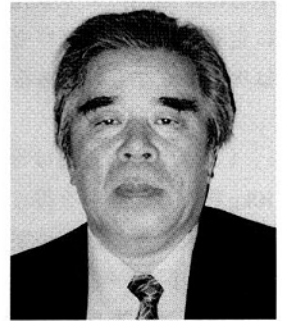


製造技術の革新を支える 塑性加工の新しい課題

New Technologies of Plasticity for Evolution of Manufacturing

東京大学名誉教授
木内研究室 代表
木内 学
Manabu Kiuchi



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」の構想から具体化そして成果の獲得に至る道は容易ではない。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。多くの人々が、独創性や先導性の重要性を説いているが、そのための具体的方策や方向について語っている例は少ない。実際、この問いかけに具体的に答え得る人は限られている。云えることは、技術の全体的動向を視野に入れ、目標を広く且つ柔軟に設定し、採り得る方法や手順と予想される結果についてあらゆる可能性を探り、それらを追求し続けることが必要不可欠であって、そのような努力の累積が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ろう。

さて、塑性加工分野において、創造性や先導性を強く求めながらも、様々な局面で見られるある種の閉塞状況は、他の技術分野で見られる状況と基本的に同様であり、この閉塞状況を打破し、将来へ向けての展望を開くためには、既存技術の限界を乗り越え得る新しいコンセプトや方法が必要である。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や製品を提供していくことは困難であろう。今こそ、塑性加工の新しいフロンティアを拓く技術やプロセスを構想し具現化できる力が求められているのである。

本稿では、塑性加工の分野において、今後検討されるべき新技術や新プロセスについて幾つかの例を紹介する。紙面の制約もあって、採りあげる事例は限られているが、いずれも今後の塑性加工の発展に対し、大きな影響を与えられようと思われるものである。但し、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、必ずしも開発が具体化しているものばかりではない。

2 産業基盤たる材料技術の進歩を支える塑性加工技術

鉄鋼をはじめとする鉄・非鉄・その他の材料は、およそあらゆる産業の骨格を支える役割を果たしており、材料技術の進歩無くして産業技術の発展無しと云うことができる。

塑性加工技術は、産業用材料を作り出す一次素材産業と、それらを加工して所要の部品・部材を作り出す二次加工産業の双方に深くかかわっており、それらの中核技術として、現在にいたる産業技術の発展に大きく貢献してきた。例えば、我国の自動車産業の発展が、鉄鋼メーカーをはじめとする素材メーカーの高度な圧延技術その他の塑性加工技術に裏打ちされた緊密な協力の下に成し遂げられた成果であること、また、このようにして得られた高品質素材に支えられた冷間鍛造技術の発達も、その競争力の強化に大いに貢献してきたことなど、広く知られているところである。

高品質素材の安定した供給は、一国の高度産業システムの維持・発展には不可欠であり、高度な材料技術の発達が高度な産業技術を誘導する。故に、高度化を続ける産業技術が要求する新しい特性や品質を有する素材を開発し提供していくことも、今後の塑性加工技術に課せられた大きな任務である。かかる視点から、材料技術の更なる発展を目指す先導的な塑性加工技術の幾つかを次に示す。

3 超微細粒鋼その他の新材料開発と大変形付加技術

21世紀の産業技術を先導する材料として、超高強度構造材料（STX21）やスーパーメタル（超微細粒金属材料）の開発プロジェクトが推進されている。在来品の2倍の強度と優れた靱性並びに変形能を発現し得る構造材料の獲得を目指し、その製造技術を樹立しようとするものである。この目標を達成する手法として、以下の取組みが強力に推進されている。

(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、目指す強度を有する合金、あるいは炭化物をはじめとする析出物や金属間化合物による分散強化特性をもつ金属を実現する。

- (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、金属学的に最も望ましく選択し制御することにより、内部に超微細結晶構造を発現せしめ、目標とする強度や特性を獲得する。

以上の手法を実現していく上で、その核となる幾つかの技術が必要となる。高速大変形付加技術は、急加熱-急冷却技術と並んで、超微細粒組織の作り込みをはじめとする金属材料の内部構造制御のために必須の技術である。云うまでもなく、一工程での大変形付加は、塑性加工が常に目指す重要な技術的課題であるが、現状ではアルミニウムの熱間押出しや一部の鍛造などにそれが見られる程度であり、他の塑性加工において大変形付加を実現することは容易ではない。

このような状況の下で、生産性や生産量の面から期待される高速大変形付加技術の一つが、図-1に示す遊星クラスタ圧延機 (New Planetary Cluster Mill) による高圧下圧延である。その特徴は、各ワークロールによって表層に加えらる変形量が極めて大きく、他の如何なる圧延法によるよりも大きなひずみを一挙に付加することができることにある。この圧延方式および圧延機の構造上の問題および機能発現上の障害については、未だ必ずしも検討し尽くされていないが、現在の我国の機械技術を以てすれば、実現の可能性は十分ある。また、この圧延法および圧延機は、上記の超微細粒材料の開発に大きな効果を発揮するばかりでなく、他の素材開発および製造の多くの面での活用も可能であり、その意味で、本技術の波及効果は非常に大きい

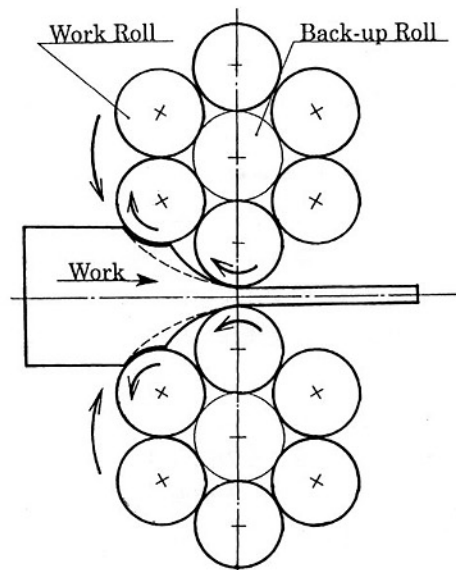


図-1 遊星クラスタ圧延機(HSPC Mill)の基本概念図

と云える。

4 素材製造のエミッションフリー化：連続鋳造厚スラブの直接大圧下圧延技術

連続鋳造により得られる厚スラブを、凝固終了前あるいは直後に大圧下して、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実現し、併せて使用エネルギーを極限的に削減することは、圧延技術の大きな目標である。これが実現できれば、前節で述べた高機能構造材料への道を拓くばかりでなく、高い生産性を獲得し、同時に環境への負荷を大幅に削減し、我国の鉄鋼産業あるいは素材産業の更なる競争力の強化に貢献できる。

この連続鋳造厚スラブの大圧下圧延がこれまで実現しなかった理由としては、(1)圧下に伴う凝固シェル割れ、溶湯の偏在、その結果としての組織の乱れ、その他の被圧延材内部の不均一構造あるいはマクロ偏析の発生を防止できない、(2)効率よく大圧下を加える方法がない、(3)大圧下により搾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)の問題については、従来、極く軽度の圧下を加える場合のみが議論され、圧下の害のみが強調されてきたきらいがある。実際、凝固シェル内面の粗大化した組織を完全に破碎する水準の大圧を加える場合の内部組織の挙動については、殆ど知られていないのが実状である。

これらの限界を打破し、大圧を加えて凝固シェ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期待されるのが、上述の新形式遊星クラスタ圧延機による大圧下圧延である (図-2参照)。この圧延方式を導入することにより、上述の問題を逆に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)同じく大圧下による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。

併せて、上述の如き素材の製造過程におけるエネルギーおよび環境負荷の大幅な削減は、エミッションフリーなプロセスによるクリーンな素材の製造を意味するが、クリー

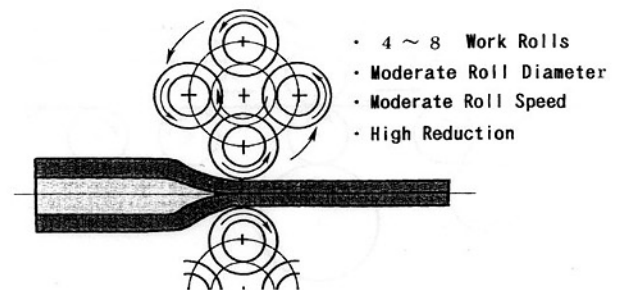


図-2 遊星クラスタミルによる未凝固原スラブの大圧下圧延概念図

んな素材の広範な供給は、これからの地球環境問題に大きく貢献することになり、これにより我国の素材産業の競争力を更に高めることができる。

5 積層型高機能材料の開発を目指す高張力付加圧延技術

現行の冷間圧延においては、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、降伏応力の70～80%以上の張力を加えて圧延する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。しかしながら、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。高張力圧延機および圧延プロセスの概念図を図-3に示す。

高張力付加圧延技術が望まれる理由は、この技術により、大圧下圧延が可能になるばかりでなく、従前の圧延によっては実現できない薄板の圧着圧延や、結晶方位の効率的制御が実現できる可能性があることにある。

例えば、大圧下に伴う新生面の増大により薄板の圧着圧延が容易となり、積層型の新機能材料の製造が可能となる。また、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、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。即ち、被圧延材の変形が、ロールによる板厚方向への圧下型の変形から、高張力による長手方向の伸びの誘発が主体となる変形へと変わり、内部の結晶の挙動が変化し、形成される方位や集合組織が変わって、従来とは質的に異なる材料特性が得られると考えられる。そして、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。

かかる視点から判断して、高張力圧延技術は、現行の限

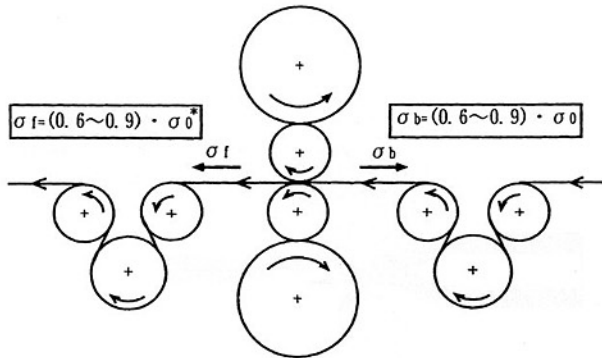


図-3 高張力付加圧延の概念図

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。

6 塑性加工にかかわる技術融合に期待される効果

現下、塑性加工技術を取巻く経済的・社会的環境は激変しつつある。製品に対する要求の多様化と高度化は絶え間無く進んでおり、品質や機能の面ばかりでなく、変種変量生産、オンデマンドマニュファクチャリング、リサイクリング、省エネルギー等々に対する要求も日増しに高まっている。さらにまた、我が国を支える産業技術の確保を目指す視点からみれば、製造業の将来展望が不透明になるがゆえに、その基盤たる金属加工技術の競争力の再構築が求められている。

塑性加工の技術的飽和が指摘されている現在、閉塞的状况を打破するためには、これまで蓄積してきた知識・能力を最大限に活用して、可能性を探索する以外に道はない。その探索に際して、最も有用な手段は、“技術融合の推進”である。

現状を注意深く見れば、各個技術が発展限界に近づきつつある一方、複数技術の融合による技術革新の可能性はむしろ増大していることが分かる。何故なら、技術融合を支援するエレクトロニクス技術をはじめとする制御技術、計測技術、材料技術、計算技術、等が急速に進歩しており、十年前はおろか数年前とも大きく異なる技術環境が生まれているからである。

以下、技術融合の可能性とその期待される効果について理解するために、一例として、“鑄造加工”と“鍛造加工”との融合について考えてみよう。

“鑄造加工”と“鍛造加工”は、それぞれ従前技術の改良・改善を通して生産性の向上や製品品質の高度化を図り、新製品の開発を進めようとする取組みを、今なお進めてはいる。しかしながら、その多くは発展の限界に直面し、成果の獲得に苦しんでいる。

例えば、“鑄造加工”は、(1)取り扱い得る被加工材質に関する限界、(2)製品の形状・寸法精度に関する限界、(3)製品の表面品質に関する限界、(4)製品強度に関する限界、(5)生産性に関する限界、(6)生産環境や生産立地に関する限界、などに直面している。同様に、“鍛造加工”も、(1)製品の形状や大きさに関する限界、(2)金型の強度・寿命に関する限界、(3)加工機能力に関する限界、(4)加工可能な被加工材質に関する限界、(5)作業環境に関する限界、などに苦しめられている。

しかしながらそれぞれが直面している問題は、一見すると、同じように見えても、その内容は質的にも量的にも異なる。例えば、“鑄造加工”が直面している形状・寸法精度に関する限界と“鍛造加工”が直面している形状・寸法にかかわる問題とは大きく異なる。この事実は、一方が限界と感じている問題も、他方から見れば限界ではなく、容

易にクリアできる課題に過ぎない場合があることを意味している。技術融合の狙いは、この技術的特質の相違を利用することにある。

鑄造加工と鍛造加工との融合を通して、各々の技術の加工機能や加工限界を大きく前進させることができる。“塑性加工”側から見れば、(1)工程の削減、(2)金型数の削減、(3)金型寿命の向上、(4)製品形状および品質の多様化、(5)コスト競争力の向上、等について、大幅な改革を実現できる。

7 大幅なコストダウンを可能にする融合技術：スプレー鍛造・スプレー押出し

スプレーフォーミング法により製造されたプリフォーム、ピレット等を直ちに金型、押出しコンテナ、その他の加工工具内へ移し、金型鍛造や押出しを施し、機械部品、板材、管材、棒材へと加工するプロセスは、非常に効率的且つ即応的なプロセスである。

金型スプレー鍛造の場合、プリフォーム製造用金型の中へ所要量の溶湯を直接スプレーし、半凝固または凝固後のプリフォームを成形金型へ移し鍛造加工を行う（図-4参照）。その際、スプレー条件を制御することにより、得られるプリフォームやピレットの形状・寸法並びに内部組織などを広範囲に変えることができる。同時に、プリフォームやピレットの製造工程が著しく短縮され、大幅なコストダウンが実現できる。

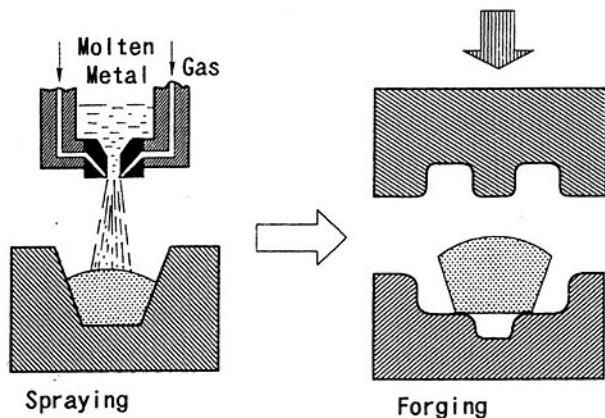


図-4 スプレー鍛造プロセス説明図

一般的には、従来プロセスで得られるピレットやプリフォームに比して、格段に細かい結晶粒や、一様に分散する炭化物等の微細な析出物を有するピレットあるいはプリフォームを安価に製造することが可能となり、その結果として、優れた特性と競争力をもつ製品を作り出すことができる。

このように、スプレーフォーミングと半凝固加工あるいは熱間加工との融合により、微細な内部組織と望ましい外形形状を有する凝固直後の素材からの直接的な成形加工が可

能になり、製品品質を高めることばかりでなく、加工工程を大幅に短縮し、生産効率の高い素形材や部品の製造が可能となる。その意味で、これらの技術は素形材製造分野での強い競争力の獲得へ向けて、有力な手段となる。

8 即応の多種少量生産のためのディップ鍛造、ディップ押出し

ディップフォーミングは連続鑄造法の一つであり、線材用素線の製造に利用されてきたが、このプロセスはきわめて応用範囲が広く、特に、半凝固あるいは熱間の押出し、引抜き、鍛造、圧延などとの融合を図ることにより、機能性が高くかつ生産性に優れた加工技術となる（図-5参照）。

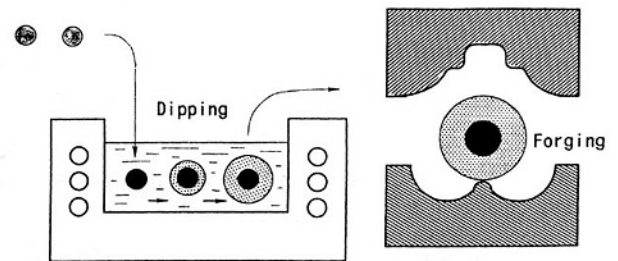


図-5 ディップ鍛造プロセス説明図

ディップ鍛造、ディップ押出し、ディップ圧延は、核あるいは芯となる素材を溶湯中に浸漬しそれらの表面に凝固層を発達させた後、あるいは必要に応じてこのような浸漬を繰り返して凝固層の更なる発達をうながした後に、取出し、金型鍛造や押出し、平圧延、孔形圧延を施し、素材化あるいは製品化しようとするものである。さらに、目的に応じて半凝固状態下でも、鍛造、圧延などを行い、凝固と変形の適切な組合せにより、製品の内部組織の制御も行うことを目指している。

通常、ディッピングのみでは、いわゆる凝固組織の発達が顕著であり、強度特性等について満足できない場合が多々あるが、その直後に加える上記加工により、動的あるいは静的再結晶が促進され、内部組織の面で改善されるばかりでなく、寸法精度、表面品質についても大きく改善される結果となる。

又、このプロセスは、内部に複層構造を有する鍛造品や圧延品を作る方法として優れており、核又は芯の部分は、軟らかく韌性に優れた材質より成り、外皮表層部は硬く耐磨耗性に優れた材質あるいは構造を有する製品などを作り出すことも出来る。

更に、このプロセスは、必要な製品を必要な量だけ、即応的に作る手法としても優れており、いわゆるオンデマンド生産など、柔軟な生産体制の構築にも有効である。

9 製品機能の高度化に適応する半熔融粉末成形

金属粉末を素材とする成形加工および焼結加工は、既に、各種機械部品の製造に広く利用されており、金属加工の重要な一翼を担っている。しかしながら、粉末材質や表面の酸化膜の影響により、成形および焼結の各過程において様々な問題が発生している。その多くは、成形加工時の圧密の不均一性、および焼結時の粉粒間の接合不足、さらに、それらに起因する製品内部の空隙の発生にかかわるものである。

金属粉粒体を半熔融状態に過熱すると、酸化被膜が溶融せずに残存したまま、粉粒体の内部が部分的に溶融し、熟したほおずきのように、薄い被膜の内部に固相・液相が共存する状態となる。これに鍛造、押出し、圧延等の加工を加えると、酸化被膜は細かく碎け、分散し、その後は通常の半熔融加工に広く見られるように、流動性のよい被加工材が小さな加工力の下で大きく変形して、所要の製品形状が容易に得られる。併せて被加工材内部の各固相粒間の結合が液相成分を介して促進され、同時に空隙は完全に埋め尽くされて、内部的に十分に密でありかつ結合力の強い組織が得られる。

粉粒体の半熔融押出し、鍛造、圧延は、(1)粉粒体素材の酸化被膜除去を含む表面処理が不要であること、(2)比較的粗い粒度を有する素材を用いても、半熔融加熱と金型・工具による急冷加工を組み合わせることにより、製品内部組織の微細粒化を比較的容易に達成できること、(3)粉粒体素材自体が安価に入手できる環境が整ってきたこと、あるいはまた、(4)溶製材では得られない材質組成が可能であり、機能的な製品を得やすいこと、などの理由により、今後、広く利用されるものと考えられる。

10 結言

本稿では、産業技術の高度化や経済的・社会的環境の変化に伴って、各種の新しい加工プロセス・加工技術の開発が必要となり、それが契機となって、塑性加工の新しい技術分野が広がっていくことを示した。この過程で異種技術の融合を通して生まれてくる新しい技術・プロセスは、異なる特質を有機的に結びつけ、相互に補い合うことにより、従前的な枠組みでは困難とされた課題を解決し、従来難しいとされた目標を達成できることを示した。

塑性加工技術全般について飽和感や閉塞感が強まる中、新しい技術のフロンティアを切り開くことが急がれている。問題解決のためには、いたずらに従来技術に拘泥することなく、思い切った新しいコンセプトや構想を掲げ、将来へ向けて挑戦する決意と行動が必要である。そのような意識で見ると、塑性加工技術には、飽和どころか、未知の大きな可能性が包含されていると云うことができる。

参考文献

- 1) 木内 学：金属素形材の製造技術の可能性；生産研究，49-9（1997.9）377～383
- 2) 木内 学：鑄造加工と塑性加工，技術融合への道；鑄造工学，68-1（1996.1）91～14