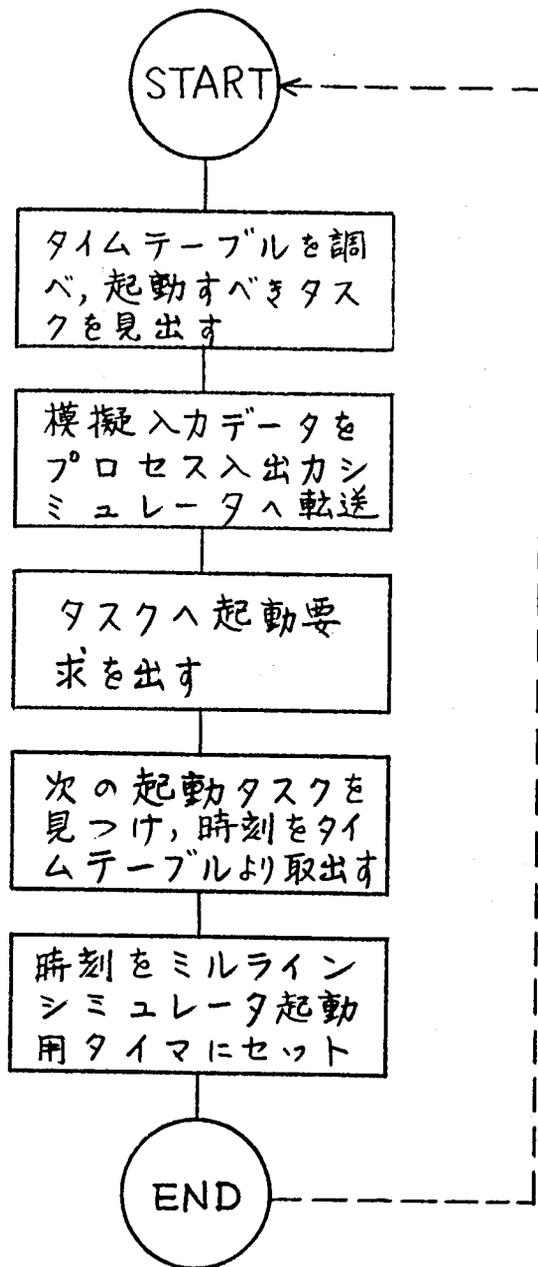


図 7.7 ミルラインシミュレータの概略フローチャート

擬するものである。スラブとスラブとの間隔をそれぞれ時間差として与え、さらに各スラブの移動に伴って発生する割込と割込との間隔を時間差としてタイムテーブルに登録しておき、各割込に応じて起動するタスク番号を登録しておく。本シミュレータは図 7.7 に示すように、既定時刻毎に起動され、その時点においてタイムテーブルを調べ、模擬割込を発生すべきものについては該当タスクを起動する。起動されるタスクで使用される各種データの内容は、本シミュレータでセットされ、上述のプロセス入出力シミュレータ等を介して用いられる。

このミルラインシミュレータを用いることにより、圧延工場に計算機を持ち込む以前に、圧延ラインを流れる圧延材と同様のタイミングを発生させることができ、種々の流れに関する試験を済ますことができ、それに応ずる設定計算のチェックも効率的に実施することができた。

7.5 結 言

計算機制御システムは、ハードウェアとソフトウェアから構成される。ハードウェアはおもに既開発装置の組み合わせであるが、ソフトウェアは新規開発の部分が多いため、システムティックな開発計画を立てるほか、計画当初から各開発過程において必要と思われる試験工具に類する支援プログラム等を計画準備しておくことが、ソフトウェア開発過程を短縮するのに有効である。

ホットストリップミル計算機制御のソフトウェア開発において配慮したこととそれらの効果をまとめると次のようになる。

- (1) ソフトウェア構築の過程で通常は種々のレベルのフローチャートが作成されるが、システムエンジニアがコーディングまで含めて、システム開発を行なう場合には、フローチャートを 1 種類に集約する方が能率的であることを体験した。
- (2) 計算機制御が活用されるためには、人と機械との協調が大切である。オペレータガイドとしては、トラッキングボードや各種表示器を設けて、圧延ラインの状況を計算機の処理状況を認識しやすくした。
- (3) セットアップ計算の良否の確認は、運転員が一見して行なえる方法を案出した。この確認方法の導入により、数式モデルの改良がスピードアップされた。
- (4) 模擬計算方式により、圧延材がライン上にない場合にもセットアップ計算を試みることができ、セットアップ計算の適否やその適用範囲が効率的に検討できるようにな

った。

(5) 支援プログラムとして、下記を開発準備した。

- (a) ダンププログラム
- (b) オンラインモニター
- (c) プロセス入出力シミュレータ
- (d) ミルラインシミュレータ

これらの支援プログラムの用意により、計算機の設置から、実運用までを、従来は1年以上を要していたものを5ヶ月間で実施することができた。

第 8 章 結 論

第 8 章 結 論

本研究では、ホットストリップミル計算機制御に関する技術課題のうち、主として仕上圧延機のミルセットアップの方式とその数式モデルの検討を制御技術の面から行なった。すなわち、仕上圧延機のミルセットアップと適応制御に関して各種方式の比較検討、それぞれの場合における数式モデルの作成方法の検討、およびソフトウェアの開発過程において配慮すべきことの検討を行なった。得られた結論の詳細は各章の終りに記したが、一般的にまとめると次の通りである。

- (1) ミルセットアップの方式として、パターン方式、偏差計算方式、絶対値計算方式の 3 種類について比較検討を行なった。

パターン方式は実績データをそのまま計算機内へ格納するため、圧延材の品種が少ないときは計算機制御の着手は早い。融通性、発展性に欠ける。偏差計算方式は、圧延材の品種が多く、計算機に格納されたパターンのみでは不十分な場合に、標準的な設定値のみをパターンとして格納しておき、パターンと偏差計算により所要の設定値を得る。標準設定値をオフラインの設定計算により求め、偏差計算を影響係数により行なう偏差計算方式は、複雑な計算や繰り返し計算をオフラインで行なうことにより設定値を決めることができ、また偏差計算の範囲を適切に選べるため、精度的には絶対値計算と同等の設定値を得ることができる。また、この方法はロット内の微少変動を扱う場合には簡便である。設定値を絶対量として直接求める絶対値計算方式は融通性・拡張性に富むが、圧延現象を簡潔な数式モデルに表現するためには、かなりの開発期間を要する。

偏差計算方式と絶対値計算方式のいずれの方式も、ともに数式が完成してしまえば同様の精度で計算できる。しかし両方式は、計算機制御システムの開発過程において、つまり手法的にはかなり相違がある。偏差計算方式はオフライン計算の結果である標準設定値や影響係数を計算機の中に格納しておくので、オンラインの実験とオフライン計算とをくり返ししながら、システムが改良されていく。他方、絶対値計算方式は、各数式モデルを実験とオフラインの解析で決めておけば、システム的な改良はオンラインの実験を通して実施できる。

以上の実験、経験からセットアップ計算の方式としては、絶対値計算方式のほうが融通性、拡張性など手法面ですぐれていることがわかった。絶対値計算方式は、鋼種

や成分の追加，変更が容易であり，ダミー圧延ではいずれのスタンドをダミーに選んでも，容易に対応することが可能である。

- (2) ミルセットアップは適切な適応制御のもとではじめて効果を発揮する。適応制御の方式としては，セットアップ計算方式と同様に，偏差計算方式と絶対値計算方式の2種類を考案し，実験，検討を行なった。

偏差計算方式による適応制御は，外乱や誤差による影響が最終的には全スタンドのロール回転数と仕上板厚の偏差として現われることと，これらの偏差を検出し，影響係数の算出法を利用し各スタンドの圧下位置を修正することができることに着目した方式で，この方式により外乱や誤差が吸収可能なことを理論的に明らかにした。

絶対値計算方式による適応制御は，圧延変動に寄因する要因を可及的に分離し，ミルセットアップの数式モデルのパラメータである要因を個々に修正する方式である。これらの要因としては，ロール開度零点，塑性曲線適応修正係数，圧延温度式定数を採り上げ，これらの適応修正要因によりほとんどの外乱が吸収され得ることを理論的に究明した。これらの要因により，適応修正が理論的には可能であっても，観測値の個数に制限のある場合には，満足な制御が行なえぬことが実験の結果明らかとなった。このため感度解析や洞察により，観測不能な変数の認識方法の改良が必要なことも明らかとなった。

絶対値計算方式の適応制御で生じた問題点は，スタンド間の板厚の認識の方法であった。マスフローゲージ算出時の先進率の影響についての感度解析，先進率の値を変更した場合のロール開度零点推定の時系列的なシミュレーション，ならびにゲージメータゲージを用いた場合の効果などについても検討を行なった。

- (3) 絶対値計算方式の適応制御においては，適応制御すべき圧延変動原因やミルセットアップ誤差は再現性のあるものととどめ，一過性の雑音は除去する必要がある，累積補正となるように指数平滑法を利用した。累積補正の度合は指数平滑法の平滑ゲインで決められる。平滑ゲインを定める場合，ロール開度零点と塑性曲線適応修正係数の両平滑ゲインは，ともに同一値としなければ適応制御に伴う誤差が現われることが理論的に明らかとなった。

- (4) ミルセットアップ方式2種類と適応制御方式2種類との組合せの良否は，評価すべき尺度が多様にあるため，一概には決め難い面がある。評価尺度としては，圧延製品の品種，圧延仕様，圧延設備等生産形態に関するもの，記憶容量，演算速度等計算機

に関するもの、オフライン計算での準備、オンラインでの計算と調整等工程的なものが挙げられる。これら評価尺度に照して適切な組合せを選ばばよい。4種の組合せに関する考察を以下に述べる。

(a) セットアップ：偏差計算 + 適応制御：偏差計算

ともに影響係数を主体とするため、思想的に統一され簡明である。計算式も簡単である。しかし、圧延条件が多様になると、標準パターンの数と偏差計算の係数の数が増え、それらの数値の準備が大変となる。

(b) セットアップ：偏差計算 + 適応制御：絶対値計算

組合せることは困難である。

(c) セットアップ：絶対値計算 + 適応制御：偏差計算

セットアップ計算の機能は、圧延状態の変動に関わりのない設定値を求めるものであり、適応制御はロール熱膨張や摩耗等圧延状態の変動を吸収する機能を持つとの考え方を採ることができる。換言すると、セットアップモデルの高精度化、すなわちモデルパラメータの調整は長期間の操業データの採取に基づく解析で実施し、時々刻々変動する圧延状態の基準からの偏差は適応制御で吸収する方式である。

(d) セットアップ：絶対値計算 + 適応制御：絶対値計算

モデルは精緻であり、複雑となるきらいがあるが、実用化も可能である。特にモデル誤差と圧延変動とを同時に吸収する点は長所であると同時に、両者の分離が不明確であるとの短所ともなり得る。適応制御の使い方を慎重にしないと、モデル誤差算出時に発生する計算誤差がセットアップ計算への外乱となる場合も起る。この方式は圧延理論を直接用いているため、圧延理論の高精度化などオフラインでの解析に適している。

以上の組合せ法以外にも、適応制御としては両方式を部分的に利用することも可能である。また他のセットアップや適応制御の方式等との組合せも考え得る。さらに、計算機制御に含まれる他の制御機能との併用、斉合性についても実用上は検討を必要とする。

(5) 計算機制御導入のシステムアプローチとして、短期間で稼働させるにはどのようにすればよいか、すでに手動運転で圧延操業中の運動員にどのようにして計算機になじんでもらうかについて検討を加えた。マンマシンインターフェイスとしては、トラックボードの配置、圧延仕様のカードないしはデスクからの入力方法の検討のほか、

セットアップ計算の方式や数式モデルの良否の判定と改良が迅速に実施できるような実験方法やセットアップ計算値の表示方法を検討した。

セットアップ計算の良否の判定方法としては、圧延現場では手動操作が行なわれているので、セットアップ計算値を表示し、その表示値と操業実績値とを比較することにより行なおうとした。比較すべき変数は、6スタンド分の圧下位置とロール回転数の12個であり、12個の変数の表示値と操業値を一見して比較することは運転員にとって負担になる。そこで運転員の負担を軽減する新しいセットアップ計算の確認方法を開発した。この方法は体積速度一定の関係に基づいている。あるスタンドの圧下位置と回転数の設定値は、与えられた体積速度を基に計算されるが、圧下位置と回転数との組合せはいくぶん任意に選ぶことができる。これらの関係により、セットアップ計算では、6個のロール回転数設定値を前回圧延時のロール回転数実測値に一致させることができる。このように本確認方法はロール回転数をノルマライズすることによって比較すべき変数を6個の圧下位置のみとした。この確認方法により、設定値の良否を直感で確認できるようになり、その結果数式モデルの改良をスピードアップすることができた。

圧延材が圧延ライン上にない場合でも、模擬圧延仕様によりセットアップ計算が行なえる模擬計算プログラムを用意した。これにより、新しい圧延仕様に関しての設定値を事前に算出してチェックしたり、計算機上の種々の試算が可能となり、方式や数式モデルの現地での検討に有効であった。

- (6) ソフトウェアシステムの開発期間の短縮を図る道具として、支援プログラムにはどのような機能を備えるべきであるかを検討した。機能の異なる4種類の支援プログラムを開発し、利用したところ次のような効果を見ることができた。ダンププログラムはアプリケーションプログラムの処理過程や計算結果を出力するが、ライン上に点在する圧延材のトラッキングに応じるデータを、種々のフォーマットに整理して印字するようにすることにより、計算機の内部状態が一見して知れるようになった。オンラインモニターは、時分割制御されている各プログラム(タスク)の起動要求、起動、終了の各時刻を監視出力するもので、これにより各タスクの挙動、タスク相互間の影響、総合的な処理時間等が認識できる。プロセス入出力シミュレータは、オンラインの入出力装置の代わりに、それらハードウェアの機能をプログラムで代行するもので、模擬データを用いて入出力を含んだ形でシステムのデバッグが容易に実施できる。ミ

ルラインシミュレータは、圧延ラインを流れるスラブに応じて発生するタイミング面の問題を検討するもので、圧延ライン上を複数個のスラブが順次移動する状況を模擬する。スラブとスラブとの間隔を時間差として与え、各スラブの移動を、移動に伴って発生する割込と割込との時間差として与えることにより、ライン上で発生するすべての割込信号を模擬的に発生させ、該当タスクを起動する。プロセス入出力シミュレータとミルラインシミュレータとを共動すると、実際の圧延に近い状態でタイミングとデータを与えることができる。

これら支援プログラムの準備により、現地調整期間を短縮できることを実証した。

謝

辞

本論文で述べたホットストリップミル計算機制御の研究は、住友金属工業株式会社と日立製作所による同計算機制御システムの共同研究過程において行なったものである。対象圧延機としては住友金属工業和歌山製鉄所の6スタンドタンDEM仕上圧延機が用いられた。本研究推進に当っては、住友金属工業株式会社と日立製作所の関係部署の多くの方々の御理解と御援助を賜った。

本論文を纏めるに際しては、京都大学工学部教授 近藤文治先生、小門純一先生に御高見を賜るとともに御懇切な御指導をいただいた。本研究は、著者が日立製作所 日立研究所に在勤中に遂行したものであり、この間、所長 小林栄二博士、部長 前川敏明博士を始め、著者の属した研究室の方々ならびに日立製作所 大みか工場の関係者に、御指導と激励を賜った。著者が日立製作所 システム開発研究所に移籍後は、所長 三浦武雄博士、副所長 田上嵩博士、主管研究員 三巻達夫博士から、御援助と激励を賜った。ここに御指導と御援助をいただいた多くの方々に深甚な謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1.1) 前川敏明：最近の圧延設備の自動制御，日立評論創刊50周年記念論文集，40-43，昭43-12
- 1.2) 西沢ほか：熱延工場AGCの使用経過とその結果について，住友金属，19巻，3号，130-137，昭42-7
- 1.3) J.W.Wallace：Automatic Gage Control for Modern Hot Strip Mills, Iron and Steel Engineer, vol. 44, No. 10, 75-86, Dec. 1967
- 1.4) 志田：熱間圧延における圧延荷重について，塑性と加工，7巻，67号，424-431，昭42-8
- 1.5) 今井：ホットストリップミルにおける連続圧延の理論とその応用，機学誌，66巻，534号，938-944，昭38-7
- 1.6) R.G.Beadle：On-line Computer Control of a Hot Strip Finishing Mill for Steel, Iron and Steel Engineer, vol. 41, No. 7, 71-81, July 1964
- 1.7) R.J.Darnall：Computer Control on Inland's 80-in. Hot Strip Mill, Iron and Steel Engineer, vol. 45, No. 4, 128-134, April 1968
- 1.8) 北之園，大成ほか：ホットストリップミルの計算機制御，日立評論，51巻，4号，13-18，昭44-4
- 1.9) 伊佐早ほか：ホットストリップ巻取温度計算機制御，日立評論，49巻，10号，996-999，昭42-10
- 1.10) 小島ほか：ホットストリップミルのコンピュータコントロール，住友金属，21巻，2号，50-58，昭44-4
- 1.11) 大成ほか：ホットストリップミルの計算機制御，日本自動制御協会，第13期通常総会学術講演会，昭44-5-22
- 1.12) 大成，大橋：ホットストリップミルの計算機制御，計測と制御，8巻，12号，886-894，昭42-12

- 113) T.Isahaya, M.Ohnari, et al : Computer Control of 80-In. Hot Strip Mill, Intern.Meeting on Iron and Steel Making 1970 "Automation in Iron and Steel Making", Dusseldorf. April 1970
- 114) 田沼, 大成 : 直接計算による動特性解析法 — 冷間タンデム・ミルの動特性解析 I — , 塑性と加工, 13巻, 133号, 昭47-2
- 115) 榎木ほか : 感度解析的考察による最適制御系の構成, 制御工学, 11巻, 12号, 昭42-12
- 2.1) R.B.Sims : The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills, Proc.Instn.Mech.Engrs., vol.168, 191-200, 1954
- 2.2) W.Dahl, et al, Arch.Eisenhüttenwes., vol.36, No9, 633-642, Sept. 1965
- 2.3) 西村ほか : ホットストリップミル仕上げ圧延機の仕上げ板厚影響係数, 塑性と加工, 4巻, 27号, 231-237, 昭38-4
- 2.4) 美坂 : ホットストリップミルの影響係数とその応用, 塑性と加工, 10巻, 96号, 9-18, 昭44-1
- 3.1) Hot Strip Steel Mills Computer Control Begins to Pay Out, Control Engineering, Vol.10, No12, 24-25, Dec. 1963
- 3.2) W.D.King : Computer Control of Cold Strip Mills, 鉄鋼科学技術国際会議, 東京, 昭45-9
- 3.3) T.E.Bryan & J.F.Horn : Application of Computers to Temper Mill Control, Iron and Steel Engineer, vol.45, No6, 123-132, June 1968
- 3.4) 大成ほか : 熱間仕上圧延機計算機制御における設定計算モデル, 電気学会論文誌, 92-C巻, 2号, 100-109, 昭47-2
- 3.5) M.Ohnari, et al : Two Types of Setup Model applied to Computer Control of Hot Strip Mills, IFAC/IFIP 3rd Intern.Conf.

on Digital Applications to Process Control, Helsinki, June
2 - 5, 1971

- 4.1) 大成ほか：圧延制御方法，特許第795303号，特公昭47-11647，昭47-4-12
- 4.2) スネデカー（畑村ほか訳）：統計的手法，岩波，1962
- 5.1) 大成，三矢：ホットストリップミル計算機制御における適応制御，第12回自動制御連合講演会，昭44-11-27
- 5.2) M.Ohnari, et al : Adaptive Control Method for Computer Control of Hot Strip Mill, 1970 IEEE Symposium on Adaptive Processes (9th) ; Decision and Control, Texas, Dec. 7-9, 1970
- 5.3) 大成ほか：連続式圧延機における修正制御方法並びに装置，特許第616581号，特公昭44-20861，昭44-9-6
- 6.1) D.Gross : A General Purpose Forecast Simulator, Management Science, vol. 11, No6, B-119-135, April 1965
- 6.2) 大成ほか：連続圧延機における適応制御方法，特許第762399号，特公昭44-12570，昭44-6-6
- 6.3) 大成ほか：圧延予測温度の適応修正方式，特許第797496号，特公昭47-40188，昭47-10-11
- 6.4) R.W.Lee, et al : A Method for Predicting Temperatures in Continuous Hot Strip Mills, J.of Iron and Steel Inst., vol. 201, No 3, 270-274, March 1963
- 7.1) J.Martin : Programming Real-Time Computer Systems, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1965
- 7.2) 諸岡，大成：計算機制御の支援プログラム，第8回計測自動制御学術講演会，昭44-8-26
- 7.3) M.Ohnari, et al : Experience in Installing a Computer Control System in Hot Strip Mill, Proc. IEEE, vol.58, No1, 30-37, Jan.1970

影響係数の導出過程

影響係数の導出過程は、美坂により示されている^{2,4)}。美坂の方法では、変形抵抗を一つの変数として、扱っているが、以下では、変形抵抗の代わりに、それに含まれる炭素含有量と圧延温度とをそれぞれ変数として扱えるように、改良を加えた影響係数について述べる。

(1) 影響係数

影響係数とは独立変数の変動に対して従属変数がいくら変化するかを示す係数である。たとえば独立変数 x 、 y と従属変数 z との間に次のような関係がある場合

$$z = f(x, y) \quad \dots\dots\dots(1)$$

x 、 y がなんらかの原因で変動し、 z が別の定常状態になったとすると、次式のように表わされ、

$$z + \Delta z = f(x + \Delta x, y + \Delta y) = f(x, y) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + 0(\Delta^2) \quad \dots\dots\dots(2)$$

2次以上の微小量を見捨てて

$$\Delta z = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。この $\frac{\partial f}{\partial x}$ を x に関する z への影響係数という。 z が板厚で x が各スタンドの

圧下位置の場合は $\frac{\partial f}{\partial x}$ を圧下位置に関する影響係数という。なお、式(3)を書換えて

$$\frac{\Delta z}{z} = \left(\frac{x}{z} \frac{\partial f}{\partial x} \right) \cdot \left(\frac{\Delta x}{x} \right) + \left(\frac{y}{z} \frac{\partial f}{\partial y} \right) \cdot \left(\frac{\Delta y}{y} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

とすると、 $\left(\frac{x}{z} \frac{\partial f}{\partial x} \right)$ 、 $\left(\frac{y}{z} \frac{\partial f}{\partial y} \right)$ をそれぞれ $\left(\frac{\Delta x}{x} \right)$ 、 $\left(\frac{\Delta y}{y} \right)$ に関する $\left(\frac{\Delta z}{z} \right)$ へ

の影響係数ともいう。以下、仕上圧延の種々の要因に関する影響係数を求める。

(2) 基本方程式

n スタンドの任意のスタンドにおける体積速度 U_i は定常状態において次式で表わされる。

$$b_i \cdot h_i \cdot v_i = U_i \quad \dots\dots\dots(5)$$

b_i は各スタンドにおける出口板幅、 v_i は各スタンドにおける板速、 h_i は各スタンド出口板厚である。仕上圧延機においては体積速度一定の関係が成立する。いま、なんらかの外乱により体積速度が変化した場合、その変化量は、上式の関係から全スタンドに伝搬し、別の定常状態におちつく。そのとき次式が成立する。

$$(b_i + \Delta b_i) \cdot (h_i + \Delta h_i) \cdot (v_i + \Delta v_i) = U_i + \Delta U_i \quad \dots\dots\dots(6)$$

ゆえに各変動率に対する関係は、上式より2次以上の微小項を無視すると次式により表わされる。

$$\left(\frac{\Delta b}{b}\right)_i + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)_i + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)_i = \left(\frac{\Delta U}{U}\right)_i \quad \dots\dots\dots(7)$$

上式が影響係数の基本となる式である。ここで、あらゆる要因の板厚への影響を知るため b , h , v がいかなる要因の関数であるかを求める。

板幅 b に関しては、仕上圧延の場合には、圧延中の幅広がり量は無視し得る。

板厚 h と、 h を規定する式は、第2章で述べた。すなわち、

- 板 厚 h : 式(2.1)
- 圧延荷重 P : 式(2.2)
- 変形抵抗 k_p : 式(2.3)の簡略式
- ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$: 式(2.5)
- 偏平ロール半径 R' : 式(2.6)
- 圧下力係数 Q_p : 式(2.7)

変形抵抗 k_p は、式(2.3)において、 C^2 の項を省略した形の次の式を用いる。

$$k_p = 1.15 \exp\left(k_1 + k_2 C + \frac{k_4 + k_5 C}{T_K}\right) r^n \dot{\epsilon}^m \quad \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 $k_1 = 0.4305$, $k_2 = -2.033$, $k_4 = 2.603$, $k_5 = 3.358$, $n = 0.27$, $m = 0.13$

以上より、 h は S , H , R , T_K , N , C , b の関数となり、 h の変動量は次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta h}{h}\right) = & \frac{K}{K - \partial P / \partial h} \left(\frac{\Delta S}{h}\right) + \frac{H}{h} \frac{\partial P / \partial H}{K - \partial P / \partial h} \left(\frac{\Delta H}{H}\right) + \frac{R}{h} \frac{\partial P / \partial R}{K - \partial P / \partial h} \left(\frac{\Delta R}{R}\right) \\ & + \frac{T_K}{h} \frac{\partial P / \partial T_K}{K - \partial P / \partial h} \left(\frac{\Delta T_K}{T_K}\right) + \frac{N}{h} \frac{\partial P / \partial N}{K - \partial P / \partial h} \left(\frac{\Delta N}{N}\right) + \frac{C}{h} \frac{\partial P / \partial C}{K - \partial P / \partial h} \left(\frac{\Delta C}{C}\right) \\ & + \frac{b}{h} \frac{\partial P / \partial b}{K - \partial P / \partial h} \left(\frac{\Delta b}{b}\right) \quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

板速 v は次式で表わされる。

$$v = \frac{2\pi}{60} NR(1+f)(1+Z^*G) \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 Z^* は電動機の特性を示す drooping 量、 G は電動機のトルクである。上式より v の変動は次のようになる。

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right) = \left(\frac{\Delta R}{R}\right) + \left(\frac{\Delta N}{N}\right) + \frac{1}{1+f} \Delta f + \frac{Z^*}{1+Z^*G} \Delta G \quad \dots\dots\dots(11)$$

ところでトルク G は、Sims によれば、式(2.11)のように

$$G = 2 \epsilon R R' k_p Q_g b \quad \dots\dots\dots(12)$$

で求めることができる。したがって、

$$\Delta G = \frac{\partial G}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial G}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial G}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial G}{\partial T_K} \Delta T + \frac{\partial G}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial G}{\partial C} \Delta C + \frac{\partial G}{\partial b} \Delta b \quad \dots\dots\dots(13)$$

また、先進率の式(2.10)より、

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial f}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial f}{\partial T_K} \Delta T + \frac{\partial f}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial f}{\partial C} \Delta C + \frac{\partial f}{\partial b} \Delta b \quad \dots\dots\dots(14)$$

ゆえに、式(11)~(14)および式(7)より次の変動式を得る。

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{R}{1+f} \frac{\partial f}{\partial R} + \frac{Z^*R}{1+Z^*G} \frac{\partial G}{\partial R}\right) \left(\frac{\Delta R}{R}\right) + \left(\frac{H}{1+f} \frac{\partial f}{\partial H} + \frac{Z^*H}{1+Z^*G} \frac{\partial G}{\partial H}\right) \left(\frac{\Delta H}{H}\right) \\ & + \left(1 + \frac{h}{1+f} \frac{\partial f}{\partial h} + \frac{Z^*h}{1+Z^*G} \frac{\partial G}{\partial h}\right) \left(\frac{\Delta h}{h}\right) + \left(1 + \frac{N}{1+f} \frac{\partial f}{\partial N} + \frac{Z^*N}{1+Z^*G} \frac{\partial G}{\partial N}\right) \left(\frac{\Delta N}{N}\right) \\ & + \left(\frac{T_K}{1+f} \frac{\partial f}{\partial T_K} + \frac{Z^*T_K}{1+Z^*G} \frac{\partial G}{\partial T_K}\right) \left(\frac{\Delta T}{T_K}\right) + \left(\frac{C}{1+f} \frac{\partial f}{\partial C} + \frac{Z^*C}{1+Z^*G} \frac{\partial G}{\partial C}\right) \left(\frac{\Delta C}{C}\right) \\ & + \left(1 + \frac{b}{1+f} \frac{\partial f}{\partial b} + \frac{Z^*b}{1+Z^*G} \frac{\partial G}{\partial b}\right) \left(\frac{\Delta b}{b}\right) = \left(\frac{\Delta U}{U}\right) \quad \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

電動機の動力 E とトルク G 、ロール回転数 N との間には次の関係が成立する。

$$E = \zeta G \cdot N \quad \dots\dots\dots(16)$$

ただし、 ζ は定数である。したがって、式(13)、(16)より次の変動式を導くことができる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta E}{E}\right) &= \frac{1}{G} \left\{ \frac{\partial G}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial G}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial G}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial G}{\partial T_K} \Delta T + \frac{\partial G}{\partial C} \Delta C + \frac{\partial G}{\partial N} \Delta N \right. \\ & \left. + \frac{\partial G}{\partial b} \Delta b \right\} + \frac{\Delta N}{N} \quad \dots\dots\dots(17) \end{aligned}$$

以上、式(9)、(10)、(17)の3式は各スタンドについて成立するから、次の3n個の連立一次方程式が導かれる。

$$\begin{aligned}
 & (1 + \sigma_{Ri}) \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_i + \frac{\sigma_{Hi}}{H_i} \Delta H_i + \frac{1 + \sigma_{hi}}{h_i} \Delta h_i + (1 + \sigma_{Ni}) \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_i + \sigma_{Ti} \left(\frac{\Delta T}{T_K} \right)_i \\
 & + \sigma_{Ci} \left(\frac{\Delta C}{C} \right) + (1 + \sigma_{bi}) \left(\frac{\Delta b}{b} \right)_i - \left(\frac{\Delta U}{U} \right) = 0 \\
 & \nu_{Ri} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_i + \frac{\nu_{Hi}}{H_i} \Delta H_i + \frac{\nu_{hi}}{h_i} \Delta h_i + \nu_{Ni} \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_i + \nu_{Ti} \left(\frac{\Delta T}{T_K} \right)_i + \nu_{Ci} \left(\frac{\Delta C}{C} \right) \\
 & + \nu_{bi} \left(\frac{\Delta b}{b} \right)_i + \frac{\nu_{si}}{h_i} \Delta S_i = 0 \\
 & \eta_{Ri} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_i + \frac{\eta_{Hi}}{H_i} \Delta H_i + \frac{\eta_{bi}}{h_i} \Delta h_i + (1 + \eta_{Ni}) \left(\frac{\Delta N}{N} \right)_i + \eta_{Ti} \left(\frac{\Delta T}{T_K} \right)_i \\
 & + \eta_{Ci} \left(\frac{\Delta C}{C} \right) + \eta_{bi} \left(\frac{\Delta b}{b} \right)_i - \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_i = 0 \\
 & \hspace{15em} (i = 1 \sim n) \hspace{10em} \dots\dots\dots(18)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xi} &= \frac{x_i}{1 + f_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_i + \frac{Z_i^* x_i}{1 + Z_i^* G_i} \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)_i \quad (x = R, H, h, N, T_K, C, b) \\
 \nu_{yi} &= \frac{y_i}{h_i} \frac{(\partial P / \partial y)_i}{K_i - (\partial P / \partial h)_i} \quad (y = R, H, N, T_K, C, b) \\
 \nu_{hi} &= -1, \quad \nu_{si} = \frac{K_i}{K_i - (\partial P / \partial h)_i} \\
 \eta_{zi} &= \frac{z_i}{G_i} \left(\frac{\partial G}{\partial z} \right)_i \quad (z = R, H, h, N, T_K, C, b) \\
 & \hspace{15em} \dots\dots\dots(19)
 \end{aligned}$$