

微粒子衝突と高周波誘導加熱を利用した 構造用鋼の高度化技術の開発

慶應義塾大学理工学部機械工学科
小茂鳥 潤

1. はじめに

国内における様々な工業技術を産業界に活かすための基礎を築くことは、申請者をはじめとする工学者の重要な取組みと考えている。とくに大学などの研究教育機関では、新しくシーズを生み出し、その応用への道筋をつけることが重要である。このような考え方にに基づき、申請者は、鋼材を中心とする金属の高度化技術の開発に取り組んでいる。素材の性能が向上すれば、それを利用する機械部品の信頼性のみならず性能そのものも向上する可能性がある。当該申請は、基礎研究フェーズではあるが、将来的には産業の基盤技術として発展することを期待している。

鋼の疲労特性を向上させる表面処理の一つとして浸炭焼入れがある。これまで実用化されている浸炭手法には、固体浸炭、液体浸炭、ガス浸炭、真空浸炭などいくつかの種類がある。その中でも工業的に幅広く用いられているガス浸炭には、排気ガス排出量が多い点やエネルギー消費量が多いなどの問題が残されている。そこで本研究では、炭素の拡散が可能でありながら排気ガス排出量が極めて少ない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¹⁾に着目した。AIH-FPP 処理とは、任意の雰囲気下で高周波誘導加熱した試験片に対し粒径 200 μm 以下の微粒子を高速で投射する処理である。

慶應義塾大学ではこれまでに、工業用純鉄と SCM420H 鋼に対して鋼粒子の表面に炭素粉末を被覆した炭素/鋼 MC (Mechanical coating) 粒子を用いて AIH-FPP 処理を施すと、基材表面に炭素が拡散することを明らかにしている^{2,3)}。これは、既存の浸炭手法のような一酸化炭素やアセチレンを介した化学反応による拡散ではなく、炭素粉末の直接的な拡散であると考えられる。そのため、処理中に排気ガスが発生せず、環境負荷が極めて小さい処理であるといえる。そこで、この AIH-FPP を用いた浸炭処理を環境親和型固体浸炭プロセスと呼んでいる。

現在、本処理を施した試験片の疲労特性は、ガス浸炭焼入れを施した試験片に比べ大きく劣ることが報告されている³⁾。この要因として、拡散した炭素量が少なく、表面近傍が十分に高硬化化していないことが考えられる。そこで本研究では、新しい AIH-FPP 処理装置を作製し、疲労特性向上を目的とした環境親和型固体浸炭プロセスの開発を試みた。また、処理を施した試験片に対し疲労試験を実施し、その疲労特性について検討・考察を加えた。

2. 研究の方法

供試材には SCM420H 鋼を用いた。表 1 に同材の化学成分を示す。同材を図 1 に示す最小径 5 mm の砂時計型疲労試験片に機械加工した後に、エメリー研磨紙 (#100-800) を用いて R 部を研磨し供試状態とした。

本研究で新しく作製した AIH-FPP 処理システムの構成図を図 2 に示す。処理中の脱炭や酸化を防ぐため、真空ポンプにより雰囲気置換を行えるよう改良を加えた。また、R 部に対して均一に処理を行うため、ステッピングモータを用いて試験片を回転させた。

表 1. SCM420H 鋼の化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	O	Fe
0.21	0.25	0.85	0.019	0.016	0.01	0.02	1.10	0.16	0.0005	Bal.

表 2. AIH-FPP 処理条件.

Atmosphere	N ₂
Gas flow rate, L/min	130
Shot particles	Carbon/steel MC particles
Particle supply rate, g/s	1

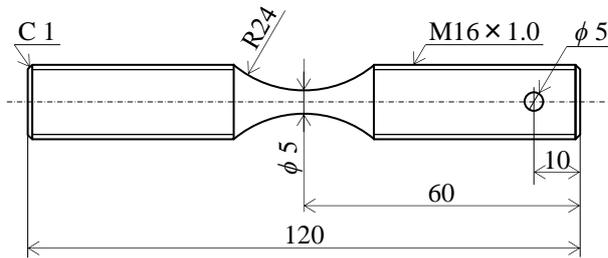


図 1. 疲労試験片の寸法と形状

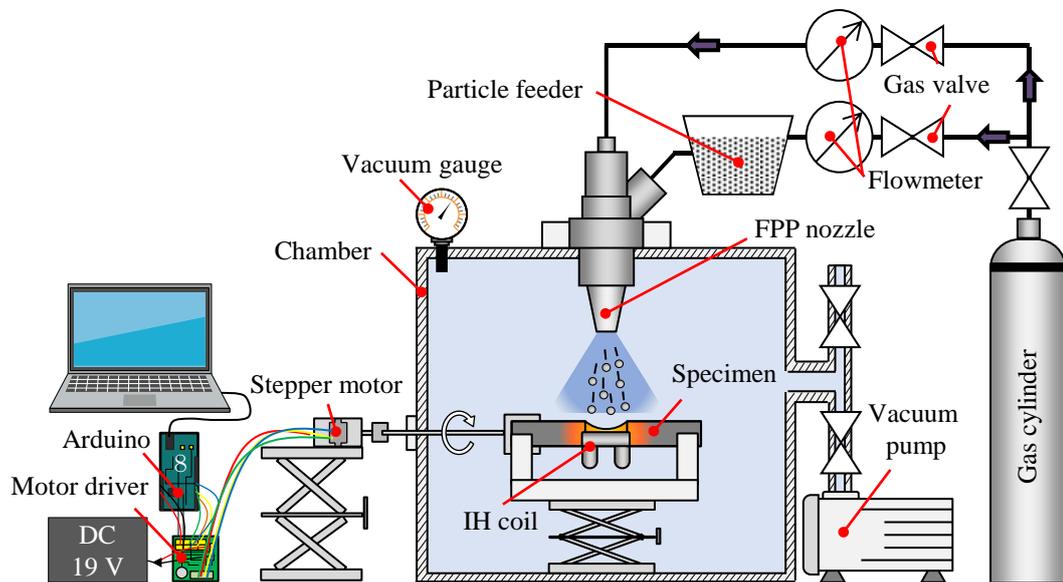


図 2. 本研究で作製した AIH-FPP システムの構成説明図

試験片への AIH-FPP 処理は、窒素雰囲気中に置換をした後、表 2 に示す処理条件および図 3 に示す熱履歴で行った。その後、再焼入れを行った。AIH-FPP 処理の投射粒子には図 4 に示す炭素/鋼 MC 粒子を用いた。なお、研磨のみ行ったものを P 材、AIH-FPP 処理および再焼入れを施したものを AIH-FPP+Q 材と呼称する。比較のため、900°C、120 min（カーボンポテンシャル 1%）で浸炭焼入れ処理を施したものを準備した。以下これを C 材⁴⁾と呼称する。

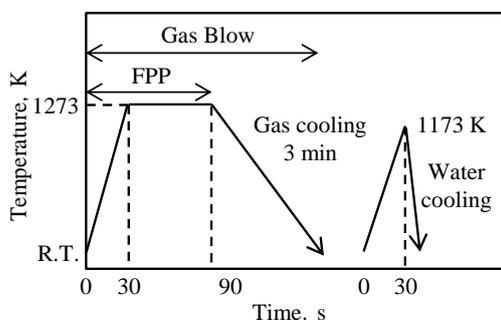


図 3. 処理時の熱履歴

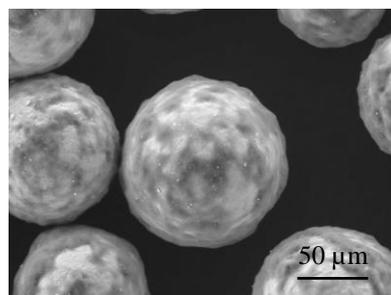


図 4. 投射粒子の電子顕微鏡写真

作製した試験片に対して、断面硬さ分布測定による浸炭層深さの測定、組織観察、最小径部表面の残留応力の測定を行った。断面硬さ分布の測定には、マイクロビッカース硬さ計を用いた。組織観察の際のエッチングには、ナイトール液を用いた。残留応力の測定は、ポータブル型 X 線残留応力測定装置を用いた $\cos\alpha$ 法により応力を算出した。その際、計 4 か所の測定を行い、その平均値を測定結果とした。また、疲労特性の評価のため、P 材および AIH-FPP+Q 材に対して疲労試験を行った。疲労試験は、油圧サーボ式引張圧縮試験機を用いて、軸荷重負荷、応力比 $R=-1$ 、試験周波数 10 Hz、打切り繰返し数 10^7 回にて行った。

3. 実験結果および考察

3-1 環境親和型固体浸炭プロセスを施した試験片の表面近傍の特性評価

図 5 に試験片断面の硬さ分布の測定結果を示す。同図より、AIH-FPP+Q 材には表面近傍 300 μm 程度の硬化層が確認でき、最表面の硬さは 870 HV 程度まで上昇していることがわかる。この層は、炭素原子が拡散した浸炭層であると考えられる。また、C 材の場合には、表面近傍 50 μm 程度の硬さが低下していることがわかる。これは、粒界酸化の影響であると考えられる。AIH-FPP+Q 材では表面近傍での硬さの低下がないことから、炭素の拡散を阻害する酸化被膜の形成や、脱炭、粒界酸化は起きていないと考えられる。酸化や脱炭、粒界酸化などの化学反応が生じなかった理由として、チャンバ内に存在する酸素および水素が極めて少ないことが挙げられる。またそのため、一酸化炭素やエチレン、アセチレンは発生しない。そのため、既存の浸炭処理とは異なるメカニズムにより炭素が拡散したと考えられる。図 6 に光学顕微鏡による試験片断面の表面近傍の組織観察の結果を示す。同図より、表面近傍にマルテンサイトが形成されていることが確認できる。以上より、環境親和型固体浸炭プロセスにより表面近傍に十分な量の炭素が拡散し、再焼入れによりマルテンサイトが生成され高硬さ化したと考えられる。

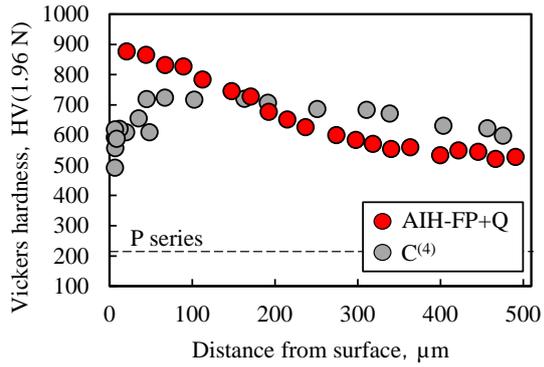


図5. 断面のビッカース硬さ分布

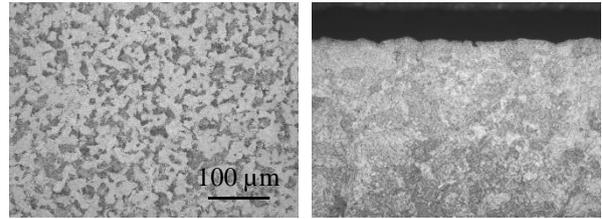


図6. 光学顕微鏡により処理後の組織観察

3・2 疲労特性の評価

P材およびAIH-FPP+Q材の疲労試験の結果を図7に示す。また、AIH-FPP+Q材の試験片表面の残留応力の測定結果を図8に示す。なお、疲労試験を行うにあたりAIH-FPP+Q材を6本作製し、6本各々について試験片表面の残留応力を測定した。各試験片は図7,8に示す通りNo.1からNo.6の番号で整理した。図7より、P材と比較してAIH-FPP+Q材の疲労限度は低下していることがわかる。

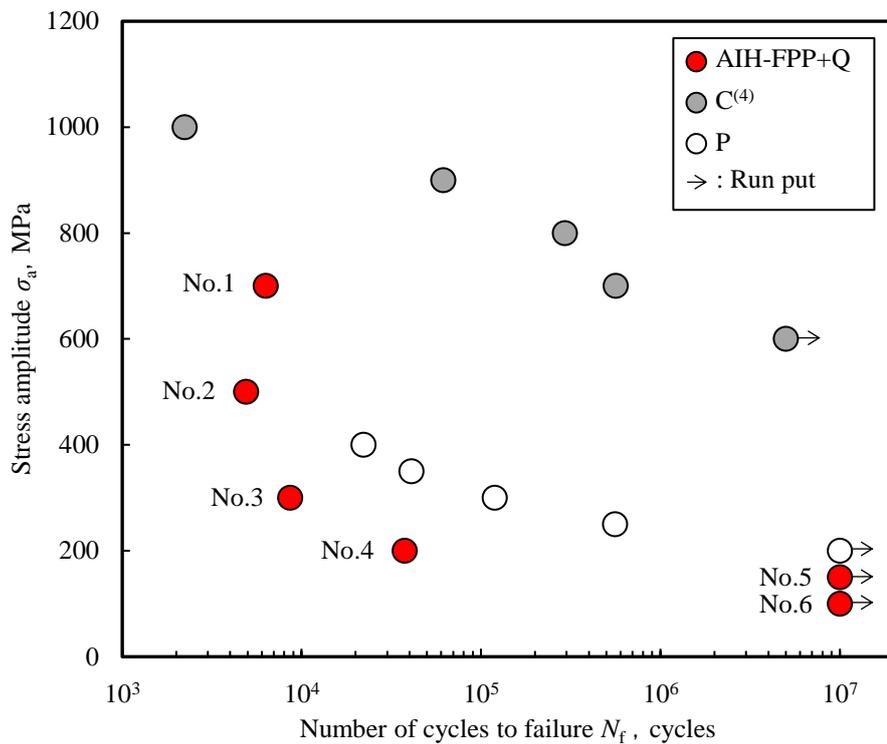


図7. 疲労試験の結果

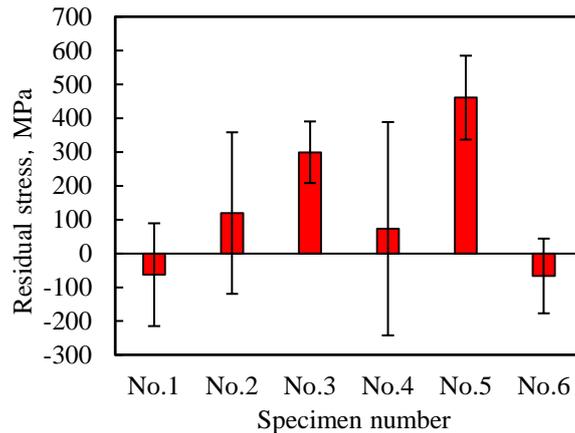


図 8. 各試験片の残留応力測定結果

これに対して、No.1 の試験片の疲労特性のみ P 材と比較して、優れていると読み取ることができる。No.1 の試験片のみ優れた疲労特性を示した要因として、残留応力が挙げられる。図 8 より、No.1 以外の試験片の表面には主に引張残留応力が生起していることがわかる。破断した試験片の中で、No.1 の試験片のみ表面に圧縮残留応力が生起していることから、試験片表面に生起した圧縮残留応力により疲労強度が上昇したと考えられる。

また、AIH-FPP+Q 材について、表面近傍が高硬さ化しているのにもかかわらず疲労強度が上昇していないことがわかる。この要因の一つとして表面粗さの増加が考えられる。AIH-FPP+Q 材には、試験片表面にピーニングによる投射痕が形成されている。一般に硬さが上昇するほど切欠きに対し敏感になることから、投射痕からき裂が発生しやすくなり、き裂発生寿命が著しく短くなった可能性が考えられる。

今後、最表面の硬さおよび表面粗さが本研究で準備した試験片と同等であり、残留応力のみが異なる試験片の疲労試験を実施し、残留応力が疲労特性に及ぼす影響について検討を行う予定である。

4. おわりに

本研究では、SCM420H 鋼に対して環境親和型固体浸炭プロセスを施し、表面近傍の硬さなどの諸特性の測定および観察、疲労試験による疲労特性の検討を行った。その結果、環境親和型固体浸炭プロセスにより表面近傍に十分な量の炭素が拡散し、その後の再焼入れにより最表面の硬さは 870 HV 程度まで上昇することが明らかとなった。しかし、その疲労特性はガス浸炭焼入れを施した試験片に比べ大きく劣っていることが明らかになった。これは、試験片表面に引張残留応力が生起したこと、ピーニングにより表面粗さが増加したことが要因として考えられる。

謝辞

本研究で使用した材料は、日本材料学会疲労部門委員会『疲労に関する表面改質分科会』から提供されたものである。また研究の一部は、天野工業技術研究所の補助のもとに行われた。記してここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 笹子敦司, 菊池将一, 亀山雄高, 小茂鳥潤, 深沢剣吾, 三阪佳孝, 川寄一博, “高周波誘導加熱を利用した IH-FPP 処理システムの構築とそれによる S45C 鋼の表面改質”, 日本金属学会誌, Vol. 72, No. 5 (2008), pp. 347-352.
- 2) 梅野玄, 羽山元晶, 武末翔吾, 富田翼, 加藤健郎, 三阪佳孝, 小茂鳥潤, “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) M. HAYAMA, G. Umeno, S. Takesue, J. Komotori, “Fatigue Property Evaluation of SCM420H Steel Treated by Short-time Carburizing with Atmospheric-controlled Induction-Heating Fine Particle Peening”, 6th International Conference on Materials and Reliability, (2022).
- 4) 羽山元晶, 牧悠介, 菊池将一, 小茂鳥潤, “浸炭焼入れを施した SCM420H 鋼の疲労過程における残留オーステナイトおよび残留応力の変化挙動”, 鉄と鋼, Vol. 108, No. 11 (2022), pp. 891-899.