



Y. Tsuchida

冷間鍛造前処理としての中炭素鋼球状化焼なましの高能率化

土田 豊*

1. 緒言

冷間鍛造は効率的な生産プロセスであり、自動車用などの量産部品製造に多用されている。冷間鍛造用素材には、軟質化と加工限界との向上が必須であり、球状化焼なまし処理が施される。この熱処理では、化石燃料により十数時間の熱処理となるのが通常であり、コストばかりでなく環境の観点からも処理時間の短縮が望ましい。

セメンタイトの球状化焼なましは古くより研究されてきた。対象は共析鋼あるいは過共析鋼が主体であり、冷間鍛造用の亜共析鋼を主たる対象とする研究は多くない。このような認識から、我々はフェライトの存在に注目した研究を実施してきた[1]-[2]。さらに、セメンタイトの均一分散と処理時間の短縮を両立する目的で、加熱温度より粒状セメンタイト生成温度直上まで急冷保持する熱処理方法を提案している[3]。

本報告では、この熱処理方法を誘導加熱のような急速短時間加熱により実現することを念頭に、SCM435 鋼を用いて、加熱および等温保持の温度・時間の最適化と処理時間短縮の見極めを行った結果についてまとめている。

また、本報では、球状化焼なまし処理の後に、フェライト高温域での加熱を行い、割れ発生限界への影響を調査した結果についても報告している。

2. 実験方法

実験に用いた JIS SCM435 丸棒の化学組成を Table 1 に示す。市販の圧延材（直径 13mm）であり、チェック分析値を示している。1/2r 部より、熱電対取付け穴を有する直径が 3.2mm、長さ 10mm の試験片を、長手方向を一致させて加工した。この試験片を、富士電波工機製 Formaster FII 試験機に取付け、Fig.1 に示す加熱冷却を実施した。熱処理中には温度および試験片長さの変化を連続的に記録し、変態の進行を測定した。

Table 1 Chemical composition of the as-rolled SCM435 steel bar (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.36	0.20	0.69	0.022	0.022	1.03	0.15

Table 2 Results of check analysis of chemical compositions (mass%)

Symbol	Dia.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ti	Al	N	B
S35C	14mm	0.36	0.19	0.73	0.020	0.022	0.12	<0.01	0.001	0.029	0.0032	0.0001
S35CB	26mm	0.34	0.25	0.81	0.032	0.020	0.14	<0.01	0.026	0.032	0.0032	0.0023
SCM435	27mm	0.36	0.79	0.79	0.022	0.017	1.15	0.15	0.004	0.002	0.0114	0.0002

熱処理終了後、試験片の長手方向の断面を研磨後、3% ナイタルで腐食し、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡を用いてマイクロ組織を観察した。これらの試験片について、98N の試験力でビッカース硬さの測定を行い、3 点の平均として硬さ(HV)を求めた。

割れ発生限界への球状化焼なまし後のフェライト高温域加熱の影響調査に用いた素材のチェック分析結果を Table 2 に示す。いずれも圧延まま材であり、徐冷法による球状化焼なましを施した。この焼なましの条件は、2 時間で 760℃ (SCM435) あるいは 740℃ (S35C および S35CB) に昇温し、2 時間保持後に 10℃/h で 600℃まで徐冷した。600℃以下は炉冷とした。この球状化焼なまし材に 500~600℃で 10~30 分の後加熱を実施した。

このような素材を用い、素材の中心部より、直径 12mm、高さ 18mm の円柱状試験片を機械加工し、側面の長さ方向に切欠を設けた[4]。切欠底半径が 0.15mm、切欠角度が 30 度、切欠深さが 0.7mm である。

上記の円柱状の切欠付き圧縮試験片を用い、公称ひずみ速度 0.2%/s で圧縮試験を行なった。各圧縮工程の後に、切欠底部に沿った割れ長さを実体顕微鏡により測定した。圧縮率と割れ長さのグラフを作成し、割れ長さが 0.5mm[5]となる圧縮率を限界圧縮率 (ϵ_c) とした。

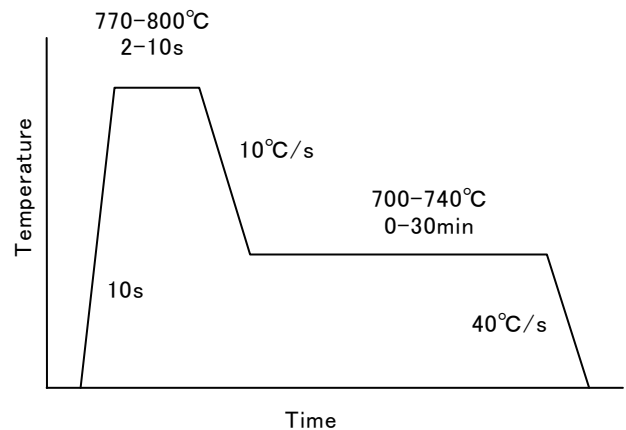


Figure 1 Heat treatment conditions.

* 大同大学 工学部 機械工学科 教授

3. 実験結果

3.1. 急速加熱での短時間球状化

(1) 急速加熱での変態温度の測定

1000℃まで50℃/sで昇温し、熱膨張曲線により A_{C1} および A_{C3} を決定した。これらを、 ϕ_1 および ϕ_2 と呼ぶことにする。熱膨張曲線をFig.2に、変態温度をTable 3に示す。 ϕ_1 および ϕ_2 とも2回の実験での結果はよく一致している。

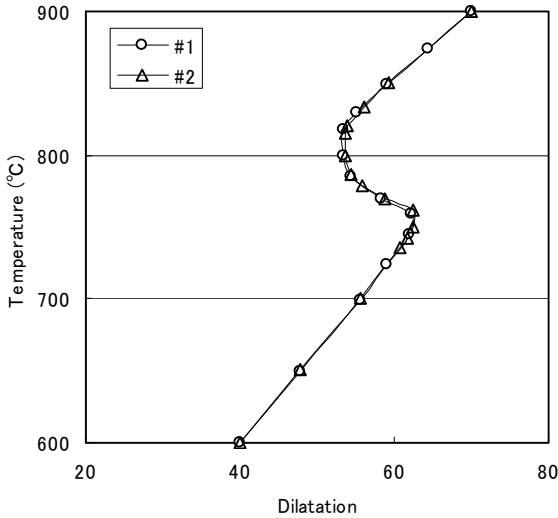


Fig.2 Results of dilatometric measurements for two specimens

1000℃に到達後、50℃/sで冷却し、組織観察と硬さ測定を行った。マイクロ組織は全面ラス状のマルテンサイトを呈しており、硬さは623HVであった。

(2) 短時間加熱でのオーステナイト化状況

Table 3の結果を参考に、より50℃程度低い785℃に10sで昇温し、5s間保持し、40℃/sで加速冷却した。Fig.3でのマイクロ組織にはフェライトと推察される小領域が僅かに残っている。また、硬さも599HVと上記の623HVよりやや低い程度であり、フェライトの残存は余り多くないことが傍証される。

Table 3 Measured transformation temperatures (°C) .

	#1	#2	Average
A_{C1}^f	740	745	743
A_{C3}^f	830	835	833

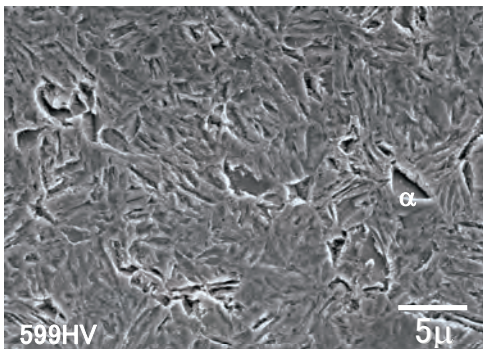


Figure 3 A SEM image of the specimen cooled at 40℃/s from 785℃ after holding for 5s.

(3) 加熱温度の影響

Fig. 1の熱処理条件において、加熱温度を770, 785, および800℃に変化させ、5s保持し、10℃/sで730℃まで冷却し、10分間保持後、40℃/sで冷却した。前者の冷却は放冷相当であり、後者の冷却は、未変態のオーステナイトからのマルテンサイト変態を意識した。

Fig.4に、それぞれの膨張曲線を ϕ_1 部で一致させて重ね書きしている。変態開始温度は加熱温度によらず同等である。また、加熱温度が高いほど、オーステナイト化が進み収縮が大きい。Fig.4を用い、730℃で10分間の等温保持中に分解したオーステナイト量を求め、等温保持後に残留するオーステナイト量を試算した。結果をFig.5に示す。加熱温度が高いと730℃保持中のオーステナイト分解が進むが、等温保持後に残存するオーステナイト量も多い。730℃保持後のフェライト量を減少させるためには、加熱温度を極力低くすることが望ましい。

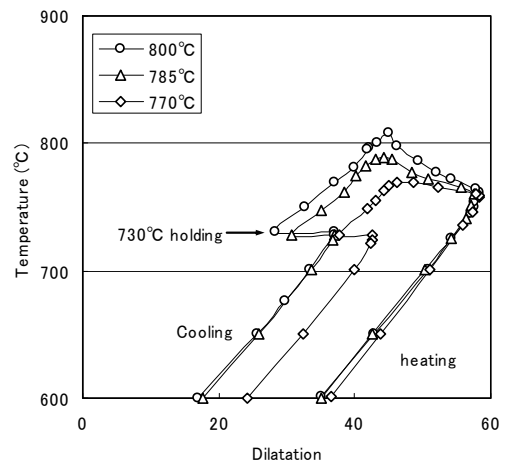


Figure 4 Results of dilatometric measurements for various heating temperatures.

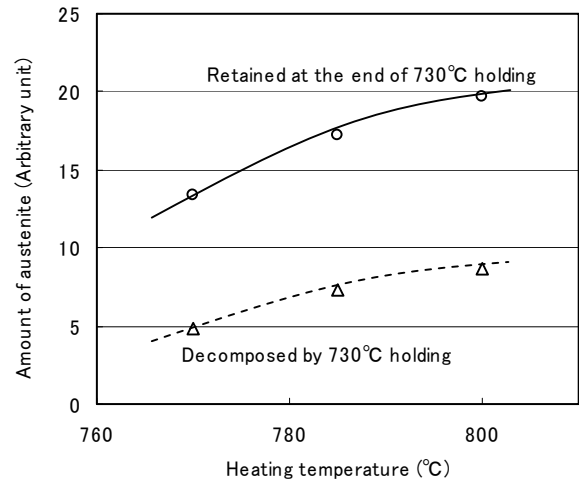


Figure 5 Amount of austenite decomposed during isothermal holding and retained at the end of 730℃ holding.

(4) 等温保持温度の影響

Fig.1の熱処理プロセスにおいて、加熱温度および時間を785℃および5sとし、その後の等温保持温度を720~740℃で変化させた。

Fig.6のマイクロ組織で、保持温度740℃と730℃とを比

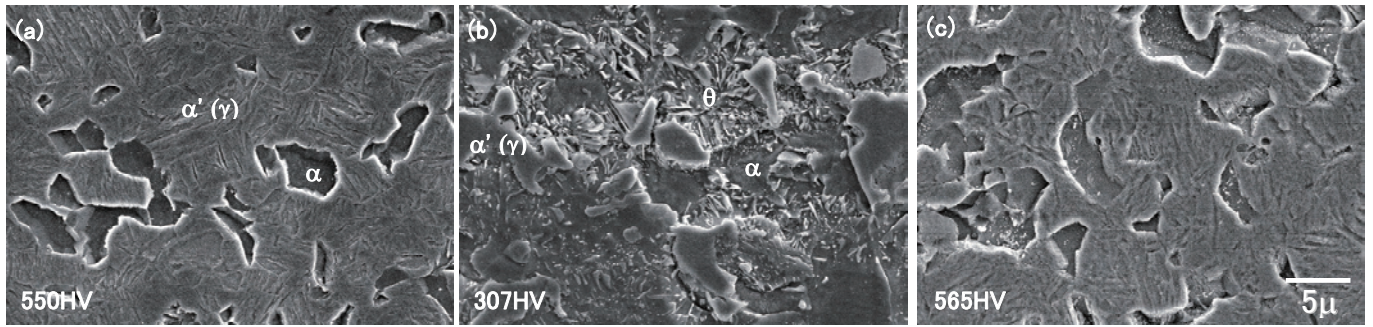


Figure 6 SEM images of specimens isothermally held at (a) 740°C or (b) 720°C for 10min.

べると、730°Cの方でフェライト量が増加している。Fig.6(c)の保持温度が720°Cでは、セメントイトが多量に生成する。また、未変態のオーステナイトが一部残留している。 ϕ_1 より25°C程度低い温度で初めて共析変態が生じている。硬さ測定結果にも軟化が確認される。

Fig.7に720~740°C保持での熱膨張量の時間変化を白抜きの記号で示す。この膨張量は初析フェライトの生成量を示している。保持温度が低いほどフェライトの生成量も多く、オーステナイトの分解が進行しやすい。また、最も分解が進行しやすい720°C保持でも、分解速度は時間とともに減少する傾向を示す。

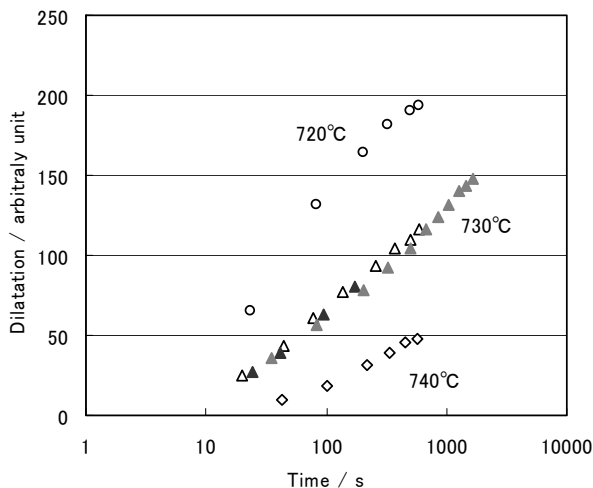


Figure 7 Thermal expansion during isothermal holding at 720, 730 and 740°C.

(5) 等温保持時間の影響

Fig.1での最高加熱温度と保持時間を785°Cと5sとし、730°Cでの等温保持の時間を3~30分に変化させた。熱膨張量をFig.7中に灰色で塗りつぶした記号で示すが、30分保持しても、720°Cで10分保持した場合より膨張量が少なく、フェライト量は余り増加していない。

(6) 熱処理条件の影響と最適プロセス条件

本実験では加熱温度の基準条件として、785°Cを選択した。この温度は、 ϕ_1 と ϕ_2 のほぼ中間に位置し、Fig.2の熱膨張曲線から考え、20-30%程度のフェライトが残存すると予想したためである。しかし、Fig.3に示されるように、実測のフェライト量は10%未満と少ない。加熱の目的を、層状パーライトを分解しオーステナイト化することに限定すると、Fig.2で ϕ_1 から上での急激な収縮が一段落する760°C程度まで低温化することが適切である。加熱時間は、

標準条件とした5sで十分である。

加熱により形成されたオーステナイトは、730°Cの等温保持で初析フェライトに変態する。このフェライト生成量は、Fig.3とFig.6(b)のフェライト量の差異程度であり、多くない。730°Cで30分の等温保持でも未分解のオーステナイトが多量に存在し、その後の40°C/sの加速冷却でマルテンサイトが多量に生成する。Fig.7が示すように等温保持温度が720°Cになると、膨張量で示されるフェライト生成が短時間で進行するようになる。オーステナイトの分解にはFig.2で求めTable 3に示されている ϕ_1 より23°C以上低温化することが望まれる。

720°Cで10分保持後に加速冷却したときのマイクロ組織はFig.6(c)に示されている。初析フェライト、針状セメントイトおよび塊状の残留オーステナイトからなる複雑な組織となっている。残留オーステナイトは740°C等温保持の場合と同じく、等温保持後の加速冷却で未変態のオーステナイトであり、針状のセメントイトも加速冷却中のものと考えられることができる。740°C等温保持に比べて初析フェライトの生成が促進され、オーステナイト中への炭素の濃縮が進み、結果としてセメントイトの生成可能温度が上昇したものといえる。等温保持での初析フェライト生成を一層促進し、オーステナイト中への炭素の濃縮が進めば、セメントイト生成可能温度がさらに高温側に移行し、セメントイトの粒状化が達成可能と推察される。

(7) 最適化プロセス条件

前節の考察に基づき、760°Cに5s加熱し、素材のパーライト部分のみをオーステナイト化した。その後、710°Cあるいは700°Cで10分等温保持し、加速冷却した。マイクロ組織と硬さをFig.8に示す。710°C等温保持ではセメントイトの粒状化が進んでいるもののオーステナイトが未だ残存しており、硬さも312HVと高い。さらに低い700°C等温保持では、初析のフェライトと粒状セメントイトが

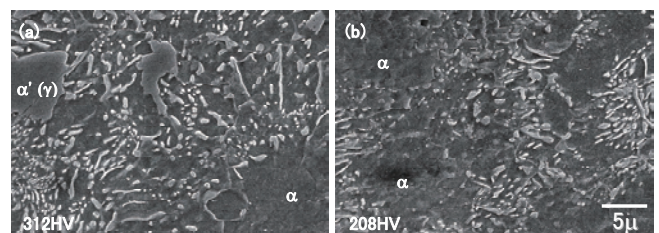


Figure 8 SEM images of specimens that has been heated at 760°C followed by isothermal holding at (a) 710°C and (b) 700°C for 10min.

分散したパーライトが主体の組織となっており、セメンタイトの粒状化が達成されている。等温保持の初期に初析フェライトが十分に生成し、オーステナイトへの炭素濃縮が進んだものといえる。

3.2. 限界圧縮率

(1) 球状化焼なましによる限界圧縮率の変化

3種の鋼種について、受入れまま (AR) と球状化焼なまし (SA) の限界圧縮率 (ϵ_c) を Fig.9 に比較している。SCM435 は球状化焼なましにより ϵ_c が向上している。S35C は逆に ϵ_c が低下し、S35CB の ϵ_c はやや高いが、球状化焼なましにより大きな変化は生じない。

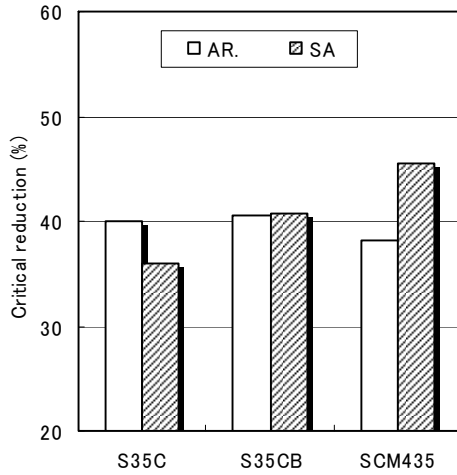


Fig. 9 Changes in critical reduction by spheroidizing treatment

球状化焼なましにより、変形抵抗が低下しセメンタイト形態が球状化する。このような変化は、SCM435 鋼の $\cdot C$ の結果に対しては妥当なものであろう。しかし、S35C では球状化焼なましにより限界圧縮率が受入れまま材より低下している。また、主要成分が S35C とほとんど同等な S35CB では球状化焼なましによるセメンタイトの粒状化や軟質化に見合った改善が認められない。硬さやセメンタイトの分断粗大化以外の支配因子が存在することを示唆している。

ボロン (B) は焼入性を向上するほか、炭化物や窒化物を作る。Cr や Mo も同様である。S35C では、球状化焼なまし後には無視できない量の固溶炭素や固溶窒素が残存し、Cr, Mo, B などは炭窒化物の生成を通して固溶炭素や固溶窒素の量を変化させ、限界圧縮率に影響していることが考えられる。

(2) 限界圧縮率 ϵ_c への球状化焼なまし後加熱の効果

球状化焼なまし後に、500~600°C で 30 分加熱し、 ϵ_c を求めた。また、550°C については 10 分の加熱も実施した。加熱温度と加熱時間から求めた焼もどしパラメータ (TP) に対して ϵ_c をプロットした結果を Fig.10 に示している。ここで、TP は温度 T (°C)、時間 (h) として、以下で表される。

$$TP = \{(T+273) \times (20 + \log(t))\}$$

3 鋼種とも、550°C で 30 分間に相当する $TP=16.2 \times 10^3$ までは $\cdot C$ が向上している。S35C および S35CB での向上が大きい。TP=17.2 $\times 10^3$ (600°C 30 分に相当) では ϵ_c が

低下しており、逆効果となっている。

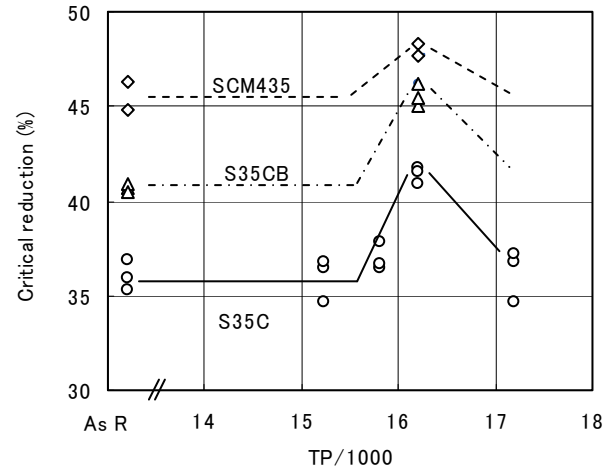


Fig.10 Relations of critical reduction with temper parameter

等温変態線図[6]を考えると、550°C は炭素鋼などでのセメンタイト生成のノーズである。核生成および成長を含めて、セメンタイトが生成しやすい温度といえる。セメンタイト生成の助長による固溶炭素量の減少が想定される。球状化焼もどしでは、徐冷を 600°C で終了した。このため球状化焼なまし材での固溶炭素量は 600°C での平衡値に近いものと推定される。600°C での後加熱では固溶炭素量の減少が期待できない。限界圧縮率が改善されなかったことも、矛盾がない。

4. まとめ

SCM435 鋼を用い、($\alpha + \gamma$) 域への急速加熱短時間保持とその後の等温保持により、球状化焼なましを極限まで短時間化することを念頭に、昇温時の熱膨張曲線より求まる変態温度を基準としたプロセス条件の影響調査とメカニズム検討を行い、最適化条件を検討した。また、球状化焼なまし後のフェライト域高温側での加熱の影響を調査した。急速加熱による短時間球状化と 550°C での加熱を組み合わせることが効果的と考えられる。550°C は 30 分以上が望まれ、炉加熱が好ましい。

参考文献

- [1] 永木聖司, 土田 豊: 熱処理, Vol.43, No.3, pp.143-148
- [2] 河野大作, 中村圭作, 永木聖司, 土田 豊: 熱処理, Vol.43, No.3, pp.149-154
- [3] 土田 豊: 研究概要報告書 (17), p17, 天田金属加工機械技術振興財団
- [4] 冷間鍛造分科会材料研究班, 塑性と加工, 22, p 139 (1981)
- [5] 宮川松男, 篠原宗憲, 浅尾 宏, 切欠円柱によるすえ込み性試験, 塑性と加工, 12, pp183-189 (1971)
- [6] 金属データブック, 日本金属学会編, 丸善刊, p 337 (1974)