

解説

Review

特殊鋼の制御鍛造技術

藤原正尚^{*1}，吉田広明^{*2}，五十川幸宏^{*2}

Controlled Forging Technology for Special Steels

Masanao Fujiwara, Hiroaki Yoshida, and Sachihito Isogawa

Synopsis

Thermo-mechanical controlled processing (TMCP) for rolling has been developed to obtain high strength and toughness even at low temperature for plate, and there are many applications as real production. In case of forging, there were a few example applied TMCP. For automobile forged components, weight reduction is one of the most effective methods to reduce fuel consumption for decreasing the global warming. By the application of TMCP for forging process, named as controlled forging, the mechanical properties of forged components are extremely improved so that it can lead weight reduction. In this paper, the mechanical properties of controlled forged steels and some application for real production are introduced.

1. 緒 言

制御圧延技術・制御冷却技術 (TMCP: Thermo-Mechanical Controlled Processing) は、当初は 400 MPa クラスの高級造船用厚鋼板を、焼きならしを省略して、圧延ままで製造する「低温圧延技術」として実用化されたものであり、理論的な背景は不十分なままの経験的技術であった。1960 年代前半ごろから、低温圧延ほど、変態前のオーステナイト粒は、微細に再結晶することが、定性的に認識されるようになり、1970 年代には、熱間圧延後の微細な再結晶オーステナイトから変態することによるフェライトの細粒化に加えて、さらに低温で圧延された未再結晶の加工硬化オーステナイトから変態したフェライトも、さらに微細になることが明らかにされ、従来にない、高性能な細粒鋼の製造が可能になった¹⁾。その後、更なる高強度、高靱性化の要求に応えるため、制御圧延による変態組織の微細化のみでなく、冷却速度を積極的に制御して、変態挙動そのものの制御を行う制御冷却技術の開発が盛んに行われ、厚板のみでなく、形鋼、棒鋼の製造にも広い意味での制御圧延・制御冷却技術が適用されており、高級鋼材の製造に必

要不可欠な技術となっている。

近年、環境問題に対する自動車軽量化技術の開発は、自動車の燃料消費率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いる。軽量化の取組として、制御圧延・制御冷却技術を駆使した高張力鋼板の使用比率を増やしたり、アルミニウム合金をボンネット、ドアパネルや足廻り部品などに採用する事例が増えてきている。その中でも、最も燃料消費率改善効果の高い駆動系部品に対しては、強度、剛性やスペース上の制約などの問題により、鉄鋼材料の強靱化による軽量化が強く望まれており、鍛造加工により製造されることが多い駆動系部品の組織制御による強靱化技術の開発が必要不可欠となっている。

一般に、材料の引張強度を上げた場合、靱性や被削性の低下を招き、十分な軽量化が達成できないばかりでなく、製造コストの大幅な上昇を招く恐れがある。そのため、鍛造部品の軽量化では、引張強さの上昇を抑えつつ、靱性や被削性を確保することが重要となる。特に、実質的な設計強度となる降伏強度を高めること、すなわち降伏比を高めることに主眼をおいた高強度化が最も理想的な手法と考えられる。

2007 年 7 月 2 日受付

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

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

降伏比や靱性を同時に向上させるためには、結晶粒の微細化が極めて有効である。結晶粒の微細化には、加工熱処理の適用や、特殊な短時間熱処理など、いくつかの手法が存在する。鍛造部品を考えた場合、燃料消費率改善効果の高い駆動系部品の多くに、熱処理を省略できる非調質鋼が積極的に使用されてきていることから、加工熱処理を利用した制御鍛造が最も合理的な結晶粒微細化手法と考えられる。今回、特殊鋼の組織制御を目的とした制御鍛造の代表的なプロセスと、その適用効果について、実用例を交えて解説する。

2. 制御鍛造プロセス

制御鍛造とは、鍛造温度や鍛造後の冷却速度をコントロールするプロセスの総称で、一般的には、加工熱処理プロセスを適用した鍛造加工のことを意味する。

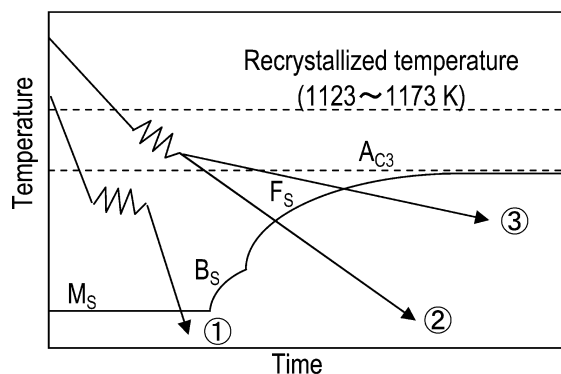
加工熱処理プロセスは、熱処理と加工を組み合わせる材料、特に鉄鋼材料を強化することが可能で、種々の組み合わせがある。熱処理は一般的にオーステナイト化、焼入れ、焼戻しが一つのサイクルとなっている。このサイクルの中に加工を組み合わせると、Table 1 に示すように分類される²⁾。I a(2)は通常の熱間加工も含まれるが、たとえば厚板の圧延加工において、圧延温度を低下させて結晶粒を微細化し、強度・靱性を向上させる制御圧延技術が確立されている。I a(1)、I b(1)はオーステナイトを加工する処理法としてオースフォーミングと呼ばれ、鋼の強化に最も重要な加工熱処理法である。

代表的な加工熱処理プロセスとして、焼入れ鋼を対象としたオースフォーミングやフェライト・パーライト鋼を対象とした低温オーステナイト域での制御鍛造がある。フェライト・パーライト鋼の制御鍛造には、強化を目的としたものと、鍛造後の冷却速度を遅くして硬さの低減、延性の向上を目的としたものがあり、目的に応じた選択が可能となっている。これらのプロセスの代表的な加工・温度履歴を Fig.1 に示す。

オースフォーミングプロセスは、いったんオーステナイト域に加熱した後、準安定オーステナイト域まで冷却して鍛造加工を行い、連続して焼入れを行うプロセスである。フェライト・パーライト鋼の制御鍛造プロセスは、いったん安定オーステナイト域に加熱した後、再結晶温度域から準安定オーステナイト域の間で鍛造し、その後、冷却速度をコントロールするプロセスである。フェライト・パーライト鋼の制御鍛造において、強化を目的とする場合、鍛造後の冷却は、ベイナイトが析出しない範囲内の比較的早い速度で冷却し、軟化を目的とする場合、できる限りゆっくりと冷却する。Fig.2 に、各制御鍛造プロセスにおける強化メカニズムの概念図を示す。

オースフォーミングの強化メカニズムは、鍛造後の未再結晶オーステナイトから引き継がれた均質化された転位による若干の加工硬化と、強化単位として有効なマルテンサイトブロックの微細化によるものである。

フェライト・パーライト鋼の制御鍛造の強化メカニズムは、フェライト・パーライト組織の微細化である。フェライト・パーライト組織の微細化メカニズムは、オーステ



- ① Ausforming
- ② Controlled forging for developing strength and toughness
- ③ Controlled forging for softening

Fig.1. Schematic diagram of ausforming and controlled forging process.

Table 1. Classification of thermo-mechanical treatment.

I . Forming before transformation	a. After forming under stable austenite region
	(1) Martensitic transformation (2) Ferrite-pearlite transformation, bainite transformation
II . Forming during transformation	b. After forming under meta-stable austenite region
	(1) Martensitic transformation (ausformed martensite) (2) Ferrite-pearlite transformation, bainite transformation
III . Forming after transformation	a. Forming during martensite transformation
	b. Forming during ferrite-pearlite transformation, bainite transformation
	a. Forming martensite b. Forming tempered martensite c. Forming ferrite-pearlite or bainite

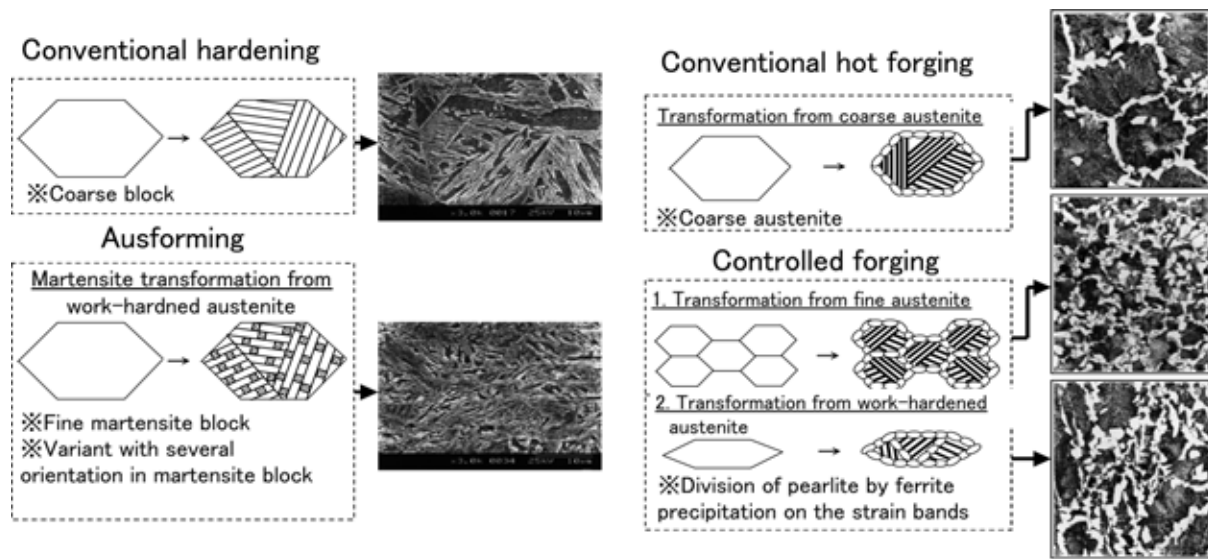


Fig.2. Schematic diagram of microstructure control mechanism in ausforming and controlled forging process.

ナイト粒界や、加工硬化オーステナイト中のひずみバンド上に優先的にフェライトが析出する性質を利用して、パーライト組織を微細化させることである。鍛造後の冷却速度を遅くした場合、フェライトが成長し、よりフェライトリッチな組織になるため、軟化させることが可能となる。

3. 制御鍛造材の基礎特性

3. 1 オースフォーミング

3. 1. 1 マルテンサイト型非調質鋼のオースフォーミングによる強靱化

Fig.3 および Fig.4 に、マルテンサイト型非調質鋼 (METT100:0.07C-3.2Mn-0.6Cr-0.2Mo) における鍛造温度と硬さの関係および強度・靱性の関係を示す³⁾。また、Fig.5 には、通常の焼入れ材と 973 K 鍛造時の TEM 画像を示す。再結晶温度である 1173 K 付近以下では加工硬化の影響によって、硬さ、引張強さが向上する。一般的に、強度が増加した場合、靱性は低下するが、オースフォーミングで

は、靱性の向上もあわせて得られている。これは、準安定域での加工により変形した未再結晶 γ 粒がマルテンサイト変態し、マルテンサイトブロックが微細化して破壊単位がより小さくなり、強度の上昇による靱性低下分を補っているためである。ただし、オースフォーミングでは、加工により拡散的な変態が促進されやすくなり、焼入れ性の低

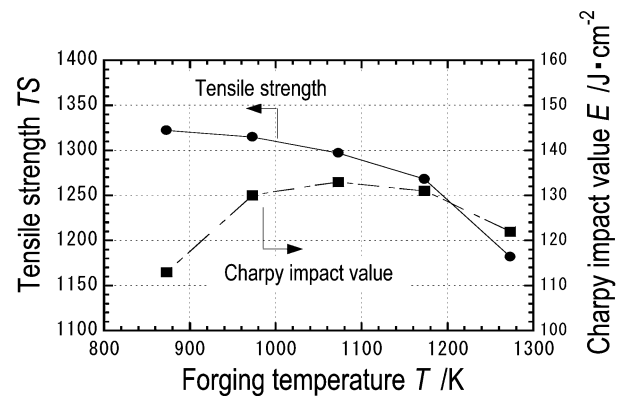


Fig.4. Relationship between forging temperature and tensile strength and Charpy impact value.

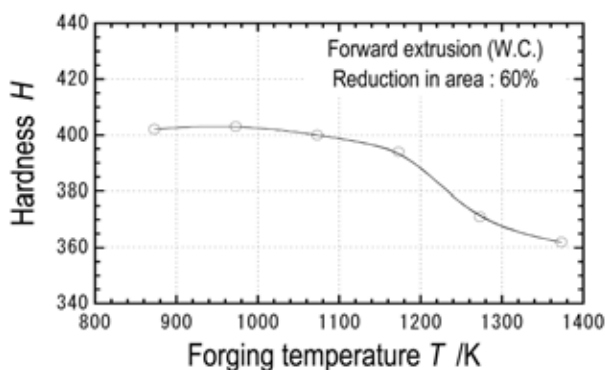


Fig.3. Effect of forging temperature on hardness.

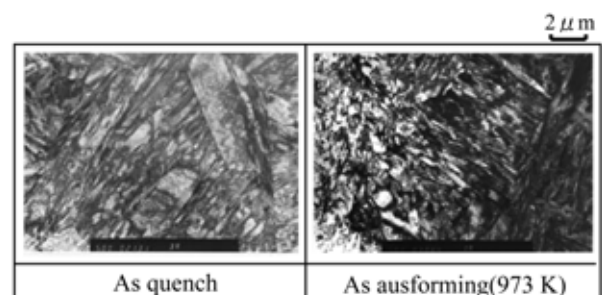


Fig.5. TEM image of METT100.

下による強度の低下がもたらされるため、対象とする鋼には、十分な焼入れ性が要求される。

3. 1. 2 析出硬化型ステンレス鋼 SUS630 のオースフォーミングによる強靱化

析出硬化型ステンレス鋼の SUS630 は、熱間鍛造から空冷してもマルテンサイト組織が得られるほど十分な焼入れ性を持つと共に、C 含有量が少なく、準安定 γ 域での変形抵抗が、熱間での変形抵抗と大きく変わらないため、加工が不可能な程に成形負荷を増大させることなく、オースフォーミングの適用による強靱化を図ることが可能である。

Fig.6 に SUS630 の溶体化処理材およびオースフォーミング材のそれぞれに $480^{\circ}\text{C} \cdot 4\text{h}$ の時効処理を施した試料の SEM 画像を示す。オースフォーミング材では、マルテンサイトブロックサイズが非常に細くなり、ブロックの

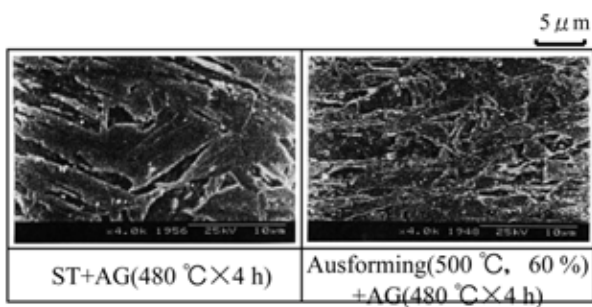


Fig.6. SEM image of SUS630.

幅は $5\mu\text{m}$ 以下となる。Fig.7 には、溶体化処理+時効処理材とオースフォーミング+時効処理材の強度・靱性バランスを示す。オースフォーミングの適用によりブロックサイズが微細となり、強度と靱性が共に増加して、強度・靱性バランスの向上が得られている。

3. 2 フェライト・パーライト型非調質鋼の制御鍛造による強靱化

フェライト・パーライト組織は、変態前のオーステナイト組織に強く依存し、オーステナイト組織の微細化、あるいは、低温の未再結晶域での強加工が、フェライト、パーライト組織の微細化に極めて有効である。Fig.8 は、制御

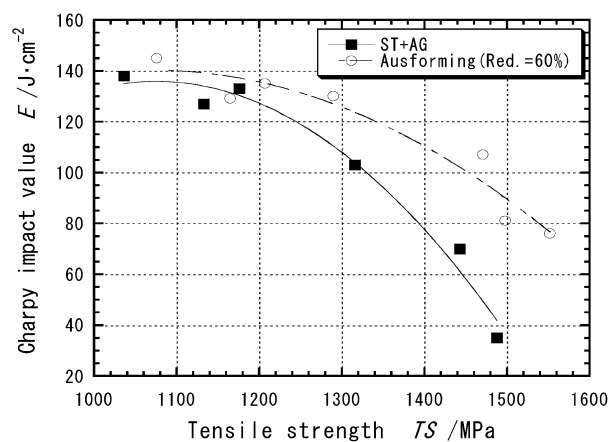


Fig.7. Balance map of strength and toughness.

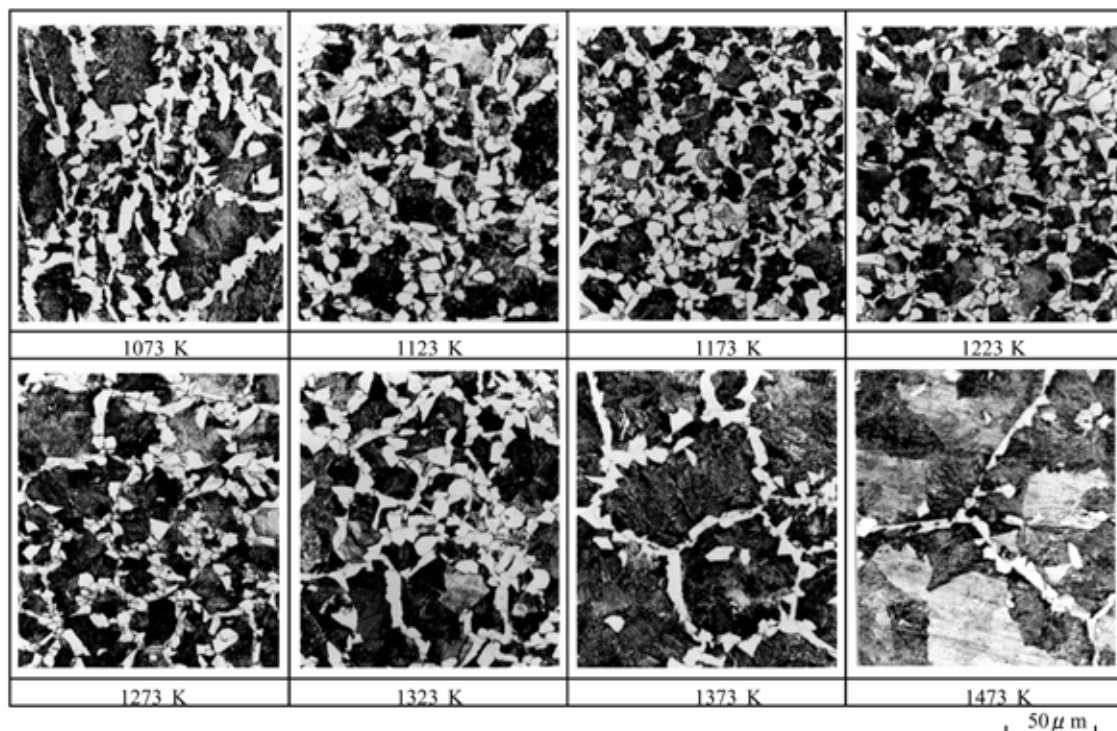


Fig.8. Microstructure photographs of METT70 in various forging temperature.

鍛造用非調質鋼 METT70(0.38C-0.25Si-1.0Mn-0.2Cr-0.2V)を、いったん 1373 K 以上に加熱した後、各温度に低下させて鍛造したときの組織である⁴⁾。鍛造温度が低温になるほど組織の微細化が進んでフェライト分率が高くなり、同時にパーライト粒径が微細化される。

Fig.9, Fig.10 および Fig.11 に、制御鍛造用非調質鋼 METT75(0.30C-0.25Si-1.0Mn-0.3V)の鍛造温度と各種強度、

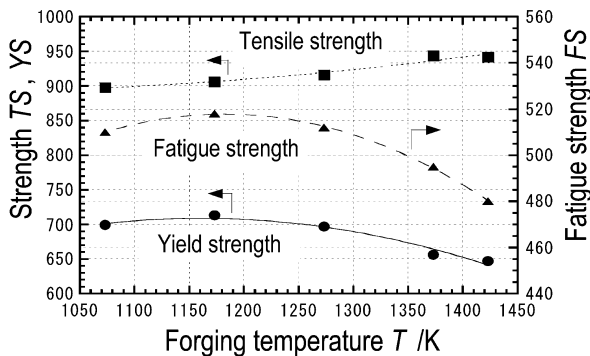


Fig.9. Effect of forging temperature on various strengths.

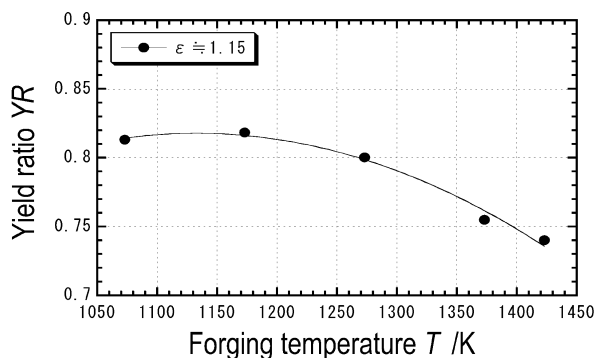


Fig.10. Effect of forging temperature on yield ratio of METT75.

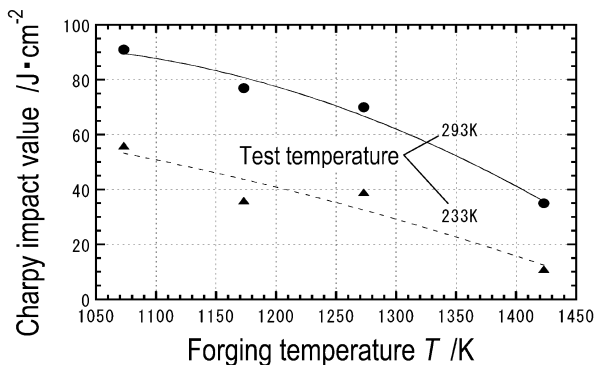


Fig.11. Effect of forging temperature on Charpy impact value of METT75.

降伏比およびシャルピー衝撃値の関係を示す。鍛造温度が低温化するに従い、引張強さは低下し、降伏強度、疲労強度、降伏比、シャルピー衝撃値が向上する。引張強さが低下する理由は、柔らかいフェライト分率の増加であり、降伏強度と疲労強度および衝撃値の向上については、主としてパーライト粒径の微細化によるものである。鍛造用鋼の場合、板成形用鋼と異なり、炭素量が比較的多いため、パーライト粒径が、機械的性質に対してより強い影響を与えるため、このようなパーライトの微細化は重要といえる。ただし、中炭素鋼では、フェライト分率がより上昇しやすいため、フェライトを強化するバナジウムやシリコンなどの元素が添加された材料を選ぶことが望ましい。

3.3 フェライト・パーライト型炭素鋼の制御鍛造・制御冷却による軟化処理

Fig.12 および Fig.13 に、S53C の前方押出し試験において、鍛造温度および冷却速度を変えた場合の引張強さおよび伸びを示す。鍛造温度を A3 点以上、再結晶温度以下の 750 °C から 825 °C とすることにより、未再結晶オーステナ

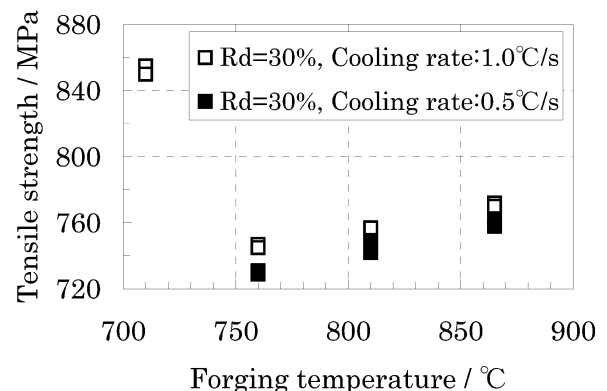


Fig.12. Effect of forging temperature on hardness of S53C.

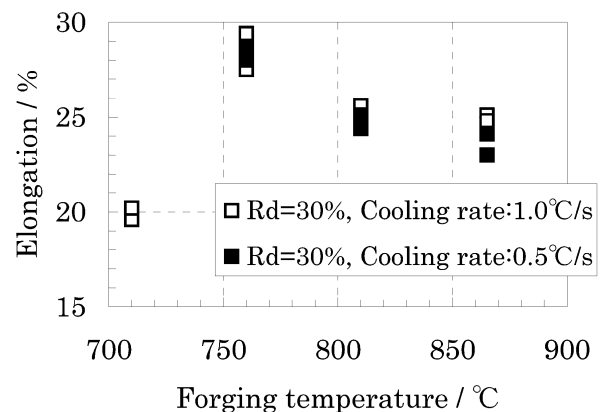


Fig.13. Effect of forging temperature on tensile strength of S53C.

イトから変態させることで、フェライト変態の核生成がより多くなり、フェライト面積率が増加して引張強度が低下すると共に延性が増して伸びが増加する。また、鍛造後の冷却速度をコントロールし、ゆっくりと冷却することにより、フェライト粒の成長を促進し、さらに強度を下げ、延性を上げることも可能となる。

4. 実部品への適用

制御鍛造プロセスを適用した鍛造用部材の代表的な事例は、強靱化を目的としたものでは、フェライト・パーライト制御鍛造のコネクティング・ロッドへの適用やオースフォーミング（正確には鍛造温度がやや高い改良オースフォーミング）のトラック用板ばねへの適用、軟化を目的としたものでは、フェライト・パーライト制御鍛造の等速ジョイントへの適用がある。その他、まだ実用化事例の報告は無いが、クランクシャフト、各種サスペンション部品、ホイールハブなどへの適用も効果が期待できる。

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。Fig.14 にMETT80の試作材の棒部組織を示す。比較材のS40VC熱間鍛造材の組織と比較して、約1/10となる10 μ m程度の

極めて微細化なパーライト粒を得られることが確認された。また、桿部から切り出した引張試験片での評価結果では、S40VC熱間鍛造材と比較して、降伏強度が1.6倍に上昇することが確認された。また、オースフォーミング(METT100)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た。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軽量化が期待できる。

析出硬化型ステンレスSUS630への組織制御プロセスの適用事例として、ゴルフクラブフェース材料の強靱化がある⁵⁾。この強靱化により、フェース強度を保ったままでフェース肉厚の薄肉化が可能となり、打撃時のフェースの反発係数が大幅に上昇し、飛距離アップに貢献している。製造プロセスとしては、改良オースフォーミングを適用しており、加工量と加工温度の適正化による結晶粒の微細化と、二次加工での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倍の靱性が得られている。

Fig.15は等速ジョイントの鍛造後硬さの軟化を狙った制御鍛造・制御冷却ラインの模式図である。加熱温度を800℃～950℃とし、鍛造後の冷却速度を制御することで、鍛造後の硬さをより下げており、従来実施していた鍛造後

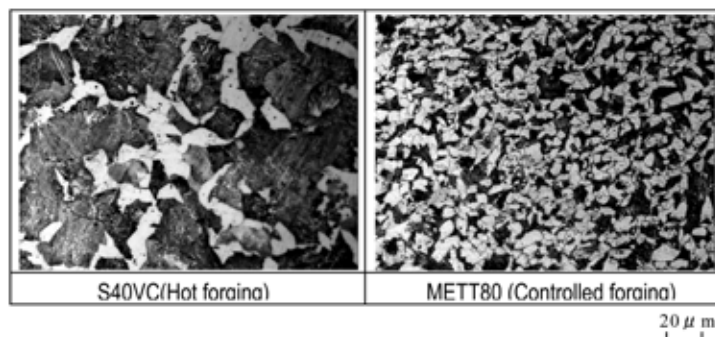


Fig.14. Microstructure photographs of METT80.

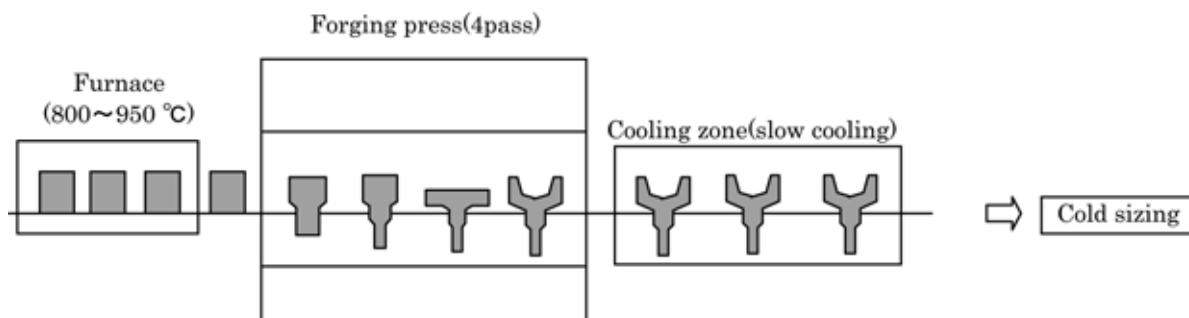


Fig.15. Schematic diagram of CVJ controlled forging and controlled cooling line.

の焼準工程を省略すると共に、その後の冷間サイジングにおける成形負荷低減と割れ発生防止を実現している。

5. まとめ

組織制御を目的とした制御鍛造技術の特徴とその実用例について取り纏めた。制御圧延技術の適用実績に比べて、制御鍛造の実用化事例はまだ少なく、鍛造部品の軽量化ニーズに応える非常に有効な手段の一つとして、より多くの部品に適用していく必要がある。また、制御鍛造技術を実際の量産技術として確立するには、鍛造温度の低温化から、成形負荷の増加に伴う金型寿命の低下や潤滑の問題など、解決すべき課題は多い。これらの問題解決を含めて、高度な量産技術として、制御鍛造技術の開発を進めていく。

(文 献)

- 1) 小指軍夫：制御圧延・制御冷却，地人書館，1997，11.
- 2) 田村今男：塑性と加工，**11**（1970），924.
- 3) 吉田広明，五十川幸宏，石川孝司：Journal of the JSTP，**41**（2000），379.
- 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) 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.