

特別講演

UDC 621.771.01 : 669.15-194

日本の鉄鋼業への圧延理論の貢献*

鈴木 弘**

Theoretical Studies of Rolling Made Great Contribution
to Rapid Progress of Iron and Steel Industry in Japan

Hiromu SUZUKI

1. ま え が き

日本の鉄鋼業が戦後大躍進を果して、今や生産量においては長く世界に君臨したアメリカに迫り、しかもなおも急増加の勢を示している。しかも、すぐれているのは量ばかりではなく、製品と技術の質においてもきわめて高いものがあり、量においてはアメリカにトップの座を許しているが技術の質においてはアメリカを抜いて世界の王座を占めているものが少なくない。

圧延の諸技術もまた、日本がその高いレベルを誇り得るものの一つであつて、世界をリードしていて、新しい構想により計画され、世界に類を見ない高性能の圧延機が種々あるばかりでなく、圧延の技術にも世界のレベルを抜く高くまた斬新なものがある。特に、わが国における圧延技術の急速度の進歩は、最近 15 年間位の間に達成されたので、鉄鋼業界の関係者中でも、高い年令層の人達には、圧延技術の最近の進歩の実状がかならずしも十分には伝わっていないかも知れない。

特に、圧延に関する基礎的な研究が、実際の圧延機の構造・性能や圧延作業にどのような影響をあたえたか、またそれとは逆に、現実の圧延機の構造・性能や圧延作業から、どのような問題が注目されて研究対象となつているかなどの問題や、また数多く発表されている研究成果の正しい評価などに至つては、鉄鋼業界の指導層の人々の中でも、これを正しく理解するための情報の入手ができなくて困惑しておられる向きが多いのではないかとと思われる。

製鉄・製鋼については、長期間にわたる技術の発達史の歴史と、その裏づけとなつた基礎研究との関係、さらにまた現在到達している技術の水準と、今後の技術上の要請までも、鉄鋼業界の指導層に広く理解されている。

圧延技術が熟練工の手の中から離れて、近代的な科学技術の領域に入つたのが比較的最近であつた、という条

件はあるにしても、今や、製鉄所において、製鉄・製鋼とならんで基幹工程であり、同時に基幹技術でなければならぬ圧延への理解が、製鉄や製鋼と比較してはなはだしく不十分なままにとどまつていては、鉄鋼工業の正しい進歩のために大きな問題であるので、現状は早急に是正されねばならない。

今回筆者が、“タンデム圧延の研究開発と圧延技術の近代化推進”とに貢献したとして、鉄鋼協会から浅田賞を戴いて、特別講演の機会を与えられたので、この機会に圧延理論と日本の鉄鋼工業と題して、上記の“圧延の基礎的研究と鉄鋼工業における実際の圧延技術との関係”について述べる。

2. 圧延技術を構成する要素

圧延技術を構成している要素を分析すると、表 1 に示すように 4 分野に分類できる。この中で、学問的な研究の歴史も古く、鉄鋼協会の会員にとりなじみの深いのは第 1 分野特に 1, 2 の材質的な研究であろう。圧延に関して、金属工学の研究者の関心は従来主として圧延による材料の性質の変化に寄せられた。

圧延による結晶構造の微細化と方向性の発生とによつて、材料の広い意味での物理的性質が変化する。この性質の変化を、目的に応じて機械的な性質の変化として受取る場合もあれば、電気的な性質の変化に着目する場合もあるが、それらと圧延作業条件との関係をとらえる研究が、過去において多く行なわれている。もちろん、材料の組成がそれ以上に物理的性質に大きい影響を及ぼすので、新材質の研究と組合わせて行なわれることはいうまでもない。電気鉄板の圧延などはこの種の研究の好例であろう。

古くから圧延に関連して行なわれた金属工学的な研究は、すべて圧延後の材料の性質を主対象として行なわれたのが一貫した特徴であつて、(表 1・1) にあげたように、圧延作業をおもな対象として、そのために材料の性

* 昭和 49 年 11 月本会講演大会における浅田賞受賞記念特別講演

** 昭和 49 年 12 月 12 日受付 (Received Dec. 12, 1974)

*** 東京大学生産技術研究所 工博 (Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, 22-1, 7chome Roppongi, Minatoku, Tokyo 106)

表 1 圧延技術を構成する要素

第 1 分野：圧延材料の金属工学的問題

- 1.1 圧延作業のために必要な基礎的情報
材料の 変形抵抗・変形能（加工限界）・加工 温度域
- 1.2 圧延製品の品質・特性に関して
圧延条件と結晶構造及び方向性との関係
圧延条件と機械的性質との関係
圧延条件と物理的性質との関係

第 2 分野：圧延機の機械工学的問題

- 2.1 ロールの強度に関連して
弾性歪・疲労・耐摩耗性・熱応力
 - 2.2 ロールの圧下方式
多段ロール方式・油圧圧下方式
 - 2.3 圧延機軸受の特性（大荷重軸受）
油膜軸受・コロ軸受・特殊材料軸受
 - 2.4 自動制御
ロール間隙・スタンド間張力・ロール速度
 - 2.5 タンデムミルの総合特性の解析
 - 2.6 圧延機の計算機制御の数式モデルの探求
- 第 3 分野：圧延による変形の塑性力学的問題
- 3.1 圧延中の材料内部の応力と歪との分布の解析
 - 3.2 圧延荷重及び圧延トルクの理論式探求
 - 3.3 圧延作業に関係ある諸因子間の数値的關係を明らかにする

第 4 分野：圧延作業に伴う技術的諸問題

- A 特定の専門分野の問題
 - A.1 ロールと材料間の潤滑・摩擦・摩耗
 - A.2 圧延材料に関する諸計測
材料温度・肉厚・幅・材料速度・張力・形状など
 - A.3 材料の冷却・スケールの除去方法
- B 2 以上の専門知識の総合問題
 - B.1 圧延板材の形状制御
 - B.2 圧延材料の表面状況制御
 - B.3 圧延作業の生産性の向上

質を明らかにする種類の研究が行なわれるようになったのは 1950 年頃から以降のことである。

第 2 の技術分野は圧延機の機械工学であつて、端的に言えば圧延機の設計製作の基礎となる工学が中心となつている分野である。近代的な圧延機は一般に機械といわれるものの中で最も巨大なものであるばかりでなく、高速・高精度で、しかも巨大な力を受けるものであつて、機械の設計の見地からはきわめて興味深い対象である。

設計の際の機械部品の強度検討についても、応力が均一に分布していることを条件とする初歩的な材料力学ではなく、応力の不均一分布を考慮に入れた高度の解析を行なわねばならない問題を数多く含んでいる。また、圧延機の軸受は機械の軸受としてはもつとも高度の技術を結集したものである。さらにまた圧延機を制御工学の対象として見れば、複雑であつて独立変数の数も他に例を

見ないほど多く、被制御システムとしての特性は最近の 10 年間にようやく明らかにされた有様である。

要するに、圧延機を機械工学的な見地から技術の対象としてとらえても、非常に高度の機械であるが、工作機械——材料を切削する工作機械——に比較して、機械工学の対象とされるのが甚しく遅れたのは不思議な現象といわねばならない。その理由は明確には指摘しにくい。が、工作機械は機械技術者により使用され、したがってまた大学においても機械工学科の教育課程に入れられているが、圧延機は従来長期間にわたつて金属技術者により使用され、大学においても金属加工として金属工学科の教育課程に入れられていた時期が長かつたことと無縁ではないと考えられる。

第 3 の技術分野、すなわちロール間間にかみ込まれた材料が塑性変形する際の、応力と歪の分布を解析し、圧延の条件に応じて、その応力と歪との分布がどのように変化するかを求める分野が、圧延の力学的特性の基礎をなすものである。従来から“圧延理論”と呼ばれて来たのは、この分野を中心とする理論体系であるが、これについてはやや詳しく述べるのが本稿の主眼であるので、次節で詳説する。

第 4 の技術分野は、圧延には重要な課題でありながら、第 1～3 のように明確な学問的分野が確立されていなかったものや、あるいは非常に複雑な総合技術であるために、学問的な取扱いが困難な問題などが取り残されている、いわば、技術的課題の集合である。学問的な取扱いが困難な性質の問題であるために、実測値と経験との積上げにより、実生産上当面する各種の問題を解決する努力を続けてきた分野であるが、最近になつて、この中から学問的な解決に近づき、第 1～3 の分野の学問体系の中に組込まれるものや、あるいはそれ以外のたとえば摩擦・潤滑などの学問体系の有力なひとこまを形成するものなども出て来る機運にある。

この分野は、圧延工学の興味ある課題の今後の可能性を蔵した鉱脈であると同時に、この分野での研究の成果により圧延技術の進歩がもたらされる可能性もまた大きい。

3. 圧延技術における圧延理論の役割

3.1 圧延理論の第 1 段階：圧延による材料の変形の塑性力学的研究

材料力学の学問的対象は、1910 年以前は弾性変形に限定されていたが、その後塑性学の学問分野が開拓されて、塑性変形をも対象として応力と歪との分布を解析できるようになった。この手法を導入して、圧延によりロール間隙内で生じる塑性変形時の応力と歪との分布が、はじめて求められたのは 1926～7 年の頃であつた。

塑性変形中の応力と歪との解析に際しては、3 次元の歪の場合は数学的解析は不可能に近いほど複雑になるの

ミルセッティング 圧延動力曲線法

1. 実績を直接資料とするので成功の保証あり。
2. 圧延動力曲線を求めた際の圧延条件と異なる圧延条件にはそのまま適用不可能。

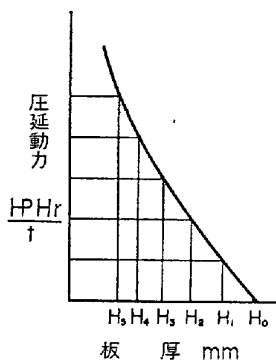


図4 圧延動力曲線

度・圧延温度その他の作業条件の個々の値には一切目をつぶつて、熱間圧延か冷間圧延かに大分けて、総合値である圧延動力のみに着目して、しかも実測値を集めて作ったカーブであるから、材料の変形抵抗や摩擦係数の値はあらかじめわかっているなくても、条件としては材質と圧延前後の板の厚さだけが与えられれば、圧延動力が求まる。したがって、圧延速度を決めれば圧延トルクが求まり、次にロールと材料との接触弧上の圧延荷重の合力の作用点を仮定すれば、圧延荷重も求めることが可能である。

この方法がアメリカにおける圧延機設計と圧延作業選定のための技術として長く用いられ、また戦前から戦後にかけて、日本へも圧延機や圧延技術とともに輸入されて圧延技術の基幹の知識の一部となつてきた。

圧延荷重は図3に示すように、ロール径や材料に作用する張力の影響を受ける。またほぼ変形抵抗に比例するので、材料の温度の影響を受ける。したがって、圧延動力曲線を求めた際の圧延作業と、次にこの曲線の値を適用しようとする圧延作業とで材料温度やロール径・張力などの条件が相違している場合には、圧延動力の予測値に誤差を生じることは避けられない。

このような欠点を持つにもかかわらず、アメリカ技術を中心としてその影響下にあつた諸国で、現在に至るまで長く使用されてきたのは、実際の生産現場で行なわれている圧延については、作業条件には大差はなく、また新しい圧延機が設計製作される場合にも、圧延機の構造寸法などが急激に変化することはまれであつて、漸進的に改造進歩してきたので、過去のものの実績によつてもその判断に大きな誤りがなかつたからであろう。

3.3 材料の変形抵抗の実測

前記のように圧延動力曲線により実際上の要求はほぼ満し得たとしても、理論的構成には目をつぶつて、圧延動力のみに着目する方法では、理論的取扱いによる新技術への発展を期待し得ないことはいふまでもない。また実際上の要求を解決する場合にも、圧延条件や圧延機の構造と寸法などが大幅に変化する際には、過去の実績そのままでは新しい条件下の圧延荷重や圧延トルクの予測

に不安が伴うことは否定できない。

したがって当然の帰結として変形抵抗の測定が課題となる。この測定が年代的に遅れたのは、その測定が面倒なためである。すなわち変形抵抗は材料の加工履歴・歪速度・温度の3者の関数であるが、歪速度を一定に維持しながら変形を進行させる実験はかなり高度の技術を要するものであるばかりでなく、1材料ごとにこの3種のパラメータを広範囲に変化させて多くの実験を繰返さねばならない。しかも実際に圧延すべき材料の種類はおびただしい数にのぼるので、実用上の要求を満たそうとすれば、非常に時間と努力とを注入する必要がある。

この地味で努力を要する研究に取り組んだのは、イギリスと日本の研究者とであつた。BISRAの研究者は圧縮実験により炭素鋼についてその変形抵抗を求め、その値を入れた圧延荷重を数値計算し、圧延荷重を求めるための線図を作製している。

日本においては、池島・井上・豊島・鈴木・橋爪らが、それぞれ独自の装置を駆使して実験を行ない、普通鋼から特殊鋼までの広範囲の多種類の材料について豊富な測定値を得た。(図5に鈴木・橋爪測定の1例を示す。)日本においては、圧延動力曲線によらないで、圧延荷重式から“圧延理論”の手法で圧延荷重を求める場合が多いのは、これらの変形抵抗に関するデータが豊富に揃っていることが一因であろう。なおその後も、美坂・志田らの測定により補足され、圧延されるケースの多い材料については、変形抵抗を材料成分の分析結果を反映した数式で表現して、計算機制御に使いやすい形で整理されている。

日本においては1955～60年頃に変形抵抗の実測値の整備が進行したので、圧延荷重と圧延トルクとを理論的に求める考え方が、日本の学界・業会を通じての基本的な線となつたが、他方アメリカをはじめとする西欧諸国では、従来通り圧延動力曲線法が基本となり圧延技術が構成されて来たことに変わりはなかつた。圧延動力曲線法は過去の技術の忠実な再現には確実な威力を発揮し得るものであり、変形抵抗による理論方式は、将来の新しい技術を開発する際の寄りどころとなる。それぞれこのような長所を持つ。

その後1962年頃からタンデムミルの計算機制御が採用されるようになって、現在まで進歩が続いているが、アメリカと日本との圧延技術の上記の体質の相違が、計算機制御の成果に大きな差を生み、日本の方が圧倒的に進歩する結果につながるのである。

4. 圧延機の機械工学の進歩

鉄鋼生産量は銅合金・アルミ合金の生産量に較べてはるかに多いので、鉄鋼生産量の伸びとそれに伴う生産単位の増大とに伴つて、圧延機の大さ・圧延速度・圧延精度などが発展・向上を続けて来た。また、圧延機の構

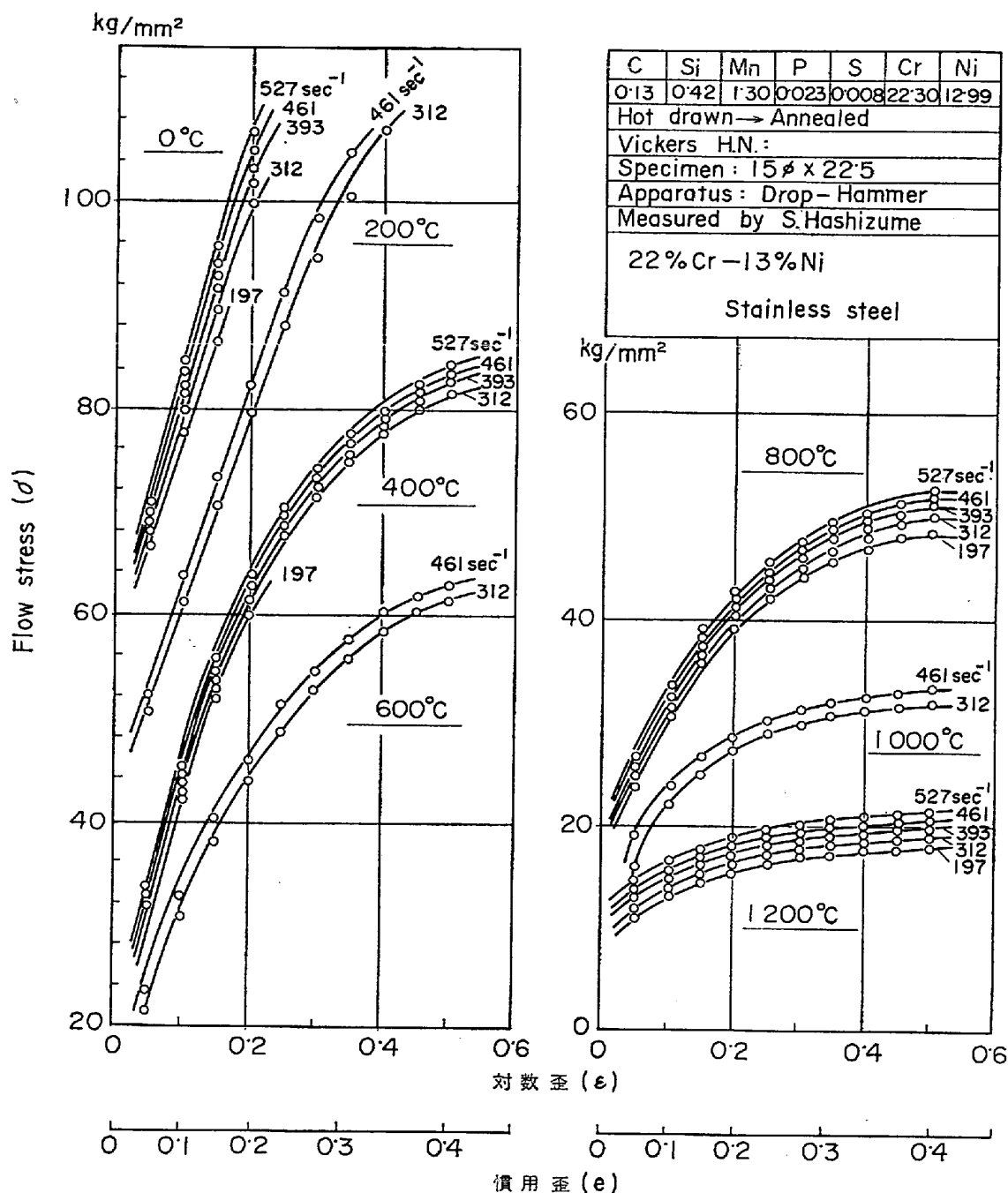


図5 変形抵抗の測定例 (鈴木研究室)

造・自動制御・計測・材料のハンドリングなどの付帯的な諸設備も進歩の一途をたどってきている。

しかし、圧延機及び付帯設備の進歩を概観するのが本稿の目的ではなく、圧延機と圧延理論とのかかわり合いを述べるのが主眼であるので、最近における圧延機の進歩の中で、圧延理論に密接な関係のある顕著な例を拾いあげて述べる。

圧延理論と呼ばれる分野の研究が体系化しはじめたのが、1930年少し前であるから、それ以後の圧延機的设计に圧延理論の考え方が常に反映していたことはいうま

でもないが、常識的なつながりではなく理論的なつながりで、しかもきわめて直接的な形で結びついている例は比較的最近のものに多い。生産単位が大きくなり、高度の性能の圧延機の採用が経済的に可能となったことと、計算機制御の導入により高度の理論的要求でも実現し得るようになったこと、この両理由により、圧延理論に直接的に基礎を置いた設計方針が導入される結果が招来されたのであろう。

4.1 圧延機の剛性

圧延中は圧延機のロールには巨大な圧延反力が加わる

ので、ロール・圧下スクリー・ハウジングなどはすべて弾性歪を起して、ロールの間隙は無荷重のときよりも広がる。大形圧延機ではこの弾性的な広がりが数 mm に達する場合さえある。荷重 P t が加わったときにロール間隙が ΔS mm 広がるとすれば、 $K=P/\Delta S$ で定義される量を圧延機の剛性といい、その圧延機の剛さを表わす量となる。

1950 年頃にスキンパスミルとして、剛性のきわめて小さい油圧圧下式の圧延機がイギリスで製作され、原板の形状をそこなわないでスキンパス圧延ができる長所を認められて、圧延機の剛性の役割が認識されるまでは、圧延機の設計に際しても、また圧延作業に際しても圧延機剛性はなるべく強くするという方針以外には特に注目されてはいなかった。

その後 1960 年頃に筆者が圧延機剛性の最適化の理論を発表して以後は、圧延機剛性の役割が強く認識されるに至った。

圧延素材条件・圧延作業条件・ロールの寸法精度などが、圧延後の板厚の変動に及ぼす影響をすべて理論式中に導入して置いて、圧延板厚の変動が最小になる剛性値の最適値を求める理論が、圧延機剛性最適化の理論であり、この手法を圧延機の設計に導入することにより超高精度の圧延が可能となった。

4.2 タンデムミルの剛性配分

従来はタンデムミルの 4~7 スタンドの各圧延機はすべて同一構造・同一寸法に設計された。しかし、前記の圧延機剛性最適化の理論を適用すれば、上流側スタンドの剛性は強く下流側スタンドの剛性は弱く設計することが、製品の肉厚の不均一を改善することにつながる。

このことは、10 数年前から筆者が指摘して、実用機への採用を勧奨して来たが、次に述べる剛性可変ミルの出現により、数年前からは機械設計的には採用が容易となり、また後述するタンデムミルの総合特性の解析の研究が進んだので、その効果を数値的に予測することも可能となった。この結果、最近国内においてこの理論にもとづき剛性値の傾斜配分を採用した実用機が設計・製作されたものが 3 例あり、好結果をおさめていることは後に具体的に述べる。

4.3 剛性可変の油圧圧下圧延機

従来の圧延機はすべてモータ駆動のねじ圧下方式であった。圧延機の制御特性を高める目的から圧下速度を高速にする工夫が長年にわたり行なわれ、ねじの構造とその駆動方式とに改良が重ねられたが、その延長線上にあつてはるかに圧下速度の高速なのが油圧圧下方式である。したがって、その意味では油圧圧下方式も単なる構造設計上の改良であり、特に圧延理論との関係を取上げるには値しない。

しかし前述のタンデムミルの剛性配分の理論を実現する手段として、剛性可変の方式が併せて採用されたところ

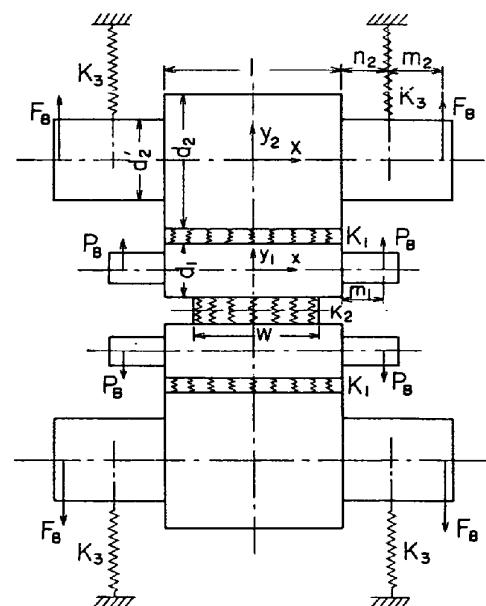
ろに圧延理論との結びつきが生じた。油圧圧下方式の剛性可変圧延機は、圧延中のロールの間隙を適当な方法で検出して、それを予め定められた値に一致させるよう油圧圧下装置を制御するものであつて、見掛け上の剛性値を指定値に一致させるような機能の自動制御装置付油圧圧下圧延機である。

通常のタンデム圧延機では、圧延機剛性は 400~600 t/mm 程度であるが、この方式によればゼロから無限大の間の任意の値を選択し得るので、前述の通りタンデムミルの上流は高く下流は低い値に剛性値を選ぶことが可能である。これは、圧延理論と圧延機設計技術との交流により大きな進歩のもたらされた好例である。

4.4 ロールの曲げによる形状制御

厚さが 0.5 mm 以下位のいわゆる薄板の広幅材を完全に平坦な形に圧延するのは容易ではない。縁波や中央部のふくらみを生じがちである。これは、圧延による長さの伸びが幅の方向に分布を持ち、長い部分が波になるものであるが、伸率に 10^{-4} のケタの微細な差があれば生じるので、圧延中での修正には困難が多いが、現在での圧延技術上の重要な課題であり、研究も活発に行なわれている。圧延中にこれを修正する最有力の手段として採用されているのが、ワークロールあるいはバックアップロールに曲げモーメントを加えてロールを曲げる方法である。

圧延荷重により、バックアップロール・ワークロールの両者ともに曲げ撓みを生じることはいうまでもない。そのために板幅の中央部の肉厚が厚くなるのを防ぐ目的で、ロールを樽形に、いわゆるメカニカルクラウンを付



K_1 : バックアップロールとワークロールの接触弾性歪のパネ常数

K_2 : ワークロールと材料との接触歪のパネ常数

K_3 : 軸受支持部の弾性歪のパネ常数

図 6 バネモデル

けることは周知であるが、これとは別に、バックアップロールとワークロールとの接触部及びワークロールと圧延材料との接触部で、ロールの弾性歪——いわゆる偏平歪——が生じる。したがって、これらの部分は力学的にはバネを介して接触したと同様の機能を持っているので、ワークロールに曲げモーメントを加えると、力学的な平衡条件が変化して、圧延材の肉厚の幅方向の分布が変わる。

これがロールの曲げによる形状制御の原理であるが、図6に示すいわゆる“バネモデル”の力学的考察により形状制御の機構は明瞭に説明できるばかりでなく、肉厚の修正量についてもかなり高い近似値を推測できる。したがって、“バネモデル”を基礎として形状制御の基礎技術は組立てられたが、材料に加わる張力の幅方向分布が存在する場合などのような、他の分布要素の加わった場合については、肉厚の修正機構を量的に説明することは単純なバネモデルの理論では不可能であつて、研究は現在進行中である。

4.5 タンデムミルの総合特性

熱間タンデムストリップミルの仕上圧延機では4〜7スタンド、冷間タンデムストリップ圧延機では、4〜6スタンドの圧延機が同時に材料を咬んで、全スタンドの速度が調和を保つて運転されなければならない。この際に圧延作業条件に影響する因子はきわめて多い。各スタンド単独の問題としても、圧延後の板厚に影響する因子としては、圧延前板厚・圧延前の変形抵抗・加工硬化特性・材料温度・入口側の張力・出口側の張力・潤滑材料の品質・量・温度・ロールの直径・ロール速度・圧延機剛性・モータのトルク特性など十数に達する。上流スタンドの圧延結果は下流スタンドの圧延内容に影響を及ぼす上に、材料を介して全スタンドが連結されているので、全スタンドは1システムとして運転されている。したがって、最後スタンド出口の板厚を目標値に制御する問題として取上げると、それに影響を及ぼす因子は数十の多数に及び、場合によつては百を越える場合すらある。

この大型システムの多数の独立変数と作業の目的となる従属変数との関係を、総合問題として感覚で把握することは不可能である。作業者が感覚的に捉えている特性は、特に影響を強く及ぼす少数の独立変数と、作業目的である従属変数との間の関係のみであり、タンデムミルという大型システムの特性のわずかの部分を把握しているに過ぎない。

したがってこれを要約すれば、1) タンデムミルの特性として作業者が感覚的に把握しているのは、過去における作業で経験した範囲に限定されている。2) 特に計測装置により量的に計測される要素以外は、特性の数量的把握は行なわれていない。3) 圧延中に同時にその特性を認識し得る因子の数はきわめて少数である。

これに較べて、理論的にタンデム圧延作業の総合特性

を解明・把握すれば、1) 過去において一度も経験しない圧延作業内容についても、すべての独立変数が作業目的に及ぼす影響を予知できる。2) 従来は作業目的としなかつた新しい要求に応じて、新作業条件を求めることが可能である。3) 総合特性の解析結果により利益が予見されるときは、過去には前例のない構造・特性の新圧延機を導入することも可能である。

特に、約10年前から圧延機の計算機制御が実施されるようになったので、きわめて複雑な内容の制御でも必要であれば実現可能となつた。したがって、過去における前提条件である作業者の手で実施し得るか否かは、も早制約とはならない。その技術内容がすぐれているか否かが最大の要件となつた。このような環境の変化によりタンデム圧延作業の総合特性の把握の意義は飛躍的に高まり、その理論的解明がきわめて重要となつた。

この方面の研究は筆者の研究室員や、筆者のもとへ鉄鋼各社及び重電各社から派遣された多数の研究者により活発に行なわれ、わが国の研究が質量ともに諸外国の水準を上回っている。これ等の研究成果が基本となり、各種の新しい研究や技術へと世界の先端を切つてさらに発展している。

以下にその例を2, 3 列举する。1) タンデムミルのミル剛性の不均一配分を導入して、上流スタンドの剛性を強く、下流スタンドの剛性を弱く、従来前例のない傾斜配分として、各スタンドにそれに適した圧下率を配分して、板の肉厚精度を向上した。2) タンデムミルの圧延中にミルセッティングを変更する際の、各スタンドの相互作用を解析して、走間のミルセッティング変更を可能とし、生産能率を大幅に向上した。3) タンデムミルの増減速中の圧延条件の過渡特性を解析して、従来は不可避とされていた増減速中の板厚の変化を補正する技術を確立した。

5. 圧延理論が新しく第2段階に入つた

第1段階での圧延理論では、ロール間隙内で塑性変形する材料の塑性力学的な解析が主体であつたが、上述のように圧延機の機械工学的な諸問題の研究が、主として日本において進展して、両者を総合してより大きな問題として解析することが可能となつた。

また、両分野すなわち“ロール間隙の塑性力学”と圧延機の機械工学との両者を総合して解析することにより、大きな成果の期待される工業的諸問題が多数存在したので、この方面の研究が急進展した。さらにまた、計算機制御の時代が訪れたので、多量情報の処理と複雑な制御の実現とが可能となつたことも相俟つて、この方向への研究と技術の進歩とが促進された。この方向、すなわち“ロール間隙の塑性力学”と“圧延機の機械工学”との総合分野の研究は圧延の理論的研究が技術上の要求に応じて発展したものであるから“圧延理論の第2段階”

と呼ぶべきものであろう。なおこの圧延理論の第2段階の研究は、筆者の研究室を中心としてその関係者との協力のもとに行われたものが多いので、以下にその例を紹介する。

以下にあげた例は、新しい圧延設備の開発の例であるので、圧延理論の第2段階の例であると同時に、実際の生産上の要求を圧延理論により解決した例ともなっている。

5.1 圧延機剛性の最適化理論による製品肉厚精度の向上 (例 1)

本例は時計のゼンマイの量産に関するものであつて、高弾性率・高張力の材質の肉厚 100μ 程度の条を $\pm 1\mu$ の精度で圧延する要求であつた。この $\pm 1\mu$ という肉厚精度は当時前例のない超高精度であつたので、これを実現するための専用圧延機を計画するに際して、筆者が新しく考えたのが“圧延機剛性の最適化”による肉厚精度の向上であつた。

製品肉厚の不均一の原因となる要因は多数あるが、性質別に大別すれば①素材条件の不均一、②圧延作業条件の変動、③圧延用ロールの偏心・楕円等の寸法不良、の3者である。それぞれの要因については、もちろん不均一・寸法不良などは可能な限りあらかじめ除去するように配慮するが、この場合の厳しい要求に合致するためには、それだけでは實際上不可能である。そこで圧延機剛性の最適化という新しい構想をさらに導入して精度の向上を計つたのである。

原因①と②の影響を軽減するには圧延機剛性を強くすることが効果があり、③の影響を軽減するには、逆に圧延機剛性を弱めれば効果がある。従来の圧延機では圧延機剛性の影響についての研究が不十分であつたので、このような場合にも圧延機剛性への配慮が全くされていなかったが、この場合は圧延機剛性による原因①～③の変化量を理論的に算出して、総合的影響が最小になるような圧延機剛性の最適値を求めた。

この新しい技術により超高精度の圧延の実現に成功し、日本における時計ゼンマイの品質を向上することに寄与した。その後十余年間わが国の時計ゼンマイの全生産の中圧倒的多数が本圧延機により生産された。この圧延機はきわめて小型のものであつたが、この圧延機で成功をおさめた圧延機剛性の最適化理論は、その後鉄鋼生産用の大型圧延機にも貢献している。

5.2 “圧延機剛性の最適化”と“定パススケジュール方式”による圧延製品の肉厚の均一化

太平洋電話ケーブル用銅条の圧延 (例 2) 1965

電話用同軸ケーブル導体用の肉厚 0.25mm の銅条の圧延に際して、長さ約 2000m のコイル内の肉厚精度を $\pm 3\mu$ (肉厚に対し 1%) 以内にとどめるとともに、数千本の全コイルの平均寸法のばらつきもすべて $\pm 3\mu$ 以内にとどめる課題である。要求の第1項は前例に示した

“圧延機剛性の最適化”により実現可能であるが、第2項は通常の方法では実現し得る技術は当時なかつた。

これを実現するために導入した新しい方法は次の通りであつた。①オイルパルスモータによるロール圧下を採用し、精度 1μ でデジタルに圧下位置を指定する。②8パスの圧延を繰返し、各パスごとの指定肉厚をすべてのコイルにつき共通の値とする。③肉厚に対する肉厚誤差の比率を1パスごとに縮小して行く条件で圧延機剛性を定める。

上記の方針が成立するよう、圧延機の仕様と圧延条件とを理論的に解析して総合問題として解く方法を導入して、専用圧延機を設計製作した。その結果この困難な要求を満たすことができ、各コイルの圧延後の平均肉厚の差は事実上はゼロに近い好結果をおさめて、新技術の開発に成功した。その後も類似の要求に対しては、この技術に基いて設計製作された圧延機が、他の圧延機よりもはるかにすぐれた成果をあげている。

5.3 タンデムミルの剛性不均一配分による肉厚精度の改善

住友金属工業鹿島製鉄所冷間ストリップミル (例 3)

単スタンド圧延機の剛性変化によりすぐれた効果をあげ得たことを考えれば、タンデム圧延機においても、素材条件の不均一の影響が強く現れる上流側スタンドの剛性を大きくすれば、素材の不均一条件の悪影響を軽減することが可能であり、板厚精度の酷しい下流スタンドではロールの寸法不良の影響を軽減するためには、剛性を弱くするのが好ましい、筆者は定性的にはこのことを10数年前から指摘していたが、その後タンデムミルの総合特性の研究が進展した段階で、その効果を解析して数値的にも明らかにすることができた。

日本においては、世界にさきがけて筆者のこの構想を導入したコールドタンデムミルが3ライン実現したが、最も早かつた住友金属工業・鹿島製鉄所の例を引用する(図7)。素材に肉厚の不均一がある際にも、圧延後の寸法精度は在来型のタンデムミルに較べていちぢるしく向

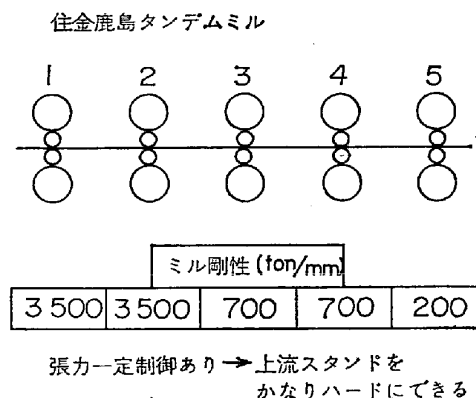


図7 油圧圧下ミルのミル剛性傾斜配列

上している。

大型圧延機の機械的圧下方式のスタンドでは、剛性値は通常 400~600t/mm であつて、これを大幅に高めることは不可能であるので、剛性不均一配分が理論的にすぐれていることが明らかであつても、剛性値を低下させること以外は採用が困難であつたが、油圧圧下方式の出現で、剛性値を自由に制御し得るようになったので、この新技術が実際に採用されるに至つたのである。今後建設される冷間タンデム圧延機はこの型式のものとなつて行くであろう。

5.4 タンデムミルの走間板厚変更

日本鋼管福山製鉄所 完全連続冷間ストリップミル (例 4)

冷間タンデム圧延機では、従来は圧延中に大幅の圧延板厚の変更は不可能であつた。日本鋼管の完全連続式冷間タンデム圧延機は世界ではじめてそれを可能にしたものであつて、経済的の利益はきわめて大きい(図8)。

タンデム圧延機では圧延中に任意のスタンドの圧下を変化すれば、その影響は材料の張力を介して即時にすべてのスタンドに及ぶから、全スタンドの運転条件の平衡が破れ、ただちに適当な修正を加えないと、ストリップが切断あるいはループとなり圧延は不可能となる。またその影響を受けて厚さの変化した部分が下流スタンドへ到達する度ごとに同様の変化が繰返される。したがつて圧延中に板厚変更を行なうためには、第1スタンドから始まり最終スタンドまで順次圧下調整を行なう時間中の平衡を保つための適切な修正を理論的に予め求めて、板厚変更の際には修正を正しく実現しなければならない。

これはタンデム圧延の総合特性に関する研究を基礎として始めて可能なところである。したがつて完全連続冷間タンデム圧延機もまた、圧延理論の高度の研究の所産である。表2にその経済的効果を示す。

上述のように、材料の塑性変形の塑性学的研究を主にした圧延理論の第1段階から、圧延機の機械工学と併せて総合的に解析する圧延理論の第2段階に移つたが、この第2段階への発展が主として日本において行なわれた

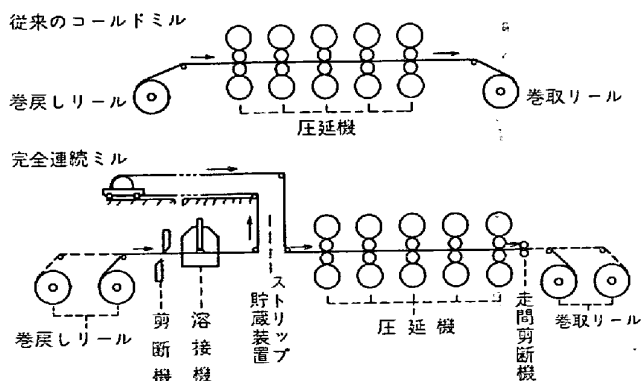


図8 従来のコールドミルと完全連続ミルの比較概念図

表2 完全連続式と従来方式の比較

		完全連続式	従来式
月間圧延能力		107 000 t / 月	70 000 t / 月
通板戻抜きによるロール疵発生率		0%	1.0%
板厚不良発生率		0.3%	1.4%
人	スタンドマン	2 名	6 名
	4 直 3 交代要員 (生産量 5 割増考慮)	2 × 4 = 8 名	6 × 4 × 1.5 = 36 名
建設費 (圧延能力 107 000 t / 月)		≒ 90 億円	77 × 1.5 ÷ 115 億円

注) 完全連続式はロール消耗 30% 減 (700 万円/月合理化)

理由を考察してみよう。

第1の理由はわが国においては、変形抵抗を測定して、そのデータにもとづき理論的に圧延荷重と圧延トルクとを求める方法が、研究者と技術者の間に定着して基本的な手法となつていたので、アメリカ式の圧延動力曲線方式の技術に較べて理論的發展に適していたことをあげねばならない。

第2の理由としては、約 10 年前からタンデムミルの計算機制御が採用され、それが日本の技術に適していたことである。計算機制御が採用されても、アメリカ式の圧延動力曲線法の基本的考えは過去の技術の再現にあるので、新技術への足が遅いが、理論式で圧延技術を表わしている日本の技術では、新しい要求への対応が容易である。筆者の研究室で行なつたタンデムミルの複雑な解析にもとづく新技術の実際作業への導入も、このような計算機制御の時代に際会したおかげで結実したのであつた。

第3の理由は、わが国の鉄鋼工業は欧米に述べて広い専門にわたつて高級技術者を非常に多人数保有していることであつて、上記の第1・第2の理由もこの条件とあいまつて実現したものである。

第4の理由は、最近の約 10 年間に国内で大型の近代的製鉄所が6カ所も建設され、熱間・冷間とりまぜてストリップミルが多数設置され、新技術の導入のチャンスに恵まれたことである。しかも、新技術の導入は次の段階の新しい研究課題を生み、その研究成果がさらに新技術につながる好循環となつたことである。

以上の環境条件が幸して、現時点では圧延理論の研究・圧延技術・圧延機設計技術のいずれの面でも、日本が世界の水準を抜くに至ったことは誠によろこばしい。また、それを支える研究者・技術者の中に筆者の研究室出

身者が多数いるので、筆者個人としては二重のよろこびでもある。

このように、材料の変形の塑性力学と圧延機の機械工学とを総合して圧延理論として体系化することは、われわれの手で実現することに成功した。圧延機の制御理論もほぼその体系に組み込まれたと見て差支えない段階に達している。今後の課題としては、その周辺の体系化ので

きていない技術的の諸問題も理論体系に組込んで、圧延理論の第3段階へと発展させることである。

潤滑・計測の諸問題をはじめとして各種の圧延技術の問題がこれに当るが、幸にわが国には圧延に関心を持つ研究者・技術者が多数在るので、その協力を得て圧延の大理論体系を完成したいと念願している。