

厚鋼板（厚板）はどのようにつくられるか

—厚板と厚板圧延の操業プロセスの紹介—

平部謙二
Kenji Hirabe

NKK鋼材技術開発部長

An Aspect of Plate Rolling Technology

1 はじめに

回転するロールの間に金属材料を通して断面積、あるいは厚みを減少せしめる加工法を圧延という¹⁾。

圧延は鍛造を連続的に行う特別な場合といえる。金属の塊のハンマーによる加工から圧延機による加工へと発展したのは15～16世紀であって主として貨幣や装飾品の圧延が行われた。天才レオナルドダビンチのデッサンの中にも2本のロールの間を通して板材をつくる図のあることも興味あることである。

その後19世紀には蒸気機関の発達により急速な変化が起こり、ロールおよびハウジングは大型化し、2段圧延機から多段圧延機への考えも芽生え、300馬力の圧延機も出現している。またこの頃ベッセマーによる転炉の製鋼法やジーメンスとマルチン兄弟による平炉製鋼法が発達して鋼が安価に大量生産できるようになり、圧延工場の規模も大きくなり、20世紀に入って錫メッキ板、自動車、鉄道用材料、造船用材料などを中心として一大飛躍をとげた。

即ち、板を例にとれば板幅は広く板厚は広範囲にわたり、一定の長さの切板だけでなくコイル状に巻いた帯板を1台または数台の圧延機で連続して圧延するようになった。

第2次世界大戦前には米国で開発されたホットストリップミルにより、板材の圧延の潮流は大きく二つに分れた²⁾。通常6mm以上を厚板と呼び、それ未満を薄板と総称しているが、薄板はホットストリップミルで圧延し、厚板はプレートミルにより圧延されるようになった。但し、厳密な定義区分があるわけではなく厚板でも4.5mmの広幅を製造できるし25mmといった厚板をホットストリップでコイルに巻く例もある。要は、板を商品とした時の寸法、用途、数量により使い分けられているのが現状である。

薄板は生活水準の向上を目的とする主として自動車、電気製品、家具といった耐久消費財の需要に応える分野であるのに対し、厚板は車両、橋梁、建築材料などの一般用、造船用、ボイラー用、フレーム用などがある。これら厚板の多くは25年50年といった長期に供用される社会資本財として重要な役割を持つ。

厚板圧延機は第2次大戦前のラウト式三重圧延機にかわって四重圧延機（4Hi）がNKK鶴見に1954年米国より初めて導入された³⁾。

4Hi式仕上げ圧延機はすべて米国から輸入されていたが、1965年に稼働した住金和歌山の分塊・厚板のコンビネーションミルは国内メーカーによるもので国産第1号といえる。

厚板圧延機はその後大型船への需要増大から規格が厳格化され、続々と設備更新された。高炉5社だけで11工場が稼働又は設備新設され、年間1500万tonの生産を行うに至る。多岐にわたる厚板の寸法用途のため、ホットストリップの如き多スタンド連続ミル化には不向きで、4Hi型ミル（四重でかつ圧下スクリュウの長いハイリフト型圧延機）で、かつ広巾化の一途をたどった。現在高炉一貫メーカーの大型厚板工場のうち5500mm巾クラスが4工場ある。圧延機スタンドは400ton（片側）にもなり、補強ロールでは直径2200mm重量200ton超という巨大なものである。圧延荷重も当初4Hiの4000tonクラスから現在9000tonクラスにも大型化している。このように大型化することにより厚板圧延機は、1基又は2基の圧延機で生産されるのが普通で、ホットストリップの如く限りなく連続化する昨今の動きとは、生産技術の進歩の方向が異なってきている。（図1）

これら厚板の最近の生産は、図2の如き生産量でピーク時の約50%であり、且つその生産品種構成は図3の如く、船舶、建設、産業機械等が厚板の主な用途である。1971年当時30%を

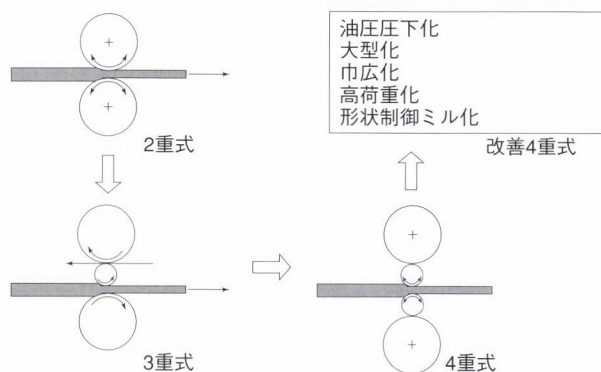


図1 厚板圧延機の進展

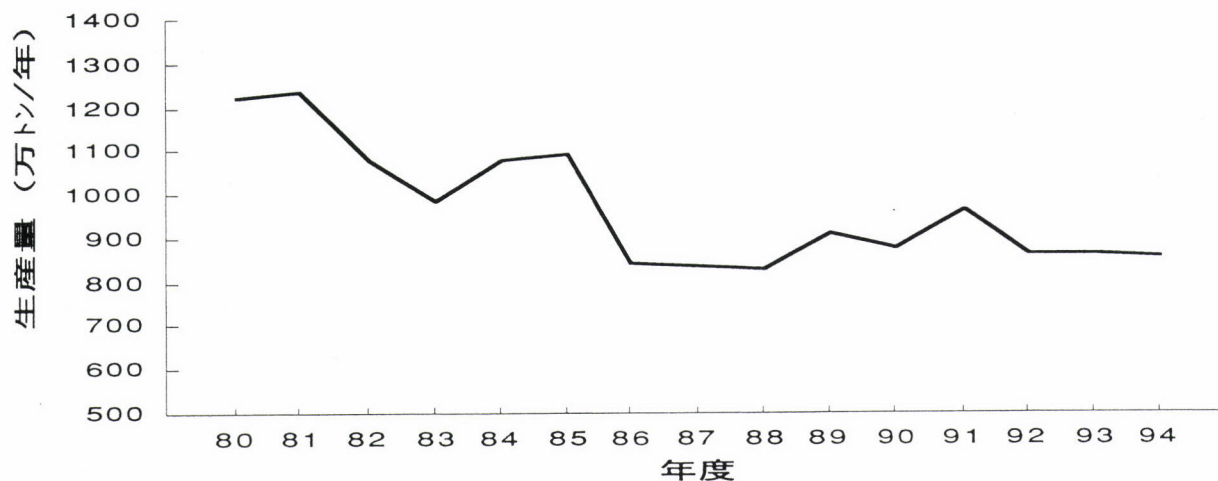


図2 生産量推移 (スラブベース)

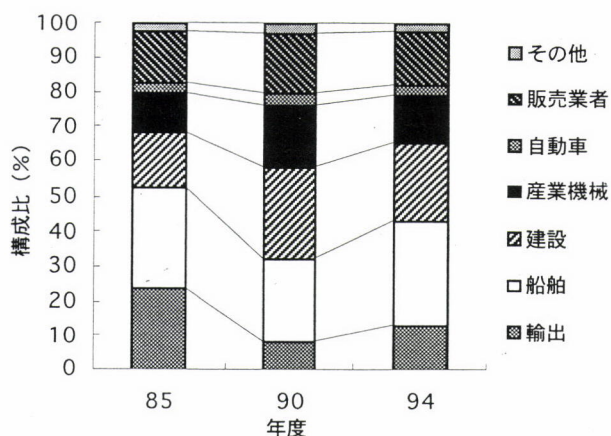


図3 品種構成推移

超えていた船舶用が若干減少しているが、依然比率は最も高いが建設用（建築・土木）の比率が増加してきている。両者を合わせると約50%を占める⁴⁾。船舶の用途によりミル巾が5500mmにもなり、且つ1615mmラインパイプ用の大径UOE溶接管素材ミルとして、大荷重に耐える高荷重ミル化して進歩した結果、日本厚板ミル群は現在世界をリードする生産と設備保有をなし遂げている。

本報告では上記の厚板の歴史の中で最近の圧延操業技術の研究開発を概説したものとする。どのような圧延技術厚板製造技術が行われていて、寸法精度を中心にどのような事を行っているか、今後どのような商品をつくるためにどのような厚板圧延技術が変化していくか、等を重点に解説する。

2 厚板の製造プロセスと圧延技術の進歩の現状

2.1 厚板の製造プロセス

厚板の受注から出荷までのプロセスは、

- (1) 需要家から注文をうけ、製造工場に注文内容を送るまでの営業部門、第1次品質設計部門、納期調整部門
- (2) 製作依頼をうけとり、製造に結びつけるまでの製造工場

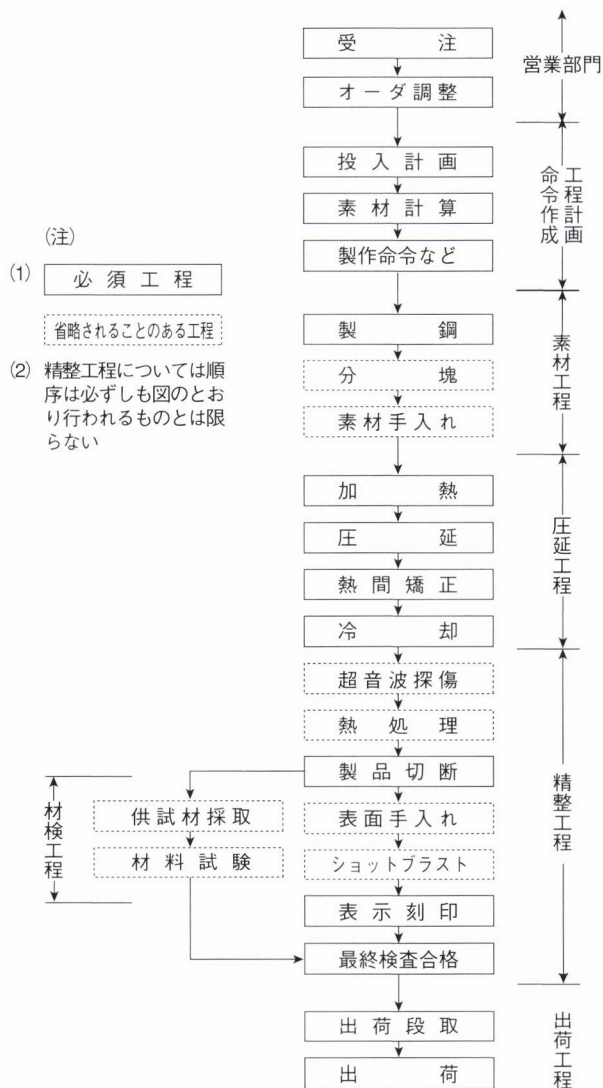


図4 厚板製造工程図

における詳細品質設計部門、製作命令（素材設計を含む）の準備を行う部門

- (3) 製造命令により実際の製造を行う部門、製鋼、分塊、あるいは連続鋳造、圧延部門

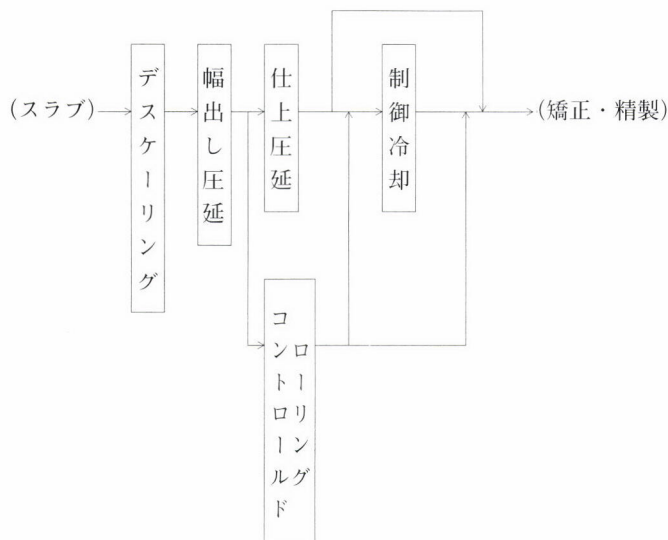


図5 圧延作業手順

- (4) 製作されたものを検査、出荷するまでの検査部門、納期出荷管理部門

に大別される部門を通過する。厚板の圧延を語る時受注段階まで示したのは、多品種・寸法の同時生産の制約のもとでコンピューターを駆使して材料計画を行い、スラブを圧延機まで供給しなければならぬためである。図4が詳細工程となる⁵⁾。

2.2 厚板の圧延プロセス

厚板の製造プロセスの中で、多種の寸法をどのような方法で圧延しているか。又現在圧延機1基方式又は、粗仕上の2圧延機方式が厚板の圧延プロセスである。巨大な圧延機で種々の機能を1台又は2台の圧延機に装備し、4.5mm～350mmという種々の厚さと巾1000～5500mmの各種の巾の厚鋼板を圧延する手順を次に述べる。

厚板の寸法精度や品質は、前段の加熱炉とこの圧延機、制御冷却設備、熱間矯正機で決定づけられるが、特に圧延機は

重要である。

2.2.1 圧延作業⁵⁾

厚板圧延作業は、主たるものは図5のようになる。加熱炉で生成する一次スケール、あるいは圧延中にできる2次スケールを除去するデスケールリング、素材の幅あるいは長手を圧延幅に見合う寸法まで引延す幅出し圧延、最終的な製品の厚みを出し形状を整える仕上げ圧延があり、さらに仕上げ圧延後特定の温度まで制御した冷却速度で冷却する制御冷却により成り立っている。

- (1) デスケールリング：デスケールリングは最近では2000MPaに近い高圧水をノズルにより噴射し、スラブや圧延中の鋼板に衝突させることにより行われる。
- (2) 幅出し圧延：厚板の圧延作業の大きな特徴の一つは、圧延作業中に圧延素材の軸に対して軸方向に圧延したり、軸と直角に圧延したりすることが可能なことである。これは、圧延機の前後面のテーブルのテーパードローラにより素材を転回し行っているが厚板のように定尺寸法の注文が少なく、設計図面指定寸法が主体の場合、圧延幅が自由に変えられることは必須条件である。図6に幅出し圧延の概略を示す。この図では、素材の幅 W_0 を最終的に必要な幅 W_1 に延ばす作業、即ち素材の軸の方向が最終製品の長手方向と一致するタテ圧の場合の例を示したが、素材の幅 W_0 と最終必要幅 W_1 の差が大きすぎる場合は、圧延能率や幅出し後の形状が悪くなるので、素材の長さ方向を最終製品の幅方向に転換して圧延が行われることもある。
- (3) 仕上げ圧延：幅出し圧延が完了したのち素材は製品厚、規格、品質設計により決定される目標厚みまで圧延される。この作業は圧延機および原動機的能力の範囲内で最大の圧下量がとりうる部分と、製品の形状をよくし厚み偏差

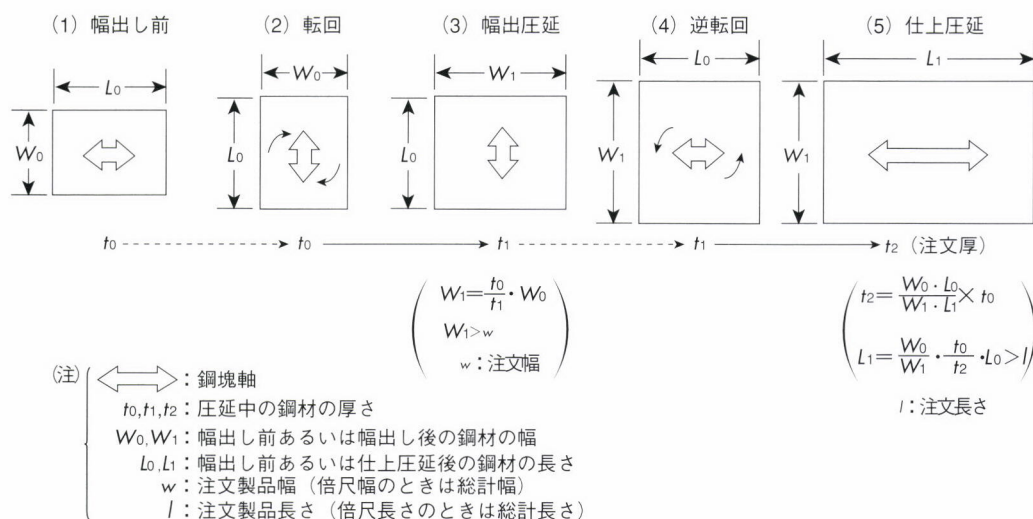


図6 厚板幅出し圧延作業

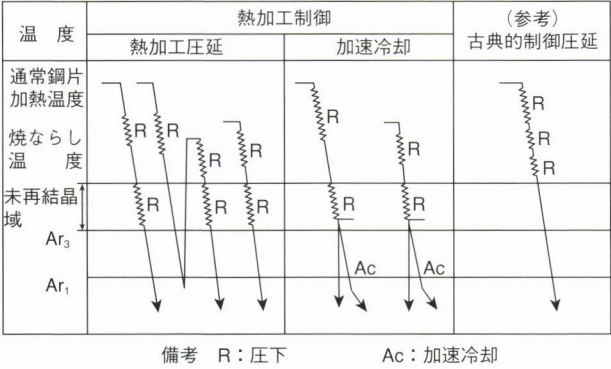


図7 TMCP (熱加工制御) 説明図

を小さくするためにロールクラウンと圧延荷重および素材の厚さ、温度などによって圧下量が調整される部分とに分けられる。

仕上げ圧延の目的は厚み偏差がなく、平坦度のよい鋼板を圧延することである。圧延材の板厚偏差はワークロールクラウンと圧延時のロールのたわみの総合された結果として生ずる。

- (4) コントールドローリング (Controlled Rolling) と制御冷却：圧延中の素材温度を調整し、最終パスの温度を低めに抑えると製品の組織が微細化し、強度の上昇と大幅な靱性の改善をはかることができる。このような圧延方法をコントロールドローリングと呼び広く行われている。又、圧延後急速に (3℃/sec~20℃/sec) 冷却し、500~700℃で冷却停止を制御する方法は、制御冷却と呼び、これも強度の上昇と靱性の改善を行うことができる。

これらを総称してTMCP (Thermo Mechanical Controll Process) と呼び1980年代に日本で開発された特筆すべき材質制御技術である。様々な組み合わせにより、各種の優れた高張力鋼板が生み出されている。そして殆どの厚板工場で現在広く採用されている。

図7にTMCPの模式図を示す^⑧。圧延の温度を低下させて圧延すると当然圧延荷重が大きくなり、強力な圧延機が必要とされる理由の一つともなる。又素材の板厚中央に、水素の影響で内部ワレを起こしやすくなるためTMCPを適用する厚板の鋼には、脱ガス処理が必須となる。

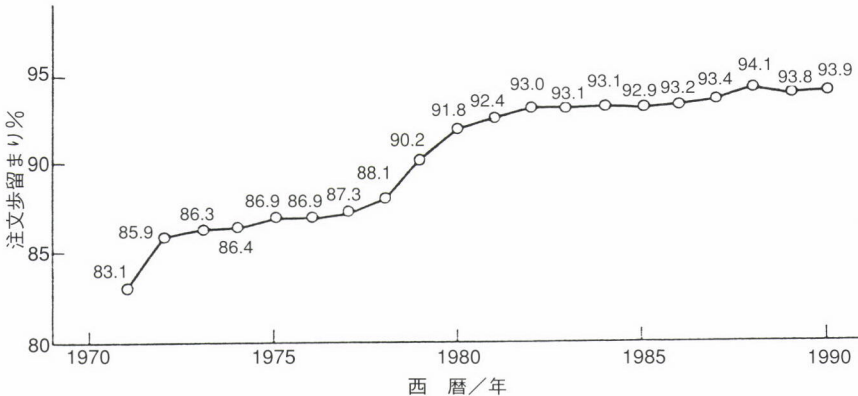


図8 日本における厚板の歩留まり向上推移 (全国平均) 鉄共研：鋼板部会 厚板分科会高炉5社 第31回 (S46年5月) ~ 第39回 (H2年5月) 厚板分科会工場操業状況による

2.2.2 圧延ロール組替作業

厚板圧延を行っていく時、圧延ロールは工具の役目として極めて大切である。ロール組替えを必要とする第1の原因はワークロールの摩耗により、圧延軸中心部と端部との板厚偏差が大きくなるため、幅広物が圧延できなくなる点である。第2はロールの表面の肌荒れによるもので異物のかみ込みキズ、はがれキズ、亀甲状の熱ワレなどがある。ロール組替えは自動組替えで10分程度で行われる。

これに対し、バックアップロールは磨耗や表面肌あれが圧延製品に与える影響が少ないので、連続使用期間は2週から1ヵ月あるいは2ヵ月に達する。ロール組替えも1回当たり数時間かかるので普通は定期修理日などを利用して行われる。

ロールの材質もワークロールでは遠心鑄造ロールが主流となり、バックアップロールは、大型鍛造ロールが使われている。

3 厚板圧延の操業プロセス技術の進歩

厚板の品質の9割方は圧延により決定づけられる。そして、同時にコストを左右することにもなる。技術の進歩を裏付ける指標として図8に歩留まり (出荷製品重量÷圧延素材重量×100%) の向上推移を示す。

この20年間に日本の厚板の歩留まりは10%以上向上しているが、その達成に貢献した典型的な技術の改善を示す^⑦。

3.1 板厚高精度化技術

1970年直前にコンピュータコントロールが導入された。初期の重要な課題は、圧延の圧下スケジュール計算であった。板厚が厚い段階では噛み込み制約やトルク制約、次いで荷重制約、製品板厚付近ではクラウン比率一定の制約下で圧下が決められるが、圧延能力を上げ、かつ所定の板厚、形状クラウンを得るための計算アルゴリズムが検討された。板厚制御については初期は板内の板厚変動を減少させるロックオンAGC (Automatic Gauge Control) が主体であったが、1975年以降、高性能大容量の油圧サーボバルブが使用可能となり、油圧圧下による高応答制御が行えるようになり、目標板厚を確保する絶対値AGCが開発された。更に近年では、厚さ計の改

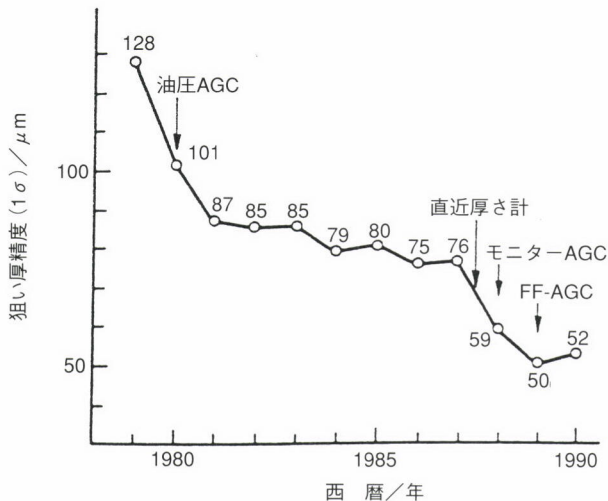


図9 厚板圧延における板厚精度推移（某ミルの例）

善も取り入れ、FF（フィードフォワード）AGCなど、AGCの改良が加えられている。図9に板厚精度推移の例を示す^{8)~10)}。

3.2 平面形状矩形化技術

四角な直方体のスラブを上から圧下を加えると、塑性変形により周辺が舌状に迫り出し、たいこ形状の厚板ができ上がってしまう。この欠点を取り除くため、従来はパーティカルエッジャーを使っていたが効果不十分であった。1970後半にはDBR（Dog Bone Rolling）圧延法又はMAS（Mizushima Automatic plan view pattern control System）圧延法といわれる平面形状矩形化技術が開発された。この原理は圧延形状を予測し、その変形量を相殺するようにスラブ厚さのプロファイルをドッグボーン（犬の骨状）に変化を与えることにより、鋼板のトップ、ボトム形状を矩形化することができる。強力で大ストロークかつ応答性の良い油圧圧下による絶対値AGCを実用化することによりなし遂げられた。歩留まりの向上は2%以上を得られた画期的な技術といえる^{11),12)}。

3.3 形状制御ミルの実用化

圧延後の鋼板の平坦度を良好にするためには、形状と密接

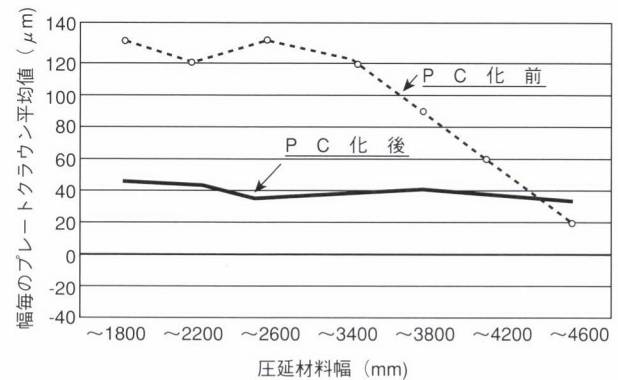


図11 ペアクロス（PC）ミルでの板幅別クラウン

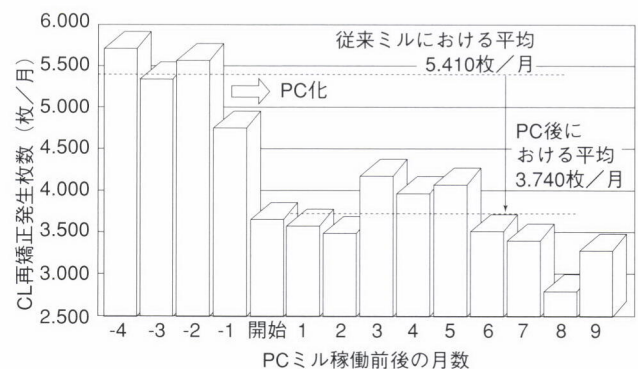


図12 ペアクロス（PC）ミルでの圧延形状の改善

な関係にある板クラウン（板端と、板巾中央の板厚差）を所定の値に制御する必要がある。又ロールチャンススケジュールフリー（「いつでも圧延可能なこと」という意味）を達成するためには、ロールのプロファイルを制御することが必要不可欠である。板クラウンは①ロールのメカニカルクラウン（摩擦と熱膨張）②圧下荷重によるロールのたわみ変形③ロールの扁平変形などにより構成される。これら諸因子の解析に基づき板クラウンを定量的に把握し形状を制御するため、1985年にはNKK福山製鉄所厚板工場にワークロールシフト付圧延機が導入され¹³⁾、ワークロールシフト量とベンダー圧力を制御することによりクラウン制御が可能となり、仕上パス付近での圧延荷重が大きくとれるようになった。又、絶対値AGCで生じる圧延荷重変化による形状クラウン変化をダイナミッ

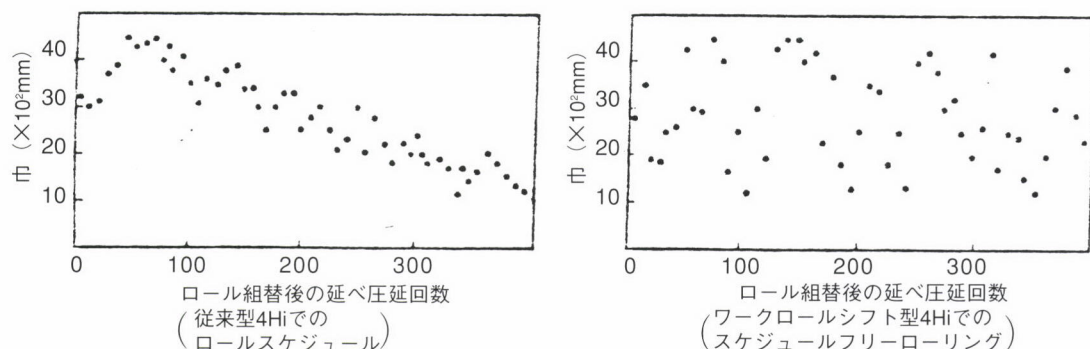


図10 ワークロールシフトミルでのスケジュールフリーローリング

クに制御することが可能となった。これによってスラブヤードにおけるスラブの並べ替え、圧延巾順に圧延する、いわゆるロールスケジュールから解放された。図10にその例を示す。

その後、新日本製鐵君津製鉄所厚板工場にはペアクロスミルが導入された¹⁴⁾。この導入結果もプレートクラウン低減、能率の向上、圧延形状におおいに成果を上げている。(図11、図12) 今後の厚板圧延機においても、形状クラウン制御機能は、益々不可欠になる。

3.4 高機能材圧延技術

形状や用途に新しい分野を開拓するため、新しい機能が開発されている。その主なものは、ステンレスクラッド鋼板やチタンクラッド鋼板、コンクリート充填用鋼管の原板となるリブ付厚鋼板¹⁵⁾、造船や橋梁用として用いられるテーパー厚鋼板など、高精度な圧延制御によってのみ製造可能なものである。

4 終わりに

日本の厚板は、今後も世界の供給基地の座を守りつづけると考える。その設備の巨大さのため設備投資リスクが大きく、中進国でもその設置には時間がかかるためである。又、単一ミルとして色々な機能を持たせる必要があり、且つ高精度でなければこれからの需要家の厳格な要望に対応しにくいためでもある。

厚板の生産技術は、アジアを中心とする今後の社会資本整備の動きと相俟って、更に高生産性、高目的性に富んだものとなっていく。その中心である厚板の圧延技術はその起爆薬として、日本に求められて来るものと思う。

そのためにも研究者・技術者のこの分野での活躍の場を広

げるとともに、読者の各層の方々が多少なりとも興味をもって何らかの面で参画して頂ければ望外の幸せである。

参考文献

- 1) 鈴木 弘：塑性加工, (1961), p. 94, 裳華房
- 2) 日本鉄鋼協会 ホットストリップ分科会報告, 特別報告書 No.23, (1975), p.1
- 3) 川崎 勉：戦後鉄鋼業論, (1968), p. 513, 鉄鋼新聞社
- 4) 楠原裕司：第159・160回西山記念技術講座, 「新しい時代を創造する高性能厚板」, 日本鉄鋼協会, (1996), p. 3
- 5) 持館 肇：鉄鋼製造法第3分冊加工 (2), (1972), p. 507, 日本鉄鋼協会
- 6) JISハンドブック1-1 鉄鋼I, 日本規格協会, (1995), p. 27
- 7) 日本鉄鋼協会 鋼板部会厚板分科会, (私信)
- 8) 鎌田正誠：日本塑性加工学会50回記念講演大会テキスト, (1992), p.11
- 9) 井上正敏：塑性と加工, 32-363, (1991), p. 404
- 10) 鈴木和裕：鉄と鋼, 80, (1994), p. T136
- 11) 芳賀行雄・小川幸文・山脇満・村上史敏・松尾敏憲・升田貞和：日本鋼管技報, No.98, (1983), p. 13
- 12) 柳沢忠昭・三芳純・坪田一哉・菊川裕幸・池谷尚弘・磯山茂・旭一郎・馬場和史：川崎製鉄技報, 11-2, (1979), p. 168
- 13) 石原慶明：鉄と鋼, (1986), p. S1112
- 14) 西岡潔・堀裕二・水谷泰・久富木行治等：圧延理論部会第100回記念シンポジウム, 日本鉄鋼協会 (1994), p. 67
- 15) 有泉 孝：材料とプロセス, 2, (1989), p. 1479

(1996年5月14日受付)