

# 冷間鍛造プロセスでのエネルギー節約を狙った球状化焼なまし処理の最適化

大同工業大学 工学部 機械工学科  
土田 豊  
(H13 年度研究助成 AF2001001)

キーワード：球状化焼なまし、冷間鍛造、セメンタイト、フェライト

## 1. はじめに

塑性加工は近代の機械産業に不可欠な技術であり、自動車産業の著しい発展に貢献してきた。この塑性加工方法は極めて効率的な製造プロセスであるが、一層多面的な技術的進展が望まれる。一つは、その技術本体に関するものであり、数値解析による金型等の最適化であると考えられる。一方、前後の工程を含めた一貫工程ととらえると、材料や熱処理を含めた最適化も有用といえる[1,2]。

塑性加工、とりわけ冷間鍛造は材料に厳しい塑性変形を強いる。素材は柔らかく延性に富んでいることが望まれる。鉄鋼材料の場合、球状化焼なましを実施され、層状のセメンタイトが球状で一様に分布したセメンタイトに変化し、軟化する。この熱処理は1000Kでの長時間を要し、処理時間も1日に及ぶ。多量のエネルギーを消費している。経済的ばかりでなく環境的な観点から、操業条件の合理化が望ましい。

軸受鋼や工具鋼などの高炭素鋼は硬く、取り扱いが難しい。熱処理による軟質化が古くより研究されている[3]。二つの型の熱処理が利用されている。一つは低温焼なましと呼ばれるものであり、950K以下の温度で長時間加熱する。他方は徐冷法と呼ばれ、フェライトとオーステナイトの二相域保持からの徐冷を特徴とする。前者では、セメンタイトは小さく分断され、球状に変化する。後者では、セメンタイトの大部分を固溶させ、残存したセメンタイトを核に徐冷中に球状に成長する。

亜共析鋼はエンジンや懸架装置などの部品の製造に用いられる。先の高炭素鋼への熱処理が亜共析鋼にも適用されている。熱処理条件は理論的というより、試行錯誤的に決定されている。

持続社会のため、エネルギーの節約は不可避である。球状化焼なまし条件の合理化も冷間鍛造にとって不可欠である。本報では、亜共析鋼での球状化焼なまし条件の影響を調査し、球状化焼なましの機構を検討した。これらは球状化焼なまし条件への数値計算の適用の基礎となるものとも言える。

## 2. 実験方法

0.35%C、1%Cr および 0.2%Mo を含有する亜共析鋼である JIS SCM435 鋼線材(直径 12mm)を供試材とした。化学成分のミルシート値を表 1 に示す。また、受入材のマイクロ組織を図 1 に示す。

供試材の 1/4t 部より、図 2 に示す形状寸法を有する試験片を加工し、真空中での熱処理に用いた。図 3 に熱処理パターンを示す。熱処理後にマイクロ組織観察および硬さ測定を実施した。本実験での特徴は、熱処理中の試験片の膨張量を連続的に測定できることにある。

## 3. 結果と考察

### 3.1. 加熱温度の影響

加熱温度を図 3(a)のパターンで 1018~1078K に変化させた。室温まで冷却後、硬さ測定を実施した。結果を図 4 に示す。1013K および 1038K での加熱で最も軟化した。1028K 加熱はやや硬い。

昇温時のオーステナイト生成開始および終了温度を  $A_{C1}$  および  $A_{C3}$  とすると、1018K はほぼ  $A_{C1}$  に一致しており、実質的に低温焼なましとなっている。したがって、徐冷法として最適な加熱温度は 1035~1045℃の狭い範囲に存在する。

### 3.2. 球状化焼なまし中のマイクロ組織変化

#### (1) 徐冷中のマイクロ組織変化

図 3(a)の熱処理パターンにより徐冷型の球状化焼なましを実施した。この際、熱膨張測定を実施した。図 5(a)は 1038K までの昇温保持した時の膨張曲線である。1020K までは熱膨張により試験片が伸長する。これ以上で収縮し始め、図 6 が示すように、1038K 保持中にも収縮し続ける。この収縮はフェライトがオーステナイトに変態するためである。

加熱保持中に熱処理を中断し急冷した試料について組織観察を行った。図 7 の光学顕微鏡写真および走査型電子顕微鏡写真が示すように、光学顕微鏡で白く観察されるフェライトが保持の進行とともに減少する。フェライト相の減少、すなわちオーステナイト相の増加が図 5(a)で試験片が収縮した理由である。これは後者の方で原子が密に詰まっ

表 1 供試材の化学成分 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.34	0.18	0.64	0.016	0.006	0.98	0.17

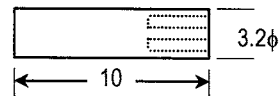


図 2 試験片形状

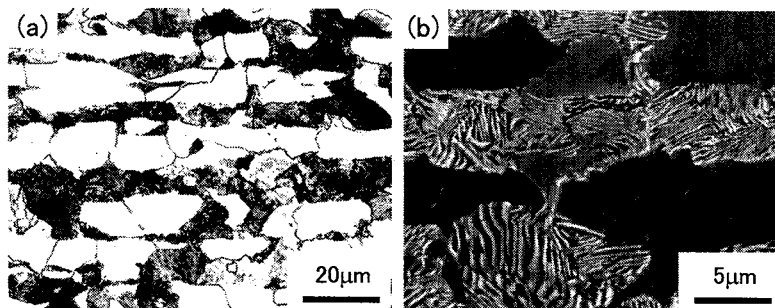


図 1 受入材のマイクロ組織  
(a) 光学顕微鏡、(b) 走査型電子顕微鏡

ているからである。このようなフェライトからオーステナイトに変化するという事実は、球状化焼なましにおいて見過ごされてきたものであり、今回の研究で注目しているものである。フェライトの減少は、図 4 の熱収縮の時間変化が示すように、ほぼ 1.5 時間の加熱で飽和する。

### (2) 徐冷中のマイクロ組織変化

1038K で 4 時間保持後に、993K あるいは 973K まで徐冷した。図 5(b) および図 5(c) が示すように、徐冷中に膨張する。今度は逆の変態により熱膨張する。変態は 993K 以下まで継続する。変態による膨張の後半部は、フェライト変態に引き続いて生起する共析変態に相当する。共析変態ではセメントイトが生成する。図 8 でのマイクロ組織を比較すると、球状化セメントイトの生成は 993K より高温で始まっている。この温度近傍での長時間保持がセメントイトの球状化に重要である。

### 3.3. 等温保持中の組織変化

変態への温度の影響と速度論を明確にするため、図 3(b) に示すパターンで等温保持実験を実施した。試験片を 1038K で 2 時間加熱保持し、1003K から 943K の間の温度

へ急冷した。試験片での膨張が完了するまで等温保持を継続した。結果を図 9 に示す。等温保持温度が低いほど、膨張の進行が速い。983K で保持での変態完了時間は 1003K 保持の約 1/3 である。

図 10 は等温保持後のマイクロ組織観察結果を示す。1003K 保持の場合、マイクロ組織はフェライトと灰色に観察されるマルテンサイト相とからなり、フェライトへの変態が未完了であることを示している。試験片を 983K あるいはそれ以下の温度で保持した場合、オーステナイトはフェライト相ばかりでなく、黒く観察される相に変化する。この黒い部分は、微細だが粒状のセメントイトが分散したフェライト相である。保持温度が低温になると、セメントイトの寸法は微細となる。フェライト分率から判断して、図 8 の前半の膨張はフェライト生成、後半は粒状パーライトと呼ぶべき黒い部分の生成に相当する。

図 9 での膨張曲線の変化はフェライト相の核生成と成長により説明できる。1003K 保持では、成長速度が速いが、核生成速度が小さい。膨張、すなわちフェライト量の増加は核生成速度により律速される。核生成速度は保持温度が低くなると増加する。これは粒状パーライトでのセメントイ

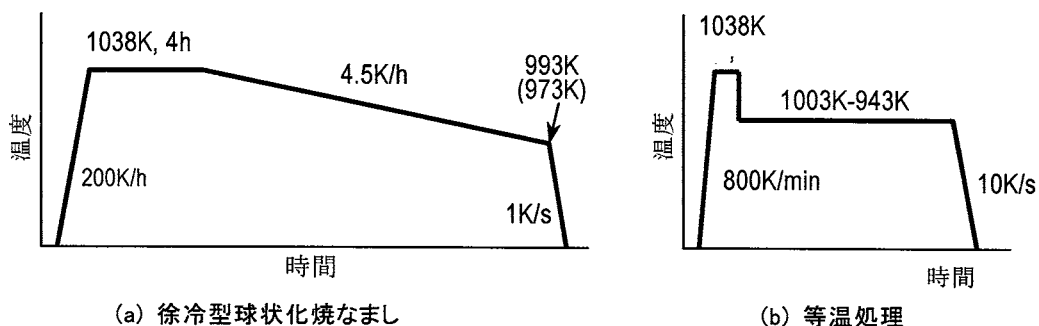


図 3 熱処理条件

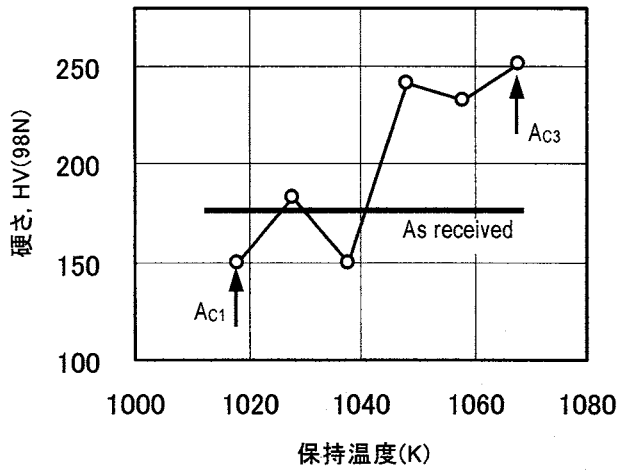


図 4 球状化焼なましでの加熱温度の影響

トにも当てはまる。この結果、高温の保持で大きなセメンタイトが得られる。セメンタイトの生成は核生成速度により制御されている。

### 3.4. 熱処理時間の改善方法

3.2 節で議論したように、供試材は 1038K まで昇温する間にほぼ完全にオーステナイトへ変態する。徐冷では、オーステナイトが先ずフェライトに変化する。残存するオーステナイト中では、993K でセメンタイトが核生成し成長する。このように、フェライトの生成が球状化焼なまし処理時間の短縮の鍵である。

3.3 節での等温保持実験はフェライト生成が核生成により律速されていることを明らかにした。温度が低いほど、フェライトの生成が早い。さらに、低温での等温保持はセメンタ

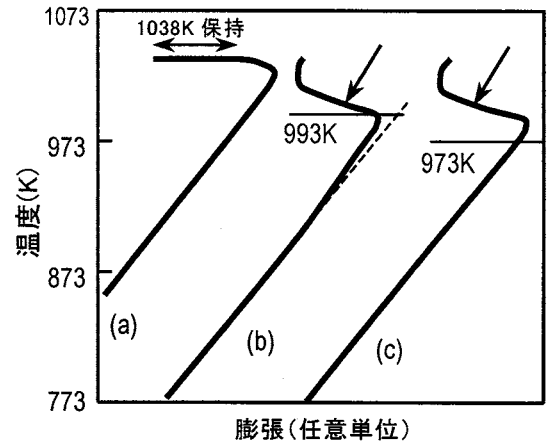


図 5 熱膨張曲線

(a) 1038K までの昇温および 4 時間保持中、(b)&(c) 993K(b) と 973K(c) への徐冷中

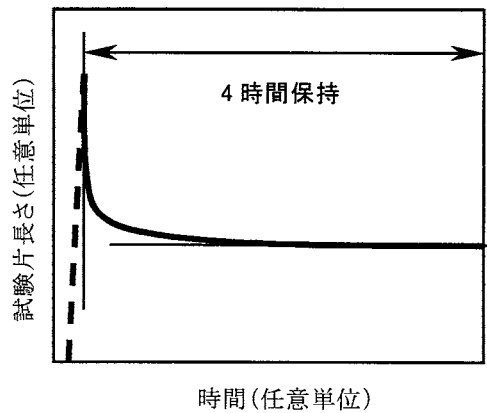


図 6 1038K で 4 時間保持中の試験片長さ変化

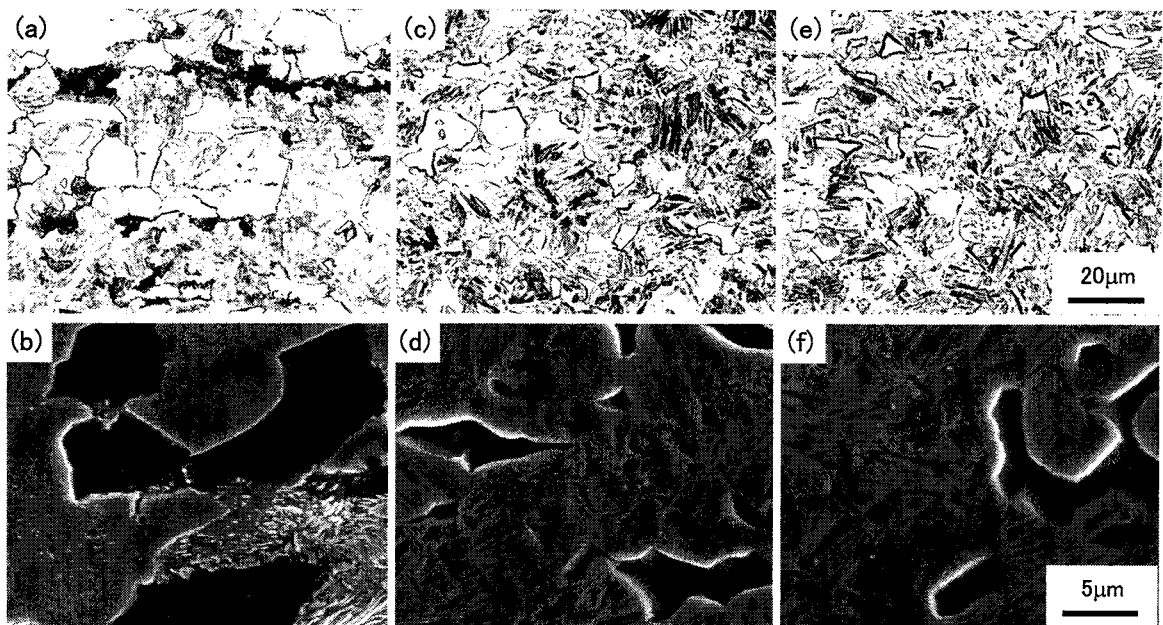


図 7 光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡観察結果  
1038K での保持時間: 0h (a, b)、1h (c, d)、4h (e, f)

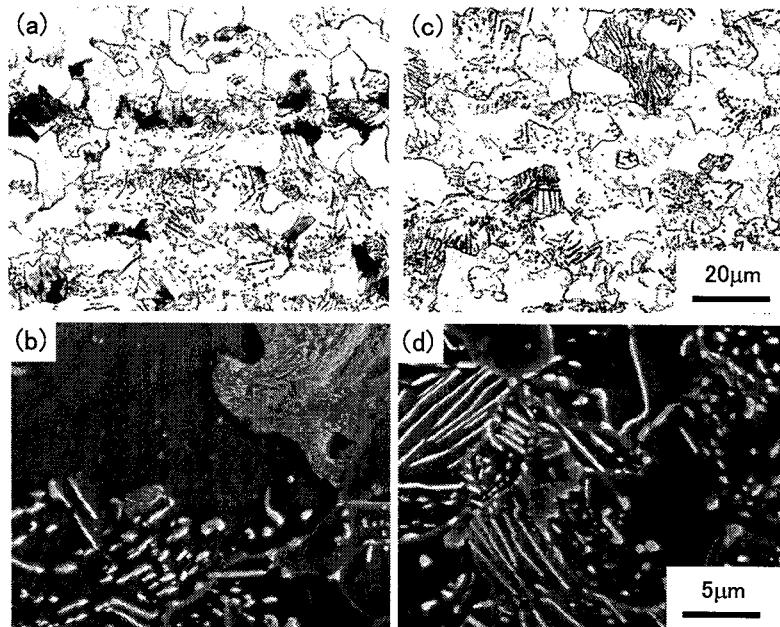


図 8 光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡観察結果  
(a), (b) 993K まで徐冷、(c), (d) 973K まで徐冷。

イトを小さくする。これは球状化焼なましに適さない。983K での保持はフェライトの生成とセメンタイトの粗大化を両立する温度である。この反応は、図 6 から約 20 分で完了するが、余裕を考えると保持時間は 1 時間となる。余分な時間はセメンタイトの粗大化に役立つ。

これらの知見は図 11 に示される改善した球状化焼なまし条件の決定に有用である。1038K までの昇温時間を通常のように設定したが、全処理時間は従来法の約 1/3 である。

### 3.5. 野心的な処理時間の短縮

誘導加熱は鋼を短時間で加熱できる。さらに温度管理が容易である。この加熱方法は、複雑な熱処理を可能にし、

画期的な球状化焼なまし処理時間の短縮に貢献する。この野心的な熱処理を図 12 に示す。1088K 急速短時間加熱後の等温保持はフェライト生成を促進し、等温保持は粗大な球状セメンタイトを生成すると考えられる。処理時間は 200 秒以内と想定され、従来の球状化焼なまし時間の 1% 未満である。

### 4. まとめ

冷間鍛造は経済的であり環境に優しい製造技術である。冷間鍛造では、素材が柔らかく延性に富んでいることが望まれる。この点で、球状化焼なましは有用な処理であるが、化石燃料を大量に使用する。合理的な条件で操作することが望ましい。徐冷型球状化焼なまし中でのマイクロ組織変

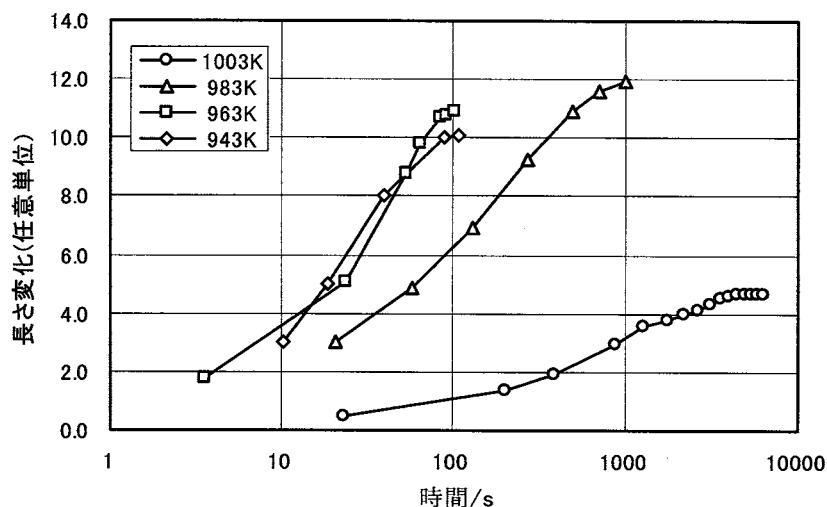


図 9 1003K, 983K, 963K, および 943K で保持中の試験片長さ変化

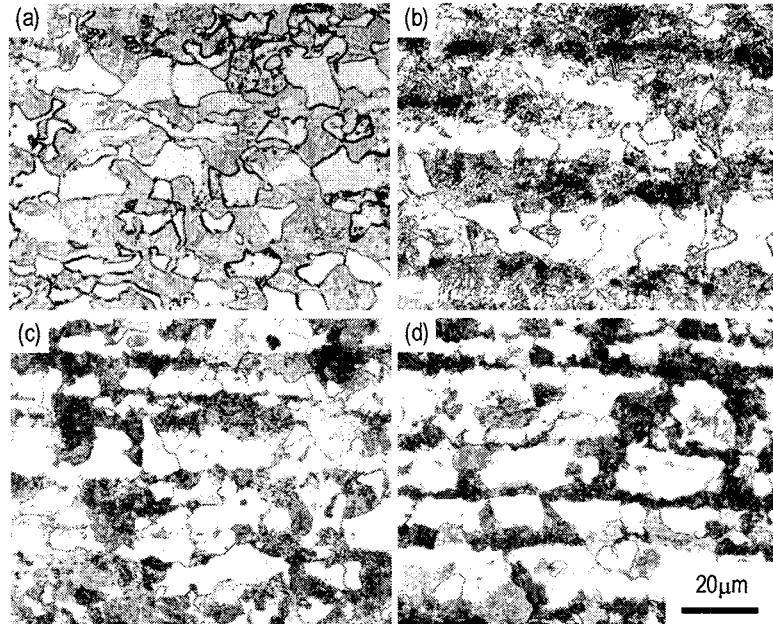


図 10 等温保持材の光学顕微鏡観察結果  
(a) 1003K, (b) 983K, (c) 963K, (d) 943K

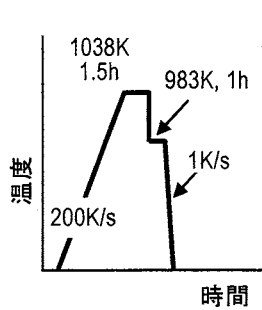


図 11 改良型の球状化焼なまし条件

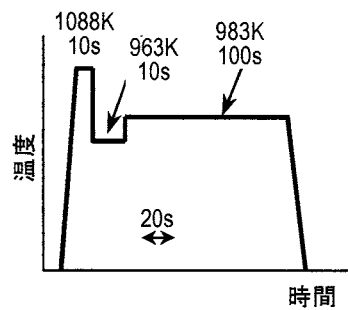


図 12 野心的な球状化焼なまし条件

化を、膨張曲線測定結果を参照しながら注意深く観察した。フェライトの生成促進が球状化焼なまし処理工程での鍵であることを見出した。フェライト生成およびセメンタイト形態への速度論を調査することにより、球状化焼なまし処理時間短縮への改良的および野心的な方法を提案した。

#### 謝辞

この研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により実施した。

#### 参考文献

- [1] Kopp R. and Leisten B.: The Process-Chain Efficiency – A Method to Evaluate Complex Process-Chain, Proceedings of International Workshop on Ecology and Economy in Manufacturing (ICEM-2000), pp.1(2000)
- [2] Kiuchi M.: Technology Fusion in Metal Forming Field, Proceedings of International Workshop on Ecology and Economy in Manufacturing (ICEM-2000), pp.42(2000)
- [3] For example, Honda R and Sato S.: Journal of Iron and Steel Institute, 206, pp.261(1920)