

技術資料

Technical Data

S45C小型鑄造鋼塊を用いた熱間鍛造時のザク圧着挙動

辻 知輝*¹, 杉野 敦*¹, 岡島琢磨*²

Evaluation of Internal Void Closure Behavior in Hot Forging Using an S45C Small Ingot

Tomoki TSUJI, Atsushi SUGINO and Takuma OKAJIMA

Synopsis

Steel ingots have internal voids caused by solidification shrinkage during ingot casting. It is very important to determine the manufacturing conditions under which the voids are completely closed by hot forging or hot rolling process. However, the conventional void closure evaluation method has a problem of inhibition of void closure by the oxide film. So, the purpose of this study was to manufacture a small ingot with internal voids and to evaluate the void closure conditions in hot forging. As a result, the voids closed as the hot forging reduction rate increased. In addition, from the results of the micro-tensile test, it was found that the tensile strength is increased by reheating and hot holding after closing the void. This suggests that reheating and hot holding time after hot forging is effective for complete closure of the voids.

1. 緒 言

特殊鋼の製造プロセスは、主に連続鑄造やインゴットから分塊鍛造や分塊圧延を通じて鍛延、棒鋼、線材製品となる。インゴットには、造塊時の凝固収縮で生成した内部空孔（以下、ザクという）が存在する。ザクは後工程の熱間鍛造や熱間圧延にて完全に圧着される必要がある。その製造条件を見極めることは非常に重要である。ザクの圧着評価手法として、従来の研究では、人工欠陥を施した試験片の鍛造試験と併せてそれを再現したFE (Finite Element) 解析を行う、ザク圧着条件の定量的な検証の事例が挙げられる¹⁾。しかし、人工欠陥を施した金属試験片でのザク圧着評価では、実機インゴットのザク表面と異なり、ごく薄い酸化被膜の存在が避けられず、見かけ上ザクが閉塞しても、引張試験時に元ザク

部を起点として破断することがあり²⁾、真の圧着である完全に拡散接合できる実機を模擬したザク圧着試験としては課題が残っていた。一方で、非常に大型な実機インゴットを用いた実証試験により、ザク閉塞予測の検討が行われた研究事例³⁾があり、その製品のザク圧着条件の明確化には非常に有効であった。しかしながら、多品種な特殊鋼製品へ活用するための、多数の大型試験の実施には限界があり、より簡便な検証方法が望まれた。

そこで本研究では、鑄型を工夫し意図的にザク生成位置を制御した小型インゴットを作製し、熱間加工時のザク圧着条件を評価することを目的とした。本報告では炭素鋼 S45C 材を用いて小型インゴットのザク生成状態の確認、その後の分塊鍛造をイメージした熱間鍛伸と FE 解析により、その鍛伸条件がザク閉塞および圧着におよぼす影響を調査した。

2021年4月5日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

2. 実験方法

2. 1 インゴットの作製

インゴットは、鑄型寸法の変更と下注ぎ鑄造法へ改良した佐藤鑄型⁴⁾を使用し鑄造にて直径100 mm × 350 mm (押湯を除く)を作製した。Table 1に作製したインゴットの化学組成、Fig. 1に鑄型の概略図、Fig. 2にインゴット外観写真をそれぞれ示す。鑄型は、リング状の耐火物を積み重ね、上から2段目のみ冷却速度の速い鉄リング(チル部)を使用することで、チル部下への溶湯の供給を押し意図的にインゴット内部にザクを生成させた。インゴットは、押湯側が鑄型頂部(以下、Topという)、押湯反対側が底部(以下、Botという)である。

Table 1. Main chemical composition of S45C ingot (wt%).

C	Si	Mn	P	S	O	T-N
0.45	0.25	0.75	0.019	0.0060	0.0023	0.0095

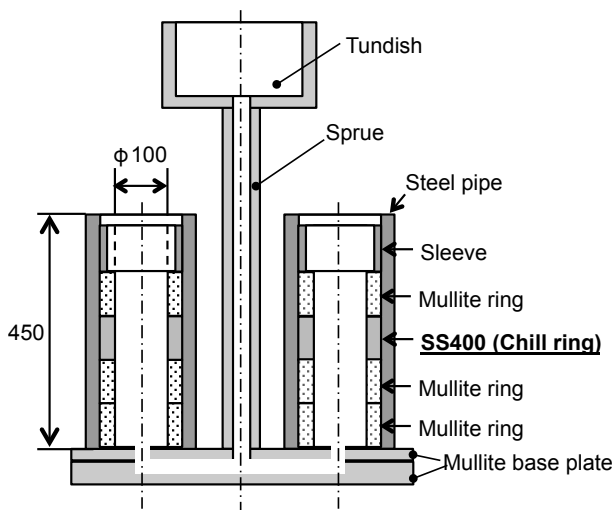


Fig. 1. Schematic drawing of modified Sato mold and bottom pouring casting.

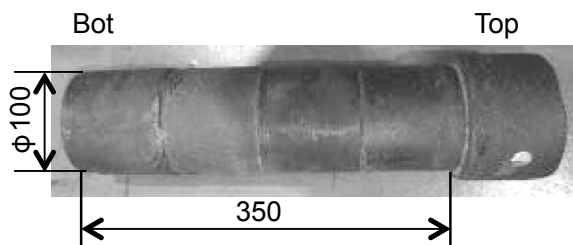


Fig. 2. Exterior photo of S45C ingot.

2. 2 ザク形状調査

放射線透過試験装置による透過撮影およびインゴットの縦断面切断にて初期のザク形状を調査した。Fig. 3に

インゴット時のCT (Computed Tomography) 画像と切断した縦断面写真を示す。インゴット内部にはTopから2段目、3段目にあたる位置に最大径φ15.4 mm、長さ107 mmの紡錘形のザクが生成していることが確認された。CT画像と縦断面写真を比較し、CT画像でザク形状を把握できることが確認されたため、熱間鍛伸後のザク残留位置を非破壊で特定することが可能である。Fig. 4に熱間鍛伸加工に使用した4つのインゴットのザク最大径部横断面のザク寸法測定結果を示す。ザク寸法は、インゴットに対し円周方向へ45°刻みに4方向(①, ②, ③, ④)から撮影したCT画像を元に、CT画像上のザク寸法を計測した。ザク寸法は全体的に見ると多少ばらつきがあるが、撮影方向①に関しては寸法ばらつきが小さい(±0.6 mm)インゴットであることが確認された。この結果から、ザク寸法差が小さい方向①のザクに対し圧下を行い熱間鍛伸条件の比較を実施することにした。

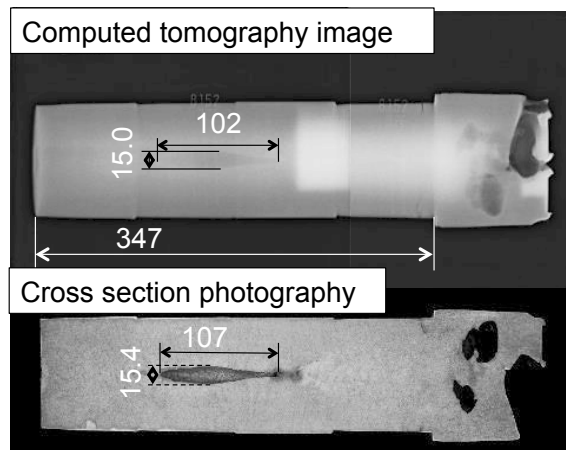


Fig. 3. Internal void shape of S45C ingot.

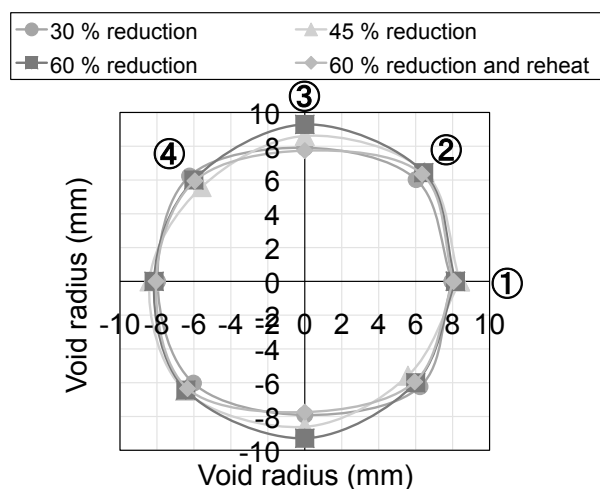


Fig. 4. Comparison of internal void shapes before hot clogging test.

2. 3 熱間鍛伸加工

Table 2 に熱間鍛伸条件, Fig. 5 に熱間鍛伸の概略図をそれぞれ示す. 初期加熱温度はすべて 1200 °C 均熱とした. 熱間鍛伸はインゴット厚み方向に対して常に一方方向への圧下とし, インゴット Bot から Top にかけて一定の圧下量で数回圧下した. この熱間鍛伸条件は, ザク閉塞への影響度を明確にするため, 事前に FE 解析を用いて φ16.8 mm × 80.9 mm 紡錘形のザクを有するモデルでザク径が最も大きいザク中央部が未閉塞, 閉塞, 完全に閉塞させる圧下率の条件を算出して決定した. さらに高温保持によるザク閉塞部の拡散接合の因子を評価するため熱間鍛伸後に 1200 °C で 4 時間保持する再加熱条件を加えた.

Table 2. Experimental condition of hot cogging test.

No.	Reduction	Reheat
1	30 %	None
2	45 %	None
3	60 %	None
4	60 %	1200 °C × 4 h

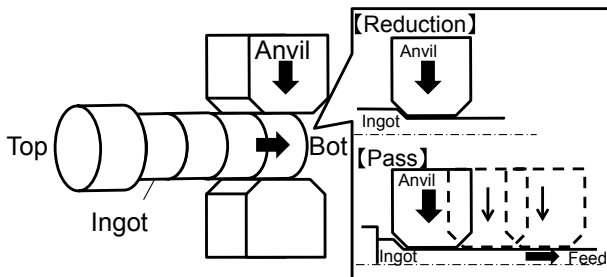


Fig. 5. Schematic drawing of hot cogging test.

2. 4 元ザク部の観察

観察用サンプルの切り出しは, ザクが存在したインゴット Top から 2 段目, 3 段目の位置で, 閉塞したザク(以下, 元ザク部という)が最大に広がっていると FE 解析と CT 画像から事前に予想された位置とした. 試験条件 1 のようにザクが明確に残存したサンプルは, ザクが見かけ上閉塞している位置から切り出した. 切り出したサンプルは樹脂埋めし, 埋め込んだ観察面を鏡面に仕上げ, 硝酸 5 % ナイタル水溶液にて腐食後, 光学顕微鏡にてマイクロ観察した. また, ザク圧着状態の確認のため元ザク部の EBSD (Electron BackScattered Diffraction) 測定, EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) 分析を実施した.

2. 5 空隙閉鎖パラメータ Q 値の算出

熱間鍛伸時のザク閉塞挙動を再現するため FE 解析ソフトウェア FORGE を用いた再現計算を実施した. 解析に使用したインゴットとザク形状は, 透過撮影により得られた形状から作成し熱間鍛伸時のザク形状変化を追跡した. 一方, 空隙閉鎖パラメータ Q 値⁵⁾の算出には, 式(1)からザクを有さない中実モデルを用いて計算した.

$$Q = \int_0^{\epsilon_f} \left(-\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) d\epsilon_{eq} \quad (1)$$

ここで, σ_m は静水圧応力, σ_{eq} は相当応力, ϵ_{eq} は相当ひずみ, ϵ_f は鍛造後の相当ひずみである.

2. 6 微小引張試験

鍛伸時の圧下方向に閉塞させたザクの圧着検証として, Fig. 6 のように元ザク部から Fig. 7 に示す微小引張試験片を切り出し引張試験⁶⁾を行った. また, 比較材としてザク無し部から切り出した試験片についても引張試験を行った. 引張試験は室温下でひずみ速度 1.1×10^{-2} /s にて実施した.

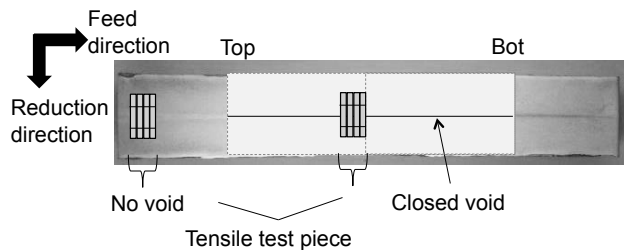


Fig. 6. Position of micro-tensile specimens of S45C ingot after cogging test.

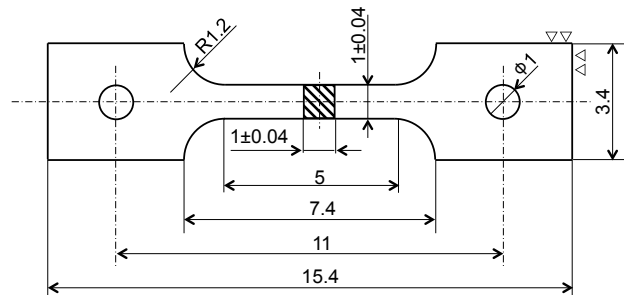


Fig. 7. Geometry of micro-tensile specimen.

3. 実験結果および考察

3. 1 ザクの変形挙動

Fig. 8 に熱間鍛伸後のインゴット縦断面マクロ写真を

示す。圧下率 30 % ではインゴット時にザク径が最大となった周辺で厚さ 2 mm × 長さ 26 mm のザクが残存していることが確認された。圧下率 45 % 以上では見かけ上、ザクの閉塞が確認された。圧下率 30 % 材鍛造後のザクのサイズは、鍛造前の最大 $\phi 16 \times 100$ mm と比べてかなり縮小しており、熱間鍛伸による圧下にてインゴット Top 側および Bot 側から順に閉塞が進行したものと考えられる。

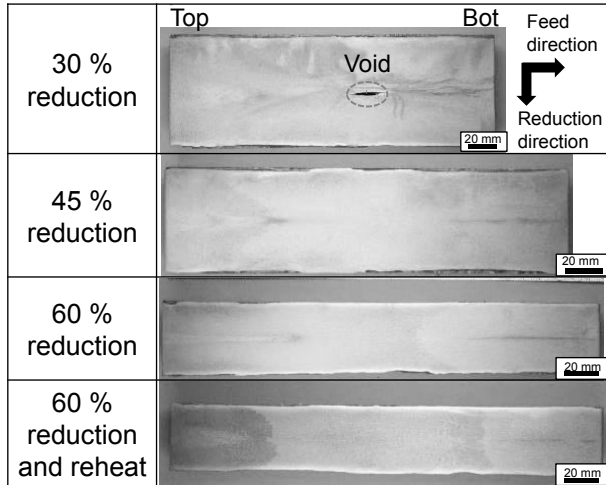


Fig. 8. Longitudinal section photographs of S45C ingot after cogging test.

3. 2 ザクの圧着状態

Fig. 9 に各熱間鍛伸条件で鍛造した後の元ザク部の横断面マイクロ写真を示す。圧下率 30 % では、元ザク部に厚さ約 0.07 mm のザクが残存していることが確認された。また、Fig. 8 ではザクが閉塞しているように観察された圧下率 45 % 材でも、ザクが完全に閉塞しておらず、厚さ約 0.03 mm のザクが残存していることが確認された。幅方向に元ザク部を観察すると、元ザクの境界が観察できる箇所と境界が消失している箇所が観察された。60 % 圧下条件では、完全にザクが閉塞し、元ザク境界も消失していることが確認された。再加熱による圧着状況の差は特に観察されなかった。

Fig. 10 と Fig. 11 に圧下率 30 % 材横断面の元ザク部の EBSD 測定結果および EPMA 分析結果を示す。ザクが未閉塞の圧下率 30 % 材においても、元ザク境界が観察されず、元ザク境界を跨ぐようにして結晶粒が存在していることが観察された。また、EPMA 分析結果からは元ザク部境界を境に目立った成分の不均質さは観察されなかった。以上の結果から、ザク閉塞部では、拡散接合が進行していると考えられ、鑄造インゴットに生成し

たザクは 1 方向圧下での閉塞にて比較的短時間で見かけ上圧着するものと考えられる。

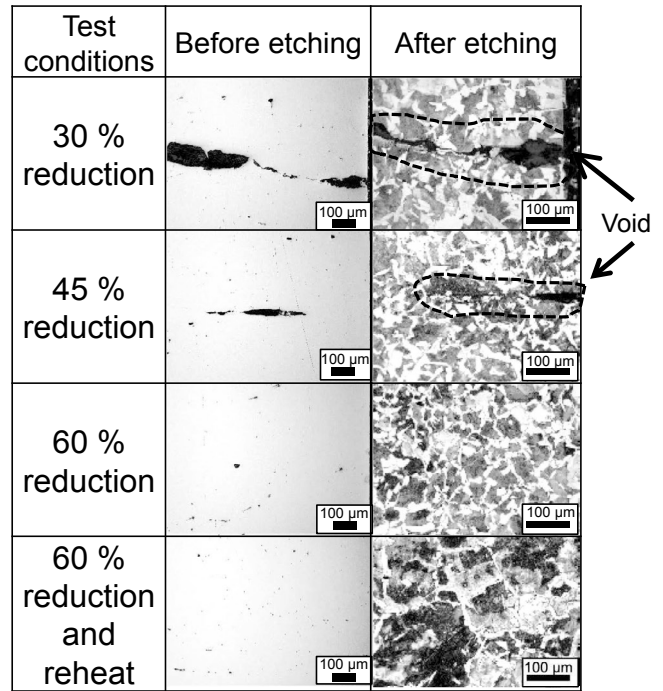
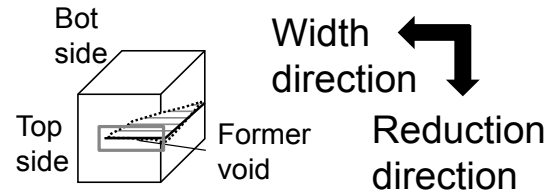


Fig. 9. Photography near void of S45C ingot after cogging test.

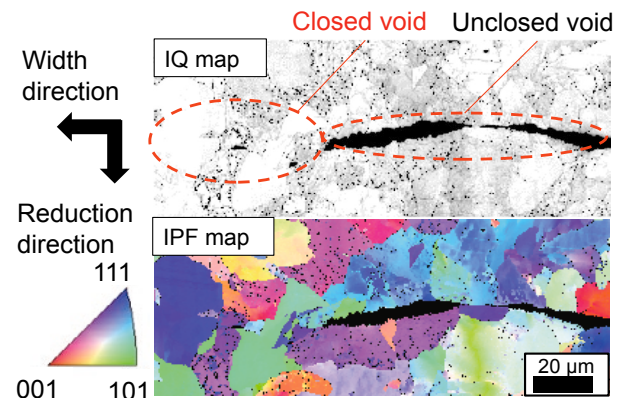


Fig. 10. EBSD analysis near void.

3. 3 空隙閉塞パラメータQ値の算出結果

Fig. 12 に FE 解析により算出された Q 値の横断面のコンター図と軸心部の Q 値を示す。Q 値はザク径が最も

大きいザク中央部の位置の値を示す。軸心部の Q 値は、熱間鍛伸の圧下率上昇に伴い増加しており従来どおりの結果が得られた。今回調査したインゴット外径とザク径の評価では、圧下率 60 % にて完全にザク閉塞が観察されたため、ザク閉塞に要する Q 値の閾値は $0.30 < \text{ザク閉塞の閾値} \leq 0.55$ に存在すると考えられる。

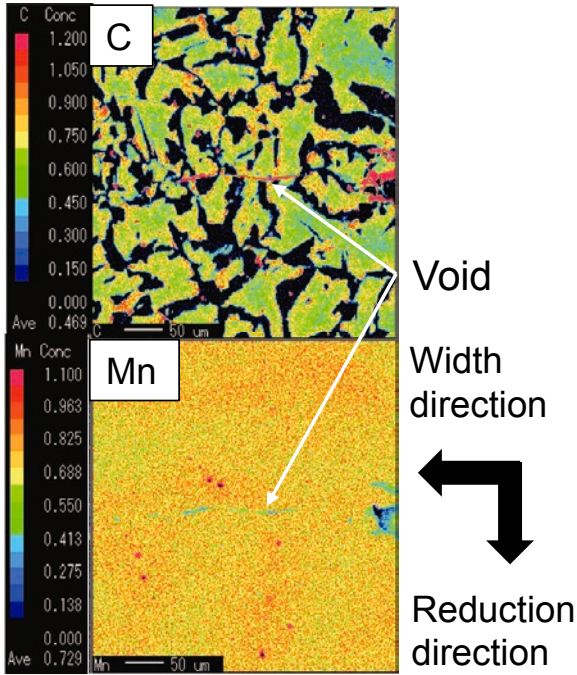


Fig. 11. EPMA image of distributions of C and Mn near void.

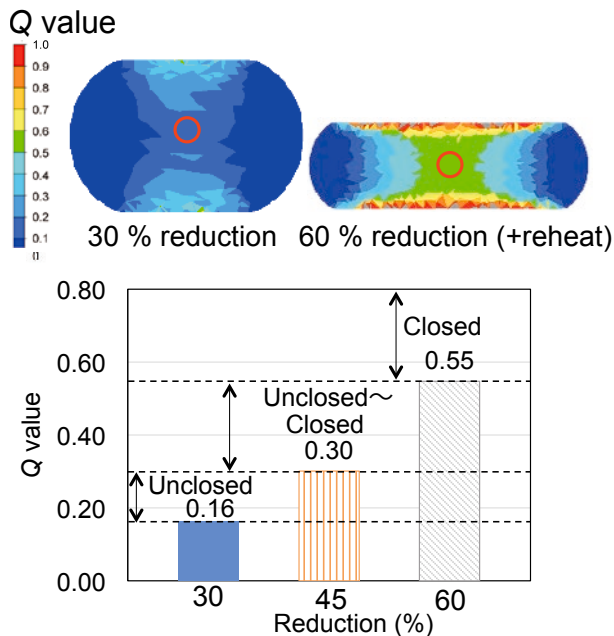


Fig. 12. Relationship between reduction ratio and Q value.

3. 4 微小引張試験結果と試験片破面

Fig. 13 に各熱間鍛伸条件で鍛伸後の元ザク部とザク無し部の微小引張試験結果を示す。熱間鍛伸のままの元ザク部引張結果は、ザク無し部と比べ引張強度および伸びが低い結果となった。一方で、圧下率 60 % で熱間鍛伸後、再加熱保持したものはザク無し部と同等の引張特性が得られた。これは、再加熱保持した結果元ザク境界で拡散接合が進行し圧着したものと考えられる。

Fig. 14 に圧下率 45 % 材の引張後破面写真、Fig. 15 に圧下率 60 % 再加熱材の元ザク部とザク無し部の引張後破面写真をそれぞれ示す。熱間鍛伸後、再加熱しなかったものの破面は、圧下率 45 % 材に見られるように、延性破面のみならず、脆性破面と未閉塞面が混在した破面形態が観察された。引張試験結果における熱間鍛伸まま材の引張特性低下は、未閉塞面、脆性破面の存在によるものと考えられる。圧下率 60 % 再加熱材ではザク無し部と同等の全面延性破面であり、加熱保持による拡散接合の進行が示唆された。再加熱無しでは、見かけ上は圧着していても、拡散接合完了しておらず途中で破断したと考えられる。

Fig. 16 に引張試験片破面観察から得られた各破面形態の面積率を示す。各種破面の面積率は、画像解析ソフト WinROOF2013 を使用し計測した。熱間鍛伸時の圧下率上昇に伴い、未閉塞面は減少し延性破面と脆性破面は増加する傾向となった。この結果から、加圧だけでは接合がまだ不十分な未閉塞面や脆性破面は加熱保持により拡散接合が進行した可能性がある。以上の結果より、鑄造インゴット中のザクの完全な圧着には、ザク閉塞後に高温保持することが有効と思われる。

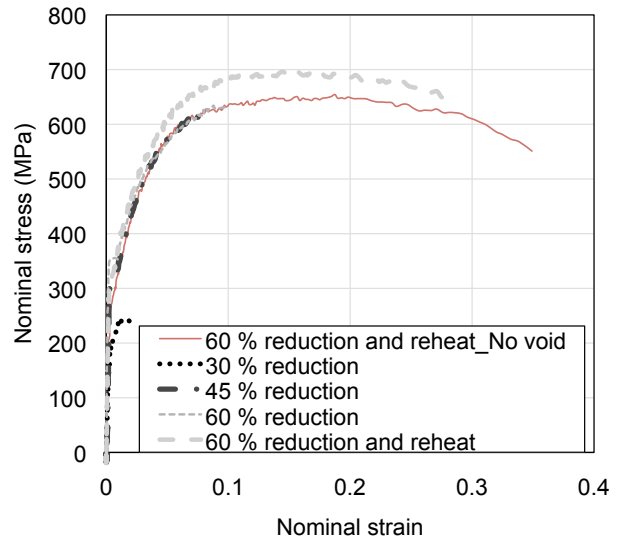


Fig. 13. Tensile properties of micro-tensile specimen.

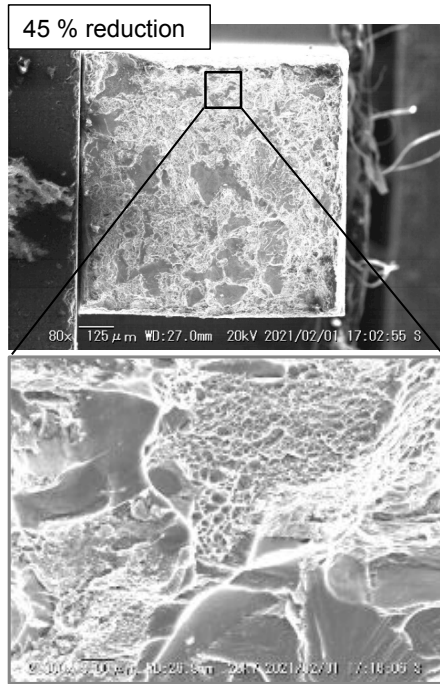


Fig. 14. SEM image of tensile fracture surface of 45 % reduction condition.

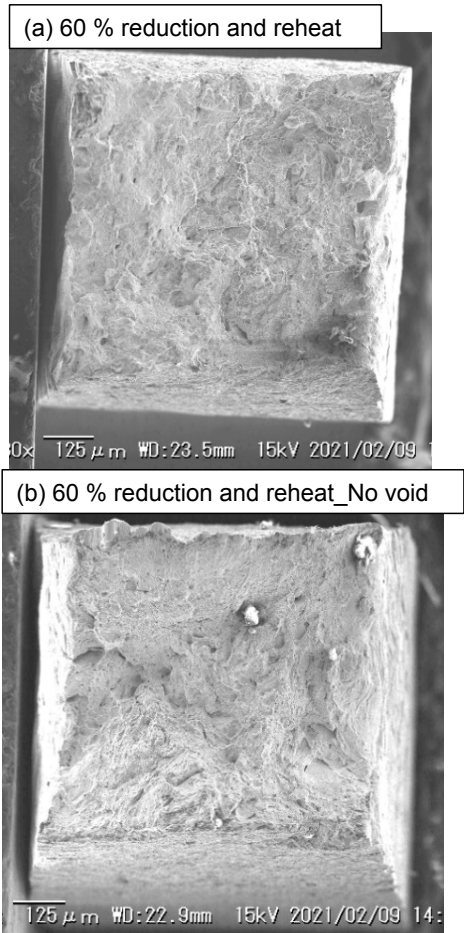


Fig. 15. SEM images of fracture surface of 60 % reduction and reheat condition.

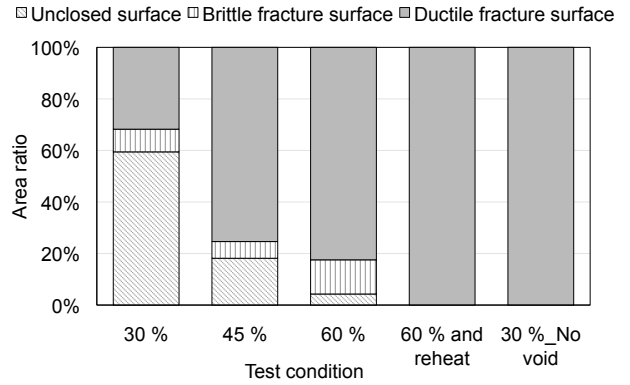


Fig. 16. Comparison of area ratio of tensile fracture surface.

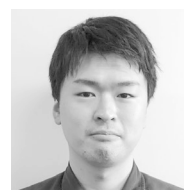
4. 結 言

S45C 小型鑄造鋼塊を用いた熱間鍛伸条件がザク閉塞および圧着におよぼす影響調査として以下の結果を得た。

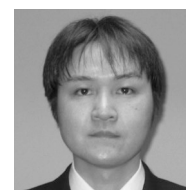
- ・熱間鍛伸後インゴットの元ザク部でのミクロ観察により、圧下率 45 % 以下の鍛伸条件でザクは完全に閉塞しきらず、圧下率 60 % 以上ではザクが完全に閉塞することが確認された。その空隙閉鎖パラメータ Q 値は 0.55 であった。
- ・微小引張試験結果から、鑄造で生成したザクは閉塞後の加熱保持によりザク無し部と同等の引張特性となった。
- ・微小引張試験片の破面観察結果から、熱間鍛伸の圧下率上昇に伴い、未閉塞面は減少、脆性破面と延性破面は増加し、ザク閉塞後の加熱保持により全面延性破面となった。
- ・加圧だけでは接合がまだ不十分な未閉塞面や脆性破面は加熱保持により拡散接合が進行した可能性があり、鑄造インゴット中のザクの完全な圧着には、ザク閉塞後に高温保持することが有効と思われる。

(文 献)

- 1) 毛利健吾, 有馬猛, 福谷理明, 松田健次: Journal of the JSTP, 59(2018), 149.
- 2) 大橋修, 雀部謙: 溶接学会論文集, 6(1988), 98.
- 3) 毛利健吾, 有馬猛, 福谷理明, 松田健次: Journal of the JSTP, 61(2020), 40.
- 4) 鷺見芳紀, 成田駿介, 山下正和: 日本鉄鋼協会第180回秋季講演会, (2020), 499.
- 5) 荒木重臣, 津田充, 松下富春, 佐藤隆夫, 落敏行: 塑性加工春季講演会, (1986), 383.
- 6) 杓掛あすか, 吉田佳典, 児嶋彬, 岡島琢磨: 塑性と加工, 61(2020), 15.



辻 知輝



杉野 敦



岡島琢磨