

焼準省略可能な高強度軟窒化クランク用鋼の開発

佐野直幸* 松本 斉**
浅井鉄也¹⁾** 瀧谷善弘***

1. はじめに

エンジンの主要な構成部品であるクランクシャフトは、エンジンの高出力化や軽量化のためにさらなる高強度化が求められるとともに、製造工程におけるCO₂排出量の削減や低コスト化につながる工程の合理化も求められている。一般の乗用車のクランクシャフトは、中炭素鋼を熱間鍛造しその後表面硬化処理を施して製造されることが多い。この表面硬化処理のひとつに軟窒化処理がある。軟窒化とは窒化の一種で、浸炭性の雰囲気と共存させながらフェライト域の600℃前後の温度で数時間、窒化する処理である⁽¹⁾。浸炭焼入れや高周波焼入れのように高温のオーステナイトからの相変態を伴わないので熱処理歪みが小さく、ガス処理なので複数本のクランクシャフトをまとめてバッチ処理することができ、個々のクランクシャフトの細かい段差部やコーナー部、および潤滑油を供給するための細径の油穴の周囲もよく硬化できる。また表面には白色層(または化合物層)と呼ばれる窒化物層が形成され耐摩耗性の向上にも寄与する。ただし、真直性が重要であるクランクシャフトでは、処理品の変形量が小さいことが特徴のひとつである軟窒化によってしても、ゆがみの矯正は必要となる。これは軟窒化処理で反ってしまったクランクシャフトを真っ直ぐになるように押し戻す作業で、曲げ矯正と呼ばれる(図1)。白色層の直下深さ数百μmの表層部分は窒素が拡散侵入して硬化した拡散層であり、硬化が著しいほど疲労強度は増大するが、曲げ矯正の際に表面から内部に向かって脆性的にクラックが進展してしまうと、所望の疲労強度は得られなくなってしまう。従って、軟窒化処理後

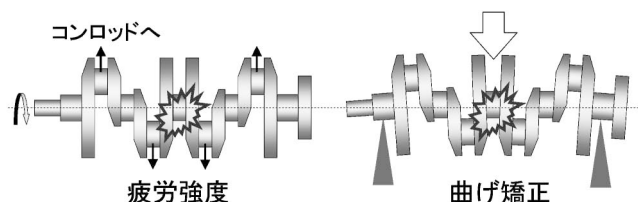


図1 軟窒化クランクに要求される疲労強度と曲げ矯正性。

に高い疲労強度と優れた曲げ矯正性が両立できる軟窒化クランク用鋼が求められるが、高出力エンジン用のクランクシャフトのように一層高い疲労強度が必要となる場合には、素材の硬度自体も高く、拡散層の硬度も一層高くなるので、曲げ矯正におけるき裂の発生や伝播を抑制することは非常に難しく、軟窒化を行う前に結晶粒の細粒化を図るための焼準処理を施さないと所望の曲げ矯正性を得ることができなかった。今回、焼準処理を行わなくても軟窒化処理後には、従来の焼準処理した鋼と同等以上の疲労強度と曲げ矯正性が得られる高強度軟窒化クランク用鋼を開発したので、その概要を紹介する。

2. 従来技術

高強度化のためには素材硬度を上げることが最も簡単であり、従来の高強度軟窒化クランク用鋼には例えば炭素濃度が0.48%のS48C鋼が使われてきた。ただし、焼準処理によって結晶粒(特にパーライトコロニー)を微細化しないと所望の曲げ矯正性は得られなかった。これはパーライト分率の高い鋼では粗大なパーライトコロニーが発達し易く、曲げ矯正の際にき裂の進展が容易に起こってしまうためである。図2は高強度用の従来鋼およびすでに焼準省略を達成している疲労強度がやや低目の通常強度鋼の光学顕微鏡組織と、疲労強度(切欠き付曲げ疲労試験での値)と曲げ矯正性の関係を模式的に示したものである。従来鋼(S48C)は焼準処理をしないとパーライトコロニーサイズが数百μmに達し、疲労強度は高くとも曲げ矯正性が著しく低下する。通常強度鋼では素材硬

* 住友金属工業株式会社総合技術研究所 主任研究員

** 株式会社住友金属小倉商品開発部 室長

*** 株式会社本田技術研究所四輪開発センター 1)研究員
Development of a New Class Steel Requiring no Normalizing Heat Treatment before Nitrocarburization for the Application of High Strength Nitrocarburized Crankshaft; Naoyuki Sano*, Hitoshi Matsumoto**, Tetsuya Asai***, Yoshihiro Takitani***(*Sumitomo Metal Industries, Ltd., **Sumitomo Metals (Kokura) Ltd., ***Honda R&D Co., Ltd.)
2008年10月31日受理

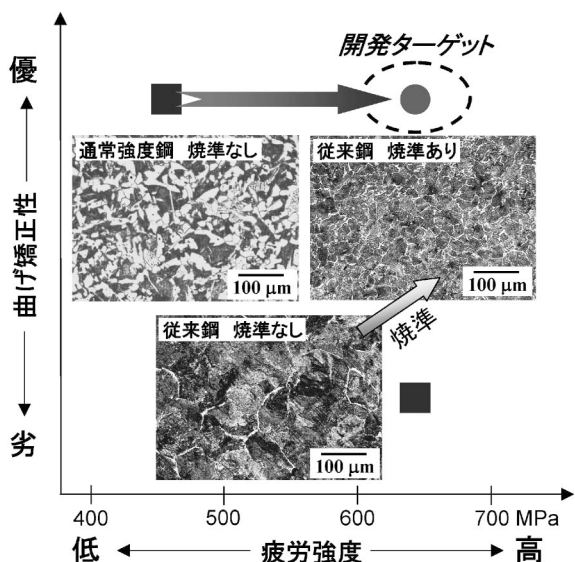


図2 切欠き付き曲げ疲労試験片の軟空化後の疲労強度と曲げ矯正性の両立に及ぼす焼準処理の効果と開発鋼の位置づけ。

度を下げられる分、炭素濃度を下げられるので粗大なパーライトコロニーを抑制し易く、また軟質なフェライトの分率が增大するので、曲げ矯正性は向上するが、疲労強度は低下しがちになる。そこで、曲げ矯正性はそのまま維持しながら高疲労強度化を図り、これまでは焼準処理の適用によって達成していた高疲労強度と曲げ矯正性の両立を、焼準処理なしで実現することを本開発のターゲットとした。

3. 開発鋼の特徴

開発鋼の代表的な化学成分を表1に示す。炭素濃度を0.38%に設定してフェライト分率を50%程度にまで増大させ、曲げ矯正性の向上を図った。高目の窒素濃度と約0.01%のTiの添加は、熱間鍛造時の高温保持でのオーステナイト粒の粗大化の抑制を狙ったものである。一方、フェライト地を強化する目的で約0.2%のMoを添加しており、従来から軟空化鋼の強化において当然のごとく添加されていたVやCrは添加されていないことが本開発鋼の最大の特徴である。VやCrは窒化物を作って析出強化に寄与するが、そのフェライト地の延性を大きく下げるので曲げ矯正にとっては不利である。特にCrは窒化物として析出しない0.2%程度の存在でも白色層直下の固溶窒素量を大きく高めることが明らかとなり⁽²⁾、焼準省略を前提とした高強度材で曲げ矯正性を確保するには、Cr含有量を大きくしないことが好ましい。切欠き付き曲げ疲労試験片をクランクシャフトの製造を模擬した条件で軟空化処理して疲労強度を評価した。疲労強度はMoの含有量とともに増大していくがMo添加による曲げ矯正性の劣化はCrの場合ほど顕著ではなく、疲労強度と曲げ矯正との両立の面で最もバランスのよい約0.2%をMoの添加量とした。0.2%Mo添加した開発鋼の熱間鍛造後の光学顕微鏡組織を図3に示す。旧オーステナイト粒界に生成した初析フェライトに加えて、パーライトコロニー内にはベイニティックフェライトも分散した組織となっており、あたかも

表1 開発鋼の代表的な化学成分(mass%)。

C	Si	Mn	P	S	Mo	Ti	N
0.38	0.20	0.80	0.01	0.07	0.17	0.01	0.018

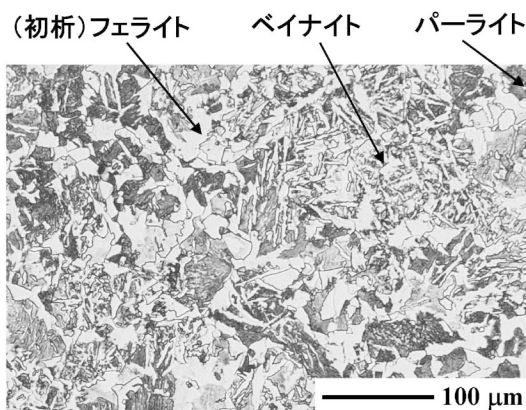


図3 0.2%Mo添加した開発鋼の熱間鍛造後の光顕写真。

パーライトコロニーが粒内フェライトで微細分断化されたような組織となっていることがわかる。これはMoが鋼の焼入れ性を高めるがゆえの結果であり、適量のベイナイトがフェライト+パーライト組織に混在したこのような微細組織になれば曲げ矯正性の改善に非常に効果的であることがわかった。また、ベイナイトの混在によって素材の硬度もフェライト+パーライト組織に比べて高くなるので、軟空化部品の芯部強度が増大して部品としての強度レベルが底上げされる。Moのさらなる微視的な効果については次節で詳しく述べる。

クランクシャフト向けのような機械構造用鋼には被削性を高めるために鉛が添加されてきたが、鉛は環境影響物質であり自動車メーカーでは鉛フリー化を志向する動きが活発になっている。本開発鋼でも鉛を非添加としており、そのかわり被削性の確保に硫化物を活用する目的でSを0.07%程度添加している。

4. モリブデンの微視的挙動の解析

機械部品の疲労強度は材料の降伏強度を高めると改善される。これは疲労き裂が局所的な微視的降伏の繰り返しによって発生するからである。軟空化クランクシャフトのような表面硬化処理を施した機械部品では表層に最大応力が負荷される場合が多く、軟空化で硬化する表層の降伏強度を増大させることが効果的である。降伏強度が増大すると曲げ矯正にはより高い荷重が必要になるが、その増大しは曲げ矯正の工程上問題になるようなオーダーではなく、むしろ通常の析出強化のように降伏強度が増大すると引張り破断強度も増大して材料の延性(最大塑性伸び)が低下してしまうことが問題となる。したがって、軟空化後の曲げ矯正性、すなわち、部品表層の塑性変形能が重要視される軟空化部品では、引張り破断強度はあまり増大せず、降伏強度だけが増大することが好ましい。こうした特性を、炭化物として析出しない程度の、適量(0.2%)のMoが有していることがわかった。

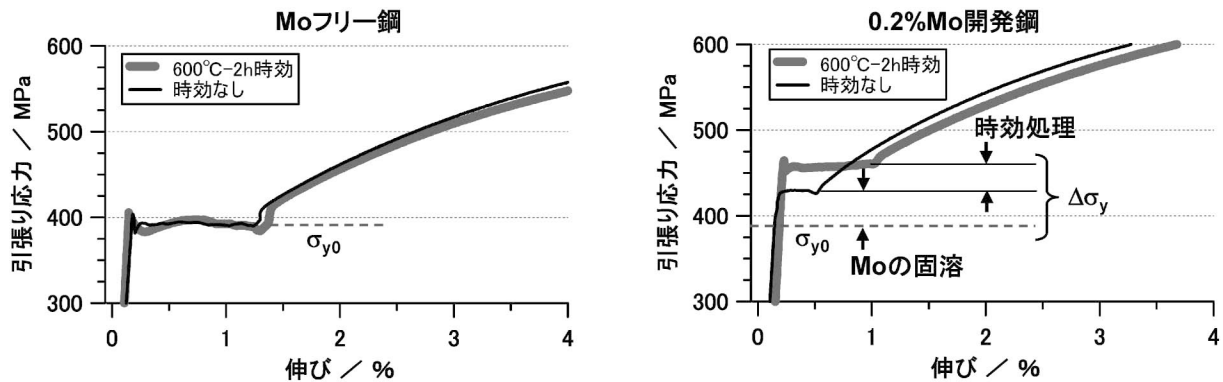


図4 開発鋼において0.2%Moが時効処理の前後で降伏強度に及ぼす影響。

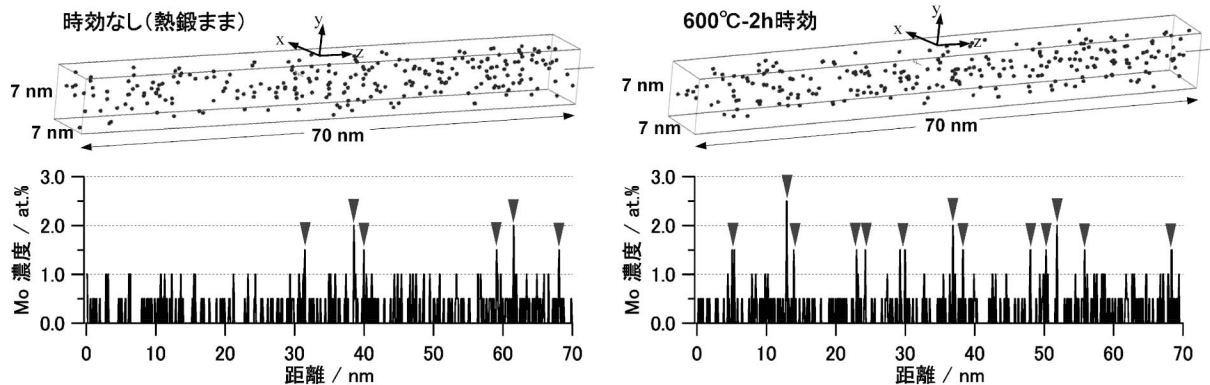


図5 0.2%Mo添加開発鋼における600°C-2h時効前後でのMo原子の空間分布とMoの濃度プロファイルの比較。

図4は0.2%Mo添加した開発鋼と開発鋼からMoを除いた試作鋼の応力-ひずみ曲線であり、軟室化処理の熱履歴に相当する600°C-2hという時効処理を行った前後で、降伏挙動が現れる変形初期の部分と比較したものである。Moフリー鋼では時効の前後で降伏強度は殆ど同一であり、引張り破断強度も変化しなかった。一方、0.2%Moを添加した開発鋼では時効前(熱鍛まま)で、Moフリー鋼に比べて降伏強度が約30MPa増大しており、Moの固溶強化によるものと解釈される。次に時効処理を行うと降伏強度はさらに約30MPa増大したが、このとき引張り破断強度は殆ど変化しなかった。すなわち、開発鋼では軟室化処理を行うと表層部分は専ら拡散侵入した固溶窒素によって強化されるが、同時に軟室化処理による熱履歴によってMoが降伏強度を増大させる効果を合わせてもたらしていることが示唆された。そこで、600°C-2h時効前後のMoの存在状態を三次元アトムプローブ電界イオン顕微鏡(3D-APFIM)によって調査した。図5はMo原子の空間分布と、深さ方向(z軸)に沿って検出された原子をブロック分けして各ブロックでのMo濃度を求めてプロットしたMoの局所的な濃度プロファイルを時効の前後で比較したものである。濃度プロファイルを比較すると時効処理によってMo濃度が立ち上がったスパイク(矢印)の頻度が増大しており、数個のMoが凝集してMoクラスターを形成したものと推察できる。Moは鉄よりも原子半径が大きいので、数個のMoが凝集すると、運動転位を停止させて自身がカッピングされたりバイパスされたりする析出粒子ほどの抵抗は無いにしても、孤立して固溶している固溶Mo原子の場合よりは転位運動に対しての粘性抵抗が強くなって、降

伏強度を数十MPa程度増大させるのに寄与しているものと考えられる。開発鋼においては、こうしたMoの存在状態と、適量のペイナイトがフェライト+パーライト組織に混在した微細組織となっていることが相まって、焼準処理を省略して軟室化処理を行っても、高い疲労強度と優れた曲げ矯正性を両立させることができた。

5. 実用化状況

本開発鋼はすでに実用化、量産されており、本開発鋼を用いて焼準処理を省略して製造した軟室化クランクシャフト⁽³⁾は2006年から市販の乗用車に搭載され始め、順次適用車種が拡張されている。焼準処理を省略できたことで製造コストは約8%低減され、熱間鍛造以降の製造工程で排出されるCO₂量が最大で約22%低減されていると試算された。

6. 特許

国際公開WO 2005/021816をはじめとして、関連特許は4件が出願されており、中国および北米ではすでに成立している。

文献

- (1) 例えば、D. Pye: Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, ASM International, Ohio, (2003).
- (2) 江頭 誠, 祐谷将人, 佐野直幸, 西谷成史: 材料とプロセス, 21(2008), 538.
- (3) 浅井鉄也, 瀧谷善弘, 佐野直幸, 松本 斉: Honda R&D Technical Review, 19(2007), No. 1 86.