

(論文)

省合金かち割りコンロッド用鋼

Low Alloy Steel for Fracture Splitting Connecting Rod



松ヶ迫亮廣*1

Akihiro MATSUGASAKO

To reduce V content of the steel for Fracture Splitting Connecting Rod, the effect of Ti addition on the splitting property was investigated. As a result, it was found that Ti addition effectively reduced the impact value of the steel. This is thought to be due to the decrease of volume fraction of the ferrite and the precipitations strengthening of the ferrite. Furthermore, Ti was also found not to have a bad effect on machinability. Based on these results, a new steel for Fracture Splitting Connecting Rod was developed.

ま え が き = 自動車に求められる特性として現在、「低環境負荷」と「安全」の2つが重要視されている。とくに、環境に対する世の中の関心は高く、メーカーも「低公害車」、「低燃費車」の開発に向けた取組を積極的に推進している^{1), 2)}。

また、コストの低減も強く求められており、鋼材の省合金化に加えて、工程の見直しによる低コスト化も多く行われている。たとえば、自動車のエンジン部品の一つであるコンロッドに対しては、製造コストの低減のため、かち割り工程による製造方法が開発された³⁾。従来の工程ではロッド部とキャップ部を別々に鍛造・粗加工し、位置決め加工を行ってから組合わせて仕上げ加工を行う。他方、かち割り工程ではロッド部とキャップ部を一体で鍛造・粗加工した後、組合せ面となる位置にノッチ加工を施す。続く工程において、このノッチ部で破断することによってロッド部とキャップ部に分割し、仕上げ加工を行う(図1)。この製法により、鍛造時の材料歩留りの向上に加え、キャップ部および位置決めピン、穴の加工工程の削減が可能となる。1990年代の実用化以降、かち割り工程は欧州や米国で広く普及し、日本でも

導入するメーカーが増えている^{3)~6)}。

かち割りコンロッド用の鋼材は、従来のコンロッド用鋼に求められる特性に加えて、かち割りした際に変形が少ない(かち割り性が良い)ことが求められる。欧州では、組織のほぼ全てをパーライトとしてかち割り性を確保したDIN規格のC70S6鋼が広く用いられている。当社はP、Vの増量とMnSの球状化によってかち割り性を確保した高強度かち割りコンロッド用鋼を開発している⁷⁾。

当社では、資源リスクの回避を目的に省Vでもかち割りが可能となる新たなかち割り性改善手法を検討し、得られた知見を元に省Vのかち割りコンロッド用鋼の開発を行った。本稿でその概要を述べる。

1. 省合金化のための代替手段検討

C70S6鋼は資源リスクの高い合金元素は含まれていないが、硬質なセメント量が多いため被削性に劣る。一方、フェライト・パーライト非調質鋼は被削性に課題は少ないものの、かち割り性改善のために初析フェライト(以下、フェライトという)の靱性を低下させることが必要である。このことは、衝撃値を低くするとかち割り性が改善することからも明らかである⁷⁾。衝撃値低下の手法として、VやPを添加してフェライトを強化し、脆化させることが検討されている。

しかしVは、供給国が限られるうえに産出量が少ない⁸⁾資源リスクの高い元素であることから代替元素が求められている。そこで当社は、Vと同様の炭化物形成元素で、産出量が多く、資源リスクが低いと考えられるTiに着目した。そして、Tiを添加した際の衝撃値や被削性に及ぼす影響を調査することにより、Vの代替が可能か検討した。

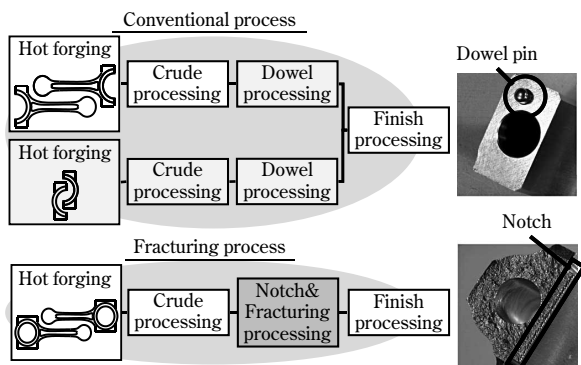


図1 通常工程とかち割り工程
Fig. 1 Manufacturing process of connecting rods

*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部

2. 実験方法

2.1 供試材

表1に供試材の化学成分を示す。Tiの影響を見るためにTi量を変化させた鋼材2種 (Steel A, Steel B), 勝ち割り性の評価の基準としてC70S6相当鋼 (Steel C), 被削性の評価の基準として従来のコンロッド用鋼相当鋼 (Steel D) の4種を準備した。鋼材はラボ真空溶製炉で溶製し, 加熱温度を1,200℃とした熱間鍛造によって所要形状に成形し, 試験に用いた。

2.2 衝撃試験方法

衝撃値に及ぼすTiの影響を調査するため, Steel AおよびSteel Bを用いてシャルピー衝撃試験を実施した。試験片形状はUノッチ試験片とし, 熱間鍛造によってφ30mmまで鍛造し, これを直径方向に厚さ15mmの板に熱間プレス加工した板材から作製した。

2.3 被削性試験方法

被削性を確認するため, ドリル寿命の評価を行った。熱間鍛造にてφ80mmまで鍛造したものを被削材とし, 横断面へのドリル穴あけによる寿命評価を行った。工具はφ10mmハイスドリルを用い, 試験条件は乾式で1回転あたりの送り量0.21mm/revである。ドリル折損までの切削距離を寿命とした。

2.4 勝ち割り試験方法

勝ち割り性は, 勝ち割り試験によって評価した。勝ち割り試験片は図2に示す形状であり, 熱間鍛造によってφ65mmまで鍛造した丸棒を直径方向に厚さ25mmの板に熱間プレス加工した板材から作製した。ノッチは, 実際のコンロッドを模擬して鍛伸方向に対して垂直な面で破断分離する位置に設けた。勝ち割り性は破断分離後の穴径の変化量で評価した。すなわち, 図3に示すように

表1 供試材の化学成分
Table 1 Chemical compositions of samples (mass%)

Sample	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ti
Steel A	0.38	0.25	1.07	0.051	0.050	0.18	0.170	0.051
Steel B	0.38	0.24	1.08	0.049	0.050	0.18	0.160	—
Steel C	0.70	0.23	0.54	0.011	0.058	0.11	—	—
Steel D	0.41	0.26	1.06	0.019	0.060	0.23	0.099	—

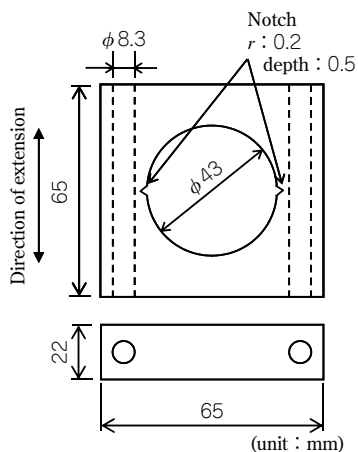


図2 勝ち割り試験片
Fig. 2 Fracture splitting test piece

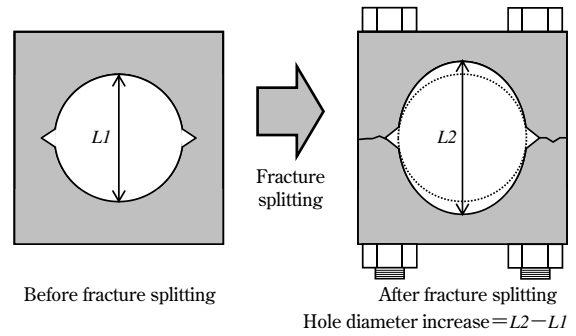


図3 寸法変化の測定方法
Fig. 3 Measuring method of hole diameter increase

破断前, および破断後にボルト締めをしてから穴径を測定し, 両者の寸法差を勝ち割り性の指標とした。

3. 実験結果および考察

3.1 シャルピー試験結果

図4にシャルピー衝撃試験の結果を示す。Tiを添加することにより, 衝撃値が大きく低下することがわかった。衝撃試験時に起こっている現象を把握するため, Steel A, Bの衝撃試験片を対象に破面や組織の詳細な観察・調査を行った。

3.1.1 破面観察

破面のSEM写真を図5に示す。Steel Aはほぼ全面がへき開となっており, 延性破壊の特徴であるディンプルは認められない。また, 一部粒界が観察されることから, 正確には疑へき開と考えられる。一方, Steel Bは, 試験片のノッチ底 (初期き裂発生位置) 付近においてほぼ全面にディンプルが観察された。ただし, 300μmほど内部に入った箇所からは, へき開の破面となっている。

このことから, Ti添加による衝撃値の低下は, ディンプルを伴った延性破壊が抑制されたことが原因と考えられる。ディンプルは, 介在物などの周辺の材料が塑性変形することによって発生し, フェライト・パーライト組織において塑性変形能を持つのは主にフェライトである⁹⁾。したがって, Ti添加はフェライトに対して脆化などの影響を与えている可能性が高いと考えられる。

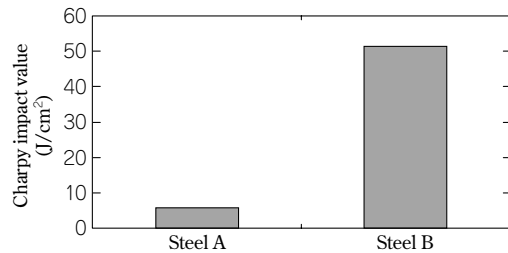


図4 シャルピー衝撃試験結果
Fig. 4 Result of Charpy impact tests

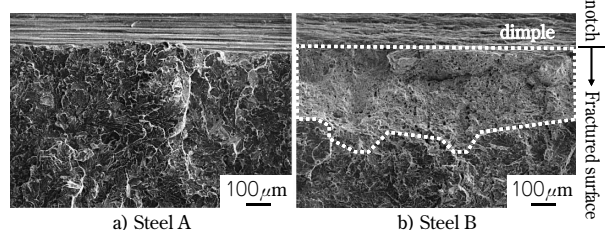


図5 破面SEM写真
Fig. 5 SEM images of fractured surface

3.1.2 組織調査

フェライトの変化を確認するため組織調査を実施した。図6に材質調査の結果を示す。Tiを添加することにより、フェライト分率は29%から20%に低下し、硬さは272.0HVから294.7HVに増加した。フェライト分率が低下するほど延性脆性遷移温度は上昇し⁹⁾、上部棚エネルギーも低下して¹⁰⁾、衝撃値が低下するため、これは衝撃値の低下に寄与していると考えられる。

そこでまず、Ti添加によってフェライト分率が低下する要因について詳細な検討を行った。変態挙動を調査するためCCT（連続冷却変態）曲線を作成した。熱間鍛造時の挙動を模擬するため、加熱温度は1,200℃としている。この結果を図7に示す。これにより、Tiの添加によって拡散変態（フェライト変態）開始が抑制され、長時間、低温側に移動することが確認された。

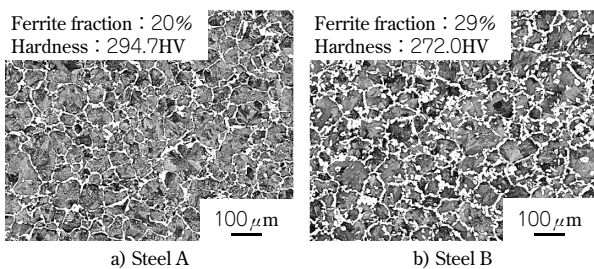


図6 組織および硬さ調査結果
Fig. 6 Microstructures and hardness of Steel A and B

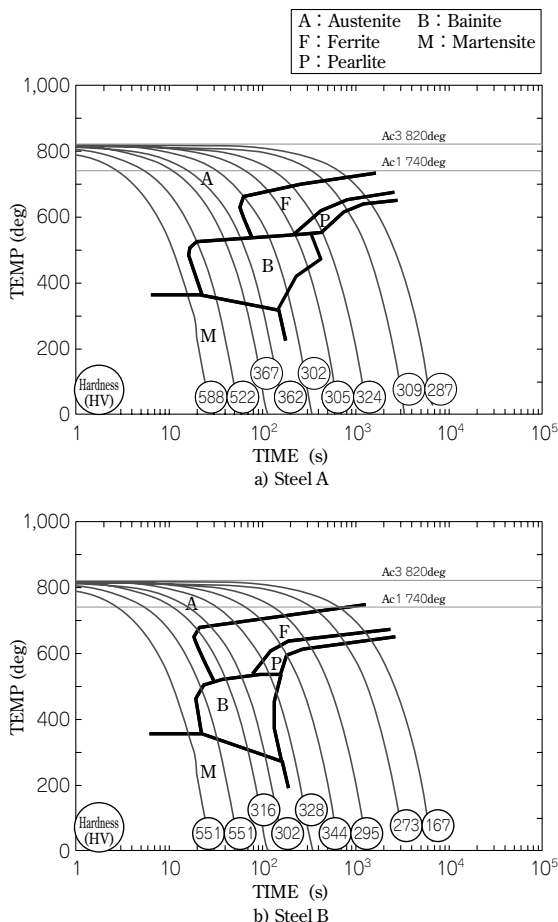


図7 CCT 曲線
Fig. 7 Continuous cooling transformation diagram

Tiがフェライト変態開始を抑制する理由は以下のように考察される。すなわち、TiはCとの親和力が高く、炭化物形成元素となっている。同様の炭化物形成元素であるVはCの拡散速度を低下させることが知られている¹¹⁾。そのため、TiもVと同様にCの拡散速度を低下させていると考えられる。拡散速度が低下した結果、拡散変態であるフェライト変態、パーライト変態が抑制されていると考えられる。

つぎに、硬さの増加について詳細な検討を行った。硬さの増加は、TiCの析出強化とフェライト分率の低下の双方が影響しているものと考えられる。硬さ変化に及ぼすフェライト分率の影響を確認するため、硬さ混合則による検証を行った。硬さ混合則は以下の関係式で与えられる¹²⁾。

$$HV = f_a^{1/3} HV_a + (1 - f_a^{1/3}) HV_p \dots\dots\dots (1)$$

ここで、HVは全体の硬さ、 f_a はフェライトの分率、 HV_a はフェライトの硬さ、 HV_p はパーライトの硬さである。

$HV_a = 235$ 、 $HV_p = 295$ ¹³⁾と図6に示すフェライト分率からフェライト分率の影響を算出した。計算の結果、フェライト分率が9%変化したことによる硬さの変化は約5HVであることがわかった。硬さの増加約23HVのうち、約18HVはTiCの析出強化が原因であると考えられるため、フェライトもTiCにより強化され、脆化していると考えられる。

3.1.3 Tiによる脆化メカニズム

以上の結果より、Ti添加による衝撃値低下のメカニズムは以下のようになっていると考えられる。

Ti添加により、

- ・フェライト分率が低下し、延性脆性遷移温度が上昇するとともに、上部棚エネルギーが低下する
- ・析出強化し、フェライトの強度が増加し、塑性変形能が低下する

これらの影響によってディンプルを伴った延性破壊が抑制されてへき開破壊が発生し、衝撃値が低下したと考えられる。とくに今回は、フェライト分率の変化に大きな効果があり、衝撃値の大幅な低下によるかち割り性向上が期待できる。

3.2 被削性試験結果

被削性試験結果を図8に示す。C70S6相当鋼であるSteel Cの被削性は著しく悪かったが、Steel A、Bおよび従来コンロッド用鋼相当鋼であるSteel Dはほぼ同等の工具寿命であり、Tiを添加したことによる被削性の大幅な悪化は認められなかった。

3.3 かち割り試験結果

3.1節および3.2節で得られた知見に基づき、従来のコンロッド用鋼(Steel D)と同等の強度(耐力600MPa程度)である省合金かち割りコンロッド用鋼の成分を決定した。表2に開発鋼の成分の一例を示す。Ti量は今回の試験で十分な効果が確認できたSteel Aと同等とし、V量は強度を同等とするためにSteel Dと同等とした。これにより、開発鋼は当社の従来のかち割りコンロッド用鋼⁷⁾よりV量を約60%低減できている。

Steel A~Dと開発鋼の5種についてかち割り試験を実

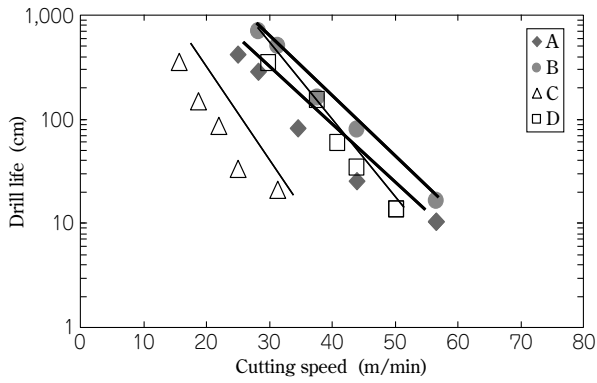


図8 ドリル寿命
Fig. 8 Results of drill life test

表2 開発鋼成分
Table 2 Chemical compositions of developed steel (mass%)

Sample	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ti
Developed steel	0.37	0.25	1.12	0.047	0.062	0.29	0.106	0.043

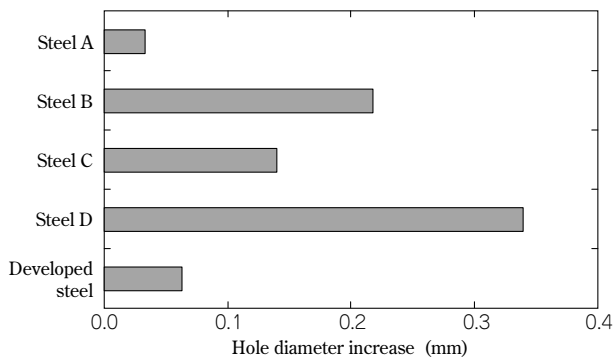


図9 寸法変化結果
Fig. 9 Hole diameter increases

施した。その試験結果を図9に示す。Tiを添加した開発鋼およびSteel Aのかち割り性は、Tiを添加していないSteel BおよびDに比べて大幅に改善しており、C70S6相当鋼であるSteel C以上に良好なかち割り性を示すこと

が確認できた。これにより、Tiを添加することによって省Vでもかち割り性の改善が可能であることが確認できた。

むすび=省合金かち割りコンロッド用鋼を開発するため、新たなかち割り性改善手法を検討し、TiによってVを代替できることを見いだした。Ti添加により「フェライト分率が低下」および「フェライトが析出強化」し、へき開破壊が発生しやすくなって衝撃値が低下していることが明らかになった。さらに、良好なかち割り性を確保でき、被削性の悪化もないことが確認できた。得られた知見を用いることにより、省Vのかち割りコンロッド用鋼を開発することができた。

参考文献

- 1) (社)自動車技術会編：自動車の材料技術，5（1996），p.2，朝倉書店．
- 2) (社)自動車技術会編：自動車技術ハンドブック，1（2008），p.1，自動車技術会．
- 3) Z. Gu et al.：The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.25, No.9-10（2005），pp.883-887.
- 4) 久保田剛ほか：YAMAHA MOTOR TECHNICAL REVIEW, No.39（2005），pp.80-87.
- 5) 小金丸知志ほか：自動車技術会学術講演会前刷集，No.20-06（2006），p.7.
- 6) 京徳信夫：自動車技術会シンポジウム，新開発エンジン，No.19-07（2008），p.19.
- 7) 阿南吾郎ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.56, No.3（2006），pp.44-47.
- 8) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構：鉱物資源マテリアル・フロー 2009，（2009），pp.147-152.
- 9) 荒木 透：鉄鋼材料学，（1970），p.102，丸善．
- 10) 岡本正三：鉄鋼材料，（1960），p.167，コロナ社
- 11) S. N. Tewari et al.：Journal of Materials Science, Vol.17, No.6（1982），pp.1639-1648.
- 12) T. Gladman et al.：Journal of The Iron and Steel Institute, Vol.210，（1972），pp.916-930.
- 13) 前田千芳利ほか：日本熱処理技術協会講演大会講演概要集，Vol.30，（1990），pp.57-58.