

真空雰囲気圧延に関する研究の現状

本 村 貢*

Present Situation of Study on Vacuum Hot Rolling

Mitugu MOTOMURA

1. はじめに

戦後の混乱期を経て、朝鮮動乱、所得倍増政策、オイルショックと約 10 年ごとの日本経済の変動は、技術の変革でもあつた。大量消費社会の出発点となつた昭和 36 年よりの所得倍増時代は、昭和 48 年の第 1 次オイルショックで大きな打撃を受け、急速に発展してきた日本の技術は一つの変換を余儀なくされてきた。その折の技術蓄積を基にして、ここ 3、4 年日本の技術は超高度化されて、多角化されてきている。日本の鉄鋼業界及びその関連業界は、その先頭に立つて新しい技術の開発と高品質材料の生産にその実を上げてきた。

筆者は、第 1 次オイルショックの中で次世代の加工技術を思考してきた。以前、林文彦経済博士[†]に乗り物の部品数の視点から技術の進歩、ブーメランイフェクトおよびアッセンブリイフェクトの話をつた。乗り物は 10 年ごとに次への乗り物へと変革を遂げてきたが、その部品数は約 10⁴ のオーダーずつ増えており、自転車、オートバイ、自動車そして昭和 48 年頃に日本も航空機関連の産業が大きく脚光をあびるはずであつたのにと、氏は力説されておられた。部品数が増えれば、それに関連して材料種類も多くなり、部品機能に最適化な材料とその品質の高精度化が要求されてくる。特に、航空機や宇宙関連機器に使用される材料は、より軽量化、高品質化が求められると共に、将来の加工の視点から宇宙空間の真空状態の積極利用が考えられる。筆者は、それらの 1 部を現実化させる意味において、材料としてチタンを使用し、真空下での熱間圧延を行う構想を立て、研究を始めた。

真空熱間圧延の基本的発想は、

- 1) 近未来の未踏材料の使用を可能にする新しい塑性加工関連技術
- 2) 特殊材料あるいは難加工材料の塑性加工
- 3) 大気空間において存在するガスに活性な材料の塑性加工
- 4) 熱間加工時の酸化膜の厚さが摩擦状態に及ぼす影

響の定量化

- 5) 異種材料の接合
- 6) 表層清浄加工による真空、不活性ガスの利用
- 7) 加工システムのコンパクト、クローズト化
- 8) 未来の宇宙工場の完成とそこにおける塑性加工技術の地上空間での準備。一つの宇宙空間での素形材加工とアッセンブルによる、次の宇宙空間への進出。

などにあるが、それらの一部を実現化していくために、真空熱間圧延装置の試作と、それによるチタンの圧延とその特性の調査を昭和 49 年に開始した。

前述のように、塑性加工技術は今日まで急速に進歩を遂げ、さらに今後も新しい分野をめざして発展していくことと信じるが、塑性加工の問題解決への一つの考え方として、筆者は図 1 に示すような要因を考えた。本報で概説する真空圧延に関連させると、従来の圧延技術の利点に加えて次の利点が考えられる。真空中であるために、熱間圧延しても酸化が少なくて(省酸化→省資源、歩留向上→生産性向上)、酸によるスケール除去工程の短縮化(省資源、生産性向上)ができ、また真空あるいは不活性ガスを使用するということから、装置がコンパクトでクローズト化され(環境の清浄化、省騒音)、従来大気中で加工が難しいとされる材料の加工の可能性(難加工材加工→付加価値向上、少利用資源活用化→省資源・特殊特性)や加工材表面の清浄度向上(精密加工、極薄化→付加価値・性能向上)などが真空熱間加工技術の特徴である。

真空圧延に関する研究は、主にソ連で数多く行われてきた、この分野の研究の動向を概観するにはソ連の研究をまとめるので十分に客観性がある。したがって、本報では、真空熱間圧延の分野の従来の研究をソ連の文献から調査すると共に、筆者が行ってきたチタンの真空熱間圧延に関する設備と圧延特性の一部を詳説し、真空中での加工技術の現状を概説する。

2. ソ連における真空熱間圧延機の構造

真空および不活性ガス中での金属の圧延は、加熱および変形中に酸化やガスの浸透が少なく、特に高真空中で

[†] 早稲田大学商学部教授

昭和 60 年 6 月 3 日受付 (Received June 3, 1985) (依頼技術資料)

* 早稲田大学理工学部鋳物研究所 工博 (Casting Research Laboratory, School of Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo Shinjuku-ku, Tokyo 160)

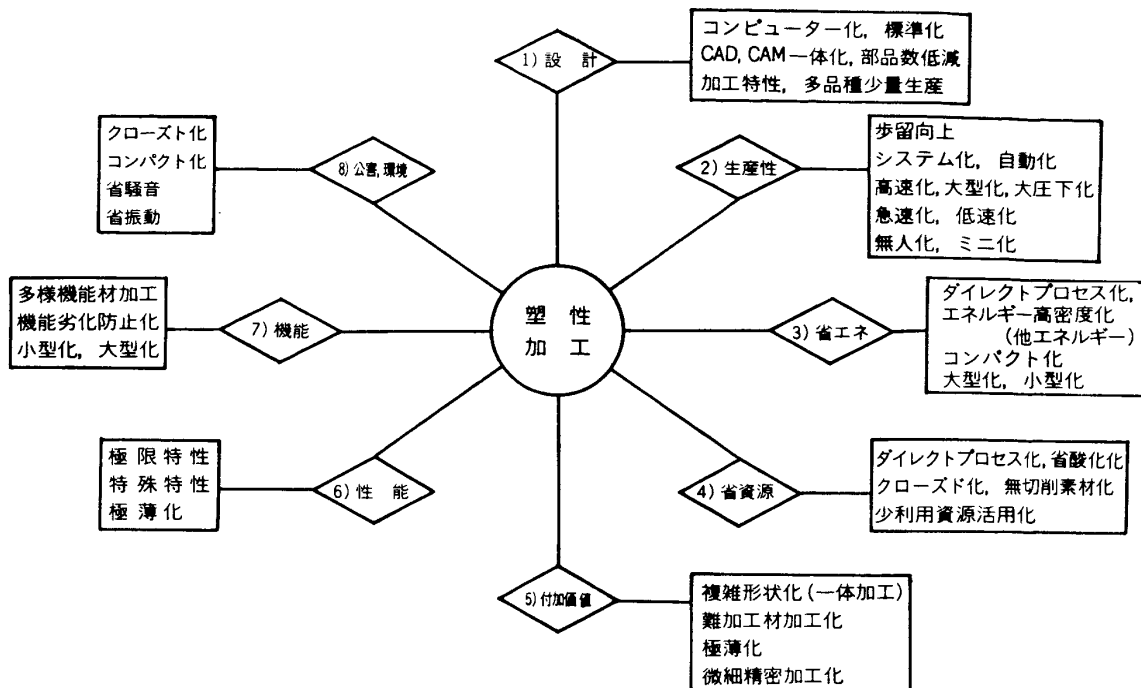


図 1 塑性加工問題を解決する考慮要因図

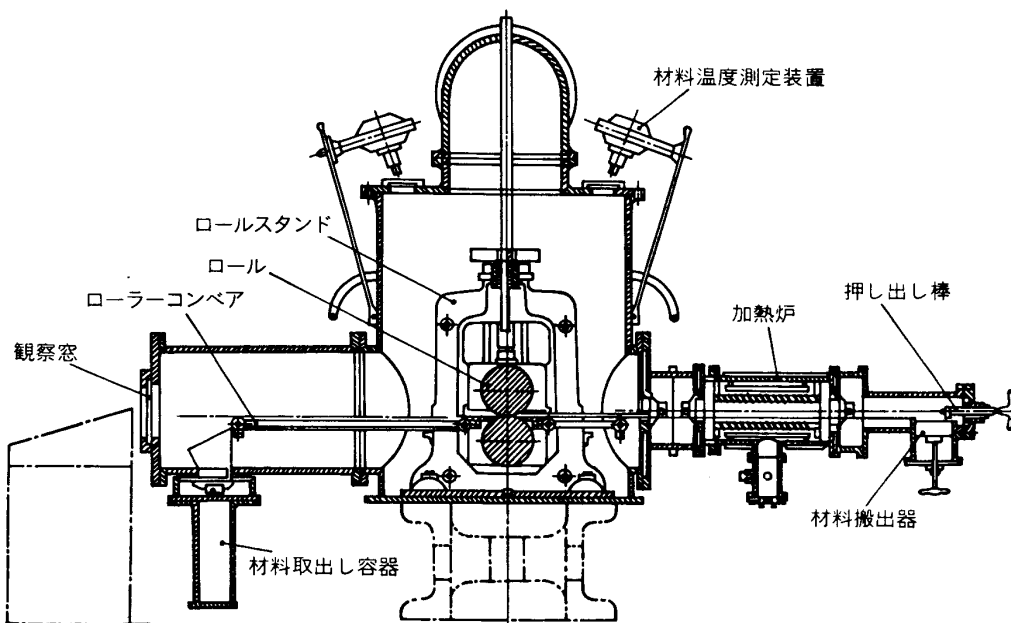


図 2 ロールスタンド封じ型真空圧延機

の圧延は脱ガスを助けるので、大気中では熱間塑性加工が困難な W, Mo, Nb, Ta 等のような、ガスを溶解する傾向の強い難融金属やそれらの合金の加工に有利であり、製品の品質、機械的性質や可塑性を向上させると考えられる。

真空圧延法の研究は過去約 25 年間主にソ連で、圧延諸特性に対する真空の影響、真空圧延用のロール材料の選択、真空圧延によるバイメタルの製造等について行われてきた¹⁾が実験に用いた真空圧延機には一般に二つの

基本的タイプがある。

一つは、圧延機を特殊な真空室内に設置するロールスタンド封じ型である。真空室内には単スタンド 2 段圧延機、ガイドと加熱炉を設置しワークロールの電気駆動装置や減速装置は真空室外に置く。このタイプの圧延機としては、ハリコフの物理工業技術研究所で 1953 年に作られた最初の真空圧延機や、モスクワ鋼および合金研究所で作られたソ連で最も大きい真空圧延機の一つである真空圧延機 210²⁾等があげられる。図 2 は真空圧延機

210 の概略図である。このタイプの圧延機の基本的に優れているのは、4段ロールスタンドや管圧延の装置、スエーピングや押し出し等の種々の塑性加工用装置やロールスタンドを用いて真空中や不活性ガス中での広汎な圧縮加工実験が行えることである。しかし、このタイプの圧延機では圧下装置やロールチョックが真空室内にあるため、それらの潤滑、調整、修理が困難である。また、真空室の容積が著しく大きくなるために強力な真空ポンプを使用しなければならない欠点がある。

この点でロールだけを真空室内に入れ、軸受、圧下装置やその他のユニットを空気中に出したロール封じタイプの圧延機は、真空室の容積が小さく装置の大きさも小さくでき運転に便利であり、より実用的な圧延機といえる。このタイプの圧延機としては、ハリコフの物理工業技術研究所で作られた真空圧延機⁹⁾がある。図3はロール封じタイプの圧延機の概要図である。

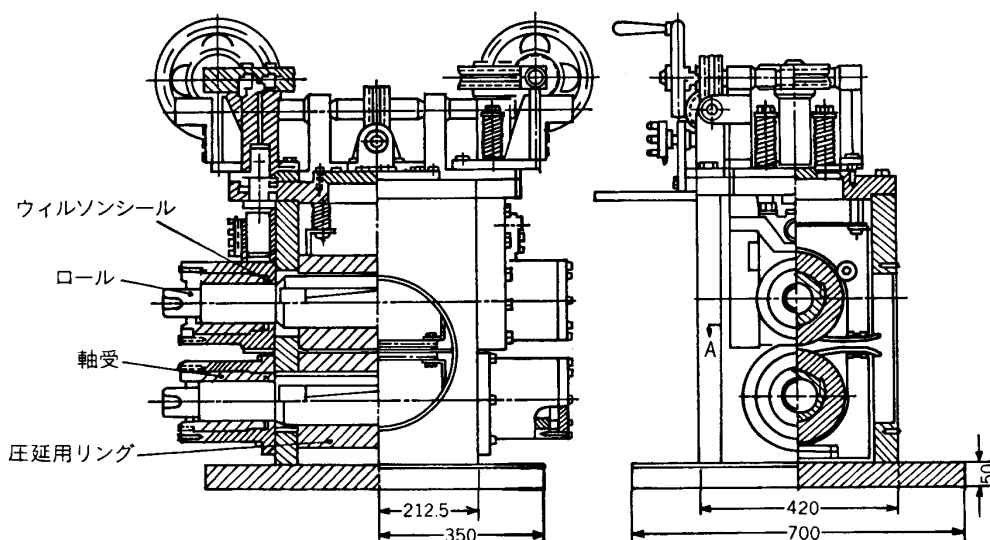


図3 ロール封じ型真空圧延機

表1 真空圧延の研究例

研究者	発表年	供試材	真空度と雰囲気ガス	圧延温度℃	圧下率%
И. М. Лавловら	1961	Ti	3×10^{-5} Torr, 大気	800~1200	20
	1962	Ti	$10^{-2}, 10^{-5}$ Torr, 大気 Ar ($N_2=0.01\%$, $O_2<0.005\%$)	800~1200	30
	1963	Mo	1×10^{-5} Torr, 大気 Ar ($N_2=0.01\%$, $O_2<0.005\%$)	1000~1250	25
	1963	Nb	10^{-5} Torr, 大気 Ar ($N=0.01\%$, $O=0.005\%$)	1000~1250	20
В. Е. Ивановら	1962	Ti, Zr, Ta Nb, Mo	1×10^{-5} Torr	900~1100 (Ti, Zr) 1100~1350 (Nb, Ta, Mo)	5~20
Я. Б. Туревич В. Л. Оржеховский	1964	Fe, Ni, Ti Mo, Nb, 鋼	$1 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-5}$ Torr	1000~1200	30
А. Я. Борисовら	1967	Nb, Ti, Mo	Ar ($N=0.034\%$)	850~1150 (Ti) 950~1200 (Nb, Mo)	10~15

3. 熱間圧延特性におよぼす真空の影響 (従来の研究)

真空圧延における圧延諸特性に関する主な研究例を表1に示す。1961~1963年に Лавлов^{4)~7)}らは Ti, Mo, Nb を真空中, アルゴンガスおよび空気中で加熱温度を変化させて熱間圧延を行い, 圧延のさいの平均圧延圧力, 先進率, 圧延トルク, 摩擦係数などの圧延諸特性とスケール生成に対する加熱温度と真空度の影響について研究した。そして 10^{-5} Torr の真空度でこれらの金属の酸化がかなり防止でき, 加熱および圧延時に真空および不活性ガス保護媒体を用いることが, これらの金属の性質に良好な影響を与えることを明らかにした。

Иванов⁸⁾らは上記の金属の他に Zr, Ta とそれらの合金の真空圧延を行い, 上記の効果のほかに真空圧延によつて金属間に強い圧接が生じることを示して, これらの金属のバイメタルの製造にも真空圧延が有効なことを示している。

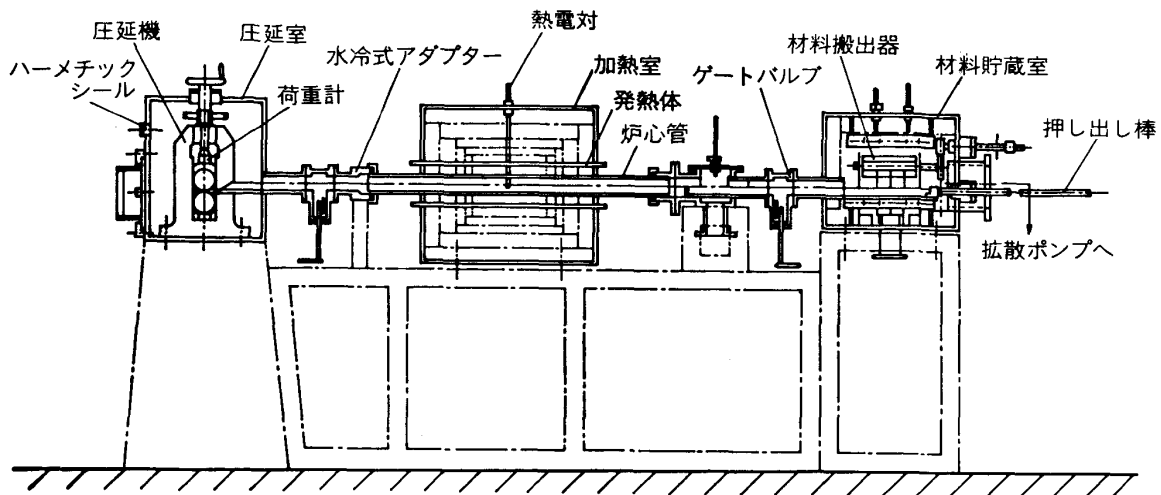


図4 真空圧延装置 (早大, 本村研)

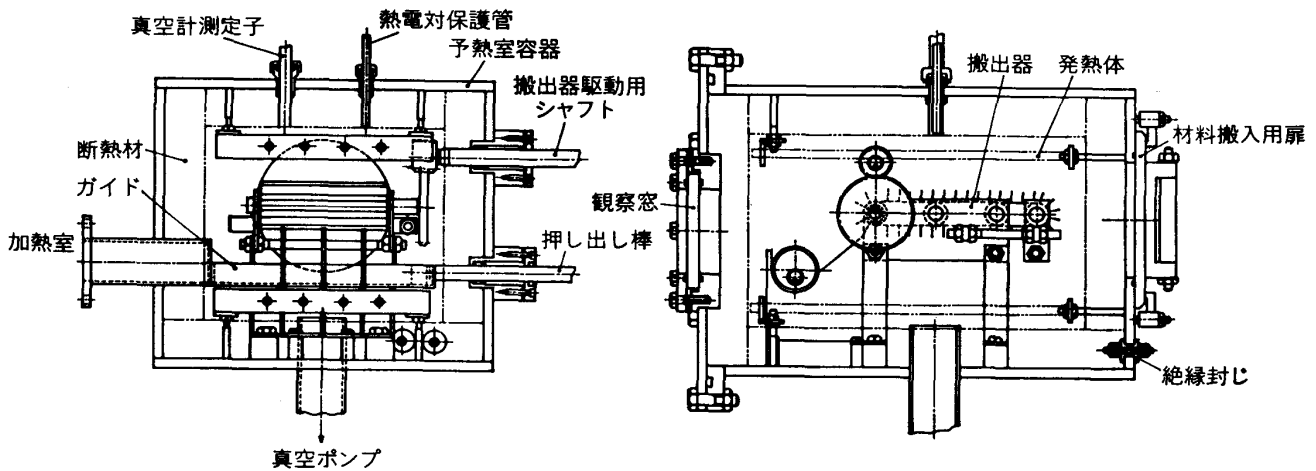


図5 材料搬出室

Борисов⁹⁾らは化学的に浄化することによつて不純物を取り除いたアルゴンガスを用いて Mo, Nb の圧延を行い、不活性ガスで満たされた密閉室内で、高い化学反応性を持つ金属の高温加工に作業者が直接材料をハンドリングできることを示した。また、アメリカにおいてはユニバーサル・サイクロップ社がペンシルバニア州にアルゴン雰囲気を利用した高融点金属加工用の装置を建設し、Ti, Nb, W やそれらの合金の加工を行っている。

Гуревич と Оржеховский¹⁰⁾は真空、アルゴンおよび空気中で純鉄, Ni, Ti, Mo, Nb, 鋼の熱間圧延を行い、そのさいの摩擦係数を測定し、純鉄, Ni, Mo, Nbの真空圧延では摩擦係数は大気中より1.5~2.0倍高く、逆に Ti と鋼では低くなることを発表している。Чернышев¹¹⁾が真空容器内の活性ガスの減少によつて摩擦状態が変化し、Mo, Ti を真空圧延するときには大気中での圧延に比べて固着領域と先進率が増加し、鋼では逆に先進率が減少することを示した。また、真空圧延の研究では接触弧にそつた圧延圧力分布、すべり、温

度の直接測定を同時に行つて、変形領域の動力、速度、温度の状態を複合的に研究する必要があることを提唱し、その方法を示した。

4. 筆者の試作真空熱間圧延機装置¹²⁾

昭和49年頃日本において真空熱間圧延機のモデル機は1, 2の圧延機メーカーで試作されていた。しかし、コスト的に低価格のものでなく、さらに、以下の実験仕様を十分に満足し得る圧延機は得られなかつた。

その主仕様を、

- 1) 常用加熱温度は 1200°C
- 2) 到達最高真空度は 10⁻⁴ Torr
- 3) 短時間に数多くの実験を行うことができる
- 4) 250万円以下であること
- 5) 矩形状の試験片の熱間真空圧延が可能なこと

と設定して、試作した熱間真空圧延機の概要を図4に示す。

加熱室にある燃焼管(アルミナ系磁性保護管, HB 燃

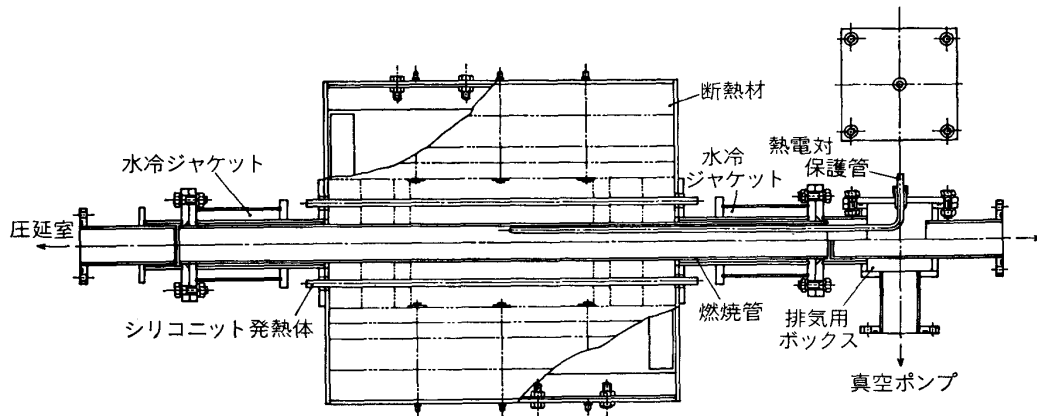


図 6 真 空 加 熱 室

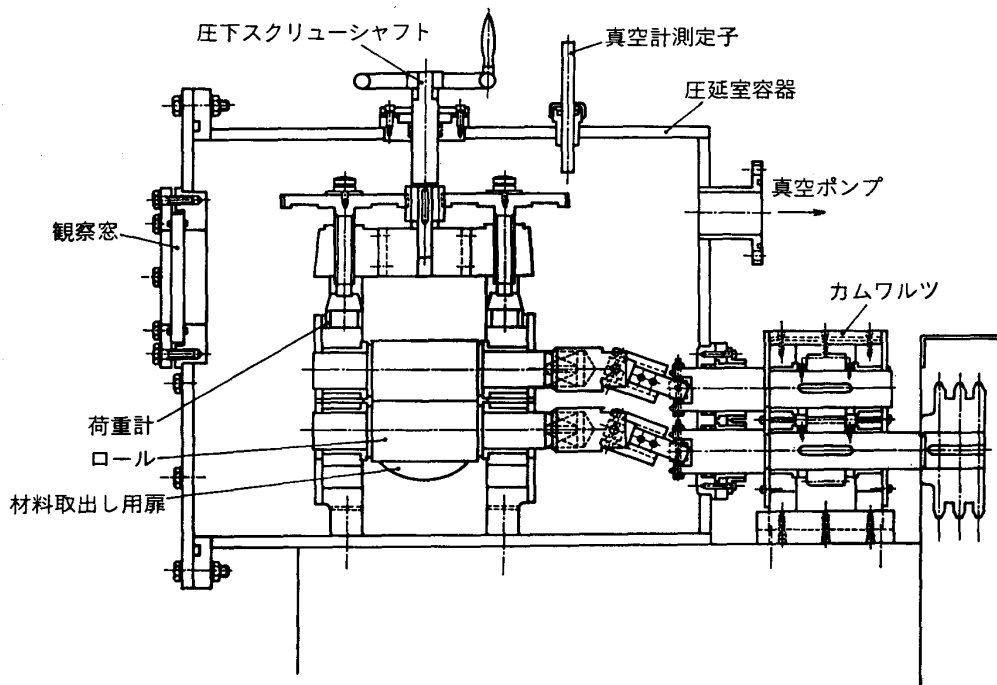


図 7 真 空 圧 延 室

焼管)を除いて、装置の構成材料はガス放出の少ないステンレス (SUS 304) を用いた。装置は大きく分けて、三つの部分よりなる。材料貯蔵室、加熱室、圧延室で、これらはできるだけ容積を小さくとつている。各室の真空の分離は、すべてこれらの中に設置したゲートバルブによつて行う。

図 5 の材料貯蔵室は、実験所要時間を短縮するために 9 個の材料が 1 度に装入でき、1 個ずつ搬出できる搬出器 (キャタピラ状装置) を設けた。同室には真空計と観察窓を設けてある。

図 6 の加熱室は、内径 50 mm の HB 燃焼管を外部から棒形シリコニットで加熱する装置となつている。炉内中央部の温度を常時計測できるようになつている。

図 7 の圧延室は、ロールスタンド全体を真空容器内に

納めるロールスタンド封じ型で、ロール駆動用シャフト、圧下スクリーシャフトとロールスタンドを止めているボルトで真空封じしている。同室には真空計、観察窓を設け、同時に、圧延荷重 (2 カ所)、圧延トルク (2 カ所) および圧延中のロールと材料との接触面における圧延圧力分布を測定する測圧ピン用端子の出力を真空室外へ誘導するハーメチックシールを設けている。

真空ポンプとしてメカニカルプースタポンプ (1500 l/min) と補助ポンプ (640 l/min)、さらに油拡散ポンプ (1200 l/s) の三台を用い、必要真空度に応じて使い分ける。なお、三室の容積は約 170 l で、 10^{-2} Torr のオーダーまでは約 10 min、 10^{-3} Torr のオーダーまでは約 30 min、 10^{-4} Torr のオーダーまでは約 1 h で実験の短縮化が十分に行える。

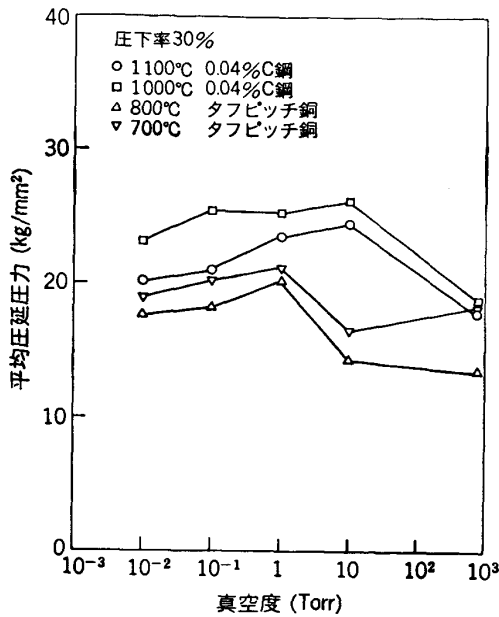


図 8 銅および軟鋼の真空熱間圧延時の平均圧延圧力

なお、圧延荷重、圧延圧力分布などの圧延中のデータはすべて AD 変換され、マイクロコンピュータによって処理する LA 化され、すべての所望のデータは自動的に作図処理まで行えるシステムとなっている。

5. 一般材料の真空熱間圧延の実験結果

熱間圧延を行う前に、鋼、純銅、純アルミニウムの冷間圧延を行い、大気中および真空中 (1, 10⁻¹, 10⁻² Torr) での圧延圧力分布を測定したが、圧延圧力への真空度の影響はなかつた。

タフピッチ鋼、0.04%C 鋼の熱間真空圧延 (圧下率 30%) 時の、真空度に対する平均圧延圧力の結果の一例を図 8¹³⁾に示す。

どちらの材料でも、圧下率が 10% を越えると真空圧延のさいの平均圧延圧力は大気中に比べて一般に大きく、1~10 Torr で最大値をとり、その後真空度が上昇するに従い減少する。このことから、タフピッチ鋼と炭素鋼の酸化膜には潤滑効果があると考えられる。加熱温度による影響を見れば、タフピッチ鋼の場合、大気中圧延時の圧力が真空圧延のそれに対する比は、800°C の方が 700°C に比べて小さい。酸化膜の厚さを考慮すれば、このことは酸化膜に潤滑効果があることを裏づけている。炭素鋼の場合には逆の現象が見られるが、これは炭素鋼の酸化膜が比較的容易に剝離することから、高温になればなるほど部分的な剝離による材料表面の凹凸が激しくなるので、酸化膜の潤滑効果が低減するためと考えられる。

この酸化膜と圧延中の摩擦状態の関係をより定量的にとらえるために、酸化膜の厚さを任意に変化させる処理を施し、そのさいの摩擦係数、先進率、平均圧延圧力を

調査した結果によると、鋼の圧延中の摩擦係数は酸化膜がなくなってくると高くなり、圧延圧力も高くなる。しかし、実験量が少なく酸化膜の適正な値を見出すに至らなかつたが、より詳細に研究を行うことにより、実操業における最適な酸化膜制御圧延 (後工程も含め) が可能になると考える。

6. 純チタンの真空熱間圧延の諸特性¹⁴⁾

チタンの日本における生産開始は 1952 年で、チタンはようやく 30 年を越えたという歴史の新しい金属である。金属チタンは、軽量 (比重 4.51) で、強度 (鋼と同程度) が高く、耐食性 (ステンレス鋼を上回る) に優れ、航空機用材料、化学工業用、火力・原子力発電用、海水淡水化装置用等に用いられている。

チタンは上記利点を持ちながらも、酸素、窒素、水素との親和力が大きく、溶解、加熱・焼なまし、溶接、酸化還元性溶液等種々の環境下でこれらのガスと反応し、極めて安定な酸化物、窒化物を作る。チタンの加工工程の熱間圧延、鍛造でチタン材表面に生成するスケールは強固であるので、機械的に表面スケールを除去した後酸洗いで仕上げる方法もとられている。

したがって、チタンを真空あるいは不活性ガス中で熱間塑性加工する利点が考えられ、真空熱間圧延の研究の意義がある。

真空度に対する平均圧延圧力を図 9 に示す。チタンの熱間圧延においては変態点 (885°C) の上下で負荷特性に大きな差が現れ、1000°C、1140°C に加熱した場合、平均圧延圧力は著しく減少した。大気中圧延の場合、1000°C では酸化膜が均一かつ強固に付着し、真空中と比べて平均圧延圧力は減少した。真空中圧延の場合、圧延材の表面あらさは大気中圧延より向上するが、高温になると結晶粒の粗大化ならびに表面層とロールとの相互作用に起因すると考えられる圧延材表面のき裂が観察されたが、860°C においては比較的一様な表面状態が得られた。

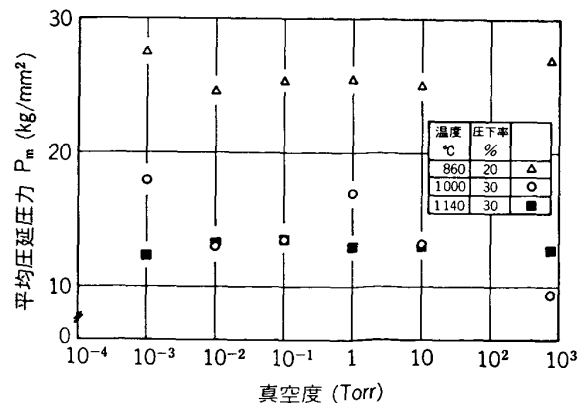


図 9 チタンの真空熱間圧延時の真空度に対する平均圧延圧力

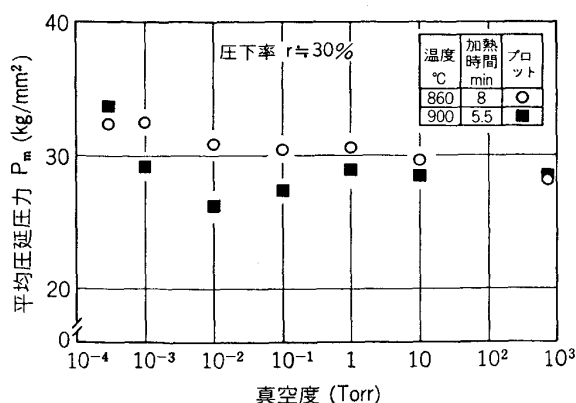


図10 圧下率 30% の場合のチタンの真空熱間圧延時の平均圧延圧力

加熱温度 860°C と 900°C で圧下率 30% 一定の場合についての結果を図 10 に示す。加熱温度 860°C においては、真空度の上昇にしたがって平均圧延圧力は徐々に増大する。これに対して 900°C においては、真空度が 10^{-3} Torr を越えると圧力が著しく増大する。加熱中に起こる試験片の酸化は真空度の上昇と共に少なくなり、高真空になるほど圧延材の表面光沢は増し、鏡のような状態である。また、表面あらさも真空度の上昇と共に良好となつている。860°C, 900°C とともに 10^{-3} Torr 以上の真空度では実用上無酸化で表面あらさも比較的良好な圧延材が得られる。

このように純チタンの熱間真空圧延では、 10^{-3} あるいは 10^{-2} Torr 以上の真空度において平均圧延圧力は高くなるが、酸化が少なく、表面状態も良好となり、900°C 以下の加熱温度の場合その傾向がより顕著となる。すなわち、酸化膜が生成しにくくなるので、大気中圧延時のようにもろく、硬い酸化膜のチタン材生地への押込現象も生ずることなく、より表面欠陥の少ない性能の高い健全な加工品が得られることとなる。

加熱温度 900°C 以上で、 3×10^{-4} Torr で連続パスあるいは一度に高圧下で無潤滑圧延を行おうとすると、チタンはロールに固着して通常の圧延が行えなくなつてしまう。この場合は、潤滑剤を用いなければならない。本研究では、潤滑剤が高温により変化し、真空度を低下させるきらいがあるので、また真空圧延用の適切な潤滑剤の入手が困難であつたので、シリコングリスを潤滑剤として使用したところ、固着を防止することができ、圧延後の表面状態もほぼ良好なものが得られた。

この問題を解決させるより重要なことは、ロール材質の適切な選択である。一例としてセラミックスロールを使用することが考えられ、その結果は、高温、高圧下でも固着が起こらず、平均圧延圧力も低下し、圧延後も表面状態の良好な製品が得られた。このように、新しい加工技術を実現していく場合、従来法のわくにとらわれない手法を用いていかなければならない。

表 2 各種材料を真空熱間クラッド圧延するさいの下限条件

クラッド組合せ材質	真空度 Torr	圧下率 %
チタン-銅	10^{-2}	20
	10^{-3}	10
チタン-鋼	10^{-2}	20
	10^{-3}	10
チタン-ステンレス鋼	10^{-3}	10
チタン-ニッケル	10^{-3}	10
チタン-アルミニウム*	10^{-2}	20

* の圧延温度 450°C, それ以外は 850°C

7. クラッド材加工への真空熱間圧延の応用¹⁵⁾

チタンはそれ自体単体で使用することもあるが、化学工業用には、他の金属とクラッドにしたり、積層にしたりして使用することもある。脱硫反応塔、アンモニア合成塔、尿素合成塔は、チタン-ステンレスの積層リングからなつている。チタンの特性を最大限に生かし、より安価な構成物を加工していくためにも、チタンと他の金属とをクラッド化させる技術の確立は意義が高い。

各種材料をクラッド化することは冷間加工では非常に困難で、組合せ材料にもよるが冷間加工率約 70% を与えないと接合は起こらず、さらに変形抵抗の差によつては、他の一方がのしいかのように破断をしてしまい、接合ができないこともある。したがつて、熱間加工にてクラッド化する方法がとられるが、大気中ではそれらの接合面にスケールが生じやすくなるために、それらを密閉容器内に封入して圧延したり、四面をあらかじめ溶接したりしてから圧延する方法がとられている。

本研究では、チタンをベースにして、タフピッチ銅、低炭素鋼、ステンレス鋼、純ニッケル、純アルミニウムなどの材料とのクラッド化するために、真空熱間圧延法を用いた。

熱間真空圧延による各種材料のクラッド化は思つたとおり容易で、接合に必要な真空度、圧下率は表 2 のようになった。どの組合せ材料でも高圧下、高真空になるほどより強固に接合することも判明した。チタン-アルミニウム (この場合熱間圧延温度は 450°C と低い) の場合を除いて、他の組合せでは、圧下率が 10% という低圧下率にもかかわらず、真空度 10^{-3} Torr の熱間圧延 (圧延温度 850°C 一定) で十分に接合することが明らかになった。無酸化に近い省酸化を期待できる真空熱間圧延の上記条件下では、接合面への酸化皮膜による外乱もなく、さらに塑性加工による新生面も酸化されることなく、その活性状態がそのまま接合へのエネルギーになるためと考えられる。

このように、大気中で接合困難である異種金属のクラッド化には真空熱間圧延法が有効であることが明らかに

された。さらに、表面あらしの点からは、被クラッド材のうち高強度材の表面あらしを大きくすればより強固に接合することや、チタンをより薄く（他金属との板厚比0.25）しても健全なクラッド材加工が可能なことや、3層クラッドの圧延も可能であることが、上記圧延条件の範囲で確認された。

8. おわりに

チタンを主に真空熱間圧延の概要について述べてきたが、真空中でかつ熱間状態での加工は今後さらに活発に使用されていくであろう。従来の技術では加工の困難な材料や、より表面性状の高品位化が要求される材料などの加工や処理に、真空や不活性ガスと高温の同時処理が用いられるであろう。今後は、チタンのみに限らず、付加価値の高い材料の加工法に、本加工法を拡大した方法が用いられていくことが望まれる次第である。

その一例として、筆者は、図1の概念から、真空拡散（あるいは固相）接合の研究も行っている。真空熱間圧延装置のノウハウを基にして、ほぼ同じ設計方案で図11に示す拡散接合装置¹⁶⁾を設計、試作、運転している。ここ1, 2年各種材料の拡散接合の研究が盛んに行われているが、本装置は、最高1200°C、到達最高真空度10⁻⁶Torr、負荷能力5t、試験片最大寸法45mm（直径）の仕様である。真空熱間圧延のさいのクラッド化の研究に

用いた各種組合せ材料の拡散接合や、セラミックスと金属との固相接合¹³⁾やその他の材料の固相接合などが可能となる。

特に、10年前にはそれほど一般化されていなかった真空技術は、今となつては10⁻⁶Torrや10⁻⁶Torrの真空度を得ることはいとも容易に実現できる状況になった。付加価値の高い材料を前提にすれば、無人化、コンパクト化、クローズド化、小型化のシステムができると思われる。

以上、真空熱間圧延の従来の研究を概説すると共に、日本では本分野の研究は筆者のものしかないの、その研究結果を基に、真空熱間加工の現状と考え方について簡単に説明してきた。不明の点もあつたことと思うが、読者の今後の研究や技術に何かしらのお役に立てば幸いです。不備な点については、色々ご指摘、ご教授お願いします。

最後に、本研究は昭和50年度文部省科研費および昭和51年度石原・浅田研究助成金を受けて完成されたもので、ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) A. V. KRUPIN and V. N. CHERNYSHEV: Int. Conf. Vac. Metall, 4 (1974), p. 329
- 2) A. B. Крупин, И. М. Лавлов, В. Н. Чернышев, В. С. Бочолобов и Б. Л. Линецкий: Извест. Вуз. уер. Метал., 3 (1965), p. 89
- 3) В. М. Амоненко, А. С. Тронь, В. В. Мухин и В. А. Тарасов: Сталь, 20 (1960), p. 920
- 4) И. М. Лавлов, Ю. М. Сигалов, А. Е. Шелест, А. М. Зубко и Я. В. Гуревич: Извест. Вуз. уер. Метал., 6 (1961), p. 106
- 5) И. М. Лавлов, Я. Е. Гуревич, В. Л. Оржеховский, А. Е. Шелест и А. П. Еашенко: Цветные Металл, 35 (1962) 7, p. 75
- 6) И. М. Лавлов, Я. В. Гуревич, А. Е. Шелест, В. Л. Орнеховский и А. П. Ващенко: 同上, 36 (1963) 2, p. 68
- 7) И. М. Лавлов, А. Е. Шелест, Я. В. Гуревич, В. Л. Орнеховский и А. П. Ващенко: 同上, 36 (1963) 5, p. 63
- 8) В. Е. Иванов, С. Ф. Ковтун, Н. Д. Тарасов и Р. А. Ульянов: 同上, 35 (1962) 11, p. 85
- 9) А. Я. Борисов, В. И. Шекалов, М. А. Герцык и А. А. Александров: 同上, 40 (1967) 5, p. 82
- 10) Я. В. Гуревич и В. Л. Оржеховский: 同上, 37 (1964) 12, p. 67
- 11) В. Н. Чернышев, А. В. Крупин и Ю. Д. Воробьев: Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Chern. Metall., 11 (1974), p. 86
- 12) 本村 貢, 小島淳良: 鋳研報告, 32 (1977), p. 23
- 13) 本村 貢, 小島淳良, 青木悦男: 昭和53年塑性加工春季講演会講演論文集 (1978), p. 185
- 14) 本村 貢, 青木悦男: 第31回塑性加工連合講演会講演論文集 (1980), p. 419
- 15) 本村 貢, 柴 啓介: 昭和58年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1983), p. 427
- 16) 本村 貢, 高野智彦: 昭和60年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1985), p. 595

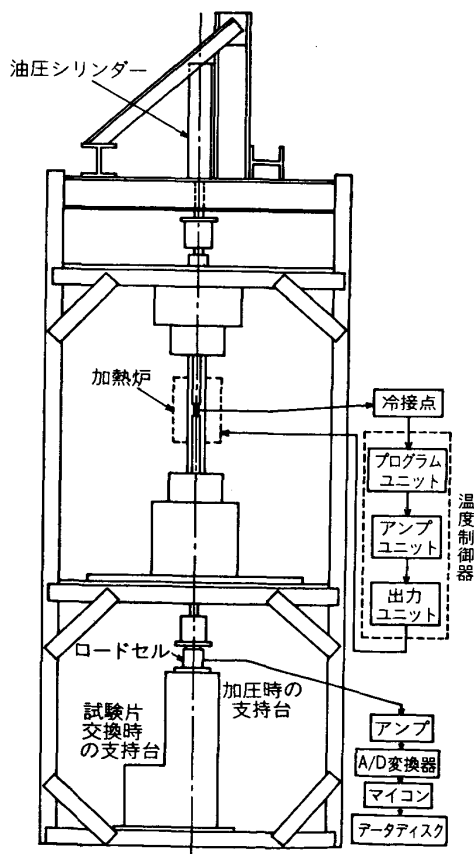


図11 拡散接合装置