

# Pb フリー-BN 快削鋼

## Free Cutting Steel Containing BN Inclusions without Lead Addition

村上 俊之 エヌケーケー条鋼株式会社 仙台製造所 商品技術部 研究開発グループ 主任部員  
白神 哲夫 エヌケーケー条鋼株式会社 仙台製造所 商品技術部 研究開発グループ マネージャー

Toshiyuki Murakami  
Tetsuo Shiraga

快削鋼として、その使い勝手の良さから、Pb 添加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、Pb フリー快削鋼の要望が強まりつつある。Pb フリー化には種々の選択肢があるが、当社では、黒鉛と物理的性質の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、確立したので紹介する。

*Lead-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 environmental problems. There are a variety of free cutting steels without lead addition, but we have investigated free cutting steel containing hcp-BN (Boron Nitride) inclusions which are similar physical characteristics to graphite, and established this new free cutting steel. This paper presents an outline of free cutting steel containing BN inclusions.*

### 1. はじめに

快削鋼として、S, Pb, Ca などの添加鋼が実用化されており、現在、国内では年間約 100 万トンの生産が行われている。そのうちの 50%強が Pb 快削鋼である。これはその使い勝手の良さから、自動車メーカーを中心とした強いニーズによるものである。しかしながら、地球環境問題から素材面では Pb フリー快削鋼の要望が、また切削面では切削油剤を使用しない乾式切削やそれに対応して高速切削の要望が強まりつつあり、新快削鋼の開発が急がれている。

Pb フリー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鍛造では造りにくく、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、黒鉛快削鋼も一部検討されているが、C, Si などの添加によりベース成分が大きく異なってくるため、採用に慎重にならざるをえない。そこで当社では黒鉛と物理的性質の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、ベース成分が S45C の場合を例に挙げて BN 快削鋼の概要を述べ、次に、BN 快削鋼の適用事例を紹介する。

### 2. BN 快削鋼の概要

#### 2.1 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。Table 1 に BN と黒鉛の比較を示す<sup>1)</sup>。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、この BN を鋼中に均一分散させることにより、Fig.1 に概念的に示すように、新しいタイプの快削鋼が期待できる。今回開発した BN 鋼は、鋼中に 50ppm 以上の B と 100ppm 以上の N を添加することにより、六方晶の BN を晶出させた。Photo 1 に EPMA での分析結果を示す。BN は、非金属介在物として、

Table 1 Comparison of BN and graphite

Item		BN	Graphite
Lattice constant	a axis	2.504	2.456
	c axis	6.661	6.696
Specific gravity		2.29	2.25
Coefficient of linear expansion	a axis	$41.2 \times 10^{-6}$	$28.2 \times 10^{-6}$
	c axis	$-2.7 \times 10^{-6}$	$-1.5 \times 10^{-6}$
Melting point		> 3000	3550
Mohs hardness		1~2	1~2

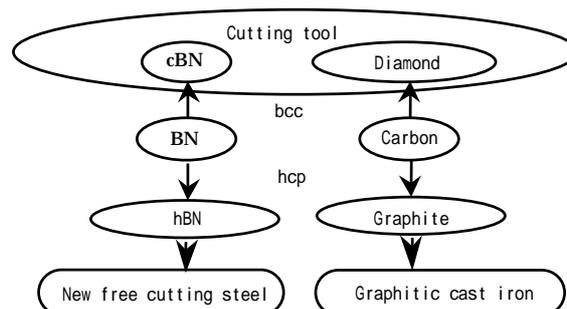


Fig.1 Concept of BN new free cutting steel

大部分が単独で存在する。サイズ的には、MnS と同等である。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ため、Fig.2 に示すように N/B 比を適正に制御することにより、フリー-B が残存ないように調整している。

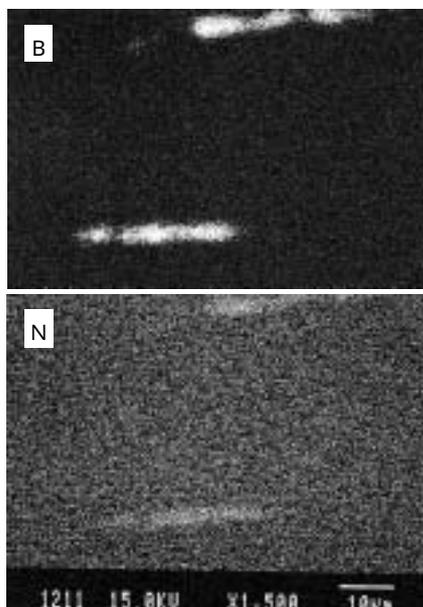


Photo 1 Elements mapping of BN inclusions

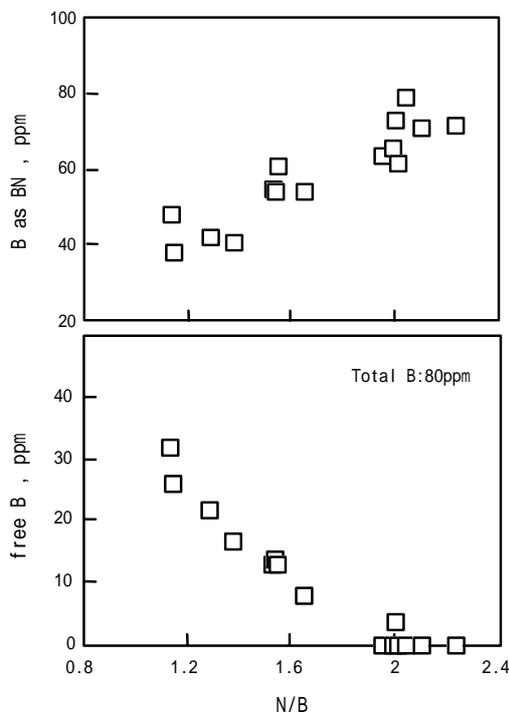


Fig.2 Relationship between N/B and B

## 2.2 BN 快削鋼の品質特性

以下に、ベース鋼として S45C を例に挙げて、S45C ベース鋼、Pb 快削鋼 (L1)、BN 快削鋼の 3 者で比較する。

## 2.2.1 成分例と機械的性質

Table 2 に化学成分例を示す。また、Table 3 に機械的性質を示す。機械的性質は BN 無添加のベース鋼と同等である。BN は機械的性質に影響を及ぼさないとと言える。

Table 2 Chemical compositions (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	s-Al	B	N
BN	0.42	0.24	0.74	0.012	0.015	0.019	0.0059	0.0119
S45C	0.43	0.25	0.73	0.011	0.018	0.020	tr.	0.0030
L1	0.43	0.25	0.71	0.012	0.014	0.020	(0.07Pb)	0.0023

Table 3 Mechanical properties

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	El(%)	RA(%)
BN	323	615	30	48
S45C	336	608	34	52
L1	338	614	29	50

## 2.2.2 被削性

### (1) 高速旋削性

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>2)</sup>。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が大きい<sup>3)</sup>。Fig.3 に超硬工具 P20 を用いて種々の切削速度にて、Table 2 に示した各種鋼を 2 分間切削したときの逃げ面摩耗量を示す。切削速度 100m/min では 3 鋼種とも切削時の工具摩耗量に差はない。S45C 切削時は 200m/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量は 100m/min から 300m/min までほとんど差がなく、500m/min での摩耗量も S45C の 300m/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。

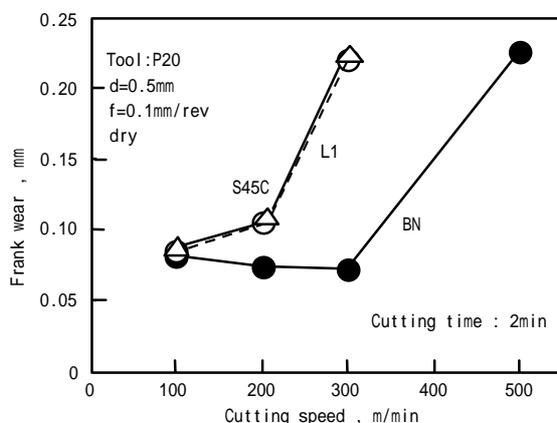


Fig.3 Comparison of frank wear

次に、Fig.4 に 200m/min の場合の B as BN 量とすくい面摩耗量の関係を示す。B as BN 50ppm 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。

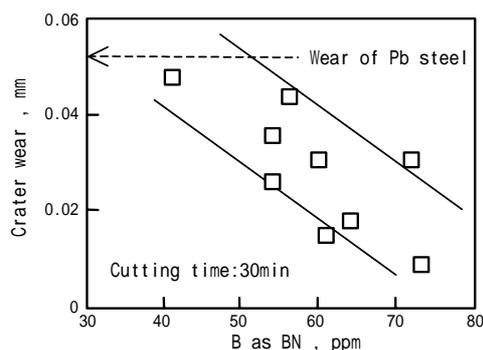


Fig.4 Effect of BN on tool wear

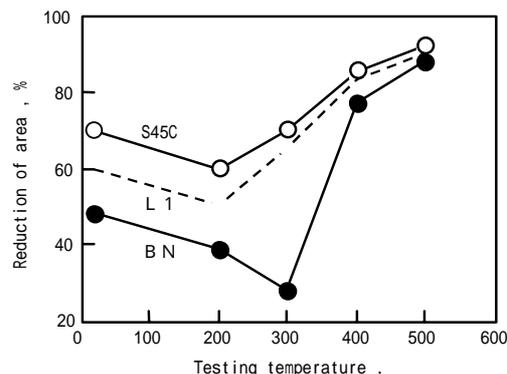


Fig.6 Relationship between temperature and reduction of area in tensile test

(2) 穴あけ加工性

Fig.5 に上記と同様の被削材を用いて、6 mm のハイスドリルによる穴あけ加工を行ったときの逃げ面摩耗量を示す。BN 快削鋼は S45C に比較して摩耗の進行が遅く良好であり、L1 に比較して同等以上である。

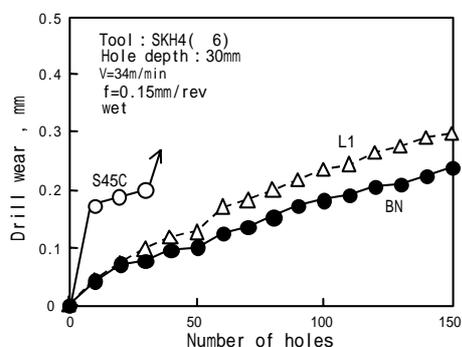


Fig.5 Comparison of drill machinability

(3) 切屑処理性

BN 快削鋼の切屑処理性もベース鋼よりは良好であり、Pb 快削鋼とほぼ同等である。

(4) 被削性に対する BN の効果

被削性付与のメカニズム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。

切欠き効果により切屑生成を容易にする(S 快削鋼)。

Photo 1 で示したように BN 介在物は MnS と同等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。

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)。

一般的に言って 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 付近での延性低下が著しいためである。Fig.6 に 200 ~ 500 での高温引張による絞りの変化を示す。BN 快削鋼は Pb 快削鋼以上に 300 での延性低下が大きい。Table 1 に示すように BN の融点は 3000 以上と非常に高く、Pb と同じメカニズムでの脆化は考えにくい。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言われていることから<sup>4)</sup>、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。

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 (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。Fig.7 に旋削時の切削抵抗から算出した結果を示す。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できた。

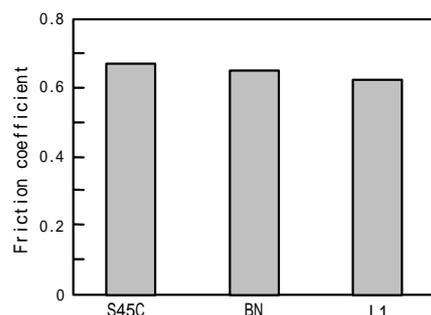


Fig.7 Comparison of friction coefficient

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>5)</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。Fig.8 に切削速度 300m/min にて 10 分間切削後の鋼中 Al 量と逃げ面摩耗量の関係を示す<sup>6)</sup>。鋼中 Al 量が増加するにつれて摩耗量が減少する。また、高 Al ではあるが、B フリー (Al1) , または 60ppmN の N 低減鋼種 (BN1) では摩耗量が増加している。B フリー高 Al 材 (Al1) では鋼中に AlN が大量に生成しているが、工具面上には AlN の付着は認められず、摩耗が大きいことから、鋼中のフリーの Al と BN の存在が摩耗抑制に必要なことがわかる。

このような付着物生成には工具材質も影響することから、TiC 含有量の異なる工具を用いて摩耗量を調べた。工具中の

TiC 量の増加に伴い、S45C の場合は寿命が非常に短いのに  
 対して高 Al-BN 鋼は大幅に工具寿命が向上する。したがっ  
 て、工具面上への AlN 付着のためには工具中の TiC も影響  
 を及ぼしていると考えられる<sup>7)</sup>。

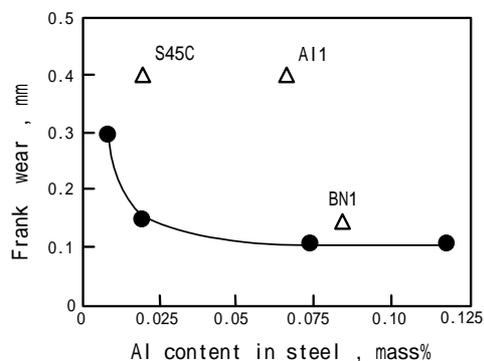


Fig.8 Effect of Al content in steel on frank wear

以上、いずれのメカニズムに対しても BN が効果的である  
 ことを示したが、～ 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、～ 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。これについては Fig.3 で高速に  
 なるほど BN 快削鋼と Pb 快削鋼の工具摩耗の差が広がるこ  
 とと一致する。

### 3. BN 快削鋼の適用事例

#### 3.1 非調質鋼の例 (S45CVL1 の代替)<sup>8)</sup>

##### 3.1.1 成分例と機械的性質

Table 4 に化学成分例を示す。また、Fig.9 に機械的性質を  
 示す。機械的性質は Pb 快削鋼とほぼ同等である。

Table 4 Chemical compositions (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	V	B	N
BN	0.45	0.25	0.95	0.018	0.023	0.102	0.0056	0.0122
L1	0.42	0.24	0.96	0.016	0.022	0.103	(0.07Pb)	0.0096

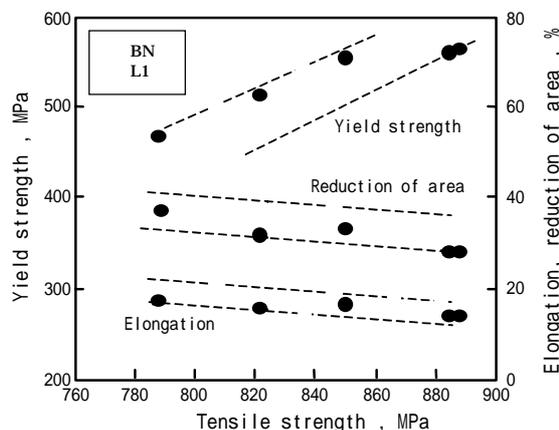


Fig.9 Comparison of mechanical properties

#### 3.1.2 疲労特性

Fig.10 に小野式回転曲げ疲労試験による S-N カーブを示す。  
 疲労特性は、時間強度、疲労限ともに Pb 快削鋼とほぼ  
 同等である。疲労特性に対しても BN は影響を及ぼさない。

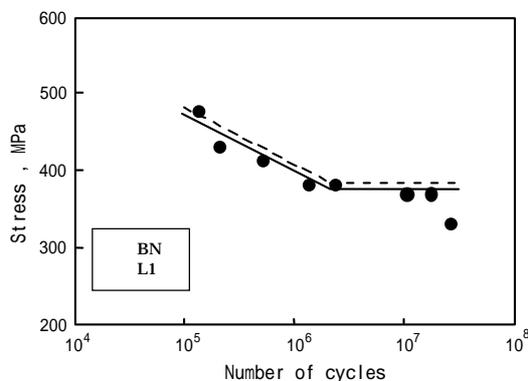


Fig.10 Comparison of S-N curve

#### 3.1.3 被削性

Fig.11 に 6mm のハイスドリルによる穴あけ加工を行い、  
 穴あけ個数とドリル摩耗量の関係を示す。BN 快削鋼は、Pb  
 快削鋼とほぼ同等の穴あけ加工性である。また、BN 快削鋼  
 の切屑処理性も Pb 快削鋼とほぼ同等である。

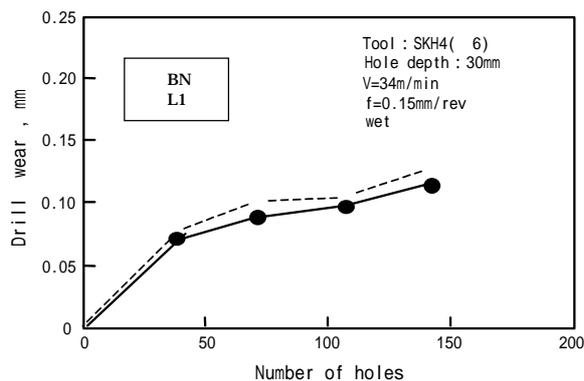


Fig.11 Comparison of drill machinability

### 3.2 肌焼鋼の例 (SCr420HL1 の代替)

#### 3.2.1 成分例と機械的性質

Table 5 に化学成分例を示す。また、浸炭深さを確認した  
 ところ、BN 快削鋼と Pb 快削鋼はほぼ同じ深さであり、浸  
 炭特性は同等である。

Table 5 Chemical compositions (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	s-Al	Nb	B	N
BN	0.22	0.29	0.81	0.016	0.016	1.14	0.018	0.014	0.0053	0.0104
L1	0.23	0.29	0.81	0.016	0.016	1.18	0.027	tr.	(0.09Pb)	0.0106

#### 3.2.2 疲労特性

##### (1) 小野式回転曲げ疲労特性

回転曲げ疲労特性は、時間強度、疲労限ともに Pb 快削鋼  
 とほぼ同等である。

(2) スラスト型転動疲労特性

Fig.12 に累積破損確率で整理して示す。転動疲労特性は、Pb 快削鋼よりも優れている。転動疲労に対しては、Pb 添加による劣化が著しいことによる。

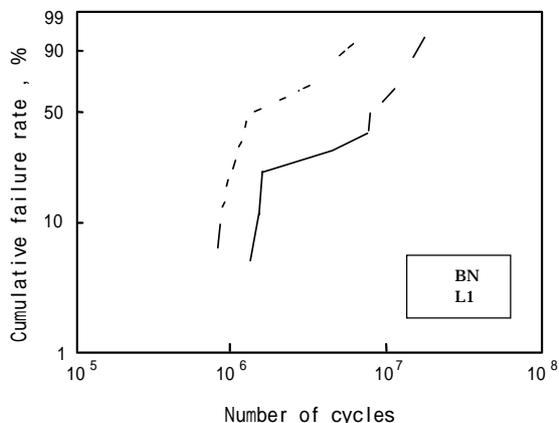


Fig.12 Comparison of rolling contact fatigue life

3.2.3 被削性

(1) 旋削性

Fig.13 に P20 による旋削時の逃げ面摩耗と旋削時間との関係を示す。切削速度は実部品加工時の速度と同じ 150m/min とした。BN 快削鋼は、切屑処理性も含めて、Pb 快削鋼とほぼ同等の旋削性である。これは、切削速度が比較的遅いためである。

(2) 穴あけ加工性

穴あけ加工性についても BN 快削鋼は、切屑処理性も含めて、Pb 快削鋼とほぼ同等である。

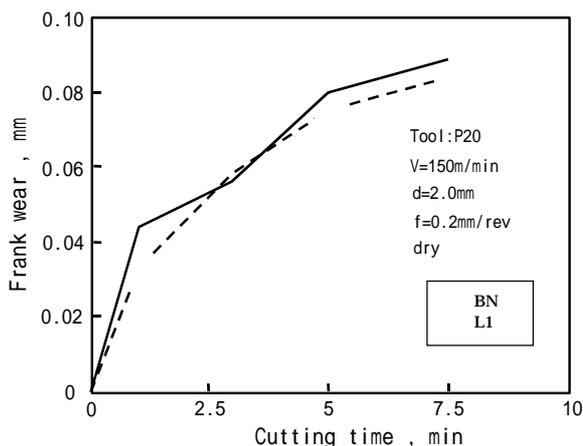


Fig.13 Comparison of frank wear

3.3 調質鋼代替鋼の例 (S48CL2-QT の代替)

3.3.1 成分例と機械的性質

Table 6 に化学成分例を示す。BN 快削鋼は、Pb フリー化と同時にフェライト・パーライト型の非調質化も図っている。機械的性質は Pb 快削鋼とほぼ同等である。

Table 6 Chemical compositions (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	V	B	N
BN	0.36	0.39	0.98	0.016	0.044	added	0.0057	0.0118
L2-QT	0.48	0.26	0.77	0.015	0.020	tr.	(0.12Pb)	0.0058

3.3.2 被削性

Fig.14 に 8.3mm のハイスドリルによる穴あけ加工を行い、穴あけ個数とドリル摩耗量の関係を示す。Pb 快削鋼は BN 快削鋼よりも早い段階で穴あけ不能となっており、BN 快削鋼の方が良好な工具寿命である。これは、BN の効果と組織をフェライト・パーライトとした効果によると考えられる。なお、切屑処理性は、この条件で BN 快削鋼と Pb 快削鋼とほぼ同等である。このように条件によっては、L2 (フル鉛) 対応も可能である。

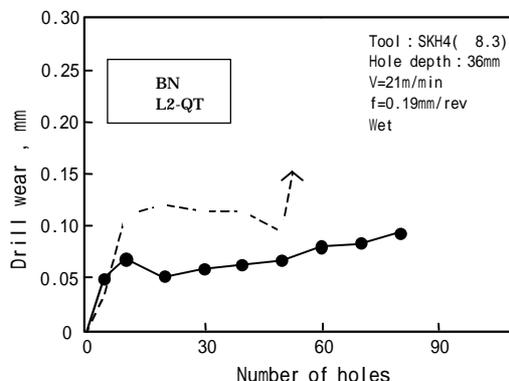


Fig.14 Comparison of drill machinability

4. おわりに

以上述べたように、BN 快削鋼は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 添加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。

地球環境問題から Pb フリー化に寄与するだけにとどまらず、高速切削用としての適用にも推奨できる。

参考文献

- 1) 理化学辞典(1991)岩波書店.
- 2) 伊藤哲朗. 鉄と鋼. Vol.47(1961)-1563.
- 3) 白神哲夫ほか. 材料とプロセス. Vol.12(1999)-475.
- 4) 工業材料便覧(1985)日刊工業新聞社.
- 5) 山根八洲男ほか. 精密工学会誌. Vol.64(1998)-1370.
- 6) 白神哲夫ほか. 材料とプロセス. Vol.13(2000)-532.
- 7) 山根八洲男ほか. 精密工学会誌. Vol.66(2000)-229.
- 8) 村上俊之ほか. 材料とプロセス. Vol.14(2001)-708.

<問い合わせ先>

エヌケーケー条鋼(株) 仙台製造所 商品技術部

Tel. 022 (258) 5523 村上 俊之

E-mail address : toshiyuki\_murakami@nkbs.co.jp

エヌケーケー条鋼(株) 仙台製造所 商品技術部

Tel. 022 (258) 5515 野崎 周作

E-mail address : syuusaku\_nozaki@nkbs.co.jp