

普通炭素鋼におけるセメンタイトの均一粒状化について

福 井 昂*

Studies on the uniformly spheroidizing of Cementite in a Plain carbon Steel

Takashi FUKUI

Abstract

In this report, the author studied the influences of heat treatment and forging on the uniform spheroidization of cementite in three kinds of commercial carbon steels with carbon 0.21, 0.49 and 1.07% by means of microscopic observation and hardness measurement.

The results obtained are as follows:

- (1) Uniformization in form and dispersion of spheroidized cementite in low carbon steel is remarkably improved by forging at the temperature range from 550°C to 650°C, but, spheroidized cementite in high carbon steel is coarsened by forging at the same temperature range.
- (2) When comparing the spheroidized cementite in forged material at the temperature range from 550°C to 650°C with spheroidized cementite in material as quenched, we know the former shortens spheroidizing time by 10 hours to 15 hours under the same heating temperature.
- (3) In order to make uniform the uniformization in form and dispersion of spheroidized cementite in low carbon steel, it is advisable to do the forging at the first stage of tempering below A_1 transformation rather than within the austenite range (900°C~800°C).

1. 緒 言

一般に焼鈍された炭素鋼中に存在するセメンタイトは、層状をなしてパーライトを形成するか、またはオーステナイト粒界に網目状に析出している。このようなセメンタイトの存在は、その材料の機械的性質とくに靱性を低下させるため、刃物などに使用する高炭素鋼では、これらのセメンタイトを焼入処理に先立って粒状化し、そのセメンタイトがオーステナイト中に完全に固溶するには長時間を要することを利用して、粒状セメンタイトを一定量だけ残留させ、基地組織を機械的性質のすぐれた低炭素マルテンサイトとし、その靱性ならびに耐摩耗性を改良している。実際的な問題としてベアリングなどに多く使用されている軸受鋼において焼入れされた基地組織中に残留する粒状セメンタイトの量を規制しているのも、これと同じ理由によるものである。このような粒状セメンタイトの粒度と分散度を均一にするための熱処理と加工を組合せたセメンタイトの粒状化方法は、いろいろ報告されている

が^{1)~6)} 焼入材を A_1 変態点以下の温度で一定時間加熱して、ある程度焼戻しを進行させたものに鍛造を行なって、これを A_1 変態点以下の一定温度で長時間加熱する粒状化方法についての報告はみられないようである。

したがって本報告では、市販の炭素鋼の数種のものについて、これらの焼入れまま材および焼入材を A_1 変態点以下の一定温度で一定時間焼戻して、これに鍛造を施したのち700°Cで長時間加熱する粒状化処理を行なって、セメンタイトの均一粒状化におよぼす熱処理および鍛造の影響を硬度測定および顕微鏡組織観察を行なって検討したので、その結果について報告する。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

試料には市販の 25 ϕ の炭素鋼 S20C, S50C および SK3 材を使用した。試料の化学成分を Table 1 に示す。なお試料の寸法は熱処理による組織の不均一をなくすために機械加工により 15 \square ×20mm の形状に整形した。

* 工業短期大学部機械工学科

Table 1 Chemical composition of annealed specimens (wt%)

Specimen	C	Si	Mn	P	S
S20C	0.21	0.27	0.51	0.007	0.018
S50C	0.49	0.27	0.70	0.018	0.016
SK3	1.07	0.22	0.50	0.016	0.014

2.2 熱処理および鍛造

試料の熱処理は、すべてマッフル電気炉を用いて空气中で行なった。まず粒状化処理に先立って試料の残留応力の除去ならびに組織を標準組織とするために4時間で Table 2 に示した温度に昇温し、その温度に2時間加熱保持したのち炉中冷却した。つぎに粒状化処理としては各試料について、まず均一なマルテンサイト

Table 2 Annealing temperature of specimens

Specimen	S20C	S50C	SK3
Annealing temperature °C	900	800	800

Table 3 Quenching temperature of specimens

Specimen	S20C	S50C	SK3
Quenching temperature °C	900	800	760

組織をうるために Table 3 に示した温度に20分間加熱したのち水中 (0°C~5°C) 焼入れしたもの、この焼入れ材を650°Cで1時間焼戻したのち650°C~550°Cの温度範囲で鍛造し空中 (20°C) 冷却したもの、およびS20C材については、このほかに焼入れ温度に20分間加熱したのち900°C~800°Cの温度範囲で鍛造し空中 (20°C) 冷却したものについて、前報^{7), 8)}で明らかにしたように最も粒状化の進行しやすい700°Cに適当時間加熱保持して空中冷却する方法を採用した。また温度調節は電子管式調節器 (±3°C) で行なった。つぎに鍛造は上述の鍛造温度範囲で重さ2kgのハンマーを用いて金敷上において手早く試料の軸方向に圧縮鍛

造した。鍛造比は断面積の変化をもって表わし、すべての場合について約5とした。

2.3 組織観察

試料は脱炭層を除去するために端面を約3mm削り落し、高速鏡面仕上機で研磨したのちバフ仕上げを行ない、腐食は3%硝酸アルコールで行なった。観察は各試料につき粒状化処理時間ごとの光学顕微鏡組織写真を撮り、セメンタイトの粒状化の進行状況を、その写真より比較した。

2.4 硬度測定

硬度はビッカース硬度計を用いて測定した。測定にあたっては誤差を少なくするために、各試料につき同一処理を行なったもの3個について端面を約3mm削り落し高速鏡面仕上機で研磨して、表面より4mm内側で8点について測定し、合計24個所の平均値をもって、その試料の硬度とした。

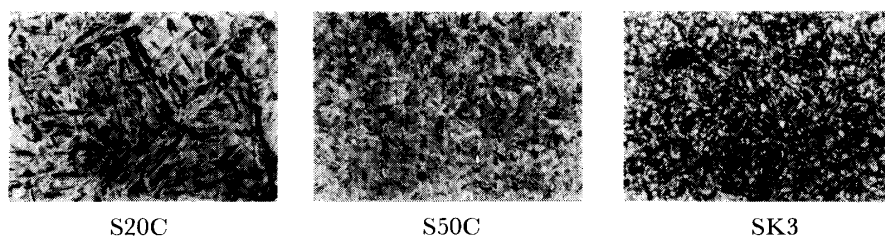
3. 実験結果および考察

3.1 焼入組織について

Table 2 に示した焼入れ温度より水中冷却した試料の組織を Fig. 1 に示す。これより各試料ともほぼ完全なマルテンサイト組織になっていることがわかる。しかし炭素含有量の多いSK3材についてはマルテンサイト中かなり大きな粒状セメンタイトが残留しているようである。

3.2 焼入れまま材を700°Cで粒状化処理した場合について

Fig. 2 に各試料の加熱保持時間と硬度の関係を示す。これより炭素含有量0.49% (S50C材)以上のものはS20C材にくらべて、硬度が一定となる加熱保持時間が約10時間短かくなっていることがわかる。これは炭素含有量0.49%以上の試料では、焼入れ温度における加熱時間を20分間としたために、層状パーライト中のセメンタイトおよび網目状セメンタイトが完全にオーステ

Fig. 1 Quenched structures of specimens ($\times 400 \times 1/2$)

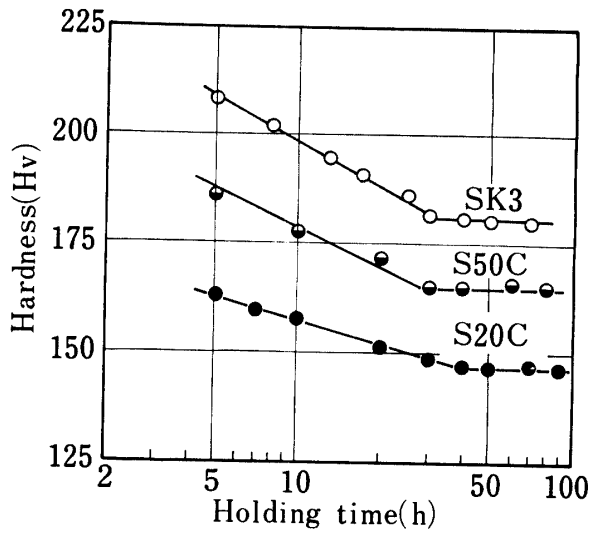


Fig. 2 Relation between hardness and holding time of spheroidizing at 700°C

ナイト中に固溶されずに残留するものと考えられ、焼入れに際してマルテンサイト中にもセメンタイトの微細粒が存在し、これが700°Cで粒状化処理した際にマルテンサイト中より析出してくるセメンタイトが粒状化する核として作用したためと思われる。したがってS20C材においては、このような未溶解セメンタイトの存在はほとんど考えられず、またマルテンサイトより析出するセメンタイトの量も少なく、それが粒状化するには、ほかの試料にくらべて相当長時間を要するものと思われる。つぎにこの場合のセメンタイトの粒状化の進行状況を Fig. 3~Fig. 5 に示す。これより各試料とも硬度が一定となる加熱保持時間までは、加熱時間の増加とともにセメンタイトの粒状化も進行しているが、硬度が一定となったのちは、組織的にはほとんど変化はなく、700°Cにおけるセメンタイトの粒状化は飽和しているものと考えられる。またセメンタイ

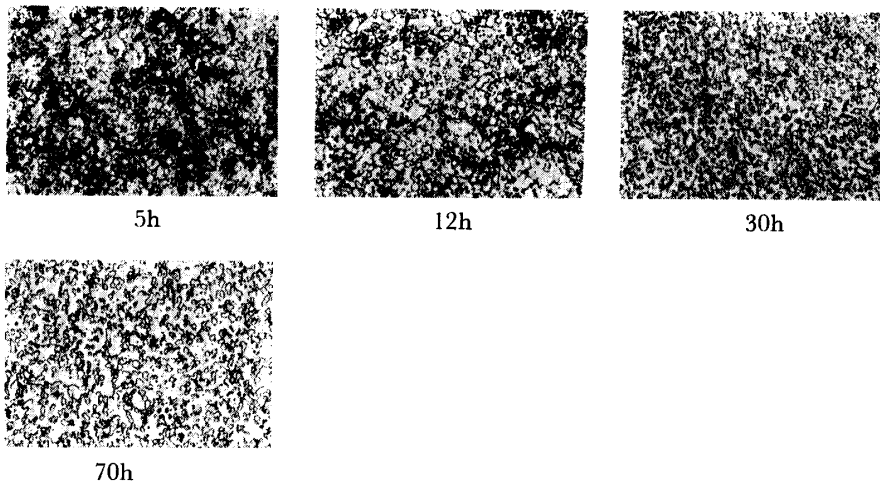


Fig. 3 Microstructures of SK3 sphered at 700°C (×400×1/2)

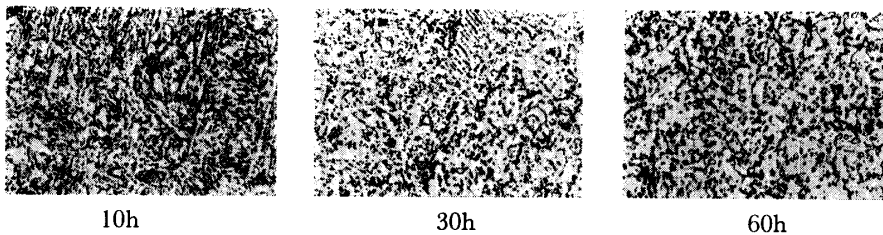


Fig. 4 Microstructures of S50C sphered at 700°C (×400)

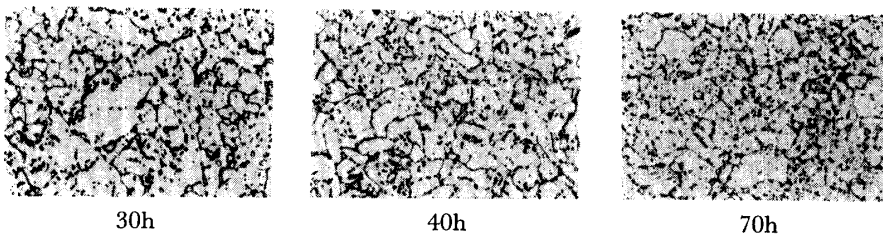


Fig. 5 Microstructures of S20C sphered at 700°C (×400×1/2)

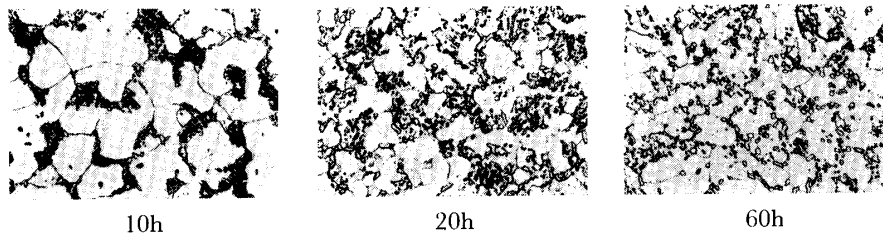


Fig. 6 Microstructures of S20C air-cooled from normalizing temperature and spheroidized at 700°C ($\times 400 \times 1/2$)

トの粒度ならびに分散度について検討してみると、炭素含有量0.49%以上の試料については硬度が一定となったのは粒度および分散度も均一になっていることがわかる。これは前述のようにマルテンサイト中にセメンタイトの粒状化を促進するセメンタイトの微細粒が比較的均一に存在しているためと思われる。したがって、マルテンサイト中にこのような微細なセメンタイトがほとんどないと考えられるS20C材については、粒状セメンタイトの粒度および分散度が不均一になっている。しかし著者⁷⁾が以前にS20C焼準材を700°Cで粒状化処理した場合の一例をFig. 6に示したが、これにくらべると粒度および分散度の均一性は著しく改良されていることがわかる。

3.3 鍛造（鍛造比 ≈ 5 ）後、700°Cで粒状化処理した場合について

Fig. 7に焼入れしたのち650°Cで1時間加熱保持して650°C \sim 550°Cの温度範囲で軸方向に鍛造して空中冷却したのち、700°Cで粒状化処理した場合の各試料の加熱保持時間と硬度の関係を示す。これより焼入れまま材を700°Cで粒状化処理した場合とことなり硬度が一定となり、セメンタイトの粒状化が飽和したと考えられる加熱保持時間が炭素含有量にほぼ無関係に約30時間となっているが、これは焼入材を650°Cで焼戻してマルテンサイト基地より、かなりのセメンタイトを析出させておいて鍛造を行なったために齊藤ら⁶⁾の言っているように、セメンタイトはひずみを受けると同時に基地組織もひずみを受けているために、700°Cで粒状化処理した際のセメンタイトの粒状化が

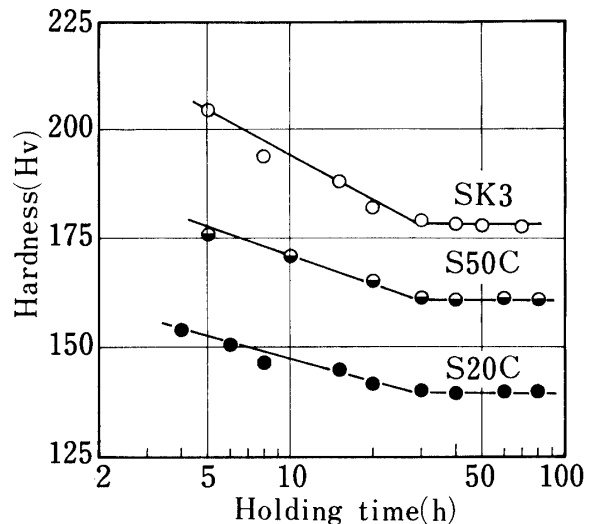


Fig. 7 Relation between hardness and holding time of spheroidizing at 700°C (In case that specimens were forged in the temperature range of 650°C \sim 550°C)

促進されたものと思われる。つぎにこの場合のセメンタイトの粒状化の進行状況を検討してみると、Fig. 8 \sim Fig. 10に示すように粒度および分散度は鍛造により、概して炭素含有量の少ないものほどその均一性が改良されているが、この点を試料別に検討してみると炭素含有量の多いSK3材については分散度は焼入れまま材を粒状化したものと大差はないが、粒度については部分的に粗大化したものが存在していることがわかる。これは佐藤ら⁵⁾の言っているようにセメンタイト中で不安定になっている部分あるいは表面の曲率半径の大きい部分は、基地のフェライトに対する固溶度

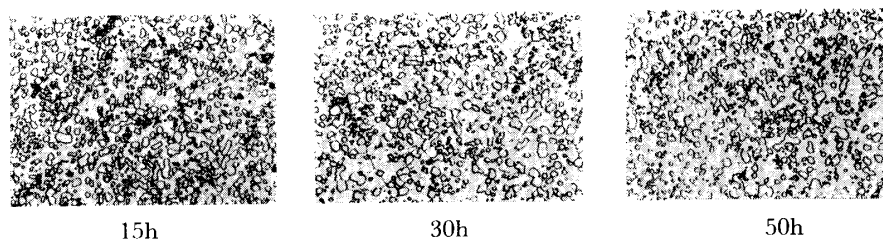


Fig. 8 Microstructures of SK3 forged in the temperature range of 650°C \sim 550°C and spheroidized at 700°C ($\times 400 \times 1/2$)

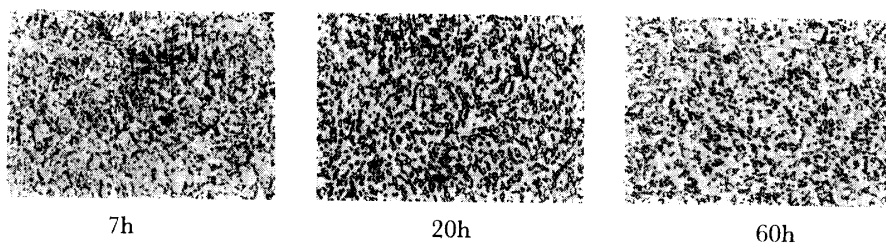


Fig. 9 Microstructures of S50C forged in the temperature range of 650°C~550°C and spheroidized at 700°C (×400×1/2)

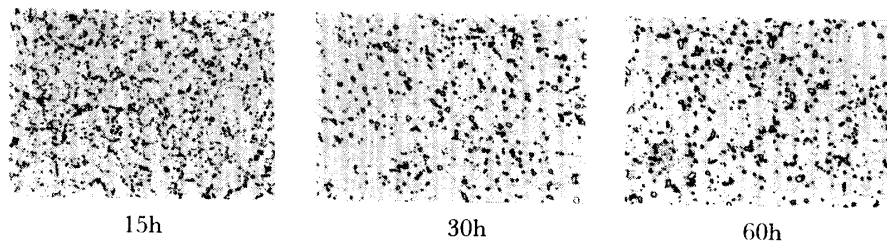


Fig. 10 Microstructures of S20C forged in the temperature range of 650°C~550°C and spheroidized at 700°C (×400×1/2)

が大きく長時間の加熱によって基地に固溶して消滅するが、これに反してセメンタイト中で安定な部分は基地に対する固溶度が小さいために基地より析出したセメンタイトが、その安定なセメンタイトを肥大化するためと思われる。またこの試料について加熱保持時間と硬度の関係を焼入れまま材と比較してみると、Fig. 11 からわかるように、硬度が一定となる加熱

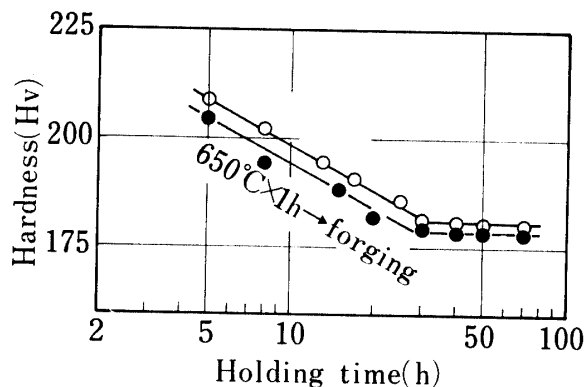


Fig. 11 Effect of forging on hardness and holding time of spheroidizing at 700°C (SK3)

保持時間が焼入れまま材にくらべて鍛造材では約10時間短縮されているが、一定となった硬度には大差はないようである。これはFig. 8からもわかるように、また齊藤ら⁶⁾も言っているようにセメンタイト粒の粗大化したところもあるが、逆に部分によっては微細なセメンタイト粒の集合した部分もかなり存在しているためと思われる。つぎにS20C材について検討してみるとFig. 12 からわかるように硬度が一定となる加熱保

持時間が鍛造を行なうことによって約15時間短縮されており、また硬度が一定となった際のセメンタイト粒は粗大化もなく微細なセメンタイト粒が均一に分散されており、焼入れまま材を粒状化したものよりも硬度が約10程度高くなっている。またS50C材についても

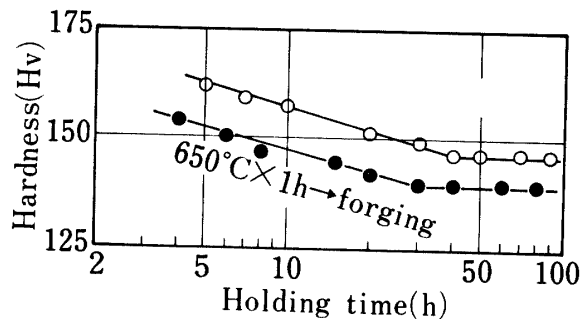


Fig. 12 Effect of forging on hardness and holding time of spheroidizing at 700°C (S20C)

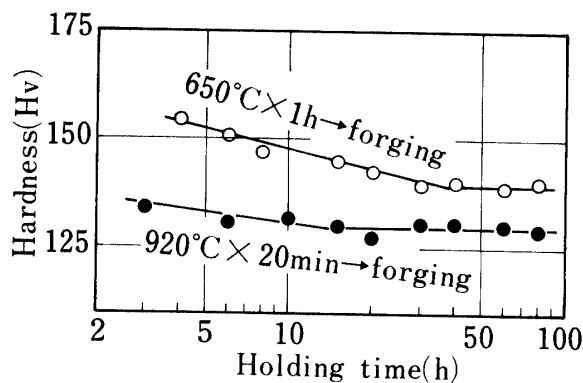


Fig. 13 Effect of forging method on hardness and holding time of spheroidizing at 700°C (S20C)

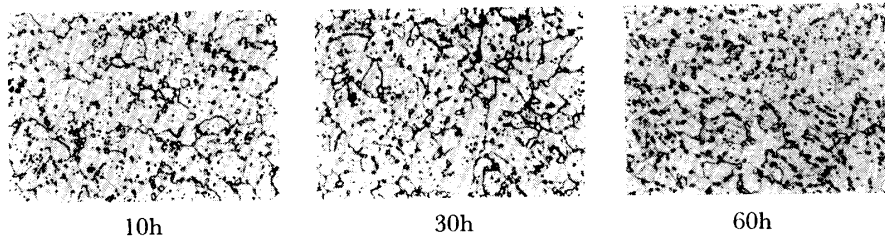


Fig. 14 Microstructures of S20C forged in the temperature range of 900°C~800°C and spheroidized at 700°C ($\times 400 \times 1/2$)

同様な比較を行なったが、粒状化時間はSK3材と同じく鍛造によって約10時間程度短縮され、一定となった硬度は焼入れまま材を粒状化したものより約5程度高くなっていたが、これはS20C材と同じ理由によるものと思われる。つぎにセメンタイトの均一粒状化が困難と考えられるS20C材について、900°Cに20分間加熱保持したのち900°C~800°Cの温度範囲で鍛造したのち空中冷却したものを700°Cで粒状化して鍛造温度の影響を検討した結果をFig. 13に示す。これには650°C~550°Cの温度範囲で鍛造した結果も示してあるが、硬度が一定となる加熱保持時間は、それよりも約15時間短縮され一定となった硬度は約10程度低くなっていることがわかる。またこの場合の組織的な観察を行なってみると、Fig. 14に示すようにセメンタイトの粒度も不均一となり、その存在もフェライト結晶粒界の近傍にかぎられているようであるが、これは900°C~800°Cという高温で鍛造した際にオーステナイト中に固溶していた炭素、その他の含有元素が粒界におし出され、その部分でのセメンタイトの粒状化を促進する化合物の形成によるものと考えられ、これが700°Cで長時間加熱した際の結晶粒界への粒状セメンタイトの選択的析出をまねいたものと推察される。

4. 結 言

市販の炭素鋼S20C、S50CおよびSK3材について、それらの焼入れまま材および焼入材を650°Cで1時間焼戻したのち、650°C~550°Cの温度範囲で軸方向に鍛造（鍛造比 $\div 5$ ）し空中冷却したもの、およびS20C材については、このほかに900°Cに20分間加熱

したのち900°C~800°Cの温度範囲で軸方向に鍛造（鍛造比 $\div 5$ ）し空中冷却したものを700°Cで粒状化処理した場合のセメンタイトの均一粒状化におよぼす炭素含有量、加熱保持時間および鍛造の影響について検討した。その結果を要約するとつぎのとおりである。

(1) 650°C~550°Cの温度範囲で鍛造を行なうと、低炭素鋼の粒状セメンタイトの粒度および分散度は著しく均一化されるが、炭素含有量の多い材料（たとえばSK3材など）では、かえって特定なセメンタイト粒の粗大化による粒度の不均一をまねく。

(2) 650°C~550°Cの温度範囲における鍛造は、焼入れまま材を同一温度で粒状化する場合にくらべて、セメンタイトの粒状化が飽和すると考えられる加熱保持時間を約10~15時間程度短縮する。

(3) 低炭素鋼（たとえばS20C材など）のセメンタイトの均一粒状化を目的とする場合の鍛造は、オーステナイト域（900°C~800°C）で行なうよりも、 A_1 点以下の焼戻し（650°C~550°C）段階で行なうことが望ましいようである。

参 考 文 献

- 1) Howe, Levy: Trans. A.I.M.E., **50**, 532 (1914)
- 2) J. H. Whitely: J. Iron and Steel Inst., **97**, 353 (1918)
- 3) C. H. Desch: J. Iron and Steel Inst., **107**, 249 (1928)
- 4) Andrew, Lee: J.I.S.I., **165**, 145, 369, 382 (1951)
- 5) 佐藤知雄, 西沢泰二: 日本金属学会誌, **20**, 51 (1956)
- 6) 齊藤利生, 村上昇一: 日本金属学会誌, **29**, 995 (1965)
- 7) 福井 昂, 時弘義雄: 材料科学, **2**, 128 (1965)
- 8) 福井 昂, 時弘義雄: 材料科学, **3**, 185 (1966)