

(論文)

高強度Pbフリーかち割りコンロッド用鋼

High Strength Lead Free Steels for Fracture Splitting Connecting Rods



阿南吾郎*
Gorou Anan



辻 武司**
Takeshi Tsuji



吉田敦彦***
Atsuhiko Yoshida



椎橋慶太****
Keita Shiihashi

The relationship between hole diameter increase after fracture splitting using test pieces shaped like connecting rods, with various MnS aspect ratios, was investigated to determine MnS configurations for optimum fracture splitting properties. The findings indicated that a lower aspect ratio of MnS yields improvements. A new steel that provides better fracture splitting properties was developed through the creation of spherical MnS formations using Ca addition.

まえがき = 自動車エンジンについては、近年の原油価格高騰やCO₂排出量低減の観点から、低燃費のニーズが高まっている。エンジンのピストンとクランクを連結するコネクティングロッド(以下、コンロッド)は、回転運動するためその大きさや重量がエンジンレイアウトや性能に大きく影響すると言われている¹⁾。一方欧米では、コンロッドのロッド部とキャップ部を一体で鍛造した後に、大端部合わせ面内側にレーザなどによる切欠きを付け破断分離させる(以下、かち割り)工法が採用されている。本工法を採用することで破面自身のかみ合いで位置決めが可能になり、合わせ面加工などを省略できるので大幅なコストダウンが可能となる²⁾。破断分割加工に要求される特性は、破断部位の寸法が変化しないことである。

本稿では、破断分割後の寸法変化を抑えるための新しい手法を検討した。さらに得られた知見を元に、高強度でかち割りが可能な被削性に優れたコンロッド用鋼を開発した。なお、環境負荷物質であるPbは使用せずに従来鋼と同等の被削性も確保した。

1. かち割り性に影響する因子

欧州で広く用いられているDIN規格のC70S6は、破断分離時の寸法変化を抑えるため組織のほぼ全てをパーライトとした0.70% Cの非調質鋼であり、硬質なセメン

タイト量が多いため被削性に劣る。このため、被削性改善にはセメントタイトを減らしてフェライト・パーライト非調質鋼とする必要がある。

フェライト・パーライト非調質鋼において、破断分離させるためにはフェライトの靱性を低下させることが必要と言われている¹⁾。このための手法として、VやPを添加してフェライトを脆化させることが検討されている¹⁾⁻³⁾。また、Ti¹⁾やSi³⁾の添加も破断分離性に有効であることが報告されている。しかし、破断分離のしやすさはフェライトそのものの靱性だけでなく破断分離時のき裂進展形態にも影響をうけると思われるが、そのような検討をした例は見あたらない。そこで、き裂進展形態に影響を及ぼすと思われるMnSアスペクト比の影響に注目して基礎調査を行った⁴⁾。

2. かち割り性に及ぼすMnSアスペクト比の影響

2.1 実験方法

表1に示す成分の鋼材をラボ真空溶製炉で溶製した。インゴットは図1に示すように、熱間鍛造にて直径65mmまで鍛造し70mm長さに切断した。これを直径方向に厚さ25mmの板に熱間プレス加工した。鍛造前の加熱温度はいずれも1,200とした。これから、図1の右端に示すようなかち割り模擬試験片を作成した。

ノッチは実際のコンロッドを模擬して、鍛伸方向に対

表1 供試材の化学成分
Table 1 Chemical compositions of samples

Sample	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ca	Mg	Zr	Te	Ce
Base	0.43	0.27	0.90	0.080	0.030	0.15	0.045	-	-	-	-	-
Ca	0.42	0.26	1.00	0.083	0.059	0.15	0.055	0.0014	-	-	-	-
Ca + Mg	0.42	0.25	0.97	0.081	0.052	0.15	0.052	0.0006	0.0020	-	-	-
Zr	0.41	0.22	0.97	0.084	0.060	0.15	0.050	-	-	0.11	-	-
Te	0.43	0.22	1.02	0.084	0.056	0.15	0.046	-	-	-	0.011	-
Ce	0.45	0.25	0.97	0.080	0.052	0.15	0.053	0.0088	0.0060	-	-	0.005
C70S6	0.70	0.23	0.50	0.010	0.060	0.10	-	-	-	-	-	-

*鉄鋼部門 神戸製鉄所 条鋼開発部 **鉄鋼部門 神戸製鉄所 条鋼技術部 ***鉄鋼部門 神戸製鉄所 製鋼部 ****鉄鋼部門 神戸製鉄所 条鋼圧延部

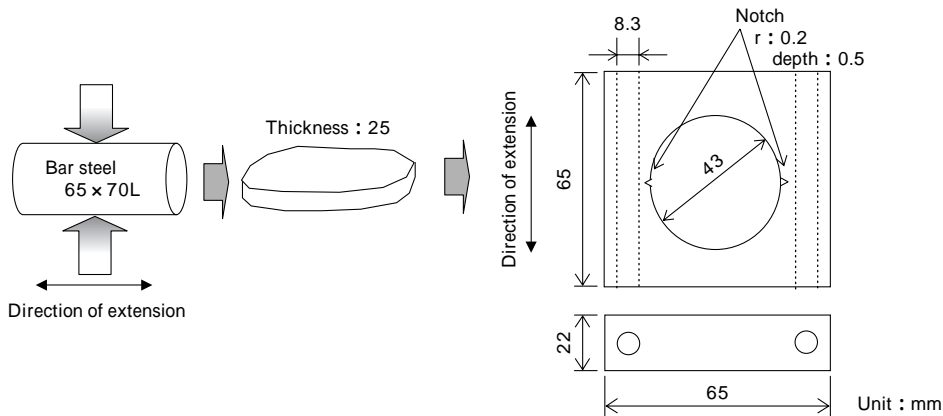


図1 かけ割り模擬試験片加工工程
Fig. 1 Experimental process of fracture splitting test

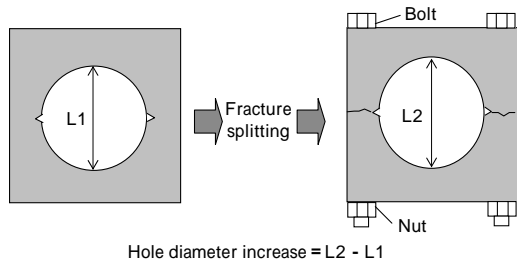


図2 寸法変化の測定方法
Fig. 2 Measuring method of hole diameter increase

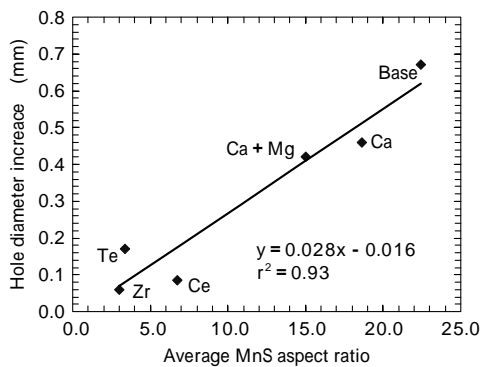


図3 寸法変化と MnS アスペクト比の関係
Fig. 3 Correlation between hole diameter increase and average MnS aspect ratio

し垂直な面で破断分離する位置に付けた。かけ割り性は破断分離後の穴径の変化量で評価した。図2に示す様に破断前の穴径を測定し、破断後ボルト締めをした後穴径を測定し、両者の差異を寸法変化としてかけ割り性の指標とした。衝撃試験は JIS Z 2242 に準じて U ノッチ試験片を用いて実施した。試験片はかけ割り模擬試験片の素材に使用した 25mm 厚の熱間プレス加工材から鍛伸方向に切出した。MnS のアスペクト比は図1の 25mm 厚の鍛造材を展伸方向に切断し、面積 16mm² の視野で最も長い MnS を 20 個選び、各々の MnS のアスペクト比を平均して求めた。

2.2 実験結果

MnS のアスペクト比と寸法変化の関係を図3に示す。図中の記号は表1の供試材の略号に対応している。Base鋼に比べて Ca や Mg を添加した鋼材は、MnS のアスペクト比が小さくなっており寸法変化も小さくなった。Te や Zr, Ce は、Ca や Mg より強い MnS 球状化効果があり、寸法変化はさらに小さくなった。Ce を添加した

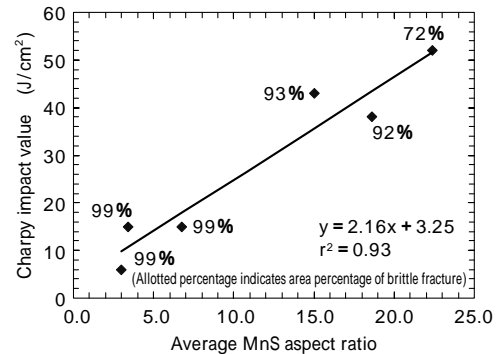


図4 MnS アスペクト比とシャルピー衝撃値の関係
Fig. 4 Correlation between MnS aspect ratio and Charpy impact value

ものには同時に Ca や Mg を添加しているので、複合的な効果である可能性もある。結果、MnS のアスペクト比が小さいほど、寸法変化は小さくかけ割り性が良好と言える。

2.3 考察

以下に、MnS のアスペクト比が小さいほど寸法変化が小さくなる原因について考察を述べる。寸法変化が少なくなる原因として、破壊エネルギーが低下していることが仮説としてあげられる。検証のため、衝撃試験を行った。結果を図4に示す。アスペクト比が高いほど衝撃値が高くなっており、かけ割りの模擬試験でも破壊エネルギーが増加していることを示唆している。衝撃試験時の破面形態と MnS 形態の関係については、小指らが考察を行っている^{5),6)}。

図5は、遷移温度に及ぼす介在物形状の影響を模式的に示したものである。介在物が球形の場合(a)は、クラックが介在物に到達すると介在物が割れてへき開クラック生成を促進するので、遷移温度は上昇する。しかし、介在物が長く伸びた形状の場合、介在物が割れてへき開クラック生成を促進する場合(b)と、介在物に沿った剥離が生じて応力の緩和が起こりへき開クラックの生成を抑制する場合(b')がある。前者は遷移温度が上昇するが、後者は遷移温度が低下する。介在物が長く伸びるほど後者の傾向が強くなると考えられ、へき開破壊しにくくなる⁶⁾。かけ割り模擬試験でも MnS のアスペクト比が小さくなることでへき開破面率が増加して破壊エネルギーが低下するものと考えられたので、破面を確認した。

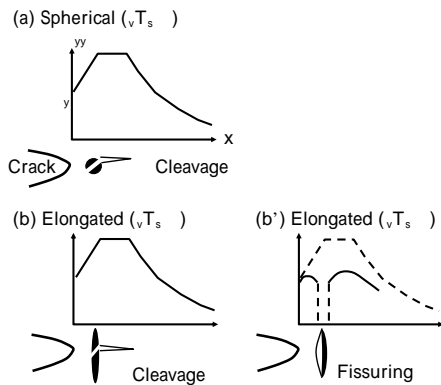


図5 遷移温度に及ぼす介在物の影響の模式図^{5),6)}

Fig. 5 Schematic diagram illustrating the effect of inclusions on transition temperature^{5),6)}

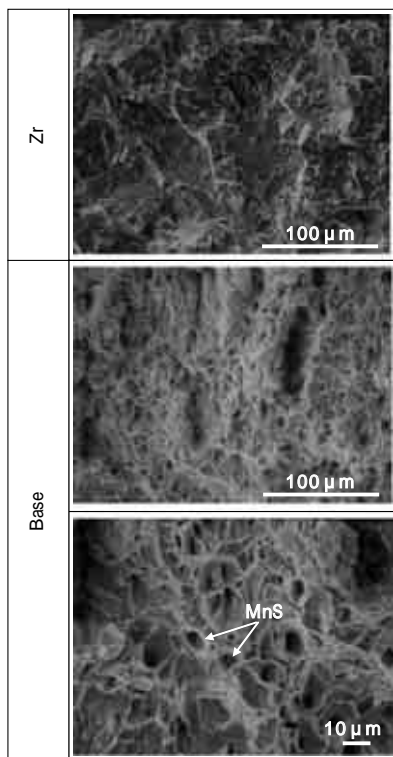


写真1 供試材破面のSEM像

Photo 1 SEM images of fractured samples

写真1に、Base鋼と特にMnSが球状化したZr鋼のかち割り模擬試験後の破面を示す。Zr鋼では全体がへき開破面であるが、Base鋼は所々にディンプル破面が見られる。ディンプルの中にはMnSがあるものが散見され、MnSに沿って剥離が起こった形跡がうかがえる。MnSのアスペクト比の小さいZr鋼の方がベース鋼よりへき開破面率が高く、小指らの検討結果⁶⁾に準じた結果が得られた。

さらにき裂の進み方に及ぼすMnSの影響を把握するため、き裂の経路とMnSの位置関係を詳しく調査した。写真2は、破断後再度結合して破断時のき裂とMnSの位置関係を観察したものである。MnSに沿ってき裂の進展方向が変わっていることが分かる。き裂の進展方向が変わると、き裂の長さが長くなり破断に必要なエネルギーが大きくなることが予想される。図6は、説明のためき裂の進展に及ぼすMnSのアスペクト比の影響を模

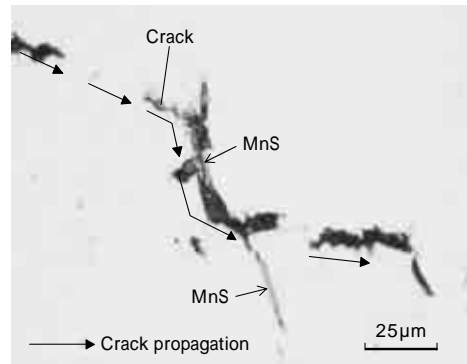


写真2 MnS付近の破断き裂

Photo 2 Splitting crack including MnS

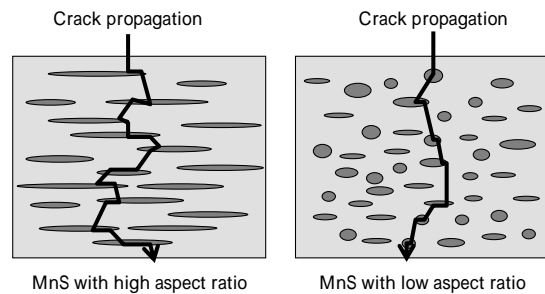


図6 破断き裂に及ぼすMnS形状の影響を説明するための模式図
Fig. 6 Schematic illustration of crack propagation with different MnS aspect ratios

式的に示したものである。MnSのアスペクト比が高いと、MnSに沿ってき裂が進む際にき裂の経路が長くなる。MnSのアスペクト比が大きくなるほどへき開破面率が減ることとき裂の経路が長くなることにより、破壊エネルギーが大きくなることで、寸法変化が大きくなるものと思われる。

3. 開発鋼の試作結果

MnSを球状化するとかち割り性が改善する結果を基に、高強度かち割りコンロッド用鋼を開発した。表2に、開発鋼とC70S6、かち割りに用いられていない従来非調質鋼について、成分の一例を示す。開発鋼はVを添加して高強度化している。高強度化とPbフリー化に伴う被削性低下を、C低減とS増量により補った成分設計となっている。かち割り性は、かち割り性を改善するP、Vの増量とMnSの球状化により確保している。MnSの球状化にはCaを用いた。

従来非調質鋼、C70S6、開発鋼を用いてコンロッドを試作し、レーザノッチを入れてかち割り性を評価した。レーザノッチを用いた理由は、鍛造品のコンロッドでは機械加工ノッチよりも一般的であるためである。かち割り性は、かち割り後の大端部穴の外接円と内接円半径の差(以後、変形量)で評価した。結果を図7に示す。開発鋼はC70S6に比べて変形量が同等以下であったのに対

表2 試作鋼成分
Table 2 Chemical composition of tested steels (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	V	Pb	Ca
Developed steel	0.33	0.25	1.14	0.080	0.100	0.27	-	added
C70S6	0.70	0.20	0.50	0.010	0.060	-	-	-
Conventional steel	0.42	0.27	0.02	0.033	0.040	0.05	0.07	-

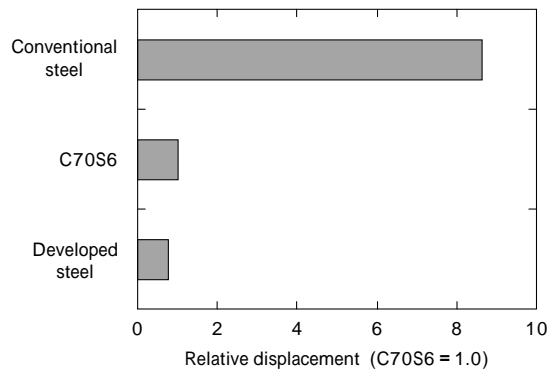


図7 打ち割り後の歪

Fig. 7 Relative displacement of connecting rod big end hole diameter caused by fracture splitting

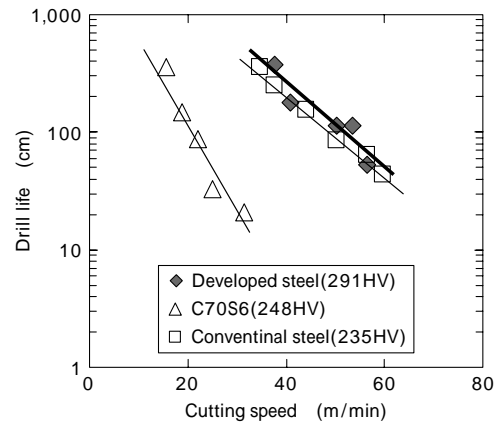


図8 鍛造品のドリル寿命

Fig. 8 Drill life of forged steels

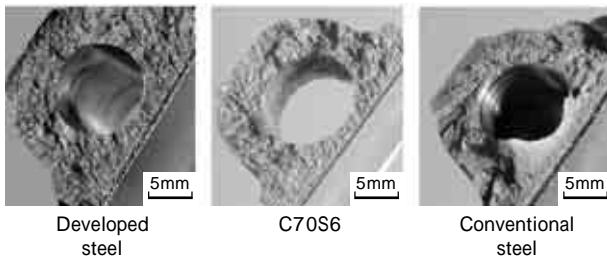


写真3 破断分離後のコンロッドの破面

Photo 3 Fractured images of connecting rods after fracture splitting

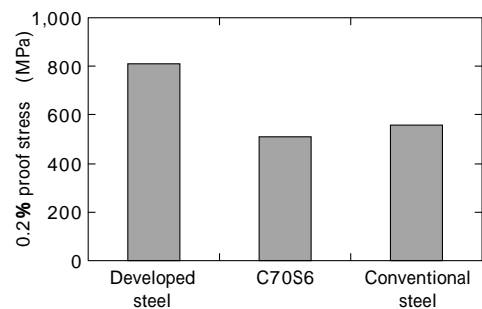


図9 鍛造品の耐力

Fig. 9 0.2% proof stress after forging process

し、従来非調質鋼は変形量が大きかった。破面外観写真を写真3に示す。開発鋼とC70S6は同様に脆性的な破面となっているが、従来鋼はボルト穴周辺が延性的に破壊しており、再度組合わせてもうまく合わせる事ができず、変形量が大きくなったものと推察される。

表2の鋼材の鍛造材について、ドリル被削性を評価した結果を図8に示す。開発鋼は従来非調質鋼とほぼ同等の工具寿命であった。それに対しC70S6は、工具寿命が著しく短くなった。

表2の鋼材の鍛造品から引張試験片を作製し、0.2%耐力を比較した例を図9に示す。開発鋼は800MPa程度の耐力となったが、C70S6や従来非調質鋼の耐力は600MPa未満であった。コンロッドはエンジンの中でも比較的大きな運動部品であり、これまでも部品強度を向上させ燃費向上に貢献してきたが、さらなる高強度軽量化が求められていると言われており⁷⁾、開発鋼はこうしたニーズにも応えることができると考えられる。実際に開発鋼は、高耐力を効かして高い燃焼圧のエンジンでコンロッドの軽量化に寄与している⁸⁾。

むすび = MnSの形状に着目し、耐力800MPa程度の高強度が得られ、被削性も従来非調質鋼並のかち割り可能なコンロッド用Pbフリー鋼を開発することができた。MnSは球状化するほど打ち割りの寸法変化が小さくなった。開発鋼で用いたCa添加以外にも、Zrなどにより強力な球状化手法も適用の可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 飯田善次ほか：自動車技術会学術講演会前刷り集 No.111-05 (2005) p.9.
- 2) 山田雄一ほか：自動車技術会学術講演会前刷り集 No.81-04 (2004) p.21.
- 3) 福田晋作ほか：自動車技術会学術講演会前刷り集 No.86-00 (2000) p.13.
- 4) 椎橋慶太ほか：材料とプロセス, Vol.16 (2003) p.1442.
- 5) 小指軍夫：鉄と鋼, 第61年, 第14号 (1975) p.2998.
- 6) 小指軍夫ほか：鉄と鋼, 第57年, 第13号 (1971) p.2029.
- 7) 森 元秀：特殊鋼, 54巻, 1号 (2005) p.18.
- 8) 相賀正一ら：自動車技術, Vol.60, No.1 (2006) p.37.