

鉄鋼材料の高度化に資する環境親和型固体浸炭プロセスの開発

慶應義塾大学 小茂鳥 潤

1. はじめに

鉄鋼材料の疲労特性，耐摩耗性を向上させる表面処理の一つに浸炭焼入れがある．浸炭焼入れは，低炭素鋼の表面に炭素を拡散させ，その後急冷することで，内部の韌性を残したまま表面のみを硬化させる処理である．工業的に幅広く用いられているガス浸炭焼入れは，大量生産に適しており均一な処理が可能であるが，有毒ガスの発生や処理時間が長いなどの課題も残されている．そこで，本研究では，雰囲気制御高周波誘導加熱微粒子ピーニング（Atmospheric-controlled Induction Heating Fine Particle Peening : AIH-FPP）処理に着目し，これを利用した新しいメカニズムの浸炭焼入れに関する研究を実施することとした．

AIH-FPP 処理とは雰囲気制御下で高周波誘導加熱により加熱した基材に対して微粒子を投射することで，投射粒子成分を基材表面に移着・拡散させる表面処理である¹⁾．梅野ら²⁾は，鋼粒子の表面に炭素をコーティングした炭素/鋼 MC（Mechanical Coating）粒子を AIH-FPP に用いることで，純鉄に炭素が拡散したことを報告している．AIH-FPP を用いた浸炭焼入れは，従来のガス浸炭焼入れと異なるメカニズムであると考えられる．そのため，一酸化炭素が排出されず，処理時間が非常に短いといったメリットがある．以降，この AIH-FPP による浸炭焼入れを環境親和型固体浸炭プロセスと呼称する．

梅野³⁾は SCM420H 鋼に対し，環境親和型固体浸炭プロセスを行った．その結果，基材表面が硬化し，疲労特性がわずかに向上したことを報告している（図 1）．しかし，処理装置の性能不足などの理由により，環境親和型固体浸炭プロセスを施した処理材の疲労特性は，ガス浸炭焼入れ材に比べ大きく劣っていることも明らかにしている．

そこで本研究では，環境親和型固体浸炭プロセスによる SCM420H 鋼の疲労特性向上を目的として，新しい処理装置の構築およびその性能検証，新装置を用いて本処理を施した処理材の疲労特性評価を試みた．

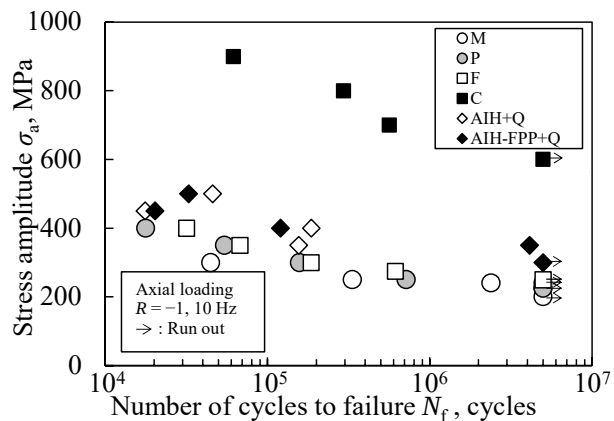


図 1 従来システムにより処理した試験片の疲労試験結果

2. 実験方法

2.1 処理装置の構築およびその性能検証

環境親和型固体浸炭プロセスに用いる処理装置を新たに構築した。構築した処理装置の構成図を図 2 に示す。また、実際に作製した写真を図 3 に示す。梅野³⁾の処理装置と比較して、チャンバの大型化、ポンプによる雰囲気置換、ステッピングモータによる試験片回転数の制御、ポンプによる冷却水の噴射の 4 点が異なる点である。これにより、均一な浸炭層の創成、酸化の抑制、水冷時の冷却速度の増加が可能であると考えられる。

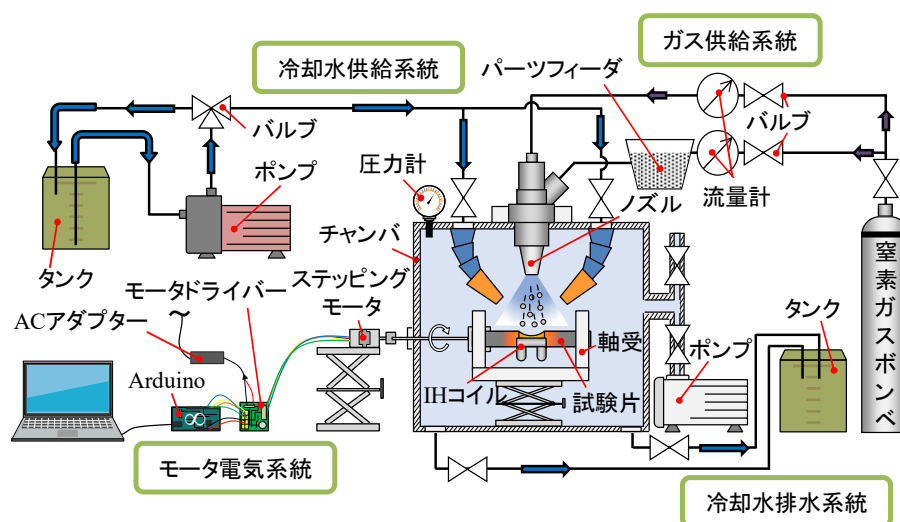


図 2 本研究で新たに構築した環境親和型固体浸炭システムの構成図



図 3 本研究で作製した処理システム（左はチャンバ、右は全景）

新しく構築した環境親和型固体浸炭システムの性能を検証するために、まず、焼入れが可能か否かについて調べた。その際、供試材には SCM440 鋼を用いた。この素材は、通常の高周波焼入れ処理を行えば、高硬さマルテンサイトを得ることができる。

この材料を、最小径部直径 5 mm の砂時計型試験片（図 4）に機械加工した後、R 部を

#100～800 のエメリ紙を用いて研磨した．その後，処理装置内に試験片を設置し，チャンバ内で窒素雰囲気への置換を行った．雰囲気置換後，N₂ ガスを 130 L/min で噴射しながら，試験片を 30 s で 900℃まで昇温した．その後，加熱を終了し，水冷を行った．焼入れ性の評価は，マクロ観察，組織観察およびビッカース硬さ測定により行った．分析を行う際の試験片の準備の状況は図 5 に示す通りである．

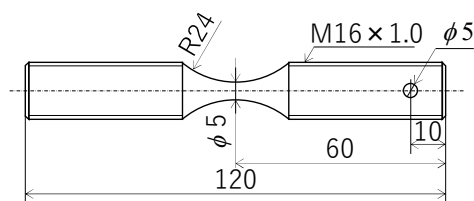


図 4 砂時計型疲労試験片の寸法と形状



(a) 表面の分析（マクロ観察）



(b) 断面の分析（組織観察・硬さ測定）

図 5 分析の際の試験片の準備方法の説明図

2・2 環境親和型固体浸炭プロセス

新たに構築した処理装置を用いて，環境親和型固体浸炭プロセスを行った．供試材には SCM420H 鋼を用いた．同材を 2・1 と同様の手順で機械加工し，研磨した．その後，以下に示す条件で処理を行った．まず，雰囲気置換後，N₂ ガスを 130 L/min で噴射しながら，30 s で 1000℃まで昇温した．昇温後，1000℃に保ちながら 60 s 加熱した．その後，加熱を終了し，水冷を行った．加熱を行っている間は，炭素/鋼 MC 粒子を 1 g/s の割合で投射した．評価方法は 2・1 と同様である．

3. 結果および考察

3.1 構築した処理装置の性能検証

新たに構築した処理装置を用いて焼入れした SCM440 鋼の試験片断面のマクロパターン、硬さ分布、組織観察を行った。その結果を図 6～8 に示す。

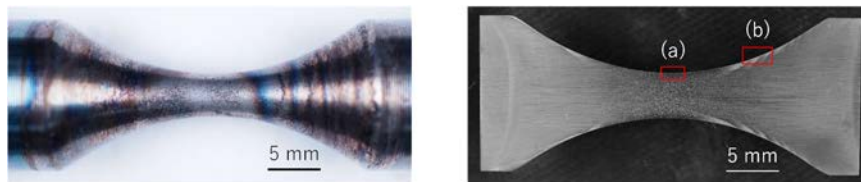


図 6 処理後の試験片のマクロ観察

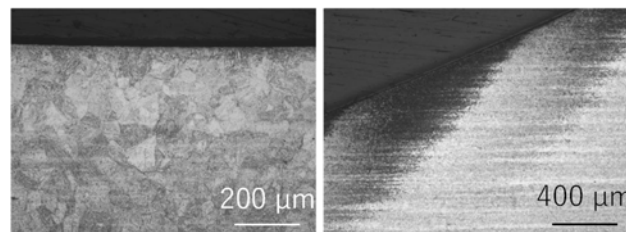


図 7 処理を施した試験片断面の組織観察画像

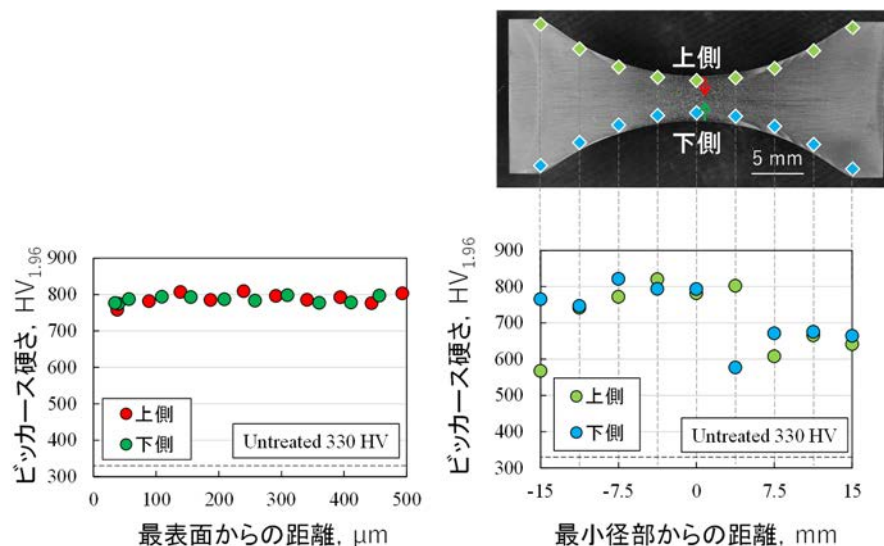


図 8 硬さ測定の結果（左は最小径の測定，右は最小径から離れた領域）

図 6 の右側に示した断面のエッチング写真より、(b) で示した領域にのこぎり状のパターンが確認でき、のこぎり状のパターン部には、最小径部と異なる組織が形成されていることが分かる。また、図 7 に示した試験片の断面の組織観察画像からは、不完全焼入れの部位（右図）も観察することができる。また、この領域は、硬さは後述するが 700 HV を

下回っていた。このような不完全焼入れ部が形成した原因として、冷却水が R 部全体に当たっておらず、R 部全体が均一に冷却されていないことが考えられる。図 8 は試験片断面の最小径部（左）および R 部表面金部の硬さ分布を測定した結果である。同図より、最小径部は均一な硬さ分布が得られているものの、軸方向では不均一な硬さ分布となっていることがわかる。この点も、加熱、冷却が目的通り行われていないことが原因と考えている。この点は処理システムの改良が必要であることを示すものである。

3・2 開発したシステムを用いた処理の結果とその考察

前節では、モデル試験片として焼入れ性能のみを検討する目的で焼入れ性の高い SCM435 を利用した。本研究の最終的な目的は、炭素量が少ない素材に対する浸炭焼入れである。現状では焼入れ性能に劣ることは判明したが、ここではトライアルとして、炭素量の少ない SCM420H 鋼を用いて、環境親和型固体浸炭プロセスを行った。

図 9 に浸炭プロセスの熱履歴を示す。また詳細は割愛するが、投射粒子としては、直径 90～150 μm の鋼粒子の表面に炭素の微細粉末をメカニカルミリング装置よりコーティングした粒子（図 10）を自作し、それを利用した。同図の一番右は、投射粒子の断面の模式図であり、カーボンがほぼ一様に被覆された状態になっている。メカニカルミリングの処理条件に関しては予備実験を繰り返しながら検討をしたが、ここでその詳細は割愛する。図 11 は用いたメカニカルミリング装置の全景と装置内の動きを説明した模式図である。そのシステムは粒子を格納した容器が高速で自転と公転を繰り返す仕組みになっている。

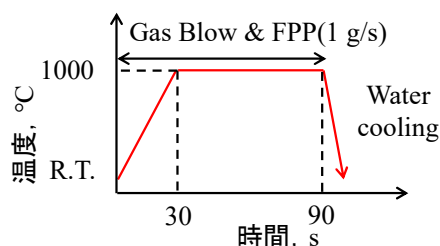


図 9 浸炭処理の熱履歴

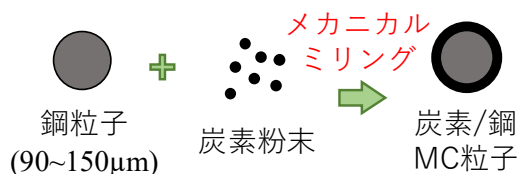


図 10 投射した粒子断面の模式図（右）

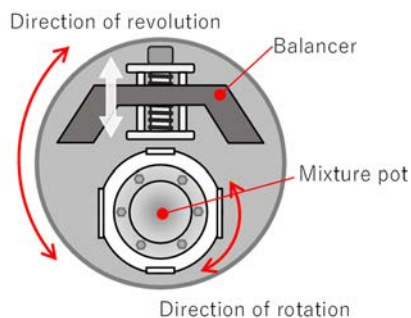


図 11 メカニカルミリングシステムの説明図

図 12 に環境親和型浸炭処理を施した試験片のマクロ観察画像と断面のマクロエッチングパターンを観察結果を示す。同図から、この場合にも、前述した SCM435 鋼の場合と同様に不均一な様相が観察される。



図 12 環境親和型浸炭処理を施した SCM420H 鋼の被処理面のマクロ観察

図 13 に試験片断面の組織観察画像を示す。同図から未処理部は炭素量が 0.2% 程度のフェライトパーライト組織であるのに対して、処理を施した最小径部近傍では、別の組織に変化していることがわかる。これは、焼入れにより変態したマルテンサイト組織と考えられる。

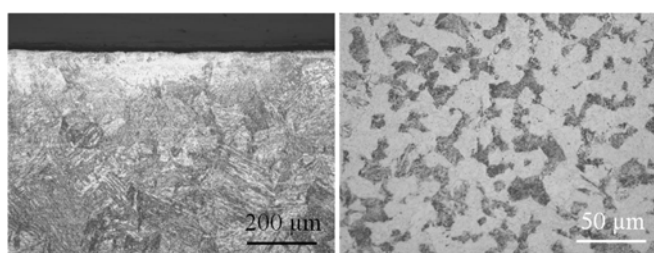


図 13 試験片断面の組織観察画像（左は最小径部，右は未処理部）

図 14 に、最小径部の断面の深さ方向の硬さ分布を示す。同図から、最小径部の最表面の硬さも 700 HV 以上まで高硬化していることがわかる。また、最小径部は、300μm 程度の硬化層深さが得られていることもわかる。これは、本研究で開発した処理プロセスにより浸炭焼入れが実現できたことを示す重要な結果である。

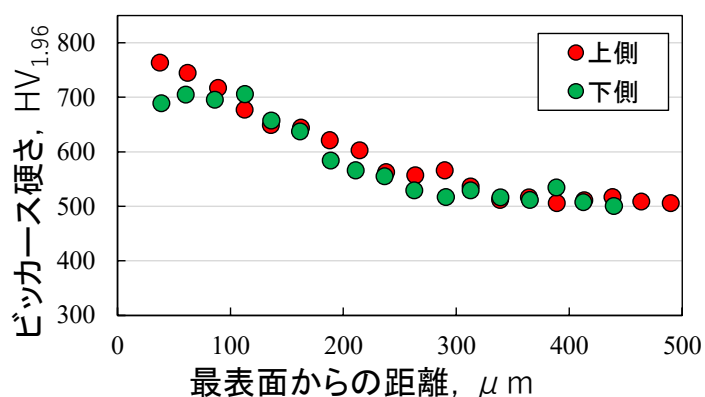


図 14 試験片深さ方向の硬さ分布

このような焼入れ処理が、R 部のどの領域まで実現できているかを調べる目的の硬さ測定を行った。その結果を図 15 に示す。同図のマクロ観察パターンと硬さ測定の位置は対応している。硬さ測定の結果から、最小径部は 750HV 程度まで硬さが上昇しているが、それ以外の領域では、十分な高硬さとはなっていないことがわかる。この原因は冷却が不均一なことや冷却速度が不足していたことなどが挙げられる。この点に関しては現在も改良を試みている。

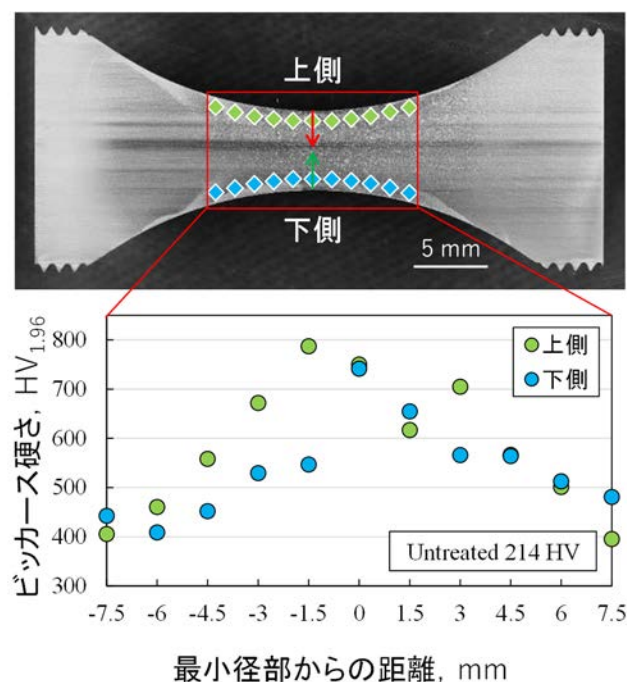


図 15 試験片 R 部における硬さ測定

4. 現在の取り組みと今後の課題

申請書にも記述した通り、身の回りにある機械構造システムの多くに鋼を代表とする金属が利用されている。この素材の安全性と信頼性の確保のためには、現在、様々な表面改質処理が開発され実用化もされている処理も数多い。そのなかで浸炭焼入れは、大型部材から小型の部品に至るまで幅広い機械部品を対象とした処理が可能であることから、自動車部品をはじめとして利用件数も多い。しかし欠点も指摘されている。現在実用化されているガス浸炭や真空浸炭などは、いずれも装置が大がかりであることや、プロパンガスやメタンガスなどを処理に使用しておりその管理が複雑となる。また浸炭処理には 7~10 時間の長時間を要する。

本研究ではこの解決に取り組んでいる。現在までの成果により、新しいメカニズムの固体浸炭の実現は達成されたと言える。すなわち、これまで実用化されてきた浸炭は固体浸炭という名称であっても、固体の炭素そのものが拡散するメカニズムでは無かった。それ

に対して、今回の処理ではピーニングを伴うことにより、固体の炭素そのものを被処理品の内部に拡散させるものである。その意味で、全く新しい浸炭処理が実現されたと言える。

浸炭の目的の一つは、素材の疲労特性の向上である。その観点からはすでに疲労試験の実施もしている。結果の考察が不十分であるため本報告書には掲載は控えたが、疲労強度も上昇する可能性を示唆する結果は得られている。

今回開発したシステムの一つの利点は、これまで極めて困難であった浸炭処理のインライン化である。これが実現できれば、初期投資は必要となるが大きなコスト削減にもつながるものと考えている。また、この処理は投射粒子 Cr や Mo, Ni などを用いることで被処理面の耐食性の向上も可能となることが明らかとなっている。これらの知見との複合化により、より優れた金属表面の構築が可能になると考えている。

以上

謝辞

本研究は公益財団法人 JFE21 世紀財団 2022 年度技術研究助成の支援を受け実施された。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- (1) S. Ota et al., Surface Modification of Carbon Steel by Atmospheric-Controlled IH-FPP Treatment Using Mixed Chromium and High-Speed Steel Particles, Materials Transactions, Vol. 57, No. 10, (2016), pp.1801-1806.
- (2) 梅野玄ら, 炭素粉末を用いた AIH-FPP 浸炭プロセスの開発, 材料, Vol. 71, No. 9, (2022), pp.787-794.
- (3) 梅野玄, 慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修士論文, (2022)