

# 金属素形材の製造技術の可能性

—圧延技術を中心として—

New Possibility of Technology for Metal Sheet and Plate Manufacturing

木 内 学\*

Manabu KIUCHI

「技術創造立国」が叫ばれ、「先導的研究開発」の推進が求められているが、従来型の思考の枠を破り、真のブレークスルーを実現するのは容易ではない。本解説では、素形材製造技術として最も重要な役割を果たしている「圧延加工」対象として、従前技術の限界を突破し得る革新的技術やプロセスの可能性について、具体的な例を示す。本稿に示す新技術・新プロセスは、いずれも筆者独自の着想によるものであり、各種の問題を含むもののそれぞれ今後の大きな技術開発課題となり得るものである。一見、無謀とも思われる事例が含まれているが、大胆な発想と取り組み無くしては、現在各分野に満ちている閉塞感や飽和感を打破することは出来ない。「創造性」や「先進性」は常に一定のリスクを内包しており、また或る種の「非常識性」を含むものと云えよう。かかる見地からまとめた本稿が革新を目指す技術者に役立てば幸いである。

## 1. 緒 言

「技術創造立国」が叫ばれ、「キャッチアップ型」から「先導型」への研究開発の転換が求められている。しかしながら「創造的且つ先導的な研究開発の推進」と一口には云い得ても、その立案から計画、実行、更に成果の獲得に至る道には様々な障害があり、実現は容易ではない。そもそも、独創性が高く、未踏の分野を開拓していく先導的研究開発とは如何なる考え方や方法により実現できるのであろうか。この問いかけに具体的に答えることは難しい。唯一云えることは、与えられた目標や課題に向かって、採り得る方法や手順のあらゆる可能性を探り追求し続けることが、何時如何なる場合においても必要不可欠であり、新しい突破口を探り出すきっかけを与えてくれるという事実であらう。

さて、素形材の製造技術に関する或る種の閉塞状況も、他の技術分野と同様であり、既存技術の限界を打破し得る新しい技術や手法が強く求められている。既存技術の役割とその重要性は当面大きく変わることはないと考えられるものの、それらの改良・改善により新たに得られる成果にはおのずと限界がある。またその様な改良・改善を目指す取り組みのみによって、激しく変化し続ける産業社会が求める多様な素材を提供していくことは困難であらう。即ち、素形材製造のための新しいフロンティ

アを拓く技術やプロセスの開発が求められているのである。

本稿では、素形材の製造分野において中核的役割を担っている圧延技術を中心として、今後検討されるべき新製造技術やプロセスについて幾つかの例を紹介する。なお、以下に述べる加工方法・加工機械あるいは製造プロセスは、筆者の着想をそのまま示したものであり、必ずしも開発が進み具体化しているものばかりではない。

## 2. 超高圧下圧延と圧延機

現在、21世紀へ向けての超高強度構造材料 (STX21) の開発プロジェクトが構想されている。在来品の2倍の強度を発現し得る鋼構造材料を目指し、その製造技術を樹立しようとするものである。この目標を目指すに当たって、考え得るあるいは採り得る手法としては概略以下のものがある。

- (1) 材料設計技術および強度特性シミュレーション技術を駆使して、広範な材料組成の中から最も有望な組合せを選び出し、目指す強度を保有する合金あるいは金属間化合物の開発を実現する。
- (2) 材料組成と製造過程における変形付加プロセスおよび加熱・冷却プロセスを最適化することにより、素形材 (製品) 内部に超微細結晶構造を発現せしめ、目標とする強度を獲得する。
- (3) 同様な手法により、素形材 (製品) 内部の結晶方

\*東京大学生産技術研究所 第2部

位を完全に制御し、最も高い強度を発現する方位の3次元的分布構造を実現する。

- (4) 上述の手法により得られた超微細構造層、結晶方位制御層、金属間化合物層あるいは酸化層等を3次元的に配列した構造を実現し、所要の強度を獲得する。
- (5) 金属(合金)材料の超高純度を実現し、不純物による特性劣化を極限的に抑制することにより、その理想的強度を発現せしむる。

以上の手法を実現していく上で、その核となる幾つかの基幹技術が必要となるが、高速大変形付加技術は、急加熱-急冷却技術と並んで、金属材料の内部構造制御のために必須の技術である。そして、この高速大変形付加技術の一つが超高圧下圧延技術である。

この超高圧下圧延を実現するために最も可能性の高い圧延法あるいは圧延機として、新しいコンセプトに基づく遊星クラスター圧延機(New Planetary Cluster Mill, 図1参照)が考えられる。これは、これまでのプラネタリーミルとは異なり、概略8本以下の比較的小径のワークロールとそれらを支え公転させるための回転支持体とから構成される圧延機であり、各ワークロールは公転しつつ自転し、被圧延材に沿って転動してその表層を強く圧下する。この方式の特徴は、(1)各ワークロールによって表層に加えらるる変形量が極めて大きく、高速で大ひずみを付加することができること、(2)ワークロールの数を限定することにより、操作の安定性とメンテナンスの容易化を実現できること、などにある。本圧延方式および圧延機の開発に当たって、構造上および機能発現上の特別の困難さは見当らず、実現性は十分あると考えられる。

### 3. 連続製造スラブの大圧下圧延

板材の製造に際して、連続製造により得られる厚スラブを、中心ザク領域の凝固終了前に大圧下して、適切な

粗圧延機又はホットストリップミルに直接送り込み、圧延効率を著しく高めるのと同時に、中心欠陥の無い板材の製造を可能とすることは、圧延技術者の長年の夢である。これが実現できれば、高い生産性を獲得しつつ高品質板材の製造が可能となるばかりでなく、前節で述べたような高機能構造材料製造への道を拓くことにもなる。

この連続製造厚スラブの大圧下圧延は、従来、繰り返して議論されながらも実現しなかったが、その理由としては、(1)大圧下に伴う凝固シエルの割れ、破碎、溶湯の偏在、など被圧延材内部の挙動が必ずしも十分解明されておらず、従って圧延条件の選択基準や制御方法も不明である、(2)上記シエルの破碎や溶湯の偏在に伴うマクロ偏析の発生挙動も解明し尽くされていない、(3)大圧下を加える方法がない、(4)大圧下により絞り出された濃化溶湯が溜まり、行き場がなくなる、などが挙げられている。

上述の(1)、(2)の問題については、従来、極く軽度の圧下を加えた場合の問題のみが議論され、圧下の害のみが強調されてきたきらいがある。実際、凝固シエル内面の粗大化した組織を完全に破碎する水準の大圧下を加える場合の内部組織については殆ど知られていないのが実状である。

これらの問題と限界を打破し、大圧下を加えて凝固シエル内面を完全に破碎し、且つ、未凝固ザク層を一気に凝固圧延する方法として考えられるのが、上述の新形式プラネタリークラスター圧延機である(図2参照)。この圧延方式を導入することにより、上述の種々の問題を将来への可能性へと転換し、(1)大圧下による内部組織の改質、(2)同じく内部未凝固層の凝固促進、(3)粗圧延あるいは熱間連続圧延との直結化による生産効率の飛躍的向上、などが期待できる。なお、この遊星式圧延方式においては、各ワークロールによる圧下率と公転速度を変化させることにより、連続製造工程と圧延工程の速度バランスを任意に調整できる点も大きな利点となる。

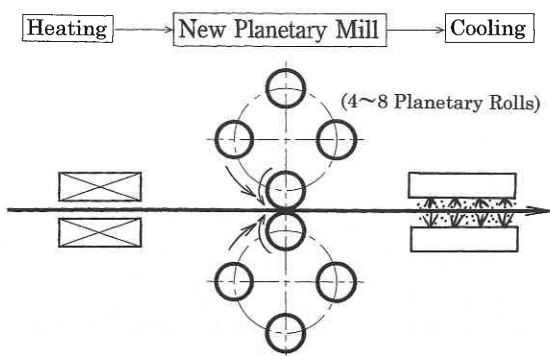


図1 新形式プラネタリークラスターミル(PC Mill)の概要

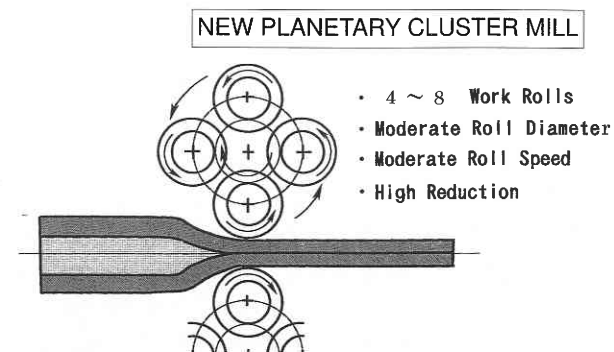


図2 プラネタリークラスターミルによる未凝固スラブの大圧下圧延

4. 連続半凝固圧延および圧延機

連続半凝固圧延法とは、溶湯を半凝固状態に至るまで攪拌冷却し、得られた半凝固スラリーをロール間に導き、凝固せしめると同時に圧延して、微細な結晶構造を有する薄板その他の圧延製品を得る方法である（図3参照）。この圧延法の狙いは、(1) 溶湯から直接的に薄板（ストリップ）を製造する、(2) 溶湯を半凝固化することにより、いわゆるストリップキャストイングにおいてみられる凝固過程の不安定化現象を防止し、安定した操業を実現する、(3) 半凝固スラリーより凝固させることにより内部組織を微細化する、(4) 強圧下を加えることにより被圧延材の改質を達成する、ことなどにある。

図3より理解できるように、これは単なる鋳造プロセスではなく、半凝固スラリーからの凝固および大圧下圧延を通して、製品特性の大幅な改質を目指している、と同時に、連続プロセスとして高い生産性の実現をも可能としている。実施に当たっては、半凝固スラリーの固相率制御や雰囲気制御を行う必要性も考えられるが、基本的な部分の実現可能性については既に確認済みである。

図4には、半凝固圧延法に対するもう一つの新しい圧延プロセスとして、いわゆる半溶融圧延法の概要を示す。この圧延法では、被圧延材を半溶融状態に加熱した後、ロールを用いて大圧下を加えつつ急冷凝固させ、微細な内部組織を持つ製品を得ることができる。

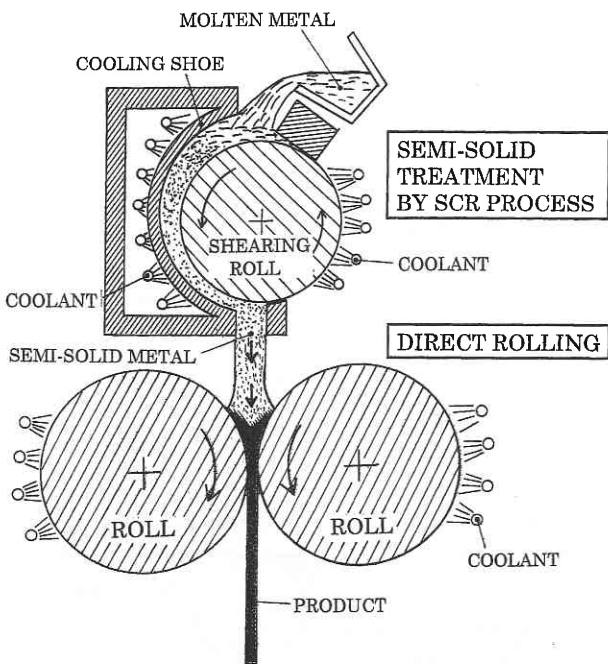


図3 半凝固直接圧延法（SCR-Strip Rolling法）の概要

5. リングロール型ストリップCC圧延機

いわゆるツインロールタイプのストリップキャストイング法は、長年にわたる開発研究の結果、近年にいたって本格的実用化が始まろうとしている。この方法は溶湯から直接ストリップを製造することを目指しているが、その際の最大の問題点は、(1) 凝固プロセスの安定性の確保が難しい、(2) 湯ジワ等の製品表面欠陥の防止又は表面品質の確保が容易でない、ことにある。

これらの問題解決のためには、ストリップに対するロールの冷却能力および圧下能力を出来るだけ高めることが不可欠であり、これにより凝固終了点をロールギャップ中心より入口側へ移動させると同時に、凝固後のストリップに大圧下をかけて所要の板厚を獲得し、併せて表面品質を確保することが可能となる。凝固終了点を入口側へ移し、凝固挙動を安定化させるためには、大径ロールが有利であるが、通常のロールでは、冷却能力と圧延荷重に耐える剛性を両立させる方法が難しく、支持方式や駆動方法の面でも問題がある。例えば、冷却能力を高

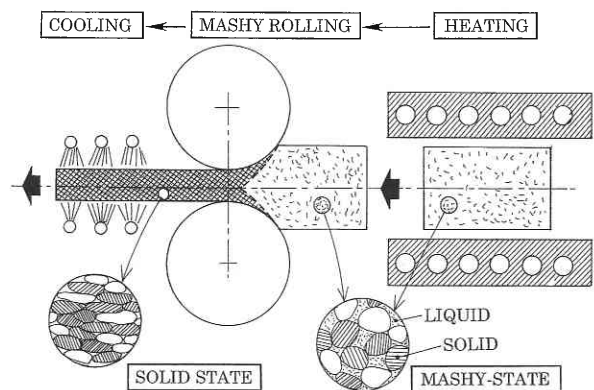


図4 半溶融圧延（Mashy Rolling）法の概要

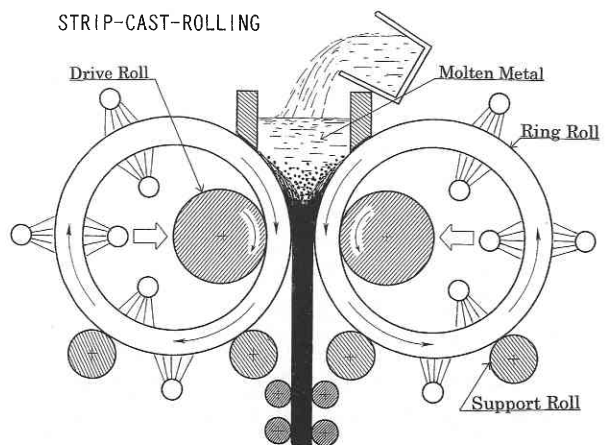


図5 リングロール圧延法による溶湯の直接圧延法の概要

めるために中空ロール化すれば、強度や剛性の面で問題を起こしやすい。そこで考えられるのが、図5に示すリングロール圧延方式である。

リングロール圧延方式では、溶湯を冷却し圧下するためのツールとなるリングロールと、これに圧下力を加え駆動するためのドライブロールおよび定位置で回転させるための支持ロールとが用いられる。リングロールは構造から考えても容易に理解できるように、その径を拡大することは容易である。故に溶湯および凝固シェル又はストリップとの接触を長くして、凝固とそれに続くシェルの合体および圧延を安定化することができる。一方、リングロール自体を冷却することも容易であり、十分な冷却能力を確保することができる。併せて、ロールの表面管理も実行し易い構造を有している。

他方、ドライブロールには十分な剛性あるいは強度と駆動力を付与することができるので、リングロールに対して必要十分な圧下力と駆動トルクを伝達することが可能である。

図6には、シングルリングロールタイプのストリップCC圧延機の基本構想を示す。この場合も、圧延機の構造、特性、期待される効果はツインリングロールタイプの場合と同じである。

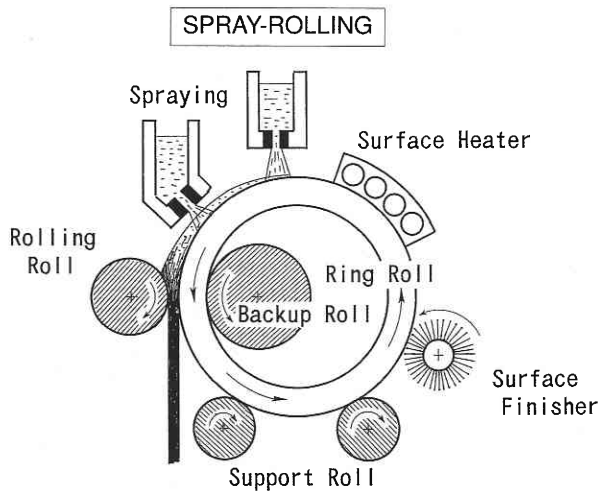


図6 Single-Ring-Roll Strip C. C.圧延機の概要

6. DIP-ROLLING

これは母層となる金属素板を、同種金属又は異種金属の溶湯中に浸漬し通過させることにより、その表面に溶湯金属を凝固させ、この凝固層を直ちに圧延し、その内部組織を改善するとともに、母層と凝固層との接合強度を高めることを狙いとするプロセスである(図7参照)。圧延に際しては(1)母層と凝固層とを同時に大圧下し、凝固層のみならず全体を改質して新しい機能を発現させ

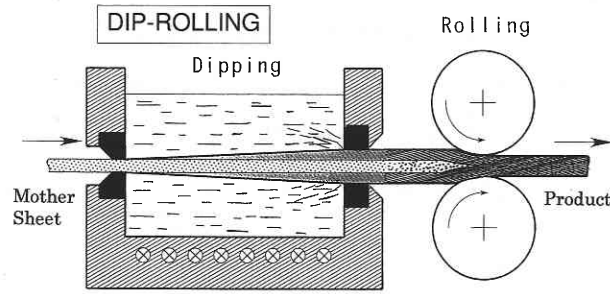


図7 Dip-Rolling法の概要

る、(2)凝固層のみを適度に加圧、圧下、冷却することにより、上述の内部組織の改善と接合強度の向上を図る、の2種類の場合がある。更に、(3)圧延して薄くなった板を母層素板として再び溶湯中を通し、凝固・圧延を繰り返して製品長さを増し、いわゆるストリップの連続製造に代わるプロセスとして利用することも可能である。

また、(1)、(2)のいずれの場合の圧延方式を採用にしても、それらの凝固・圧延を繰り返すことにより、いわゆるクラッド板、あるいは積層構造を有する複合材料、を製造するプロセスとして利用することもできる。

7. GALVANIZED-ROLLING

いわゆる浸漬型のメッキ層の結晶構造のあり方については必ずしも十分に研究されていないのが実状である。多くの場合、メッキ層の厚さに比して、結晶粒の大きさが異常に大きい構造を有している。このことが、メッキ層の強度の低下や剥離を誘発する原因となっている。

浸漬後のメッキ層の凝固完了直前あるいは、凝固完了直後に圧延を加え、新生メッキ層に急冷および大変形を付与することにより、メッキ層の内部構造を改質し、超微細粒化を実現して、その強度や機械的特性を大幅に変えることができる。Galvanized-Rollingの狙いは、凝固直前・直後の急冷および大変形によりメッキ層が持ち得る金属学的・機械的特性を変更せしめ、新しい特性を獲得

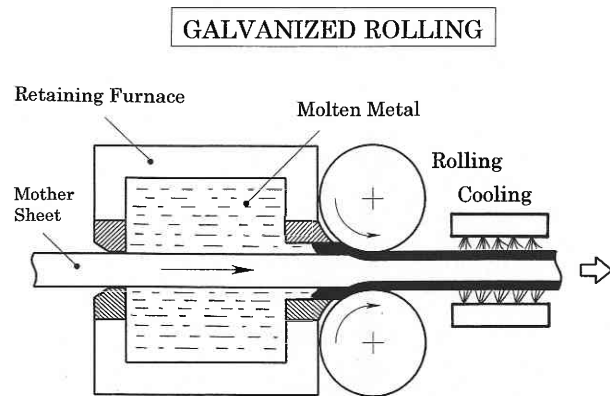


図8 Galvanized Rolling法の概要

することにあり (図 8 参照)。

更に、この方法の拡張したプロセスとして、浸漬法により極端な厚メッキ層を形成せしめ、母層金属とメッキ層との反応を促進させて金属間化合物層の成長を促した後、これに大圧下を加えて、成長した金属間化合物層を破碎しこれを再加熱してメッキ層を半溶融状態にして、粉碎した金属間化合物をメッキ層中に分散させつつ圧下圧着させて、いわゆる粒子強化型複合メッキ層を作り出すことができる (図 9 参照)。所要のメッキ層の特性を維持しつつ、その硬度や耐摩耗性を大幅に向上させて新しい構造を有するメッキ層の形成が可能となる。

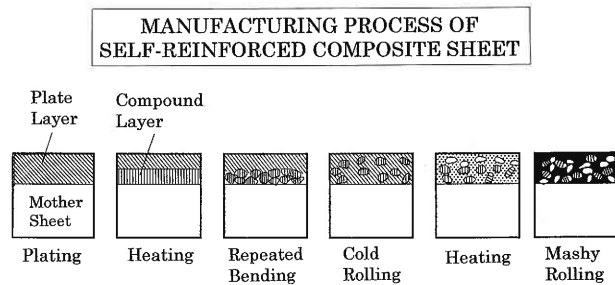


図 9 自己強化型積層複合材料の製造プロセスの概要

### 8. SMR (Surface-Melt Rolling) プロセス

素板の表面を高周波加熱法により、半溶融又は溶融状態に加熱し、この表層部をロールを用いて急速に冷却し凝固せしめると同時に圧下し変形を与えて、急凝固効果および動的再結晶効果により、超微細構造を有する表層を形成するのが SMR 法 (Surface Melt / Mashy Rolling 法) である (図 10 参照)。この方法により、薄板の表層に極めて微細な結晶構造を有し、強度が高く、変形能が高い第二相を形成することができる。このようにして製造される自己強化型傾斜機能板材は、二次加工性に優れ

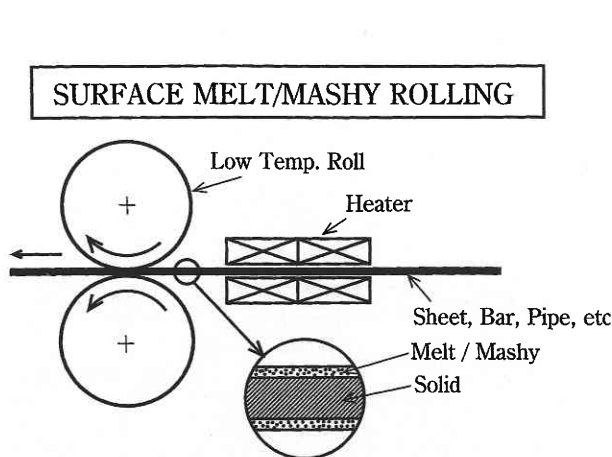


図 10 Surface Melt/Mashy Rolling (SMR) 法の概要

且つ最終製品の品質を大幅に高めることが出来る。

更に、このプロセスの応用として、加熱され半溶融化又は溶融化した表面にセラミック粒子やセラミック短繊維、あるいは異種金属の粉末や粒子を散布し、その直後にロールで圧下しつつ急凝固させ、複合層を形成することも出来る。散布され圧下されたセラミックや異種金属の粉粒や短繊維は、半凝固層あるいは溶融層へ埋め込まれ固定されて強固な複合層が形成される。この様にして表層部を任意に改質できることがこのプロセスの特徴である。

### 9. 超高張力圧延技術

現行の張力付加圧延においては、被圧延材の降伏応力の 30 ~ 40 % の張力を付加して圧延を行うのが普通である。張力を付加する理由はいろいろあるが、圧延加重の低減、ロール摩耗の低減、プロセスの安定化、被圧延材の形状制御の容易化、などが主たるものである。

被圧延材に、その降伏応力の 70 ~ 80 % 以上の張力を加えて圧延する超高張力付加圧延技術は、被圧延材のくびれや破断その他の不安定変形、あるいはプロセスの動的挙動の安定化制御の困難さの故に、長い間、不可能と考えられてきたが、近年の計測技術、シミュレーション技術および制御技術の急速な進歩により、あながち不可能とばかり云えなくなってきた。

超高張力圧延機および圧延プロセスの概念図を図 11 に示す。一般的には圧延機の入・出側に張力付加装置が設置される構造となるが、圧延機そのものの方式および入・出側の流入・流出角度等の組み合わせとしては種々のものが考えられる。

超高張力圧延技術が望まれる最大の理由は、この技術により大圧下圧延が可能になることにある。超高張力下の大圧下により、圧延による被圧延材の内部組織の変化、

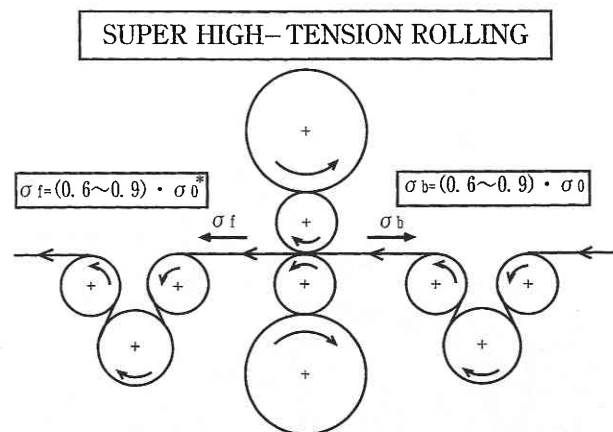


図 11 超高張力 (付加) 圧延 (Super High Tension Rolling) 法の概要

特に集合組織の発生の度合いや形態が従来とは大きく変わることが予想される。それらを適切に制御することにより、成形性に優れた板材、あるいは強度や変形限界に優れた板材を開発できる可能性がある。その他、高圧下圧延による圧延効率の大幅な向上、ロール段数の削減など設備の簡素化、その他の効果が期待できる。

この他、次に示す非対称圧延技術との組合せによる冷間での薄板の圧着圧延あるいはクラッド材の製造など、超高張力圧延技術は、現行技術の限界突破を目指す近未来の圧延技術の最重要な課題の一つである。

10. 多自由度非対称圧延技術および圧延機

非対称圧延技術に関する研究はこれまでも種々の角度から行われてきたが、筆者らの研究を除けば、いずれも断片的であり、その技術の持つ特徴や能力を十分に明らかにするものではなかった。しかしながら多自由度非対称圧延は、これまで検討されていない種々の機能と特性を備えており、圧延技術の新しい局面を切り開くためにも、従来以上に多くの研究がなされて然るべきである。

ここで提案するのは、多自由度非対称圧延機 (Super Flexible Mill) であり、(1) 上下ロール径、(2) 上下ロール速度、(3) 圧延方向に対する上下ロール軸のなす角度、(4) 被圧延材の流入角度、(5) 同じく流出角度、(6) 被圧延材流入時の幅方向傾斜角度、(7) 同じく流出時の幅方向傾斜角度、を変更できる機能を有し、加えて (8) 被圧延材の上下面、幅方向各位置の単独又は部分的な加熱・冷却、(9) 複数素材の挿入・取出し、などの機能を有するものとして定義できる (図12参照)。

この圧延機および圧延技術を用いることにより、(1) 板表面の片側大圧下による改質圧延、(2) クラッド板の安定な連続圧延、(3) 複数の異種材料の圧着圧延による積層型複合材の製造、(4) 厚さ方向に内部組織の異なる板材の製造、(5) 厚さ方向に残留応力が異なる板材の製造、(6) 幅方向に厚さの異なる板材の製造、(7) 幅方向

に材種が異なる板材の製造、などが可能となる。

図12は、被圧延材の流入および流出角度のみを制御する場合となっているが、上述の如く、被圧延材の流入・流出時の幅方向傾斜角度を制御し、また必要に応じて、上下のロール軸と圧延方向とのなす交叉角を同時又は別々に変化させることにより、幅方向に異なる材種で構成されている板材の圧延や幅方向に異なる圧下率を要する圧延にも対処できる。

この多自由度非対称圧延技術も、超高張力圧延技術と並んで、近未来の圧延加工が必要とする最も応用範囲の広い圧延技術の一つである。

11. COMBINED-ROLLING PROCESS

この場合の Combined Rolling Process とは、図13に示す如く、圧延機とテンションレベラーとの結合プロセスである。図13では、テンションレベラーが、圧延ロールと巻き取り機および巻き戻し機との中間に一台ずつ設置される形となっているが、圧延ロールに対して入側、出側、のいずれかに1台、あるいは両側に合計2台以上設置する場合がある。

衆知の如く、薄板の圧延では、1パスでクラウン比率を大きく変えることは難しい。その理由は、出側における板形状の悪化が発生し、下流側ロールへの移送あるいは巻き取りが困難となることにある。

そこで、圧延とテンションレベリングを直列的に組み合わせ、(1) 圧延ロールによる板クラウンの修正と (2) テンションレベラーによる板平坦度の改良とを同時に実行することにより、(1) 1パス当たりのクラウン修正量を大幅に増大させる、(2) 逆に圧延によって発生する縁波やセンターバックリングを圧延直後に修正することにより、圧延のパススケジュールの自由度を高める、などの効果が期待でき、圧延効率の大幅な向上が可能となる。

FLEXIBLE ROLLING MILL

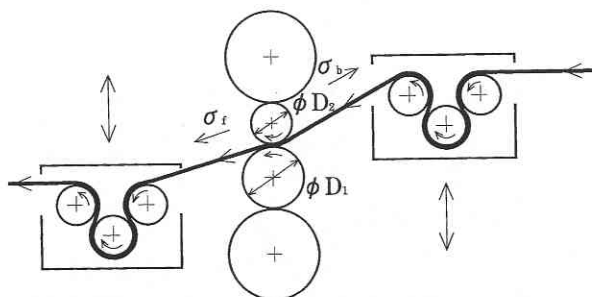


図12 超自由度圧延 (Super Flexible Rolling) 法の概要

Rolling Mill

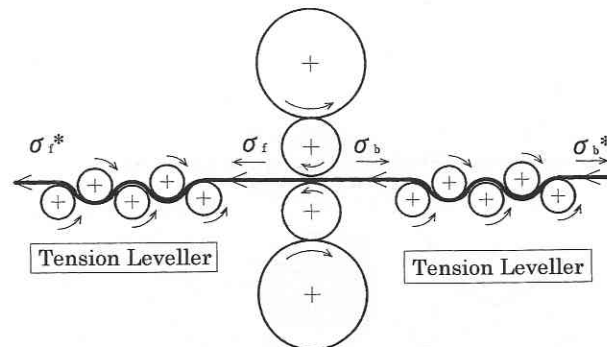


図13 combined Rolling Mill の基本構成

12. FORMING-ROLLING 技術

幅方向に板厚が異なる板材を圧延によって製造することは想像以上に難しい。これは、板材の圧延では、ロールギャップで被圧延材の幅方向への流動が起こりにくい、ということに起因している。そこで幅方向に厚さが異なる板材を効率的に製造するためには、部分圧延と幅方向への材料流動を促進するプロセスとの結合が必要である。

そこで考えられるのが、いわゆるロールフォーミングと圧延との結合である。ロールフォーミング法による丸波や角波の成形に際しては、被加工板材には幅方向に強い張力が作用するため、素板の各部に幅方向の伸び即ち板厚の減少が発生する。即ち、素板の幅方向に板厚の分布が発生する。分布の形態は、フォーミングロールの組合せや設定位置によって異なる。それ故、このロールフォーミングプロセスを適切に利用し、素板板厚の望ましい幅方向分布を獲得した後に、目的とする形状を持つ孔形ロールを用いて、圧延することによって、幅方向に厚さの異なる板材を比較的容易に製造できる可能性がある(図 14 参照)。

ロールフォーミング法と圧延法との組合せはこの他に

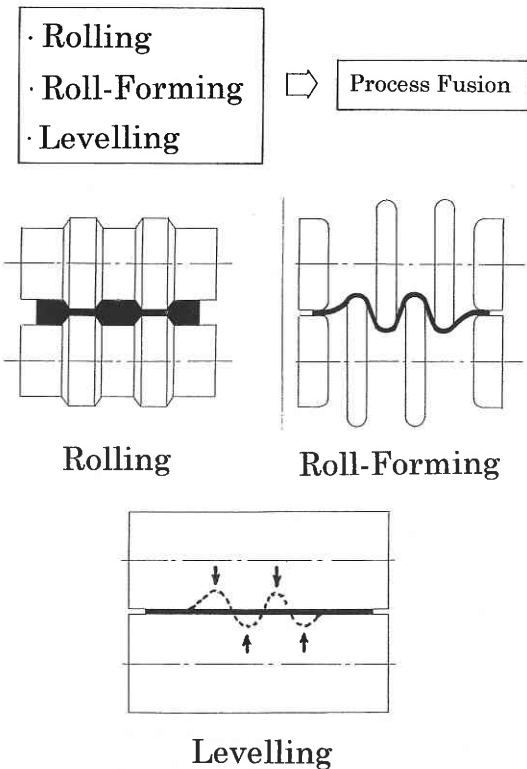


図 14 複合成形/圧延法 (Combined Forming/Rolling Process) の考え方

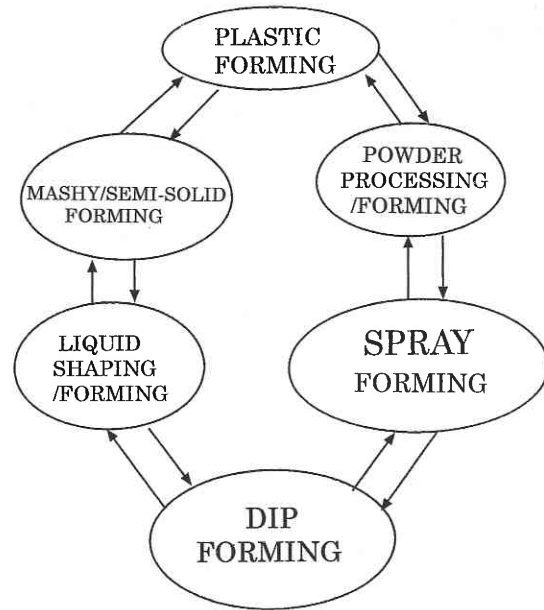


図 15 金属素形材製造のための技術融合の輪

もあり、ロールフォーミング法で幅方向へ伸ばした素板を平ロールで圧延して、均一な板厚を有する板材へ戻すことを通して、板幅を増大させる拡幅圧延法もある。

13. 結 言

本稿では金属素形材の製造にかかわる限界突破型未来技術の例として、圧延技術にかかわる新しい可能性について示した。それらの多くは、様々な要素技術や、個別技術の融合の上に成立しており、いずれも従来技術の枠を越えその限界を突破できる可能性を秘めている。(図 15 参照)。故に、先入観を捨てて可能性に挑戦することが大切である。

我国の技術風土には、従来試みられたことのないプロセスや技術に直面するとき、提示されたアイデアやコンセプトの難点や欠点のみを強調する傾向が多い。独創性の重要性が語られる一方で、このような反応や考え方が無数の可能性を失わせしめてきたと云うことができる。

限界突破型の技術開発が求められている現在、困難やリスクを伴わない課題などは残っていないと考えるべきである。大切なことは、「新しい提案の核心は何であるかを考え、肯定的に可能性を追求する」ことである。このような積極的取り組みなくして新技術や新プロセスの開発はあり得ない。そのような意味で、本稿に示した幾つかの提案が圧延技術の未来のために役立つことを願っている。

(1997年6月16日受理)