

ダンデム圧延作業の最適化について

Optimization for Tandem Rolling Process

阿 高 松 男*

Matsuo ATAKA

タンデム圧延作業の最適化を実現するために、作業条件・制御系の特性・機械的特性などの見地からそれら3因子の相互作用の影響を考慮してタンデム圧延現象を総合的に検討してゆく必要がある。したがってこの方面の研研の現状を紹介し、著者が機械的特性の見地から最適化の問題を研究している内容の一部について述べ、さらに計算機制御を導入して作業の最適化を実現するために解決してゆかなければならない問題点などをまとめてみた。

1. ま え が き

鉄鋼製品の量質両面の躍進はまことにめざましく、したがって量質両面からの圧延作業への要求は年ごとにきびしさを増している。これらの要求を満たすためには各種の対策がとられていて、その一つとして圧延作業の自動化が取り入れられた。とくにわが国においては生産量は世界に比較しうる国がない程急上昇を続けたので、最新鋭設備があいついで設置された。また、製品の多量の世界との競争に打ち勝つて輸出するためには品質の向上についてもきびしい要求が課せられた。

したがって、生産の中心をなすタンデムミルの作業に対する要求は世界の水準を越えてきびしいものがあり、最近における自動化とその基礎となるタンデム圧延作業の最適化に関する研究水準は世界でもっとも高いといっても過言ではない。

現在確立されている自動化の技術中の大きなものは2種類ある。その一つはフィードバック制御の形態であり、他の一つはプログラム制御の形態である。これらの自動設備は圧延設備全体のうちで、特定部分の自動運転にとどまっているが、圧延機のさらに高度の自動運転の目的で、制御計算機を直結して運転の指示を与える方法が最近現われている。これは上記のフィードバック制御とプログラム制御の両性能を兼ねそなえているばかりでなく、さらにこれらの両者では実現できなかった新しい機能をも発揮できる強力なものである。計算機制御の実施については、最近設置中のものも含めるとかなりの数の設備が報告されているが、これらの根本思想は人手による模範的な作業方式を、より正確に、より速く、代行させようとするものである。

しかし計算機による圧延機の制御はさらに一段高い要求にも応じうる性格のものである。タンデムミルの運転条件を支配する独立変数は非常に多く、理想的な作業は人手ではとうていその実現は望めないので、従来の人手

による運転では作業要求のパターンを非常に単純化して制御しているのが実情であるが、計算機を使用すれば現在行っていない複雑な作業も実施可能である。したがって人手による作業を復元するだけでなく、より高度の要求を盛り込んだ作業方式を新たに採用することも可能になるのである。この重要な特長が一般にはまだ十分認識されていないが、むしろこれこそ最も重視しなければならない。このように圧延作業の計算機制御は大きな成果の期待できるものであるが、それを採用するか否かに無関係に、いずれにしても、タンデム圧延作業の技術向上をはかり最適化の道を歩むためには、その総合特性の理論的把握が肝要であって、そのためにはタンデムミルの特性を全独立変数を含んだ一般式として数学的に、あるいは電気的手法によってシミュレートする研究が行なわれなければならない。したがって著者はタンデム圧延作業の最適化を目指して種々の角度から研究を進めているが^{1)~8)}、本報ではその研究内容の一部を紹介し、またその方面の研究の現状および最適化を実現するための問題点などをまとめてみた。

2. 最適化への歩み⁹⁾

前述したように圧延工程を支配する変数が多数あり、しかもそれらの変数が相互にきわめて複雑な関係で結ばれている上に、圧延作業内容を表わす精度の高い決定的なプロセス方程式がまだ明確にされていない領域が多く、しかも工程がきわめて高速度で行なわれるので、総合特性の把握は困難な課題である。また全圧延工程に対して一貫した計算機制御を行なうためには、計算機本体・各種の測定装置・自動運転装置などの設備投資額は高額に達する。したがって計算機制御の採用に先立って圧延現象および圧延機の詳細に分析し、正確に把握する必要がある。

圧延機をタンデムに並べて圧延する場合は、単スタンドの圧延機で圧延する場合とはその特性が異なる。たとえば、冷間タンデム圧延の場合には、各スタンド間に張

* 東京大学生産技術研究所 第2部

力が作用しているので、張力を介して上流側スタンドにおける変化の影響が下流側にまで及び、逆に下流側の変化の影響が上流側に現われるという非常に複雑な特性を示す。また、熱間タンデム圧延の場合には、圧延される材料の温度を介して上流側スタンドにおける圧延条件の影響（履歴現象として）が下流側スタンドに現われるが圧延中の真の材料温度の把握が非常に困難なため、熱間タンデム圧延の特性の把握は一層複雑である。しかも、加減速時のような過渡期にはタンデム圧延現象はさらに複雑になる。

タンデム圧延の総合特性の研究は、1955年 Hessenberg & Jenkins によって、圧下およびロール回転速度設定値の両者の変化が板厚と張力とにおよぼす影響を求める基本式が導入され、定性的検討が若干なされたのが始めてである。その後 Phillips および Ham によって定常圧延状態における総合特性の解析の基本的手法が考案され、その後主としてわが国における多数の研究者の研究により発展し、現在ではさらに加減速時・通板時の解析へと進みつつある。研究の内容もおおよそ次の5種類に類別される。

(1) パススケジュールの決定法に関する研究

この方面の研究は今井が動力曲線から熱間タンデム圧延のパススケジュールを決定する方法を発表して以来、鎌田・鈴木、H. Wenzel らが他の解法を提案している。

(2) 過渡特性の研究

この研究は定常圧延状態がなんらかの外乱によって平衡が破られ、次の定常状態に達するまでの過渡現象を扱っているもので、1957年に Phillips が遊尺板厚制御系に対するアナログ・シミュレーションを行なって以来、M. Alexander らは圧延用シミュレータを組み素材板厚のステップ状変化に対する応答現象の解析を行ない、鎌田らはこの解析にディジコンを導入した。

(3) Incremental method によって各種の変数の二定常状態間の影響係数の研究

この解析は定常状態から他の定常状態に移行する過渡現象は無視して、その二定常状態間における因子の変化量だけを問題にし、それらの相互作用の度合を調べるものである。この方面の研究は Ham らが全スタンドにおいて体積速度一定の条件を用いて、各因子の微小変動量の間に一次の関係式を導入し、各因子間の影響係数を求めたのに始まり、美坂によりさらに進められ、鎌田・鈴木によって幅方向の板厚分布をも考慮した方法として拡張された。しかも、現在タンデム圧延機には適応制御が導入されつつあるが、その根本はこの影響係数の概念が基礎となっている。

(4) 加減速・通板時の特性の研究

この研究は通板時・ズームング・コイルエンドの圧延時などにたびたび現られる加減速時（非常に大きな過

渡現象）の現象を扱うもので、才木がオフゲージの原因を考慮した漸次計算法を示して以来、著者を含め多くの研究者によってシミュレーションモデルが発表され加減速時の対策が検討されている。

(5) 実験的な研究

この方面の研究は現場の圧延機を用いて行なった実験的研究を主体としたもので、制御系（AGC系・ルーバASR系）の制御効果を検討したものが多く発表されている。また、熱間タンデム圧延の温度解析を行なった Sims らの報告や久能、P. Funke らの行なった冷間タンデム圧延の動作特性の実験的報告などがある。

以上の研究はタンデム圧延作業の最適化を目指して、作業条件・制御系の改善という見地から研究が行なわれているが、たとえば圧延機の剛性は長手方向の板厚分布および幅方向の板厚分布制御に大きな影響を与えるのでタンデム圧延作業の最適化を論ずる場合には剛性を含めた機械的特性を無視することはできない。また、図1に

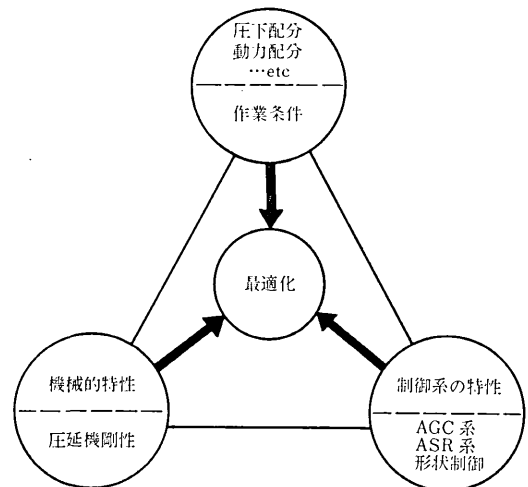


図1 最適化と周囲条件因子

示すごとく上記の3因子はそれぞれ相互に影響を及ぼし合うので、最適化を進める場合には3因子の影響を同時に考慮してゆく必要がある。著者はこれらの3つの見地から最適化の問題を研究しているが、本報では圧延機の機械的特性という立場から最適化の問題を論じてみる。

3. 圧延機の機械的特性から見た最適化への方法

いうまでもなく、圧延を行なう時には圧延材をはさんでいるロール間には非常に大きな力が作用するので、圧延機は弾性変形をする。したがって著者は圧延機の機械的特性として剛性をとりあげ、それが製品形状に影響する現象に着目して、その機構を解析的に示し、タンデム圧延機における好ましい剛性配分を提唱しようとするものである。しかし従来の圧延機の剛性の概念は長手方向の板厚分布に関するもので、幅方向の板厚分布に関して

Taylor 展開し、無次元化・線型化して得られる。圧延条件と製品形状との関係に及ぼす圧延機剛性の影響をみるために、独立変数として圧延条件を示すものを選び、従属変数として圧延結果を示すものを選んで、各変数の組み合わせを表1のようにした。

(3) 問題の設定と解析方針

一般にタンデム圧延機では各スタンドの構造寸法は等しく、したがって、圧延機剛性は等しく設計されているが、著者は任意の1スタンドの剛性を一定の割合で増減したタンデム圧延機を設定し、このような圧延機で定常

な圧延が行なわれている時なんらかの原因で圧延作業因子中のあるものに微小変動が生じて他の定常状態に移行した場合、2定常状態間の各因子の相互作用の割合(影響係数)が圧延機の剛性によってどのような影響を受けるかを求める。理解を容易にするために数値例で傾向を示す方針を採り、圧下率の比較的小さいパススケジュール(A)と圧下率の大きいパススケジュール(B)との2種類の代表例を基準パススケジュール(各スタンドの剛性が等しい)として選ぶ。この二つのパススケジュールを基準として剛性を変えて計算するのであるが、本解析に

おいて計算したケースを表2に示す。ただし、ここで言う剛性は前述の長手方向の板厚分布に関係ある縦方向の剛性とロールの曲げ変形および扁平変形に関係する横方向の剛性との両者を意味し、上記両剛性は同比率で変化するものとして解析した。

(4) 計算結果と考察

基準パススケジュール(A)および(B)の両者とも計算結果は同じ傾向を示したので、本報ではパススケジュール(A)を基準パススケジュールとして選んだ結果だけを示す。ただし、製品形状とは仕上板の長手方向の板厚分布と幅方向の板厚分布との両者を意味している。前者は最終スタンドの出側平均板厚を無次元化した $(\Delta h/h)_n$ の形で表わし、後者は最終スタンドの出側板の中央部と端部との肉厚変動率の差を $(\Delta SF)_n = (\Delta h_c/h_c)_n - (\Delta h_e/h_e)_n$ と定義して表わした。このような表現を探れば、 $(\Delta SF)_n > 0$ の場合には仕上板が中伸び、 $(\Delta SF)_n < 0$ の場合には緑伸びとなることを意味する。

図3は任意のスタンドのロール間隙を単位量変化した場合の仕上板厚の変動を示す影響係数 $(\Delta h/h)_s / (\Delta S_r)_i$ が圧延機の剛性によりどのように変化するかを示したものである。たとえば、○の記号(曲線①)は1号スタンドの圧下が仕上板厚に及ぼす効果が圧延機剛性の増減によって受ける影響を示す。すなわち、ある圧延状態から1号スタンドの圧下を変えて次の定常状態へ移行させた場合、1号スタンドの圧下量と仕上板厚の変化量との関係を示すものがこの影響係数であって、その絶対値が大きい程効果が大きいことを示す。したがって1号スタンドの剛性を大きくすると1号スタンドの圧下が仕上板厚に与える効果を増大するようになる。次に2号・3号・4号・5号スタンドの剛性を順々に変えた場合、剛性の変化量と影響係数との関係を示す

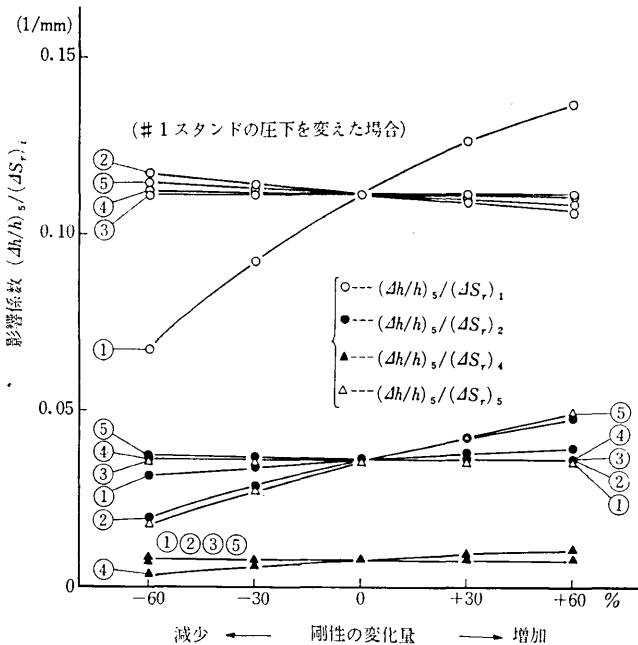


図3 ロール設定間隙と仕上板厚の関係に及ぼす圧延機剛性の影響

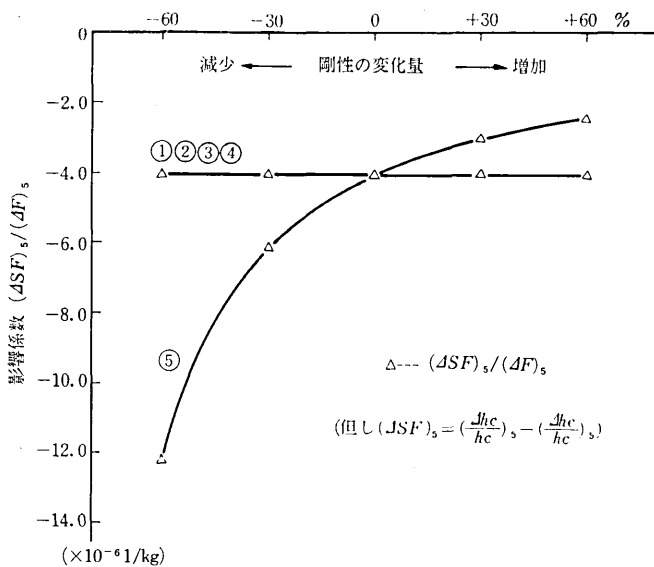


図4 Shape Control Force と仕上板の形状の関係に及ぼす圧延機剛性の影響

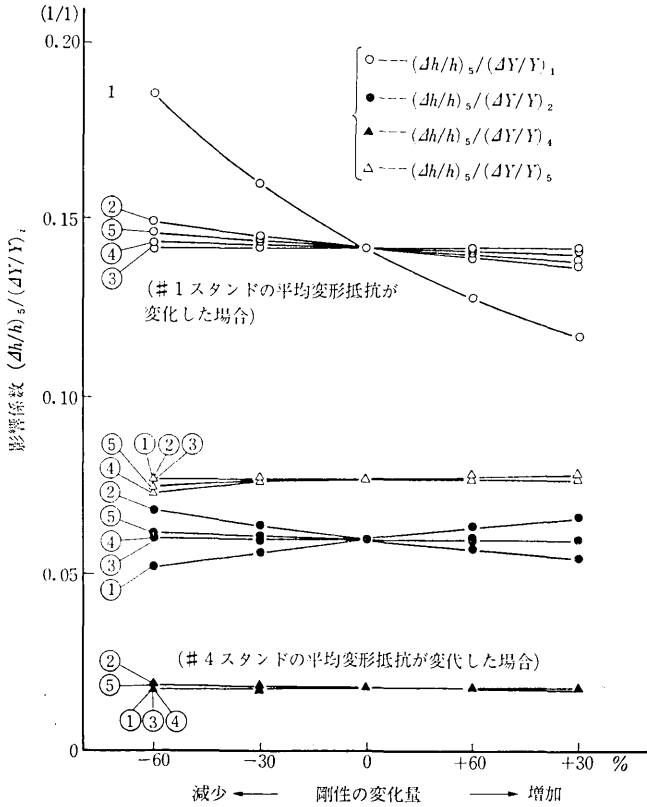


図5 平均変形抵抗と仕上板厚との関係に及ぼす圧延機剛性の影響 (○内の数字は剛性変えたスタンドを示す)

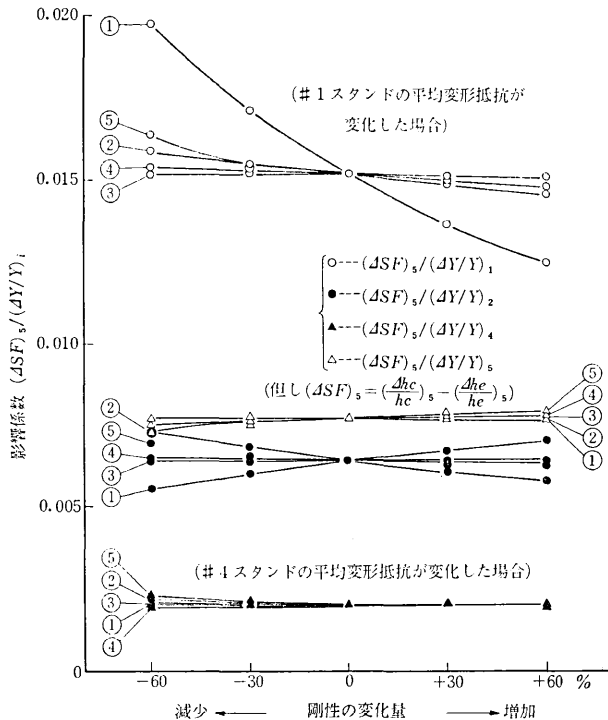


図6 平均変形抵抗と仕上板の形状との関係に及ぼす圧延機剛性の影響 (○内の数字は剛性を変えたスタンドを示す)

ものが②・③・④・⑤の曲線である。3号スタンドの圧下が仕上板厚に与える効果は非常に小さいのでグラフには省略してある。図より、1号スタンドの圧下を変化して板厚制御する場合には1号スタンドの剛性を大きくすると有利である。

図4は5号スタンドの形状制御力が仕上板の形状変化に及ぼす効果を示す。他のスタンドの形状制御力の効果はこれに比して微小なので省略した。図より、5号スタンドの剛性を小さくすると、5号スタンドの形状制御力の効果は増すが、その他のスタンドの剛性を変えてもその影響は現われない。しかし5号スタンドの形状制御力の効果は、5号スタンドの縦剛性のみを小さくした場合よりも横剛性のみを小さくした場合のほうが顕著に現われる傾向があることに注意する必要がある。

図5・図6は平均変形抵抗の変化が仕上板厚および仕上板の形状に及ぼす影響を示す。両図より、平均変形抵抗の変化が仕上板厚および形状に与える悪影響は1号スタンドが最も大きい、1号スタンドの剛性を増すとこの悪影響を緩和することができる。

図7は粗板厚の変化が仕上板厚および仕上板の形状に及ぼす影響を示す。図から明らかのように、1号スタンドの剛性を増すと、粗板厚の変動が仕上板厚および形状に及ぼす悪影響を削減でき、剛性を小さくすると粗板厚の悪影響を助長することになる。5号スタンドの剛性を変えても同じような傾向が現われるが、その影響の程度は小さい。

また、4~5号スタンド間張力で製品の形状・寸法の微調整を行なうことが多いので、各スタンドの圧下量およびロール速度が4~5号スタンド間張力の変化に及ぼす影響係数についても論ずる必要がある。

図8はロール間隙の変化が4~5号スタンド間張力に及ぼす影響を示す。ロール間隙の変化が4~5号スタンド間張力に及ぼす悪影響は、5号スタンドの圧下を変えた場合が最も大きく、次に1号・4号・2号・3号スタンドの順に小さくなってゆく。5号スタンドの圧下が4~5号スタンド間張力に与える影響は、5号スタンドの剛性を小さくすると緩和でき、剛性を増すと悪影響も増大する。

図9はロール速度の変化が4~5号スタンド間張力に及ぼす影響を示す。ロール速度の変動が4~5号スタンド間張力に及ぼす影響は5号ス

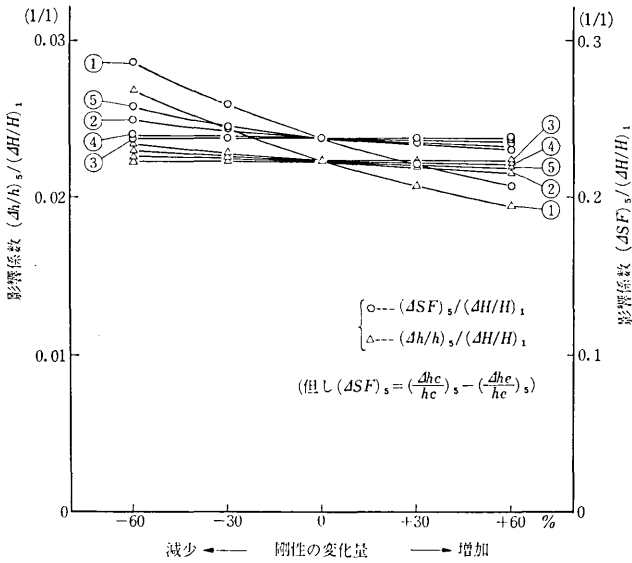


図7 粗板厚と仕上げ板厚及び仕上げ板の形状との関係に及ぼす圧延機剛性の影響 (○内の数字は剛性を変えたスタンドを示す)

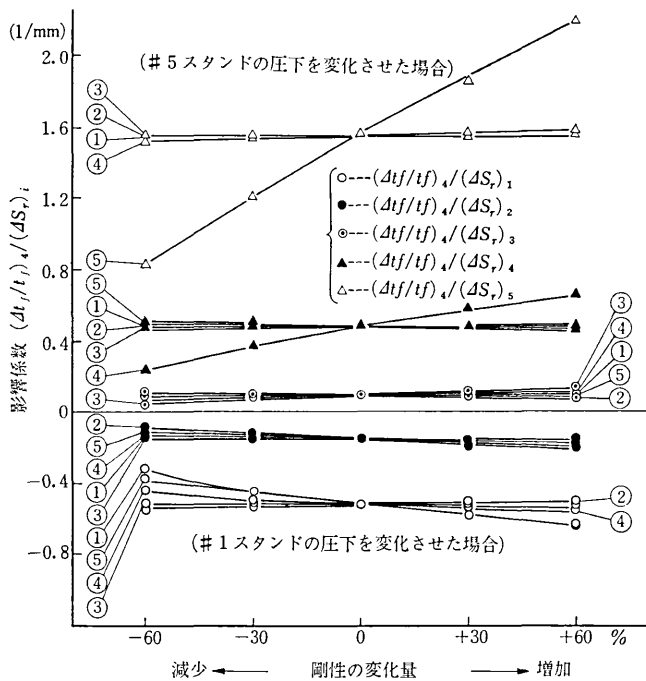


図8 ロール設定間張力との関係に及ぼす圧延機剛性の影響 (○内の数字は剛性を変えたスタンドを示す)

ンドが最も大きく、次に4号・1号・2号・3号スタンドの順に小さくなってゆく。しかも5号スタンドのロール速度の変動が4~5号スタンド間張力に及ぼす影響に剛性の効果をはっきり現われているのは、5号スタンドの剛性を変えた時である。すなわち、5号スタンドの剛性を小さくするとその影響は減少し、剛性を増すと影響は増大する。

以上より、冷間タンデム圧延機の剛性配分は1号スタ

ンドの剛性を大きくして、最終スタンドでは縦剛性を小さくし横剛性を大きくすると制御性が改良され、実際作業の改善が容易である。このように冷間タンデム圧延機の剛性配分を変えて、剛性配分がタンデム圧延現象に与える影響を検討した結果、タンデム圧延機の剛性を一様に増大させることに専念してきた従来の考え方とは全く違った新たな概念が得られた。

圧延機の剛性が任意に変えられることを前提として(油圧圧下圧延機は剛性可変である)、圧延機の機械的特性の見地から最適化の問題を定性的に述べてみた。現在、著者は前記の両剛性の問題をさらに深く研究を進めているが、紙面の都合で後者については別の機会に紹介する。

4. 最適化への将来性について

今まで計算機制御を導入してタンデム圧延作業の最適化を実現するために、種々の見地から行なわれてきた研究の概要を述べ、さらにその具体例を紹介してきたが、ここで計算機制御の目的、計算機の機能、さらに計算機制御の効果や問題について簡単に述べる。

計算機制御の目的は、直接的には(1)単位時間当たりの生産量の向上、(2)品質、(3)歩留りの向上、また間接的ではあるが、(4)圧延技術を経験と勘とから解放して数学的な技術の下におき、(5)作業の再現性の確保を得ることであって、要約すれば合理化された圧延設備を最高の効率で活用することである。また、圧延工程に計算機制御を導入した場合次のような効果が考えられるので、大規模な計算機制御を導入しても十分利益があげられる。

- 1) 製品仕様の変更のたびに行なわれる圧延条件の設定に要する時間が短縮される。最近ミルのセットアップに計算機制御が導入され、その効果を発揮しつつある。
 - 2) パススケジュールの適正化により単位時間当たりの生産性が増す。
 - 3) 各圧延機の負荷分担の適正化を詳しく検討し実現できるから、圧延機の不合理的な過負荷を防止するため、設備の損傷による停止時間の減少が期待される。
 - 4) オフゲージ量が少なくなり歩留りが向上する。
- しかし計算機制御について問題点がすべて解決されたわ

