

肌焼鋼浸炭時の旧オーステナイト粒異常成長機構の解明

Mechanism of Austenite Grain Coarsening in Case Hardening Steel during Carburizing

吉村 英徳 YOSHIMURA Hidenori 香川大学 工学部 准教授・工学博士
三原 豊 MIHARA Yutaka 香川大学 工学部 教授・工学博士
岡内 一弘 OKAUCHI Kazuhiro 香川大学 大学院工学研究科
笠井 正之 KASAI Masayuki JFE スチール スチール研究所 棒鋼線材研究部 主任研究員(課長)
丸田 慶一 MARUTA Kei-ichi JFE スチール スチール研究所 棒鋼線材研究部 主任研究員(課長)
木村 秀途 KIMURA Hideto JFE スチール スチール研究所 棒鋼線材研究部長・工学博士

要旨

自動車部品で近年試みられている高温浸炭には、高温加熱保持時にオーステナイト（以下、 γ ）粒が異常成長する問題がある。下部組織である γ 粒の粗大化は部品として見た際に、靱性や疲労特性の劣化といった問題を引き起こし、高温浸炭技術が大きく展開しない要因となっている。本論文では、この異常粒成長の機構を解明するために、浸炭前の部品を冷間鍛造する際に与えられるひずみに注目した。FEM（有限要素法）解析と基礎的な冷間据込試験やねじり試験との対比を詳細に行い、その結果ひずみ勾配とせん断ひずみエネルギーが旧 γ 粒異常成長に大きな影響を与えることを明らかにした。

Abstract:

Recently, carburizing of the steel parts at high temperature has been tried to improve the strength of car-parts. In this high temperature carburizing, the austenite grain coarsening is a serious problem, the austenite grain coarsening leads to degradation of toughness and fatigue of the car-parts. To develop the high temperature carburizing technique, the coarsening which occurs locally in the parts must be avoided. In order to reveal the mechanism of austenite grain coarsening, the strain distribution in the cold-forged parts before carburizing treatment is focused in this study. Based on the experimental and finite element method (FEM) computational results of a cold upsetting test and a cold torsion test, it was shown that the amount of energy and its gradient of shear strain have a great influence on the occurrence of the austenite grain coarsening.

1. はじめに

肌焼鋼を用いた浸炭材は高い疲労特性と耐摩耗性を要求される自動車のギア部品や軸部品に幅広く用いられている。浸炭処理温度を高温化することで熱処理時間の大幅な短縮が可能となり、生産性の向上と排出CO₂量の削減が期待できる。

一方、部品形状を作りこむ鍛造工程においては、ニアネットシェイプ化による材料歩留まり向上を目的に熱間鍛造から冷間鍛造への変更も指向されている。しかし、高温浸炭と冷間鍛造は、いずれも浸炭加熱時に旧 γ 粒の異常成長を引き起こしやすくなる。このような異常成長は疲労特

性の低下や熱処理ひずみ増加による部品精度低下を招くという問題がある。

浸炭時の異常成長を抑制し、組織の均一化を図るために、鋼材側からは種々の検討がなされてきた。これらの鋼材のコンセプトとしては、鋼成分、製造条件などを制御することで、析出物を微細分散させ、そのピン留め効果を利用するものであり、Al-Nb-N系¹⁻³⁾やTiC系⁴⁾の析出物を利用した鋼材が開発されてきた。しかし、実際の部品での異常粒成長状況は十分に予測把握できていないのが現状である。

本報告では、肌焼鋼の浸炭時における旧 γ 粒異常成長機構の解明および評価方法の確立を目的として、粗大化に影響を及ぼすと考えられる冷間鍛造時のひずみの影響を検討した。冷間で端面拘束据込試験および単純せん断となるねじり試験を行い、その際の各種ひずみ分布および加工後の

試験片を熱処理した際の異常粒成長状況を FEM（有限要素法）解析と実験観察によって比較検討を行った結果について述べる。

2. 冷間据込拘束据込試験

2.1 実験方法

供試材に用いた SCR415 の化学成分を表 1 に示す。この供試材を鍛伸し棒鋼とした後、630℃で 10.8 ks の軟化焼鈍を行い、φ8×12 mm の円柱状試験片を切出し、同心円波型工具により冷間で圧縮率 70% まで据込み、その後窒素雰囲気中で 930℃×25.2 ks の浸炭しない加熱のみの擬似浸炭処理を施し、異常粒の発生状況の観察、発生位置の特定を行った。

2.2 粗大粒の発生位置

冷間据込みされた試験片の擬似浸炭処理を行った後の試験片の縦断面の旧 γ 粒結晶組織を写真 1 に示す。下部では破線で囲まれた箇所で局部的に粗大粒が発生しており、上下および軸対称変形的に見て計 4 ヶ所の同じ挙動下でのみ生じている。写真 2 はこの局部的に発生した粗大粒の拡大図であり、粗大粒の直径は 300 μm 程度であった。

表 1 SCR415 の化学成分

Table 1 Chemical composition of SCR415

(mass%)				
C	Mn	Al	Cr	N
0.17	0.85	0.03	1.15	0.011

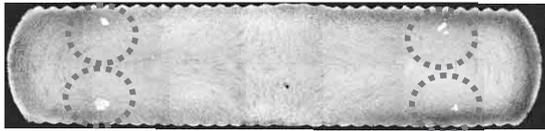


写真 1 930℃×25.2 ks 擬似浸炭処理後の粗大粒発生位置
Photo 1 The site of grain coarsening after pseudo-carburizing at 930℃ for 25.2 ks

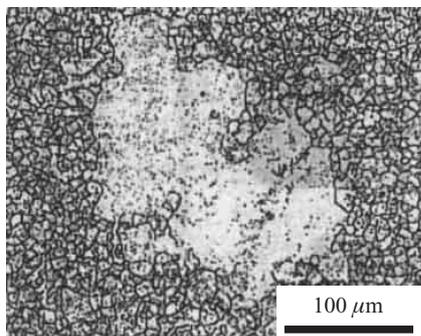


写真 2 冷間据込試験において発生した粗大粒
Photo 2 Grain coarsening at cold-forged parts

2.3 冷間据込試験の FEM 解析

異常粒成長箇所の正確なひずみの状況を把握するために、FEM 解析によりひずみなどの分布を調べた。冷間据込試験の解析モデルを図 1、解析条件を表 2 に示す。

φ8×12 mm の試験片を 1/4 軸対称モデルとし、圧縮率 70% で加工したときの材料内の塑性ひずみやひずみエネルギーの分布を汎用解析ソフト MSC.MARC™ を用いて計算した。解析に使用する試験片の変形抵抗曲線は単軸圧縮試験から得た。潤滑に二硫化モリブデンを使用した変形抵抗曲線を図 2 に示す。また、据込みの計算には、平滑の端面拘束用工具として、図面通りにモデルを作成した。

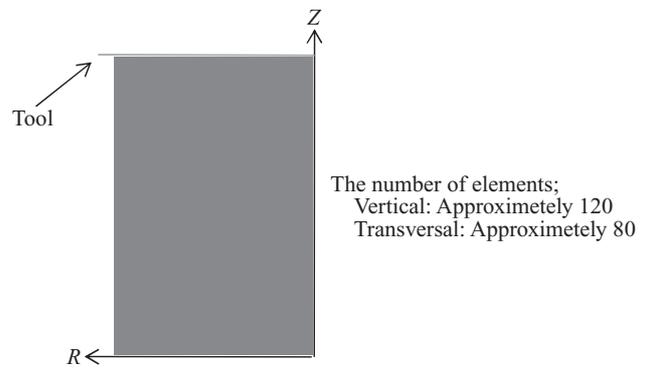


図 1 端面拘束据込みの FEM 解析による初期 1/4 軸対象モデル

Fig. 1 Initial 1/4 axi-symmetrical model of FEM for the edge constrained upset forging

表 2 解析条件

Table 2 Analysis condition for FEM

Size	φ8×12 mm
Number of elements	9 696
Number of points	9 897
Number of steps	200
Young's modulus	210 GPa
Poisson's ratio	0.3
Compression time	5 s
Coefficient of friction	0.15

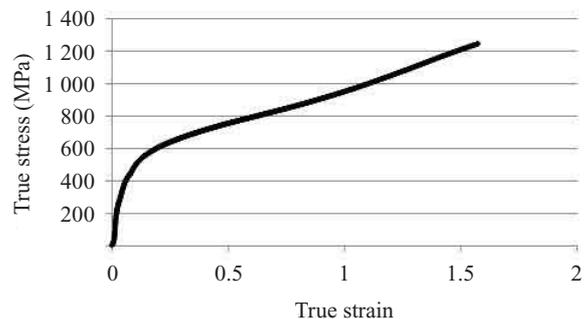


図 2 試験材の変形抵抗曲線

Fig. 2 True stress-true strain curve of test steel

検討対象のひずみ分布として、相当塑性ひずみと最大せん断ひずみ γ_{max} を図 3(a), (b) に示す。粗大化の駆動源となる活性化エネルギーを付与する変形エネルギーを表す相当塑性ひずみは、縦断面内では粗大化箇所以外に試験片中心部で最高値を示しており、単純に相当塑性ひずみだけで粗大化を判定することは難しい。また、せん断ひずみ γ_{max} のみでも今回の実験結果を完全に説明しているとはいえない。

一方、解析結果から求めたせん断ひずみ γ_{rz} 勾配を図 4 に示す。粗大粒発生箇所におけるせん断ひずみ γ_{rz} 勾配が高い値を示していることから、せん断ひずみ γ_{rz} 勾配が粗粒化の大きな影響因子の一つと考えられる。

ひずみ量そのものではなく、エネルギー量とした方が汎用的であり、ひずみエネルギーとせん断ひずみ (γ_{rz}) エネルギーの分布を計算した。その結果を図 5 に示す。ひずみエネルギーは工具直下と試験片中心部で高い値を示しており、相当ひずみ同様に粗粒化の影響因子として断定しにくい。一方、せん断ひずみ (γ_{rz}) エネルギーは粗大粒発生箇所において高い値を示しており、せん断ひずみ (γ_{rz}) エネ

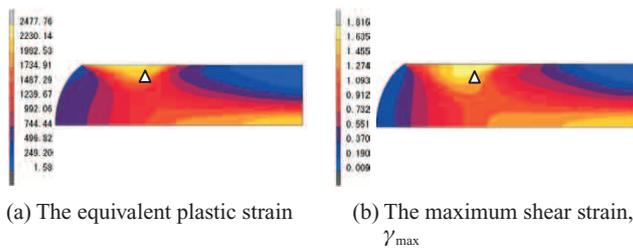


図 3 ひずみ分布
Fig.3 The distribution of the strain

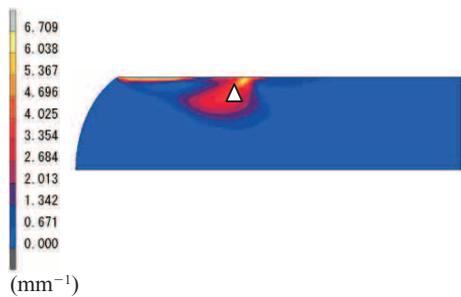


図 4 最大せん断ひずみ勾配
Fig.4 The gradient of maximum shear strain

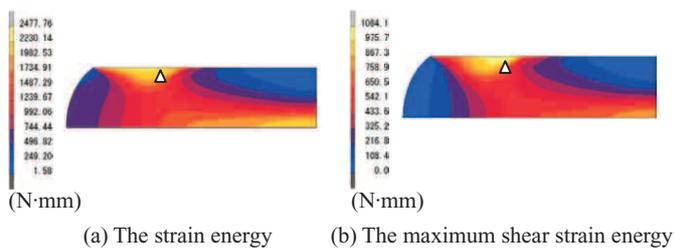


図 5 ひずみエネルギーの分布
Fig.5 The distribution of the strain energy

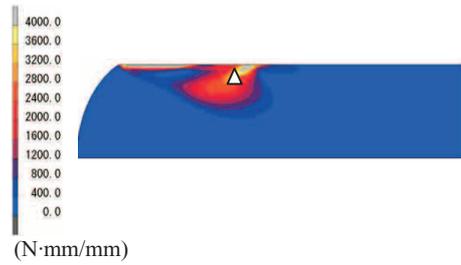


図 6 最大せん断ひずみエネルギー勾配
Fig.6 The gradient of maximum shear strain energy

ルギーが粗粒化に影響を与えるものと考えられる。

また、せん断ひずみ (γ_{rz}) エネルギー勾配を図 6 に示す。せん断ひずみ (γ_{rz}) エネルギー勾配は粗大粒発生箇所でも局所的に高い値を示す。

以上より、冷間据込試験からせん断ひずみ、せん断ひずみ (γ_{rz}) エネルギーおよびその勾配が粗大粒発生箇所において高い値を示していることから、これらのパラメータを粗粒化を引き起こす影響因子として特定した。

3. ねじり試験

3.1 実験方法

冷間据込加工の解析結果より、せん断ひずみやせん断ひずみ (γ_{rz}) エネルギー、およびその勾配が粗大化の要因となる可能性があることを確認した。しかし、冷間据込加工では試験片内部において複雑な変形を受けるため、せん断ひずみやせん断ひずみ (γ_{rz}) エネルギーの各々の粗大化に与える影響の度合は明確でなく、せん断ひずみやせん断ひずみ (γ_{rz}) エネルギー、勾配のどれが最も影響するのかを調査する必要性から、ねじり試験にて粗大化の確認を行った。ねじり試験の供試材に使用した鋼材の化学成分を表 3 に示す。

供試材に 740°C × 18 ks の軟化焼鈍を行った後、図 7 に示す形状の段付ねじり試験片でねじり変形を実施した。試験片中心の平行部のサイズとねじり試験におけるねじり角を表 4 に示す。半径 r 、変形部長さ L 、ねじり角 θ とすると、半径 r でのせん断ひずみ $\gamma_{z\theta}$ は、

$$\gamma_{z\theta} = \frac{r\theta}{L} \dots\dots\dots (1)$$

であり、せん断ひずみ $\gamma_{z\theta}$ 勾配は θ/L となり、各試験条件で

表 3 ねじり試験供試材の化学成分
Table 3 Chemical composition of SCM420

(mass%)					
C	Mn	Al	Cr	Mo	N
0.22	0.81	0.024	1.01	0.16	0.005

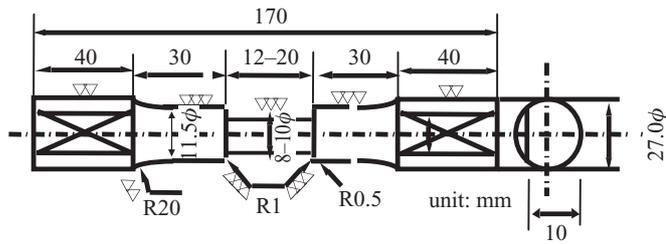


図7 ねじり試験片寸法

Fig.7 Size of test piece for torsion

表4 試験片サイズとねじり角

Table 4 Size of test piece for torsion and torsion angle

Type of test piece	Size of test piece	Torsion angle
A	φ8 × 12 mm	270°
		360°
		410°
B	φ8 × 20 mm	270°
		360°
		540°
C	φ10 × 20 mm	270°
		360°
		528°

は材料内部で一定である。

各試験片では3種類のサイズの試験片を、それぞれ270°と360°、破断寸前のねじり角でねじり試験を行った。ねじり試験後、窒素雰囲気中で950℃×10.8ks、1000℃×10.8ks、1050℃×10.8ksの擬似浸炭焼入れをそれぞれ行

い、水冷した試験片の縦断面の結晶組織を観察した。

3.2 粗大化挙動

試験片Aについて、ねじり角度410°、擬似浸炭温度950℃、1000℃、1050℃での試験片長手方向中心の最表層部の粗大化挙動を写真3に示す。ねじり角度410°、擬似浸炭温度1050℃において顕著な粗大化が確認できた。しかし、温度950℃、1000℃においては粗大化が確認できなかった。

一方、擬似浸炭温度が1050℃においてねじり角度を270°、360°、410°とした場合の粗大化挙動を写真4に示す。ねじり角度が大きいほど粗大化が顕著に現われており、強加工にともない粗大化することが分かる。

擬似浸炭温度1050℃において、各試験片タイプの破断寸前のねじり角で試験を行った場合の粗大化状況を写真5に示す。試験片A、Bでは粗大粒が多く見られるが、試験片Cは少ない。試験片AとCについて(1)式より、試験片AとCの最表層部近傍のせん断ひずみはそれぞれ $\gamma_{2\theta} = 2.223$ 、 $\gamma_{2\theta} = 2.304$ とほぼ同値になるにも関わらず、このような違いが見られるのは、試験片AとCではせん断ひずみ $\gamma_{2\theta}$ 勾配がAは $\theta/L = 0.556$ 、Cは $\theta/L = 0.461$ と異なっており、勾配値が影響していることが考えられる。

3.3 ねじり試験のFEM解析

ねじり試験のFEM解析は、粗大粒が顕著に確認できた試験片Aの形状について報告する。ねじり試験の解析モデルを図8に示す。解析モデルには実験での変形部寸法と同

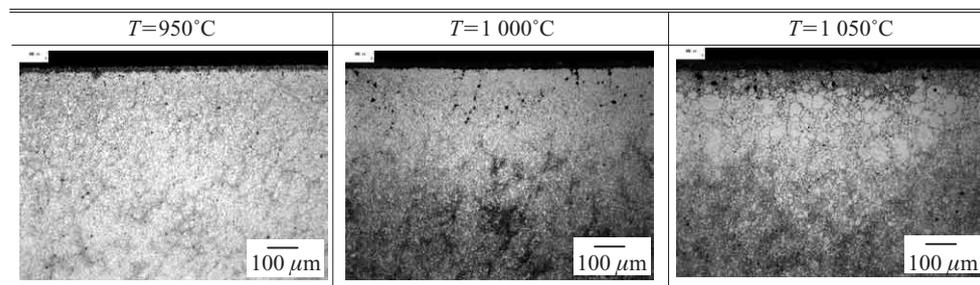


写真3 試験片Aのねじり試験による粗粒化（ねじり角 $\theta = 410^\circ$ ）

Photo 1 Change in grain coarsening of the test piece A (The torsion angle θ is constant at 410° .)

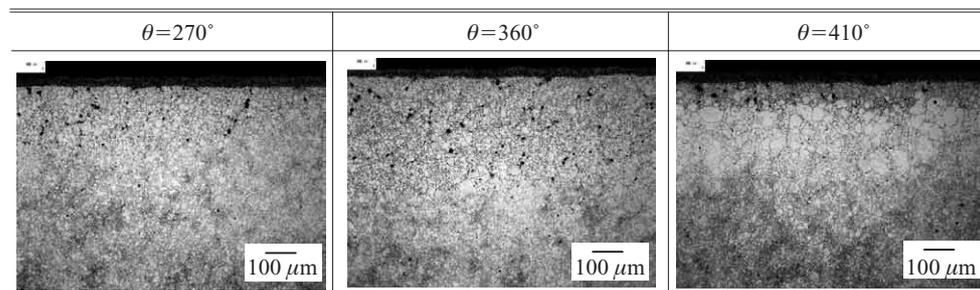


写真4 試験片Aのねじり試験による粗粒化（熱処理温度 $T = 1050^\circ\text{C}$ ）

Photo 4 Change in grain coarsening of the test piece A (The heat treatment temperature T is constant at 1050°C .)

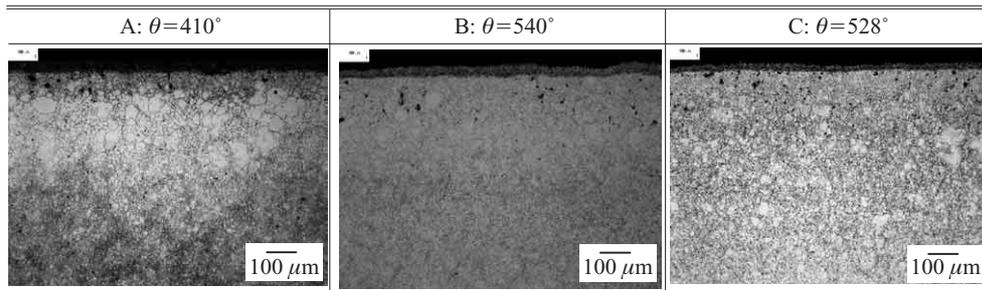


写真5 熱処理温度 $T=1050^{\circ}\text{C}$, 左から各試験片 A: $\theta=410^{\circ}$, B: $\theta=540^{\circ}$, C: $\theta=528^{\circ}$ の粗粒化
Photo 5 Change in grain coarsening of each test piece (The heat treatment temperature T is constant at 1050°C .)

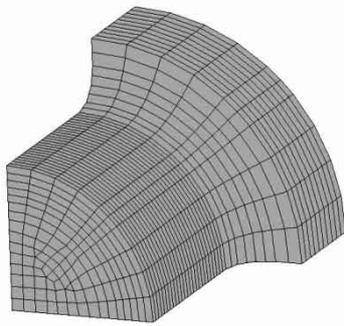


図8 1/8 周期対称の解析モデル

Fig. 8 The analysis model of the torsion test for FEM

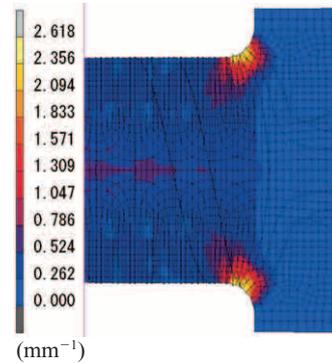


図10 最大せん断ひずみ勾配

Fig. 10 The gradient of maximum shear strain

様なものを用い、1/8 周期対称モデルにて計算する。材料定数など、解析条件は表2に示す冷間据込試験のFEM解析と同じデータを使用する。

ねじり試験のFEM解析より、せん断ひずみ $\gamma_{z\theta}$ とせん断ひずみ $\gamma_{z\theta}$ エネルギーを図9(a), (b)に示す。せん断ひずみ $\gamma_{z\theta}$ は理論通り試験片の中心部から最表層部に向かって線形で増加しており、試験片最表層で最大となる。また、せん断ひずみ $\gamma_{z\theta}$ とせん断ひずみ ($\gamma_{z\theta}$) エネルギーの分布に違いはない。せん断ひずみ ($\gamma_{z\theta}$) エネルギーも試験片最表層部で高い値を取り、せん断ひずみの分布と同様である。せん断ひずみまたはそのエネルギーが粗粒化に影響していることが考えられる。一方、図10に示すせん断ひずみ勾配は、

試験片長手方向の中心では一定となることから、せん断ひずみ勾配のみが粗粒化に影響しない。

4. 両試験のFEM解析結果の比較

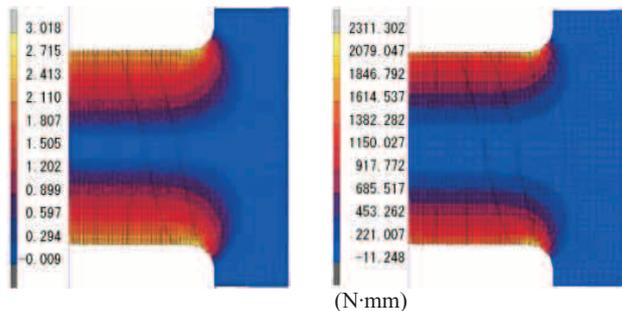
4.1 両試験のFEM解析結果のパラメータの比較

冷間据込試験とねじり試験のFEM解析結果より、粗大粒発生箇所において粗粒化に影響を及ぼすパラメータの比較を行う。粗大粒発生箇所のパラメータと熱処理温度を 1050°C とした場合の粗大粒の状況を表5にまとめる。表5

表5 粗大粒発生箇所のパラメータの比較 (熱処理温度 $T = 1050^{\circ}\text{C}$)

Table 5 Comparison of each parameter at the site of grain coarsening (The heat treatment temperature T is constant at 1050°C .)

Method of test	Upsetting test	Torsion test A		
		$\phi 8 \times 12 \text{ mm}$		
Size of test piece	$\phi 8 \times 12 \text{ mm}$	$\phi 8 \times 12 \text{ mm}$		
Torsion angle	—	410°	360°	270°
Maximum shear strain	1.521	2.223	2.094	1.571
Gradient of the maximum shear strain	2.940	0.556	0.524	0.393
Maximum shear strain energy	808.2	1434.4	1336.4	868.9
Grain coarsening	Occurrence	Occurrence	No	No



(a) The maximum shear stress (b) The maximum shear strain energy

図9 ねじり試験のFEM解析結果

Fig. 9 The results of FEM analysis on the torsion test

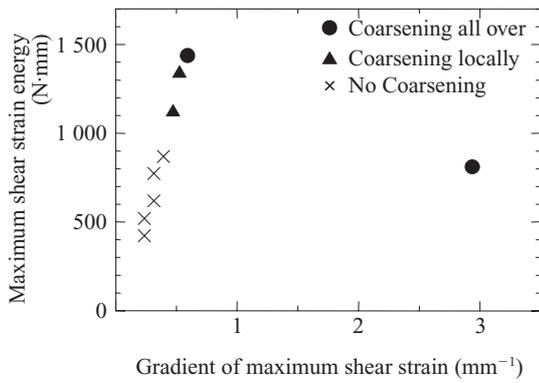


図 11 粗粒化マッピング

Fig. 11 Correlation between the maximum shear strain energy and the gradient of maximum shear strain to the occurrence of austenite grain coarsening

のねじり試験は試験片 A についてのみ示しており、試験片 B, C においても同様に求めているが、本報告では省略する。せん断ひずみは冷間据込試験とねじり試験において粗大化有無と相関がとれず、粗粒化の影響因子に特定することは不適切であると考えた。一方、粗大化した条件でのせん断ひずみ勾配とせん断ひずみエネルギーは両試験において、それぞれ高い値を示していることから粗粒化の影響因子として考えられる。

4.2 粗粒化マッピング

すべての試験において、熱処理温度 1050℃における粗大粒の状況と FEM 解析結果から得た粗大粒発生箇所における影響因子のパラメータを比較し粗粒化マッピングを作成した。作成した粗粒化マッピングを図 11 に示す。影響因子であるせん断ひずみ勾配とせん断ひずみエネルギーを軸とし粗大粒の状況を示している。せん断ひずみエネルギーが高い場合に粗大粒が発生する。しかし、せん断ひずみエネルギーが低くてもせん断ひずみ勾配が高い場合に粗大粒が発生していることが分かる。

5. おわりに

本研究では冷間据込試験とねじり試験を行い、強加工、

高温浸炭処理にともなう粗大粒の発生を確認した。また、FEM 解析を用いて粗大粒発生箇所のパラメータを比較・検討を行い、粗粒化の影響因子として、せん断ひずみ勾配とせん断ひずみエネルギーを特定した。さらに、粗粒化の影響因子のパラメータを導出し、粗粒化マッピングを作成した。粗粒化マッピングは粗大粒発生箇所を予測するために有用であり、粗粒化を抑制するための加工プロセスを提案が将来的には期待される。

参考文献

- 1) 久保田学, 越智達朗. 新日鉄技報. 2003, no. 378, p. 72.
- 2) 三野匡之, 津村輝隆, 中里福和. 住友金属. 1989, vol. 41, p. 463.
- 3) 小守努. 特殊鋼. 2005, vol. 54, p. 2.
- 4) 田中高志. Sanyo Technical Report. 2003, vol. 10, p. 53.



吉村 英徳



三原 豊



岡内 一弘



笠井 正之



丸田 慶一



木村 秀途