

(解説)

チタン薄板の圧延技術の進歩

福田正人

鉄鋼部門・チタン本部・チタン技術部

Developments in Titanium and Titanium Alloy Strip Rolling Technology

Masahito Fukuda

The historical development of titanium strip rolling technology in hot steel rolling mills is described, and reverse cold mill and annealing and pickling equipment historical development is also introduced. A number of unique titanium and titanium alloy products that have been manufactured with this process and equipment are also presented.

まえがき = 当社では1949年にチタンの研究に着手し、1999年に50周年を迎えるに至った。その間、幾多の材料開発、製造技術開発がなされてきたことは本誌「チタン開発50周年特集」¹⁾に紹介されている。そのなかの一つに掲題のストリップ圧延技術があげられる。日本のチタン産業の最大の特徴は純チタン、しかも薄板が主要な生産品目になっていることで需要分野も一般産業、民生品が中心になっている。これはとりもなおさず我国の純チタン薄板が、その品質およびコストにおいて確固たる地位を国際市場で築いていることにほかならない。本稿ではチタンおよびチタン合金薄板のストリップ圧延について取組むに至った経緯と技術的な変遷、および現在の技術を中心に概説し、21世紀に向けての新たな飛躍の足がかりとすることを試みたい。

1. 薄板圧延技術発展の経緯

1.1 シート圧延からストリップ圧延へ

当社のチタン薄板製造は長府製造所におけるシート圧延から始まった。現在ではもはやその姿を目にすることはできないが、3段ロールのブルオーバ式熱間圧延機（粗圧延および仕上げ圧延）で厚さ5~6mmに熱延し、焼鈍・脱スケールを施した後、4段式冷間圧延機で冷延するものであった。この冷間圧延機はチタン専用で1961年に当社自身で設計・製作したものでハミルトン圧延機と呼ばれてきたものであるが、これも近々世を去る運命にある。

冷間圧延された板は真空またはアルゴン雰囲気焼鈍（以下真空（Ar）焼鈍と略す）で最終熱処理がおこなわれた。これは厳しい温度管理が要求される航空機用（AMS MIL規格）のチタン材料をつくるため専用で設置されたものであり、改修や更新を経つつ現在も適用されている設備と方法である。

航空機用純チタン（JIS4種クラス）薄板のシート圧延から始まった当社のチタンであるが、次に展開したのが化学工業用材料であり、また発電所復水器や海水淡水化装置に使われる薄肉溶接管である。薄肉溶接管を作る場合に必要なのが長い条（フープ）であり、シート圧延では製造できずコイル圧延が必要となる。当時、当社に

は熱延コイルの製造設備がなく、日新製鋼（株）周南工場に委託圧延をお願いすることになった。同社ではステッケルミル^{注)}でステンレスのコイル圧延がおこなわれており、比較的近い加工特性を有するチタンの製造に向いていると考えられたからである。こうして当社の純チタンストリップ製造の歴史が始まったわけで、ステッケルミルで圧延された熱延コイルは同社の連続焼鈍酸洗設備（Annealing & Pickling Line：以下APラインと略す）で焼鈍・脱スケール処理をした後、これもまたステンレス用のセンジミア冷間圧延機で冷延コイルが製造されるようになった。

1.2 熱延 - ステッケルミルから鉄鋼用ホットストリップミルへ

ステッケルミルで純チタンの熱延コイルを製造し始めたものの、ステンレスではまったく問題がないにもかかわらずチタンでは表面きずが多発するという問題に遭遇することになった。とくに、圧延中のサイドガイドとの接触にともない発生する飛込みきずや巻き取り中の層間すべりにともなう共ずれきずには日々悩まされることとなった。チタンのきずのつきやすさを知るほど、ファーンスコイラ内で発生する共ずれきずを防止することは困難と考えられ、ステッケルミルでのチタン熱延に限界を感じるようになった。

おりしも、当社では鋼板の一貫製鉄所を加古川に建設することになり、1968年に厚板工場が、1971年に熱延工場が立ち上がったところであった。最新鋭のタンデムホットストリップミルを保有することになった当社技術陣はこれを使うことを検討した。長大な当該設備で品質の良いチタン熱延コイルを作るにあたっては多くの調査と試圧延（筆者の記憶では失敗が大半で20コイル以上）を必要とし、日新製鋼（株）周南工場の技術陣の助言もえながら、最適な加熱条件、圧延条件、巻き取り条件を確立するに至った^{2)~4)}。とくに、熱容量、比重、熱伝導率の小さいチタンにおいては、

偏熱し易い 加熱温度、時間の設定が重要

慣性質量が小さい 各種テーブルローラ、巻き取り機

脚注) 巻き取り機が保温炉に収められた（ファーンスコイラという）
4段可逆式熱間圧延機

の速度設定（過速度率）や張力設定など巻取り条件の最適化が重要

など、チタン特有の条件を模索しながら技術確立までに約1年の期間を要した。ここに鉄鋼設備を利用したチタン薄板量産の時代が幕をあげた。

1.3 冷延 - 小径多段ミルから大径コールドストリップミルへ

ホットストリップミルで熱延コイルの製造を開始してまもなく、ソーダ電解において水銀法が隔膜電解法に全面転換されることになり大量の電極用純チタン板の需要が生じた。他社への委託冷延ではこれに対応困難であったため、同じく加古川製鉄所で稼働し始めたタンデムコールドストリップミルを使って製造することにした。

いくつかの試圧延結果をもとにパワーカーブを作成し（当時はこの方法が一般的であった）約400トン以上の純チタン薄板を無事製造することができた。しかしこの過程をとおしてチタンの冷間圧延が鋼板とはまったく異なる挙動を示すこと、引張り強度は軟鋼並みなのに異方性を考慮しても異常に圧延荷重が高くなり厚さ1mm以下の薄板にすることはきわめて困難でもあった。この現象を契機に純チタンの冷間圧延特性を解明してリバースコールドストリップミルの設置に至った技術的経緯はチタン開発50周年特集¹⁾⁵⁾に詳述されているので参照いただきたい。

1.4 真空 (Ar) パッチ焼鈍から連続大気焼鈍へ

前記リバースコールドストリップミルと同時にチタン専用の AP ラインも加古川製鉄所に設置した。それまで冷延後の最終仕上げ焼鈍はコイルの状態で真空 (Ar) 焼鈍をおこなうものであった。

それまでも熱延コイルの焼鈍・脱スケールや、タイト焼鈍でできた巻きぐせの矯正が困難な JIS-3 種以上の高強度材の最終仕上げ焼鈍はステンレス用の AP ラインでおこなっていたが、チタンとステンレスの特性の違いに起因する次のような特徴から操業条件に対する制約が多く存在した。

1) 硝酸と酸との反応

チタンの酸洗は発熱反応なので時間とともに酸の温度が上昇し、酸洗速度（単位時間あたりの酸洗量）が変化するので過度の酸洗を避けるためには酸の温度を一定に制御する必要がある。また、チタンが溶けると液中の硝酸が消費され酸洗速度が低下するので適宜硝酸を補給しなければならない。しかし一定量以上溶けると液中に溶存するチタンイオン（錯イオンになっている）が有効硝酸を消費してしまうので硝酸を追加投入しても酸洗能力を回復させることができなくなる。

2) ソルト（アルカリ溶融塩）との反応

大気加熱により形成されたチタンの酸化スケールは非常に強固なので、ステンレスより高温のソルトに、より長時間浸漬する必要がある。

AP ラインの構成は、カテナリ式大気焼鈍炉、ショットブラストまたはソルト（アルカリ溶融塩）の槽、硝酸の槽、でありステンレス用と変わることはないが、上述のチタン特有の反応を十分に考慮して設計さ

れたものである⁶⁾。本設備は熱延および冷延コイルのいずれをも処理可能とするためショットブラストおよびソルト浴が併設されたユニークなチタン専用設備である。

2. チタン薄板製品

鉄鋼用の連続式ホットストリップミルで圧延された熱延コイルは AP ラインで焼鈍・ショット・酸洗され、ついでリバースコールドストリップミルにより所定の板厚まで冷延された後、ふたたび AP ラインで焼鈍・ソルト・酸洗処理される。ここに各種の純チタンおよびチタン合金薄板が加古川製鉄所で一貫して製造されるようになった。なお、冷延後の仕上げ焼鈍は用途やユーザの要求に応じて、上記の AP ライン仕上げとパッチ式の真空 (Ar) 焼鈍仕上げの二種類が使い分けられている。以下にこれらを使って製造されるようになった特徴ある製品をいくつか紹介する。

2.1 加工性に優れた純チタン板

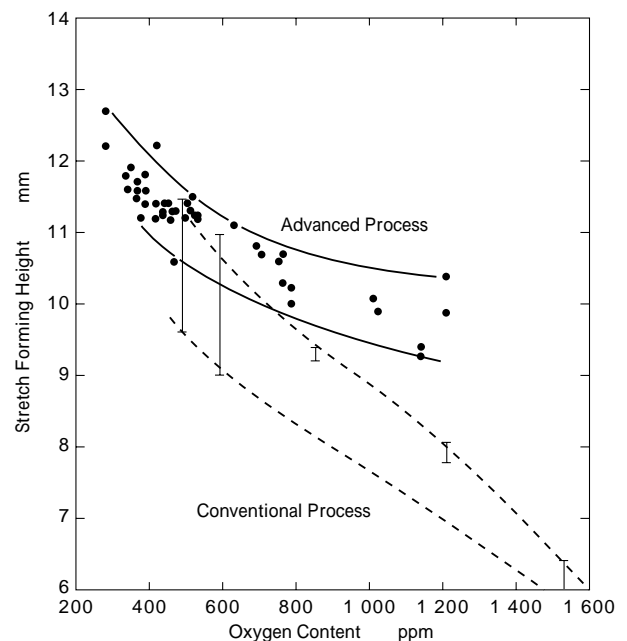
純チタン薄板の主要用途に PHE（プレート式熱交換器）がある。これは複雑な波型にプレス成形されることからもっとも軟質の ASTM-Grade1 または JIS-1 種が使われてきたが、最近では伝熱係数の向上およびコストダウンの観点から薄肉・高強度材が必要とされるようになりつつある。

純チタンの張出し成形特性を向上させるためには、

r 値（ランクフォード値 = 板幅歪み / 板厚歪み）を高める

n 値（加工硬化指数）を高める

酸素および鉄の含有量を減らして延性を上げることが効果的である⁷⁾。はいわゆる集合組織制御であり、はマイクロ組織制御である。このような材質制御をすることにより第1図に示すように高い成形性を有す



第1図 純チタン板の張出し成形高さに及ぼす酸素含有量および製造条件の影響（Advanced Process：高 r 値、高 n 値化の圧延・熱処理条件を採用）

Fig. 1 Effect of oxygen content and manufacturing process on stretch forming height of commercially pure titanium sheet (Advanced Process: with higher r value and n value)

る JIS-2 種クラスの純チタン薄板が開発されている⁸⁾⁹⁾。近々 JIS-2 種チタンを使った PHE が採用される予定と聞いており、21 世紀を迎えようとするときに世界初の高強度 PHE が世にできることは喜ばしいかぎりである。

2.2 意匠性と加工性を備えた建材用チタン

建材にチタンが使われるようになったのは、最近 10 年間の新しい用途である。外観の美しさを求められるという点においてチタンにとっては初めてでもある。使用部位としては屋根とパネルが中心である。屋根材の場合は長尺のロールフォーミングがおこなわれるので成形時の歪み（ポケットウェーブ）を発生させないことが重要である。パネルの場合はユーザの好みに合った表面光沢度とその均一性が求められる。このような観点からポケットウェーブを防止すると同時に光沢度を制御した建材用チタンが開発された¹⁰⁾。制御の必要な影響因子はマイクロ組織と表面プロファイルである。タイトコイルでおこなうパッチ式の真空（Ar）焼鈍では、コイル全体を微細均一組織にすることは一般に難しく、表面プロファイルは冷延肌のままでは変化させることはできない。

AP ライン仕上げの場合は、コイル全体を均一組織にすることが可能であり焼鈍温度を変えるだけで自在にマイクロ組織を変えることも可能である。またマイクロ組織と酸洗量の組合わせで表面プロファイルの制御も可能であり、建材用チタンの製造に AP ライン仕上げは不可欠の工程となっている。

2.3 各種合金薄板

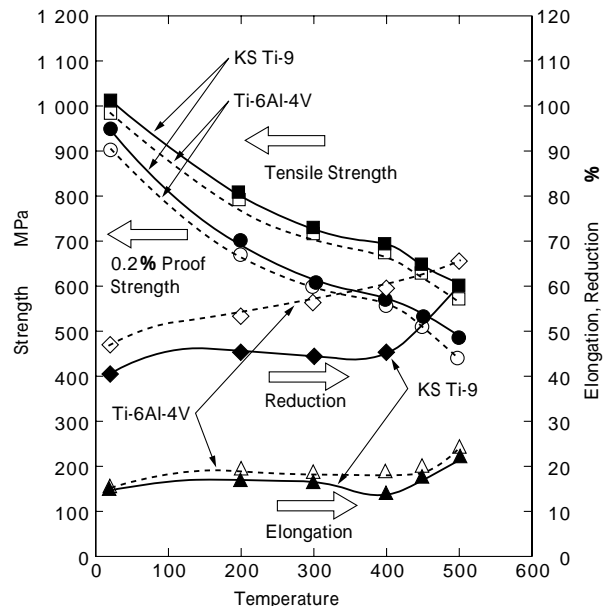
2.3.1 高強度純チタン

JIS-3 種および 4 種の純チタンは航空機機体用として量的にはそれほど多くはないが過去から使用されてきた。これらの高強度純チタン冷延薄板をコイル状で真空（Ar）焼鈍仕上げすると強い巻きくせが形成され、通常のレベラ矯正などではとうてい除去することができない。したがって冷延後いったんシートに切断してから真空（Ar）焼鈍仕上げがおこなわれることが多かった。これに対して AP ライン仕上げの場合そのような巻きくせが生成することはないのでコイル状で良好な平坦度を有する薄板を製造することが可能である。

また最近では高強度で研磨性を重視した民生品対応をコンセプトに KS100、KS120 といった純チタンに近い低合金（少量の Fe や Si が含まれる¹¹⁾）が開発されており、生産実績としては板厚 0.6mm の薄板まで AP ライン仕上げで製造されている。

2.3.2 + 合金

代表的な + 合金である Ti-6Al-4V は冷間加工性が乏しいことと Texture Hardening による材質劣化の問題から、その薄板は熱間圧延で、しかも鋼板で包んだ“バック圧延”という方法で作られてきた。そのためコストが高く、用途としては航空機など限られた分野にとどまっている。民生分野でチタンの用途拡大を図るには低コストで量産可能であることが必要条件であり、この観点から“コイル製造可能で Ti-6Al-4V と同等の特性を有する高強度 + 合金”として KS Ti-9（Ti-2Mo-1.6V-0.5Fe-4.5Al-0.3Si-0.03C）が開発された¹²⁾。この材料は第 2 図



第 2 図 KS Ti-9 と Ti-6Al-4V との常高温引張性質の比較
Fig. 2 Comparison of tensile properties between KS Ti-9 and Ti-6Al-4V

に示すように Ti-6Al-4V と同等の特性を有するとともに厚さ 1.2mm の冷延コイルまで試作されており、今後“Ti-6Al-4V を使いたい、コスト的に？”といった分野への適用が期待される。

2.3.3 合金

合金は冷間加工性に優れた高強度合金として古くから開発され機体材料あるいはばね用として期待されてきたが、それほど大きなマーケットには至っていない。むしろ、ここ数年間で急激に伸びたゴルフクラブ（高級メタルウッド）が過去最大のマーケットを築いたといってもいい過ぎではないであろう。製法としては鋳造品などもあるが主流は鍛造と呼ばれる薄板をプレス成形して溶接構造で仕上げる方法である。したがって一般的には溶体化処理をした薄板をクラブメーカーに納入することになる。

代表的な合金である Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al は厚さ 10 mm 以下なら空冷でも焼入れ可能な時効反応の緩慢な合金であるが、それでも溶体化処理後は相応の速度で冷却しなければならない。このためには、AP ライン仕上げが技術的、生産性およびコストにおいて最適かつ必須のプロセスとなっている。当社では、このプロセスで累計 500 トン以上の本合金薄板を製造してきた。設備設置時には予想もなかったことであるが昨今のチタンクラブブームに対処しえた理由の一つに AP ライン仕上げ設備および技術蓄積があるといえる。

2.4 超広幅、極薄 極限への挑戦

乾電池電極、カメラシャッターあるいは触媒用などにチタン箔の需要はあったが量的にも少なく、箔ミルメーカーで生産されているのが一般的であった。おりしもプリペイドカードの偽造が社会問題化した頃、その防止策の選択肢の一つにチタン製カードが候補に上がった（残念ながらこの案は採用されるにいたらなかったが）。これに対応しようとする月産 100~200 トンの生産をおこなう必要があり、旧来の箔ミルメーカーのみでは無理と判断さ

れた。

そこでリバースコールドストリップミルでの製造を試みた結果⁵⁾、写真1に示すような厚さ0.1mm×幅800mmという純チタン広幅箔の製造に成功した。ほぼ同時期に次世代航空機用耐熱機体材料部品用として厚さ0.13mmのTi-15V-3Cr-3Sn-3Al 広幅箔の試作にも成功した。

これらの出来事を契機に、この製品分野を箔ミルからコールドストリップミルの世界に飛躍させることになったのも当社20世紀チタンの思い出の一つになるであろうことは間違いない。

3. 今後の展望

技術にかぎらず世の中の動きには連続性とブレークスルーがある。上述した技術や製品をさらに改良、発展させていくという連続性は21世紀の当社チタンの基盤となるはずである。

いっぽう、ブレークスルーには目標を定めて一歩ずつ進めていくものと、予期せぬ必要に直面してその瞬間にエネルギーを集中するものがある。前者としては、チタンの製造プロセスのなかで精錬(スポンジチタンの製造)および溶解(EB溶解などは連続化の一例であるがVARを代替するまでには至っていない)工程は依然としてバッチ式でありこれらの連続化が大きな課題である。圧延工程については熱間圧延時の酸化の問題がある。酸化皮膜の存在はチタンのすぐれた耐食性を支える主役であるが、薄板の製造途中では表面きずや歩留り低下の大半の原因で『邪魔者』である。したがって加熱時の酸化を技術的にもコスト的にも防ぐことができるようになればチタン薄板のコストダウンが大きく進展する。来世紀の技術開発に期待したい。

いっぽう、後者の例としては、既述のホットストリップ圧延や箔圧延が挙げられよう。今後チタンの利用分野の拡大にともない、考えもしなかったニーズが出現することで新たな飛躍が実現するに違いない。

むすび=当社チタンの20世紀をひとことでいえば“創業から量産技術の確立まで”ということができよう。また来世紀にも生き残る、あるいは花開くであろう新製品も多く生みだされたことは特筆に値する。既述のごとくチタン専用設備もあるが、鉄鋼用の量産設備を使いこな

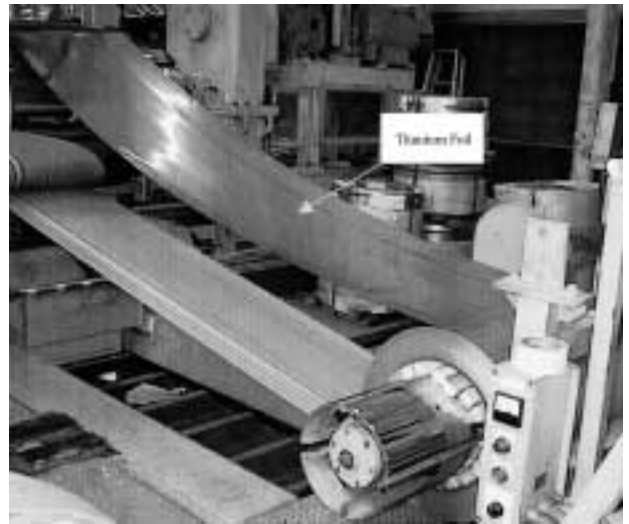


写真1 広幅純チタン箔 厚0.1mm×幅850mm
Photo 1 Wide titanium foil 0.1mm thick × 850mm wide of C.P. Grade 1

して日本のチタン産業を世界のなかで一目おかれる存在にまで育てあげたといえる。今後さらなる技術改善や新技術、新製品を生みだし続けて来世紀も世界のトップランナであり続けることが我々に科せられた課題である。

参考文献

- 1) 神戸製鋼所編：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.3 (1999)。
- 2) 福田正人：塑性と加工，Vol.36, No.417 (1995) p.1112。
- 3) 公開特許，昭53-112246号。
- 4) K. Takizawa et al.：Abstract of 3rd International Conference on Titanium, Moscow (1976)，p.62。
- 5) 福田正人ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.3(1999) p.30。
- 6) 伴 誠二ほか：日本鉄鋼協会講演概要集 CAMP-ISIJ, Vol.1 (1988) p.1344。
- 7) 長谷川淳ほか：チタニウム・ジルコニウム，Vol.32, No.1 (1984) p.11。
- 8) A. Okamoto et al.：KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW No.7 Feb, (1990) p.26。
- 9) 福田正人ほか：火力原子力発電，Vol.43, No.2(Feb-1992) p.75。
- 10) 屋敷貴司ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.3(1999) p.35。
- 11) 武村 厚ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.3(1999) p.49。
- 12) 大山英人ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.3(1999) p.53。