

AISI12L14 代替非鉛快削鋼の開発

Development of Free Cutting Steel without Lead Addition to Replace AISI12L14

村上 俊之 MURAKAMI Toshiyuki JFE 条鋼 仙台製造所 研究開発部 主任部員
富田 邦和 TOMITA Kunikazu JFE 条鋼 仙台製造所 研究開発部長・博士(工学)
白神 哲夫 SHIRAGA Tetsuo JFE 条鋼 研究主監・博士(工学)

要旨

AISI12L14 (JIS SUM24L) は Pb が 0.3%, S が 0.3% 添加された快削鋼であるが、地球環境問題から快削鋼の非鉛化が需要家に強く要望されている。そこで、従来より知られているように S 快削鋼で硫化物系介在物が大きいほど被削性が向上することから、この観点より検討を進めた。検討にあたっては、計算により状態図を求め、硫化物系介在物の大型化が期待できる成分系を予測し、予測された成分系について被削性などの確認試験を実施した。その結果、計算から予測されたように「Cr 添加 + S 増量」により硫化物の大型化が可能となり、低速のドリル加工から超硬工具での高速切削まで広い範囲で AISI12L14 と同等以上の被削性を有する新しい非鉛快削鋼を開発することができた。

Abstract:

AISI12L14 (JIS SUM24L) is Pb-added free cutting steel containing 0.3% Pb and 0.3% S. Customers need Pb-free free cutting steel from the viewpoint of global environmental problems. Since it has long been known that the machinability of S-added free cutting steels is improved as the size of sulfide inclusions becomes larger, the improvement of machinability was studied from this viewpoint. Firstly, the chemical compositions of the developed steel were designed by the calculated phase diagram to have a wide temperature range of solidification which results in the formation of large size of sulfide inclusions. Based on the results, machinability test and hot forging test were actually conducted to confirm the chemical compositions. Crystallization of large sulfide inclusions was first attained with chromium addition and increment of sulfur content. The authors have developed a new Pb-free free cutting steel with excellent machinability in a wide range from low cutting speed such as drilling to high one such as turning.

1. はじめに

前報¹⁾で述べたように快削鋼は機械構造用快削鋼と低炭素系快削鋼の2種類に大別され、前報では機械構造用鋼対応の BN 活用型非鉛快削鋼について報告した。引き続き、本報では低炭素系快削鋼である AISI12L14 (AISI: アメリカ鉄鋼協会) 代替非鉛快削鋼について報告する。

2. 開発の背景

AISI12L14 (JIS SUM24L) は、Pb が 0.3%, S が 0.3% 添加された低炭素硫黄複合快削鋼で、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、また、プリンターシャフトなどの OA 機器の部品としても多量に使用されている。この快削鋼は、鋼中酸素量が 150 ppm 程度とけた違いに多いため、機械構造用鋼対応ですでに使われている Ca²⁾ や B³⁾ 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⁴⁾。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

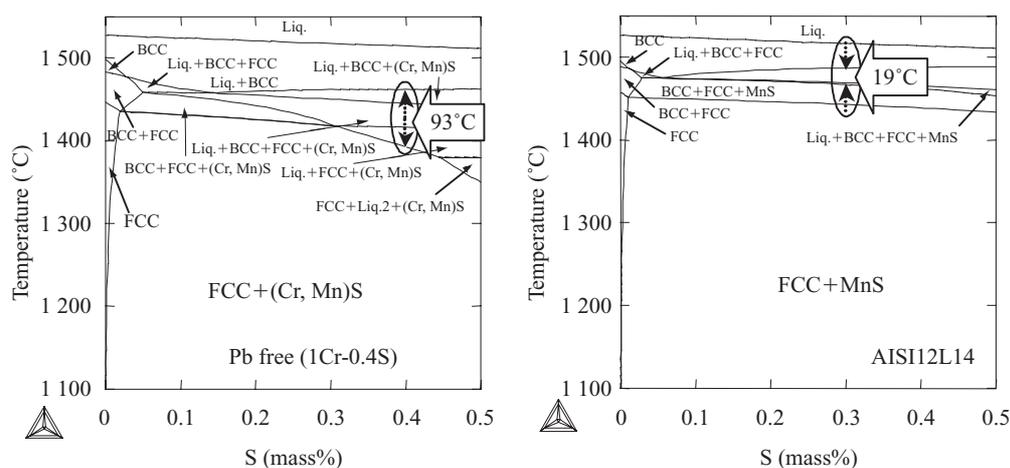


図1 計算状態図の比較

Fig.1 Comparison of calculated phase diagram

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、新しい非鉛快削鋼を開発した。なお、本開発鋼は東北大学・石田清仁教授、及川勝成准教授と共同で開発したものである。

3. 開発鋼の考え方

3.1 状態図計算による予測

被削性に関与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。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、凝固速度を遅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。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) (Cr, Mn)S を形成し、硫化物の大型化が期待できる。
- (2) (Cr, Mn)S も被削性を改善する。
- (3) 環境に有害な元素ではなく、合金として用いられる。

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⁵⁾、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 AISI12L14 の結果と比較して図1に例示する。

AISI12L14 の硫化物系介在物の晶出温度域は、19°Cであるのに対し、本開発鋼の温度域は、93°Cと4倍以上に温度域が拡大している。次に本開発鋼の成分系について、Cr を変化させて凝固のどの段階で硫化物系介在物が晶出し始めるかについて計算してみた。計算結果を図2に示す。硫化物系介在物が晶出し始める温度は、Cr の量ではあまり変化せず、約0.65の固相率と計算された。凝固後半で硫化物系介在物が晶出し始めるのが分かる。

3.2 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、非鉛快削鋼の候補と考え

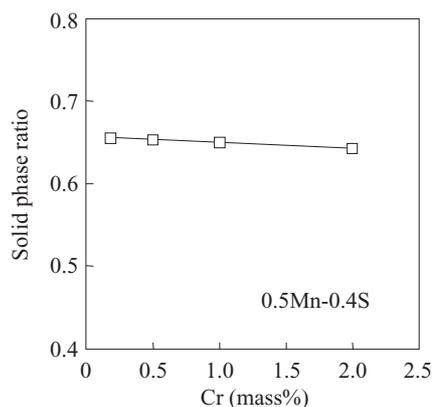


図2 固相率に及ぼす Cr の影響

Fig.2 Effect of Cr content on solid phase ratio

^{*} Thermo-Calc は Thermo-Calc Software AB 社の商標または登録商標である。

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し、160 mm 角インゴットに铸造した。その後、1200℃に加熱、直径85 mmに熱間鍛造し、950℃の焼ならしを施した後、被削性試験を実施した。なお、S増量成分系の検討であるため熱間延性についても評価した。

まず、最初に硫化物系介在物の形態について観察した。写真1に直径85 mm鍛造材L断面中間部の硫化物系介在物を示す。なお、()内の温度は状態図計算より求めた硫化物系介在物の晶出温度域を併記した。AISI12L14の硫化物系介在物の大きさは小さく、また、AISI12L14に1mass%Cr添加した成分と同系統の1Mn-0.3S-1CrにおいてもAISI12L14と同様に硫化物系介在物の大きさは小さかった。一方、0.5Mn-0.4S-1Cr、ならびに、0.5Mn-0.4S-2Crのように「Cr添加+S増量」成分系では硫化物系介在物の大きさが大型しているのが観察された。図3に種々の成分系について状態図計算より算出した硫化物系介在物の晶出温度域と顕微鏡写真より測定した硫化物系介在物の大きさの関係を示す。硫化物系介在物の大きさは顕微鏡写真で大きい方から5個を抽出し、その平均面積とした。硫化物系介在物の大きさは晶出温度域の増加とともに大型化し、状態図計算による予測と一致した。

次に、被削性試験を行った。今回対象鋼としているAISI12L14をはじめとする低炭素硫黄（複合）快削鋼が使用される部品においては仕上げ面粗さが良好であることが特に要求されるため、まず、仕上げ面粗さを試験した。切削加工メーカーで広く使用されているコーテッド超硬工具により切削速度を変化させて直径85 mm材を旋削した時の仕上げ面粗さ（最大粗さ）を測定した。いずれの成分系も

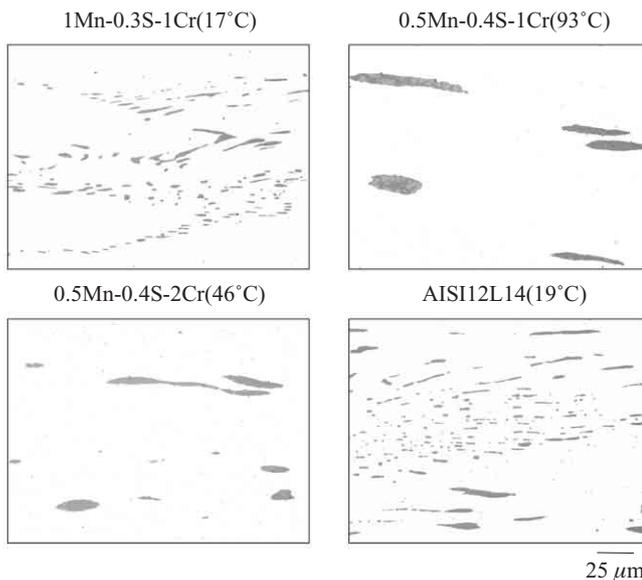


写真1 硫化物系介在物の大きさの比較 (φ85)
Photo 1 Comparison of size of sulfide inclusions (φ85)

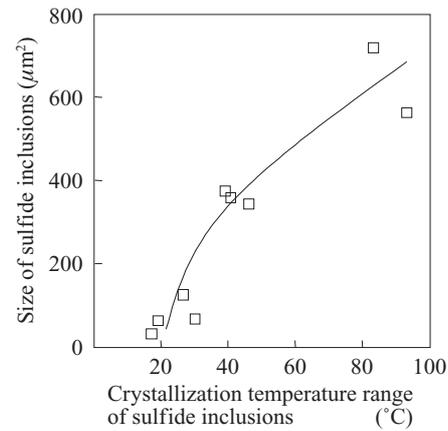


図3 硫化物系介在物の晶出温度域と大きさの関係
Fig.3 Relationship between crystallization temperature range and size of sulfide inclusions

切削速度が上昇するにつれて仕上げ面粗さは小さくなり、工具面上の構成刃先の小型化、消滅とともに仕上げ面粗さは小さくなると考えられた。図4に切削速度100 m/minでの仕上げ面粗さを硫化物系介在物の大きさとの関係で整理して示す。硫化物系介在物が大型化するにつれて仕上げ面粗さは小さくなっており、仕上げ面粗さに対して硫化物系介在物の大型化、ならびに、「Cr添加+S増量」の有効性が確認された。なお、同時に工具寿命、切屑処理性の試験も実施したが、仕上げ面粗さと同様に硫化物系介在物の大型化、ならびに、「Cr添加+S増量」の有効性が確認された。

さらに、熱間延性を評価するために熱間鍛造材の表面割れ状況を観察した。評価としては表面割れが大きく開口しているもののほか被削性試験に用いる旋削チップ、あるいは、ハイスドリルが試験中にチッピングを発生すると予想

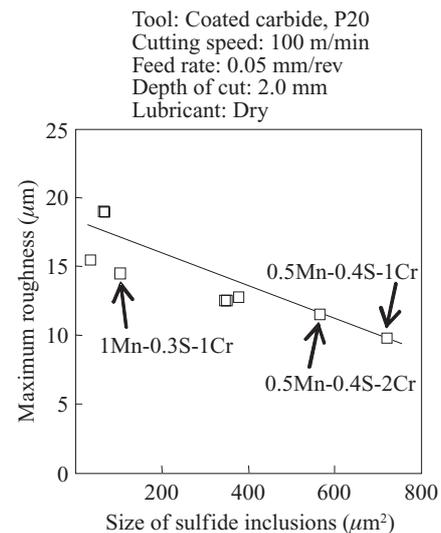


図4 硫化物系介在物の大きさとの最大粗さの関係
Fig.4 Relationship between size of sulfide inclusions and maximum roughness

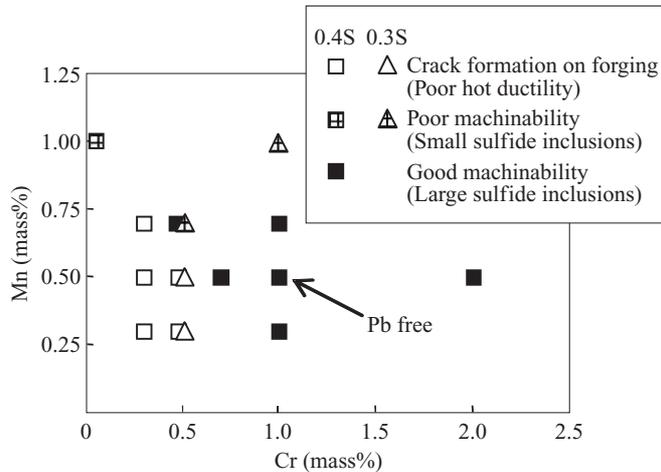


図5 被削性、熱間延性に及ぼす Cr, Mn, S 量の影響

Fig.5 Effect of Cr, Mn and S content in steel on machinability and hot ductility

される表面割れも不良と評価した。観察結果を被削性と合わせて Cr, Mn, S 量の関係として図5にまとめた⁶⁾。低 Cr, 低 Mn 量領域で表面割れが多発し、固相線温度から予測された熱間延性と一致した。また、S 増量とともに Cr を添加、増量するに従い熱間延性は向上しており、同時に硫化物系介在物が大型化することにより前述したように被削性が良好である。

以上、状態図計算の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、被削性、熱間延性ともに良好な非鉛快削鋼成分系として、1mass%Cr-0.4mass%S 鋼を決定した。

4. 開発鋼の特性 (実炉溶製鋼)

4.1 成分例と機械的性質

表1に化学成分例を示す。また、表2に機械的性質を示す。機械的性質は AISI12L14 とほぼ同等である。

表1 化学成分

Table 1 Chemical compositions

Steel	(mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Pb
Pb free	0.05	tr.	0.58	0.076	0.385	1.00	tr.
AISI12L14	0.07	tr.	1.05	0.070	0.340	0.08	0.24

表2 機械的性質 (φ85)

Table 2 Mechanical properties (φ85)

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	RA (%)
Pb free	298	401	36	57
AISI12L14	289	409	30	43

YS: Yield strength TS: Tensile strength
El: Elongation RA: Reduction of area

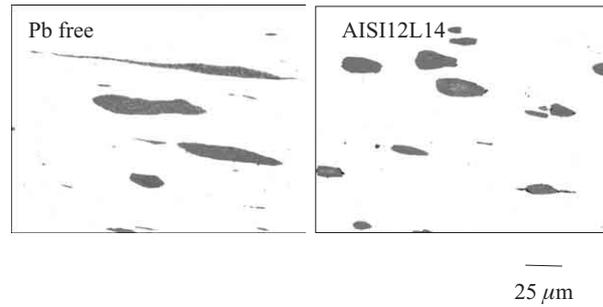


写真2 硫化物系介在物の大きさの比較 (φ85)

Photo 2 Comparison of size of sulfide inclusions (φ85)

4.2 硫化物系介在物の比較

写真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ように、本開発鋼の方が大きくなっていることを実炉溶製鋼においても確認した。本開発鋼の硫化物系介在物を EPMA を用いて元素面分析すると介在物全体に 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た。

Cr は硫化物系介在物とともにフェライト中へも分配されるが、表3にフェライトと硫化物系介在物を EPMA を用いて定量分析した結果を示す。Cr のフェライト中への分配比は高く、約 0.9 mass%Cr にも及ぶ。フェライト中への Cr のこのような高濃度の固溶はひずみ時効特性に影響を与え、ひいては被削性、特に仕上げ面粗さに影響を及ぼすことが考えられた。この影響を検討するため、本開発鋼と同程度の C 量としてフェライト主体の組織とし、かつ、硫化物系介在物の影響を排除するために S 量を大幅に減じた低 C 鋼で Cr 量を変化させて試験したところ、ひずみ時効特性、および、仕上げ面粗さに及ぼす Cr の影響は小さいことが確認された⁷⁾。また、S 量を本開発鋼なみに 0.4 mass%S 添加して同様の試験を実施し、ひずみ時効特性の影響を考慮した上で硫化物系介在物の影響を検討したところ、S 添加により硫化物量が增加し仕上げ面粗さは大きくなったが、同時に Cr を添加、増量することにより硫化物系介在物は大きくなり、それにともない仕上げ面粗さは小さくなった。この試験からも本開発鋼の最大の特徴である硫化物系介在物の大型化の効果、ならびに、「Cr 添加 + S 増量」の有効性が確認された⁸⁾。

表3 Cr の分配比

Table 3 Partition of chromium

Steel	(mass%)					
	Ferrite			Sulfide		
	S	Mn	Cr	S	Mn	Cr
Pb free	0.026	0.15	0.94	36.9	41.7	10.2
AISI12L14	0.023	0.66	0.08	35.9	53.9	0.02

4.3 被削性

被削性は以下に示すような条件下では、AISI12L14 と同等以上であることを確認した⁹⁾。

- (1) 超硬, コーテッド超硬, 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

図6に直径10mmのハイスドリル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。AISI12L14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を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。また、バリ取り性も良好であり、人手で対応しなければならぬバリに対しても有効である。

図7に超硬工具P20による旋削加工を行った時の切削速度と仕上げ面粗さ(最大粗さ)の関係を示す。低炭素硫黄(複合)快削鋼においては仕上げ面粗さが良好であることが特に要求されるが、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AISI12L14に比較して同等もしくは小さくなっており、良好である。

次に、本開発鋼の被削性付与のメカニズムについて記述する。被削性付与のメカニズムは既存快削鋼では大きく分けて次の4つであり、おのおのについて本開発鋼の最大の特徴である硫化物大型化の効果を検証する。

- (1) 切欠き効果により切屑生成を容易にする(S快削鋼)。

写真2で示したように硫化物系介在物は大型化しており、亀裂の発生および伝播に関して硫化物系介在物

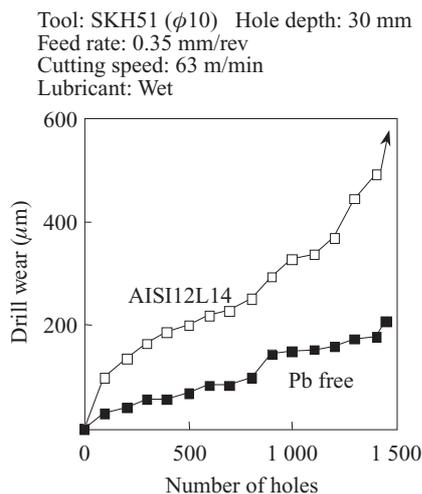


図6 ドリル寿命

Fig.6 Drill machinability

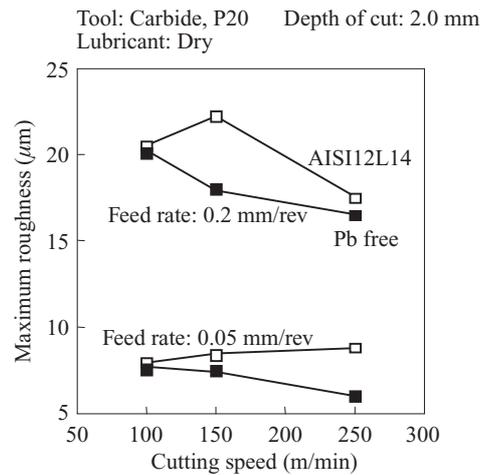


図7 最大粗さ

Fig.7 Maximum roughness

が大きい方が有利であることから本開発鋼はこの効果を有すると考えられる。

- (2) 材料に脆性を与え、せん断領域における切屑生成を容易にする(S快削鋼やPb快削鋼)。

Pb快削鋼は切屑処理性が良好であるが、これは鋼中に存在するPbの融点が低く、300℃付近での延性低下が著しいためである。この温度に対応する温間加工温度域では、鋼中のS量が増えるにしたがって延性が低下する。本開発鋼のS量は0.4mass%とかなり多量に添加されているため、この温度域では延性低下(脆化)していることから、本開発鋼はこの効果を有すると考えられる。

- (3) 工具と切屑あるいは被削材の接触面で潤滑性を持たせる(S快削鋼やPb快削鋼)。

工具と切屑あるいは被削材の接触面に硫化物の皮膜、あるいは、溶融Pbの存在により潤滑性を持たせて切削抵抗を低下させる効果がある。切削後に本開発鋼の工具面上を分析するとCr-Mn-Sの硫化物の皮膜が観察されることから、本開発鋼はこの潤滑性の効果を有すると考えられる。

- (4) 工具と被削材間の拡散反応を防止する(Ca快削鋼やBN快削鋼)。

広く知られているように、Ca快削鋼を切削すると工具面上に酸化物組成のいわゆるベラーゲが形成付着し、工具摩耗を抑制する効果を有する。また、JFE条鋼で開発した機械構造用鋼対応の非鉛快削鋼であるBN快削鋼を高速切削するとAlN皮膜が形成付着し、工具摩耗が抑制される。一般的には、S快削鋼には工具と被削材間の拡散反応を防止する効果はないため、S快削鋼の類である本開発鋼にはこの効果は有しないと考えられる。

以上、表4に被削性付与に対する本開発鋼の効果をメカニズム別にまとめる。(1)~(3)に対しては低速でのドリル

表 4 本開発鋼のメカニズム

Table 4 Mechanism of developed free cutting steel

Effect	Drilling (Low speed)	Turning (High speed)
(1) Crack propagation	○	○
(2) Embrittlement of cutting zone	○	○
(3) Tool face lubrication	○	○
(4) Prevention of diffusion wear	×	×

○: Effective ×: Ineffective

加工から高速の旋削加工まで有効であり、(4)の効果は有しない。

4.4 浸炭性

低炭素硫黄（複合）快削鋼においては切削後に浸炭されて部品として使用される場合がある。図 8 に断面形状が 10 mm 角（長さは 50 mm）に切削加工後、930℃で 2 時間ガス浸炭した時の表層近傍の硬度分布を示す。本開発鋼の最高硬さ、ならびに、550HV0.3 を閾値とする有効硬化層深さは AISI12L14 とほぼ同じで浸炭性は同等である。

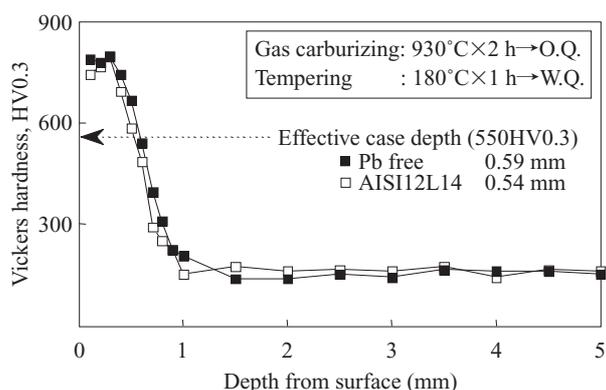


図 8 浸炭性
Fig.8 Carburization characteristics

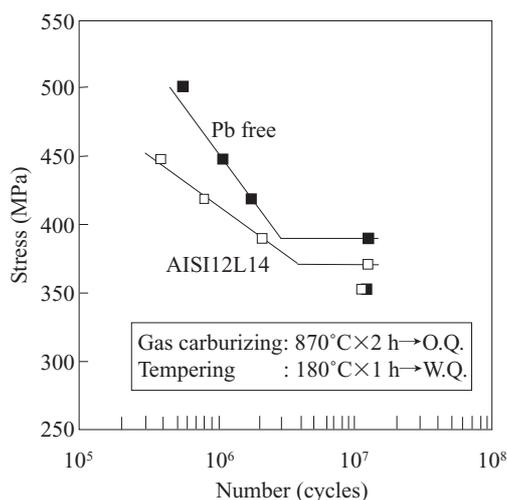


図 9 疲労特性
Fig.9 Fatigue characteristics

表 5 めっき膜厚の比較

Table 5 Comparison of plating film thickness

Steel	Not grinded	Grinded (μm)
Pb free	4.017	4.548
AISI12L14	4.008	4.699

表 6 塩水噴霧試験結果（レイティングナンバー）

Table 6 Salt spray test result (Rating number)

Steel	Not grinded	Grinded
Pb free	7	9
AISI12L14	7	9

図 9 に小野式回転曲げ疲労試験片を 870℃で 2 時間ガス浸炭後疲労試験した結果を示す。疲労限、時間強度ともに本開発鋼の方が AISI12L14 よりも高く、良好である。

4.5 めっき性

OA 機器のプリンターシャフトをはじめとして、めっきして使用される場合がある。直径 10 mm の引抜き材に無電解 Ni めっきを実施しめっき性を調査した。また、めっき前の表面状態の影響を確認するために引抜き後に研磨工程を入れたものについても試験した。めっき性の評価としては、めっき膜厚の測定、ならびに、2 時間塩水噴霧後のレイティングナンバーによる表面腐食ピット発生状況を測定した。試験結果を表 5、ならびに、6 にそれぞれ示す。めっき膜厚については、管理幅 3 ~ 6 μm のめっき条件で実施したが、本開発鋼、ならびに、AISI12L14 とともに管理幅に入っており良好である。塩水噴霧試験においては、レイティングナンバーに差が認められず、良好である。また、研磨有り品の方がレイティングナンバーが大きく、良好である。めっき後に切断し、めっき層/地鉄界面の状態を観察したが、研磨なし品は地鉄側に凹部が存在しており、その箇所から腐食ピットの発生が認められた。一方、研磨有り品のめっき層/地鉄界面は平滑であり、その違いが腐食ピット発生に影響していた。

5. おわりに

地球環境問題から、素材メーカーに対するニーズに呼応して AISI12L14 代替用途の非鉛快削鋼を開発した。

開発鋼の特徴は、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、状態図計算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。

Pb 使用量の削減が指向される中で、非鉛快削鋼は今後も適用分野、数量の拡大が予想され、いずれの業界においても進行しつつあるグリーン調達への寄与が期待される。

参考文献

- 1) 村上俊之, 富田邦和, 白神哲夫. JFE 技報. 2009, no. 23, p. 10-16.
- 2) 大野鐵. 西山記念技術講座 96・97. 1984, p. 157-185.
- 3) 村上俊之, 白神哲夫. NKK 技報. 2002, no. 178, p. 21-25.
- 4) Van Vlack, L. H. Trans. ASM. 1953, vol. 45, p. 741-746.
- 5) 及川勝成, 光井啓, 石田清仁. CAMP-ISIJ. 2003, vol. 16, p. 1516.
- 6) 村上俊之, 白神哲夫, 及川勝成, 石田清仁. CAMP-ISIJ. 2004, vol. 17, p. 1418.
- 7) 村上俊之, 白神哲夫, 及川勝成, 石田清仁. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 19, p. 1011.
- 8) 村上俊之, 白神哲夫. CAMP-ISIJ. 2007, vol. 20, p. 1004.
- 9) 村上俊之. 特殊鋼. 2003, vol. 52, p. 22.



村上 俊之



富田 邦和



白神 哲夫