

# 機械構造用 BN 活用型非鉛快削鋼の開発

## Development of BN Utilized Free Cutting Steel without Lead Addition for Machine Structural Use

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 主監・博士(工学)

### 要旨

快削鋼として、その使い勝手の良さから、Pb 快削鋼が広く使用されてきた。しかしながら、地球環境問題から素材メーカーに対して、非鉛快削鋼の要望が強まりつつある。非鉛化には種々の選択肢があるが、JFE 条鋼では鋼中に 50 ppm 以上の B と 100 ppm 以上の N を添加することにより黒鉛と物理的性質の類似している六方晶 BN を晶出させて、新しい非鉛快削鋼を開発した。この BN 快削鋼は、高速切削時の摩耗特性が良好なため、Pb 快削鋼の非鉛化のみにとどまらず、高速切削化にも推奨できる。BN はサイズの点では MnS と同等であるが、BN 快削鋼の機械的性質や疲労特性、冷間鍛造性、熱間鍛造性などは BN 無添加のベース鋼とほぼ同等である。

### Abstract:

Pb-added free cutting steel has been widely used because it has good machinability under various cutting conditions. Furthermore, free cutting steel without lead addition is increasingly being in demand for steel maker because of global environmental problems. There are a variety type of free cutting steels without lead addition, but JFE Bars & Shapes has developed a new Pb-free free cutting steel containing hcp-BN (hcp: hexagonal close-packed structure, BN: boron nitride) inclusions which are similar physical characteristics to graphite by adding more than 50 ppm of B and more than 100 ppm of N. Since wear properties are satisfactory, this material is recommended for high speed cutting applications. As the size of BN inclusion is similar to MnS inclusion, the mechanical properties, fatigue properties, cold and hot forgeability and other properties of BN free cutting steel are virtually equivalent to those of the base steel without BN addition.

### 1. はじめに

快削鋼として、その使い勝手の良さから、Pb 快削鋼が広く使用されてきた。しかしながら、地球環境問題から素材メーカーに対して、非鉛快削鋼の要望が強まりつつある。

快削鋼は大きく 2 種類に分類できる。ひとつは、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である。もうひとつは AISI12L14 (AISI: アメリカ鉄鋼協会) 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である。

JFE 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 BN 介在物の晶出、および鋼成分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。本報ではこれらのうち機械構造用鋼対応の BN 活用型非鉛快削鋼について報告する。なお、次報<sup>1)</sup>で低炭素系非鉛快削鋼について報告しているので、参考にさせていただきたい。

### 2. 開発の背景

機械構造用快削鋼として、S, Pb, Ca などの添加鋼が実用化されているが、工具寿命、切屑処理性、仕上げ面粗さほかの被削性全般に対して Pb 添加の効果が認められるため、Pb 快削鋼が広く使用されている。非鉛化には種々の選択肢がある。S 快削鋼の S 量を増やすと機械的性質の異方性が大きくなるため、また Ca 快削鋼は製造時に連続 casting では造りにくく、高速切削でしか効果がないため、いずれも Pb 快削鋼の代替にはなりにくい。Se, Te, Bi などもあるが、いずれも高価である。黒鉛の晶出した鑄鉄の被削性が良いことが知られており<sup>2)</sup>、そこで当社では黒鉛と物理的性質の

2008 年 9 月 17 日受付

類似している六方晶 BN を含有させることによる快削化の可能性の検討を行い、確立した。

本稿では、主にベース成分が S45C の場合を例にあげて BN 快削鋼の概要を紹介する。

### 3. BN 快削鋼の概要

#### 3.1 快削成分としての BN

BN は白色黒鉛 (white graphite) とも呼ばれるように、黒鉛と類似した結晶構造と物理的性質を有する。古くから、黒鉛を生成させた鑄鉄の被削性はかなり良いことが知られており<sup>2)</sup>、この BN を鋼中に均一分散させることにより、新しいタイプの快削鋼が期待できる。今回開発した BN 快削鋼は鋼中に六方晶の BN を晶出させたが、晶出時期を予測したところ、凝固後半に晶出することが計算された。晶出した六方晶 BN は、非金属介在物として、大部分が単独で存在する。写真 1 に直径 70 mm 丸棒中間部 L 断面で観察された BN を示すが、サイズ的には MnS とほぼ同じである。したがって、機械的性質の例として、表 1 に同一直径の丸棒を 870℃ で焼ならしした時の機械的性質の比較を示すが、ベースの S45C と BN 快削鋼の機械的性質はほぼ同等である。

#### 3.2 フリー B の生成抑制方法

B はフリー B として残存すると一般的なボロン鋼のように焼入性が向上することが考えられる。図 1 に S45C をベースとして、N/B 比 (N 含有量と B 含有量の比) を変えた場合のジョミニカーブを示す。N/B=2.01 の BN1 はベースの S45C と同等の焼入性であるのに対して、N/B=1.14 と

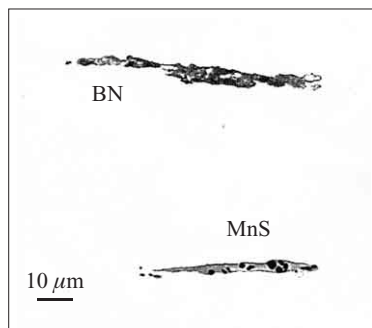


写真 1 BN 介在物と MnS 介在物の比較 (φ70)

Photo 1 Comparison of BN inclusion and MnS inclusion (φ70)

表 1 機械的性質 (φ70, 焼ならし)

Table 1 Mechanical properties (φ70, Normalized)

Steel	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)	RA(%)
S45C-BN	323	615	30	48
S45C	336	608	34	52

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

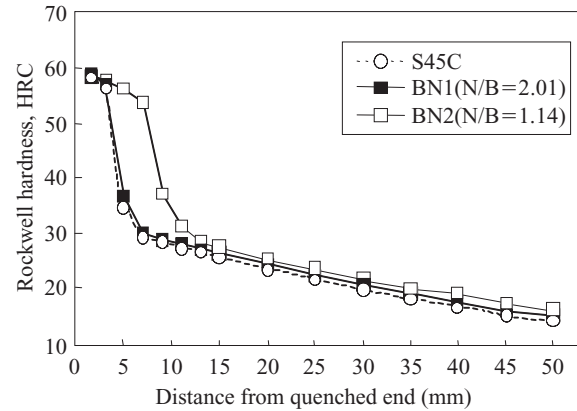


図 1 ジョミニカーブ

Fig. 1 Jominy curve

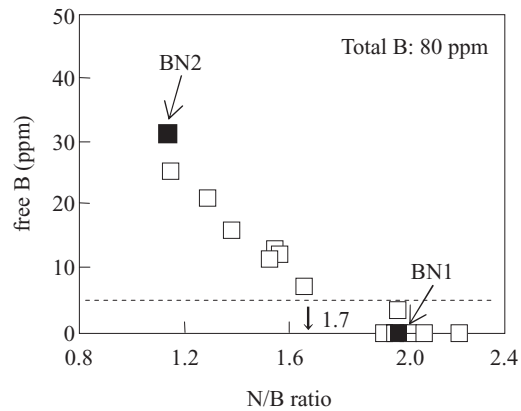


図 2 N/B 比と free B の関係

Fig. 2 Relationship between N/B ratio and free B

N/B 比の小さな BN2 は焼入性が增大している。これより N/B 比をある一定値以上に適正に制御する必要があることと同時に N/B 比を適正に制御することによりフリー B が残存しないように調整可能であることが分かる<sup>3)</sup>。

図 2 に全 B 量を 80 ppm 前後とした場合の N/B 比とフリー B 量の関係を示す。フリー B 量は、全 B 量から BN 介在物になっている B 量 (B as BN 量) を差し引くことにより求めた。N/B 比が上昇するにつれて N 量が上昇するため、B as BN 量が上昇し、その結果、フリー B 量が低下する。N/B 比  $\geq 1.7$  に成分を制御することにより、焼入性に影響を及ぼす量のフリー B が残存しないように制御可能であることを見出した。

#### 3.3 非鉛化のための BN 介在物の晶出量

BN 快削鋼の被削性は BN 介在物が増加するとともに向上するが、非鉛化のために必要な BN 介在物の晶出量を検討した。図 3 に種々の B as BN 量 (BN 介在物として晶出している B 量) とした S45C ベースの BN 快削鋼を超硬工具 P20 を用いて、200 m/min の切削速度にて、30 分間切削した時の B as BN 量とクレーター摩耗量の関係を示す。同時に目標となる Pb 快削鋼も切削しその結果も図中に表記

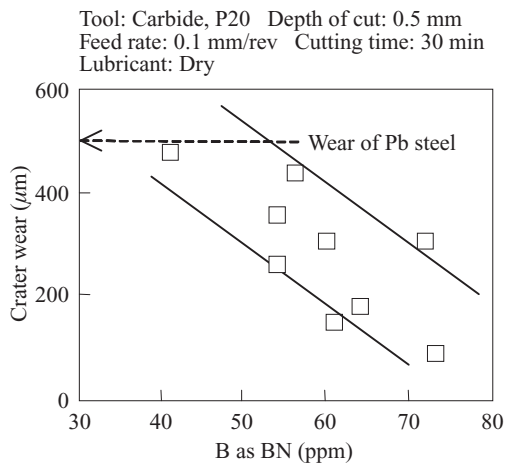


図3 工具寿命とBN量の関係

Fig.3 Relationship between BN content and tool wear

した。B as BN 量が増加するにしたがってクレーター摩耗量は低下するが、B as BN 量  $\geq 50$  ppm とすることにより、Pb 快削鋼と同等以上の工具寿命が得られることが分かった。

以上から、新しく開発した BN 快削鋼は鋼中に 50 ppm 以上の B と 100 ppm 以上の N を含有する（ただし、N/B 比  $\geq 1.7$ ）成分系とした。

### 3.4 被削性に対する BN の効果

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 BN 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1で示したように BN 介在物は MnS 介在物と同程度のサイズであることから BN 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）。  
一般的にいて 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°C 付近での延性低下が著しいためである。BN 快削鋼を熱間引張すると Pb 快削鋼以上に 300°C での延性低下が大きい。ここでの BN は黒鉛と同様に六方晶を有しており、結晶の六角平面層の層間がせん断されやすいといわれていることから、これが高温変形時に影響を及ぼしていることも考えられる。
- (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）。  
潤滑効果の確認では切削抵抗を測定し、摩擦係数を算出する方法があり、この方法で求めた摩擦係数が Pb 快削鋼では小さいことが明らかにされている。BN 快削鋼の摩擦係数はベース鋼よりも小さく、Pb 快削鋼に匹敵しており、潤滑効果についても確認している。
- (4) 工具と被削材間の拡散反応を防止する（Ca 快削鋼）。

この因子を探るため、BN 快削鋼で工具摩耗面の付

着物を分析した。Al と N の付着が認められ、X 線回折により AlN であることが確認された。工具面上への付着物は Ca 快削鋼での酸化物とは異なり、AlN である。これが工具と被削材間の拡散摩耗を抑制していることを見出した<sup>4)</sup>。この Al は鋼中での AlN ではなく、フリーの Al であることを確認している<sup>5)</sup>。

以上、表2に被削性付与に対する BN 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加工から高速の旋削加工まで有効である。一方、(4) に対しては低速の切削では付着物の生成が進行しにくいことから、高速の切削時のみの効果と考えられる。低速切削の例として、図4に6mmのハイスドリルによる穴あけ加工を行ったときのドリル摩耗量を示す。BN 快削鋼は S45C に比較して摩耗の進行が遅く良好であるが L1 鉛快削鋼に比較しては同等レベルである<sup>6)</sup>。一方、高速切削の例として図5に超硬工具 P20 を用いて種々の切削速度にて、2分間旋削した時のフランク摩耗幅を示す。切削速度 100 m/min では3鋼種とも切削時の工具摩耗幅に差はない。S45C 切削時は 200 m/min を超えると急激に工具摩耗が進行し、Pb 快削鋼も同様の挙動をするが、BN 快削鋼切削時の工具摩耗幅は 100 m/min から 300 m/min までほとんど差がなく、500 m/min での摩耗幅も S45C の 300 m/min 相当と非常に少なく、高切削速度になるほど両者の差が大きくなる。このように高速切削では BN 快削鋼の(4)の効果は(1)~

表2 BN快削鋼のメカニズム

Table 2 Mechanism of BN 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

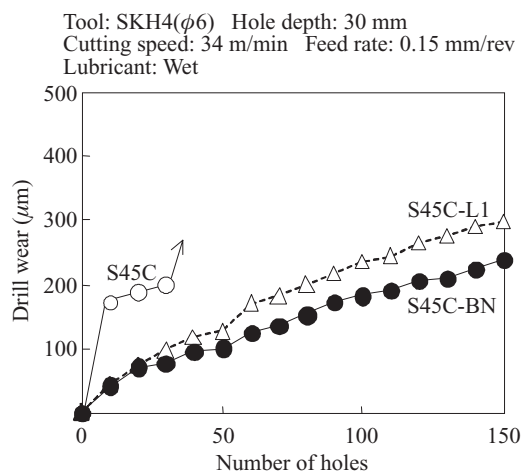


図4 穴あけ時のドリル摩耗量

Fig.4 Tool wear in drilling

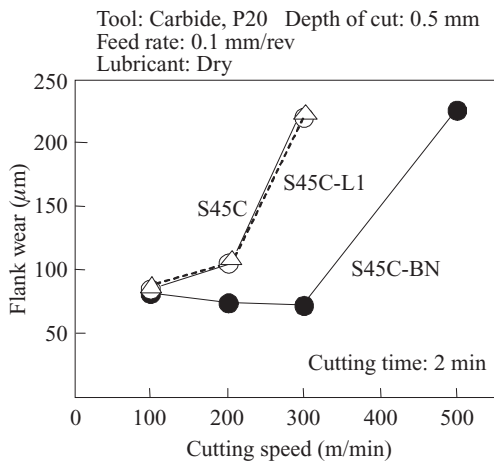


図5 旋削時のフランク摩耗幅  
Fig.5 Flank wear in turning

(3) の効果に比較して大きく、また、Pb 快削鋼は超硬工具による被削性も一般的には良好であるが、より高速切削になると被削性が劣ることがある<sup>7)</sup> という報告もあり、BN 快削鋼はこのような Pb 快削鋼の欠点を克服した点のメリットも大きい<sup>8)</sup>。

### 3.5 工具材種の影響

P 種超硬工具を用いて BN 快削鋼を高速切削すると AlN 皮膜が生成し工具摩耗が抑制されるが、また、工具中に含まれる Ti 含有量が多いほど顕著となり、これは皮膜の生成機構と工具材種の間密接な関係が示唆される<sup>9)</sup>。一方で、Ca 快削鋼を切削すると工具面上に酸化物が生成し工具摩耗を抑制するが、この酸化物の生成においても工具材種が影響すると報告されている<sup>10)</sup>。BN 快削鋼の場合、より長い工具寿命を得るためにはいかに AlN 皮膜が生成しやすい工具を選択するかということが重要となる。そこで、超硬工具より高速切削が可能で、また切削加工メーカーでも広く使用されているコーテッド超硬工具およびセラミック工具を用いて BN 快削鋼を切削加工し、工具摩耗特性の調査を行った<sup>11)</sup>。その結果、TiC、TiN、TiCN および TiAlN コーテッド超硬工具を用いた切削加工において、TiAlN コーテ

ド超硬工具が最も小さい工具摩耗を示し、TiAlN の中でも Al 含有量が多いコーテッド層を有する工具の摩耗進行速度が遅かった。アルミナセラミック工具で旋削した場合、ベース鋼 (S45C) よりも小さい摩耗を示し、また、TiC 添加アルミナセラミック工具および CBN 工具でも明らかに小さい摩耗を示し、BN 快削鋼のメリットがさらに確認できた。

## 4. 他成分系非鉛快削鋼との比較

以下に、ベース鋼として S45C を例にあげて、種々の快削性元素を添加した非鉛快削鋼で被削性試験し、BN 非鉛快削鋼と比較した。なお、同様に Pb 快削鋼も試験した。

### 4.1 供試材

供試材は、150 kg 真空溶解炉 -160 mm 角インゴット 鑄造 - 直径 85 mm 丸棒鍛造 - 850°C 焼ならしにより作製した。S45C ベース鋼では 850°C 焼なましも実施した。化学成分を表 3 に示す。

### 4.2 機械的性質

図 6 に機械的性質の代表例として引張強さと絞りの関係

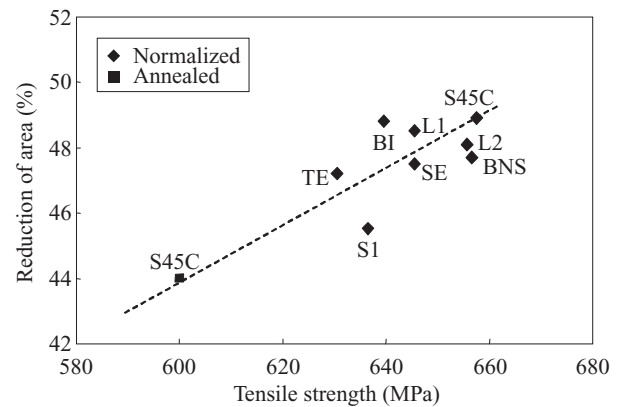


図6 機械的性質

Fig.6 Mechanical properties

表3 化学成分

Table 3 Chemical compositions

Steel	C	Si	Mn	P	S	s-Al	B	N
S45C	0.44	0.24	0.72	0.014	0.020	0.020	tr.	0.005 7
BNS	0.43	0.24	0.71	0.014	0.017	0.023	0.0055	0.010 7
L1	0.44	0.24	0.73	0.014	0.019	0.021	(0.09Pb)	0.005 8
L2	0.43	0.25	0.73	0.015	0.019	0.022	(0.13Pb)	0.005 8
S1	0.44	0.23	0.71	0.014	0.044	0.021	tr.	0.006 4
SE	0.43	0.24	0.75	0.016	0.021	0.018	(0.12Se)	0.006 5
TE	0.45	0.25	0.77	0.017	0.019	0.023	(0.12Te)	0.005 9
BI	0.44	0.25	0.75	0.016	0.020	0.022	(0.11Bi)	0.006 2



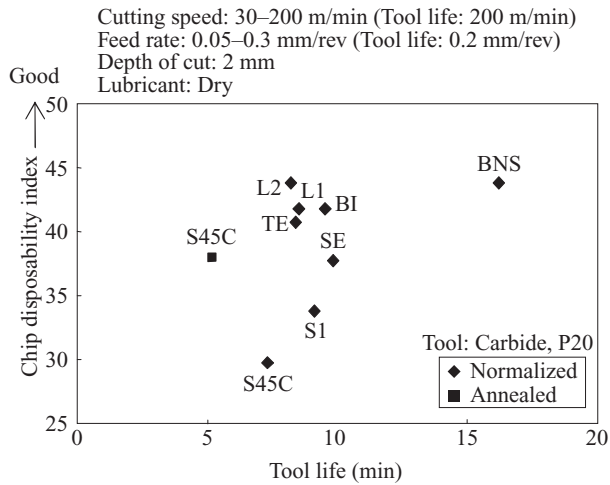


図7 工具寿命と切屑処理性

Fig.7 Tool life and chip disposability

を示す。S1 鋼で S 量が多いため絞りが S45C ベース鋼に比較してやや低い傾向にあるが、他の快削性元素は機械的性質に影響しない。焼なまし材は当然であるが引張強さが低い。

### 4.3 被削性

#### 4.3.1 旋削性

図7に超硬工具 P20 で旋削した時の工具寿命と切屑処理性を示す。工具寿命はフランク摩耗幅が 200 μm となる切削時間とした。切屑処理性は切削速度と送りの組み合わせを変えた 25 条件で旋削し、得られた切屑形状ごとに評点付けした。工具寿命は S45C ベース鋼に比較して快削性元素添加鋼すべてにおいて向上しており、なかでも BN 快削鋼の寿命の向上は著しかった。クレーター摩耗を指標とした工具寿命についても同様の傾向であった。切屑処理性は S45C ベース鋼に比較して快削性元素添加鋼すべてで向上しており、一般に広くいわれているように Pb 快削鋼の切屑処理性は良好であるが、BN 快削鋼の切屑処理性も良好であった。また、Se, Te, Bi 快削鋼の中では Se < Te < Bi 添加の順に切屑処理性は向上し、Bi 快削鋼の切屑処理性は Pb 快削鋼に匹敵する。Pb 快削鋼の被削性を付与する機構としては、Pb の熔融脆化、ならびに、潤滑作用であるが、Bi 快削鋼の機構も同じであるため、同等の切屑処理性になったものと考えられる。また、焼なましすることにより焼ならし材より切屑処理性が向上しているが、これは硬さ（強度）が低下することにより切屑厚みが増加したため

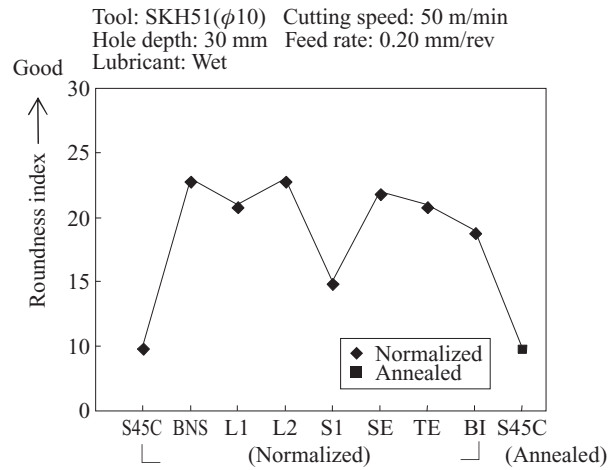


図8 穴径差

Fig.8 Hole roundness

と考えられる。

#### 4.3.2 穴あけ性

図8にハイスドリルを用いて穴あけ加工した時の穴径差の比較を示す。穴径の偏径差別に評点付けを行い、整理した。快削性元素添加鋼すべてで、穴径加工精度は向上するが S1 鋼ではあまり加工精度が向上していなかった。なお、穴あけ加工時のドリル寿命、ならびに、切屑処理性は旋削試験の傾向とほぼ一致していた。

## 5. BN 快削鋼の機械的性質、冷間鍛造性

比較鋼として代表的な非鉛快削鋼である S 快削鋼を取り上げ、BN 快削鋼の機械的性質、冷間鍛造性と比較した。

### 5.1 供試材

供試材は実炉溶解 - 連続鋳造 - 分塊圧延により作製した 160 mm 角ビレットである。また、被削性の確認には、直径 85 mm 丸棒に一部圧延した。化学成分を表4に示す。S45C をベースとした 0.028 mass% S の S0 クラスの BN 快削鋼と 0.046 mass% S の S1 クラスの S 快削鋼である。

### 5.2 機械的性質

表5に機械的性質、ならびに、その異方性を示す。BN 快削鋼の異方性を含めた機械的性質は、S1 快削鋼と同等以上である。特に、BN 快削鋼の伸び、絞りの異方性が良好である。

表4 化学成分

Table 4 Chemical compositions

Steel	C	Si	Mn	P	S	s-Al	B	N
S0-BN	0.43	0.19	0.74	0.019	0.028	0.018	0.005 4	0.012 4
S1	0.46	0.20	0.73	0.020	0.046	0.027	tr.	0.008 0

表 5 機械的性質の異方性  
Table 5 Mechanical anisotropy

Steel	$\theta$	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	RA (%)	CIV (J/cm <sup>2</sup> )
S0-BN	0°	350	656	22.5	39.4	39
	90°	345	650	14.8	16.9	16
	Anisotropy (90°/0°)	0.986	0.991	0.658	0.429	0.410
S1	0°	350	663	22.0	38.6	46
	90°	342	644	9.3	11.6	19
	Anisotropy (90°/0°)	0.977	0.971	0.423	0.301	0.413

$\theta$ : Angle from rolling direction    YS: Yield strength  
TS: Tensile strength    El: Elongation    RA: Reduction of area  
CIV: Charpy impact value

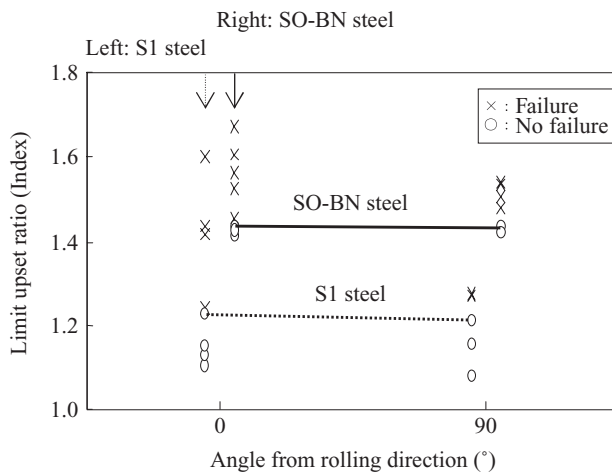


図 9 冷間鍛造性  
Fig.9 Cold forgeability

### 5.3 冷間鍛造性

冷間鍛造性は、日本塑性加工学会鍛造分科会推奨の試験片を用いて評価した。まず、直径 14 mm × 高さ 21 mm の溝付き試験片を用いて、溝部に割れが発生する限界圧縮率を測定した。試験片は圧縮方向が圧延方向と一致する場合 ( $\theta=0^\circ$ ) と直交する場合 ( $\theta=90^\circ$ ) の 2 種類を採取した。図 9 に結果をまとめる。BN 快削鋼の限界圧縮率は  $\theta=0^\circ$ 、 $90^\circ$  のいずれも S1 快削鋼に比較して大きかった。また、両鋼とも  $\theta=0^\circ$  と  $\theta=90^\circ$  の限界圧縮率はほぼ同等で異方性は認められなかった。次に、直径 14 mm × 高さ 21 mm の溝なし試験片を同様にして採取し、圧縮時の変形抵抗を測定した。鋼種によらず、また、 $\theta$  によらず、ほぼ同じ変形抵抗であった。

以上から、BN 快削鋼の冷間鍛造性は S1 快削鋼と同等以上で良好なことが分かった。

### 5.4 被削性

図 10 に直径 85 mm 丸棒を超硬工具 P20 で旋削した時の

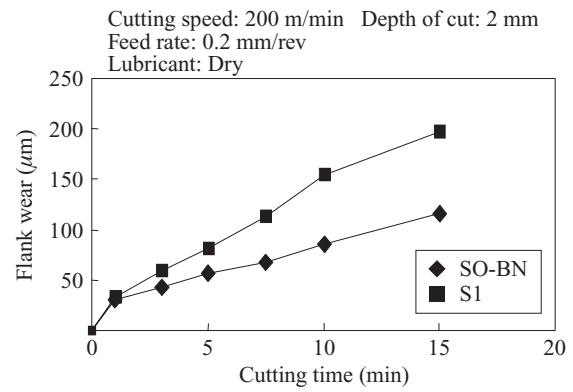


図 10 被削性  
Fig.10 Machinability

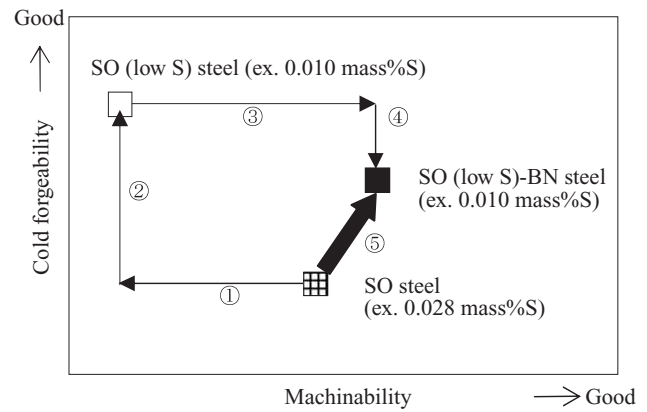


図 11 被削性と冷間鍛造性の関係  
Fig.11 Relationship between machinability and cold forgeability

フランク摩耗幅を比較して示す。S1 快削鋼に比較して、BN 快削鋼のフランク摩耗の進行は緩やかで良好である。また、BN 快削鋼のドリル工具寿命、仕上げ面粗さ、切屑処理性は S1 快削鋼とほぼ同等であることから、BN 快削鋼の被削性は S1 快削鋼に比較して同等以上である。

### 5.5 冷鍛切削兼備鋼としての可能性

図 11 に S 快削鋼と BN 快削鋼の被削性と冷間鍛造性の関係を模式的に示す。これまで述べたように、BN 介在物は MnS 介在物に比較して冷間鍛造性の劣化を低く抑え、被削性は MnS 介在物以上に向上させる。S は冷間鍛造性に有害な元素のため、冷間鍛造性向上を目的に低 S 量化をはかるとその分被削性は劣化し (矢印①)、冷間鍛造性は向上する (矢印②)。被削性の劣化を BN で補うと S 量の低下分以上に被削性は向上する (矢印③) が、冷間鍛造性の劣化は小さい (矢印④) ため、結果として S 快削鋼よりも冷間鍛造性も被削性も向上する (矢印⑤) ことから、冷鍛切削兼備鋼として利用される可能性が出てくる。写真 1 に示すように鋼中の BN 介在物と MnS 介在物の形態は似ているため、BN 快削鋼の B 量として 60 ppmB の BN 介在物を MnS 介在物に体積換算すると 0.009 mass%S 相当と計算

される。対象となる冷鍛切削兼備鋼の S0 快削鋼の S 量は多くとも 0.035 mass% S 未満の S 量であるため、0.009 mass% S 相当量の影響は大きいと考えられ、低 S 量化分を BN で補完する効果は大きいと考えられる。

## 6. おわりに

地球環境問題からユーザーニーズに対応して機械構造用鋼向けの BN 活用型非鉛快削鋼を開発した。

開発鋼の特徴は、BN 介在物を活用することにより、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 Pb 快削鋼と同等以上の被削性を有する新しいタイプの快削鋼である。

非鉛化に寄与するだけにとどまらず、高速切削用として、また、冷鍛切削兼備鋼としての適用にも推奨できる。

### 参考文献

- 1) 村上俊之, 富田邦和, 白神哲夫. JFE 技報. 2009, no. 23, p. 17-23.
- 2) 日本鋳物協会. 鋳物便覧. 丸善. 1986, p. 603-612.
- 3) 村上俊之, 白神哲夫. CAMP-ISIJ. 2002, vol. 15, p. 1164.

- 4) 山根八洲男, 田中隆太郎, 鳴瀧則彦. 精密工学会誌. 1998, vol. 64, p. 1370-1374.
- 5) 白神哲夫, 山根八洲男. CAMP-ISIJ. 2000, vol. 13, p. 532.
- 6) 村上俊之, 白神哲夫. CAMP-ISIJ. 2001, vol. 14, p. 708.
- 7) 伊藤哲朗. 鉄と鋼. 1961, vol. 47, p. 1563.
- 8) 白神哲夫, 山根八洲男. CAMP-ISIJ. 1999, vol. 12, p. 475.
- 9) 山根八洲男, 田中隆太郎, 関谷克彦, 鳴瀧則彦, 白神哲夫. 精密工学会誌. 2000, vol. 66, p. 229-233.
- 10) 赤澤正久, 黒岩和也. 精密機械. 1976, vol. 42, p. 94-99.
- 11) 田中隆太郎, 山根八洲男, 関谷克彦, 鳴瀧則彦, 白神哲夫. 精密工学会誌. 2006, vol. 72, p. 1227-1231.



村上 俊之



富田 邦和



白神 哲夫