技術解説

Technical Review

加工熱処理を用いた材質制御鍛造技術

藤原正尚 *1，吉田広明 *2，木村利光 *1

Controlled Forging Technique for Mechanical Properties using Thermo-Mechanical Heat Treatment

Masanao Fujiwara, Hiroaki Yoshida, and Toshimitsu Kimura

Synopsis

Controlled forging technique for mechanical properties is one of the useful methods to obtain higher strength or toughness of steels. It is possible to get about twice strength against conventional hot forging by applying controlled forging process. Otherwise, controlled forging process needs the increase of forging power and investment for new equipment in many cases, so that there are some difficulties to apply it to real production. In this paper, the effects of controlled forging on mechanical properties and a new approach like partially strengthening to promote applying controlled forging to real production are described.

1. 緒　　言

近年，環境問題に対する自動車軽量化技術の開発は，自動車の燃費改善の有効な手段としてますますその重要性を増してきており，具体的な取組として，制御圧延・制御冷却技術を駆使した高張力鋼板の活用やアルミニウム合金をボンネットやドアパネル，足回り部品などに採用する例が増えてきている [1]．中でも，最も燃費改善効果の高い駆動系部品に対しては，強度・剛性や設置スペースの制約などの問題により，鉄鋼材料の高強度化による軽量化が強く望まれており，通常は熱間鍛造により製造されることの多い駆動系部品の高強度化技術が必要不可欠となっている．

加工熱処理技術は，制御圧延・制御冷却などに代表される組織・材質制御のためのプロセス技術であり，結晶粒の微細化 [2] や相分率の制御，さらには析出制御 [3] などにより，高強度化や高靭性化，溶接性の向上などに効果があり，用途に応じてさまざまなプロセス技術が開発されている．制御鍛造技術は，鋼板における制御圧延技術の考え方と同様に，加工熱処理を鍛造部品に適用したものであり，材料成分だけでは達し得なかったレベルへの高強度化や，靭性の向上などを狙いとしている．ただ，圧延とは異なり，鍛造品の部品形状は複雑かつ種々さまざまであり，鍛造工程中は部位ごとに温度やひずみの履歴などが大きく異なるため，目標とする組織・材質を部品全体に得るためには，鍛造工程や加熱，冷却の位置やタイミングなど，さまざまなプロセス因子を考慮し，制御する必要がある．そのため，有限要素法を用いたシミュレーションによる組織・材質予測を活用するなどして，鍛造工程の最適化設計も行われている [4]．

本報では，制御鍛造部材における材質制御の基本となる加工熱処理方法と鍛造プロセスへ適用した場合の効果と適用事例，また，実部品への応用展開の拡大に向けた考え方について述べる．

2011 年 11 月 29 日受付

＊1 大同特殊鋼㈱研究開発本部（Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.）
＊2 大同特殊鋼㈱研究開発本部，工博（Dr., Eng., Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.）

2. 加工熱処理技術について

加工熱処理とは，熱処理と加工を組み合せて，材料，特に鉄鋼材料を強靭化する手法として良く知られ，利用する組織状態，変態方法によりさまざまな組合せがある．熱処理は一般的にオーステナイト化，焼入・焼戻しが一つのサイクルとなっており，これに加工を足し合わせることで，Table 1 のように分類される [5]．この中でも制御圧延 (Controlled rolling)，オースフォーミング (Ausforming) および変態誘起塑性 (TRIP Transformation induced plasticity) が最も重要な手法であり，例えば制御圧延では，厚板の圧延温度を低下させて結晶粒を微細化し，強度・靭性を向上させる技術が確立されており，工業的にも大きな成果を収めている．オースフォーミングは鋼の強靭化に最も有効な加工熱処理法であり，2 GPa 以上の超高強度を得ることも可能である．しかしながら，高い焼入れ性を必要とするため，比較的高合金とならざるを得ない点や，低温域での加工であるため変形抵抗が大きくなってしまうなど実用上の問題が多く，工業的に大きな発展にはつながっていないのが現状である．TRIP は準安定オーステナイト中での変形中に生じるマルテンサイト変態により均一伸びや靭性の改善を行うものであり，強度・延性バランスに優れた材料の開発が進められている [6]．

3. 材質制御のための制御鍛造技術について

3.　1　制御鍛造技術の基本コンセプト

Fig.1 に制御鍛造技術の基本コンセプトを示す．大きく分けて 3 つのアプローチが考えられ，①材料は従来のままで，加工熱処理を使った制御鍛造で高強度化する，②材料成分も焼入れ性を高めるなど，制御鍛造仕様に専用設計することで，更なる高強度レベルを達成することを狙いとする，③材料は従来よりも低合金化することで材料コストを抑え，低合金化したことによる強度低下分は制御鍛造で補う，といった方向性がある．①および②の場合は，材料コストは従来同等かそれ以上となるとともに，材質制御のために鍛造温度を低温化するなどして鍛造コストは増加することになるため，トータルの製造コストも増加する．したがって，高強度化による部品の軽量化などで部材としての魅力をどこまで引き出せるかによって，機能とコストのバ

Table 1. Classification of thermo-mechanical treatment.

Timing of deformation	Diffusional transformation (ferrite, pearlite)		Non-diffusional transformation (martensite)	
	Classification	Denomination	Classification	Denomination
Before transformation	Deformation under austenite phase	Controlled rolling	Deformation under austenite phase	Forged quenching
	Deformation under meta-stable austenite phase	-	Deformation under meta-stable austenite phase	Ausforming
During transformation	Deformation during pearlite transformation	Iso-forming	Deformation during martensite transformation	TRIP
After transformation	Deformation under pearlite	Patenting and drawing	Deformation under martensite	Warm forming, Cold forming + Aging

ランスで制御鍛造部材の位置付けが左右される．一方，③の場合には，従来よりも低合金な材料を使いつつも，制御鍛造技術で強度を上げることにより，材料コストは抑えつつ従来以上の強度レベルを達成できるため，レアメタルの使用量を抑え，材料の低コスト化によってトータルコストも従来手法に対して大きく下げることができる可能性がある．

また，単純に材料成分のみで高強度化を図った場合は，部材全体の強度レベルが向上することで，切削を必要とする部分の強度上昇により，切削性が低下するなど，実用上の問題が生じる場合が多々ある．そこで，制御鍛造のもう一つの狙いとして，部分強化による高機能化が考えられる．Fig.2 にコンロッドを例にした部分強化の概念図を示す．部品設計において強度ネックとなる部位（桿部）に関してのみ高強度化し，その他の強度ネックとならない部位（大・小端部）については強度レベルを抑えて切削性を確保する．切削性以外にも，部分的に靭性を必要とする場合や，逆に低靭性化を図りたい場合など，一つの部材内での諸特性に分布を持たせる傾斜機能部材の創り込みに適すると考えられる．また，本手法は，例えば強化したい部分のみを低温で加工するなど，鍛造負荷を抑えることにも有効であり，加工熱処理技術の実用化展開において障害となっていた鍛造コストの増大を抑え，実用化への障壁を低くすることにも寄与する．

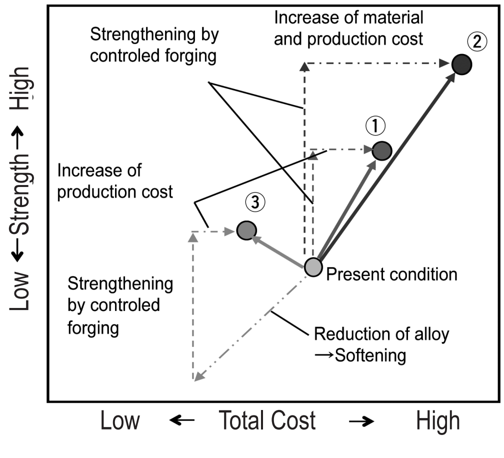

Fig.1. Schematic image of controlled forging concept.

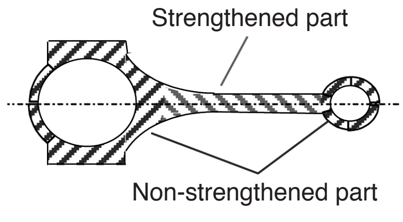

Fig.2. Schematic image of partially strengthening in connecting rod.

3. 2　制御鍛造の加工熱処理パターンと基礎特性

3. 2. 1　亜熱間鍛造

亜熱間鍛造では，フェライト・パーライト型の非調質鋼に対して，鍛造温度を下げることにより，鍛造中の粒成長を抑制し，結晶粒微細化による強靭化を図る．Fig.3 に加工熱処理パターン，Fig.4 に鍛造温度を変えた場合の組織変化を示す[7]．1200 ℃鍛造に対して，鍛造温度を 900 ℃まで下げた場合，変態前の γ 粒の結晶粒径はおよそ 1/3 程度となり，フェライトの核生成サイトとなる単位体積当たりの結晶粒界が増加することで，フェライト面積率が向上し，パーライト粒も細分化される．Fig.5 に機械特性の変化の例を示す．鍛造温度の低温化による微細化効果により，鍛造材の降伏強度・疲労強度が向上する．反対に，フェライト面積率が増加することで硬さと相関がある引張強度は低下するため，切削性を阻害することなく高強度化を達成することが可能となる．

実際の鍛造を考えた場合は，鍛造温度を低温化するため，鍛造時の変形抵抗は従来の熱間鍛造に対して増加し，鍛造荷重の増大，金型寿命の低下を招く．そのため，低合金化による変形抵抗の低減や金型材質の変更などの対策が必要となってくる．

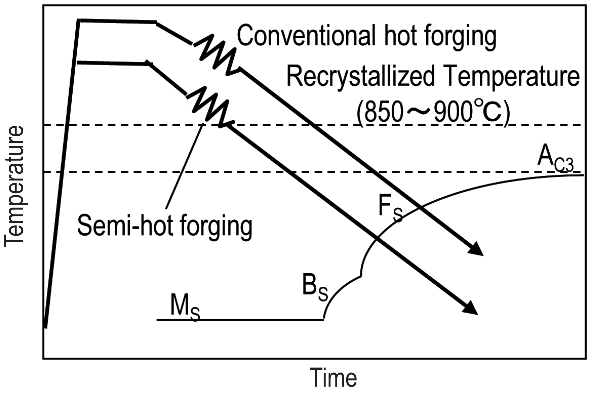

Fig.3. Thermo-mechanical treatment procedure of semi-hot forging.

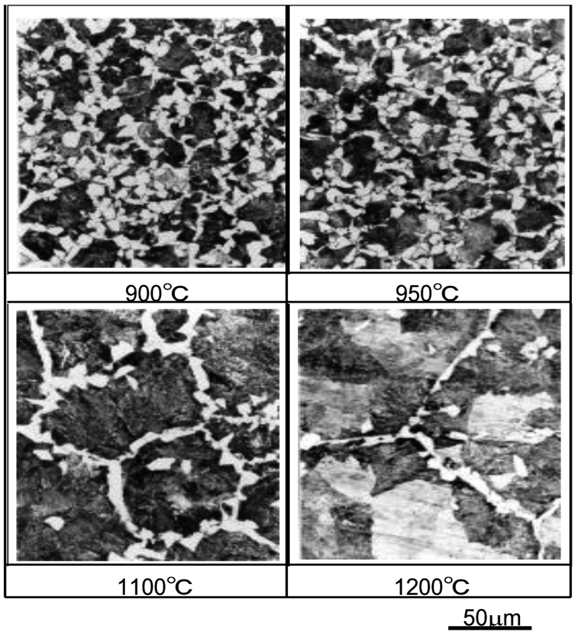

Fig.4. Change of microstructure at several forging temperature.

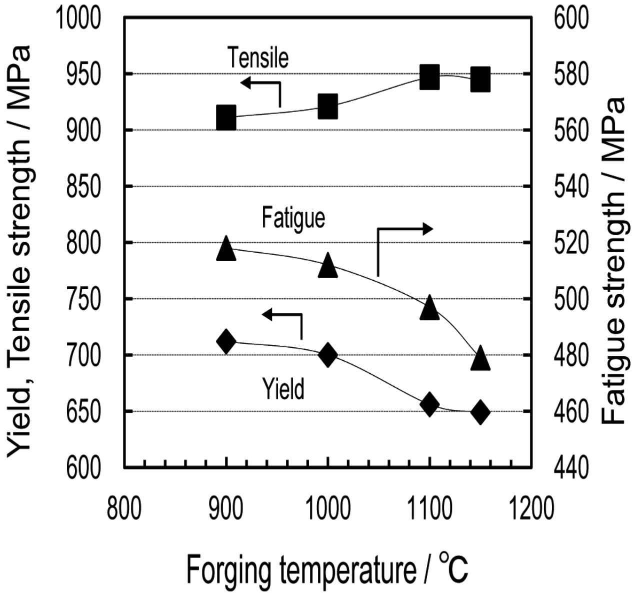

Fig.5. Change of mechanical properties at several forging temperature.

3. 2. 2　オースフォーミング

Fig.6 にオースフォーミングの加工熱処理パターンを示す．オースフォーミングでは，焼入れ性を大きくした材料に対して，変態点以下の準安定オーステナイト状態において加工を加え，加工硬化オーステナイトからマルテンサイト変態させる．Fig.7 にオースフォーミング適用後の組織写真を示す [8]．加工硬化オーステナイトから導入された転位を引き継いでマルテンサイト変態することにより，ブロックサイズが非常に微細となる．Fig.8 にオースフォーミング材の機械特性を示す．ブロックサイズが微細化することにより，強度・靭性が向上する．

オースフォーミングでは，先の亜熱間鍛造以上に鍛造温度を下げ，準安定オーステナイト域での加工となって変形抵抗・鍛造負荷の増大が著しくなるため，実部品への適用は困難を極める．そこで，変態点以上であっても加工硬化オーステナイトとなり得る未再結晶温度域で加工を加えて，その後に急冷してマルテンサイト変態させる改良オースフォーミングが考案されている [9]．加工後に回復が生じて軟化するため，強化という観点からは，通常のオースフォーミングで得られる強度レベルに劣るが，疲労特性 [10] や衝撃特性 [11] の改善効果が得られる．

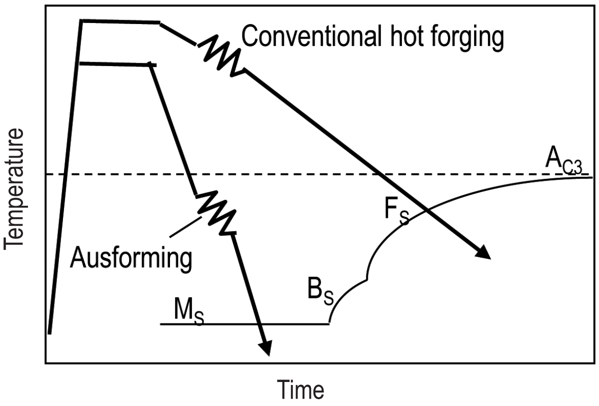

Fig.6. Thermo-mechanical treatment procedure of ausforming.

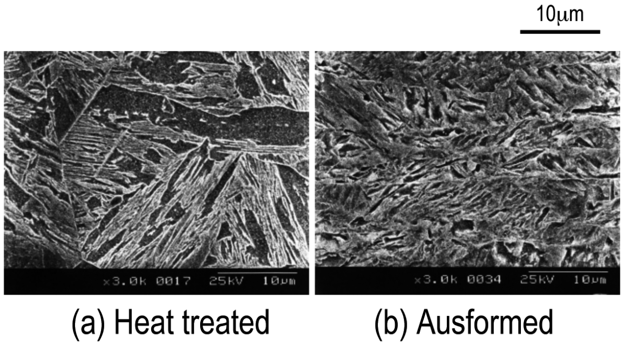

Fig.7. Microstructure of ausformed micro-alloyed steel.

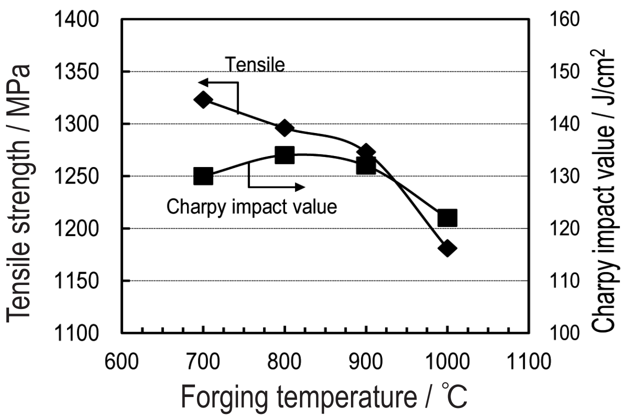

Fig.8. Mechanical property of ausformed micro-alloyed steel.

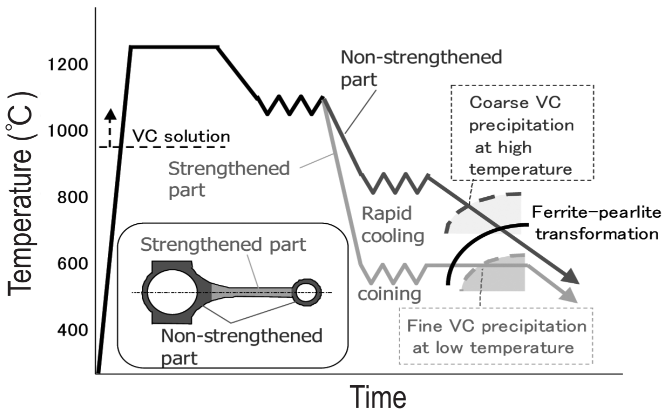

Fig.9. Thermo-mechanical treatment procedure of precipitation controlling process.

3. 2. 3 析出制御鍛造

代表的なフェライト・パーライト型非調質鋼であるV添加非調質鋼においては，通常の熱鍛造に続いて，部品サイズに応じて適宜制御冷却を加えることで，V炭化物 (以下，VC) を変態途中に析出させ，析出強化により強度を確保している．しかしながら，V添加量が0.3 mass% 以上になると析出強化量が飽和することが知られている [12)]．そこで，著者らは新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの助成事業により実施する「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発研究体」における研究開発で，従来の熱間鍛造プロセスよりもより低温で変態させることでより微細なVCを析出させ，析出強化の最大化を狙いとした析出制御型の制御鍛造技術開発を進めている [13)]．

Fig.9 に析出制御プロセスの加工熱処理パターンを示す．本プロセスでは，ベイナイト変態点直上で恒温変態させ，変態中に超微細なVCを析出させるが，変態完了に必要な保持時間の短時間化と，ベース組織の微細化を狙いとして,変態前に軽微な圧下（コイニング）を加える．Fig.10 に本プロセスを適用した場合の組織変化を示す．コイニングを付与することで，フェライト・パーライト変態は促進され，変態完了までの時間が短縮される．また，粒内フェライトの生成により，パーライト粒が分断・細粒化される．Fig.11 に制御鍛造適用時のVC析出状態のTEM画像をFig.12 にVCの数密度変化を示す．3 ～ 5 nm 程度の微細な析出物が分散しており，さらにコイニングにより数密度が増加する．これらベース組織の微細化と微細なVCが高密度に分散することで，0.2 % 耐力で1000 MPa を超える高強度が得られている [13)]．

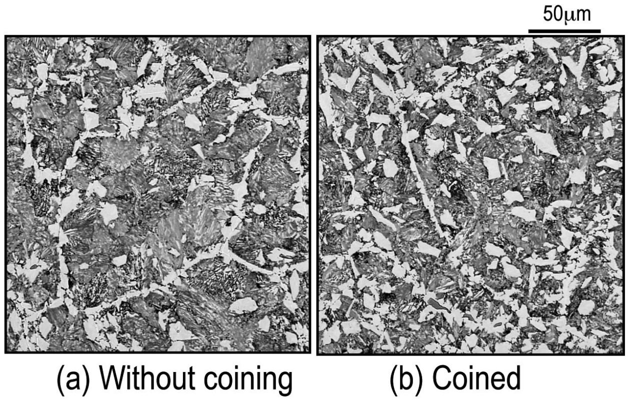

Fig.10. Change of microstructure after precipitation controlling process.

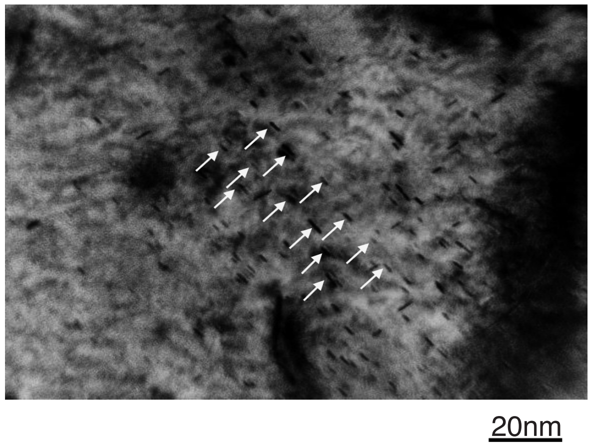

Fig.11. TEM image of VC distribution after precipitation controlling process.

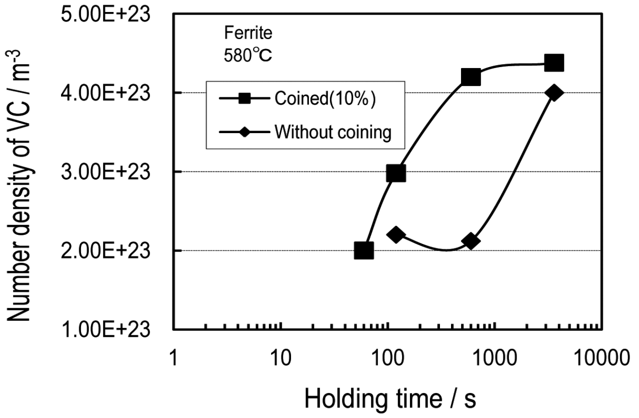

Fig.12. Change of number density of VC in ferrite.

4. 実部品への適用例と今後の展望

自動車部品への適用検討事例として，制御鍛造用非調質鋼 METT80(0.35C-0.25Si-1.0Mn-0.2Cr-0.3V) の自動車用コネクティング・ロッドへの適用が挙げられる．従来の S40VC 熱間鍛造材と比較して，約 1/10 となる 10 μ m 程度の極めて微細なパーライト粒が得られることが確認されており，桿部から切り出した引張試験片での評価結果では，従来の S40VC 熱間鍛造材と比較して，降伏強度が約 1.6 倍に上昇することが確認されている [7]．

オースフォーミング用非調質鋼 METT100(0.07C-3.2Mn-0.6Cr-0.2Mo) では，S40VC 熱間鍛造材の 2 倍近い座屈強度を得ることが確認されている [8]．このように，制御鍛造プロセスを用いることによって，自動車部品の大幅な高強度化と軽量化が達成されている．

また，他の適用事例として，析出硬化型ステンレス SUS630 のゴルフクラブフェース材の強靭化による薄肉化がある [14]．改良オースフォーミングの適用により，強度と靭性のバランスを高めることでフェース材の薄肉化を実現し，これにより打撃時のフェースの反発係数が大幅に上昇，飛距離アップにつながっている．製造プロセスとしては，低温圧延による改良オースフォーミング効果を活用しており，圧延時の加工量と加工温度の適正化による結晶粒の微細化と，二次加工として，引張矯正の付与による加工誘起マルテンサイト変態を利用した高硬度化によって，従来対比で約 1.1 倍の強度および約 1.3 倍の靭性が得られている．

析出制御プロセスの開発においては，自動車部品を模擬したプロトタイプ部品の作製を進めており，Fig.2 に示したような一つの部材内で強度差を付ける傾斜機能化部材の開発を狙いとしている．Fig.13 に想定する加工熱処理パターンを示す．通常の熱間鍛造と同様に熱間域で部品形状を決める本成形を行った後，強化したい強化部は急冷して 580 ℃程度の低温でコイニングし，強化したくない軟質部は比較的高温な 750 ℃でコイニングすることで，VC の析出状態とベース組織の状態を部位ごとに変化させ，強度差を形成する．Fig.14 に実生産での製造ラインイメージを示す．本成形部分までは従来の熱間鍛造ラインをそのまま活用し，その後の急冷，コイニング，恒温変態処理を行うための制御冷却ライン，コイニングプレス，熱処理炉を付加することで，比較的設備投資を抑えた上での実用化展開が可能となる．

以上のように，従来では達し得なかった強度レベルを達成しつつ，量産化につなげている事例もあるが，鍛造技術の向上と，ある程度の設備投資が必要不可欠となるために，制御圧延技術に見られる展開ほど拡がりを持っていないのが現状である．したがって，今後は前述した部分強化の概念を活用して，強化したい部分だけ加工を加えるなどして鍛造負荷を抑えて鍛造コストを低減するなど，実用上の工夫を加えながら，応用展開の拡大を図る必要がある．そのためにも，部分強化というアプローチの中で，強度と切削性を併せ持つ部材の開発など，特徴ある傾斜機能部材をより積極的に志向することで，新たな製品価値を創造することにも繋がると期待される．

5. まとめ

制御鍛造技術の開発は，加工熱処理技術の一つの応用展開として，材質制御による鍛造部材の特性改善の観点からさまざまな取組がなされており，従来対比で約 2 倍の強度レベルを達成するなどその効果は大きい．しかしながら，実生産への展開には鍛造技術の向上や設備投資が必要となるため，工業的には大きく成功しているとはいい難い．今後は，部分強化といった新しい考え方などを使ってこれらの課題を解決していくことで，傾斜機能部材という新たな特徴を持った製品開発に繋がることが期待される．

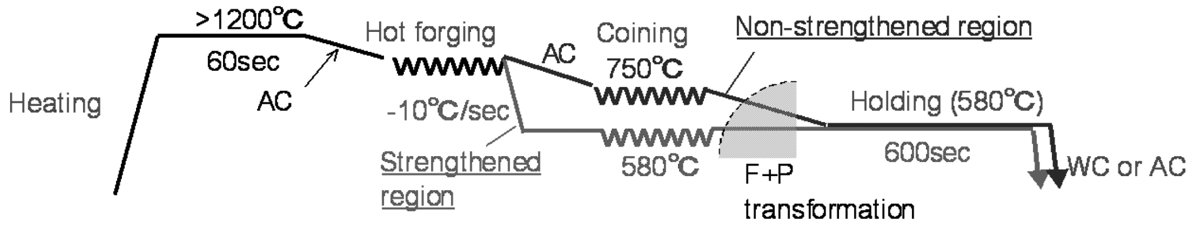

Fig.13. Thermo-mechanical treatment procedure of precipitation controlling process.

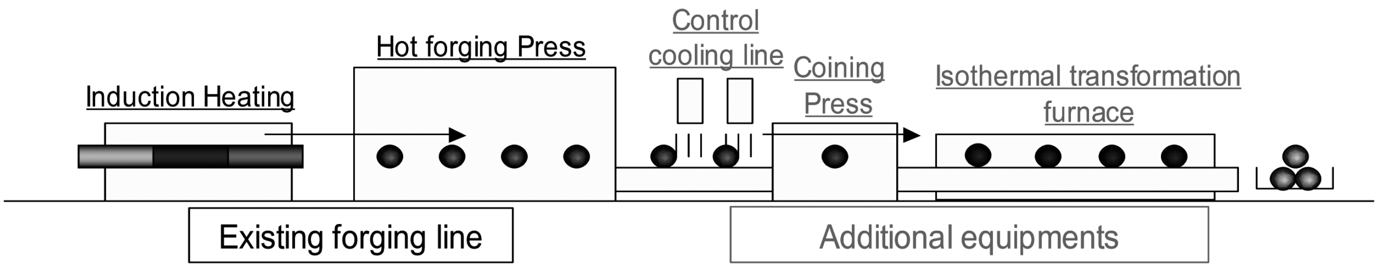

Fig.14. Schematic image of production line of precipitation controlling process.

（文　献）

1) 櫻井久之：第 252 回塑性加工シンポジウム , (2005), 1.
2) 杉本公一，早川祥，北條智彦，橋本俊一，池田周之：鉄と鋼，89　(2003), 51.
3) 山本定弘：CAMP-ISIJ, 17　(2004), 502.
4) 吉田広明，五十川幸宏，金子義典，与語康宏，石川孝司：塑性と加工 , 43　(2002), 973.
5) 牧正志：鉄と鋼 , 81　(1995), p.N547.
6) 牧正志：日本金属学会会報，27　(1988), 623.
7) 吉田広明，五十川幸宏，石川孝司：塑性と加工，42　(2001), 569.
8) 吉田広明，五十川幸宏，石川孝司：塑性と加工，41　(2000), 379.
9) 大森宮次郎：熱処理 , 35　(1995), 257.
10) 大森宮次郎，横川秀穂，山崎明：機論，46　(1980), 1166.
11) 新川雅樹, 大塚利明, 梅野好和, 吉田広明, 藤原正尚：自動車技術会論文集，40　(2009), 453.
12) 井上幸一郎，中村貞行：電気製鋼 , 65　(1994), 22.
13) 藤原正尚，岡島琢磨，加藤進一郎，吉田広明，五十川幸宏：平成 22 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2010), 155.
14) 服部和史，野末晃志，山川正克，石澤隆，藤原正尚，吉田広明，五十川幸宏：電気製鋼，76　(2005), 135.