

1600N/mm² 級高強度ボルトの開発

Development of 1600N/mm² Class High Strength Bolts

高 島 光 男*

Mitsuo TAKASHIMA

高 田 健太郎*

Kentaro TAKADA

飯 田 善 次*

Zenji IIDA

森 誠 治*

Seiji MORI

要 旨

自動車にはその目的、用途に応じたボルトが数多く使用されており、一般的には700N/mm² 級から1200N/mm² 級がその主流を占めている。昨今、地球温暖化防止の観点から自動車の燃費向上の動きが活発化しており、ボルトも例外なく高強度化による小型軽量化を求められている。しかし従来技術でのボルトの高強度化は、遅れ破壊の発生確率が高くなり、量販車には適さない。我々はこの課題に対し、従来より遅れ破壊しにくいとされてきた高張力鋼線に着目し、困難とされてきた頭部成形に対し、Crの最適添加による材料改善、頭部成形中に軸部を加工硬化させる新成形法の適用、成形性良好なヘキサローブ形状の適用などの新技術の投入にてボルト成形を可能にし、1600N/mm²の高強度ボルトを開発した。その成果を03モデルのコンロッドボルトへ適用し、従来技術であればM12であったものをM9へ、重量的にも1本あたり80gの軽量化を達成した。

ABSTRACT

Many different types of bolts are employed in automotive applications for a variety of different purposes and uses, and their strength generally ranges from 700 N/mm² to 1 200 N/mm². The present increasing focus on increasing fuel economy to prevent global warming has led to the requirement to increase the strength of bolts in order to lower weight. However, increasing the tensile strength of conventional bolts increases the incidence of delayed fractures, and is therefore not suitable for mass-market vehicles. This project studied the use of high carbon steel rods, which are less susceptible to delayed fracture than conventional bolt materials, as a solution to this issue. The difficulty of heading when employing high carbon steel rods was solved by improving the material through the addition of the optimum amount of Cr, utilizing a new forming method in which the spindle is hardened during heading, and adopting a hexalobular shape with excellent formability. The application of these techniques made it possible to form bolts from high carbon steel rods, and has enabled the development of a 1 600 N/mm² class high-strength bolt. The new material and techniques have been used in the manufacture of the conrod bolts used in 2003 models, and have enabled the size of the bolts to be reduced from conventionally used M12 to M9, and the weight of individual bolt to be reduced by 80g.

1. まえがき

自動車には1台あたり1000点前後のボルトが使用されているが、その中でエンジン、トランスミッション用には、軽量・軽量化を目的に材料強度1200N/mm² 級の高強度ボルトが多用されており、一部、1400N/mm²級のコンロッドボルトも適用されている。しかし、自動車の軽量化はますます

重要課題となっている反面、より強度の高いボルトへの転換は遅れ破壊の発生確率が高くなるため、マルエージング鋼等の航空・宇宙・レース等の特殊用途に限って使用可能な高価な材料が必要となり、量販車である自動車への採用は困難な状況にあった。これらの課題に対し、経済性や品質の観点から最適な材料と製法を研究し、1600N/mm²級ボルトの開発に取り組んだ。

2. 材料設定

2.1. 遅れ破壊しない安価な材料

筆者らは量販車に展開可能で遅れ破壊しない最適材料の検討を行った。Fig. 1に鉄鋼材料の遅れ破壊と強度の関係を示す。鋼の引張強さが 1200N/mm^2 を超えると、遅れ破壊特性が低下する傾向にあり、この傾向は強度が高くなる程、顕著になる。この高強度域で遅れ破壊特性を満足している材料系は大きく2つのタイプがある。ひとつはマルエージング鋼系であるが、本材料は高価であり量産車ではコスト的に適用は困難である。もうひとつは非調質タイプの高張力鋼線である。この非調質鋼線は安価であり、かつ同一強度の調質タイプの高強度鋼に比べ、遅れ破壊特性に優れている。遅れ破壊は鋼中の水素が応力集中部へ集積し、亀裂を生ずることにより発生するが、高張力鋼線が優れている理由として主に、冷間伸線加工により伸線された微細組織や高密度の転位が水素拡散や亀裂進展を抑制することであると報告⁽²⁾されている。最近の高張力鋼線の適用例としては、明石海峡大橋のメインケーブルに、引張強度 1800N/mm^2 のワイヤが使用されていることがあげられる。筆者らはボルト用素材としては全く新規なこの非調質加工硬化タイプ材に着目した。

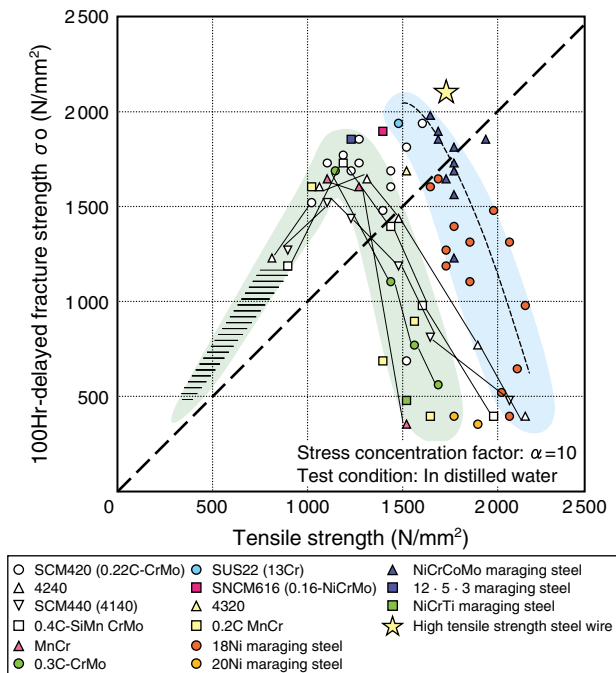


Fig. 1 Delayed fracture characteristics of various materials

2.2. 材料の課題

高張力鋼線は安価で遅れ破壊特性も優れている高強度材であるが、Fig. 2に示すように強化方法が引抜きによる加工硬化であるため、用途がワイヤ等に限られていた。しかし高張力鋼線を用いてボルトを成形する場合は、頭部が必要

Bolt manufacturing process

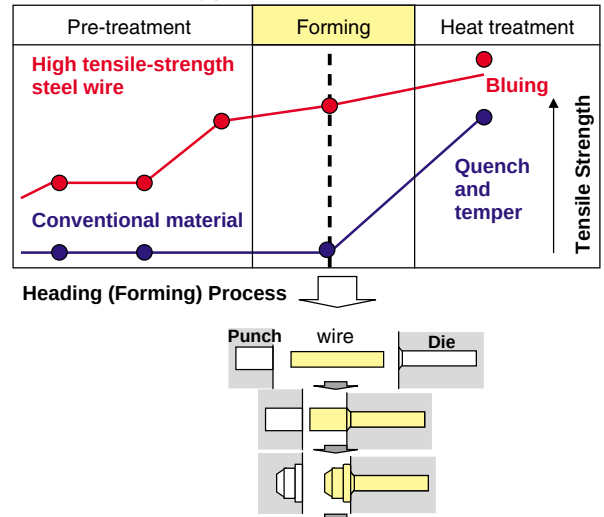


Fig. 2 Bolt manufacturing process

であり成形は非常に困難であると考えられていた。従来材料のボルトは素材を球状化焼鈍など、硬さを低くし頭部成形を行い、その後、焼き入れ焼戻しにより強化する工程をとるため成形性は問題にならなかった。

2.3. 材料の改善

高張力鋼線の高強度と成形性を両立させるために、素材段階での改善を行った。

通常の高張力鋼線はC-Si-Mn系の成分であり、強度向上のためにはSi, Mnの増加が一般的である。しかし従来の強度向上手法では絞り値が低下し、ヘッダの成形性の低下を招いた。従って、強度と絞り値を両立可能なCrに着目し、成分系の検討を行った。Si, Mn添加での強度向上はパーライト中のフェライトの固溶強化であるのに対し、Crの場合は組織の微細化による強化であり、成形性向上との両立が可能である。

Crの最適な量を設定するために、Table 1に示した一般的な高張力鋼線JIS-SWRS82BにCrを添加し検証した。Cr添加量と絞り及び材料組織をFig. 3, Fig. 4に示した。Crを添加すると絞り値は強度を維持したままCr量0.2%までは向上するが、それを超えた量を添加するとその効果は低下する。これは組織から判るように、Crはオーステナイトからパーライトへの変態を遅らせることで低温にて組織を形成させ、微細化組織を形成させるが、過剰に添加した場合、変態終了時間が長くなり、初期に変態したセメンタイトが時間経過と共に分断、球状化するためである。この結果より、Crの最適添加量を0.2%とした。

Table 1 Chemical composition

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.80 ~ 0.85	0.12 ~ 0.32	0.60 ~ 0.90	≤0.025	≤0.025	0.20

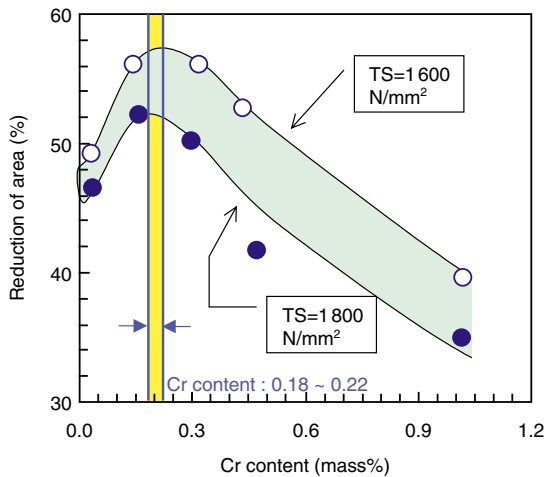


Fig. 3 Relationship between Cr content and reduction of area

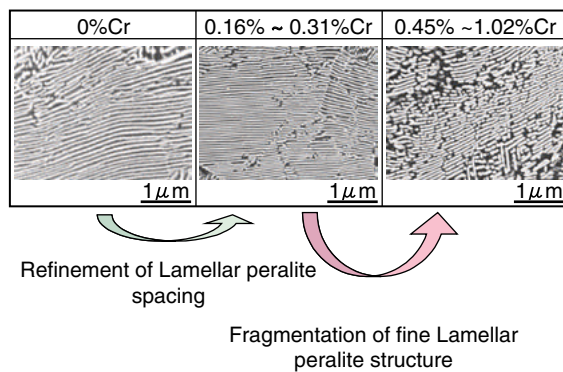


Fig. 4 Change of microstructure with changing Cr content

3. 新成形法の適用

材料の特性を活かした新成形法案の検討も行った。

3.1. 材料の伸線後の特性

本材料を伸線した場合の特性を Fig. 5 に示した。この材料は引張方向に塑性変形させると、引張強度が向上し、圧縮降伏点が小さくなる。この現象をバウシinger効果という。この効果を活かしてボルトの成形性を向上させる新しい成形方案を設定した。

3.2. 新成形法案

バウシinger効果を活用するために、事前に適度に伸線したワイヤを用いて、Fig. 6示した新しい成形方案を設定した。現行方案における投入ワイヤ径と完成材の軸径は同一サイズである。この方案に高張力鋼線を適用した場合、投入ワイヤの段階で高硬度であるため、頭部成形が困難である。従って、筆者らは低硬度で太径のワイヤを用いて、成形工程のなかで軸部を加工硬化させながら、頭部を成形する方案を用いた。この方案は投入ワイヤが低硬度だけでなく、完成頭部径に近いことから、頭部の成形が容易になる。しかし、

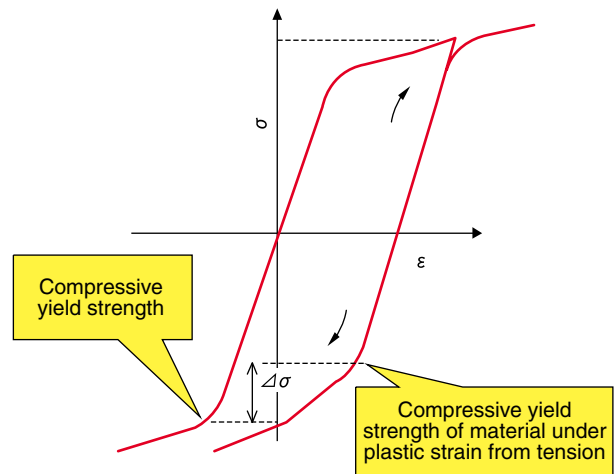


Fig. 5 Bauschinger effect

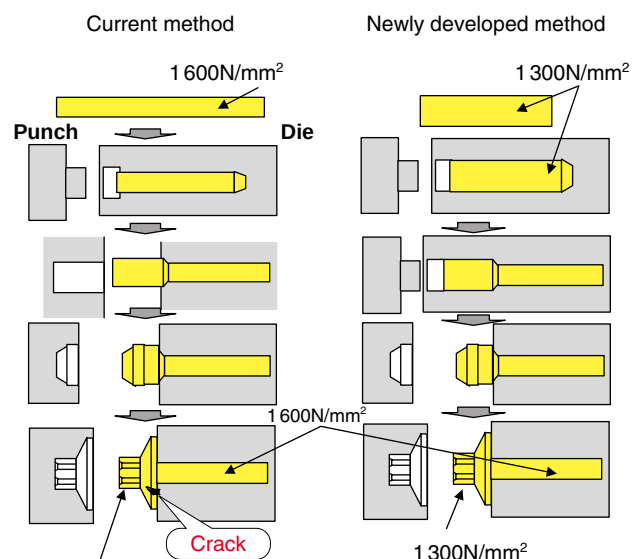


Fig. 6 Current method and newly developed method

この方案を用いる場合頭部の強度保証を考える必要がある。なぜなら、従来の焼き入れ、焼戻し材においては頭部と軸部は同一硬度であるが、この場合は頭部の一部に低硬度部が存在することになるためである。

3.3. 頭部強度保証

頭部強度を解析するために、Fig. 7 にボルトを締め付けた場合の FEM 解析結果、ヘッド後のボルト硬度分布、またその比率を示した。硬度は強度と比例関係にあるため、硬度分布を応力分布で割った値は各部の強度余裕度を表すこととなり、軸部の値を1とした場合の各部の値を示した。これからわかるように頭部の値は全域において1以上であり、最小値は軸部にある。このことは最弱部は軸部であり、頭部ではないことを表しており、実際の引張試験においても従来のボルトと同様に、破断部位は軸部(ねじ部)であることが確認された。

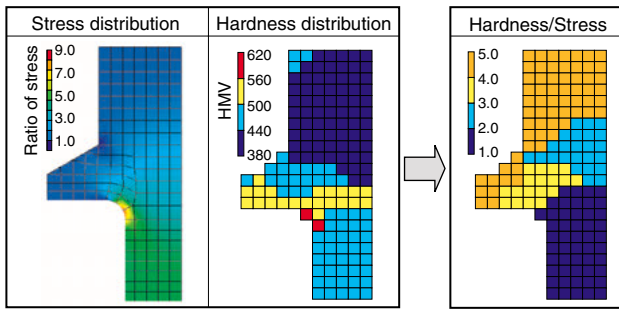


Fig. 7 Stress and hardness distribution in bolt

3.4. 減面率

パウシンガー効果を活用し、新成形方案を用いるとワイヤが初期から伸線され減面されていくが、成形性向上のために付着させている固体潤滑皮膜の膜厚減少が問題となる場合があるため検討が必要である。Fig. 8に固体潤滑皮膜残量と伸線減面率の関係を示す。この固体潤滑皮膜とは鉛パテンティング後にヘッド工程での成形性向上を目的に付着させる処理で、減面に伴い膜厚は減少する。従って、伸線工程とヘッドでの減面による膜厚低下と、パウシンガー効果のバランスした最適値として、伸線後減面率 20 ~ 25%を設定した。

Relationship between reduction in drawing and coating thickness

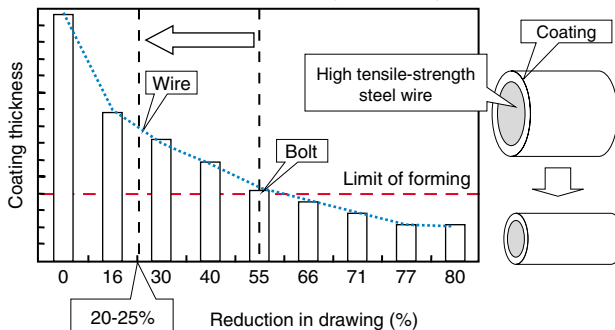


Fig. 8 Relationship and reduction of area in drawing and amount of lubricant adhering

4. 形状からの成形性向上

4.1. 頭部形状

通常のボルト頭部形状は、Fig. 9 に示したように六角形状が主流であるが、丸材を六角形状に成形するには六角隅部へ材料を充填するには加工率が大きく、高張力鋼線の場合、ヘッド性が著しく悪化してしまう。そこで Fig. 10 に示したような、丸材から低い加工度で成形できるヘキサローブ形状を採用した。ヘキサローブ形状は、完成形状が比較的丸形状に近いので、素材からの加工率が小さく、成形が容易である。我々は、このヘキサローブ形状の成形性をさら

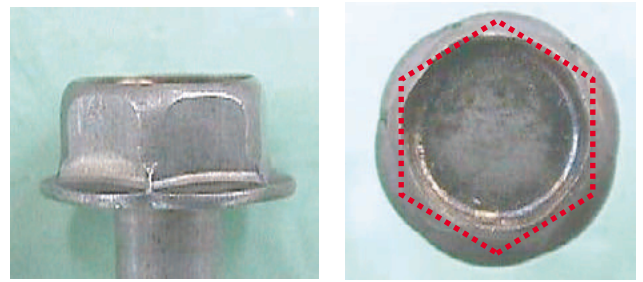


Fig. 9 Hexagon

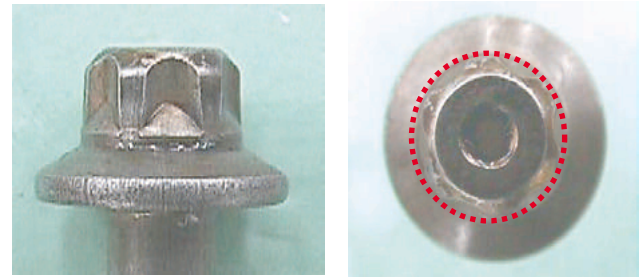


Fig. 10 Hexalobe

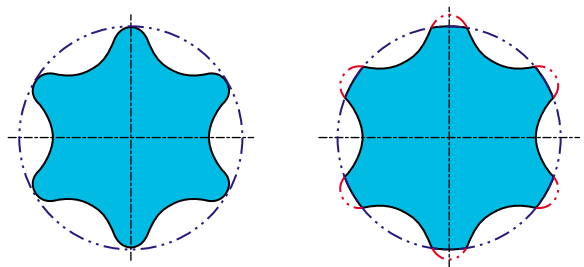


Fig. 11 Improved hexalobe

に向上させるための改良を行った。Fig. 11に示したように、従来のヘキサローブ形状の山部を一部削除して、山谷間の凹凸差を小さくした。このことは完成形状が丸形状に近づくため、加工率が小さくなり成形性を向上させることに寄与した。しかし、山部の一部削除は締付けトルクの限界値の低下を招く。これを回避するために、1ランク大きいヘキサローブ形状を基に山部の一部削除を行った。このことは接触面積が少なくても、半径が大きいため、従来形状と同等の大きなトルクを与えることが可能であり、また1ランク大きい工具を使用すれば市販品を使用可能である。

Fig. 12には改良したヘキサローブ形状と六角形状の同一外形における伝達できるトルク値を示した。ヘキサローブ形状は、六角形状と比較し小さな寸法で多くのトルクを伝えることができる。これによりヘキサローブ形状はヘッド性向上だけでなく、トルク伝達、頭部軽量化の観点でも優れていることがわかる。このことは本テーマの目指す、軽量、小型化に寄与するため好都合である。高強度化によりボルト軸部が小さくなり、さらに頭部形状も必要な締付けトルクに対し最小の重量での設定が可能となった。

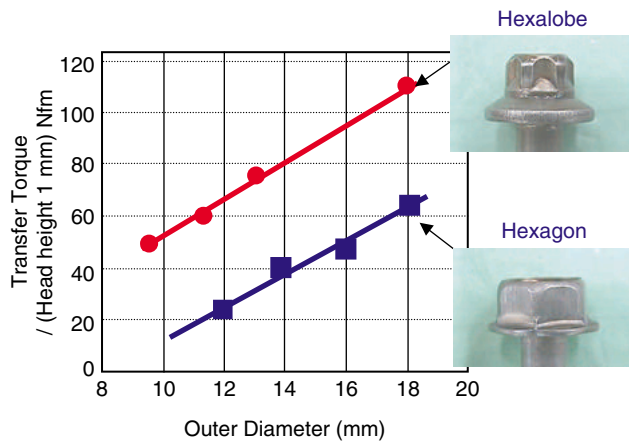


Fig. 12 Impact of hexalobular heads on weight reduction

4.2. 転造性向上

ヘッダ後には、ねじ加工を圧造で行う転造もあるが、この工程においても、成形性の向上が必要であった。そこで Fig. 13 に示したようにねじ谷底Rを大きくし、ねじ山とねじ谷底との高さを低くすることで成形性を向上させた。この谷底Rを大きくすることはねじの疲労強度を向上させることにも寄与し、航空、宇宙用ねじにおいては、その目的で使用されている仕様である。今回の1600N/mm²ボルトで、この疲労強度の向上の検証を行い、Fig. 14 に示した。0.2%耐力に対し80%の平均応力(ボルトの場合は軸力)条件では9%の疲労強度向上が確認された。

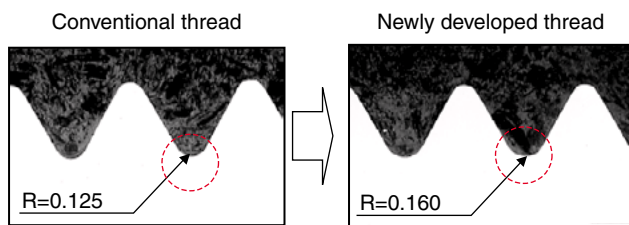


Fig. 13 Increasing the radius at the thread

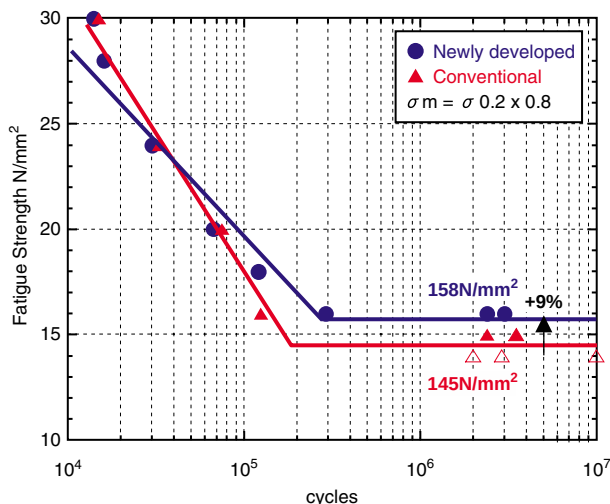


Fig. 14 Fatigue strength of newly developed bolt

また、この技術を適用した場合、おねじとめねじの接触面積が、わずかであるが小さくなる。コンロッドのように鉄鋼系のめねじでは接触面の座屈の問題はないが、アルミ等に適用する場合には、面の座屈に影響することがあり、この場合は、はめあい長さの延長にて対応は可能である。

5. 応力緩和対応

高張力鋼線のような非調質材は使用環境が高温の場合は応力緩和(リラクセーション)が起こることが知られており、自動車の場合はエンジンやトランスミッション等に適用した場合がこれにあたる。Fig. 15 に初期締め軸力とエンジン環境と同等の140℃に保持した場合の軸力を示した。これから判るように、材料強度の限界付近で使用した場合高張力鋼線では焼き入れ焼戻し材に比べて熱による応力緩和が大きく、このままでは使用にあたって軸力低下という問題がある。尚、比較している焼き入れ焼戻し材は、前述したように、高応力域では遅れ破壊の問題がある。従って本試験はあくまでも、焼き入れ焼戻し材の遅れ破壊を無視して、応力緩和についてのみの結果である。

高張力鋼線の応力緩和は伸線加工時に導入された転位が温度上昇により活性化し、応力場の下で移動することにより、結果的に変形することが原因である。従って、これらの動き易い転位に、熱エネルギーを与えることでC、Nといった軽元素を活性化し、不安定な転位部に侵入させ、不動転位化するというコットレル雰囲気を導入することを検討した。コットレル雰囲気を導入するためにC、Nが十分に拡散する200～300℃に保持することにより、Fig. 15 に示すように調質材と同等の特性を満足することができた。

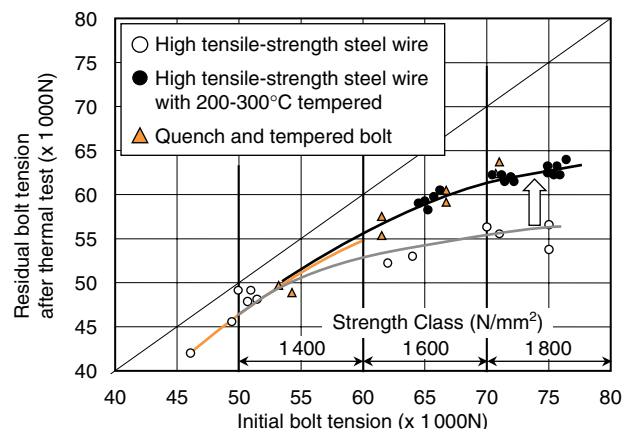


Fig. 15 Relationship between initial bolt tension and residual bolt tension

6. 適用効果

本技術を用いた事例を現行材でボルト製造した場合とて比較してFig. 16に示した。コンロッドボルト単体場合、現

行材であれば M12 のねじサイズであったものを、M9 ヘサイズダウン、重量低減としてはコンロッド 1 本あたり、80g の軽量効果であり、コンロッドを含めた場合は 2 本あたり 240g の軽量効果が得られ、大端部の寸法も外形 88mm から 81mm への小さくできた。

この軽量、軽量化効果はさらにエンジン全体に波及しており、その効果を Fig. 17 に示した。赤線で示したレイアウト図が従来技術で設計した場合であり、青線が開発技術を適用した場合の設計である。青線の寸法仕様は量産エンジンと同一であり、今回、新技術を適用した成果は、従来エンジンの基本骨格のままで、出力を大幅に向上できたことである。

また、本技術を車全体のボルトへ置換した場合の軽量化効果を検討した。従来のボルトサイズと強度から同等の軸力を達成できるサイズまで小型化した場合の効果は、ボルトのみの軽量化で 7~8 kg/台であった。さらに、コンロッドのように周辺部品の小型、軽量化を考慮するとさらに大きい効果が期待できる。

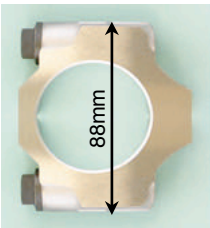
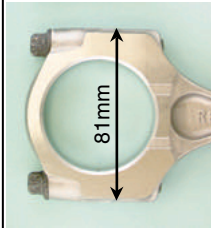
Conventional material (1 200 N/mm ² class)	Newly developed material (1 600 N/mm ² class)	Weight reduction per unit
 Size: M12 x 1.25	 Size: M9 x 0.75	- 80g
 88mm	 81mm	- 240 g

Fig. 16 Application for connecting rod bolt

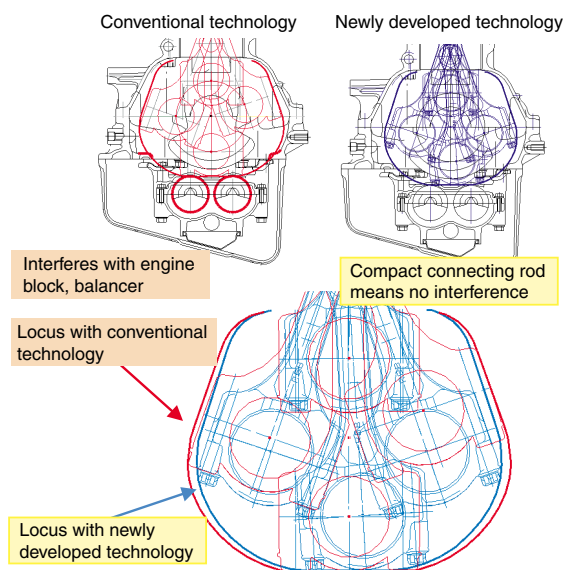


Fig. 17 New engine with newly developed connecting rod bolt

7. まとめ

1 600N/mm² 級ボルトの開発として、従来ボルト成形には不適とされてきた高張力鋼線に着目し、課題であった成形性を以下に示す観点で改善した。

- (1) 高張力鋼線に対し最適な Cr 添加量として 0.2% を設定し絞り値の改善を行った。
- (2) 低硬度、太径ワイヤから軸部を加工硬化させながら頭部を成形する方案を適用した。
- (3) Baushinger 効果と固体潤滑皮膜残量をバランスさせた最適減面率を 20 ~ 25% とした。
- (4) 頭部形状としては成形性と軽量化の観点からヘキサローブ形状を採用した。

最後に、非調質材特有のリラクセーション対策として、最適なブルーイング条件を設定した。

これにより、世界初の遅れ破壊に優れた 1 600N/mm² 級ボルトの量産化に成功した。

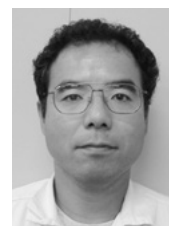
謝 辞

最後に本開発においてボルト製造に多大な御苦勞，御尽力を頂いた(株)佐賀鉄工所，材料改良を研究して頂いた(株)神戸製鋼所の関係者の皆様に感謝の意を表します。

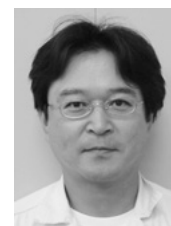
参考文献

- (1) 松山晋作：遅れ破壊，日刊工業新聞社，p.67 (1989)
- (2) 高井健一：強伸線パーライト鋼の水素存在状態と遅れ破壊，まてりあ，39 巻，3 号，p.239-242 (2000)

■ 著 者 ■



高 島 光 男



飯 田 善 次



高 田 健 太 郎



森 誠 治