

高疲労強度焼結鍛造コネクティングロッドの研究

Research of High Fatigue Strength for Powder-forged Connecting Rods

高 田 健太郎*
Kentaro TAKADA

木 暮 亮 介*
Ryosuke KOGURE

小 林 輝 夫*
Teruo KOBAYASHI

要 旨

焼結鍛造コネクティングロッド(以下コンロッド)の素材の高疲労強度化を研究した結果を報告する。

従来の主要な混合粉末(鉄, 炭素, 銅)に対し, 特殊な合金成分を添加せずに配合量の調整と焼結温度条件の制御によって焼結鍛造素材の加工性を低下させずに高疲労強度化を図った。疲労強度の向上には銅によるフェライトの固溶強化だけでなく素材の表面欠陥である空孔を低減させる方法が有効であるが, 含有炭素量を低減することで塑性段階において形成される欠陥を大幅に減らすことができた。

本研究の結果を元に高強度化した焼結鍛造素材は従来の素材に対して疲労強度を 30%以上向上させることができ, 焼結鍛造コンロッドの適用範囲を, 従来よりもさらに高出力, 高負荷エンジンにまで広げることができた。

ABSTRACT

This paper reports the results of research on increasing the fatigue strength of powder-forged connecting rod materials.

The fatigue strength of powder-forged materials was increased without adding special alloy elements or lowering workability by adjusting the ratios of the conventional main mixed powders (iron, carbon, copper) and by controlling the sintering temperature conditions. In addition to solid solution strengthening of the ferrite using copper, reducing porosity, which is a material internal defect, is also an effective method of increasing fatigue strength. Reducing carbon content greatly reduced the occurrence of defects in the forging stage.

The results of this research showed that the fatigue strength of high strength powder-forged materials can be increased by 30% or more over that of conventional materials, resulting in powder-forged connecting rods to be applied to even higher output and higher load engines than before.

1. まえがき

自動車の省燃費化, 高出力化にはエンジン部品においても軽量化が重要であるが, 特にピストン, クランクシャフト, コンロッドなどの主運動系部品の軽量化はエンジン性能の向上に大きく影響を及ぼす。コンロッドの軽量化に関しては, 鉄鋼材料以外にチタン合金などが一部実用化されている⁽¹⁾が, コストが高いため, 一般の乗用車用エンジンにおいては鉄鋼材料の高強度化によるサイズダウンで対応している⁽²⁾。

欧州含め日本では熱間鍛造成型技術が進んでおり, 鋼材の高強度化が盛んにおこなわれてきたのに対して, 北米で主流の焼結鍛造材は, 素材の脆性を利用してコンロッドの大端部を破断分割し形状を合理化し軽量化できる利点

があった。ところが, 近年は熱間鍛造製法において高強度化に加え焼結鍛造材と同様に破断分割も可能な鋼材が開発され軽量化が大幅に進歩した⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。これに対し, 焼結鍛造素材の強度向上には, 合金添加元素の増量⁽⁶⁾もしくは新規成分の追加で達成可能であるが, それは硬度上昇により被削加工性を損ない大量生産においては効率低下を招くために現実的ではなかった。

このため, 焼結鍛造で製造されたコンロッドに対し熱間鍛造で製造された場合は強度が30%以上高いため同一重量の設計ができず, 生産拠点に応じたフレキシブルな生産対応を図ることができなかった。

そこで, 同一仕様のエンジンに互換性を持たせることができるよう熱間鍛造材と同等の強度と生産性を有する焼結鍛造素材が必要であった。

*四輪開発センター

2. 研究のねらい

コンロッドを軽量化するために材料の高強度化が求められるが、この場合の高強度化は、高回転までまわすエンジンの特性上、特に疲労強度の向上をねらいとする。

また従来の焼結鍛造コンロッドと同様に大量生産ライン流動を前提とした場合、被削加工性が低下すると刃具や工具の交換頻度が増しコスト上昇へとつながり、生産性低下の懸念もある。そのため、従来と同等の被削加工性の確保し既存の量産ラインにそのまま流動できることをねらいとした。コンロッドの加工工程において近年主流となっている破断分割工法は実施を前提とした。

3. 材料成分設計

3.1. 材料成分設計の考え方

従来の焼結鍛造コンロッドの主要成分は、Fe-0.5%C-2.0%Cu および快削成分の MnS にて構成されている。

このコンロッドを高強度化する手法としては、

- (1) C, Cu 増量添加による母材強度の向上
- (2) Cr, Si, Mn 添加による焼入れ性向上
- (3) V, Ti, Nb 添加による炭化物析出による基地強化が考えられる。

しかしながら、(1)の母材強度向上手法では硬度上昇に伴う加工性の低下を招く。そのために被削加工性改善効果のある特殊な粉末を追加配合する例が報告されている⁽⁷⁾が、この場合従来の混合粉末に比べコストが高くなる。(2)の焼入れ性向上に効果的な元素(Cr, Si, Mn)は焼結時に酸化し

やすく、これらの氧化物はコンロッドの欠陥となり強度を低下させるので適当でない。また(3)の炭化物析出により母相を強化する元素(V, Ti, Nb)は、同時に粉末として混合する段階で酸化されやすいため還元する必要がある。しかし粉末混合時の還元は困難であるため合金化したプレアロイ粉末として混ぜる必要があり、プレアロイ粉末の開発からはじめなければならずコスト上昇も予想される。そこで加工性を低下させずに高強度化を図る目的で、主要成分は変えずに粉末の配合比率と焼結条件の最適化を検討する。

3.2. 主要材料成分配合量の増減

まず、従来材の焼結鍛造コンロッドにおける主要成分の C, Cu 配合量について硬度と疲労強度との関係を検討する。Fig. 1 は、C, Cu 量に対する素材硬度および回転曲げ疲労強度の関係を示す。それぞれ C, Cu とも増量添加すると疲労強度と硬度はともに上昇するが、硬度の上昇に対する C 量の影響は Cu より大きい。疲労強度を向上させかつ加工性に影響の大きい硬度の上昇を最小限に抑えるためには C を低減し Cu を増量するのが効果的である。これらの材料の組織を Fig. 2 に示す。これによると、C 量を低減すれば硬度上昇の原因である硬質パーライトを減少でき軟質なフェライトを増加できる。しかし、このままでは強度低下となるのでフェライトを固溶強化元素の Cu で強化する。Cu が固溶しやすいフェライトの割合が増えれば Cu の飽和限界も上昇し、より多くの Cu が固溶可能となる。この効果により硬度が上昇する要因である硬質パーライトを減少させ、かつ軟らかいフェライトを強化でき、硬度を上げずに疲労強度の向上が可能となる。

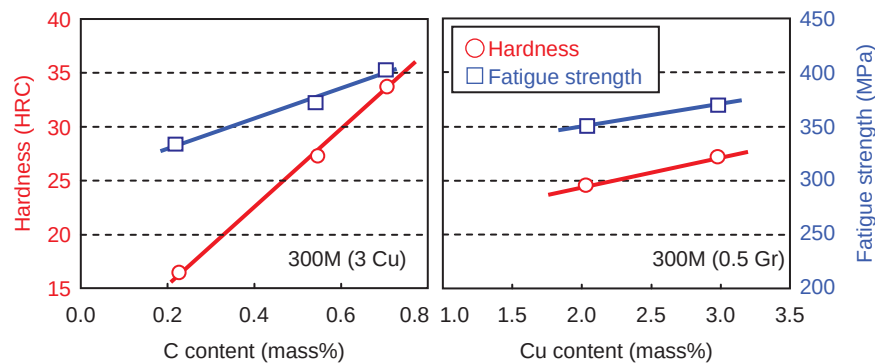


Fig. 1 Relationship between C, Cu content and hardness, fatigue strength

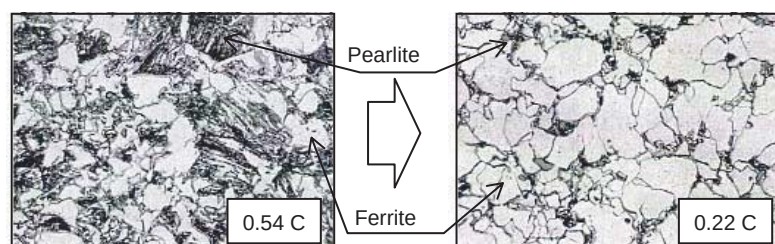


Fig. 2 Change in microstructure due to decreased C% of powder metal-forged test pieces (originally at 400X)

次に、被削加工性についてC、Cuの影響を検討する。被削供試材はコンロッドとほぼ同等の条件で製造した焼結鍛造素材とし、刃具はコンロッド結合孔加工用の超硬ドリルを使用した。Fig. 3 にドリル穿孔試験条件および結果を示す。C が一定で Cu を増加した場合、硬度上昇のために刃具磨耗量は増加する。しかし、C を低減して硬質パーライトを減少させ Cu を増加した場合、硬度は若干上昇するが刃具の磨耗量は低減することができる。このことから C を低減し Cu を増加させるのは有効な手法である。

また、一般的に焼結材の疲労強度には焼結密度が重要な因子となるが、焼結鍛造をおこなうと全体が真密度に近い状態まで上昇する。しかし表層部には微細な空孔が多数存在している。この空孔は極最表層のものはショットピーニングなどにより潰せるが、少し内部に入った層には残存す

るため疲労破壊の起点となり疲労強度を低下させてしまう。Fig. 4 に従来の焼結鍛造コンロッドの桿部に存在する空孔を示す。このような空孔は一般的に熱間鍛造時に金型との接触によって素材が冷却される時に生成するといわれている。つまり、粉末を加圧し固めた圧粉体を焼結すると、混合している粉末である Cu(融点 1083°C)は溶解しフェライトへ固溶し拡散する。その際、Cu粉末のあった場所にできる空隙が熱間鍛造する時に完全に潰れてしまうと空孔は存在しない。素材中心部や変形度合いの大きい部分はほぼ完全に充填されるのに対して、表層は鍛造金型と接触して温度が低下し、変形抵抗が増加するので潰れ難くなるため空孔として残存しやすい。このため低温時の変形抵抗を低下させられれば表層の空孔の減少が期待できると考えた。また、熱間鍛造時の素材の温度が1000°C前後であることから、この温

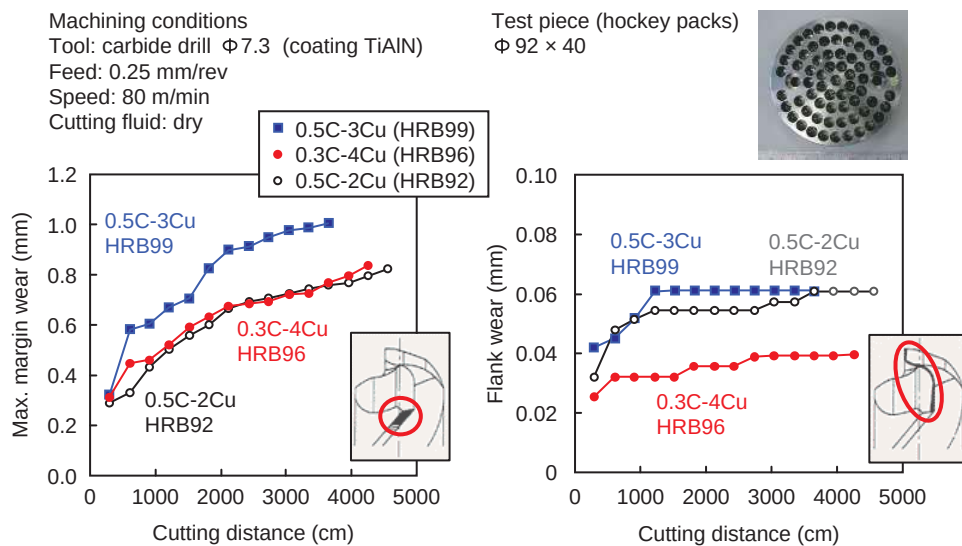


Fig. 3 Margin and flank wear in function of drilling length

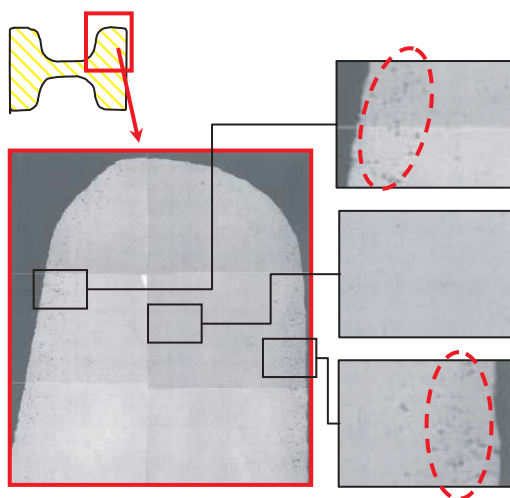


Fig. 4 Porosity of "I-Beam" for connecting rod (after shot-peening)

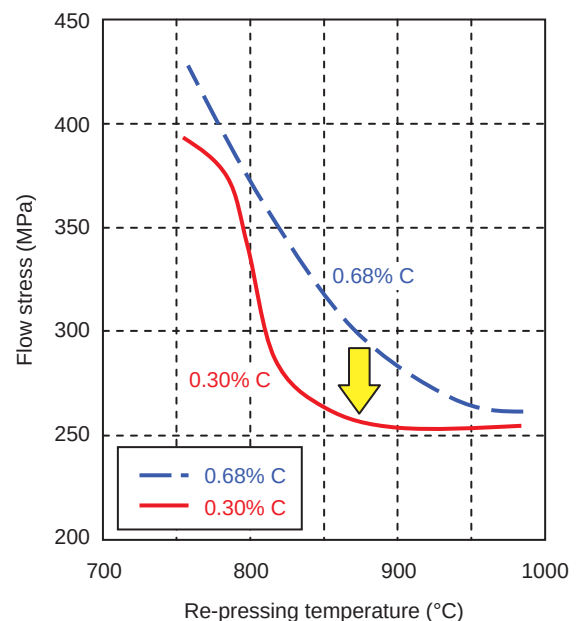


Fig. 5 Relation between flow stress and pressing temperature

度よりやや低い温度域で表層の空孔生成を抑制すればよい。
Fig. 5 に示すように、C を低減すれば 850-900℃ といった低温域での変形抵抗を抑えられる⁽⁸⁾ ので表層に存在する空孔を従来材の場合よりも細かくできると考えた。

以上より、コンロッドの被削加工性を低下させずに強度向上するためには、主要成分である C を低減し Cu を増加させる方法が極めて有効であるとわかった。

3.3. 開発コンロッドの材料成分設計

材料成分を検討する上で、表面空孔が疲労強度へ与える影響および破断分割性を考慮するためコンロッド実体を試作し検証をおこなった。粉末はアトマイズ純鉄粉(300ME)、黒鉛(グラファイト)、2.0wt% 銅粉および 0.32%MnS 合金粉を混合して用いて、評価した焼結鍛造コンロッドの鍛造後成分配合が 0.13-0.57%C、1.6-4.6%Cu となるように調整した。試験用コンロッドの試作工程を Fig. 6 に示す。

最初に C 量の最適化について検討をおこなう。得られたコンロッドの桿部の表層から深さ 0.5mm × 幅 0.5mm にある空孔の数、大きさ、形状の画像解析の結果と C 量の関係を Fig. 7 に示す。従来は 0.5%程度であった C を低減すれば空孔の大きさは小さくなり数も減少する。さらに、空孔の形状は 0.35%以下まで C を減らすと球状化する事象を確認した。

空孔の量が少なくそれぞれの空孔が小さくなりさらに球状に近付けば空孔への応力集中が低減できると推定でき、コンロッドの表面近傍にある空孔が疲労破壊起点に成り難いと考えられることから、C 量は 0.35%以下をねらう必要

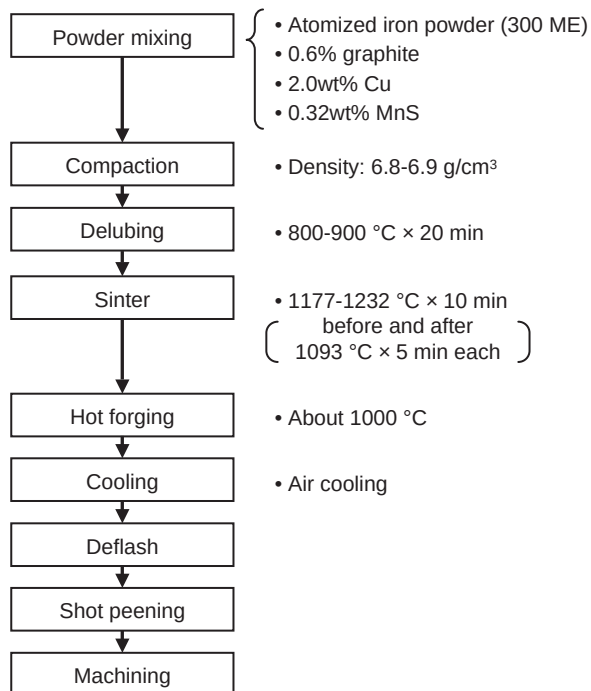


Fig. 6 Production process and condition of connecting rod

がある。

Fig. 8 は C 量と衝撃特性の関係を示す。ここでは JIS Z 2202 V ノッチ衝撃試験片を用いて常温にて試験をおこなった。C 量が 0.25%以下では大きく衝撃値が上昇する。シャルピー衝撃試験片と異なりコンロッドには破断分割部にクランクへの締結のための結合孔があるので、実際のコンロッドを破断分割して面性状を確認した。Fig. 9 に実際のコンロッドを破断分割した分割面の電子顕微鏡画像を示す。ここで、破断起点となる大端部には深さ約 1.0mm 程度の V ノッチを機械加工にて施した。破断分割部は、ほぼ全面同じ面性状が得られた。0.25%C 以上のコンロッドにおける破断分割面は、へき開破面が出現するが、0.2%C 以下の分割面に

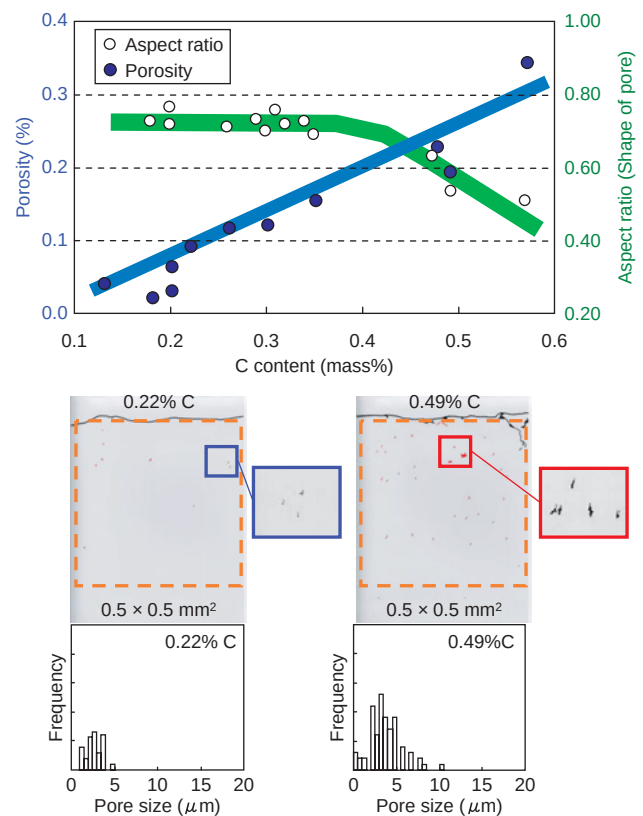


Fig. 7 Relation between C% and porosity, shape of pore (Photo: result of pore image analysis for C content)

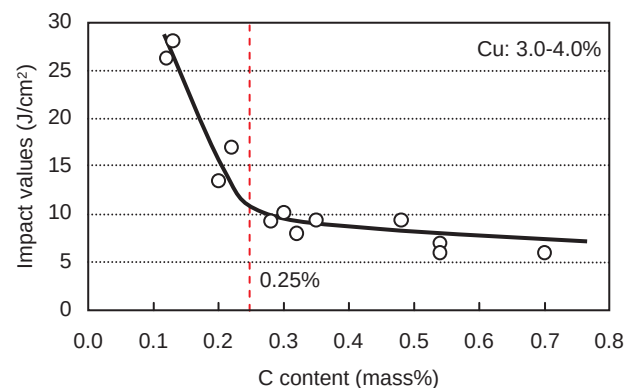


Fig. 8 Relation between impact value and C content

は延性破面を示すディンプルが見られる。このディンプルはコンロッドの破断分割後の再組付け時に分割面の密着を妨げるものである。この結果より、C 量を低減し過ぎると破断分割に対して弊害が現れるため、破断分割を前提とした場合 C 量は 0.25% 以上をねらう必要がある。

続いて Cu 量の最適化について検討する。Fig. 10 に Cu 溶解と拡散についての概念図を示す。従来材に対し Cu を増量した場合、焼結炉内で Cu が溶解 (STEP 2) してから従来材同様に Cu の拡散が開始するが、従来材の場合には拡散が完了していた条件でも Cu の拡散が不十分 (STEP 3) となる。これでは強化の効果を完全に得ることができないばかりか、未固溶 Cu として存在した場合には強度を著しく

阻害することになる。そのため、増量した Cu を完全に拡散 (STEP 4) させる必要がある。Fig. 11 に示す組織は実際に焼結炉内で拡散が不十分だったために Cu が溶け残った組織 (STEP 3) と、Cu が完全に拡散した組織 (STEP 4) を示す。溶け残った Cu は鉄粉の隙間に入り込むように存在し鉄粉間の密着を妨げているのが確認される。そこで Cu を増量した場合に STEP 3 から STEP 4 へ移行させる拡散促進方法を検討する。

Cu の拡散を一次元の拡散距離で考えると、拡散距離は拡散係数と時間に比例し拡散係数の温度依存性は以下のように入力式に従うので、拡散は温度と時間に比例する。

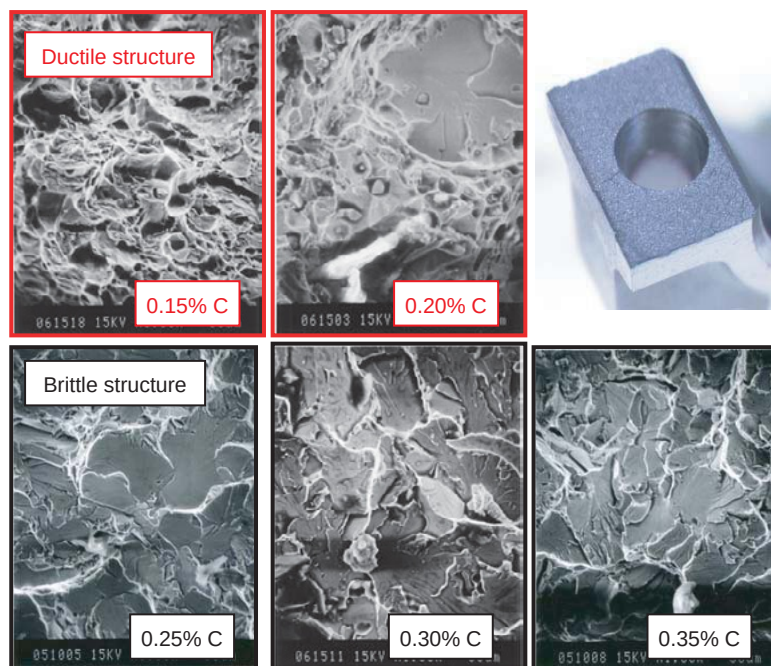


Fig. 9 SEM micrographs of fracture surface

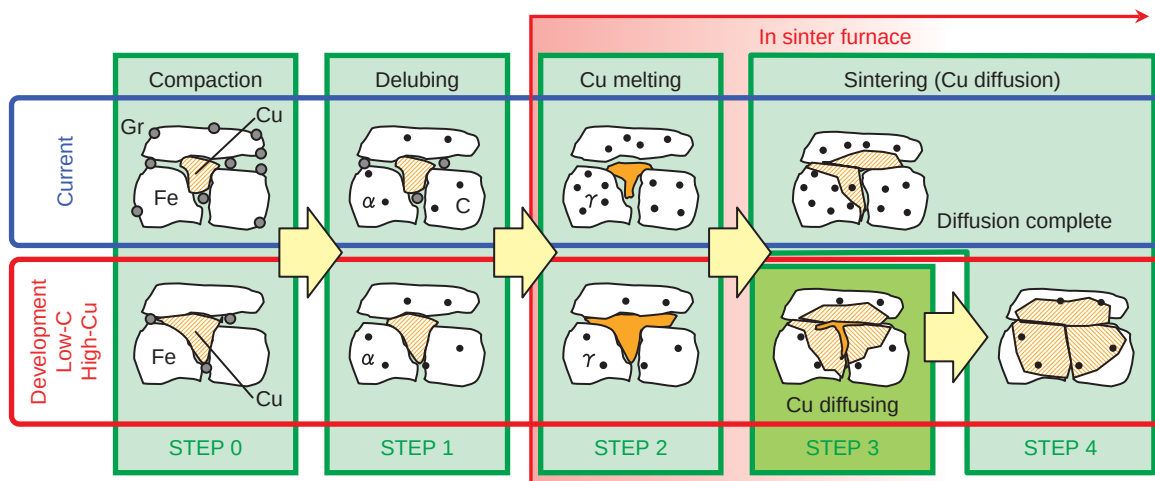


Fig. 10 Image of Cu melting and diffusion for high Cu rods in heat treatment process

$$\text{拡散距離} : d \propto \sqrt{Dt}$$

$$\text{拡散係数} : D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Q : 活性化エネルギー

R : 気体定数

T : 温度

t : 時間

Cuの拡散状況を調査するために焼結温度と時間の条件を変えたテストピースにおいて、焼結炉から取り出した直後のコンロッドの温度である1066℃での高温引張強度試験を実施した。Fig. 12に、それらの焼結条件より上記拡散式から計算で求めた一次の拡散距離を整理した。また、テスト

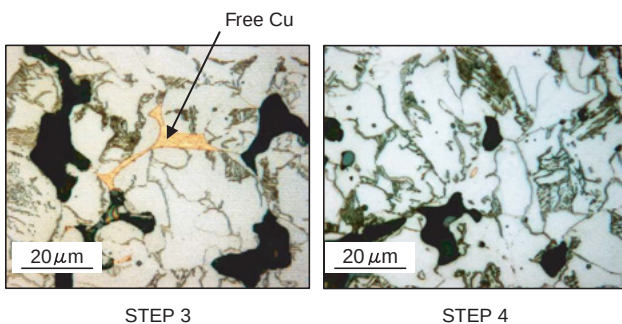


Fig. 11 Microstructure for high Cu rods in heat treatment process

ピース中の Cu の濃度分布をマッピングして Cu 固溶拡散状態を示した。これらの結果によると、焼結後の強度が低い領域では Cu は元の粉末粒子の表層に高濃度に分布しているのに対し、強度が確保されている領域においては粒内にまで拡散の均一化が進んでいる。十分に Cu が拡散されていないと高温強度が確保されないため、Cuを増量添加した場合、粒内まで拡散させる焼結条件の設定が必要といえる。

純粋な Fe-Cu 系ではオーステナイト中に固溶する Cu 量は 1094℃の温度下でおよそ 7.5-9%といわれており⁽⁹⁾、Fe-C-Cu系では理論上オーステナイト中への固溶限は約 6%と報告されている⁽⁹⁾。また、フェライト・パーライトの二層組織を有する焼結鍛造コンロッド実体においても C 量が減少すればフェライト率の増加に伴い Cu 固溶限は増加する傾向があると考えられる。Fig. 12に示した従来の条件では Cuが約 3%までであれば粒内へ拡散の均一化が可能であったが、仮にこの条件に対して、1.5 倍である 4.5%まで Cuを増量したとすると Cu の拡散も従来の 1.5 倍程度促進する必要がある。そこで、本焼結温度および時間と模擬的に計算した Cu の拡散距離との関係を Fig. 13 に示す。初期段階では一定時間に対する拡散量は多く、温度を上昇させれば一層の促進効果がある。ある程度の時間が経過すると、拡散量は定常化し増加幅も穏やかになる。この計算結果より従来に対して拡散を促進させる方法としては、焼結温度の上昇と焼結時間の延長が考えられるが、温度を50-60℃上昇する場合と時間を約 2 倍に延長する場合ではほぼ同程度拡

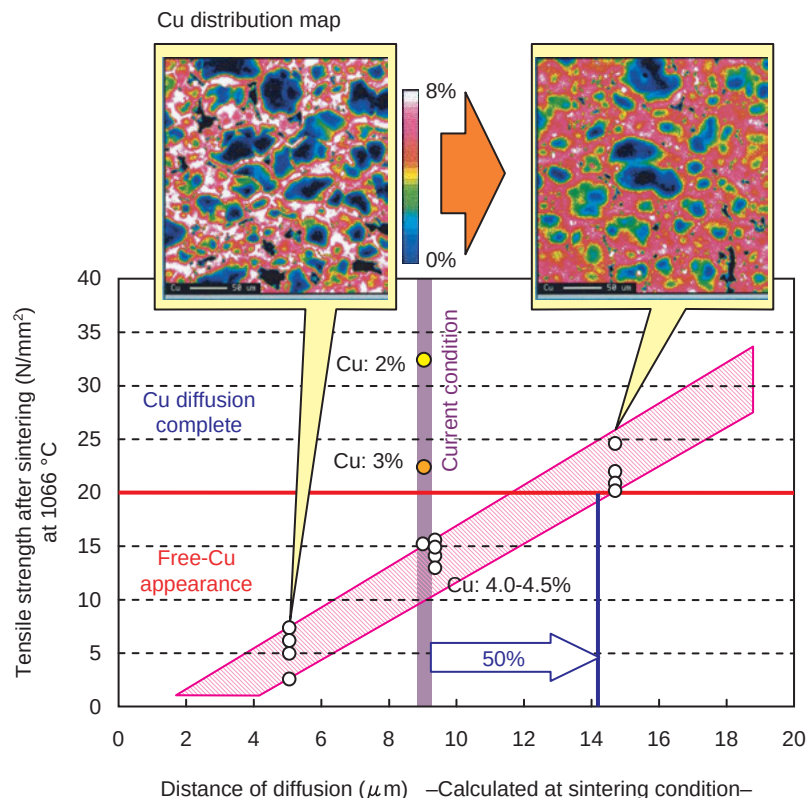


Fig. 12 Relation between high temperature strength and Cu diffusion

散促進の効果があることがわかる。量産条件に対して焼結温度を上げられる余裕があるなら、Cu拡散を促進する方法として焼結時間を延長するよりも効果的であると考えられる。本研究においては量産性を考慮し、焼結に要する時間を一定とし本焼結温度の上昇でCu増量添加に対応した。焼結温度設定は焼結炉の性能および能力を鑑みて本焼結温度を約1260℃を上限とした。

ねらいとするC量0.25-0.35%の範囲において、固溶限までCuを増量することは可能だが、焼結温度をさらに上げなければ完全に拡散するために非常に時間を要すると思われる。そこで、量産性を考慮してCu量は4.5%を上限としてC量0.3%, Cu量4.5%の素材を用いて焼結温度の影響を確認した結果をFig. 14に示す。これによると、残存する未溶解Cuは1180℃以上ではなくなり、完全に固溶

しているのが確認された。この結果より、本焼結温度を1180℃以上にした場合、C量が0.3%において実体コンロッドで4.5%程度のCuであれば完全に固溶可能と確認できた。

上記より、コンロッドの主要成分であるC, Cu量の成分配合と焼結条件の考え方を以下に示す。

C量は空孔を縮小化かつ球状化するために0.35%以下に低減し、破断分割時にへき開破断面を得る目的で0.25%以上とする。Cu量は固溶する限り添加できるが、量産性を考慮して4.5%とし、焼結時間を従来同等とした場合の焼結温度はCuを完全拡散させるため約1180℃以上とし量産炉の能力より約1260℃を上限とする。

この成分範囲を元に硬度と疲労強度の関係を実際の部品を用いて検証した。

4. コンロッドの疲労強度

主要材料成分の配合をかえたコンロッドの桿部の強度を評価するのに、コンロッド実体での疲労試験をおこなった。Table 1に実体疲労試験に用いたコンロッドの主要成分のC, Cu配合量を示す。また比較用として破断分割には不適であるが実体疲労試験を実施したC量が0.25%以下の焼結鍛造コンロッド、従来の一般的な焼結鍛造コンロッド、C, Cu増量による高硬度焼結鍛造コンロッドのC, Cu成分配合量についても同時に示す。

各成分配合のコンロッドの疲労試験結果をFig. 15に示す。疲労試験は引張-圧縮($R = -1$)のモードでおこない、各々のコンロッド実体の破断部位近傍の硬度とS-N曲線より疲労限を求めた。この結果より、従来の粉末にC, Cuを単純に増量添加した場合は疲労強度が上昇すると同時に硬度も上昇し目標とする熱間鍛造コンロッド同等の強度を確

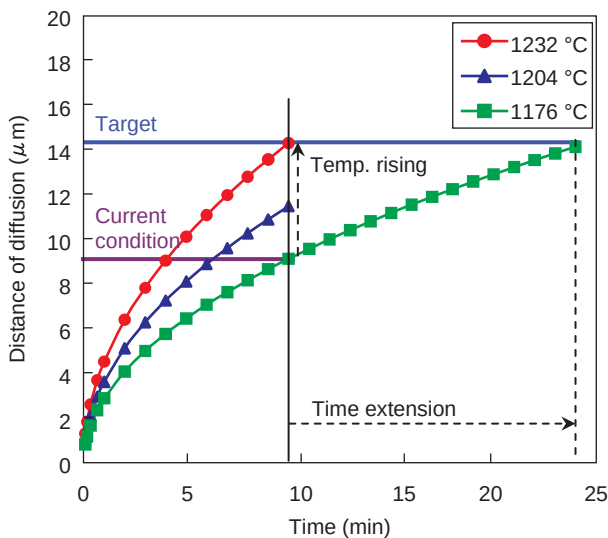


Fig. 13 Calculated results for Cu diffusion distance

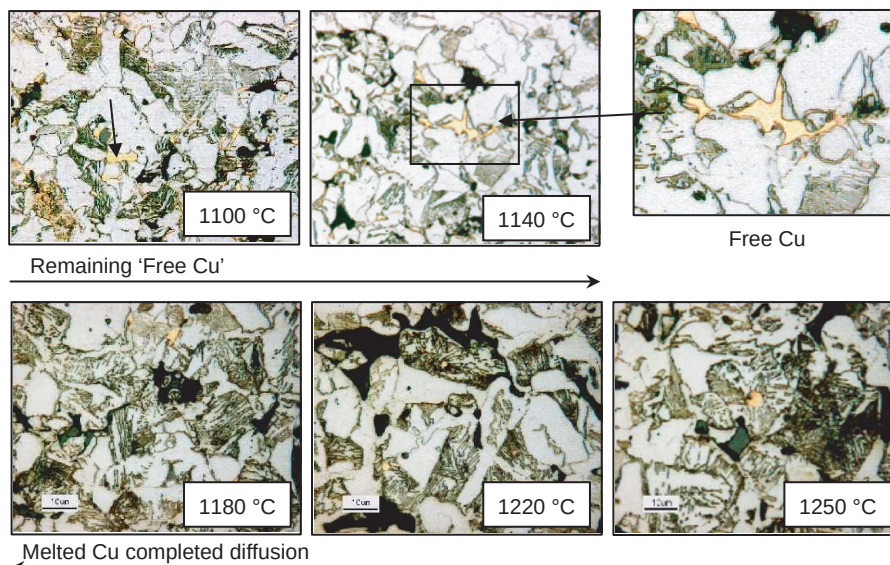


Fig. 14 Microstructure of test piece (0.35% C - 4.5% Cu) for sintering temperature (originally at 400X)

Table 1 Chemical composition for fatigue strength of connecting rod

	(mass%)		
	C	Cu	MnS
Development PF	0.26	3.59	0.32
	0.30	3.87	0.32
	0.35	4.27	0.32
	0.20	3.00	0.32
	0.13	3.42	0.46
	0.13	4.52	0.46
Current PF	0.39	1.64	0.30
	0.49	1.98	0.32
	0.54	2.14	0.30
High C/Cu	0.46	3.04	0.34
	0.51	2.93	0.33
	0.57	3.26	0.30

PF: Powder – forged rods

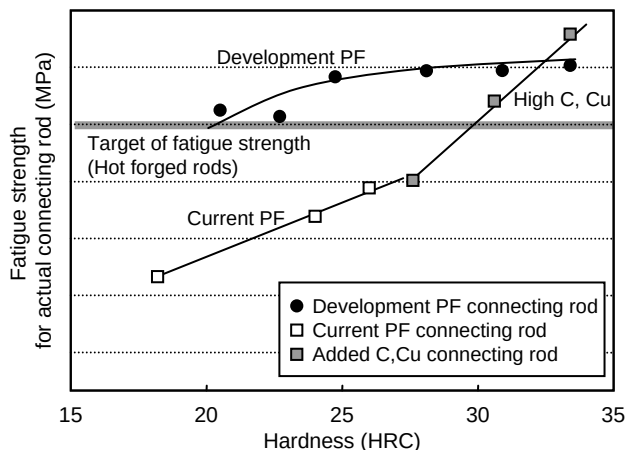


Fig. 15 Comparison of fatigue strength (tension and compression / R = -1) between developed connecting rods and current PF connecting rods

保しようとする HRC30 以上となり加工性を大きく損なうことがわかる。しかしながら、C 量を低減し Cu を増加した開発焼結鍛造素材では硬度上昇を伴わずに目標疲労強度が得られていることが確認できた。

5. 疲労強度向上による効果

材料粉末の配合比率の変更と製造条件の適合により得られた焼結鍛造コンロッド用の素材は、加工性は同等でありながらの実体疲労強度の保証値は従来比 30% 以上の上昇を達成した。これによりコンロッド一本あたり約 28g の軽量化ができ、クランクシャフトのバランス調整分を含めて新型 ACCORD 用 V6 のエンジンにおける主運動系部品トータルで約 290g の軽量化を達成した。

また、高疲労強度焼結鍛造コンロッドが高強度熱間鍛造非調質軽量コンロッド(破断分割型)と同一の疲労強度を得られたので同一重量での設計ができるようになり、製造方法によらず各拠点に適合したフレキシブルな生産が可能となった。

6. まとめ

北米現地生産の焼結鍛造コンロッドにおいて硬度を上げずに疲労強度を向上する技術確立した。

その技術により得られた新規焼結鍛造素材を用いることで被削加工性低下させることなくコンロッドの軽量化が実現できた。その結果を以下にまとめる。

- (1) 硬度上昇を抑制しつつ疲労強度を向上するためには、C 低減によるパーライト削減と Cu 増量によるフェライトの固溶強化が有効である。
- (2) 疲労破壊の起点となるコンロッド表層に鍛造時に発生する空孔は C 低減による変形抵抗抑制で縮小化かつ球状化が可能であり、疲労強度向上に有効であることがわかった。
- (3) 新規焼結鍛造素材を用いることで従来に対して被削加工性は低下させずに疲労強度を 30% 以上上げられ、コンロッドの軽量化を実現した。
- (4) 破断分割型である熱間鍛造非調質の高強度軽量コンロッドと同等性能を得られたため、日本と北米の高出力・高負荷エンジンにおける互換性を確保でき、現地生産適用範囲を広げられた。

参考文献

- (1) 松原敏彦, 佐藤泰紀, 木村健二, 川瀬直和, 伊藤茂: 快削チタン合金コネクティングロッドの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.3, p.12-26
- (2) 松原敏彦, 佐藤泰紀, 飯田善次, 田口隆: コネクティングロッド用高疲労強度快削非調質鋼の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.4, p.73-85
- (3) 飯田善次, 高田健太郎, 鈴木茂, 佐藤史: 軽量コネクティングロッドの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.2, p.115-121
- (4) 福田晋作, 衛藤洋仁: 破断分割型コネクティングロッドの開発, JSAE Review, Vol.23, No.1, p.101-104(2002)
- (5) 山口雅史, 大熊悟, 宮澤智則, 山田雄一: 軽量一体鍛造分割型コンロッドの開発, NISSAN Technical Review, No.56, p.21-25(2005)
- (6) Ilia, E., O'Neill, M., Tutton, K., Lanni, G., Letourneau, S., Haehnel, M.: Benchmarking the Industry: Powder Forging Makes a Better Connecting Rod, SAE Paper, No.2005-01-0713, p.1-13(2005)

- (7) Ilia, E., O'Neill, M., Tutton, K.: Higher Fatigue Strength Materials for Powder Metal Forged Connecting Rods, SAE Paper, No.2002-010611, p.1-7(2002)
- (8) James, B.W., McDermott, M.J., Powell, R.A.: "Powder Forging" Metals Handbook, ASM International, Vol.14, No.9(1988)
- (9) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会編：鉄鋼と合金元素 (上), 誠文堂新光社, p.353-355(1966)

■ 著 者 ■



高田健太郎



木暮亮介



小林輝夫