

浸炭窒化熱処理技術による 単気筒エンジンの高性能化

Improvement of Single Cylinder Engines using Carbonitriding Technology

坪井 隆昌 大賀 浩次

Abstract

In recent years, there has been a downward trend of the motorcycle market in southeast Asian nations (ASEAN) compared to its peak due to the effects of road upgrades and increased incomes bringing a shift in demand from motorcycles to automobiles. In order to secure share in these markets of limited scope, each company must be superior in performance and cost over its rivals. However, as there is often a trade-off between improved performance and cost reductions, there is a need to achieve both without just simply passing these onto the vehicle's price.

As the main models sold in the ASEAN markets use single-cylinder engines, for the assembled crankshaft crank pins used in these engines, there is a need to reduce friction loss using a smaller diameter, and therefore development has been progressed with a focus on materials and heat treatment. This report introduces carbonitriding, which helps to solve issues around achieving both high performance and reduced costs.

1 はじめに

近年、東南アジア諸国連合（ASEAN）においては、道路整備や所得増などの影響によって二輪から四輪に需要が移行していることもあり、二輪車市場は全盛期に比べて減少傾向にある。この限られた市場規模の中でシェアを獲得するには、性能、コスト等で他社よりも優位でなければならない。しかし、高性能化とコスト削減はトレードオフの関係にある場合が多いため、車両価格に転嫁するのではなく、双方を両立させる取り組みが求められている。

ASEAN の市場で販売される主力機種は単気筒エンジンを搭載していることが多く、単気筒エンジン内にある分割型クランクシャフトのクランクピンにおいては、小径化による摺動ロスの低減が求められ、材料や熱処理の視点で開発を進めてきた。今回は高性能と低コストの両立という課題を解決した浸炭窒化について紹介する。

2 開発の背景・狙い

二輪車のクランクシャフトには一体型と分割型の2種類が存在し、エンジンレイアウトや強度、コストによって選択される。一般的に低排気量モデルには分割型が採用されることが多い。分割型クランクシャフトは5つの部品で構成されており、カウンターウェイトを有する左右のクランクシャフト、クランクシャフトに圧入されるクランクピン、燃焼圧をクランク側に伝達するコネクティングロッドから成り立っており、コネクティングロッドの大端部はニードルベアリングを介してクランクピンと結合している。図1に分割型クランクシャフトを示すが、コネクティングロッドの大端部を見やすくするため、左側のクランクシャフトは外している。

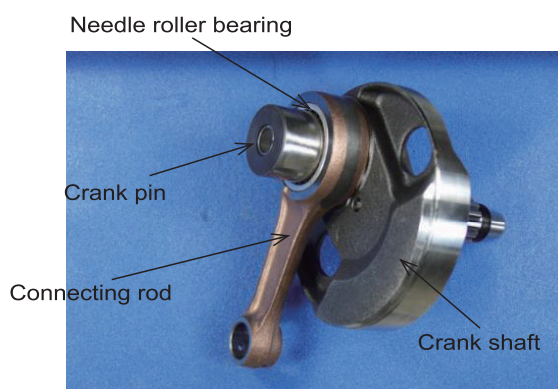


図1 分割型クランクシャフト

走行中のクランクピンには高い Hertz 応力が発生し、その値は 2.5 ～ 3.0GPa に達する。従来は Hertz 応力の値に合わせて一般的なガス浸炭（以下、通常浸炭という）と高濃度浸炭窒化^[1]の2種類を使い分けて生産していた。

高濃度浸炭窒化は高濃度浸炭処理後、焼入れせずに炉冷し、その後に浸炭窒化焼入れ焼戻しを実施している。高濃度浸炭窒化の特徴は、微細な炭化物の析出および浸炭窒化による焼戻し軟化抵抗の向上等である。高濃度浸炭窒化を採用することで通常浸炭よりも高強度化が可能となるが、処理時間や作業工数が増え、コストアップの要因となっていた（図2）。そこで、今回は高濃度浸炭窒化の性能を維持したまま、コストダウンが達成できる熱処理条件を目指した。

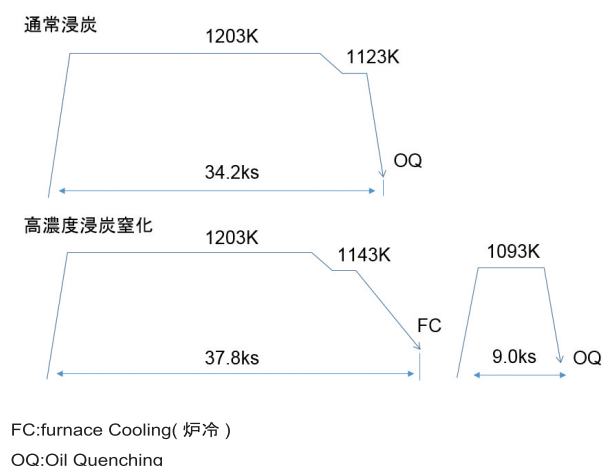


図2 処理条件比較

3 開発の取組み

3-1. 目標値の設定

クランクピンの外周にはエンジンの燃焼圧により、ニードルベアリングを介してクランクピンに Hertz 応力が発生する。そのため、クランクピンには高い Hertz 応力に耐え得る耐転動疲労特性が要求されており、これを評価する試験として転動疲労試験^[2]を採用している。高濃度浸炭窒化から違う工法に変更するためには、転動疲労寿命が同等となる必要がある。

また、コストは高濃度浸炭窒化よりも安価で、可能な限り通常浸炭に近いコストが望まれる。加えて理想は炉内雰囲気監視し、制御するべきであるため、新たな管理方法を検討した。

3-2. 工法の選定

高濃度浸炭窒化においては微細炭化物の析出や浸炭窒化による焼戻し軟化抵抗の向上、残留オーステナイト増による圧痕周辺の盛り上がりの抑制が効果とされるが、今回想定しているエンジンのクランクピンに対して必要な効果を抽出するため、過去に高濃度浸炭窒化を採用したモデルの耐久試験終了品で再評価した。

一般的に歯車のケースでは歯車同士の接触部の温度が 573K 程度に上昇して製品を軟化させることがわかっている^[3]。クランクピンにおける硬度低下の有無を調査した。測定はニードルローラーの転送面と非転送面の硬度および転送面の金属組織を確認した。

硬度では表層から 0.05mm 位置で転送面と非転送面に差異は見られなかった。また、金属組織においても熱が加わった様子は見られなかった (図 3)。この結果から、今回想定

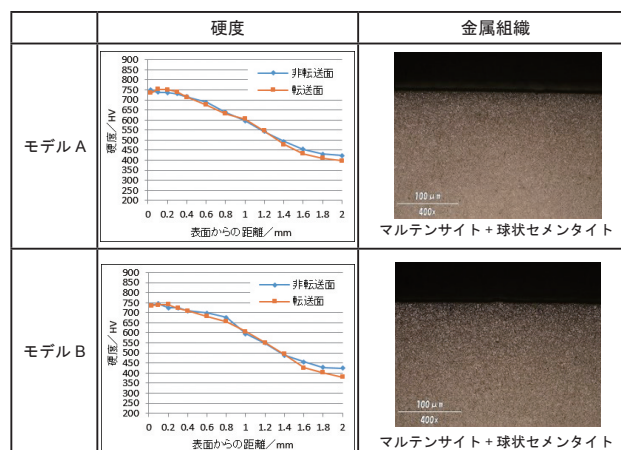


図3 硬度、金属組織測定結果

しているエンジンの使用環境において、クランクピンの焼戻し軟化抵抗の効果は過剰品質であると推定した。

焼戻し軟化抵抗の効果は、高濃度浸炭の炭化物と浸炭窒化による窒素拡散から得られるが、今回は高濃度浸炭窒化の高濃度浸炭を廃止し、浸炭窒化の効果を最大限活用するため、条件の作り込みを実施した。

3-3. 浸炭窒化の管理項目

浸炭窒化は処理の前半で浸炭させ、処理の後半でアンモニアガスを添加して侵入拡散させる。アンモニアガスには高温状態だと熱分解しやすい特徴があるが、浸炭窒化で必要とされるのは未分解のアンモニアガスであるため、添加するアンモニアガスの量ではなく、未分解のアンモニアガスと製品表層の窒素濃度を管理する必要がある^[4]。加えて、窒素はオーステナイト安定化元素であるため、Ms 点を下げる効果があり、残留オーステナイトが発生しやすく、表層の硬度が低下する恐れがある。

また、製品に侵入できる炭素量と窒素量には飽和値があり、製品の窒素濃度を向上させた場合、炭素濃度が低下することになる^[5]ので、炭素濃度と窒素濃度の双方で最適となる条件を調整する必要がある。

今回は未分解のアンモニアガス濃度を測定する機器に赤外線分析計を使用し、製品表層の炭素濃度および窒素濃度は電子線マイクロアナライザ (EPMA) で測定することで、双方の結果を比較することとした。

3-4. 処理条件

処理条件はガス浸炭で使用している Harris の実験式を基に検討した (図 4)。未分解のアンモニアガス濃度、表層の窒素濃度、転動疲労寿命を調査するため、図 5 に示す実験を実施した。

Harrisの実験式

$$D = K\sqrt{t}$$

$$t = t_c + t_D$$

$$t_c = t((C_2 - C_0)/(C_1 - C_0))^2$$

D: 全硬化層深さ

K: 温度計数

t: 全浸炭時間

t_c: 浸炭時間

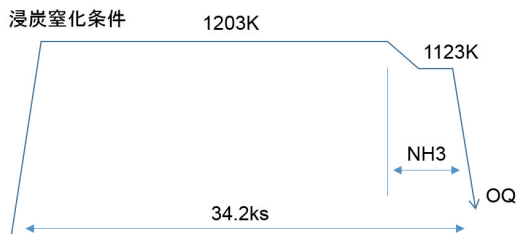
t_D: 拡散時間

C₀: 素材炭素濃度

C₁: 浸炭後炭素濃度

C₂: 拡散後炭素濃度

図4 Harrisの実験式



条件	残留 NH3 濃度 (狙い)
TRY1	500ppm
TRY2	750ppm
TRY3	1000ppm
TRY4	1500ppm

図5 浸炭窒化実験条件

3-5. 機能評価

機能評価ではボールオンディスク式の転動疲労試験を使用した。この装置は試験片とシャフトの間に3個のボールがスラスト力を受けながら転動する。試験片にフレーキングが発生すると、加速度センサーが振動を検知して停止する構造

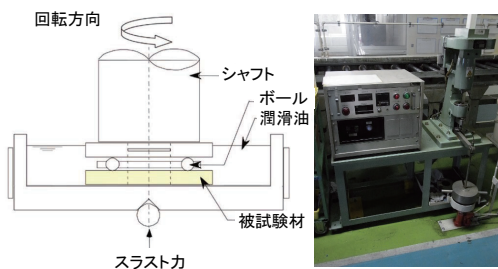


図6 転動疲労試験

となっている（図6、表1）。この装置を用いてワイブル分布にて整理し、通常浸炭、高濃度浸炭窒化、浸炭窒化を累積破損確率50%（L50）にて比較した。

表1 試験条件

印加応力 (Hertz応力)	Pmax = 5.3GPa
回転速度	1,800rpm (球は3個)
球	SUJ2 φ9.5mm
潤滑油	Puresaftey 10 (コスモ)
不純物	ガスアトマイズ法で作成した高速度鋼 直径 : 100-150 μm 硬度 : 750HV 混入量 : 1g/L

4 結果と考察

4-1. 熱処理品質

TRY1～4の結果を図7に示す。TRY1～3においては硬度および金属組織に異常は見られなかったが、TRY4については表層の硬度低下が発生した。これは金属組織でも明らかだが、残留オーステナイトが多くなっていることがわかる。

残留オーステナイトをマルテンサイト化する手法として、ショットピーニングやサブゼロ処理があるが、今回は追加工程無しの工程設計を目指したため、TRY4の結果をNGと判定し、硬さが維持できるTRY3をアンモニアガスの上限と設定した。

4-2. 転動疲労試験

浸炭窒化のTRY4では、残留オーステナイトが多くなり、硬さが低下したためにNGと判断していたが、転動疲労寿命は長寿命であることがわかった（図8）。これは転動疲労試験片の表層が硬度低下したため、コンタミによる圧痕周辺の盛り上がり低減され、ピッチングが発生しにくい環境であったと考えられる。

また、高濃度浸炭窒化と浸炭窒化のL50寿命はほぼ同等であることがわかった（図9）。さらに、浸炭窒化ではばらつきが低減できており、1回で処理が完結するためと推測している。

4-3. 炉内雰囲気可視化

炉内に添加したアンモニアガスを可視化するため、赤外線分析計を使用し、未分解のアンモニアガス濃度の推移を

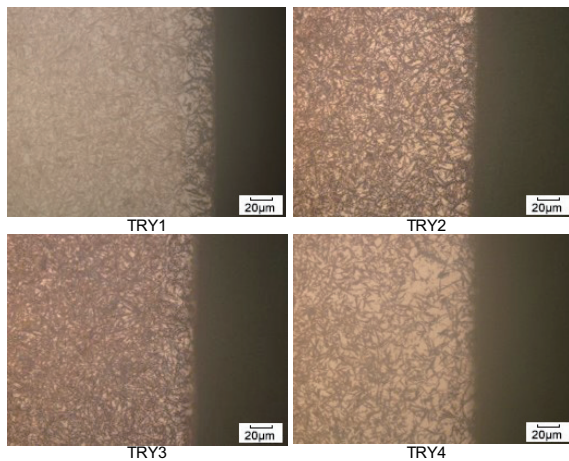
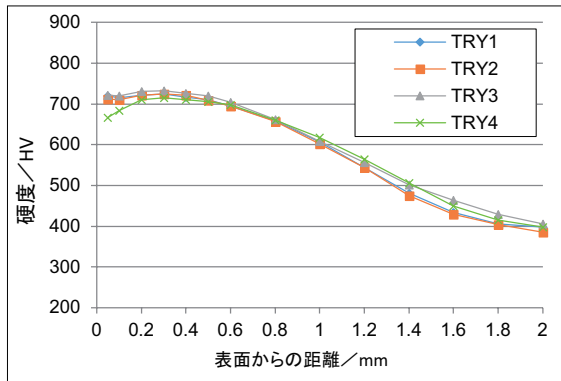


図7 浸炭窒化実験結果

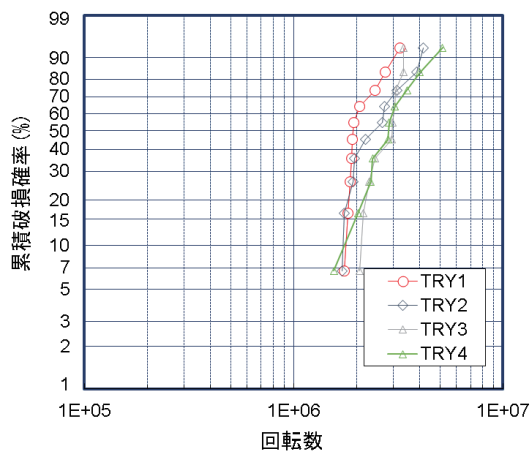


図8 ワイブル分布(実験結果)

	L10 寿命	L50 寿命
TRY1	1.63×10^6	2.18×10^6
TRY2	1.47×10^6	2.81×10^6
TRY3	2.08×10^6	2.80×10^6
TRY4	1.67×10^6	2.95×10^6

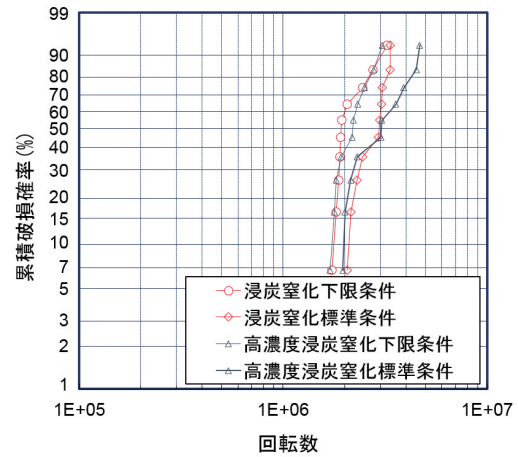


図9 ワイブル分布(工法比較)

調べた。キャリアガスの影響を確認するため、変成式と滴注式で調査したが、変成式は拡散終了後の 930℃から 850℃まで増加し、その後に飽和状態になることがわかったが、滴注式は 850℃に到達後、30 分経過しても飽和しなかった（図 10）。これはアンモニアガスが高温下では熱分解していることを意味しているが、滴注式では均熱開始後 30 分で飽和状態にならなかった理由についてはわかっていない。

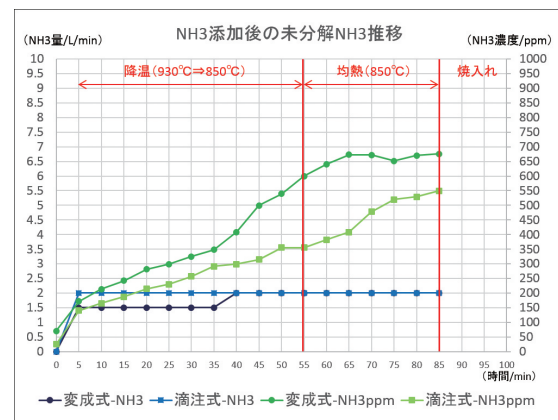


図10 アンモニア濃度の推移

また、製品表層の窒素濃度を調べたところ、アンモニア量と窒素濃度はほぼ比例関係であることがわかったが、ベースガスの仕様によって表層の窒素濃度は異なっていた（図 11）。これは窒化ポテンシャルの影響が考えられ、滴注式には水素の割合が 66.7%となっており、変成式と比べて約 2 倍と高い（図 12）。この水素量の違いによって滴注式は窒化ポテンシャルが下がるため、表層の窒化濃度が低下したと推測される。

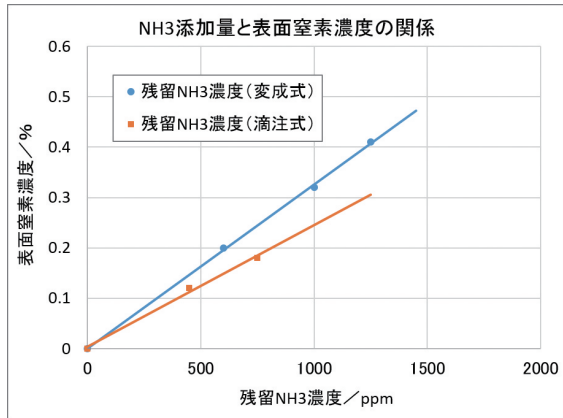
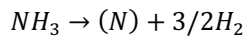


図11 添加NH3と窒素濃度の関係



$$K_N = P_{\text{NH}_3} / P_{\text{H}_2}^{3/2}$$

K_N : 窒化ポテンシャル

P_{NH_3} : NH_3 の分圧

P_{H_2} : H_2 の分圧

図12 窒化ポテンシャル計算式

4-4. 生産性、コスト

高濃度浸炭窒化と浸炭窒化の処理時間を比較すると、約30%の処理時間短縮が可能となり、手扱い工数も削減できたことから目標とするコストダウン金額にも到達し、当社インドネシア拠点で生産を開始した。

また、高濃度浸炭窒化は限られた拠点のみで生産することができたが、浸炭窒化には設備の制約条件が少ないため、当社グループの全ての拠点で生産することができる。今後は様々な拠点で生産することで、さらなるコストダウンに貢献できると考える。

5 まとめ

浸炭窒化の条件出しを行った。管理項目である未分解のアンモニア濃度は、硬度低下の影響を受けない程度に添加することにより、高濃度浸炭窒化とほぼ同等の転動疲労強度を得ることができた。

この結果により、高濃度浸炭窒化の性能は維持したまま、処理時間を27%削減し、また作業工数も削減することができた。

6 おわりに

浸炭窒化は50年以上前から普及した技術だが、ガス浸炭に対して耐ピッチング性を向上させるには非常に有効な工法であると考えられる。また、ショットピーニングやサブゼロ処理のような複合処理を組み合わせることによってさらに高強度化が期待できる。今後は今回の取り組みを皮切りに、複合熱処理の開発に注力し、低コストで高強度化できる工法開発を進めていきたい。

最後に本件の開発にあたり、多大なるご協力をいただきました山陽特殊製鋼株式会社の方々に対し、深く感謝申し上げます。

■参考文献

- [1]新野力也ら:高濃度浸炭窒化法による二輪車用クランクピンの転動疲労特性改善(ヤマハ発動機技報No.36 2003)
- [2]久保田剛、山下恭幸:モーターサイクル用クランクピンの転動疲労寿命評価(ヤマハ発動機技報 No.45 2009)
- [3]永濱睦久、岩崎克浩、安部聡:歯面強度に優れた浸炭窒化歯車用鋼(神戸製鋼技報 Vol.56 No.3 2006)
- [4]毛利信之、田口一彦:熱処理による浸炭鋼の耐摩耗性向上(NTN技報 No.76 2008)
- [5]大木力:過共析鋼の2相域での浸炭窒化処理に関する研究(三重大学 博士論文 2008)

■著者



坪井 隆昌
Takamasa Tsuboi
エンジンユニット
コンポーネント統括部
生産技術部



大賀 浩次
Hirotsugu Ooga
エンジンユニット
コンポーネント統括部
ユニット技術部