

自動車ギア・バルブ部品用棒鋼・線材 環境に優しいPbフリー快削鋼

Bar and Wire Steels for Gear and Valve of Automobile —Eco-Friendly Free Cutting Steel without Lead Addition—

岩本 隆 IWAMOTO Takashi JFE スチール スチール研究所 棒鋼・線材研究部 主任研究員(副課長)
村上 俊之 MURAKAMI Toshiyuki エヌケーケー条鋼 仙台製造所 研究開発部 主任部員

要旨

Pb 添加に代わる被削性向上手段として、JFE スチールでは機械構造用 Pb 快削鋼代替鋼として鋼中への黒鉛析出に着目し、エヌケーケー条鋼では低炭素系 Pb 快削鋼代替鋼として組成による硫化物形態制御に着目し、新しい快削鋼をそれぞれ開発した。黒鉛鋼は鋼中 C の存在形態の制御により Pb 添加鋼と同等の被削性を有し、優れた冷間加工性と焼入れ焼もどし後の疲労特性との両立が可能な、特性バランスに優れた機械構造用快削鋼である。また、低炭素系 Pb 快削鋼代替として、硫化物系介在物の大型化により被削性を向上した鋼材を開発した。硫化物系介在物の大型化は、計算状態図からの予測に基づき、Cr 添加および S 添加量増によって実現した。

Abstract:

The free cutting steel has 2 types, one for machine structural use, and the other, low carbon steel for hard cutting, such as SAE 12L14. The addition of Pb is a popular means to improve the machinability of steel. However, it is considered that Pb in steel has a harmful effect on the human body. JFE Steel has developed a new free cutting steel, without Pb addition, for machine structural use by controlling the existing state of C in the steel. By the utilization of graphite precipitation in steel, both excellent cold workability and high fatigue strength can be achieved. To substitute for SAE 12L14, NKK BARS & SHAPES has developed a new free cutting steel, without Pb addition, by crystallizing large sulfide inclusions. It has been achieved by increasing the amount of S addition while also adding Cr on the basis of the estimation from the calculated phase diagrams.

1. はじめに

自動車や産業機械の部品素材として、Pb を添加した快削鋼が広く用いられているが、近年環境保護の観点から Pb の使用が問題視されている。

快削鋼は大きく 2 種類に分類できる。(1) 被削性と同時に冷間鍛造性や機械構造用鋼としての高い強度の両立を要求される機械構造用快削鋼と、(2) SAE 12L14 鋼に代表される、低炭素系で被削性を第一義とするいわゆる低炭素系快削鋼の 2 種類である。

JFE スチールおよびエヌケーケー条鋼では、各用途に応じて、Pb 添加に替わる被削性向上手段として、鋼中への黒鉛析出、および組成による硫化物形態の制御に着目した快削鋼をそれぞれ開発した。本報ではこれらの鋼材を紹介する。

2. 黒鉛析出型機械構造用 Pb フリー快削鋼

2.1 開発の背景

機械構造用鋼には、被削性、焼入れ焼もどし後の疲労強度および冷間鍛造性などが要求される。被削性の向上を目的とした Pb を含む介在物は、疲労強度や冷間鍛造性を阻害する要因であり、これら特性を同時に満足することは従来困難とされてきた。そのため、鋼中へ Pb 添加しないで、被削性、焼入れ焼もどし後の疲労強度および冷間鍛造性を同時に満足することが可能な鋼材の開発が望まれている。

このような背景のもと、高い疲労強度を有し、かつ Pb の添加を必要としない快削鋼が渴望されてきた。その解決のポイントは疲労強度を低下させない被削性向上手法を見出すことにある。

快削元素添加による介在物制御や Pb 添加に代わるこれまでにまったくない被削性向上因子として、本開発では鋼

中炭素の存在形態制御に着目した。本開発は通常、鋼中にセメンタイトとして存在するCを黒鉛へと変化させることを最大の特徴としている。しかしながら、亜共析組成を有する機械構造用鋼では、黒鉛の工業的な活用は従来困難とされてきた。

本章では、工業的な黒鉛析出を可能にするための化学組成と、鋼中の黒鉛析出が機械構造用鋼の特性に及ぼす影響について報告する。

2.2 開発鋼の考え方

2.2.1 黒鉛を活用した被削性・疲労強度バランスの向上

本開発鋼における、黒鉛活用の考え方を模式的に Fig. 1 に示す。硬いセメンタイトを黒鉛に変化させることで、鋼材の軟化が可能であり、被削性が向上する。さらに、工具面での黒鉛の潤滑作用により被削性は大幅に向上する。一方、黒鉛粒子は切削成形後の焼入時の加熱で母相に再溶解するので、応力集中源となりうる黒鉛が消失し、疲労強度を劣化させない。また固溶したCは鋼の焼入性を向上させ、強度を上昇させる¹⁾。

しかしながら、高炭素鋼や鋳鉄では、含有Cを黒鉛化する例²⁾はあるが、これらを機械構造用として用いることは靱性の観点から困難である。一方、亜共析組成を有する機械構造用鋼では、鋼中セメンタイトの黒鉛化には極めて長時間を要するため、黒鉛の工業的な活用のためには黒鉛化処理時間の短縮が必須となる。

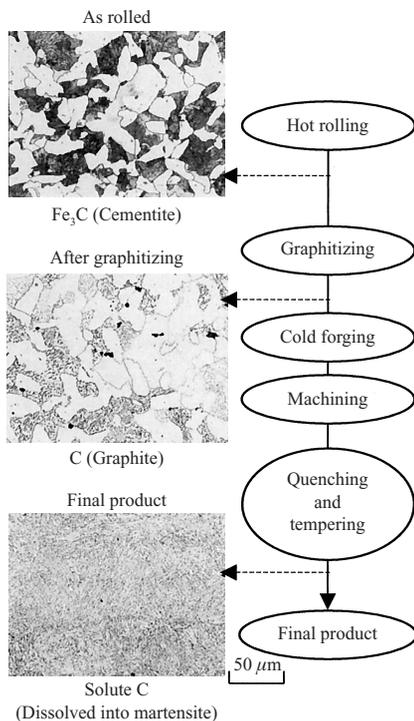


Fig. 1 A concept of utilizing graphites in the steel to achieve workability together with high strength

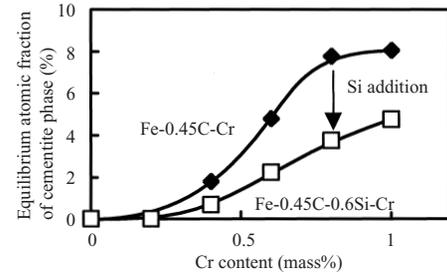


Fig. 2 Effects of Cr and Si on stability of cementite phase at 700°C

2.2.2 セメンタイトの熱力学的安定性制御

黒鉛化処理時間の短縮を目的として、機械構造用鋼の主要合金成分であるSiおよびCrの、鋼中セメンタイトの安定性に及ぼす影響を、熱力学データベース Thermo-Calc を用いて検討した。

Fig. 2 に、Fe-0.45 mass% C をベースに各合金元素を添加した場合の、700 °Cにおける平衡セメンタイト相量の計算結果を示す。純 Fe-C 合金にはセメンタイトは平衡相としては存在しないが、Cr を添加するとセメンタイトが平衡相として存在するようになり、添加量の増加とともに平衡セメンタイト量は増大する。一方、Fe-0.45C-0.6Si をベースとした場合、同一 Cr 量における平衡セメンタイト量は、Si の添加により減少する。Mn は Cr と同様に鋼中セメンタイトの安定性を増大する元素である¹⁾。山中ら²⁾は、鋳鉄の分野において、Cr や Mn がセメンタイト中の Fe 原子と置換してその安定性を増大させること、Si がセメンタイト中に微量に固溶して安定性を低下させることを報告しているが、亜共析鋼でも同様の傾向が認められた。

2.2.3 BN の活用による黒鉛核生成サイト数の増大

鋼中黒鉛粒子の微細分散は、疲労強度の低下抑制および黒鉛化処理時間短縮の両面に有効である。黒鉛粒子の微細分散には核生成サイトの増大が必要となる。本開発では、鋼中析出物による黒鉛核生成促進を検討した。種々の鋼中析出物の存在により黒鉛粒子の核生成は促進されたが、中でも BN が極めて有効な核生成サイトとして作用^{3,4)}した。

黒鉛と BN は析出物の結晶構造に加え、析出形態も極めて類似している。そのため、黒鉛は BN 表面上にエピタキシャルに生成、成長することが容易であり、鋼中の BN は黒鉛核生成サイトとして極めて有効に活用できる。

以上の検討結果に基づき、以下の特徴を有する開発鋼の化学組成を決定した。まず、セメンタイトの不安定化を目的として、従来の機械構造用鋼よりも Mn, Cr 量を低減し、Si 量を増加した。さらに黒鉛核生成サイトとなる BN の増大を目的として B および N 量を適正化した。開発鋼の主要化学組成例を、機械構造用鋼として一般的な JIS S45C と比較して Table 1 に示す。

鋼中セメンタイトは必ずしもすべてを黒鉛化する必要はなく、セメンタイトの一部の黒鉛化にともなうセメンタ

Table 1 An example of chemical composition of the developed steel (mass%)

	C	Si	Mn	Cr	B	N
Developed steel	0.45	0.6	0.3	trace	0.002 0	0.004 0
JIS S45C	0.45	0.25	0.8	0.15	-	0.005 0

イト量減少と、残留するセメントの形状制御の組み合わせにより、必要な特性が得られる。フェライト-黒鉛-球状化セメントの3相組織の活用で、さらなる軟化焼鈍の簡便化と、黒鉛粒子の微細化が同時に可能となる。

2.3 開発鋼の特性

本開発鋼および従来鋼における被削性・冷間鍛造性のバランスを Fig. 3 に示す。被削性は外周旋削試験により、超硬(JIS P10) 工具の逃げ面摩耗が 0.2 mm に達する切削時間を工具寿命として定義した。冷間鍛造性は、供試鋼の 50% に割れを生ずる圧縮率(限界圧縮率)をもって定義した。

従来、被削性と冷間鍛造性の両立は困難とされていたが、開発鋼においてはこれらの特性の両立が可能であり、開発鋼は従来鋼と比較して、優れた冷間鍛造性・被削性バランスを示す³⁾。たとえば、本開発鋼は、冷間鍛造性が同等の鋼材(図中 A) に対して、外周旋削試験においては 2 倍以上の工具寿命を有し、切削工具寿命が同等の鋼材(図中 B) と冷間鍛造時の変形能を比較すると、限界圧縮率で 10 ポイント以上の優れた値を示した。

開発鋼の優れた被削性は、黒鉛析出にともなうセメントイト減少と、黒鉛の潤滑作用によるものである。

各鋼の被削性と焼入れ焼もどし後の疲労強度の関係を図 4 に示す。開発鋼は、従来快削鋼と同等以上の被削性を有する一方で、焼入れ焼もどし後には 500 MPa を超える疲労強度を有している。快削鋼中の介在物径が数 10 μm 程度であるのに比較して、黒鉛粒子は BN 活用による核生成数の増大により、数 μm と微細である。さらに、鋼中の黒鉛は焼入れ時の加熱により、鋼材母相中に固溶する。なお、

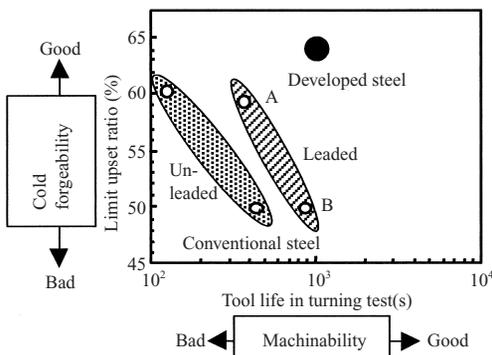


Fig. 3 Balance of machinability and cold forgeability of the developed steel in comparison with the conventional ones

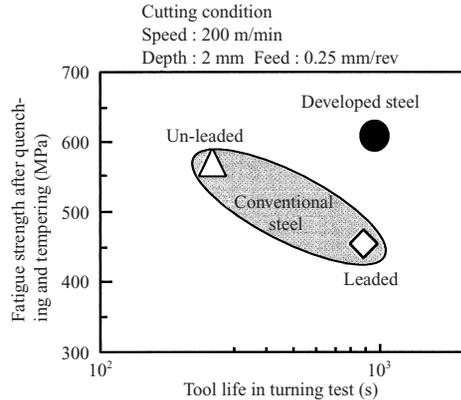


Fig. 4 Tool life obtained in the turning test and fatigue strength of the developed steel in comparison with the conventional ones

開発鋼中には未固溶 BN も存在しているが、サイズは 1 μm 前後である。このように本開発鋼で活用する黒鉛、BN はいずれも微細であり、従来の介在物とは異なり、疲労強度への悪影響を及ぼさなかったものと考えられる。

本開発鋼は、機械構造用鋼において、従来 Pb 添加鋼を用いていた部品や、被削性の問題で高強度化が困難とされてきた冷間鍛造用途を中心に、幅広く適用が可能である。

3. 硫化物形態制御型 SAE 12L14 代替 Pb フリー快削鋼

3.1 開発の背景

SAE 12L14 (JIS SUM24L) は Pb が 0.3%、S が 0.3% 添加された快削鋼で、自動車関連ではトランスミッション内での油圧制御バルブや油圧ホースの口金として、多量に使用されている。この快削鋼は鋼中酸素量が 150 ppm 程度と著しく多いため、機械構造用鋼対応で既に使われている Ca⁵⁾ や B⁶⁾ による被削性の向上が困難であると考えられた。そこで、別の手法を考える必要があったことから、被削性向上元素として多量に添加されている S に着目した。従来より S 快削鋼について、硫化物系介在物が大きいほど被削性が向上することが知られている⁷⁾。その観点から、硫化物系介在物の大型化による被削性向上を目的に検討を進めた。その際、硫化物に関する計算データベースの構築がマイクロアロイング技術の進歩にともない急速に進展していることから、それを有効に活用した。

本開発鋼では、最初に多元系の相平衡計算から状態図を求め、硫化物系介在物の大型化が期待できる成分系を予測した。その結果を基に、実際に試験溶解、被削性試験などの確認試験を実施し、成分系の決定を行い、新しい Pb フリー快削鋼を開発した。なお、本開発鋼は東北大学 石田清仁教授、産業技術総合研究所 東北センター 及川勝成主任研究員と共同で開発したものである。

3.2 開発鋼の考え方

3.2.1 状態図計算による予測

被削性に関する硫化物系介在物は、溶鋼の凝固中に偏晶反応により晶出する⁸⁾。硫化物系介在物の大型化を考えた場合、以下の方法が考えられる。

- (1) 凝固段階で、硫化物系介在物を大きく晶出させる。
- (2) 晶出後、鍛錬比を小さくする。

(1)の場合、凝固速度を小さくすることが一般的で、鑄造断面形状を大きくするか、鑄造時に緩冷却することが考えられる。しかし、いずれも現状の連続鑄造法の中で大きく変化させることは難しい状況にある。一方、(2)の場合、同一サイズの圧延材を製造することを考えると鑄造断面形状の小型化による鍛錬比の縮小が考えられるが、前述のように、鑄造断面形状の小型化は鑄造時の介在物サイズを小型化することにつながり、効果は小さい。そこで、著者らは、現状の連続鑄造設備を用いて硫化物系介在物を大型化するには、硫化物系介在物が液相から晶出する温度域を拡大する成分系が有効であると考えた。

成分系検討にあたり、以下の理由からCrに着目した。

- (1) MnSに固溶し、硫化物の大型化が期待できる。
- (2) (Cr, Mn)も被削性を改善する。
- (3) 環境に有害な元素ではない。

また、成分系定量化の検討にあたっては、状態図を計算により求め、そこから硫化物系介在物の晶出温度域を予測した。状態図の計算には、多元系状態図計算に適したCALPHAD (calculation of phase diagrams) 法を用いて、Fe-C-S-Cr-Mn系状態図用の熱力学データベースを構築し⁹⁾、状態図計算にはThermo-Calcを用いた。種々の成分値について計算を行ったが、Sの単独添加量増加やCrの添加のみでは晶出温度域の大幅な増大は得られず、「Cr添加+S増量」によって初めて晶出温度域が拡大することを見出した。本開発鋼成分系の計算状態図を現行鋼SAE 12L14の計算結果と比較してFig. 5に例示する。SAE 12L14の硫化物系介在物の晶出温度域は19°であるのに対し、本開発鋼の温度域は93°と4倍以上に温度域が拡大している。

一方、検討の過程で、本開発鋼の硫化物の析出量について

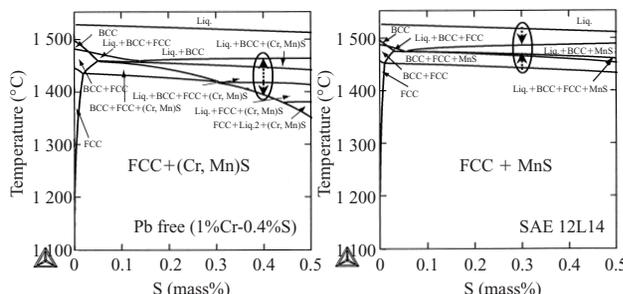


Fig. 5 Examples of calculated phase diagrams

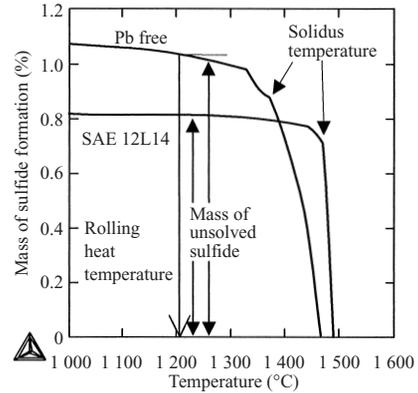


Fig. 6 Mass of unsolved sulfide of Pb free steel in comparison with SAE 12L14 steel

でも計算した。Fig. 6に示すように硫化物の析出量が求まり、圧延再加熱時の硫化物の未固溶量がSAE 12L14に比べて、はるかに多いことが分かった。これが、圧延再加熱時のオーステナイト粒成長の抑制、あるいは、フェライト変態の核として機能し、圧延材マイクロ組織の細粒化に寄与することが予測された。マイクロ組織の細粒化は、硫化物系介在物の大型化と同様に、被削性を向上させる¹⁰⁾。このような新たな知見についても計算によって初めて予測できたものと考えている。

3.2.2 実験溶解炉鋼による確認試験

計算で検討した成分系の中で、Pbフリー快削鋼の候補と考えられた成分系について、実際に試験溶解、被削性試験を行い、最終的な成分系の確認試験を行った。

供試材は、150 kg真空溶解炉により、溶製、鑄造した。鋼塊を1200°に加熱後、直径85 mmに熱間鍛造し、950°の焼ならしを施した後に、被削性試験を実施した。なお、熱間鍛造材の表面割れ状況を観察し、熱間延性も評価した。被削性と熱間延性をCr, Mn, S濃度の関係としてまとめた例をFig. 7に示す。図中には、同時に試験した比較鋼の結果も合わせて表記している。従来知られているように硫化物系介在物が大型化している成分系は被削性が良好であり、その大型化に対しては、状態図の計算から予測されたように、Cr添加ならびにS増量が必要であった。固相線温度から予測された熱間延性に対しても低

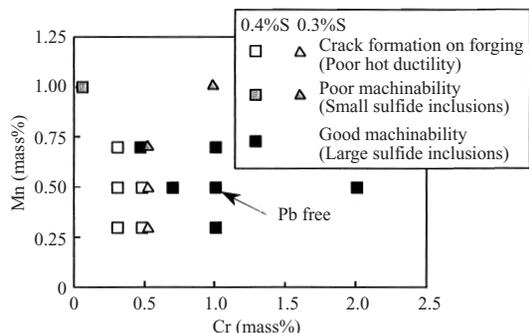


Fig. 7 Effects of Cr and Mn on machinability and hot ductility

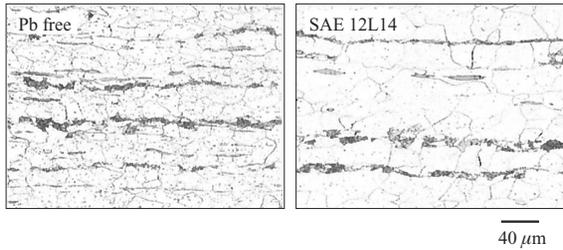


Photo 1 Micro structure of Pb free steel in comparison with SAE 12L14 steel

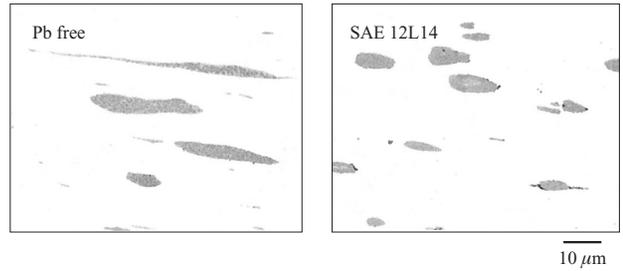


Photo 2 Size of sulfide inclusions of Pb free steel in comparison with SAE 12L14 steel

Mn, 低Cr領域で熱間鍛造割れが多発し、計算からの予測に一致していた。また、ミクロ組織については、1200 に加熱し、直径11.5 mmに圧延した線材のフェライト粒径を観察した。Photo 1 にミクロ組織を示す。本開発鋼成分系のフェライト粒径は、SAE 12L14 に比べて小さい。Fig. 6 の硫化物析出量の計算結果から予測されたように1200 に加熱した状態で、本開発鋼成分系の未固溶の硫化物析出量は、SAE 12L14 に比べてはるかに多く、その析出物量の差が原因で、本開発鋼成分系のオーステナイト粒成長が抑制されたと考えられる。

以上、状態図の計算予測に基づいて実施した実験溶解炉鋼による確認試験により、Pbフリー快削鋼成分系として、1%Cr-0.4%S鋼を決定した。

3.3 開発鋼の特性（実炉溶製鋼）

3.3.1 化学組成例と機械的性質

Table 2 に化学組成例、Table 3 に機械的性質を示す。機械的性質はSAE 12L14 とほぼ同等である。

3.3.2 硫化物系介在物の比較

Photo 2 に硫化物系介在物の顕微鏡写真を示す。硫化物系介在物の大きさは、これまで検討してきたとおり本開発鋼の方が大きくなっている。

Photo 3 に本開発鋼の硫化物系介在物をEPMAを用いて元素面分析した結果を示す。介在物全体にS, Cr, Mnが検出されているが、Cr, Mnについては、Cr濃度の高い箇所とMn濃度の高い箇所が存在している。

3.3.3 被削性

被削性は以下の条件下では、SAE 12L14 と同等以上であ

Table 2 Chemical composition

Steel	(mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Pb
Pb free	0.05	trace	0.58	0.076	0.385	1.00	trace
SAE 12L14	0.07	trace	1.05	0.070	0.340	0.08	0.24

Table 3 Mechanical properties ($\phi 85$ mm)

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	RA (%)
Pb free	298	401	36	57
SAE 12L14	289	409	30	43

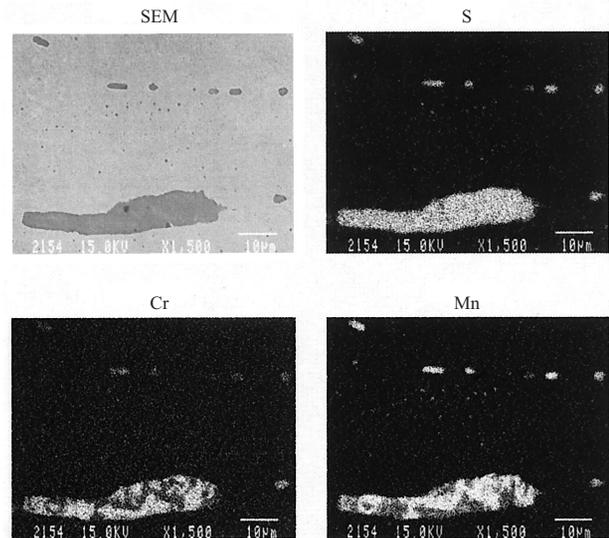


Photo 3 Elements mapping of sulfide inclusions

ることを確認した¹¹⁾。

- (1) 超硬、コーティング超硬、サーメット工具での旋削加工性（工具寿命および仕上げ面粗さ）
- (2) ハイス工具での旋削加工性（工具寿命および仕上げ面粗さ）
- (3) ハイス工具での穴あけ加工性（工具寿命）
- (4) 切屑処理性

Fig. 8, 9 に超硬工具 JIS P20 による旋削加工を行った時の切削時間と工具摩耗（逃げ面摩耗）量の関係と、切削速度と仕上げ面粗さ（最大粗さ）の関係をそれぞれ示す。SAE 12L14 に比較して、本開発鋼の工具摩耗の進行は緩やかで、良好な工具寿命となっている。また、本開発鋼の仕上げ面粗さは、いずれの切削速度においても SAE 12L14 に比較して、同等もしくは小さくなっており、良好である。

Fig. 10 に直径10 mmのハイスドリル JIS SKH51 による穴あけ加工を行った時の穴あけ個数とドリル摩耗量の関係を示す。旋削加工と同様に、SAE 12L14 のドリル摩耗の進行が速く、1450個を過ぎる頃から穴あけ時に異音が発生するようになり、穴あけ継続が不可能になったのに対して、本開発鋼にはそのような現象は認められず、1500個以上の穴あけが可能であり、良好な穴あけ加工性となっている。

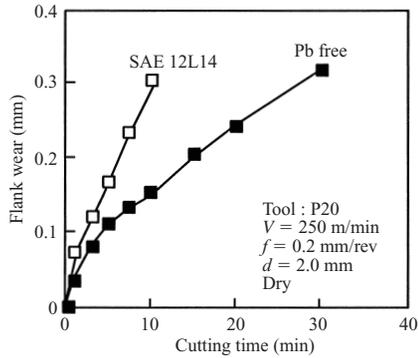


Fig. 8 Flank wear of Pb free steel in comparison with SAE 12L14 steel

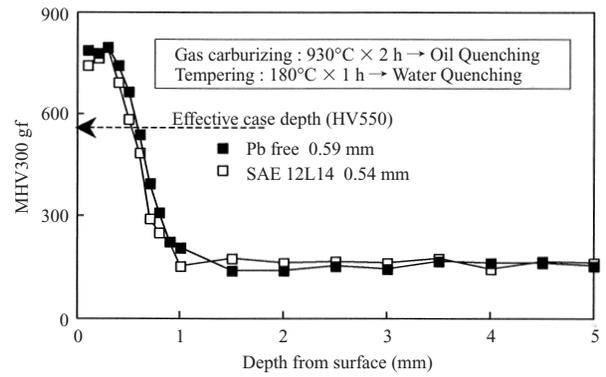


Fig. 11 Carburization characteristics of Pb free steel in comparison with SAE 12L14 steel

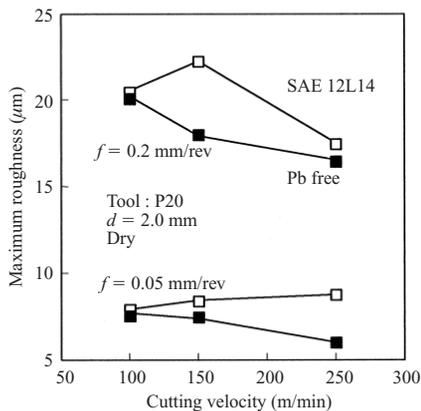


Fig. 9 Maximum roughness of Pb free steel in comparison with SAE 12L14 steel

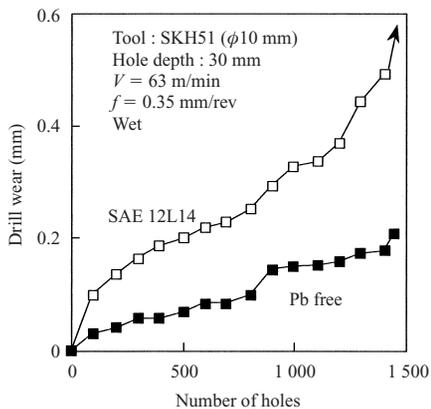


Fig. 10 Drill machinability of Pb free steel in comparison with SAE 12L14 steel

3.3.4 その他の特性

Fig. 11 に浸炭性の例をあげる。本開発鋼の浸炭性、めっき性も SAE 12L14 と同等である。

4. おわりに

地球環境問題からユーザーニーズに対応して開発した、機械構造用鋼向け、および、SAE 12L14 代替用途の Pb フリー快削鋼を紹介した。

(1) 黒鉛析出型機械構造用 Pb フリー快削鋼は、環境に有

害な物質を用いることなく、被削性と冷間鍛造性に優れ、機械構造用鋼に必要とされる特性を十分満足させるものである。

(2) SAE 12L14 代替 Pb フリー快削鋼の特徴は、硫化物系介在物を大型化したことにより、被削性を向上させたことである。これは、計算状態図からの予測に基づいて、Cr を添加し、さらには S を増量することによって初めて可能になった。

いずれの業界においてもグリーン調達動きが進んでおり、Pb 使用量の削減が指向される中で、これら Pb フリー快削鋼を、さまざまな分野で採用していただけるよう、今後も製品開発を進めていく所存である。

参考文献

- 1) Iwamoto, T.; Hoshino, T.; Amano, K.; Nakano Y. "An advanced high strength graphitized steel for forging uses". 2nd Internat. Symp. on Microalloyed Bar & Forging Steel. Colorado, 1996. p. 277.
- 2) 山中直道, 日下邦男. 鉄と鋼. vol. 48, 1962, p. 946.
- 3) 岩本隆, 太田裕樹, 星野俊幸, 天野虎一, 下村順一. 鉄と鋼. vol. 84, 1998, p. 67.
- 4) Iwamoto, T.; Hoshino, T.; Matsuzaki, A.; Amano, K. ISIJ Int. vol. 42, 2002, s77.
- 5) 大野鐵. 西山記念技術講座, 96・97. 1984, p. 157.
- 6) 村上俊之, 白神哲夫. NKK 技報. no. 178, 2002, p. 21.
- 7) Van Vlack, L. H. Trans. ASM. vol. 45, 1953, p. 741.
- 8) 及川勝成, 大谷博司, 石田清仁, 西沢泰二. 鉄と鋼. vol. 80, 1994, p. 623.
- 9) 及川勝成, 光井啓, 石田清仁. 材料とプロセス. vol. 16, 2003, p. 1516.
- 10) 白神哲夫. 材料とプロセス. vol. 12, 1999, p. 961.
- 11) 村上俊之. 特殊鋼. vol. 52, 2003, p. 22.



岩本 隆



村上 俊之