

小型汎用エンジンクランクシャフト用 高じん性非調質・鉛フリー快削鋼の開発

Development of Pb-free Free-cutting Microalloyed Steel with High Toughness for Crankshaft of Small Multipurpose Engine

田 原 譲*
Yuzuru TAHARA

清 水 真 吾**
Shingo SHIMIZU

要 旨

熱間鍛造後の調質処理を省略しても調質鋼同等の強度・じん性が併せて得られ、高周波焼入れも可能な小型汎用エンジンクランクシャフト用フェライト・パーライト型非調質鋼を開発した。組織中のフェライト率増加、および粒内フェライトを利用した組織の微細化によるじん性の確保と、固溶・析出強化、焼入れ性向上による強度の確保を同時に成立させる合金設計を、高周波焼入れ可能な炭素量の範囲内でおこなった。さらに、組織の粗大化を抑制し、これら合金設計を生かす鍛造加熱温度、鍛造後冷却条件を設定した。また同時に合金設計により、鉛添加無しで従来の鉛快削鋼と同等の切削加工性を維持することに成功した。以上の結果、クランクシャフト製造における調質コストの削減と、環境負荷物質である鉛の添加廃止を達成した。

ABSTRACT

A ferrite-pearlite type microalloyed steel has been developed for use in the crankshafts of small multipurpose engines. Although the thermal refining process after hot forging has been eliminated, this steel possesses equivalent strength and toughness to thermally refined steel, and can also be induction hardened. The design of the alloy sought to ensure toughness by increasing the ratio of ferrite in the structure of the steel and refining the structure through the use of intragranular ferrite and, at the same time, to ensure strength by strengthening of solid solution and precipitation strengthening and increasing hardenability while still employing a carbon content within the range enabling induction hardening. In addition, conditions for the temperature of heating during hot forging and for cooling after hot forging were established to control coarsening of the structure and optimize the characteristics of the alloy. At the same time, the design ensured that while no lead was added, a level of machinability equivalent to that conventional free-cutting steel with added lead was achieved. This has reduced the cost of crankshaft manufacture by eliminating the thermal refining process and done away with the necessity of adding lead, an environmentally harmful substance.

1. はじめに

熱間鍛造後の焼入れ焼戻し処理(調質処理)を省略しても、所望の強度が得られる鋼を非調質鋼と呼ぶ。非調質化の手段としては、通常の構造用鋼に V(バナジウム)等の元素を微量添加し、炭窒化物による析出強化により調質鋼と同等の強度を得るのが基本であり⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾、その機構のみによるものは基本型(一般型)非調質鋼と呼ばれる。

しかし、それらの組織は熱間鍛造後そのままの粗大なフェライト・パーライト組織であり、緻密な組織を持つ調質鋼に比べてじん性が大きく劣るため、その適用はエンジン内のコンロッド等、高じん性の要求されない箇所

に限られる。

自動車の足回り部品等、高じん性の要求される箇所には、低炭素・高合金成分化^{(1), (3)-(6)}、析出物による熱間鍛造時の組織粗大化抑制^{(1), (4)}、粒内フェライト析出による組織微細化^{(1), (3)-(5), (7)}、等の手法によりじん性を改善した高じん性型非調質鋼が適用されている。さらに、極低から中炭素の鋼に各種合金元素を適当量添加し、熱間鍛造後の放冷のみでベイナイト組織を得られる高強度・高じん性型非調質鋼も開発されている^{(1), (4), (8)-(11)}。

この様に、今日までに多様な特性を持つ非調質鋼が開発されており、コスト削減、リードタイム短縮、省エネルギー等の観点から、様々な分野において使用されている^{(2), (12)}。

* 本田技研工業株式会社

** 朝霞東研究所

2. 汎用エンジンクランクシャフトの非調質化

二輪車や四輪車のエンジンとは異なり、汎用機器に搭載される小型エンジン(以下、汎用エンジン)のクランクシャフトには、強度のみならず高いじん性が必要とされる。汎用機器においては、Fig. 1に示す芝刈機のように、作業部位がベルトやクラッチ等の緩衝機構を介さずクランクシャフトに直接接続される場合があり、大きな衝撃荷重が直接出力軸に加わる可能性が考えられるためである。また、汎用エンジン用クランクシャフトでは、耐摩耗性および疲労強度向上のためにピン部やジャーナル部等に高周波焼入れを施すことが一般的である。したがって、このような用途に適用されるクランクシャフトには、これまでは S48C 等の構造用炭素鋼に、熱間鍛造後調質処理を施し、必要な強度とじん性を付与して用いてきた。

これを非調質化することを考えた場合、基本型非調質鋼では、高周波焼入れは可能であるが、前述のようにじん性に劣るため不適であり、高じん性型非調質鋼は、じん性確保のために低から中炭素に成分調整されているために十分な高周波焼入れ硬度を得られず、既存のものは適用できなかった。

そこで、合金成分設計のみならず、熱間鍛造時の各工程制御条件をも総合的に検討することにより、汎用エンジンクランクシャフトに必要な強度とじん性を持たせることができ、なおかつ高周波焼入れも可能である非調質鋼を新たに開発した。

また、従来構造用鋼には、切削加工性向上の目的で環境負荷物質である鉛が添加されていたが、各特性を損なうことなく、その廃止もあわせて達成したので、これらの詳細を以下に説明する。

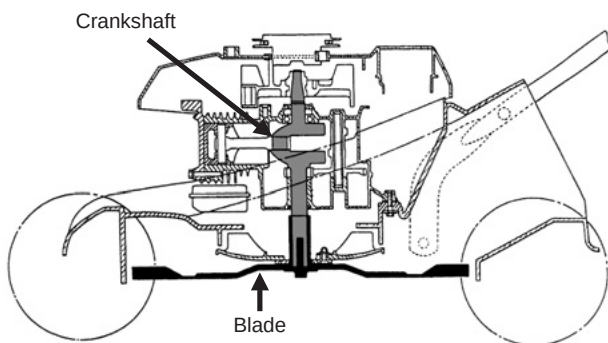


Fig. 1 Layout of lawn mower

3. 目的達成手法

3.1. 合金設計

フェライトーパーライト鋼では、硬度や引張強度、さらに高周波焼入れ部硬度は主に C 量に比例し、じん性は反比

例する。汎用エンジンクランクシャフトにおいては、高周波焼入れ部の硬度は HRC50 以上が必要であるため、これを満足できる範囲で最も低い C 量とした。

また、じん性確保のためには、組織の微細化を図る方法が効果的である。そこで、本開発材においては、前述の粒内フェライト析出による組織微細化手法を用いた。組織中に多量に微細分散させた MnS を核として、熱間鍛造後の冷却中に旧オーステナイト粒内にもフェライトが析出し、その結果組織が微細化されじん性が向上するという手法である。そのために Mn、および S を基本鋼に比べ増量させている。

一方、C 量の低減により鋼の強度は低下するが、フェライトを固溶強化する Si を増量、析出強化する V を微量添加し、Mn、Cr による焼入れ性向上をもあわせて活用することによって鋼の強化を図り、これを補っている。これらの元素を含有するフェライトーパーライト型非調質鋼の硬度、引張強度は、

$$Ceq = C + \frac{1}{10}Si + \frac{1}{5}Mn + \frac{5}{22}Cr + 1.65V - \frac{5}{7}S$$

なる式で表される炭素当量 Ceq と相関があることが知られており⁽¹²⁾、この値を 0.73 以上に調整すると、比較材である S48C 調質鋼と同等以上の引張強度を安定して得ることが可能である。

切削加工性については、前述の MnS が、鉛快削鋼中の鉛と同等の効果を発揮する^{(13)・(16)}ことから、これを用いることとした。

本開発材の化学成分を Table 1 に示す。

Table 1 Chemical composition of newly developed steel

								(Wt.%)
C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Pb	Ceq
0.33	0.68	1.33	≤ 0.020	0.055	0.20	0.08	—	0.80

3.2. 鍛造工程条件

本開発材は高周波焼入れ性を確保するため、既存の高じん性型非調質鋼と比べて若干 C 量を高めとしている。そのためじん性確保の面では不利であり、これまでに述べた合金設計による組織の微細化に加え、熱間鍛造時の工程条件管理による、組織粗大化の防止も必要となった。

まず素材の加熱温度であるが、オーステナイト粒の粗大化を防ぐには加熱温度は低いほど望ましい。通常の調質鋼の場合は後工程で組織の調整が可能であるため、鍛造性や金型寿命などを重視して 1250℃程度としていることが多いが、非調質鋼の場合は鍛造工程で組織が決定されるため、金型寿命に大きな影響を及ぼさない範囲内でできるだけ低い、1150 - 1200℃に設定した。

次に鍛造後においては、ワークの余熱によりオーステナイトは再結晶，粒成長を起こすため，組織の粗大化防止のためには変態までの温度域を速やかに冷却する必要がある。そのため強制空冷を導入した。Fig. 2に，熱間鍛造後のコンベア上での強制空冷の様子を示す。冷却速度については，以下の検討をおこない決定した。

汎用エンジンの使われ勝手の内，クランクシャフトに最も厳しい衝撃荷重が加わる可能性のある物は前出の芝刈機である。後述する芝刈機実機による低温実体衝撃試験の結果，さらに芝刈りブレードが直接接続されるクランクシャフト出力軸の形状仕様等から，汎用エンジンクランクシャフトに必要な衝撃値を， -40°C において $40\text{J}/\text{cm}^2$ 以上，と定めた。一方，本開発材においてはパーライト粒度と衝撃値



Fig. 2 Fan cooling after hot forging

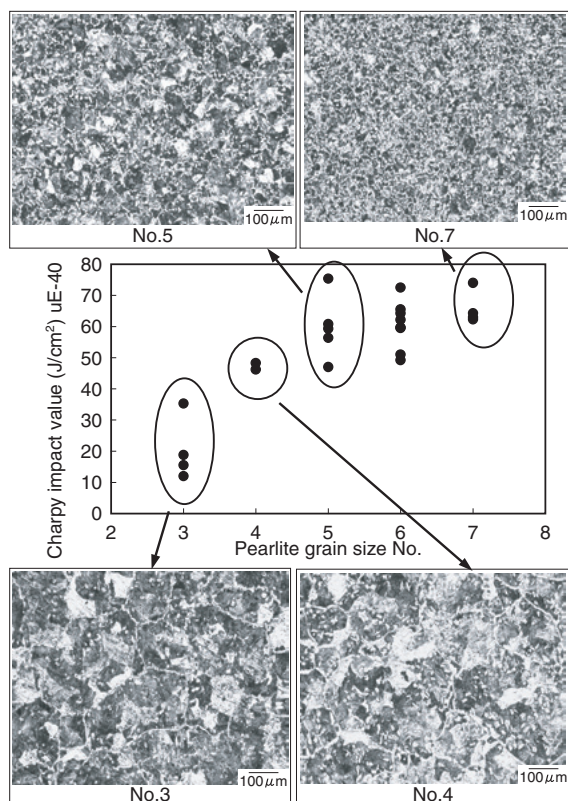


Fig. 3 Relation between pearlite grain size and charpy impact value

には Fig. 3 に示すような関係があり，パーライト粒度 5 以上を確保すれば，この衝撃値を余裕を持って満足できることがわかる。以上を踏まえて実際の工程で各種冷却試験をおこなった結果，上記衝撃値を得るためには，冷却速度の設定は 800°C から 550°C の間において $50\text{--}80^{\circ}\text{C}/\text{分}$ ，が最適であることがわかった。

以上の結果をまとめて，Fig. 4 に示す。

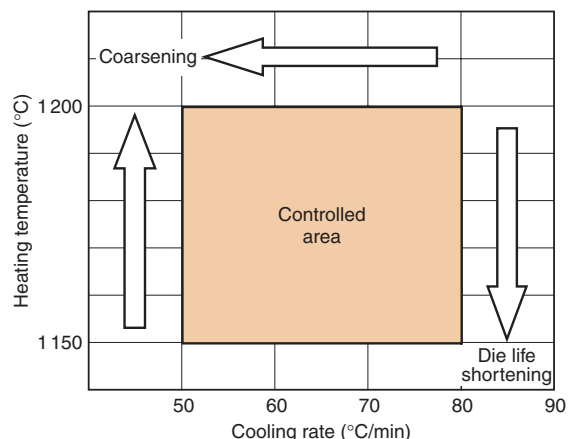


Fig. 4 Hot forging conditions

4. 試験結果

4.1. 材料試験結果

4.1.1. シャルピー衝撃試験

クランクシャフトより切り出した JIS3 号試験片にて，各温度でシャルピー衝撃試験をおこなった結果を Fig. 5 に示す。開発材は -40°C においても $40\text{J}/\text{cm}^2$ 以上の衝撃値を確保している。また U ノッチ部に $1\text{--}3\text{mm}$ の深さで高周波焼入れを施した試験片の場合，開発材は全温度域にて比較材である S48C 調質鋼の衝撃値を上回る結果を示している。これは開発材の C 量が比較材に比べて少なく，焼入れ硬度が低いためであると考えられる。

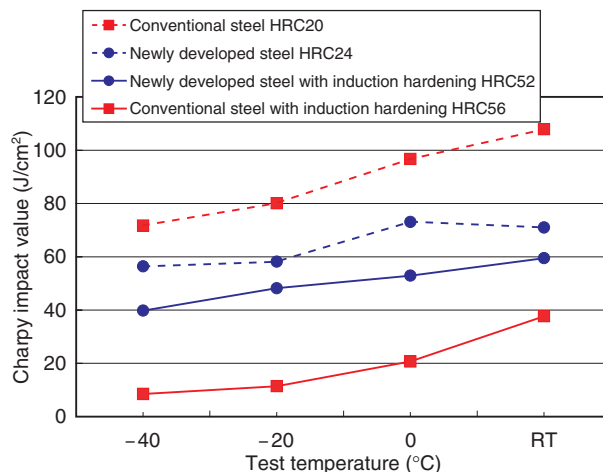


Fig. 5 Charpy impact value of newly developed and conventional steels

4.1.2. その他の機械的性質

その他、引張強度、疲労強度等の材料試験結果を、比較材と併せて Table 2 に示す。各項目とも、比較材とそん色のない値が得られている。また、ピンオンディスク式摩耗試験においても、開発材の摩耗量は従来材と同等であった。

Table 2 Mechanical properties of newly developed and conventional steels

	Newly developed	Conventional
Hardness (HRC)	20	20
Tensile strength (MPa)	813	764
Yield point (MPa)	549	549
Elongation (%)	19	23
Rotating-bending fatigue strength (MPa)	412	372

4.2. クランクシャフト実体試験結果

4.2.1. 低温実体衝撃試験

クランクシャフト実体を芝刈機実機に組み込み、運転状態で地面から棒鋼を飛び出させ芝刈りブレードに衝突させる衝撃試験を、 -15°C にておこなった。その結果例を Fig. 6 に示す。開発材でも、比較材と同様に出力軸の折損は発生せず、曲がり量も同等で良好な結果となった。

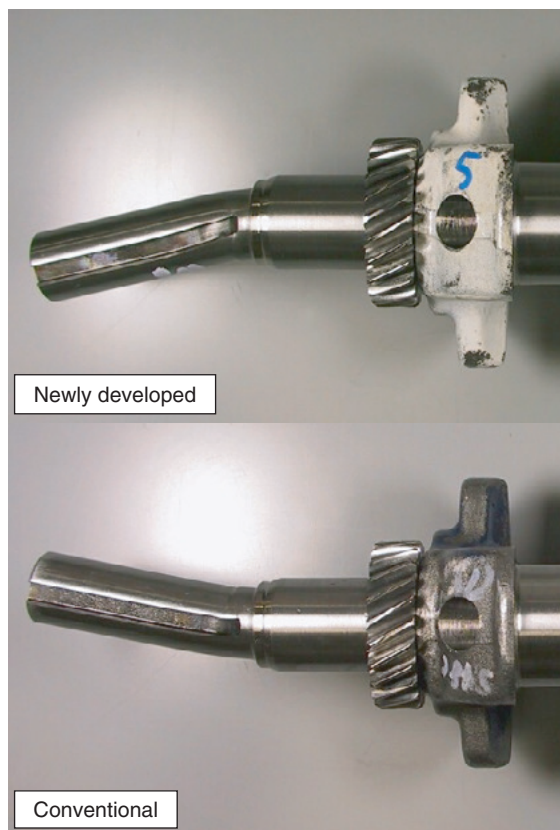


Fig. 6 Result of low temperature blade-hit test for crankshaft

4.2.2. 高周波焼入れ性

クランクシャフト実体のピン部に対し、実際の量産設備により高周波焼入れをおこない、その硬度・深さを測定した結果を Fig. 7 に示す。汎用エンジンクランクシャフトに必要な焼入れ表面硬度 HRC50 以上を満足しており、焼入れ深さも比較材と同等で問題ないことが確認された。

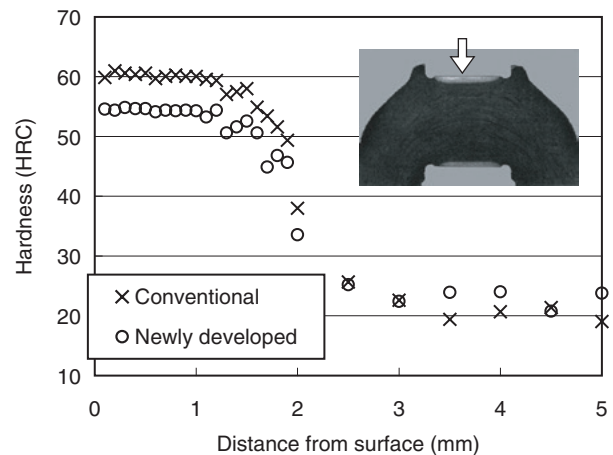


Fig. 7 Hardness of crank pin surface after induction hardening

4.2.3. その他の実体試験

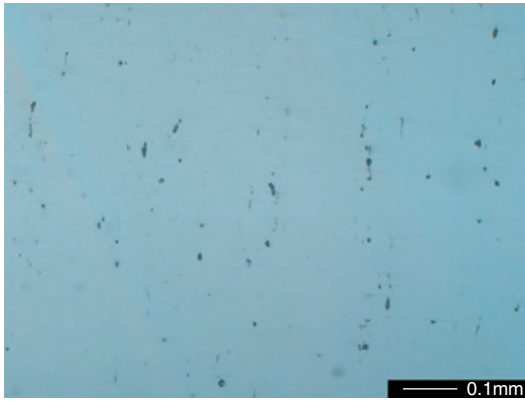
クランクシャフト単体の疲労試験の結果を Table 3 に示す。曲げ疲労試験、ねじり疲労試験ともに完全両振りである。材料試験結果同様、各項目とも比較材同等の結果が得られている。また、エンジン実機による各種耐久試験においても、従来材同様にすべての確認項目において基準値を満足することを確認した。

Table 3 Result of various fatigue tests for crankshaft

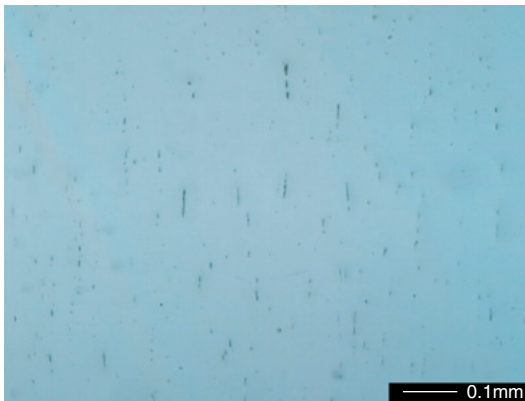
		Newly developed	Conventional
Bending fatigue strength of crank pin (MPa)	Without induction hardening for fillet	402 (HRC24)	402 (HRC20)
	With induction hardening for fillet	647 (HRC52)	666 (HRC60)
Torsion fatigue strength of power take-off shaft (MPa)		182 (HRC20)	106 (HRC20)

4.3. 切削加工性

開発材および比較材の快削組織分布状態を Fig. 8 に示す。開発材においては MnS が、比較材においては Pb が、同様の形態で分布しているのがわかる。



(a) Newly developed steel (MnS)



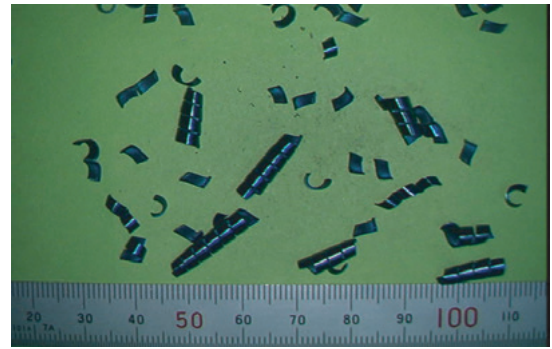
(b) Conventional steel (Pb)

Fig. 8 Distribution of inclusions

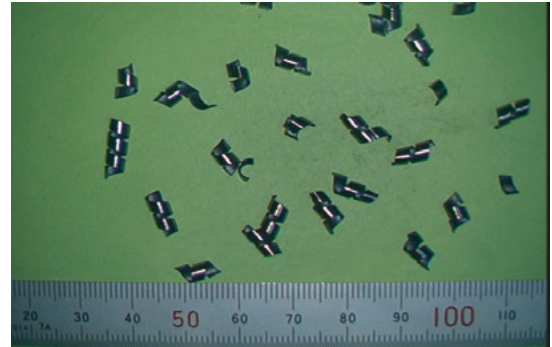
この両者について、同条件にてバイト切削性、およびドリルせん孔性の確認試験をおこなった。その際の工具摩耗量を Table 4 に、旋削・せん孔切りくず形態をそれぞれ Fig. 9, 10 に示す。工具摩耗量については、開発材は比較材よりも少なく有利である。切りくずについては、開発材のほうが比較材に比べ若干処理性に劣る形状であったが、実際の量産加工ラインにおいては全く問題のない差であった。

Table 4 Comparison of amount of tool wear between newly developed and conventional steels

	Newly developed	Conventional
Amount of wear of tip flank after 30 min. turning (mm)	0.07 (HRC19.4)	0.18 (HRC21.2)
Amount of wear of drill flank after drilling 200 holes (mm)	0.08 (HRC22.6)	0.09 (HRC20.1)

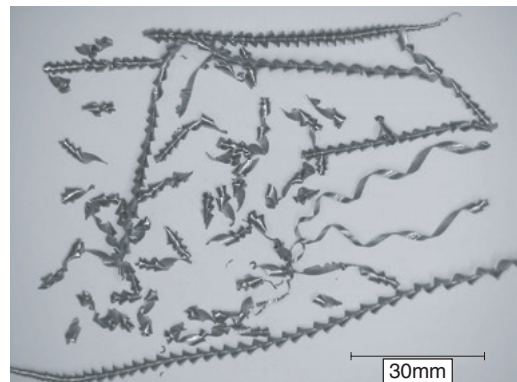


(a) Newly developed steel

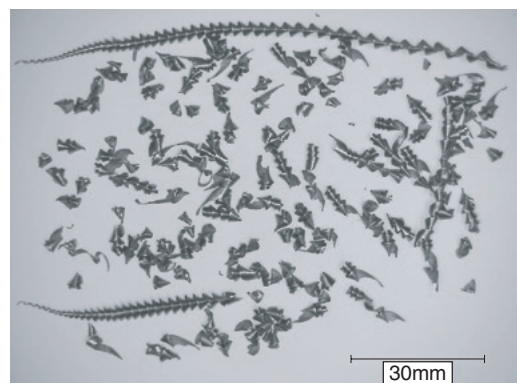


(b) Conventional steel

Fig. 9 Chips of newly developed and conventional steels produced by 30 min. of lathe turning



(a) Newly developed steel



(b) Conventional steel

Fig. 10 Chips of newly developed and conventional steels produced by drilling 200 holes

5. まとめ

- (1) 合金成分と鍛造条件を総合的に検討することにより、熱間鍛造後の調質処理を省略しても、従来の調質鋼と同等の強度・じん性を得られ、なおかつ高周波焼入れも可能である非調質鋼を開発した。
- (2) 従来の鉛快削鋼と同等の切削加工性を維持しながら、環境負荷物質である鉛の添加を廃止した。
- なお本鋼材は、排気量 160・390cm³ のプロユース向け汎用エンジン用クランクシャフト材として量産適用されている。

謝 辞

本開発にあたり、多大な協力を頂いた(株)住友金属小倉を始めとする関係者各位に、紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 野村一衛：自動車用非調質鋼における組織制御技術，まてりあ，Vol.34, No.6, p.705(1995)
- (2) 細野昭彦，藤田敬太郎：非調質鋼の現状，いすゞ技報，Vol.90, p.90
- (3) 池田正一，阿南吾郎：高強度非調質棒鋼，R&D 神戸製鋼技報，Vol.52, No.3, p.47(2002)
- (4) 高田啓督，子安善郎：鍛造用非調質鋼の現状と将来動向，新日鉄技報，Vol.354, p.6(1994)
- (5) 佐藤武史，栗田真人：最近の非調質鋼について，鍛造技報，Vol.83, p.16(2000)
- (6) 井上幸一郎，中村貞行：高強度・高靱性非調質鋼，電気製鋼，Vol.67, No.1, p.56(1996)
- (7) Ochi, T., Takahashi, T., Takada, H.: Improvement of the Toughness of Hot Forged Products Through Intragranular Ferrite Formation, Iron & Steel Maker, 16-2, p.21-28(1989)
- (8) 勝亦正明，松島義武，山本義則：低炭素マルテンサイト・ベイナイト型高強度高靱性熱間鍛造用非調質鋼の開発，日本金属学会報，Vol.31, No.6, p.547(1992)
- (9) 岡津光浩，林透，天野慶一：極低炭素ベイナイトを利用した非調質 570MPa 級厚肉高張力鋼板とその溶接部特性，川崎製鉄技報，Vol.30, No.3, p.131(1998)
- (10) 井上幸一郎，中村貞行：ベイナイト型非調質鋼の組織と機械的性質に及ぼす合金元素の影響と切欠き材の疲労強度，電気製鋼，Vol.69, No.1, p.27(1998)
- (11) 福住達夫：熱間鍛造用ベイナイト型高靱性非調質鋼の開発，三菱製鋼技報，Vol.19, No.1,2, p.33(1985)
- (12) 佐藤武史：非調質高強度鋼，住友金属，Vol.45, No.4, p.120(1993)
- (13) 大野鐵：鋼の被削性研究の近況，住友金属，Vol.48, No.1, p.4(1996)
- (14) 橋村雅之ほか：クランクシャフト用 Pb-free 非調質鋼について，新日鉄技報，Vol.378, p.68(2003)
- (15) 常陰典正ほか：硫黄快削鋼の靱性と被削性に及ぼす Mg, Ca 添加の影響(硫黄物系新快削鋼の開発－1)，材料とプロセス，Vol.14, No.6, p.1233(2001)
- (16) 佐藤公保ほか：鋼の被削性と強度に及ぼす S 量および Mg, Ca 添加の影響(硫黄物系新快削鋼の開発－2)，材料とプロセス，Vol.14, No.6, p.1234(2001)

■ 著 者 ■



田原 譲



清水 真吾