

定ひずみ鋼の開発

笠井 貴之^{*1}・雲丹亀 泰和^{*2}・高須 一郎^{*3}・林 亮二^{*4}・北出 真一^{*5}

Development of steel with stable heat treatment distortion
Takayuki Kasai, Yasukazu Unigame, Ichiro Takasu, Ryoji Hayashi and Shinichi Kitade

Synopsis: Recently, the demand to variation reduction of heat treatment distortion becomes increasingly severe, because of the cost reduction and the environment influence by production process saving, such as polish process elimination after heat treatment. In order to develop steel with little variation in heat treatment distortion, effects of the core part area fraction of a bar and the aspect ratio of a core in a bar were investigated. Consequently, the followings were found;

- 1) As for the variation of heat treatment distortion of a part, the core area fraction of a bar had more contribution rather than the aspect ratio of a core.
- 2) Decreasing the core part area which remains in parts is effective for reducing the variation in heat treatment distortion. By applying this steel, to the automobile parts, the variation in heat treatment distortion at carburized quenching was reduced rather than conventional steel. Moreover, this steel is expected to be applicable not only for that parts but also for hollow parts with comparatively thick wall in the core of high accuracy parts.

Key words: carburized quenching, heat treatment distortion, variation, core, aspect ratio, area fraction, case hardening steel, CAE, macro pattern

1. 緒言

自動車用ギアや機械製品に使用される伝達部品は、小型軽量化・高出力化・高信頼性はもとより、低騒音・低振動化・高機能化のニーズも強く、ますます高精度化が要求されている。熱処理は、機械部品の強度、耐摩耗性向上のために広く行われているが、部品の形状および寸法変化が不可避免的に発生する。この変化が、部品の使用時に騒音や振動の要因となるため、起因となる熱処理ひずみのばらつきを抑制する事は大きな課題となっている。また、近年、省工程化によるコストの削減および環境への影響から、熱処理後に行う部品の研磨を一部省略するなど、熱処理ひずみのばらつき低減に対する要求は厳しさを増している。

駆動部品の製造工程においては、浸炭焼入れによる体積変化を見越して、予め部品の加工代により調整することが多い。したがって、熱処理後の寸法精度に対しては、部品の体積変化の絶対量よりも、そのばらつきが小さいことが必要となる。特に、熱処理後の研磨工程を省略するような場合には、熱処理による寸法変化のばらつきを数 μm 程度

と極めて小さな値に抑制しなければならない。熱処理ひずみのばらつきを抑える手段は種々検討されているが、金属学的には、焼入性、化学成分および鑄造組織を制御する方法が多く報告されている^{1)~8)}。例えば、化学成分の組み合わせによって熱処理ひずみの挙動が変化するが、これには特に炭素含有量の影響が顕著である事が知られている¹⁾。また鑄造組織制御を例に取れば、正方形鑄型や丸鑄型で鑄造した材料は、矩形鑄型で鑄造した材料に比べて部品内に凝固組織が等方的に残存するが、凝固組織における等軸晶の内外で熱処理ひずみ発生量が異なるため、熱処理後の部品の熱処理ひずみばらつき低減に有利であるとの報告もある^{2)~8)}。

本報では、化学成分と熱処理ひずみ発生量との関係を調査し、凝固組織における等軸晶（コア部と呼ぶ）の面積率および縦横比に着目し、熱処理ひずみのばらつきにおよぼす影響について調査を行った。また調査により得られた知見から、部品での熱処理ひずみのばらつきはコア部の縦横比よりも面積率の影響の方が大きいことを見出し、定ひずみ鋼、つまり熱処理歪のばらつきが少ない鋼の開発に成功した。また高い寸法精度が要求される自動車用浸炭用部品

*1 研究・開発センター プロセス開発グループ
*2 技術管理部 軸受・構造用鋼グループ長
*3 研究・開発センター プロセス開発グループ長, PhD
*4 製鋼部 製鋼技術グループ
*5 製鋼部 鑄造課

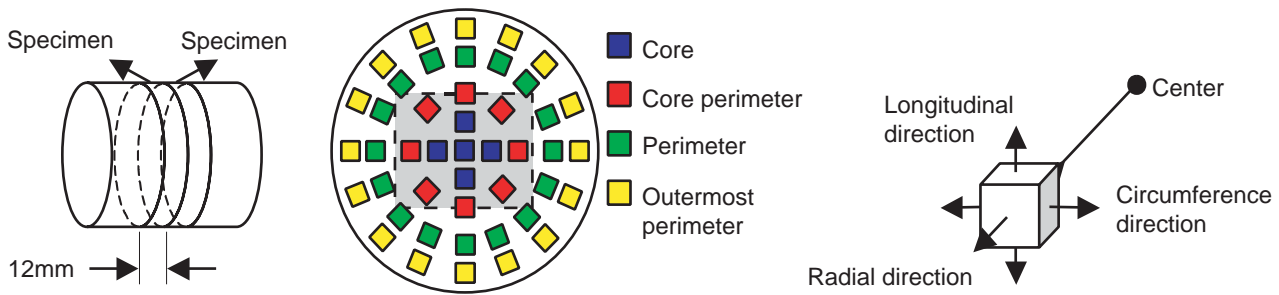


Fig.1 Heat treatment experiment method

に適用したので報告する。

2. 熱処理ひずみにおよぼす化学成分の影響

2.1 実験方法

化学成分と熱処理ひずみ発生量との関係を調査するため、鋼片から切り出した試験片を用いて、熱処理による変形量を測定した。実験方法を以下に示す。

供試材にはクロム鋼を選定し、380×490mmの大断面矩形鋳型を用いて垂直式連続鋳造装置で鋳片を製造し、直径167mmに熱間圧延し、鋼片にしたものを用いた。Table 1に本供試材の化学成分を示す。Fig.1に示すように、供試材から幅12mmの面を共有する2個の円板を切断・採取し、片方を熱処理試験用の試料（試料と呼ぶ）、もう一方を化学成分調査用の試料（試料と呼ぶ）とした。試料でマクロ腐食によりコア部を確認し、1193Kの焼ならしにより残留ひずみを除去したものを作製した。コア部は、鋳片断面形状とほぼ相似した矩形を呈していた。この試料から、Fig.1のように、一辺10mmのサイコロ状の試験片を、コア部の長辺および短辺に垂直、かつ中心から同心円状に採取した。このサイコロ状試験片は、コア部とコア部の外側（柱状晶）に分類し、更にコア部を「コア部中心」と「コア部外側」、コア部の外側を「外周部」と「最外周部」の計4領域に分類して実験を行った。また試料は、試料でサイコロ状試験片を切り出した部位に相当する位置から分析試料を採取し、燃焼-赤外線吸収法により化学成分分析を行った。

Table 1 Chemical compositions of specimen for heat treatment experiment

(mass%)						
C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Cu
0.17	0.17	0.85	0.013	0.07	1.19	0.13

熱処理は、不活性ガス中で1198K - 30min保持後、275Kの冷水中の焼入れとした。熱処理ひずみは、半径方向、周方向および高さ方向の寸法を熱処理前と熱処理後に測定し、熱処理による各方向の寸法変化率で評価した。

2.2 実験結果

炭素濃度はマルテンサイト変態時の膨張量に影響することが知られている。Fig.2に各領域での炭素濃度を示す。炭素濃度は外周部が高く、コア部は外周部よりも約0.015%程度低いことが分かった。Fig.3に各領域での熱処理ひずみを示す。ここで縦軸は体積ひずみ（3軸ひずみの和）を表している。解析の結果、熱処理ひずみの方向性についての規則性は見られなかったが、体積ひずみを指標

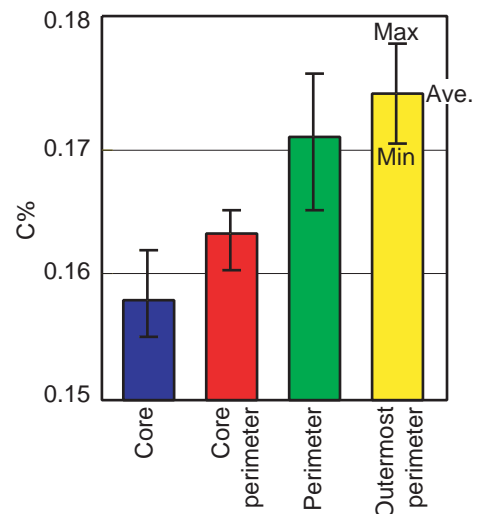


Fig.2 Carbon contents of each domain

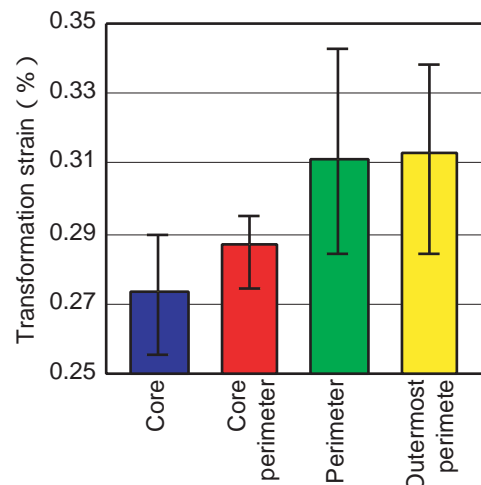


Fig.3 Transformation strain of each domain

にする事でFig. 2に示す炭素濃度分布の傾向とよく一致した。Fig. 4に熱処理ひずみ（体積ひずみ）と炭素濃度の関係を示す。切片を0とした1次の回帰分析を行った結果、次式に示す近似式が得られた。

$$\text{熱処理ひずみ} = 1.78 \times \text{炭素濃度} \quad \dots (1)$$

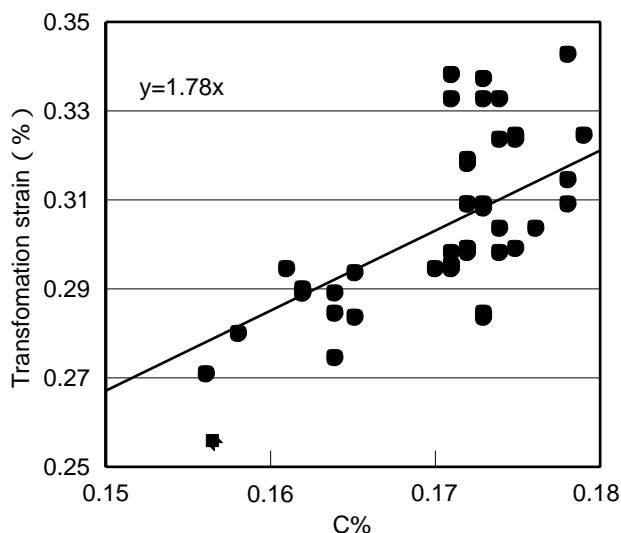


Fig. 4 Relation between transformation strain and carbon contents

また、他の成分にも熱処理ひずみとの間に相関が見られるものがあったが、炭素濃度が熱処理ひずみと相関係数が最も高く、炭素鋼における炭素濃度と焼入膨張率の係数⁸⁾にほぼ合致する事から、本クロム鋼において、焼入れ時の熱処理ひずみは炭素濃度に支配されると考えられる。

以上の知見から、部品の中心部を打ち抜いた後に熱処理される中空部品では、「部品内のコア部の残存分布状態が、熱処理ひずみのばらつきに影響する」という事が推測される。つまり、熱処理ひずみには炭素濃度の寄与が大きいため、外周部に比べて炭素濃度が低いコア部の部品内に残存する形状および体積率が、熱処理後の部品の外径変化量に影響をおよぼすと考えられる。例えば、コア部が等方であると、部品横断面ではコア部が周方向に均一に残存するた

め、コア部の縦横比が大きい場合に比べて、熱処理ひずみのばらつきが小さくなると思われる。またコア部の面積率が小さいと、部品内に残存するコア部の体積率が低減され、熱処理ひずみのばらつきに有利であると考えられる。

したがって、上記推測の妥当性の調査を兼ね、熱処理ひずみのばらつきを低減するために、以下の2点について検討し、それぞれの熱処理ひずみのばらつきにおよぼす影響を調査した。

コア部縦横比の等方化

コア部面積率の縮小化

3. 熱処理ひずみばらつきにおよぼすコア部形状および炭素濃度ばらつきの影響

3.1 試作材

熱処理ひずみのばらつき低減のため、コア部の縦横比および面積率の最適化を狙い、以下に示す製造方法にて3種類の試作材を製造した。供試材はSCr420とした。まずコア部面積率大の矩形コア材（比較材）として、Steel Aを380×490mmの大断面の連続鋳造により製造した。Steel Bは、コア部の面積率縮小化を狙い、Steel Aと同じ設備を用いて鋳造条件を変更して製造した。またSteel Cは、コア部の等方化を狙い、平均寸法428×428mmの正方形鑄型を用いて造塊法にて製造した。各鑄片を直径167mmの鋼片に熱間加工した。Table 2に各供試材の化学成分を示す。供試材間で化学成分、およびジョニミー焼入性曲線に差異はなかった。

Table 2 Chemical compositions of specimens (mass%)

Steel	C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Cu
A	0.19	0.17	0.85	0.013	0.07	1.19	0.13
B	0.19	0.17	0.82	0.016	0.10	1.19	0.12
C	0.19	0.17	0.83	0.016	0.14	1.24	0.10

3.2 コア形状と炭素濃度

本実験で用いた鋼片の横断面のマクロ組織を、Fig. 5に

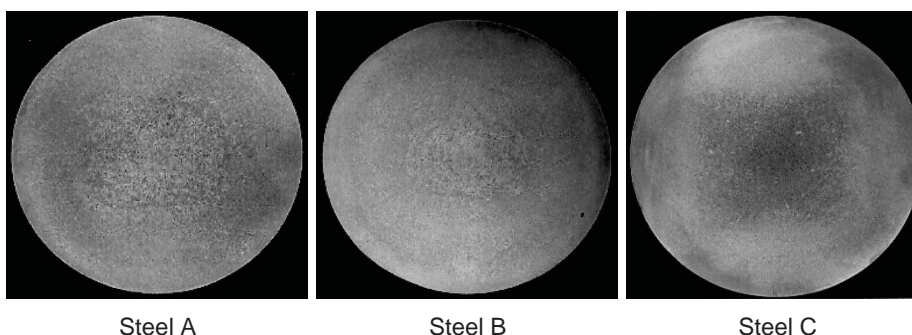


Fig. 5 Macrostructure of specimen

示す。これを見ると、Steel AおよびSteel Bは矩形の、またSteel Cは正方形のコア部が観察された。Steel Aのコア部は長軸長さ82mm、短軸長さ64mmの矩形、Steel Bのコア部は長軸長さ72mm、短軸長さ49mmの矩形をしている。またSteel Cのコア部は、長軸長さ82mm、短軸長さ80mmとほぼ正方形であった。

それぞれの試作材の鋼片横断面に占めるコア部の縦横比および面積率を、Table 3に示す。Steel BはSteel Aに比べてコア部の縦横比は大きい、狙い通り、面積率は約8%小さかった。Steel CはSteel Aに比べてコア部の面積率は大きく、縦横比はほぼ1であった。

Table 3 Aspect ratio and area fraction of core part

Steel	Aspect ratio	Area fraction
A	1.28	24.0%
B	1.47	16.1%
C	1.03	29.9%

各試作材のコア部とコア部の外側の炭素濃度の差異をFig. 6に示す。炭素濃度は、鋼片の中心から径方向に5mmおきに採取し、燃焼 - 赤外線吸収法により測定した。いずれの試作材でも、炭素濃度はコア部外側が高く、コア部では低くなる傾向が見られた。Steel BおよびSteel CはSteel Aに比べて、コア部外側とコア部の炭素濃度の差が小さくなり、特に、Steel Bでは比較材であるSteel Aに比べて約60%低かった。

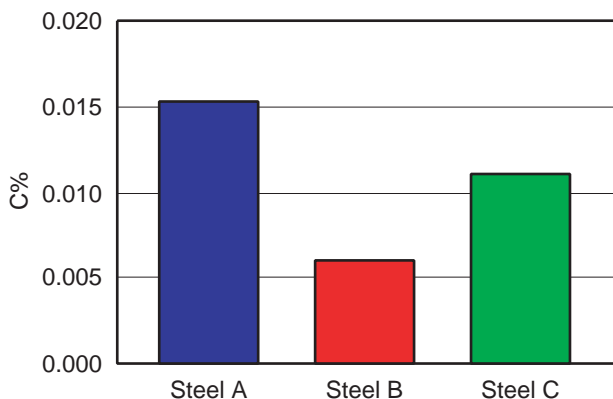


Fig. 6 Carbon content variation between core part and perimeter part

3・3 中空部品の熱処理シミュレーション

前節までに得られた熱処理ひずみと炭素濃度の関係式、各試作材のコア部の形状、および鋼片の炭素濃度分布を用いて熱処理シミュレーションを行った。自動車用ギアおよびレースなどの部品は、鍛造により中心部を打抜いた後、熱処理をする事が多い。そのため解析では、簡易的に

Fig. 7に示す鍛造工程で成形される、軸対称形状の中空部品を対象とした。

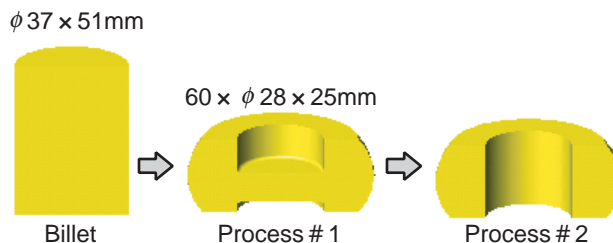


Fig. 7 Forging process of parts (CAE)

CAE解析は、コア部の対称性を考慮して、1/4モデルとした。

解析を実施する上で、以下に示す仮定を用いた。

鋼片のコア部の形状 = 鍛造前素材のコア部の形状
鋼片の炭素濃度分布 = 鍛造前素材の炭素濃度分布

これらの仮定について更に詳細に説明すると、仮定は、Fig. 5に示した直径169mmの鋼片のコア部が、直径37mmの鍛造前素材にも相似形（縦横比、面積率が等しい）で存在するという仮定である。Table 4に鍛造前素材におけるコア寸法を示す。また仮定は、Fig. 6に示した鋼片のコア部およびコア部外側の炭素濃度の差が、鍛造前素材にも存在するという仮定である。Fig. 8に、本仮定を元に、鍛造解析により得られた、対象部品のメタルフローを示す。鍛造解析により得られたメタルフローから、部品内の位置と素材位置との対応を求め、部品内のコア部残存状態を求めた。Fig. 9に、各試作材における部品内のコア部残存状態を示す。

Table 4 Core size of billet and bar

		(mm)		
Steel		A	B	C
Billet	Long side	82	72	82
	Short side	64	49	80
Forging material	Long side	9.1	8.0	9.1
	Short side	7.1	5.4	8.9

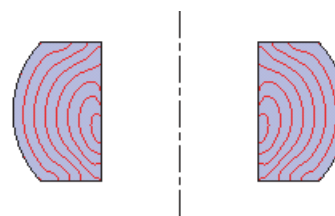


Fig. 8 Metal Flow of forging parts (CAE)

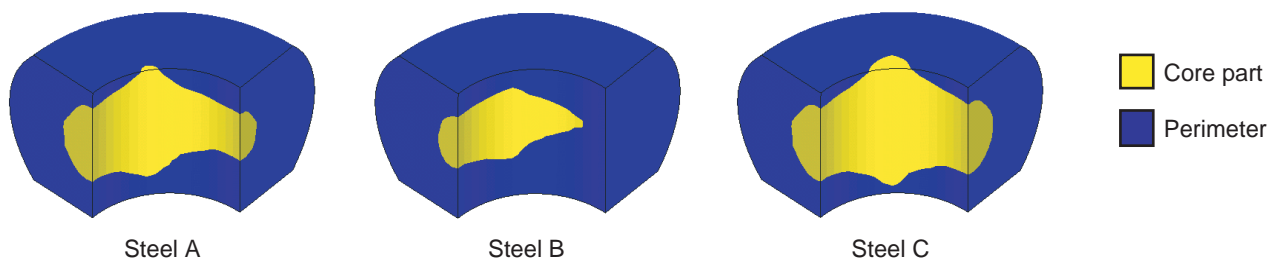


Fig. 9 Core part in after forging (CAE)

熱処理解析は、油焼入れを想定し、熱伝導率、比熱および応力・ひずみ関係式等の材料物性値は、温度依存性のデータを用いた。冷却過程では、炭素濃度 = 0.2%でのCCT曲線を用いて相変態を考慮し、計算を行った。変態過程では、Fig.9に示した部品内でのコア部および外周部に、式(1)により導出した変態ひずみを、Fig.6に示した各部位の炭素濃度に応じて発生させるものとした。

Fig.11に、CAE解析により得られた、各試作材での外径ばらつきとコア面積率との関係を示す。外径ばらつきは、Fig.10のように、高さ方向の5断面について断面毎にR(最大半径-最小半径)を求め、各断面のRの標準偏差をとった値を指標とした。この解析結果より、コア部面積率が低いほど外径ばらつきは小さくなる事が分かった。従って部品にした時の熱処理時の外径ばらつきは、コア部縦横比

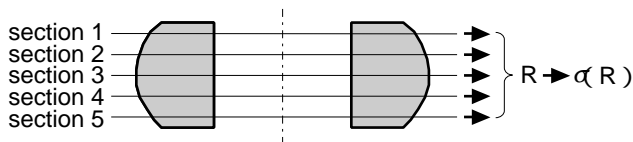


Fig.10 Calculation method of carbon content variation

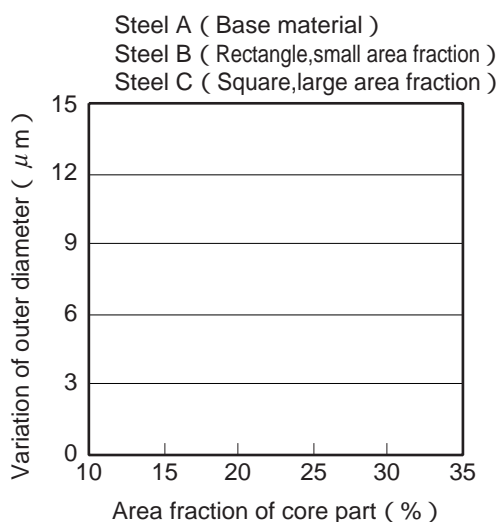


Fig.11 Relationship between variation of outer diameter and area fraction of core part

よりもコア部面積率の影響がより大きい事となる。すなわち、いずれの場合でも、コア部の部品内への残存量を低減する事が、残存パターンを等方にするよりも熱処理ひずみのばらつきを低減するのに有効である事が判明した。

3・4 実部品での評価

熱処理ひずみのばらつきを実部品にて評価するため、自動車用駆動部品の浸炭焼入れ時の熱処理ひずみのばらつきを調査した。供試材は、3・1で作成した試作材：Steel A～Steel Cに加え、丸いコア部を有した試作材：Steel Dを追加して評価した。Steel Dは、丸鑄型を用いて鑄造した後、直径169mmの鋼片に熱間加工し、所定の径まで熱間圧延を行い製造した。Steel Dのコア部は、鑄型形状とほぼ相似形の円形で、コア部の面積率は31.6%と4つの試作材のうち最も大きかった。またSteel Dの化学成分およびジョミニ値は、他の試作材と同等のものを用いた。

Fig.12に各試作材の熱処理ひずみのばらつきの調査結果を示す。熱処理ひずみのばらつきは、丸いコア部を有するSteel DについてはSteel A(比較材)よりも小さく、正方形のコア部を有するSteel CについてはSteel Aよりも大き

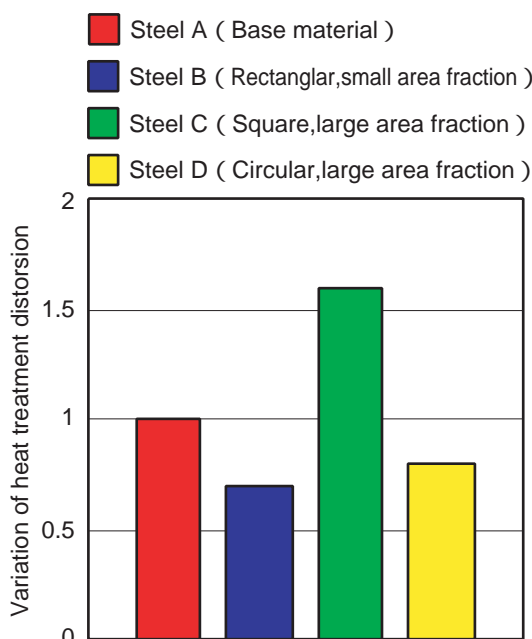


Fig.12 Variation of pitch circle diameter in each steel

かった。Steel Dは、コア部の面積率は大きいですが、コア部が丸い事により、径方向の寸法変化のばらつきが抑えられたと考えられる。また、コア部の面積率が最も低いSteel Bは、熱処理ひずみのばらつきが最も良好であった。この事から、熱処理ひずみのばらつきを抑制するには、コア部の形状を等方性にするより、コア部の面積率を小さくすることが有効である事が確認された。熱処理時の膨張量が炭素濃度に依存することを考慮すると炭素濃度分布のばらつきを低減することも有効であると考えられるが、コア部の小さいSteel B（定ひずみ鋼と呼ぶ）が熱処理ひずみのばらつき低減に非常に効果的である事が明らかとなった。今回開発した定ひずみ鋼を用いる事で、今回実験した自動車部品だけでなく、コア部の中心と部品の中心軸が一致するような比較的厚肉の中空部品について適用の効果が現れるものと期待される。

4. 結言

コア部の面積率と縦横比に着目し、部品鍛造後の熱処理ひずみのばらつきにおよぼす影響について調査を行い、以下の事を明らかにした。

- ・熱処理ひずみのばらつきにおよぼす影響は、コア部の縦横比よりも面積率の寄与が大きい。
- ・部品内のコア部残存量を低減することが熱処理ひずみのばらつきを低減するために有効である。
- ・上記特性を有した鋼材を自動車部品の浸炭焼入れに適用した結果、従来鋼よりも熱処理ひずみのばらつきを低減できた。また本自動車部品だけでなく、比較的厚肉の中空部品で、かつ熱処理後の寸法に高い精度が要求される部品について、本開発鋼の適用の効果が現れるものと期待される。

文 献

- 1) 西山善次：マルテンサイト変態 基本編，丸善，(1971)，13.
- 2) W.Seger：Munich Seminar on Forming，(1986)，25.
- 3) S.Gunnarson：Haerterie-Technische Mitteilungen，(1991)，216.
- 4) B.Thoden：AWT Factsheet 15.
- 5) S.Gunnarson, M.Cristinacce, T.Lund and J.Volkmoth：Journale of Engineering Materials and Performance, 4 (1995)，259.
- 6) J.Volkmoth, F.Hengerer and T.Lund：Haertereitechnische Mitteilungen, 50 (1995)，352.
- 7) H.W.Zoch, T.Luebben, F.Hoffmann and P.Mayr：Haertereitechnische Mitteilungen, 49 (1994)，245.
- 8) M.Cristinacce：Heat Treatment of Metals, 1 (1999)，18.

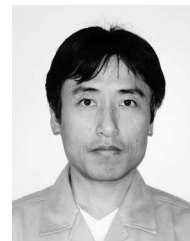
著者



笠井 貴之



雲丹亀 泰和



高須 一郎



林 亮二



北出 真一

