

技術資料

Technical Data

焼ならしV非調質鋼を用いた高強度軟窒化クランクシャフトの開発

加藤公輔*¹, 木村和良*¹, 諏方 悟*², 川口大二*², 村上 敦*²

Development of High-Strength Nitrocarburized Crankshaft using Normalized Vanadium Microalloyed Steel

Kosuke Kato, Kazuyoshi Kimura, Satoru Suwa, Daiji Kawaguchi, and Atsushi Murakami

Synopsis

It is important in a nitrocarburized crankshaft to have all high fatigue strength, machinability, and straightening ability.

A vanadium microalloyed steel was developed of which a high level of strength and toughness could be achieved by control of normalizing temperature.

The result of this development is as follows.

(1) The amount of vanadium that melts in steel increases with an increase in normalizing temperature and hardness increases. Hardness can be arranged by the carbon equivalent weight.

The nitrocarburized surface hardness can be arranged by the chromium equivalent weight. The surface hardness increases in proportion to the amount of dissolved vanadium.

(2) The alloy design was able to be established by using [C]eq and [Cr]eq.

(3) The insoluble vanadium carbide shows an effect of silicon grain boundary pin detention. And microstructure is prevented from coarsening. Moreover, toughness is improved.

(4) Optimization of normalizing temperature helped to enable the achievement of more than 30 % increase in fatigue strength against conventional steels while maintaining machinability and straightening ability.

1. はじめに

自動車用機械構造部品には熱処理コストが低減でき、かつ製造中のCO₂排出量を低減できるフェライト・パーライト型非調質鋼（以下、非調質鋼）が広く利用されている^{1),2)}。また、非調質鋼の高強度化は車体重量の軽量化を可能とし、燃費向上、走行時のCO₂排出削減および運動性能向上に大きく寄与するため強く望まれている³⁾。しかし、非調質鋼は焼入・焼戻しを施す調質鋼と比べて耐力比（0.2%耐力/引張強度）が低く、高強度化を図

る上で硬さの増加が避けられず、その結果とし被削性の低下が懸念されるため、強度と量産性の両立が不可欠であった。また、熱間鍛造のまま使用される非調質鋼は粗大なフェライト・パーライト組織（以下、F+P組織）であるため、靱性の低下が問題視されている。例えば、軟窒化クランクシャフトにおいては高い疲労強度と加工性、特にひずみ矯正性が重要であるため、高強度でかつ高靱性な材料が求められている⁴⁾。

一般に強度と量産性を両立させるためには耐力比を増加させる手法がとられており、析出強化元素であるV

2010年12月1日受付

*1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Research & Development Center, Daido Steel Co, Ltd.)

*2 (株)本田技術研究所 二輪 R&D センター (Honda R&D Co., Ltd. Motorcycle R&D Center)

を活用するV非調質鋼が用いられている⁵⁾。V非調質鋼は鍛造加熱時にVが鋼中へ固溶し、その後の空冷時に10 nm以下の微細なV炭化物(以下、VC)がフェライト中に析出することで高硬度化が図れる。析出強化元素としてVが広く用いられているのは、鍛造加熱時に固溶しやすく加熱温度の影響を受けにくいためである。一方、非調質鋼の高靱性化については化学成分、F+P組織の微細化および熱間鍛造条件などの検討が報告されている^{6),7)}。熱間鍛造では加工加熱温度や冷却速度を大きく変えることが困難であるため、より簡便に処理条件を設定しやすい焼ならし処理を用いることでF+P組織の微細化を図り靱性の改善が行われている。しかし、V非調質鋼においては焼ならしを施すことでVCの析出形態に影響を及ぼすため硬さの低下が懸念される。部品の強度設計を行う上でこの硬さへの影響を十分把握しておく必要があるが、詳細に検討された報告は少ない。

そこで、著者らはV非調質鋼を用い硬さおよびF+P組織に及ぼす焼ならし温度の影響について調査し、所望強度を得るための合金設計手法を確立するとともに、軟窒化クランク用鋼部品に適応可能な高強度かつ高靱性な材料の開発を行った。以下にその内容について報告する。

2. 焼ならしV非調質鋼の基礎特性評価

2. 1 供試材

Table 1に供試材の合金成分を示す。JIS鋼S45Cをベースに、Vのみを0.1~0.4%まで変化させた材料を準備した。それぞれ真空高周波誘導炉にて溶製し150 kg鋼塊に铸造した。これらを1473 Kで加熱後にφ60 mmの丸棒に熱間鍛造した。さらに非調質鋼としての特性を得るために、1473 Kに再加熱し40 mmの角材に鍛造し、大気中で室温まで冷却した。焼ならしは1103 K~1303 Kの温度で、それぞれ3.6 ks保持し、その後大気中で室温まで冷却した。

2. 2 硬さとF+P組織に及ぼす焼ならし温度の影響

鍛造後、および各焼ならし温度における代表的なミクロ組織写真をFig.1に示す。鍛造後のF+P組織はV添加量が多いほど細かく、また、いずれの供試材も焼ならしを施すことで鍛造後に比べF+P組織は微細化することが分かった。Fig.2に平均パーライトサイズと焼ならし温度の関係を示す。A鋼は焼ならし温度が高くなるにつれて、徐々にパーライトサイズが大きくなる傾向を示す。一方、V添加鋼は低温域では粗大化が抑制され、高温で処理されると粗大化が進行する。V添加量が多い供試材ほど粗大化する温度が高く、VCが粗大化抑制粒子として働いていることを示唆している。

そこで、電解抽出残渣法を用いて、焼ならし加熱時に固溶し空冷時に析出したVC(以下、析出VC)と、加熱時に固溶することなく溶け残った未固溶VC(以下、未固溶VC)の定量化を行った。電解処理には10%AA系電解液(10v/v%アセチルアセトン-1w/v%テトラメチルアンモニウムクロライド-メタノール)を用いた。抽出は0.2 μm x 47 mm φのろ紙を使用し、吸引ろ過により行った。抽出残渣はICP質量分析装置を用いて測定した。焼ならし材をそのまま抽出分析を行うと、鍛造時に析出したVCが焼ならし加熱時に鋼中へ固溶しその後の空冷中に再析出するVCと、焼ならし加熱時に固溶することなく溶け残った未固溶VCとを同時に測定することになる。そこで、焼ならし加熱後に油焼入れを施した材料を準備し、鋼中に固溶できなかった未固溶VCのみを分析することで、焼ならし空冷材との差分から析出VCの定量化を行った。

Fig.3に焼ならし温度と析出VCの関係を示す。また、統合型熱力学計算システム(以下、Thermo-Calc)を用いて各温度における固溶V量の計算結果を併記した。計算で求めた固溶V量と析出VC量は良い相関を示し、焼ならし加熱時に固溶したVがその後の空冷でVCとして析出することが明らかとなった。また、析出VC量

Table 1. Chemical compositions of steels (mass%).

	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	V
Steel A	0.48	0.10	0.74	0.10	0.08	0.15	—
Steel B	0.46	0.10	0.72	0.10	0.08	0.15	0.10
Steel C	0.47	0.10	0.75	0.10	0.08	0.15	0.20
Steel D	0.47	0.10	0.73	0.10	0.08	0.15	0.30
Steel E	0.47	0.09	0.75	0.10	0.08	0.15	0.40

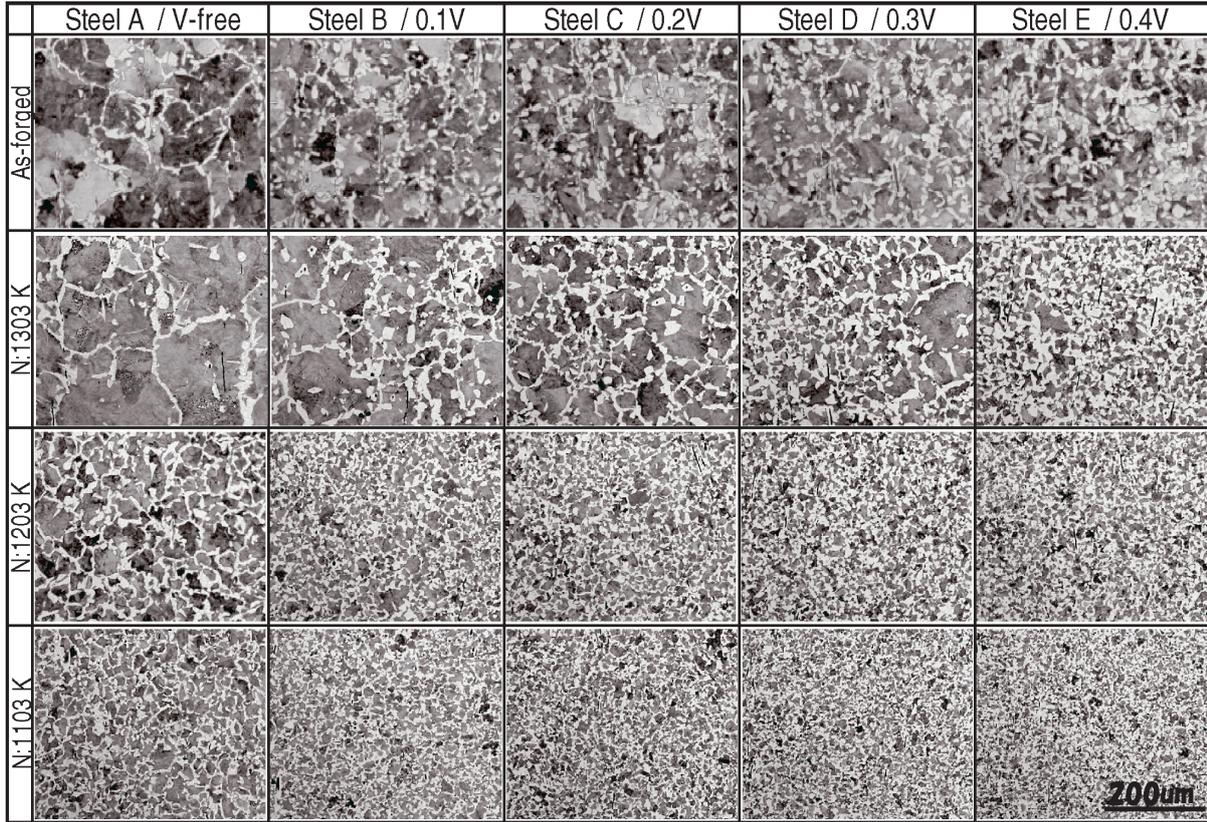


Fig.1. Microstructure of specimens after normalizing.

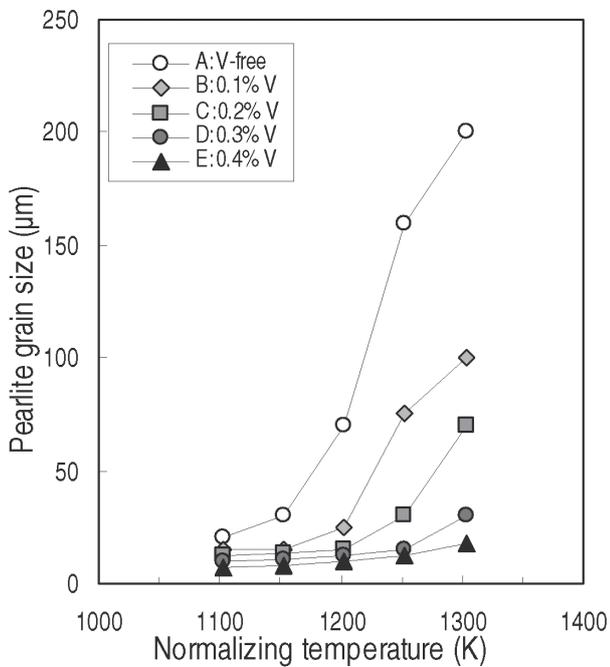


Fig.2. Relationship between normalizing temperature and pearlite grain size.

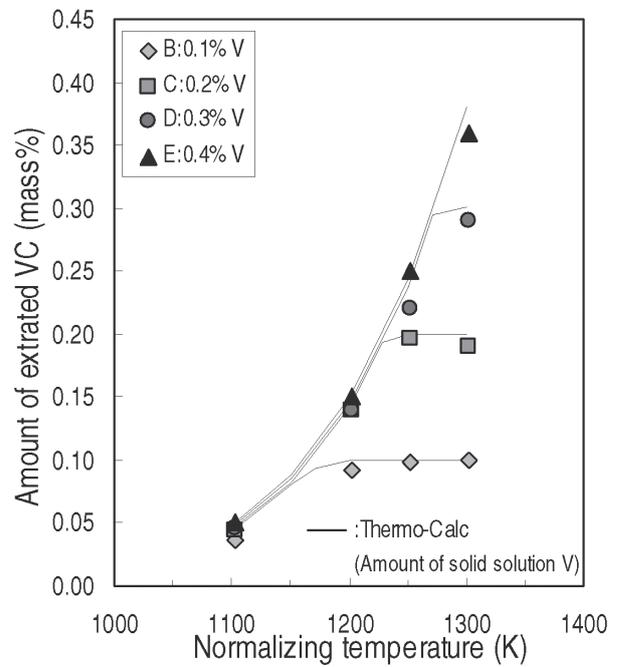


Fig.3. Relationship between normalizing temperature and amount of precipitation VC with electrolytic extraction method.

と未固溶 VC 量の総和が溶製時に添加した V 量に相当することから、焼ならし加熱時に固溶することなく溶け残った V は全て未固溶 VC として存在することが明らかとなった (Fig.4). Fig.5 に各焼ならし温度における

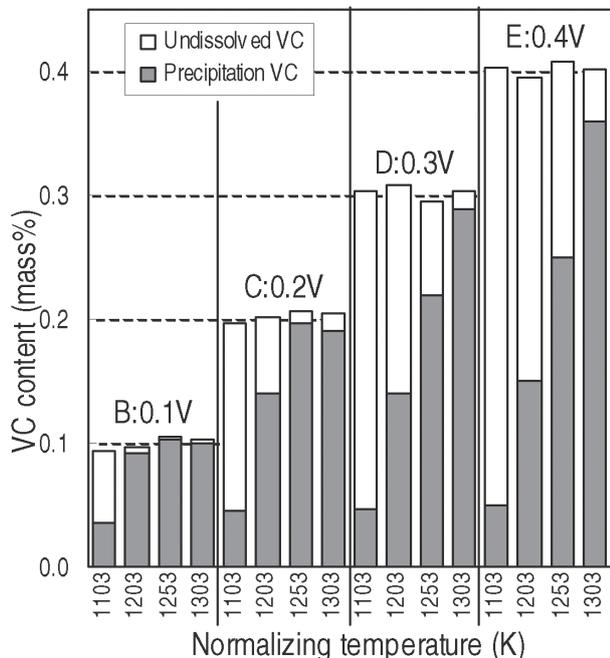


Fig.4. Relationship between undissolved VC and precipitation VC.

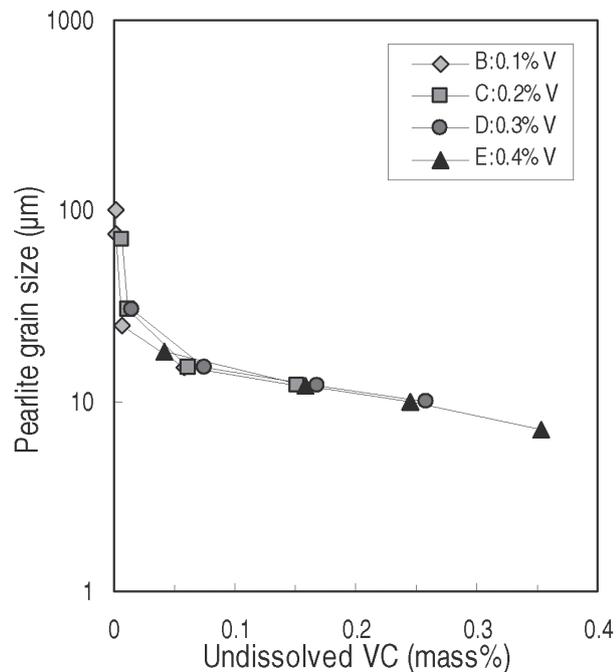


Fig.5. Relationship between undissolved VC and pearlite grain size.

未固溶 VC 量と平均パーライト粒径の関係を示す。平均パーライト粒径は溶製時の添加 V 量に関らず未固溶 VC 量で整理することが可能であり、未固溶 VC が F+P 組織の粗大化抑制粒子として作用していることが明らかとなった。したがって、F+P 組織の微細化効果を得るためには V が全固溶する温度以下で焼ならしを施す必要があることを示唆している。

Fig.6 に焼ならし温度と硬さの関係を示す。焼ならし温度を上昇させることで硬さが増加することから、焼ならし V 非調質鋼においては焼ならし加熱時の鋼中への固溶 V 量 (以下, [V] 量), つまり空冷時に析出した VC 量で整理が可能であることを示唆している。Fig.7 に析出 VC 量と硬さの関係を示す。析出 VC の増加とともに硬さが上昇することから、この析出 VC は母相と整合性を持った微細な炭化物であり、また、焼ならしで溶け残った未固溶 VC は鍛造空冷で析出した VC がその後の焼ならしで凝集、粗大化した粒子で硬さへの寄与は小さいが F+P 組織の粗大化抑制粒子として作用していると考えられる。したがって、高強度化 (高硬度) には焼ならし温度を上昇させることが重要であるが、高温化により F+P 組織が粗大化し靱性の低下が懸念されるため、最適な温度設定が必要となる。また、高温で焼ならしを施し VC を全析出し、かつ F+P 組織が粗大化した場合の硬さは、熱間鍛造後の硬さとほぼ同等となる。

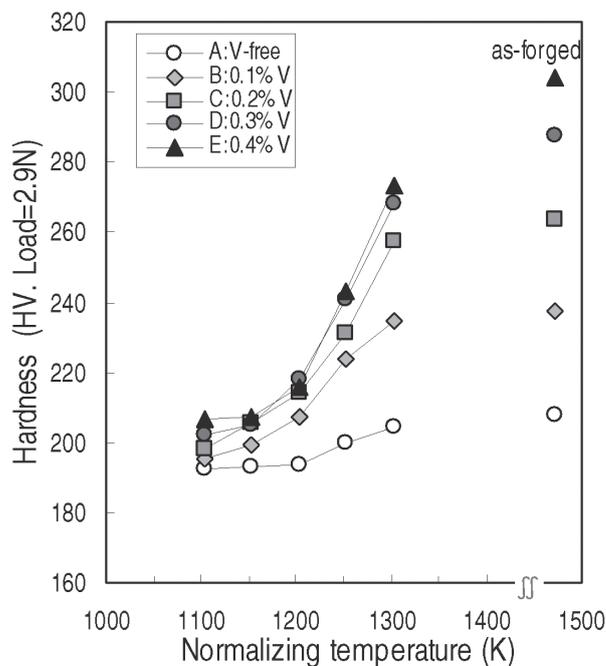


Fig.6. Relationship between normalizing temperature and hardness.

2. 3 機械特性に及ぼす焼ならし温度の影響

Fig.8 に析出 VC 量と耐力比の関係を、Fig.9 に焼ならし後の硬さとシャルピー衝撃値の関係を示す。析出 VC が増加するほど耐力比は向上し、焼ならし温度を上昇させることで高強度化が図れることを示唆している。衝撃値は硬さと良い相関関係をもっているが、F+P 組織が荒れると衝撃値が低下することも覗うことができる。これらのことから、強度 - 靱性バランスの両立には V が全固溶する温度以下でかつ高温で焼ならしを施すことが重要であることを示唆している。

次に、これらの考え方を活用し強度 - 靱性バランスに優れた軟窒化クランク用鋼を開発したので内容を紹介する。

3. 高強度軟窒化クランク用鋼開発

軟窒化部品の強度は表層硬さ、内部硬さおよび窒化拡散深さなどで整理することができる。強度の向上を図るにはこれらを増加させることが有効であるが、過度に表層硬さを上昇させるとひずみ矯正が行えなくなり、また内部硬さの上昇は被削性を低下させるため、強度と製造性（ひずみ矯正性、被削性）を両立させるためには最適な硬さ分布を付与する必要があることはすでに報告されている⁸⁾。さらに内部硬さと表層硬さを推定する合金設

計手法を加えて提案されているが⁸⁾、V 添加鋼に関しては十分に検討がなされていないため、V を考慮した合金設計手法を検討した。

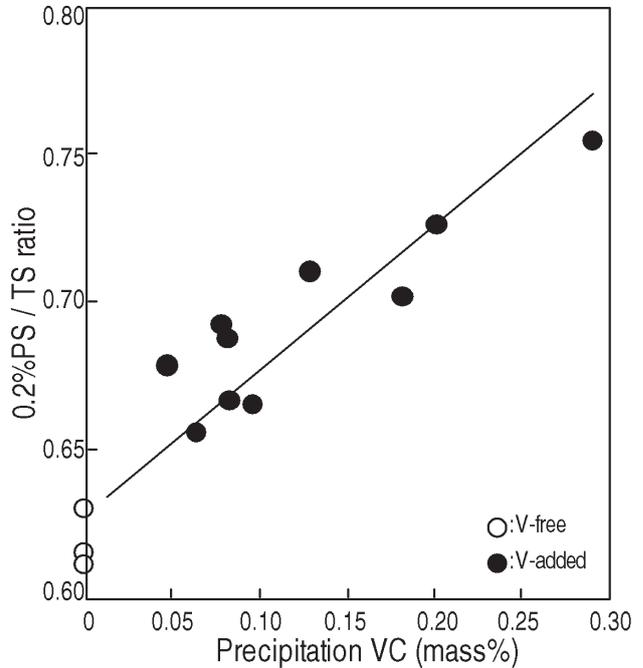


Fig.8. Relationship between amount of precipitation VC and 0.2 %PS / TS ratio.

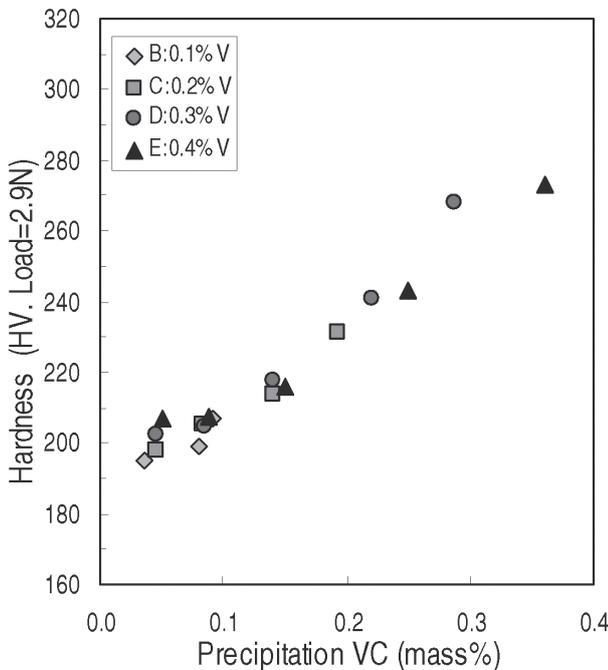


Fig.7. Relationship between amount of precipitation VC and hardness.

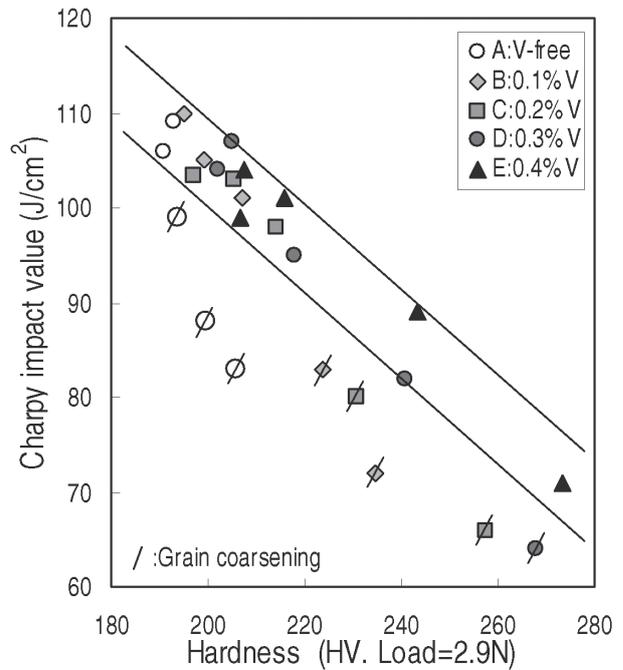


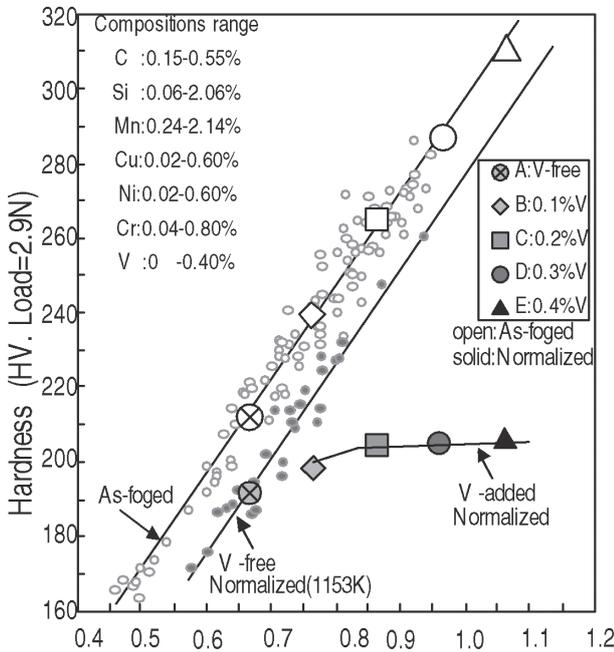
Fig.9. Relationship between hardness and proof Charpy impact value.

3. 1 内部硬さと表層硬さの推定式

熱間鍛造後のV非調質鋼の硬さは、Vの析出硬化とCやその他合金元素による硬化作用を合算した指数である炭素当量（以下、[C]eq）で整理することが可能であることはすでに報告されている⁸⁾。Fig.10に[C]eqと硬さの関係を示す。また[C]eqは式(1)で表される。

$$[C]eq=C+0.07Si+0.16Mn+0.19Cu+0.17Ni+0.2Cr+V \dots\dots\dots (1)$$

1153 Kで焼ならしを施した結果についても併記した。熱間鍛造後の硬さは[C]eqと良い相関を示すことが分かった。焼ならし材の硬さは鍛造後に比べ低い、[C]eqで整理が可能であることを示している。ただし、V非調質鋼においては[C]eqでは整理できないことも分かった。焼ならしV非調質鋼の硬さは析出VCと相関があることから、式(1)のVの項に焼ならし加熱時の[V]量をとった式(2)を用いることで硬さが推定できることが推察される。Fig.11に式(2)[C]eqと硬さの関係を示す。式(2)と硬さには良い相関を示しており、これにより焼ならしV非調質鋼においても[C]eqで合金設計を行うことが可能となった。また、[V]量はThermoCalcで容易に計算できることから工業的に有用である。



[C]eq(1)=C+0.07Si+0.16Mn+0.19Cu+0.17Ni+0.2Cr+V
Fig.10. Relationship between carbon equivalent ([C]eq(1)) and hardness of air-cooled ferrite-pearlite steels after forging at 1473 K and normalizing at 1153 K.

$$[C]eq=C+0.07Si+0.16Mn+0.19Cu+0.17Ni+0.2Cr+[V] \dots\dots\dots (2)$$

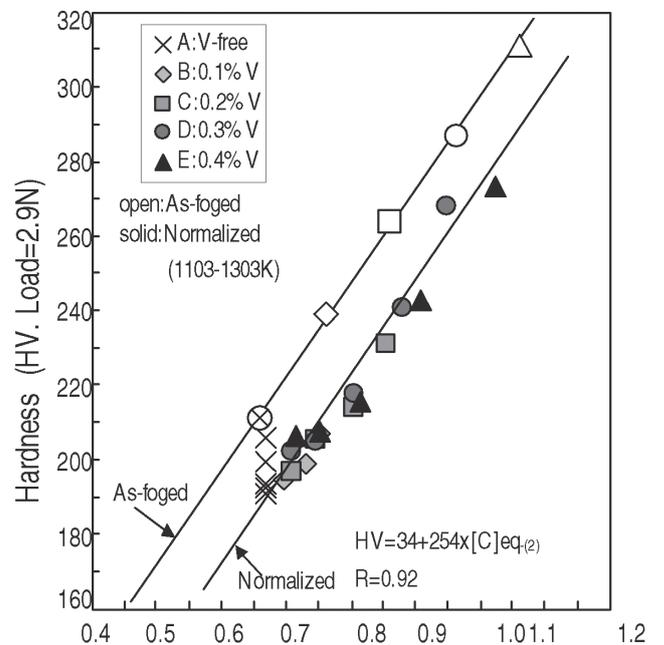
[V]：焼ならし加熱時に鋼中に固溶できるV量次に表層硬さについて検討を行った。軟窒化における表層硬さはクロム当量（以下、[Cr]eq）で整理が可能であると報告されているが、Vの影響については検討が行われていなかった。[Cr]eqを式(3)に示す。

$$[Cr]eq=0.48C+0.16Si+0.24Mn+Cr \dots\dots\dots (3)$$

Fig.12に軟窒化後の表層硬さと焼ならし加熱後の析出VCの関係を示す。析出VC量と軟窒化後の表層硬さには良い相関を示していることから、従来[Cr]eqに焼ならし加熱時の[V]量で整理が可能であることを示唆している。Fig.13に[V]量の項を追加した[Cr]eq(式(4))と軟窒化後の表層硬さの結果を示す。[Cr]eqと軟窒化後表層硬さには良い相関を示している。

$$[Cr]eq=0.48C+0.16Si+0.24Mn+Cr+1.3[V] \dots\dots\dots (4)$$

[V]：焼ならし加熱時に鋼中に固溶できるV量以上のことより、式(2)(4)で表される[C]eqと[Cr]eqを用いることで内部硬さと表層硬さを整理することができ、内部硬さと表層硬さは式(5)(6)で示される。
内部硬さ： HV=34+254x[C]eq(2) R=0.92
表層硬さ： HV=133+392x[Cr]eq(4) R=0.88



[C]eq(2)=C+0.07Si+0.16Mn+0.19Cu+0.17Ni+0.2Cr+[V]
Fig.11. Relationship between new carbon equivalent ([C]eq(2)) and hardness of air-cooled ferrite-pearlite steels after forging at 1473 K, normalizing at 1103-1303 K.

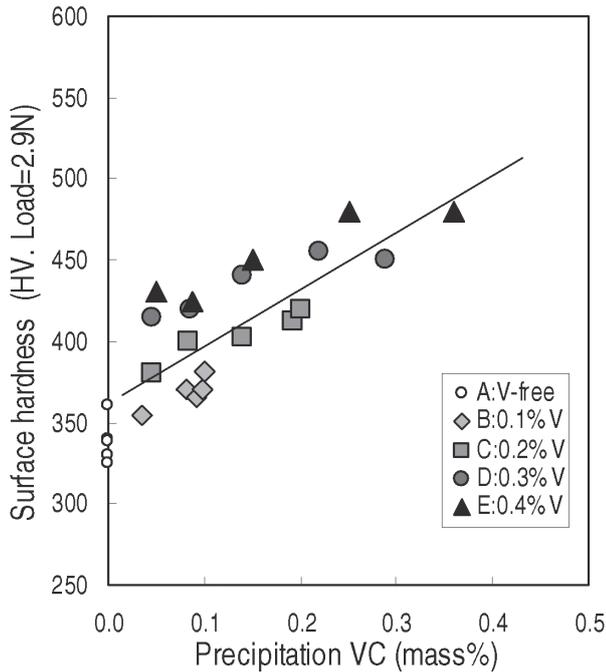


Fig.12. Relationship between amount of precipitation VC and surface hardness of ferrite-pearlite steels after nitrocarburizing.

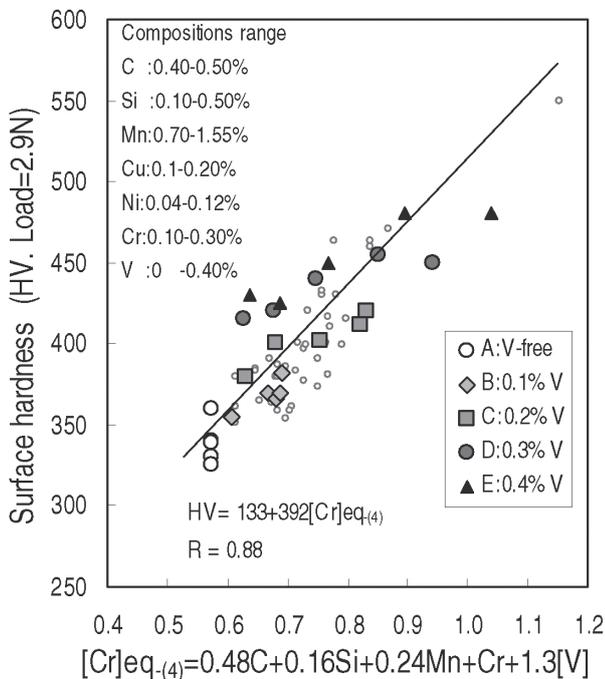


Fig.13. Relationship between chromium equivalent $[Cr]_{eq-(4)}$ and surface hardness of ferrite-pearlite steels after nitrocarburizing.

3. 2 合金設計

本高強度軟窒化クランク用鋼の開発目標は、疲労強度を従来鋼対比 30% 向上させ、かつ製造性（ひずみ矯正性、被削性）は現行同等以上となるように設定した。

Fig.14 に疲労強度を従来鋼対比 30% 向上させるための必要硬さ分布を示す。本開発材の目標疲労強度は 450 MPa であり、表層硬さを 400 HV 以上に設定し、窒化拡散深さを 0.3 mm 以上、内部の硬さは 200 HV 以上とした。また、ひずみ矯正性を確保するため表層硬さを 500 HV 以下、被削性を確保するため内部硬さを 250 HV 以下とした。Table 2 に開発鋼の化学成分を示す。表層硬さを上昇させる Cr, Al を従来鋼に比べ低減あるいは非添加とし、C, Mn, V で硬さを調整している。また、F+P 組織が粗大化する温度（1273 K）以下で目標の内部硬さが得られるように設計した。

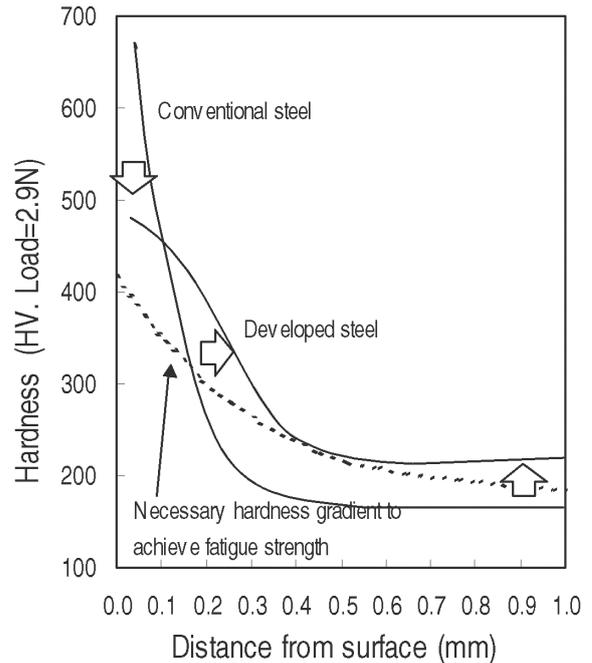


Fig.14. Hardness transition curve design with typical hardness distributions of conventional steel and developed steel.

Table 2. Chemical compositions of steels (mass%).

	C	Si	Mn	Cr	V	Al
Developed steel	0.47	0.10	0.75	0.15	0.30	—
Conventional steel	0.23	0.60	1.00	1.00	—	0.16

3. 3 疲労強度特性

Fig.15 に軟窒化後の硬さ分布を示す。試験片には Fig.16 に示すように段付の回転曲げ試験片を用い、焼ならし(1103 ~ 1253 K) →機械加工後に軟窒化を施した。軟窒化後の表層硬さは458-474 HV、拡散層深さは0.4 mm と狙いの硬さ特性が得られている。内部硬さは1103 K 以上で200 HV 以上が確保できている。Fig.17 に焼ならし温度と疲労強度の関係を示す。焼ならし温度を上昇させることで疲労強度が向上するのは、内部硬さの増加によるものと考えられる。しかし、焼ならし温

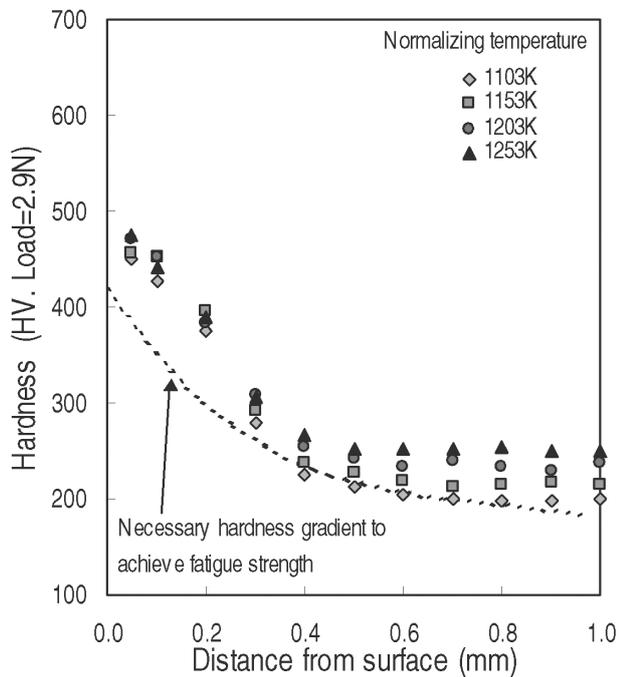


Fig.15. Hardness distributions of developed steel with normalizing temperatures after nitrocarburizing.

度 1253 K では疲労強度の向上が図れなかった。Fig.18 に焼ならし温度 1203 K, 1253 K のマイクロ組織を示すが、1253 K 材は F+P 組織の粗大化が観察された。開発材の V の全固溶温度は 1273 K であることから、粗大化抑制

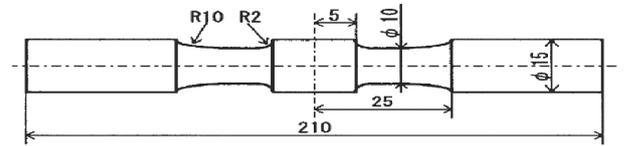


Fig.16. Geometry of rotating-bending fatigue, and bending test specimen.

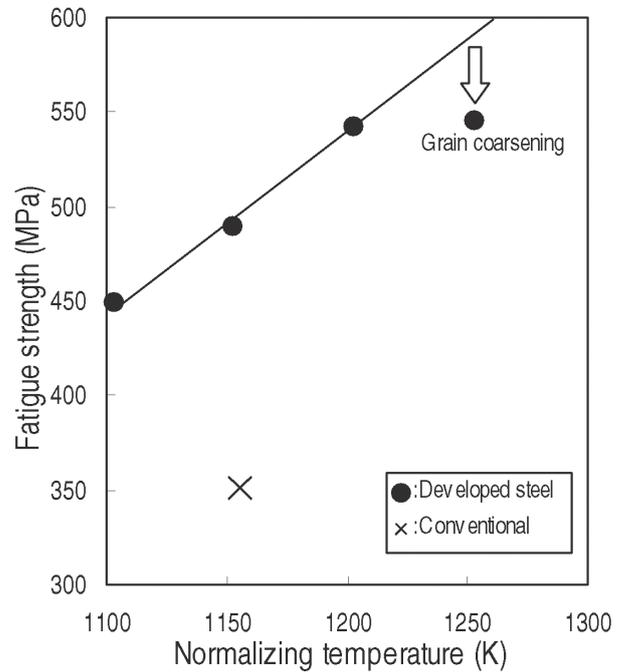


Fig.17. Relationship between normalizing temperature and fatigue strength.

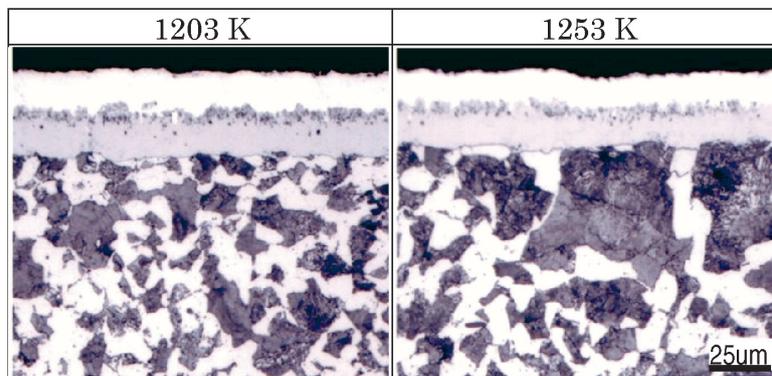


Fig.18. Microstructures of developed steel after normalizing at 1203 K and 1253 K.

粒子である未固溶 VC の減少により F+P 組織が粗大化したために疲労強度が向上しなかったと考えられる。

開発鋼はいずれの温度でも 450 MPa 以上の疲労強度が得られており、従来鋼 (350 MPa) と比較して 30 % 以上の向上が図れ、また、焼ならし温度を最適化することで最大 50 % の疲労強度の向上が得られる。

3. 4 ひずみ矯正性

前章 3.3 の強度評価用試験片を用いて 3 点曲げ試験を行い、試験片表層にき裂が発生するまでの押し込み量を測定することでひずみ矯正性を調査した。押し込み量が大きいほどひずみ矯正性に優れることを意味する。Fig.19 に焼ならし温度と押し込み量の関係を示す。また、焼ならしを省略した開発鋼、および 1153 K で焼ならしを施した従来鋼の押し込み量を併記した。焼ならしを施すことでひずみ矯正性は改善される。焼ならし温度 1253 K の押し込み量が低下したのは F+P 組織が粗大化したことによるものと考えられる。また、従来鋼の押し込み量が 2.1 mm であることから、開発鋼の焼ならし温度を 1203 K 以下に設定すれば、従来鋼と同等のひずみ矯正性が得られる。

以上のことから、最適な焼ならし温度を選択することで強度-靱性バランスに優れた V 非調質鋼を提供することが可能となった。

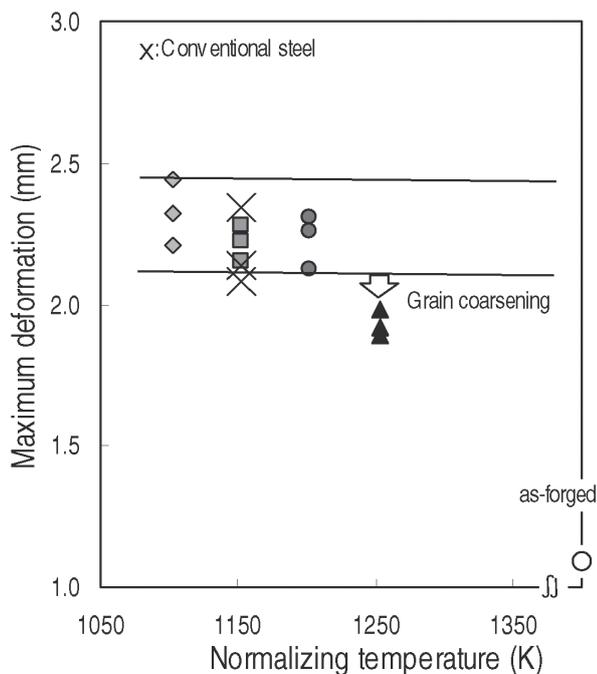


Fig.19. Relationship between normalizing temperature and maximum deformation.

本開発鋼を用いて量産ラインでクランクシャフトの製造を行い、製造性 (被削性、ひずみ矯正) は従来鋼同等で、かつ疲労強度は 30 % 以上向上していることを確認している。

4. 結 言

硬さと F+P 組織に及ぼす焼ならし温度の影響を調査することで、以下の知見を得るとともに強度 - 靱性バランスに優れた軟窒化クランク用鋼を開発した。

- (1) 焼ならし加熱時に鋼中へ固溶する V 量に応じて硬さは増加し、硬さは [C]eq 式 (2) で整理が可能である。軟窒化後の表層硬さは [Cr]eq (4) でよく整理ができ、[V] 量に応じて硬さは増加する。
- (2) 焼ならし材においても [C]eq と [Cr]eq を用いることで軟窒化後の内部硬さと表層硬さを推定することが可能となり、目標強度を得るための合金設計手法を確立した。
- (3) V が鋼中へ全固溶する温度以下で焼ならしを施すことで、鋼中に溶け残った未固溶 VC が粗大化抑制粒子として作用し F+P 組織の微細化に寄与し靱性の改善が図れる。
- (4) 焼ならし温度を最適化することで、ひずみ矯正性を確保しながら、疲労強度は現行材対比 30 % 以上の向上が図れる軟窒化クランク用鋼を開発した。

(文 献)

- 1) 丹羽祐久, 町田 功, 加藤哲男, 上原紀興, 田中良治: 電気製鋼, 53(1982), 26.
- 2) 渡辺敏幸: 電気製鋼, 70(1999), 43.
- 3) 佐藤紀男: Sanyo Technical Report, 8(2001), 68.
- 4) 諏方 悟, 川口大二, 村上 敦, 木村和良, 多田雅人: Honda R&D Technical Review, 22(2010), 55.
- 5) 井上幸一郎, 中村貞行: 電気製鋼, 67(1996), 56.
- 6) 藤井利光, 中村貞行: 電気製鋼, 63(1992), 15.
- 7) 井上幸一郎, 中村貞行: 電気製鋼, 65(1994), 22.
- 8) 井上幸一郎, 松村康志: 電気製鋼, 75(2004), 11.