

## 解 説

UDC 62.771.01 : 669.14

## 加工技術の将来像\*

岡本豊彦\*\*

## Future of Metal Working in Steel Industry

Toyohiko OKAMOTO

## 1. 緒 言

鉄鋼業における塑性加工技術の将来像について、寄稿するように御依頼を受けた。歴史を述べることは容易であるが、未来を論ずることは非常に難しいことであり、その任にあらずと考えたが、せつかくの御依頼であるので一文を記し、皆様の御批判を仰ぎたいと考える次第である。

さて、技術の将来像について考えると、遠い将来の将来像、近き将来の将来像に分けられる。

近き将来の将来像とは、どちらかといえば、現在の技術の延長という意味で現状の知識の中から“こんなことができたらいいなあ”といつたことであり、比較的考えたり議論しやすい。

しかし、遠き将来の将来像については、現在の常識の範囲からでは考えつかないような技術が実用化されてくるかも知れない。このようなことを予言または予測せよということは中々難問である。したがって、このようなことを思考する一つのアプローチの方法としては、少々理論的に問題を解析し考え直して見ることもかも知れない。そのためには、しばしば独創性や新技術の開発などについて論ぜられていることを思い出してみたい。例として五弓教授の意見を紹介すれば、

- 1) 現在技術のキーポイントを知ること
- 2) 理論(理想)に近づけること
- 3) 常識にこだわらないこと
- 4) 基礎と応用を結びつけること
- 5) 類推を働かせること

などが揚げられている。また加工技術に焦点を合わせた場合は、同氏は次のことを強調している<sup>2)</sup>。すなわち、塑性加工により製品を良質安価に生産する場合の根本理念は次の十項目である。

- 1) 外部摩擦の減少-仕事量の減少-変形効率の上昇
- 2) 精度の向上
- 3) 品質の向上(異方性、内部応力、加工熱処理の利用)

- 4) 歩留りの向上
- 5) 欠陥の防止
- 6) 工具費の節減
- 7) 工程の節減(加熱回数、中間焼鈍、酸洗の節減、加工度、加工限の上昇)
- 8) 単位時間当り生産量の増大(高速化、自動化、連続化、並列化)
- 9) 設備費の減少
- 10) 原単位の減少

以上は、現在考えつかないような将来の加工技術を予想あるいは創造するための考え方の基礎と言えよう。

さて、私は今回若干別の角度からの見方を付け加えることにする。一般に鉄鋼の塑性加工は、アルミニウムや銅のごとき一部の非鉄金属の塑性加工に比べると、比較的難しいと言える。

したがって、鉄鋼の塑性加工の近き将来としては、現在非鉄部門で実現していることが鉄鋼の部門でも実用化されるようになるだろうということである。

過去を振り返り、2, 3の実例をあげてみると、現在鉄鋼界では常識と考えられている連続鑄造法は、一昔にアルミニウム業界では実用化されていた。また、鋼管のフローティングプラグの引抜やブルブロックなどは鋼管での実用化よりもずっと以前に非鉄では常識化されていた。

また、現在は、非鉄部門で実施されているが、鉄鋼部門では実現していないものの例としては、アルミニウムの熱間押出の場合のホローダイス押出法などがある。また、線引作業などにおいても銅線の線引速度は、多くの場合には鋼線の引抜速度よりも格段に高速である。このような見方は最近よく言われているテクニカルトランスファーとも言うべきものである。

次に、若干理論的というか理屈ばい考え方をして見よう。現在の塑性加工の主流は熱間加工と冷間加工に大別される。そうして冷間加工は、製品の精度、表面状況の高度のものが得られるが、一般にはコスト高と考えられている。熱間加工は、冷間に比すれば、一般には容易な

\* 昭和51年3月 第38回西山記念技術講座にて講演

\*\* 住友金属工業(株) 工博(Sumitomo Metal Industries, Ltd., 5-15 Kitahama Higashi-ku Osaka 541)

加工法でコストも安価と見られているが、普通の場合にはスケールの発生のため、表面状況は冷間加工に比して劣るのみでなく、寸法精度も冷間加工には及ばないとするのが常識となつている。したがつて、無酸化状態での熱間加工や熱間加工でもつて冷間加工並みの寸法精度も出すことのできる方法などが開発されれば画期的なことである。また、最近では、熱間加工よりさらに進んだものとして未凝固状態での加工法も基礎的に研究され始めているので将来は工業化される日がくるであろう。

さらに、熱間加工と冷間加工の中間に位置する低温熱間加工や温間加工は、主として製品の品質の改良に有効な手段と現在でも考えられている。すなわち、高級な材料を用いずに低級安価な素材を用いて高度の性質を有する製品を作る有力な手段である。今後は、省資源の時代になつてくるのでますますこの方面の技術が急速に進歩してくるものと予想される。したがつて、現在では、加工法の主流は、純粹の熱間加工かあるいは純粹の冷間加工のいずれかであり、その中間温度での加工法は例外的と考えられているが、将来はむしろ中間温度の加工が主流となり純粹の熱間加工や冷間加工の方が少なくなることもあり得ると予想される。

さらに、別の見方から考察すれば、塑性加工における変形抵抗と変形能、ならびに加工エネルギーについての見方がある。

加工に当つて、変形抵抗が小さく、変形能が大きいことが望ましいことは言うまでもない。昨今しばしば超塑性材料ということが言われるが、現在の我々の知識の範囲では、大量に製造される鉄鋼材料において、材質的に超塑性的な性質を求めることは、今後将来と言えども、まず不可能と考えられるので、それは勢い熱間加工のよりよい応用ということになるのではないか。すなわち、加工に要するエネルギーが少なく、かつ大きな加工度においても加工硬化せず、どこまでも変形加工が続けられるということである。この見地からすれば、現在では冷間加工の範囲に属する小径あるいは薄肉の製品が熱間加工で実施できないかという問題となる。また、一般に材料を塑性加工するに要するエネルギーは熱となつて放散されている。又、場合によっては強制冷却するための手段が種々採用されている。これは、省エネルギーという観点から言えば、非常に大きい無駄と言えらる。したがつてこの熱になる加工エネルギーを回収するか、あるいは熱間加工や温間加工の一助に利用するなど今後の課題になるかも知れない。

以上は、主として塑性加工の本質に関する議論であるが、その他大切なことは、加工に用いる工具や工具用材料、ならびに潤滑に関する技術の向上は、本質に劣らず重要な要因であると言える。

例えば、一昔においての線引や鋼管の引抜には、工具鋼のダイスやプラグが用いられていたが、最近では超硬

合金の工具が常識化されてきた。また、潤滑法にしても鍍付法や石灰法に代つて、燐酸塩や硫酸塩の皮膜法に置き代つてきた。

## 2. 塑性加工法の今後の進歩

今後の進歩を論ずるにあたり、緒言に述べたようないろいろの観点があると思うが、次に一応思いつくままに今後の進歩を考察して見たい。

さて、鉄鋼業における塑性加工は、従来は、造塊から分塊圧延の段階を出発点としていたが、今後はCC化が一層に進み、分塊圧延のプロセスは、将来は全廃されるようになるものと予想される。

したがつて、鉄鋼業において今後も残る塑性加工の分野を大別すれば次のものとならう。

ホットストリップの熱延、コールドストリップの冷延、厚板の圧延、リングミルの圧延、熱間製管、鋼管の冷間引抜、線材棒鋼の熱間圧延、線材の線引、冷間鍛造、熱間鍛造、転造、ロールフォーミング、溶接鋼管の製造などが考えられる。

### 2.1 未凝固圧延

さて、鉄鋼業の塑性加工が、CC材より出発するものとすれば、まず第1に考えられることは、高温のCC素材よりの直接圧延であろう。すなわち、従来はCCスラブをいつたん常温冷却してから再加熱炉に挿入するコールドチャージ法であつたが、現在では、省エネルギーの観点からCCスラブを常温まで冷却せず、400~500°Cの温度で再加熱炉に挿入するホットチャージが次第に採用されつつある。しかし、今後はますます、省エネルギーがやかましくなつてくるので、CCよりの直接圧延がいかなる製品を圧延する過程においても、主流を占めるようにならねばならない。ただし、この場合、同一サイズのCC断面よりいろいろの断面の圧延を行うためには、CCマシンに何かの圧延加工設備を付属させて、断面形状を変化させることが得策であることは言をまたないが、あまり大形の設備をCCマシンの各ストランドに付属させることは、あまりも高価につくことになるので、できるだけ簡単な設備としたい。したがつて最近各方面で研究の行なわれている未凝固圧延がクローズアップすることになる。特に、断面形状が単純でなく異形のものに対しては、一層必要のこととならう。

また、此の様にCCよりの直接圧延が指向されると従来のような縦型CCよりも横型CCが要望されてくるのではないか。すなわち、アルミニウム業界では、Fig. 1に示すような横型CCが現在既に検討されている。すなわち、Aはスチールベルトの上下の外側を水冷しながらその間で溶鋼を凝固させる方法であり、Bは円筒とこれを取り巻くスチールベルトの間に凝固を行なわせる方法であり、Cは、冷却されたチルテングブロックがキャタペラーのごとく廻っている間で凝固を行なわせるアルミ板

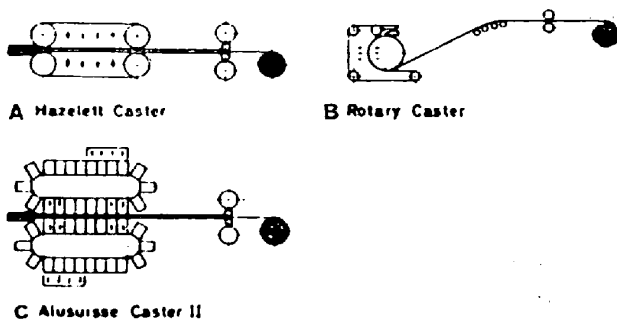


Fig. 1. Model layout for aluminum (case C).

の直接鋳造であり、何れも直接圧延に連なっている構想である。

## 2.2 ホットストリップミル

ホットストリップミルの熱延の分野の将来を考えると、CC スラブの幅殺し圧延がまず考えられる。これは、CC マシンに連続するというよりも、ホットストリップミルの前段という形で実現するのではないか。したがって、相当に大型の圧延機という感じのものであろう。

現在のホットストリップの粗圧延機にはいずれも水平ロールのほかに垂直ロールによるエッジャーが設置されているので、最大可能の幅殺し率なるものが、実験的あるいは実機でのテストなどで検討されているが、普通の方法では、スラブの先端や後端部の変形やフィッシュテールなどのため、あまり過大な幅圧下は不適切で 80mm ~ 100 mm の幅圧下が適切な限度であると考えられている。

しかし、ソ連においては溝型を有する垂直ロールによる幅殺し圧延により、CC スラブの幅をわずか 2 種類に統一して、すべてのサイズのホットコイルを製造するという支那も発表されている。

この場合は、各パスごとに溝型の幅とスラブの厚みが一致しなければならないので、1 個の垂直ロールに多数の溝型を設け、パスごとにロールを上下に調整しなければならない。さらに以前は、 $t/h$  の向上のため次第にスラブ厚を増していくことが進歩と考えられていた時もあったが、我々の検討結果にも見られるようにいたずらにスラブ厚を増加することは省エネルギーの観点からも見直す必要がある。とくに最近のごとく連続鋳造が普及してきたので、理想的に言えばスラブ厚はできるだけ薄くするのがよいともいえるが、基本的には、製鋼側の要請と圧延側の要請のかねあいとなり、場合によっては最適な値が異なるであろう<sup>3)</sup>。すなわち、あるソ連の文献では CC スラブ厚み 190 mm 程度が最適との意見もあるが、我国の設備では若干厚く 220 ~ 230 mm 程度が最適になる場合もあろう。

次に、倍尺圧延の普及である。すなわち、薄物狭幅のホットコイルの圧延は  $t/h$  が上がらないから高価につくので、勢い 2 倍幅の薄物広幅のコイルとして熱延される

こととなろう。この場合は、当然後工程でスリットする必要があるため、高速高能率のスリッターによる分割が必要となってくるので、厚物の場合は適当でなく、かつ厚物では  $t/h$  も比較的大きいので、倍尺圧延のメリットは少なく 5 mm 以下の薄物ホットコイルに限定されよう。さらに 1 mm またはそれ以下の現在では冷延コイルと考えられているものが熱間でかつ無酸化状態で熱延される日も到来するかも知れない。すなわち、鉄鋼業の下工程において、冷延工場は比較的エネルギーを消費することが大きい分野であり、なるべく冷延焼鈍を行わないことが望ましい。しかし、この場合一般に問題視されることは超薄物の熱間圧延は可能であるが、普通の場合にはミルの  $t/h$  が減少することである。最近では、ホットストリップミルの設備能力は過剰の傾向になるであろうから、薄物を圧延することの  $t/h$  の低下は次第に問題点としては薄れてくると考えられるが、近接ダウンコイラーを利用し仕上圧延速度を著しく向上した高速圧延法の実現が要望される。一方このような薄物は従来の冷延鋼板に代るものであるから、使用上はプレス加工される場合が多い。このとき、ホットコイルのスケールを酸洗

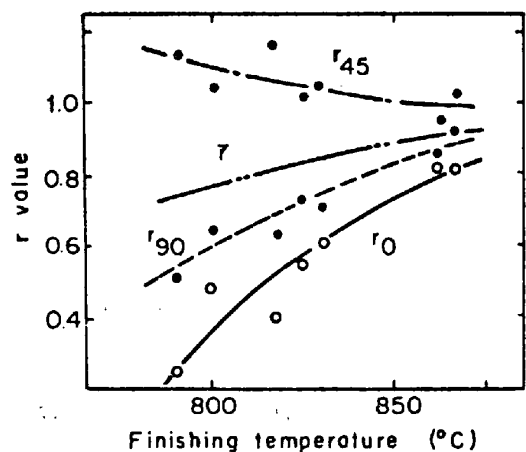
Fig. 2. Effect of finishing temperature on planar anisotropy  $r$  value (1.6 mm hot strip).

Table 1. Comparison between hot rolled strip and cold rolled strip (both 1 mm thickness).

	Hot rolled strip	Cold rolled strip
Yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	27.6	18.8
Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	36.9	30.5
Elongation (%)	43.9	45.2
$r$ value	0.84	1.41
$n$ value	0.233	0.225
Erichsen value (mm)	10.9	10.8
Conical cup value (mm)	47.1	45.0
Cylindrical cup drawing (mm)	410	430
Square shell drawing (mm) 0°	230	240
45°	215	245
Hydraulic bulging (mm)	35.9	36.0
Hemispherical cup stretching (mm)	75	75
Hole expanding (%)	84	85

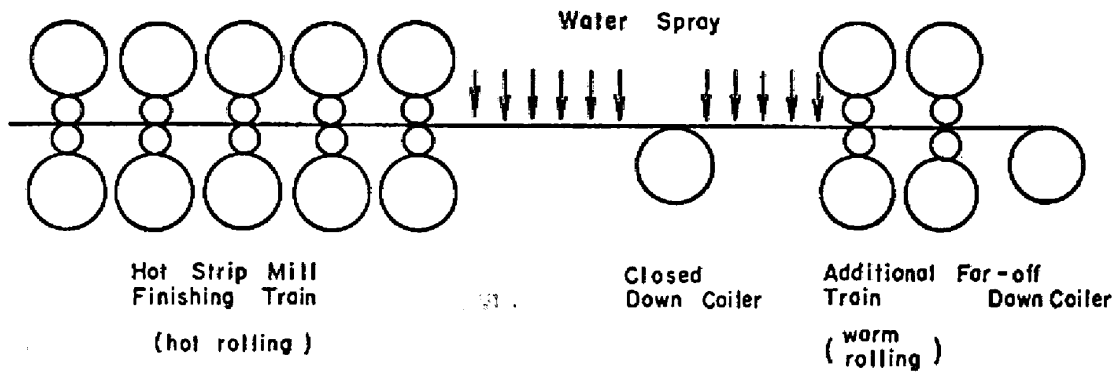


Fig. 3. The model layout for the experimental study.

したのでは、コスト的にも問題であろうから、無酸化状態での熱延が要請されることとなる。

無酸化状態ではないが、今日までに作られた薄物の熱延コイルの性質について若干述べてみよう。

すなわち、Fig. 2 に示すように仕上温度により成形性は著しく影響を受け高温仕上げの方が一般に加工性は優れているが代表的な特性値を示せば Table 1 のごとくであり、その特長の要約をすれば次のとおりである。

- 1) 降伏点と引張強さは冷延よりも若干高いが、伸びは冷延鋼板と大差はない。
- 2)  $r$  は熱間であるので 1.0 より低い  $n$  値は冷延と大差はない。
- 3) 面内異方性は冷延とは異なり、45° 方向の伸びや  $r$  値が高い。
- 4) エリクセン値や液圧バルジによる延性は冷延鋼板と同等である。
- 5) CCV や角筒絞りによる深絞り性は若干冷延よりも劣る。
- 6) 孔拡張性は冷延鋼板と同等である。

したがって、特に深絞り性の厳しい部品でなければプレス成形は可能であり、現在でも少量ではあるが実用されている。

さらに、成分的な検討、例えば極低C化、極低S化および低Mn化やその他の合金元素添加の技術開発によりより一層の特性向上も考えられよう。

また、低温熱延による超深絞り鋼板の製造技術もすでに研究開発段階としては完成しており、工業化の日を待

っていると言える<sup>5)~8)</sup>。

従来の二回冷延焼鈍法における一次冷延を  $A_3$  変態点以下、望ましくは  $A_1$  変態点以下の低温熱延に置き換え、さらに望ましくは再結晶以下の温間圧延に置き換え、こ

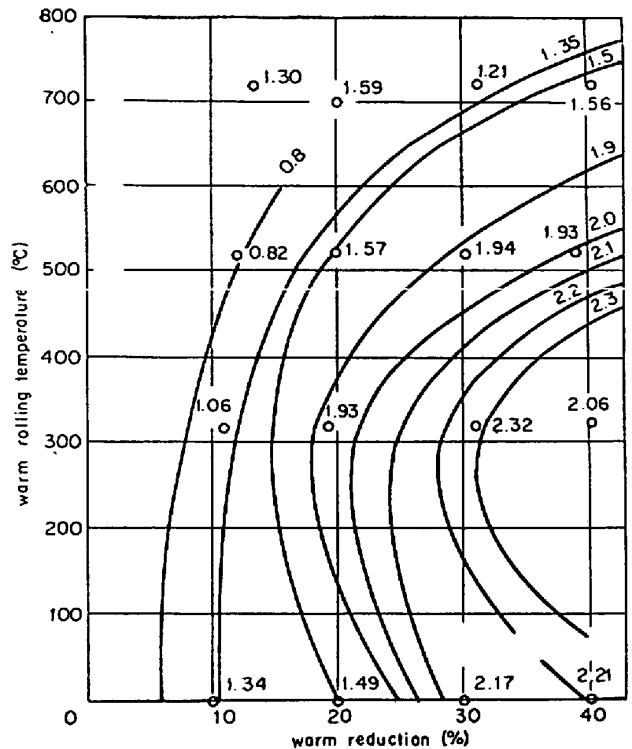


Fig. 4. Effects of warm rolling temperature and reduction of  $r$ -value (mean).

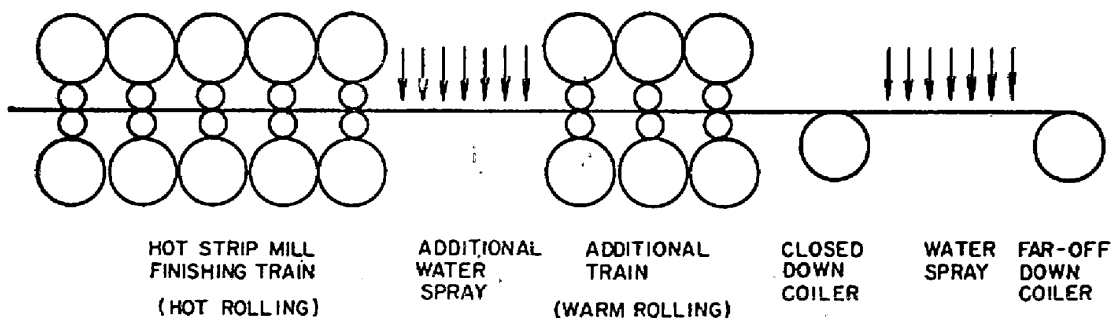


Fig. 5. The model layout for the experimental study.

の低温熱延あるいは温間圧延を Fig. 3 のごとく、ホットストリップミル仕上スタンドに後続する冷却台の後方、巻き取り機の前方に特別に設けられた追加スタンドにおいて実行することにより、1回の冷延焼鈍により通常の2回冷延焼鈍と同等もしくはそれ以上の深絞り性を有する超深絞り用冷延鋼板を2回冷延焼鈍法に比較してはるかに安価に製造できるようになる。その一例を Fig. 4 に示す。

上記レイアウトに関する実験結果はそのまま、深絞り用熱延鋼板の製造法を暗示しており、Fig. 5 に示すように、ホットストリップミル仕上スタンドにおいて通常の熱間圧延を行なった後、追加水冷装置によってストリップを急激に水冷し、しかるのち、追加スタンドにおいてフェライトパーライト領域望ましくはフェライト単相領域で低温熱延あるいは温間圧延を実行し、これまた特別に追加された近接ダウンコイラーで巻き取り、これを再結晶焼鈍すれば、通常の一冷延焼鈍法と同等もしくはそれ以上の深絞り性を有する深絞り用熱延鋼板が一冷延焼鈍法に比較してはるかに安価に製造できる。その一例を Fig. 6 に示す。ただし、この場合はおよそ65%以上の低温熱延あるいは温間圧延圧下率を必要とする。なお、通常の熱間圧延を実行する時は追加水冷装置を止め、追加スタンドにおいても通常のオーステナイト領域の熱間圧延を行ない、通常の水冷装置によって冷却後、通常の遠隔ダウンコイラーで巻き取ればよい。

このような低温熱延あるいは温間圧延を実行する際には、圧延温度が低いためストリップがダウンコイラーに巻き取られる時に突っかけ事故の発生が予想されるが、

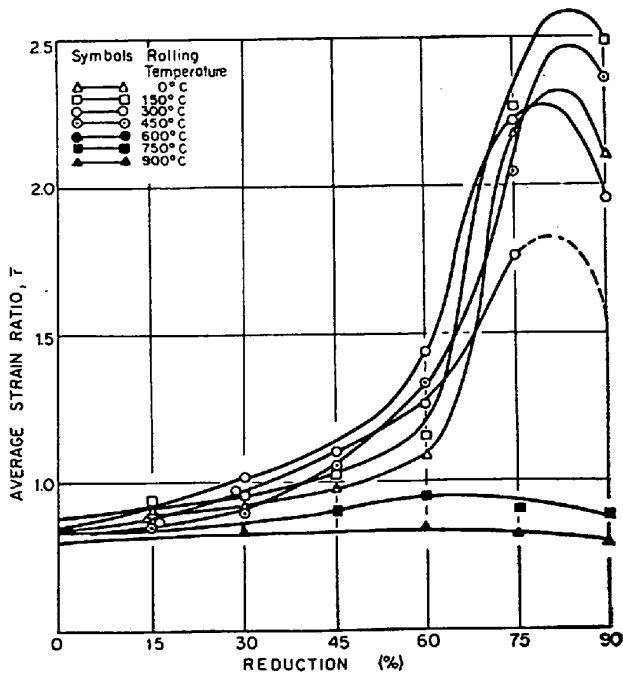


Fig. 6. Effects of rolling temperature and reduction on average strain ratio.

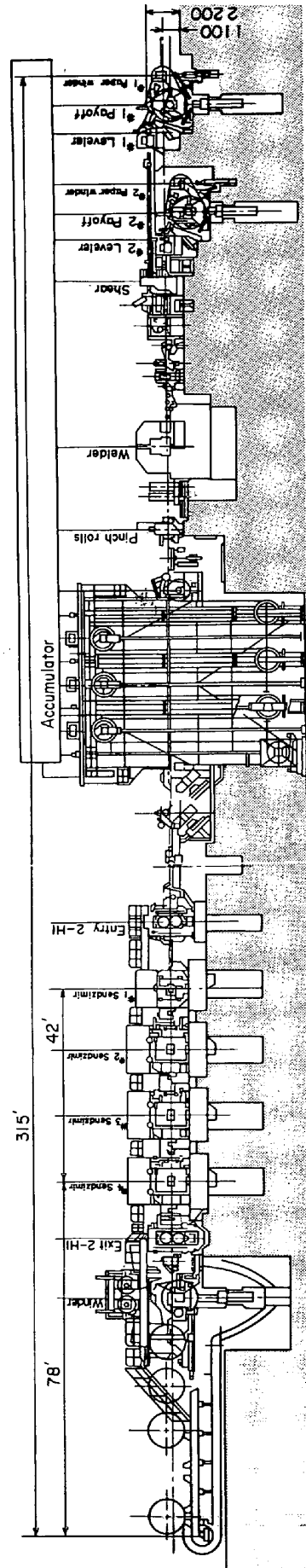


Fig. 7. General arrangement of entire installation.

これに対してはいわゆるトップウォーム操業で対処し、かつ、その部分を熱延のオフゲージに含ませればよい。

以上、温間圧延を利用した超深絞り用冷延鋼板あるいは深絞り用熱延鋼板の製造法についての研究のあらましを紹介したが、今後、強力なスケールブレイカーが出現すれば、熱間圧延と冷間圧延の直結は実現不可能なことでは決してない。熱間圧延から冷間圧延に至る中間の低温熱延あるいは温間圧延領域における圧下率と集合組織の関係については、我々の研究と相前後して2, 3の論文<sup>9)~11)</sup>が発表されており、温間圧延は冷間圧延に優るとも劣らないという結論が提出されているようであるが、彼らの研究は供試材を室温から所定の温度に加熱し、その温度で温間圧延を実行したもので、我々のようなレイアウトを仮想して実験したものではない。換言すれば彼

らの研究が温間圧延あるいは低温熱延を冷間圧延の延長として捉えているのに対し、我々の研究ではこれを熱間圧延の延長として捉えているのであり、特に熱間圧延直後、所定の温度に達するまで急激に水冷していることは母材における固溶C量、セメントタイトの大きさと分布の形態、さらにはMnSなどの存在形態が異なり、それが影響しているためか、温間圧延は冷間圧延に優るとも劣らないという結論が得られている。要するに温間圧延は利用する価値がある。

2.3 コールドストリップミル

コールドストリップミルの冷延分野では、すでに、わが国では、連続式コールドタンデムミルの実機が有効に稼動しているし、また、従来はブリキなどの硬質の薄物にのみ適用されていた連続焼鈍方式が各社で改良され、

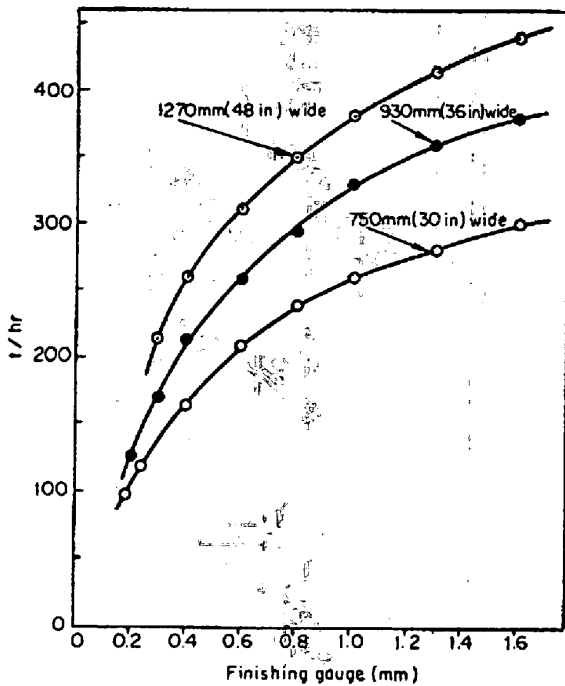


Fig. 9. Result values of t/h by size.

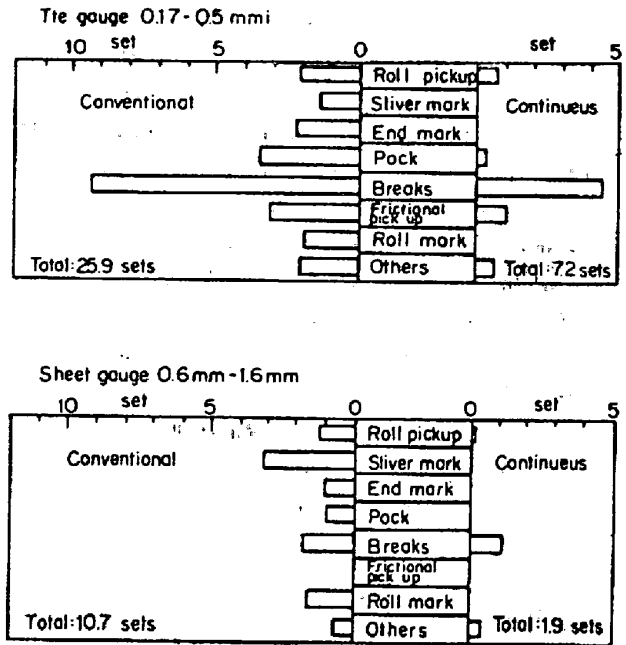


Fig. 10. Comparison of abnormal roll changing parameters between conventional and continuous mills.

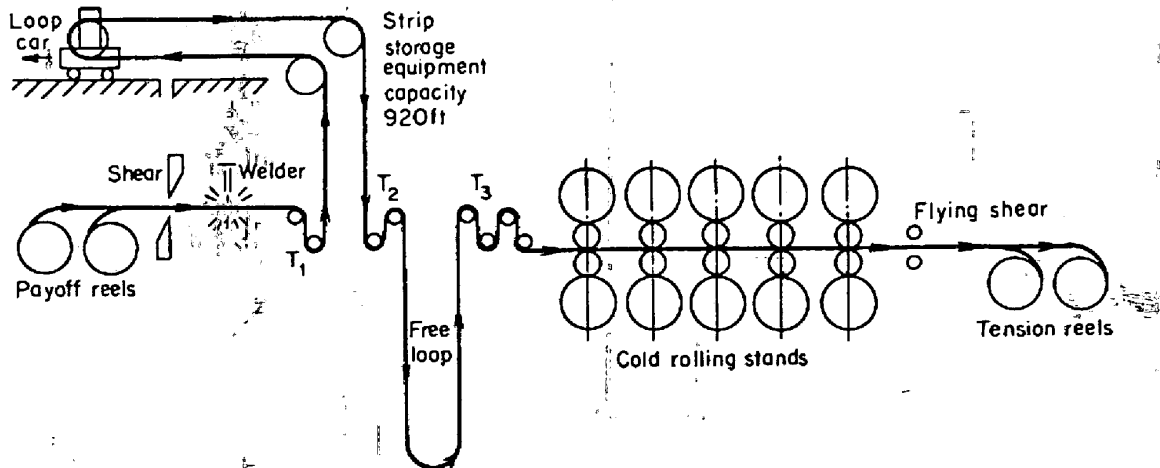


Fig. 8. Layout of the continuous cold tandem mill (NK, Fukuyama).

シートゲージの深絞り用鋼板のごとき軟質のものまで、連続ラインにより焼鈍と調圧が実際に行なわれる時代が到達した。おそらく、今後新規に工場が建設される場合には、この方式が主流となるものと思われる。

すなわち、連続式コールドタンデムミルはすでに 1967 年の Stahl und Eisen 誌に一つのアイディアとして Fig. 7 が発表されていたが、実機はいまだ世界中で存在してなかったが、1971 年日本鋼管の福山製鉄所において世界最初のミルが稼動した。このミルのレイアウトは

大約の Fig. 8 ようなものであり<sup>12)</sup>、Fig. 9 に示すように通常のミルに比すると  $t/h$  が著しく大きく、かつ、Fig. 10 のように異常によるワークロールの組替も非常に減少とも言われている<sup>13)</sup>。さらにこのような連続ミルにおいては走間板厚変更が Fig. 11 に示すように容易に行なわれている。また、連続式焼鈍ラインについては、日本鋼管福山製鉄所に設置されたものは Fig. 12 のごとく再結晶焼鈍後いつれ水冷却を行なった後過時効処理を行ない、Fig. 13 に示されたように時効劣化を防止する方式であり、製品の性質は Table 2 のごとくである。

この方式は同時に水焼入による  $50 \text{ kg/mm}^2$  以上の高張力鋼板の製造にも Fig. 14 のごとく有効と言われている。一方新日鉄君津製鉄所の方式は Fig. 15 のごとく水

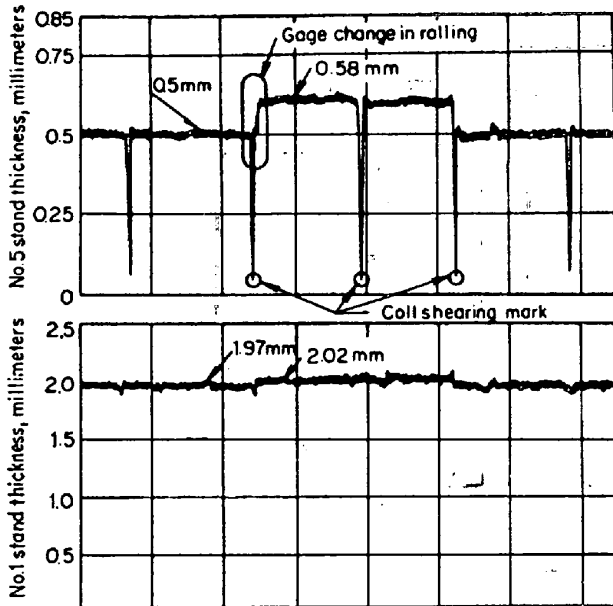


Fig. 11. Figure 10-X-ray charts showing abrupt gage changes in dynamic gage changing control.

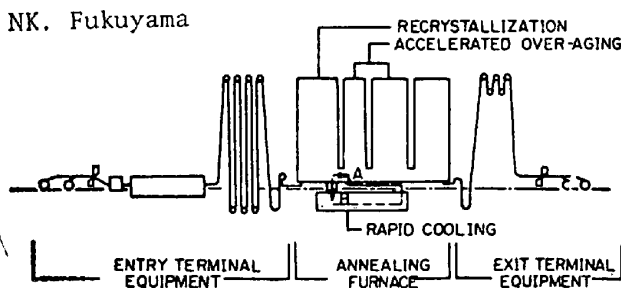


Fig. 12. Schematic of No. 1 continuous annealing line.

Table 2. Comparison of mechanical properties of annealed strips.

	Continuous annealing	Batch annealing
Yield stress, $\text{kg/mm}^2$	22.0	22.2
Tensile strength, $\text{kg/mm}^2$	32.9	32.0
Elongation, %	45.0	46.5
Erichsen value, mm	10.1	10.4
$r$ -value	1.51	1.26
CCV, mm	37.8	37.9

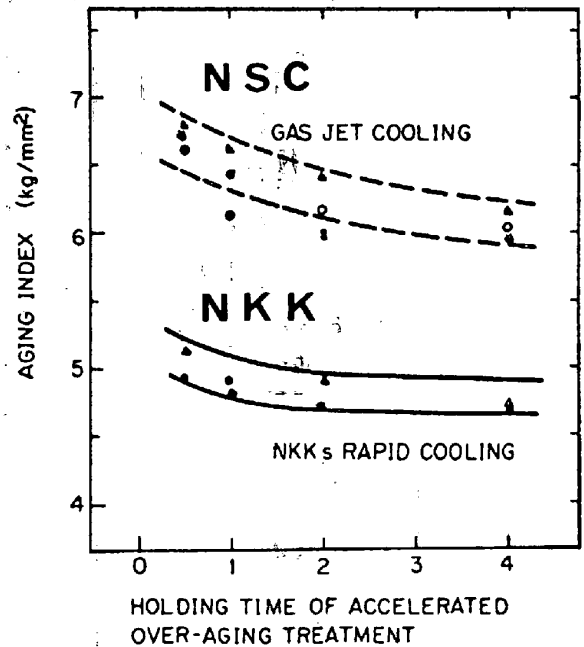


Fig. 13. Influence of primary cooling rate on aging index.

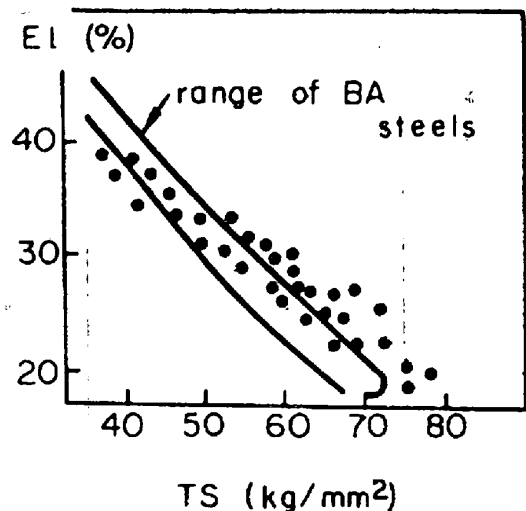
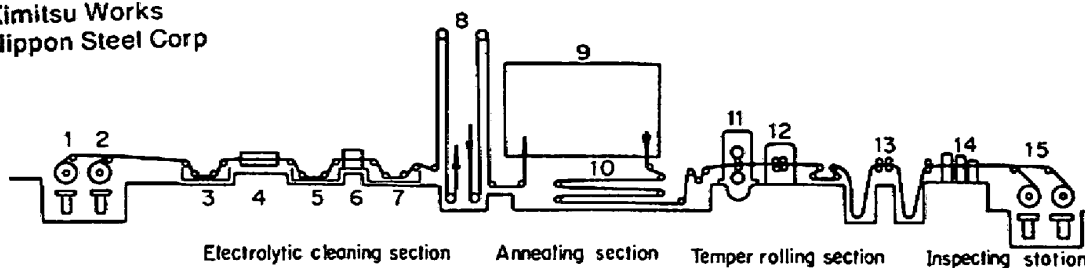


Fig. 14. Elongation of the strip processed on CAL.

Kimitsu Works  
Nippon Steel Corp



- 1. No.1 pay-off reel
- 2. No.2 pay-off reel
- 3. Hot caustic tank
- 4. No.1 brush scrubber
- 5. Electrolytic tank
- 6. No.2 brush scrubber
- 7. Rinse tank
- 8. Entry looping tower
- 9. Furnace
- 10. Exit loop car
- 11. Temper mill
- 12. Tension leveler
- 13. Side trimmer
- 14. Oiler
- 15. No.1 and 2 tension reels

Fig. 15. Layout of the continuous annealing and processing line.

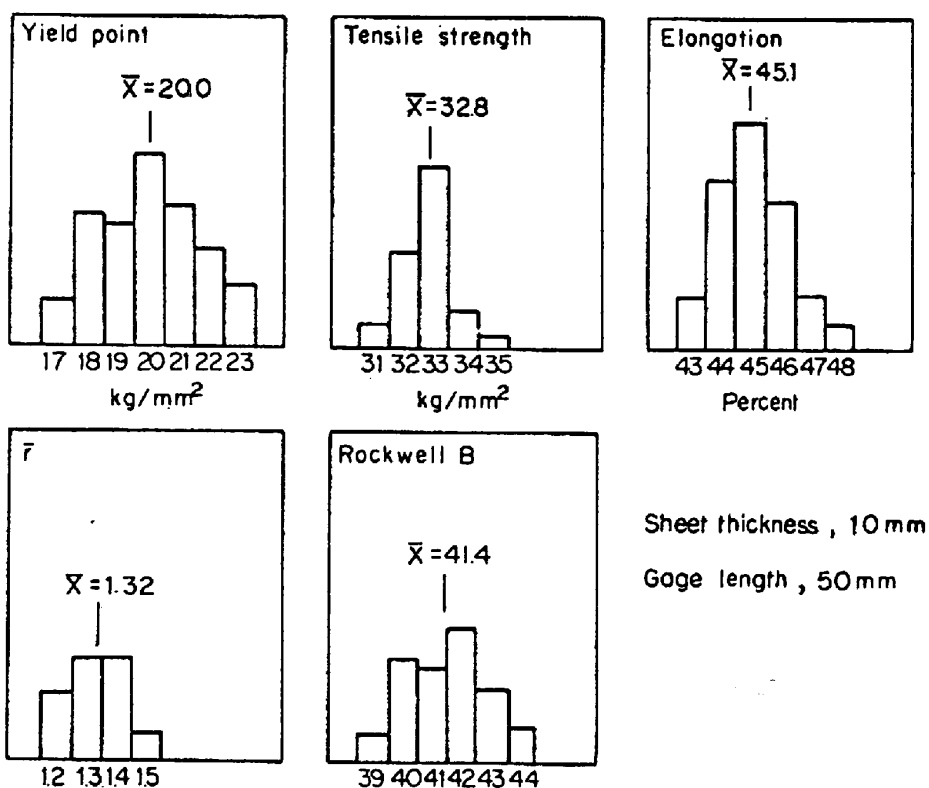


Fig. 16. Mechanical properties of the strip processed on the new line.

Table 3. Tandem mill characteristics.

Equipment	Type	Work roll diameter, in	Rolling speed, fpm	Motor, hp	Maximum interstand tension, t
Payoff reel	Overhung mandrel 20-in. diameter	...	0/985	330	5 <sup>1/2</sup>
Entry 2-high	Hydraulic screwdown 440 tons	30	0/328/985	2 440	44
No. 1 sendzimir	ZR22N-50	2.65	0/330/1080	2X960	66
No. 2 sendzimir	ZR21B-50	3.38	0/480/1310	2X1610	66
No. 3 sendzimir	ZR21B-50	3.38	0/610/1640	2X1610	66
No. 4 sendzimir	ZR21B-50	3.38	0/740/1969	2X1610	66
Exit 2-high	Hydraulic screwdown 440 tons	30	0/740/1969	2X1000	66
Tension reel	Overhung mandrel 20-in. diameter	...	0/1969	2X1340	22



冷装置はなく、過時効処理の時間が若干長くなる方式であり、電清ラインと調質圧延も同一のラインに組込まれている。

製品の機械的性質は Fig. 16 のごとくであり、伸びの値は良好である。そうして適正成分を Fig. 17 のごとく  $k$  値で管理し、かつ、Fig. 18 のごとく高温巻取を実施するものとなつている。

あるいはまた、薄物の冷延に際して、二枚あるいは三枚重ねた状態でタンデムミルをとおすような方法も開発されるかも知れない。また、最近では、ステンレスの分野で、タンデムのセンジミアーが出現している。

Fig. 19 は日新製鋼の周南工場に設置されたもののレイアウトであり、諸元は Table 3 のとおりである。

現在はタンデムコールドストリップミルは、4段ミルが通例であるが、一般には、エッジシンニングの現象が

あり、その対策はなかなか難しい。これはワークロール自体の扁平変形に基づくものであるから将来は超硬ロールが用いられるようになるかも知れない。こんな場合にもタンデムセンジミアーは興味のあるものかも知れない。また、最近では HC ミルが開発された<sup>15)</sup>。これは Fig. 20 に示すように、一般には6段ミルとして完成されているが、4段ミルでもこの着想をある程度実現できるものと考えられる。このミルは中間ロールの水平方向の移動によって板のクラウンコントロールが有効に行なわれるものであり、きわめて興味のあるものであるが、現在はレバースミルとして実用化されつつあるが、将来はタンデムミルにも活用されるようになるかも知れない。

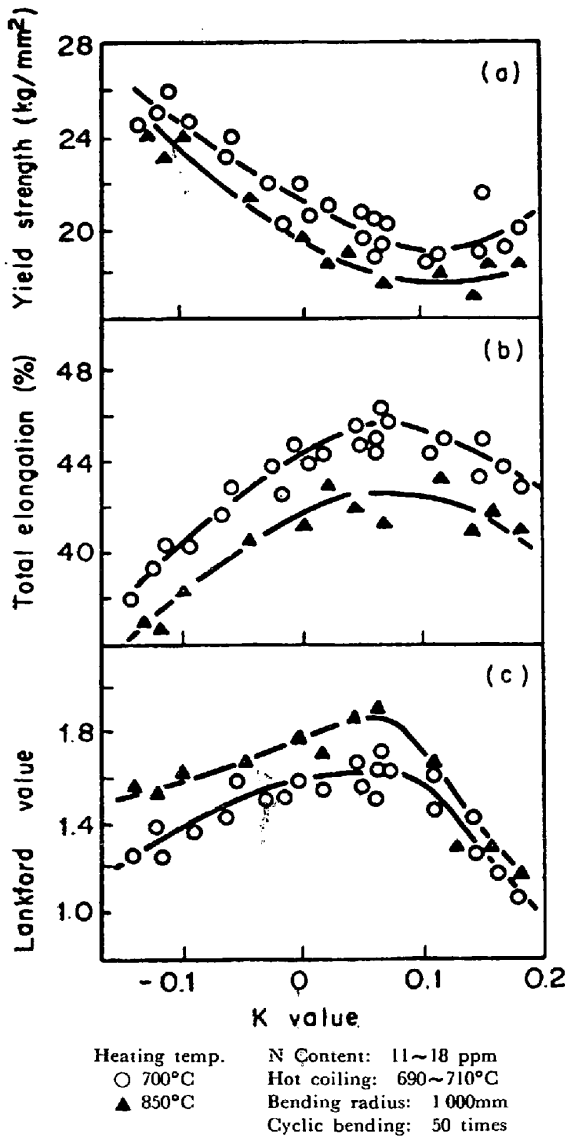
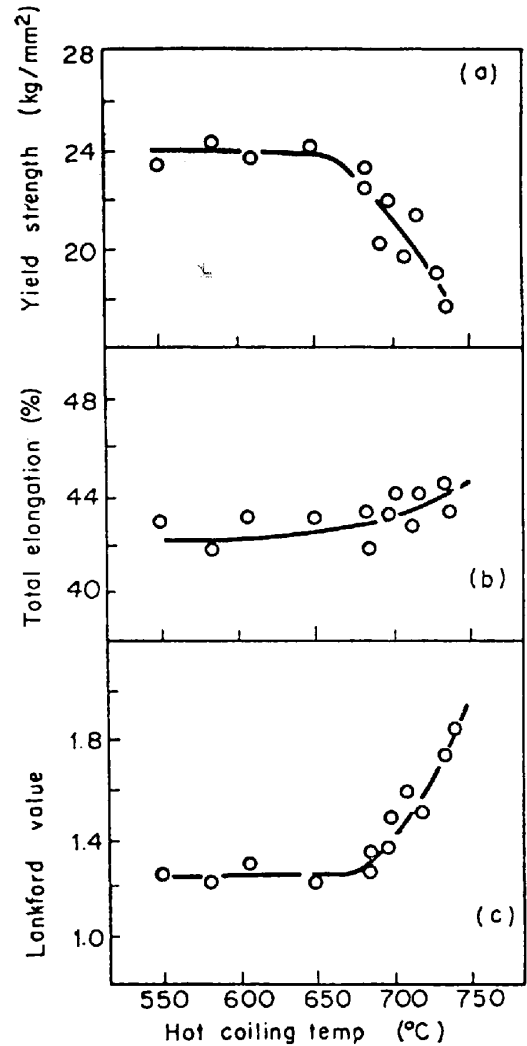


Fig. 17. The effect of K values on mechanical properties of specimens heat-treated under heating cycle 700°C or 850°C and then temper-rolled by 1%.



K value : 0.08~0.12  
 N content : 12~16 ppm  
 Bending radius : 1000 mm  
 Cyclic bending : 50 times

Fig. 18. The effect of hot-coiling temperatures on mechanical properties of specimens heat-treated at 700°C and then temper-rolled by 1%.

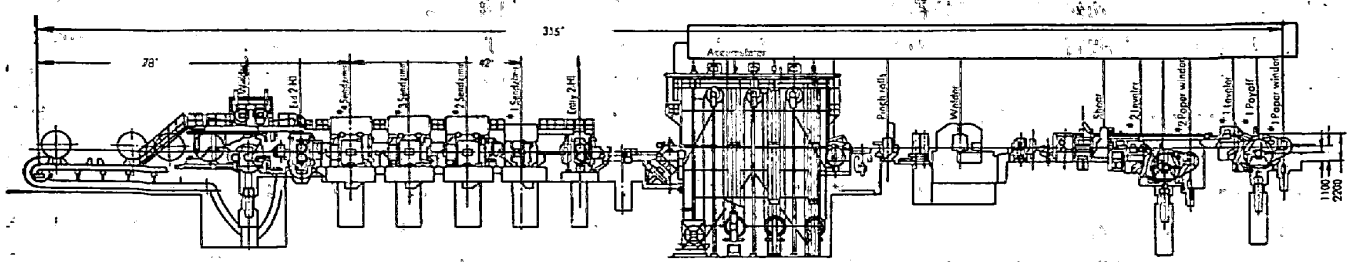


Fig. 19. General arrangement of sendzimir, tandem mill.

- 1 Back-up roll
- 2 Intermediate roll
- 3 Work roll
- 4 Strip
- 5 Work roll bending equipment

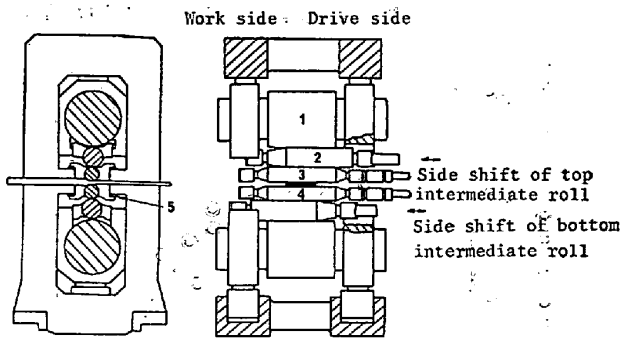


Fig. 20. HC-mill with intermediate roll shift and work roll bending.

2.4 製管法

継目無鋼管の分野では、まずCC素材よりの製管法が今後の課題である。すなわち、最近では製鉄所でのCC化比率は次第に向上してきているが、継目無鋼管の素材のCC化の割合はまだ低すぎると言える。このように板や線材の素材に比して継目無鋼管のピレットCC化が遅れたのは、従来法である穿孔圧延機（ピアサー）においてCCの鑄造組織のままのピレットは疵が発生しやすいためである。

また一方、丸断面のCC素材を鑄造する技術よりも困難性があるためである。したがって現在では、直接製管できるような丸断面のCC素材を製造する技術と、一度角または矩形の断面のCC材を鑄造した後何らかの方法で断面を円形にするとともに若干の鍛造比を与えて穿孔圧延に適するようにする二つの方法が推進されているが、将来像としてはもつと新しい外の方法が開発されるかも知れない。そうしていずれにしてもCC工場と製管工場の直結が実現するのではないだろうか。また、熱間圧延による継目無鋼管の製造法の現在の主流は、プラグミルとリーラーを有する圧延ラインであるが、小径継目無鋼管の圧延ラインは現在でも採用されているマンドレルミルの全盛となり、完全な自動制御のできる新しいマンドレルミルが開発されるものと思われる。さらに最終工程に属するストリッチレデューサーにおいては現在よりももつとスタンド数の多いストリッチレデューサーが採用されるのではないか。一方、このようなストリッチ

レデューサーでは管の両端で張力の充分にきかない部分が発生し、管端の厚肉化の現象が避けられない。したがって、レデューサーの各スタンドの回転数を制御して厚肉化の減少を計るような試みが現在も行なわれているものと思うが、将来像としてはさらにもつと前進したレデューサーの手前で管を継ぎエンドレスの状態での絞り圧延が出現することも考えられる。

中径継目無鋼管の圧延ラインは、マンドレルミルでは設備費があまりにも高価につくが、通常の場合現行のプラグミルがt/hのネックになる傾向にあるので、両者の中間的なマルチスタンドプラグミルが研究されている。このマルチスタンドプラグミルは、アイデアとして米国では検討されているが、まだ世界中どこにも実機が建設される段階には至っていないが、近き将来においてはこのようなミルの実用化も考えられる。

大径継目無鋼管の製管法は、現在はエルハルト穿孔法とホットピルガーミルを組合せたものが多いが、今後はこれに代る製管法が開発されると予想される。

すなわち、例えば大径の中空鋼塊からレックナーミルのごとき圧延機により鍛造比を与えた製品が作られると思う。ただし、現在知られているレックナーミルにはいろいろ欠陥も考えられるので、もつと改良を加えたものとなる。

次に、特殊鋼やステンレスの小径薄肉引抜鋼管は今のところユージンセジュール押出法による押出素管からコールドピルガーまたは冷間引抜により仕上げられているが、今後においてはもつと小径の丸ピレットを素材にして高速高能率の小径薄肉鋼管を押出すことが開発され、次工程の冷間加工は最少必要限に止められるようになる。

さらに、鋼管の冷間引抜は現在ではダイスとフローティングプラグによる多本引（3本引）などが主流となっているが、今後は連続式の高エネルギー、高圧下率の完全自動化したコールドピルガーミルに置換えられるかも知れない。

溶接鋼管の分野では、超高速の電縫管の製管機、あるいは多ストランドの電縫管ミル、さらには、現地で組立可能なスパイラル溶接管製造設備、あるいは船舶の中に組み込まれ、世界各地に出張して溶接鋼管を作る移動工場なども夢の一つではないか。

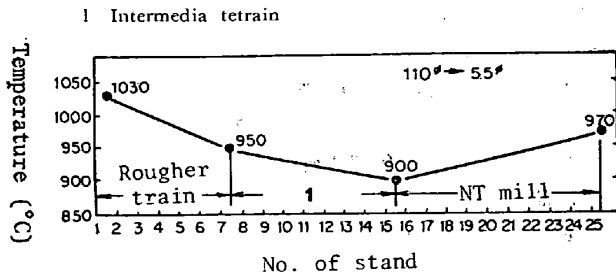


Fig. 21. Temperature variation at rod mill.

## 2.5 線材の圧延と引抜

古い線材の熱間圧延ミルでは細い線材の熱間圧延は温度の降下が著しくて困難であったが、最新型の線材ミルでは5.5φ程度で時速約200km/hで新幹線なみの圧延速度であり、言い換えれば3600m/minに達し、次のFig. 21に示すようにむしろ後半では加工熱のために温度が上昇する傾向にある。したがって細い線材の圧延時の温度の問題はなく、むしろ捲取方法などのコイルのハンドリングの解決にまつものと言える。さらにまた、ダイレクトクエンチングや無酸化状態での線材圧延が可能になると思われる。さらに線引作業の分野では完全無人に近い伸線工場が建設されるとともに超高速の伸線機などが出現しよう。また、一方、従来のごとき穴ダイスを用いた連続伸線機とは発想を異にした、1パスで非常に高い減面率を与えることのできるコールドピルガミルや静水圧押出を応用したエキスドルジョンドロイングなどがもつと広範囲に利用されるようになる。

## 3. 塑性加工理論の将来像

塑性加工の理論のあり方または今後の発展や将来像を考える場合三つの見方がある。

すなわち、一つは現在研究の完成または確立した理論よりももつと高度の新しい理論の開発や研究ということである。

その二は、現在は理論的に取扱われておらず経験的に対処されている分野への既成の理論の活用や応用ということもある。

その三は、実際の生産現場が塑性加工の基礎的な理論すら無知であるために現象の解析や対策が試行錯誤的に行なわれている場合などがある。

さて、塑性加工理論の将来像といえば普通は第1の場合を意味すると考えられる。塑性学の基礎はテンソル解析であることは良く知られていることであるが、実際の問題をこのような手法で解決された事例はほとんどなく、一般には応力-歪関係として全歪理論、または歪増分理論と降伏条件、ならびに応力の釣合式や適合条件式などを連立させて解かれるのが普通である。

このような方法によつて、板の圧延あるいは軸対称の問題などの二次元問題として取扱つても実用上差支えない方面は最近では研究しつくされたような観もないとは

言えない。

一昔では、このような分野でも塑性加工の理論や圧延理論は実用にはならないと考えられていた時代もあったが、最近ではオンライン、オフラインのコンピューターの活用が普及してきたほか、理論を用いるための変形抵抗の研究も完成して、塑性加工の理論の有用性が実際に認識されるようになってきた。

すなわち、以前はたとえば板の二次元圧延理論の研究ではKARMANの微分方程式を正確に数式的に解くことはできないので、近似的に、解析的に解く方法の研究が主流を占めていた時代もあった。

KARMANの微分方程式のHillの解

KARMANの微分方程式のHuberの解

TSELIKOV'Sの方法

NADAIの方法

などがそれである。

しかし、近年ではコンピューターを利用することで微分方程式自体を解くことは問題解決の重要手段ではなくなつたので、少くとも純研究としての分野では、このような努力は余り価値のないものとなつたが、理論を背景にしたオンラインコンピューターコントロールなどを代表例として、圧延理論は必要欠くべからざるものとなつてきた。

しかし、三次元塑性理論の対象になるようなプロセスあるいは変形中の付加剪断歪の割合が大きくてそれを無視することのできない変形過程といった分野は今後の理論の発展が大いに期待されている分野である。

一般には、三次元塑性理論をもとにした有限要素法などを用いてアプローチする方法が検討されているように思うが、普通の方法ではたとえばコンピューターを用いてもプログラムの量であまり膨大となり、よほどの大型コンピューターでないと処理しきれないとか、あるいはまた、そのようなプログラムの開発があまりにも長期を要するとかいつた事情で実用化には非常に問題がある。

したがって、三次元塑性理論をある程度近似するとか剪断変形を無視またはその取扱法を近似化するなどの手法の助けを借りた上でコンピューターを利用する方法が今では多く採用されていると言える。

そのような意味では、コンピューター以前の一昔に二次元理論での前述の各種の近似法が価値があつたのと類似性があるともいえるかも知れない。

ゆえに三次元圧延理論の将来像といった夢を言うならば次のようなことが考えられる。

コンピューターが大幅に進歩してより安価で大容量のコンピューターが容易に使用できるようになることと同時に、ある種の自動プログラミング手法が開発され膨大な処理が可能にならないかということである。

あるいはこのことを別の表現で述べるならば、次の三つの技術が完成され総合されることであるかも知れ

ない。

(現 在)	(将 来)
人間がプログラムを作る ↓ コンピューターが計算する	人間がプログラムを作る ↓ コンピューターが本番用のプログラムを作る ↓ 超大型コンピューターが計算する

すなわち、

1) 塑性理論の分野では、剪断変形を含む三次元塑性理論と有限要素法の組合せのある種の定式化が行なわれること。この場合の定式化は、問題の対象がいろいろ異なつていても常に応用可能なような汎用性のある定式化でなければならない。

2) 塑性理論とコンピューター技術の協力の下で各々の実際のケースに対して、上記の定式化された手法を応用するための別の定式化された手法が完成し、それを用いて自動プログラミングを行うための汎用のプログラムが開発され、それによつて実際に計算機に使用するプログラムがコンピューターによつて作られねばならない。おそらくこのような技術やプログラム自体の開発や作成には年をもつて数える月日を要するとともに、そのプログラムで実際の計算機に使用する自動プログラムの作成にしてもコンピューターでもつて数時間を要するようなものかも知れない。

しかし、いつたん完成した時には充分実用化に足るもの言えよう。

3) 最後に、このようにして作成されたプログラムにより実際の計算をするにも、大型の計算機で数時間を要するといったことでやはり大型計算機が安価に利用できる日の到来を必要とするかも知れない。すなわち、以上の事を要約すれば、上記のごとくコンピューターを二段に使用するということであるかも知れない。

以上は第1の見方の考察であり、大学などの公共研究機関や企業内では若手研究者などの今後の活躍に期待するところではないかと思う。

さて、次に第2の見方を考察して見よう。すなわち、孔型圧延の孔型設計やパススケジュールのようなものは現在では一般に理論の対象ではなく、現場的経験の積上げによると考えられている分野である。

我々のグループでは、剪断変形を無視できる場合に半有限要素法的三次元塑性理論ともいうべき手法によつてコンピューターを使用して、熱間製管ラインの孔型設計や回転数の設定法をコンピューターにより計算し実用化している。また、コールドピルガーのような特殊な孔型設計もコンピューターによつて計算し多大の効果を上げているが、一般にいわれる線材や条鋼、型鋼の孔型設計

を理論をベースにしてコンピューターにより設計するには至っていない。

このような分野は、基礎理論としては既開発の手法を用いて今後の発展が期待される分野である。

また、このような孔型圧延のさいの中立点(作動半径)や圧延荷重の予測法などの理論も一部開発されているものもあるので今後はこのような圧延ラインの理論をベースとしたコンピューターコントロールへの道が開かれるものと思う。

これらは、いわば塑性加工理論の近き将来での未来像といつたものであり、主として企業での中堅クラスの技術者や研究者の活躍に期待されるところでなかろうか。

第3の観点はしばしばよくあることである。すなわち、生産現場は日常の業務や生産管理や労務管理に忙しく、技術的な勉強は怠られがちとなり、部門や企業の規模によつては塑性加工理論の基礎的な事項すら理解されずに試行錯誤により処理されている場合が少なくない。

このような事態に直面すると、塑性加工技術というのは特殊な技術なのか知らんと錯覚を起こしそうになる。

その理由を考えるに、学者の書かれた教科書はそのような対象者には残念ながらあまりにも高級すぎ、最少限度の必要な基礎理論が判りやすいように解説された書物がないことになると思われる。これは実は科学工業の発展のためには誠に無駄であり惜しいことである。

このことは、第1点のような高度な理論の今後の発展が重要であることと同じく、塑性加工の理論の底辺を拡げるために忘れてはならない重要事項であり、将来像としてはもつと画期的な進展が望まれるところである。

その手段としてはいろいろのことが考えられようが、生産現場の技術者の指導や教育に関する問題とも言えるので、比較的経験の深い上級管理職の技術者の努力が要請される分野であろう。

#### 4. 自動化とコンピューターコントロール

##### 1) オンラインコンピューターコントロール

さて、前節に述べたことは塑性加工理論とオフラインのコンピューターとの関連に重点があつたと思うが、コンピューターの活用には衆知のようにオンラインコンピューターによるプロセス制御の問題がある。

##### 2) 現在における鉄鋼業のプロセスコンピューターコントロール

一貫製鉄所の設備と操業は、原料ヤード、焼結工場、コークス工場から始まり、高炉から転炉へと続く上工程部門と分塊工場に始まり熱間仕上鋼材や冷間仕上鋼材の加工部門に至る下工程の部門に大別される。

さらに、鉄鋼の塑性加工という見地からすれば線材の二次加工すなわち伸線や冷間鍛造や転造のような分野までが含まれるが、我国ではこのような二次加工分野は高炉メーカーでは直接取扱わずに別の会社が行なっている

のが普通である。

さて、このような鉄鋼業の各プロセスにおいてもいずれも多かれ少なかれコンピューターコントロールが採用されているが、上工程では操業に関する理論との結びつきがまだ完全とは言えず、また、コンピューターによる自動操業の割合も必ずしも高いとは言えない。

しかし、下工程においては圧延理論との結びつきも密接であり自動化率も極めて高く、コンピューターコントロールの役割は極めて大きい。

一方、前述の鉄鋼の二次加工の分野では現在はほとんどプロセス制御と言ったことは検討されていないと言つても過言でない状況である。

3) 下工程でのコンピューターコントロール<sup>16)</sup>

製鉄所における下工程の塑性加工はいろいろの分野があるが、これを総称して圧延工程ということができると考えられるので、圧延のシステムということで述べて見たいと思う。

さて圧延のシステムといえは次の三つの面がある。

- (1) トータルシステムにおける圧延のシステム (生産管理と情報処理)
- (2) 圧延理論の応用としての圧延のシステム (操業技術の近代化)
- (3) 省力自動化の推進としての圧延のシステム (個々の自動化機器のネットワーク化)

ここでは、上記の(2)と(3)について述べよう。

製鉄工場のミルラインは一般に単重の非常に大きな材料を取扱い、かつ多くの場合高温での作業を伴うので現在では手作業ということは考えられずすべて機械力によるハンドリングであり、直接的な手作業はほとんど存在

していない。したがって、ミルラインのコンピューター化とはオペレータのハンドル操作を自動化したことに相当し、主たる目的は品質の向上、生産性の向上などのごとく手動運転法では達成できなかったような高度の操業を行なわせしめんとするためのものであり、直接的な人員節約の点はあまり大きな目的とは考えられない。しかし、精整ラインにおいては、材料の寸法やきずの検査、刻印、マーキングなど、つい最近までは手作業を要する箇所も少なかったので一般に圧延工場の作業員の定員はミルラインに比すると精整ラインの方がはるかに多い。したがって最近のように、省力化や近代化が叫ばれ、かつ各種の自動機器の開発が進んできた時代になると個々の手作業を自動化する専用の機器を要所所に配置し、まずコンピューターが全ラインのトラッキングを行ない、そのトラッキングシステムの下でコンピューターと個々の自動機器の間の入出力の接続がある一種のネットワークシステムが導入される。この場合全くの無人化ということはもちろん技術的に可能であったとしてもコストパフォーマンスなどを考慮すれば、全作業の一部はオペレータによる手動 key-in のごとき方式を併用した方が適当な場合もあるので case by case によつてある程度のマンマシンインターフェースが採用される。

さて、このような精整ラインのシステムはミルラインのシステムと異なり主たる目的を人員節約に置かれている場合が多い。そして手作業によるミスの防止や工程管理上の情報収集の正確、かつ迅速性を保証し納期遅れの解消などに役立つている。

今日では主力の圧延工場のコンピューター化は著しく進み、コンピューターなしでは圧延工場が操業できない

- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1 Slab rolling                             | 10 Automatic stamping machine |
| 2 Hot strip rolling                        | 11 1974/1975                  |
| 3 Plate rolling                            | 12 October                    |
| 4 Shear line for plate                     | 13 November                   |
| 5 Cold rolling                             | 14 December                   |
| 6 Operating rate                           | 15 January                    |
| 7 Application rate of automatic operation  | 16 February                   |
| 8 Automatic plate length marking equipment | 17 March                      |
| 9 Automatic stencilling equipment          |                               |

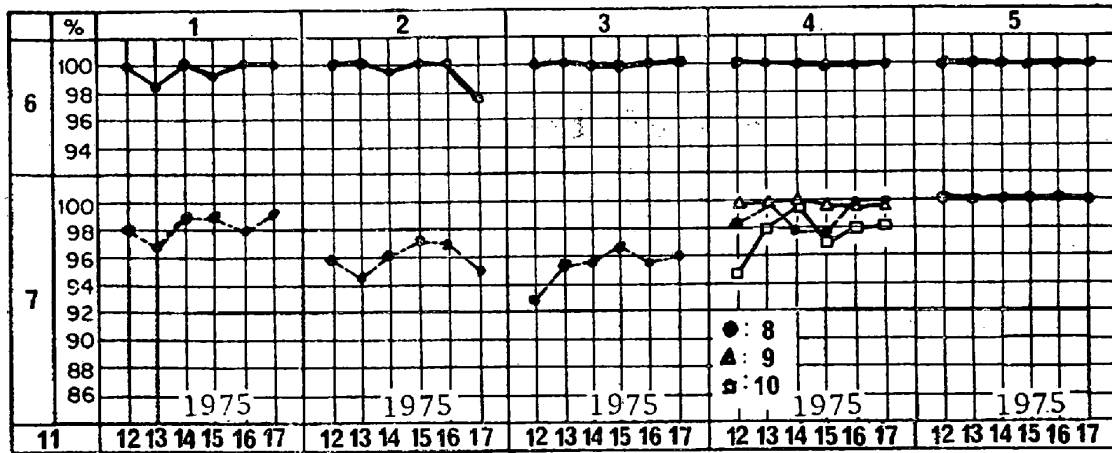


Fig. 22. Operating rate and application rate for automatic operation of computer control for rolling mills at Kashima Steel Works.

ような時代になつてきた。

Fig. 22 は、鹿島製鉄所における主力圧延工場に設置されているコンピューターシステムの稼働率と自動圧延率を一例として示した。稼働率とは、コンピューターシステムが何らかの理由でダウンせずに稼働していた割合を示すが、Fig. 22 のように昨今は 99.7% 以上の稼働率を維持するのが建前となつてきた。ここで考えられることの一つはオンラインプロセスコンピューターにおいてシステムダウンの場合の問題である。以前はシステムダウンの時は手動運転を行なつて操業を続行するとの考え方であつたが、最近では手動運転を行えば品質の低下ならびに工程管理上の混乱を招くのでむしろ思い切つて生産をストップし操業はコンピューターと運命をともにすることにして速やかに対策を講じてシステムのレスタートを行ない、コンピューター運転を再開する方が適当であると考えられるようになった。Fig. 22 の自動圧延率とは材料の圧延本数の内でコンピューターによる圧延作業が行なわれた場合を示し、残りは何らかの理由により手動圧延が行なわれたことを意味する。すなわち、試圧品や新材質、ならびに新しい方式の圧延法のテストなどのごとくコンピューターのシステムに入っていない操業はもちろん手動圧延によるわけであるが、Fig. 22 のごとくその割合は極めて少ない。

#### 4) 鉄鋼の塑性加工のコンピューターコントロールの将来像

さて、以上の議論を集約すればコンピューターコントロールの開発から実用化ならびに保守と改良と言つたことは次のごとく大別される。

- (1) 基礎になる塑性加工理論の開発または応用
- (2) システムとしての開発段階
- (3) 現場操業への定着の段階 (人間コンピューターの役割)
- (4) でき上がったシステムの改良や増強の問題

上記で人間コンピューターの役割と言つたのは、100%の自動化はコスト高となるので一部はコンピューターシステムを理解した人間、あるいはオペレータに任せられた部分があると言う意味である。

以上の現状を踏まえ、この方面の将来像を次に考えてみることにする。

##### (1) 基礎になる塑性加工理論の開発と応用の分野

孔型圧延などの三次元塑性論の対象と考えられる分野でのコンピューターコントロールが近き将来に期待される未来像である。

先に述べたようにこの方面の塑性加工理論としては、オフラインコンピューターによる相当に膨大な処理を必要とする技術を背景とすることになるであろうことは予想に難しくない。しかし、このようなシステムをそのままオンラインコンピューターコントロールに採用することは当を得た手段であるとも考えられない。

したがつて、そのような高度の理論の結果を損ねることなくオンラインに使用できるような簡易化や近似化が要請されることになり、その点がこの分野での理論を基にしたコンピューターコントロールの開発の要点になるのではないかと考えている。

##### (2) コンピューターコントロールシステムの開発について

塑性加工分野のコンピューターコントロールシステムを開発する段階について、今後の発展や予想される事態などにつき考察してみよう。

その一は、高度の制御理論の実用化である。すなわち、前述したように圧延理論や塑性理論が実操業へ実用化されたのはオンラインコンピューターのお蔭であるが、現在大学の制御工学部門、あるいは制御工学に関する各学界などで高度の数学をベースとした制御理論が研究されている。しかし、今日の段階ではこれらの理論研究は産業界特に鉄鋼業界に応用実用化された事例はほとんどないと言つてよい。言い換えれば、制御工学の学者と業界の技術者の間には著しい断層が存在している状況である。その理由は制御工学部門が比較的新しいので、その部門の出身者が企業に入つてから年限が短く、学問と技術の結び付けを推進するキャリアに到達していないこともあげられようが、その外、制御部門の学界の指導者と業界の指導者のコミュニケーションの悪さも最も大きな理由であろう。しかし、ごく最近においては、若干の制御工学技術者の手により最適化理論などを基にしたオンライン制御システムの実用化などが糸口に着き始めたように考えられ、今後は圧延のシステム工学に高度の制御理論がオンラインコンピューターによつて実用化される時代が開かれて行くこと期待され明るい希望が持てよう。

その二は、NDI などその他の局所的な省力自動化の機器の進歩に応じてコンピューターにリンクしたネットワークシステムのより一層の発展であろう。言い換えれば計測工学の圧延システム工学への結び付きである。この方面の今後の開発発展に関して一つ考えさせられる点がある。それはややもすると、一台の親コンピューターの下に各種の全く異なつた種類の機器を直接リンクせんとするアプローチがしばしば見られることである。

しかし、このような各種のNDIや計測機器などは本来非常に専門分野を異にする技術を集約したものであるから、一人のコンピューター技術者がその関連するすべての機器の専門内容に充分理解を示すことは個人の能力の限度を超える場合も少なくなかろう。したがつて、このような場合は局所自動化のための専門のDDCミニコンピューターをそれぞれ配置し親コンピューターは幾つかのDDCコンピューターとネットワークの下で端末の自動専用機器にリンクする方式を採用し、専用機器とそれにリンクするDDCミニコン、またはマイクロコンピューターの範囲はその専門家に開発や作成を依頼してこれらを

総合的にまとめるシステム作りが適当でないか。すなわち、Hierarchical Approachの方が若干Hardの費用が増大しても良い策ではないかと考えられる。

### (3) 現場へのコンピューターコントロールシステムの定着

塑性理論によるコンピューターコントロールの実用化にあたってはもちろん研究陣のシステムや数式モデルの開発などの努力が必要であることは言うまでもないが、このような新しいシステムを現場の工場において完全に実用化するためには工場のスタッフの適切な協力と努力がなければ容易にできることではない。

その意味で塑性加工の技術者とコンピューター技術者の相互関係が重要になってくる。

圧延作業の95~100%がコンピューター運転になるような時代が到来してきたので、操業技術に関する圧延技術者は同時にコンピューター技術者であることが次第に要請されてくる。このような意味において今後は、圧延工場長が圧延技術者であるときは、副工場長はシステム関係の出身者である組合せ、あるいは逆に工場長がシステム出身者のときは副工場長は圧延出身者といった組合せの人事が適当と思考される。

従来は、各企業体の中でコンピューターを取り扱うのは特定のシステム部門に限定されていた傾向にあるが、今後においては、コンピューターは企業内のすべての部門において取り扱われるように拡大を計らねばならないと考えている。

### (4) でき上ったシステムの改良や増強の問題

圧延工場でのコンピューターシステムはいまや開発段階を過ぎて活用段階に入ったといえる。このような時代になると開発段階とは異なつた意味の問題が発生してくる。すなわち、システムの改良や増強時の問題である。その第一は改良や増強時にコンピューターシステムを止めないための対策あるいはコンピューターストップがやむを得ない場合でもダウンタイムを極力減少することである。以前はこのような場合のダウンタイムは3~6カ月と言われていたが、最近では早い場合は1~2日、長くても1.5ヶ月位で大規模の改造が完成するようになった。そのためには、コンピューターメーカーの工場内でのオフラインのデバクなどのテストが充分行なわれていることが必須の条件となると考えられる。その第二は、もしも改良後の全システムを全く白紙に新たに製作する場合

はもつと良い方式が考えられたとしても、すでに既成の事実の上に立ち稼動していることを考えれば、たとえばHard的な費用は増大しても別のCPUを導入する方が得策と考えられる場合も少なくない。また、その際に変更や切換えのためにシステムエンジニアの工数がかからないようにすることも大切である。しからずんば工場のエンジニアはしよつちゆう模様変えに明け暮れするようになってしまいかねない。

したがって今後は、コンピューターシステムの開発段階で将来において発生するであろう増強や改造をできるだけ予測してその時点での対策の取りやすいようにあらかじめ配慮した設計を行なうことがシステム設計者の大切な能力と判断される時代になっていくのではないか。

## 5. 結 言

未来を予測することは著者などにとつては容易ではない難問であるので、ある程度は現状を述べその問題点から近き将来を予想するとともに、将来像としては夢のような無責任な意見を述べたが、皆様の何らかのご参考に資する点があれば幸甚であると考えます。

## 文 献

- 1) 五弓: 鉄鋼技術情報, 33 (1973-3) 3
- 2) 五弓: 伸銅月報, 20 (1969) 1
- 3) 岡本: 第29, 30回西山記念講座, p. 85
- 4) 岡本他: Proceedings ICSTIS, Supple. Trans. ISIJ, 11 (1971), p. 926
- 5) 岡本, 林: Sheet Metal Industries, May (1973),
- 6) 林: 日本金属学会講演概要, 第71回(Oct. 1972), p. 342
- 7) 林: 日本金属学会講演概要, 第72回(Apr. 1973), p. 174
- 8) 林: 日本金属学会講演概要, 第73回(Oct. 1973), p. 355
- 9) P. C. HUNCOCK and W. T. ROBERTS: JISI, 205 (May, 1976) 5, p. 547
- 10) 長島, 武智: 鋼の塑性加工 (鉄鋼工学講座6), 朝倉書店 (1969), p. 89
- 11) 渡辺, 他: 鉄と鋼, 57 (1971) 4, S 189
- 12) 岡本, 他: Iron Steel Eng. May (1972), p. 79
- 13) 日本鋼管: 日本の塑性加工, 社団法人設立10周年記念版 (1975), p. 151
- 14) 小浜: Iron Steel Eng. Apr. (1973), p. 25
- 15) 梶原: 日立評論, 56 (1974-10) 10, p. 921
- 16) 岡本: 塑性と加工, 16 (1975-9) 176, p. 793