

マクロ形態とマイクロ組織を制御したポーラス炭素鋼の作製と特性

研究代表者 大阪大学産業科学研究所 准教授 鈴木進補

1. 緒言

自動車をはじめとする輸送機械の軽量化は、大幅な燃費向上による省エネルギーの実現と排出二酸化炭素の抑制に大きく資する技術であり、従来輸送機械を構成していた鉄鋼材料がアルミニウム合金やマグネシウム合金などの軽金属に置き換えられつつある。しかし、軽金属の高強度化の試みが多くなされているにも関わらず、依然として鉄鋼材料を凌ぐことはできないため、鉄鋼材料を用いた新たな軽量高強度材料の創出も試みられている。

現在、軽量材料として一方向に伸びた多数の微細気孔を有するロータス金属の研究が盛んに行われている[1,2]。水素や窒素などの加圧ガス中で金属を溶解し一方向凝固させると、固相と液相の間でのガス溶解度差によって固相から固液界面に排出されたガスが一方向に成長し、ロータス金属を作製することができる。本研究では、このような作製原理を用いてロータス炭素鋼を作製すると共に、気孔や外形などのマクロ形態およびマイクロ組織をコントロールすることにより、鉄鋼材料を用いた新たな軽量高強度材料を作製することを目的とした。

本研究では、連続 casting 法[3]を用いて構造材料として利用可能な長尺のスラブ状のロータス炭素鋼の作製を試みた。部材形状や気孔の形態などのマクロ形態制御とマイクロ組織制御を取り入れて、ポーラス化によって低下する強度特性を補う方法を検討した。また、雰囲気ガスとして窒素を利用することにより、炭素鋼中に窒素を固溶できると考え、窒素雰囲気および水素雰囲気でのロータス炭素鋼を作製して、圧縮試験により機械的性質の比較を行った。作製したポーラス炭素鋼のマイクロ組織を熱処理により制御し、作製したロータス炭素鋼の硬さ、および圧縮試験で機械的性質を評価した。

2. 実験方法

Figure 1にロータス炭素鋼作製のための連続 casting 装置を示す。本連続 casting 装置は加圧ガスチャンバー内に設置され、溶解から凝固まで加圧雰囲気中で行うことができる。

ロータス炭素鋼を作製する目的で、窒素 0.8MPa とアルゴン 1.7MPa の混合ガス雰囲気、および水素 0.6MPa とアルゴン 1.9MPa の混合雰囲気、るつぼ内の炭素鋼(AISI1018)インゴットを高周波加熱により溶解した。

炭素鋼溶湯中に窒素または水素を十分に溶解するために、1873K で 600s以上保持し、るつぼ底部に接続したセラミックス製の鋳型(10 x 30 mm²)を通して 5mm/min で引出した。鋳型周囲の銅ブロックに循環水を流すことで試料の冷却を行った。これにより、引出された炭素鋼溶湯は一方向に凝固し、長尺の炭素鋼スラブを作製することができた。比較試料としてアルゴン 2.5MPa の雰囲気でのノンポーラス炭素鋼スラブも作製した。

作製したロータス炭素鋼スラブを放電加工(AQ325L-LN1W, Sodick)により、引出方向に平行および垂直に切り出した。切り出した試料の重量と体積から気孔率を算出し、引出方向に垂直な断面の画像解析(Win Roof, 三谷商事)により気孔径を測定した。炭素鋼の金属マトリックス部の窒素分析は酸素・窒素分析器(Model TC300, LECO Co.)にて、炭素分析は炭素・硫黄分析器(Model TC300, LECO Co., 住友金属テクノロジーにて実施)にて行った。

0.8MPa の窒素と 1.7MPa のアルゴンの混合雰囲気中で作製したロータス炭素鋼スラブから、7mm 角の試験片を切り出し、気孔成長方向に対して垂直に圧縮試験を行った。圧縮試験は、ポラス金属の圧縮試験方法に関する日本工業規格(JIS7902)[4]に準じて行った。測定した圧縮降伏強度のばらつきをなるべく小さくするために1辺の長さを平均気孔径の 10 倍以上となるようにした。

切り出した試験片のうちいくつかについては、熱処理を施さずに圧縮試験を行った。また、切り出した試験片を 1200K で 3.6ks アルゴン雰囲気中で加熱後、炉冷(焼きなまし)、空冷(焼きならし)、または水冷(焼入れ)を行うことにより熱処理を行った。

圧縮試験は万能試験機(インストロン Model4482)により、クロスヘッド速度 0.2mm/min で行った。本研究では、0.2%の永久ひずみを生じる応力を圧縮降伏応力とした。

硬さ試験機(Akashi MVK-III)により 0.98N, 15s で熱処理前後のビッカース硬さを測定した。同じ測定面上にて5点測定し、平均値および標準偏差を求めた。

硬さ試験機(Akashi MVK-III)により 0.98N, 15s で熱処理前後のビッカース硬さを測定した。同じ測定面上にて5点測定し、平均値および標準偏差を求めた。

3. 実験結果

Figure 2 に窒素および水素雰囲気中で作製したロータス炭素鋼の引出方向に平行および垂直な断面の写真を示す。いずれの試料にも引出方向に伸びた多数の気孔が観察され、いずれの条件においてもロータス炭素鋼の作製が可能であった。作製した試料の気孔径、気孔率を Table 1 に示す。

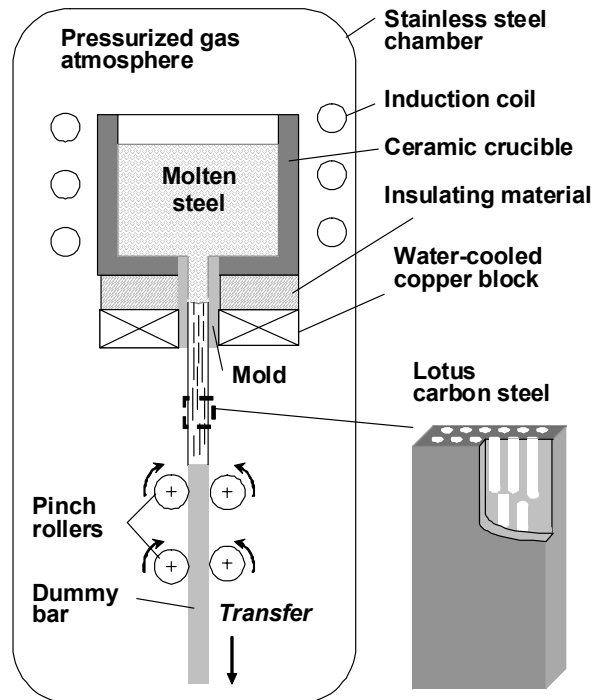


Fig.1 Schematic drawing of the continuous casting apparatus for lotus carbon steel with directional pores

Table 1 Atmospheric pressure and contents of C and N, pore diameter and porosity

	Total pressure MPa	Partial pressure MPa		C wt. %	N wt. %	Pore diameter μm	Porosity %
Lotus	2.5	N ₂ 0.8	Ar 1.7	0.075	0.104	453 \pm 193	33.8 \pm 2.9
Lotus	2.5	H ₂ 0.6	Ar 1.9	0.064	0.002	604 \pm 297	28.4 \pm 1.9
Non- Porous	2.5	0	Ar 2.5	0.131	0.003	---	0

Figure 3 に窒素および水素雰囲気で作製したロータス炭素鋼とノンポーラス炭素鋼の圧縮試験で得られた圧縮応力-ひずみ曲線を示す。ひずみ約 0.1 から 0.5 の範囲において、ロータス炭素鋼は圧縮応力の増加が小さいプラトー領域を示している。

Figure 4 は、焼きならしを施したノンポーラス炭素鋼および各気孔率を有するロータス炭素鋼の圧縮降伏強度を示す。気孔率の変化により圧縮降伏強度が変化しているが、同等の気孔率でも水素を用いて作製したロータス炭素鋼よりも窒素を用いた場合のほうが高い圧縮降伏強度を示した。Table1に示すように炭素鋼の金属マトリックス部に存在する炭素量および窒素量に違いが見られた。いずれも同組成の原材料を使用しているため、炭素は溶解中に離脱したものと考えられる。以下に、これらの窒素や炭素量の違いが強度に与える影響を考察する。

まず、窒素量の違いを除いて考えるために、ノンポーラス炭素鋼と水素を用いて作製したロータス炭素鋼を比較する。これらいずれの試料も窒素含有量は無視できる程度であるが、ノンポーラス炭素鋼のほうがロータス炭素鋼と比較して 0.07wt.%の高い炭素量を有していた。

Rinebolt によると、低炭素鋼において 0.1wt.%の炭素が減少するに従い、47MPa 降伏強度が低下するため[5]、水素雰囲気で作製したロータス炭素鋼と同等の炭素量を有するノンポーラス炭素鋼の圧縮降伏強度は 248MPa と推定できる。これを気孔率 0%にプロットすると、この点と気孔率 100%のときに圧縮降伏強度を 0 とした点を結んだ直線は、気孔率にかかわらず比強度が一定となることを示している。水素雰囲気で作製したロータス炭素鋼の圧縮降伏強度はこの直線上に存在することから、金属マトリックス部の強度はポーラス化しても同等の強度を有することが分かる。

これに対して、窒素雰囲気で作製したロータス炭素鋼は、同等の気孔率でも水素雰囲気

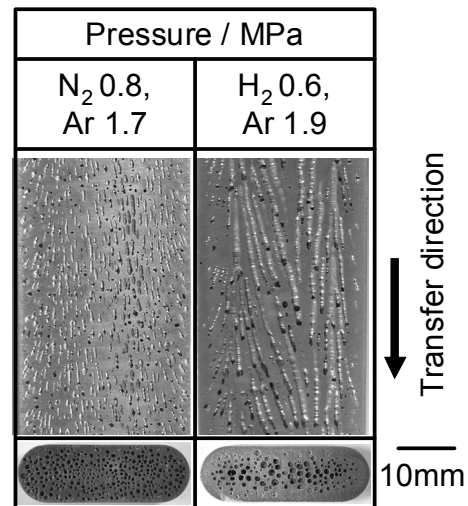


Fig.2 Cross-sections parallel (upper side) and perpendicular (lower side) to the transfer direction of lotus carbon steel slabs fabricated using nitrogen and hydrogen.

作製したロータス炭素鋼よりも高い圧縮降伏強度を示した。Table 1に示すとおり、窒素量は水素雰囲気中で作製したロータス炭素鋼やノンポーラス炭素鋼と比較して非常に高い。これは、窒素の固溶強化により金属マトリックス部分の強度が増加したことによるものと考えられる。

つまり、雰囲気中の窒素は、炭素鋼溶湯内に溶解した後、凝固過程において一部は固相に溶解されず排出され気孔を形成し、また一部は金属マトリックス部に固溶する。これにより、軽

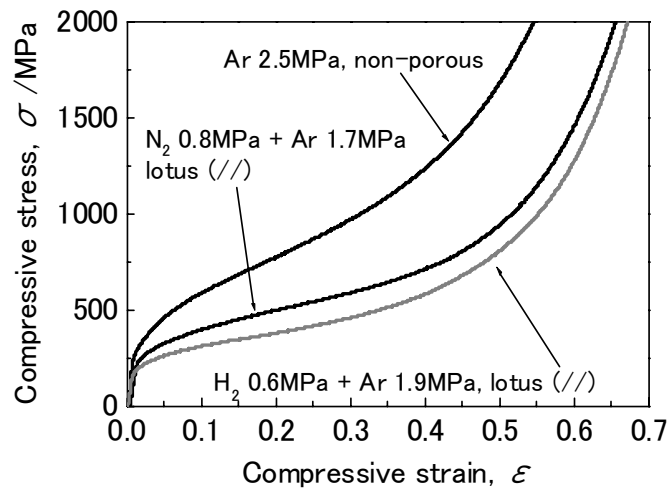


Fig.3 Compressive stress- strain curves of non-porous and lotus carbon steels. The compressive directions were parallel (//) to the pore growth direction in the compression tests of lotus carbon steels.

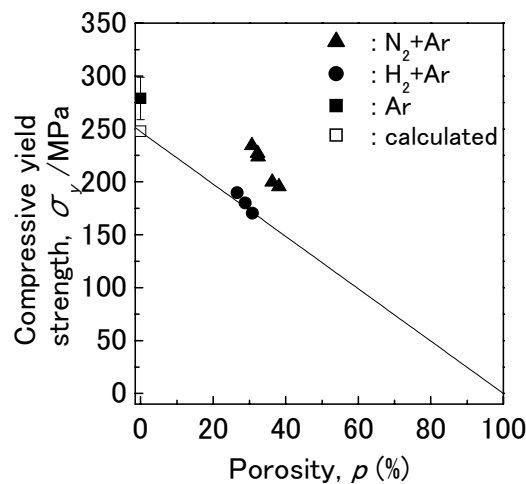


Fig.4 Compressive yield strength of the non-porous and porous carbon steels in the pore growth direction plotted against the porosity. The calculated value of the non-porous carbon steel was obtained by considering non-porous carbon steel with the same carbon content as the porous carbon steel fabricated using hydrogen.

量化に寄与する気孔形成というマクロ形態制御と金属マトリックスの強化に寄与する窒素の固溶というミクロ組織制御を同時に行うことが可能となった。

Figure 5 に窒素雰囲気で作製したロータス炭素鋼の熱処理前後の圧縮降伏応力とビッカース硬さを示した。Fig.6(a)に示すとおり、熱処理前の試料にはウイドマンステッテン組織が見られた。焼きなまし材 (Fig.6(b)), 焼きならし材 (Fig.6(c)), 焼きなまし材 (Fig.6(d)), および焼き入れ材 (Fig.6(b)) には、それぞれフェライト-パーライト組織、微細なフェライト-パーライト組織および

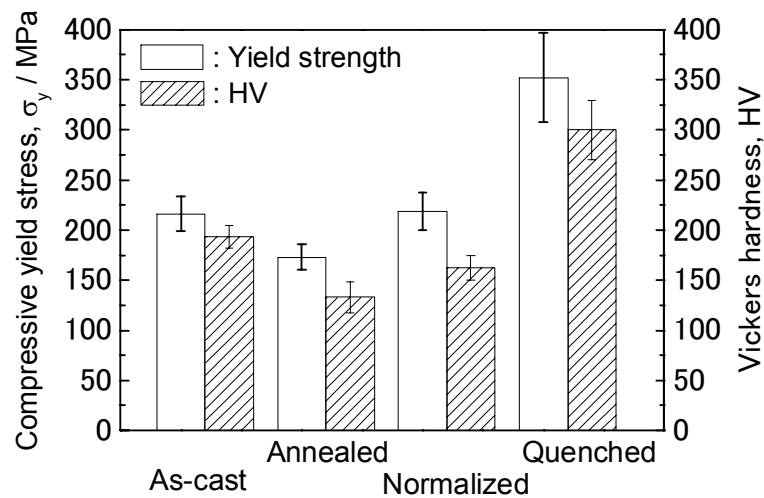


Fig.5 Compressive yield strength and Vickers hardness of the porous carbon steels fabricated using nitrogen before and after the heat treatments.

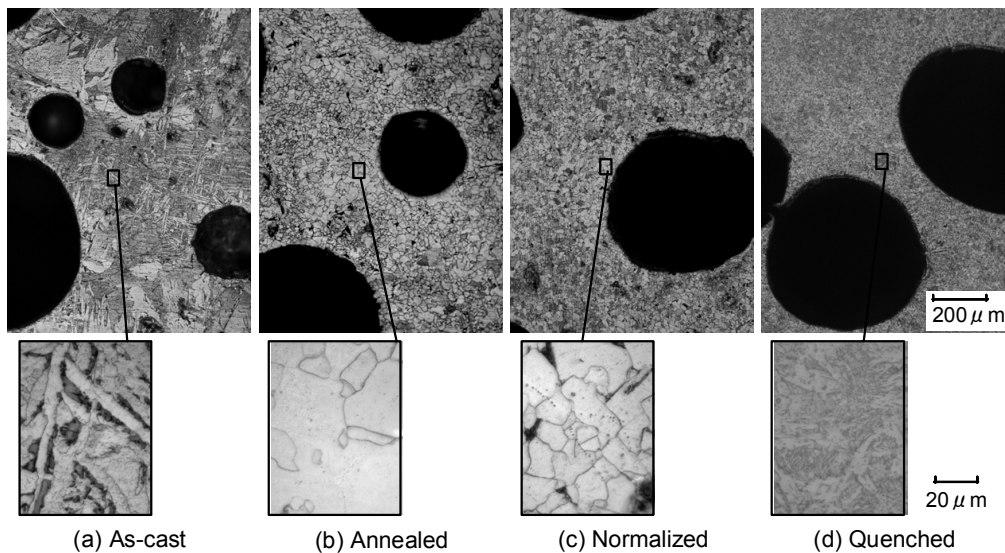


Fig.6 Microstructures of the cross-sections of the porous carbon steel fabricated using nitrogen in the perpendicular direction to the transfer direction before and after heat treatments.

びマルテンサイトが観察された。焼きなましによる粗大なフェライトーパーライト組織の析出により、ビッカース硬さおよび圧縮降伏応力は低下し、焼きならしでは顕著な強度の変化は見られなかった。これに対して、焼入れによるマルテンサイト相への相転移により著しい圧縮降伏強度の増加が見られた。

4. まとめ

窒素とアルゴンの混合ガス雰囲気、および水素とアルゴンの混合ガス雰囲気で連続鋳造を行うことによりロータス炭素鋼を作製した。

窒素を用いて作製したロータス炭素鋼の比強度は水素を用いて作製したロータス炭素鋼よりも高いという結果が得られた。

作製時の雰囲気の窒素は、炭素鋼溶湯内に溶解した後、凝固過程において一部は固相に溶解されず排出され気孔を形成し、また一部は金属マトリックス部に固溶する。これにより、軽量化に寄与する気孔形成というマクロ形態制御と金属マトリックスの強化に寄与する窒素の固溶というミクロ組織制御を同時に行うことが可能である。さらに、熱処理によるミクロ組織の制御によってもロータス炭素鋼の強度を変化させることが可能である。

本研究で開発したロータス炭素鋼の作製手法は、鉄鋼材料を新たな軽量構造部材として利用する技術の発展に寄与するものと期待される。

謝辞

本研究は、JFE21世紀財団の技術研究助成(2008 年度)により実施されたものであり、深く感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Nakajima, Prog. Mater. Sci. 52, 1093-1173 (2007)
- [2] V. Shapovalov, Proc. MRS Symp. 52, 281-290 (1998)
- [3] J.S. Park, S.K. Hyun, S. Suzuki, H. Nakajima, Acta Mater. 55, 5646-5654 (2007)
- [4] Japanese Industrial Standards Committee, *JIS H 7902 Method for compressive test of porous metals*, Japanese Standards Association, Tokyo (2008)
- [5] J.A. Rinebolt, W.J. Harris, Trans. ASM., 43, 1175-1214 (1951)
- [6] J.C. Rawers, Mater. Sci. Eng. A 187A, 167-176 (1994)