BN 添加鋼の被削性 (第2報)*

- 快削効果に及ぼす被削材および工具中の化学成分 -

山根八洲男 ** 田中隆太郎 *** 関谷克彦 ** 鳴瀧則彦 ** 白神哲夫 †

Machinability of BN added Steels (2nd Report)

- Influence of Chemical Compositions of Work Materials and Cutting Tools on Machinability -

Yasuo YAMANE, Ryutaro TANAKA, Katsuhiko SEKIYA, Norihiko NARUTAKI and Tetsuo SHIRAGA

This paper deals with influence of chemical compositions of work materials and cutting tools on machinability of BN added steels. In this study, work materials including different levels of Al, B and N were turned with carbide and cermet tools which also included different levels of Ti at high speeds. Furthermore, the free-machining mechanisms were discussed on the results obtained from cutting tests. Machining tests showed that BN added steel including Al had very good machinability when they were machined with P-grade carbide tools. The machinability, however, decreased when the work material had low content of Al, B or N. Up to 0.06% of Al in work material, it showed that the larger amount of Al the bigger effect of machinability. The machinability of BN added steel was influenced by Ti content of cutting tool, that is, the higher content of Ti the smaller tool wear. When machining BN added steels at high cutting speed with P-grade carbide tools, Al and N were detected as a layer, and the layer was considered as AlN by X-ray diffraction analysis. AlN layer on the carbide tool surface prevented the inter-diffusion between cutting tool and work material. The effect of AlN on the diffusion was considered as the mechanisms of free-machining of BN added steels.

Key words: machinability, BN, free-machining steel, carbide tool, cermet tool, TiC

1. 緒 論

前報¹⁾において鋼中にBNを微量添加することにより高速切削域における被削性を大幅に改善させることができる可能性を明らかにした。本報告ではBN添加による被削性の改善メカニズムおよび被削性を改善させるための必要条件等について検討した。

前報ではS45C相当の鋼にBを50～80ppm, Nを130～150ppm添加した鋼を各種の工具で切削した結果, 超硬工具P10で切削した場合175m/minを越える高速切削では工具の摩耗面にAlとNが相当量付着し通常鋼に比べ工具摩耗が大幅に減少するが, それ以下の切削速度あるいはK種の工具で切削した場合はこれらの付着が認められず普通鋼とほとんど同程度の摩耗量となることを示した。

P種の工具で高速切削時にのみ工具摩耗の低減効果が見られる現象はCa脱酸鋼などベラーグを生成する鋼を切削した場合に見られる現象とよく似ており, ベラーグが酸化物系の保護膜であるのに対し, BN添加鋼では窒化物系の保護膜ができていく可能性が高い。

そこで本研究では摩耗抑制効果を持つ保護膜が生成するための被削材の化学成分や工具材種を検討し, さらに工具摩耗面に生成した膜の成分やその摩耗抑制効果について実験的に検討した。

2. 実験方法

表1に実験に使用した被削材を示す。S45CおよびBN1は精密工学会切削加工専門委員会の共同研究試料であり, BN3～7は前報以降新たに作成した被削材である。BN1, 3, 4, 6はB(≒80ppm)およびN(≒150～170ppm)の含有量はほぼ同程度であるが, 酸可溶Al含有量が異なる(BN3≒0.01%, BN1≒0.02%, BN4≒0.07%, BN6≒0.1%)。またBN5はBを0.009%, Alを0.07%と相当量含むが低N(0.007%)である。さらにBN7はAl(0.063%), N(0.0155%)は含むが低B(0.0001%)となっている。これらはいずれも150kg真空溶解炉で溶解され, 熱間鍛造(1200℃, 直径70mm), 焼きならし(850℃, 2時間加熱後空冷)処理されている。硬さはHV152～168ではほぼ等しい。

実験条件を表2に示す。実験は旋盤による乾式長手旋削で行った。使用工具は市販の超硬P10, P20およびTiC系サーメットである。なお, P20-1やP20-2は異なるメーカを意味している。旋削の切削速度は100～500m/minとした。

3. 実験結果

3.1 被削材中のAl, B, N含有量が工具摩耗に与える影響

図1に酸可溶Al含有量の異なる被削材を超硬P20-2で切削した場合の工具摩耗を示す。切削速度は前報の実験結果よりBN添加鋼の快削効果が現れる比較的高速の300m/minとした。図よりAl含有量が高くなるほど工具摩耗は減少する傾向を示すが, 0.066%(BN4)と0.111%(BN6)ではほぼ同じ摩耗量を示すことから, Alによる摩耗低減効果には限界があるこ

* 原稿受付 平成11年6月11日

** 正会員 広島大学工学部(東広島市鏡山1-4-1)

*** 学生会員 広島大学大学院

† NKK総合材料技術研究所(川崎市川崎区南渡町1-1)

Table 1 Chemical compositions and Vickers hardness of work materials

	Chemical compositions %							Hardness HV
	C	Si	Mn	S	Sol.Al	N	B	
S45C	0.43	0.25	0.73	0.018	0.020	0.0030	-	162
BN1	0.43	0.24	0.74	0.015	0.019	0.0150	0.0080	168
BN3	0.45	0.25	0.76	0.019	0.009	0.0163	0.0079	161
BN4	0.42	0.26	0.78	0.024	0.066	0.0167	0.0080	158
BN5	0.41	0.26	0.77	0.023	0.076	0.0066	0.0086	145
BN6	0.41	0.25	0.76	0.021	0.111	0.0175	0.0077	155
BN7	0.40	0.25	0.73	0.023	0.063	0.0155	0.0001	152

Table 2 Cutting conditions

Tool	P10, P20-1, P20-2 TiC-cermet (SNGN120408)
Tool angle	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8
Cutting speed	100 - 500 m/min
Depth of cut	0.5 mm
Feed rate	0.1 mm/rev

Tool: Carbide P20-2, v=300 m/min, d=0.5 mm, f=0.1 mm/rev

Fig. 1 Influence of Al content in work material on tool wear

とが伺われる。図2にBN4を切削速度300m/minで10分間切削した後の前逃げ面摩耗部の付着物をEPMAにより分析した結果を示す。図より摩耗部にかかなりの量のAlが付着していることがわかる。またNもAlとほぼ対応して付着が認められる。これらの元素の付着は前報でも述べたように、BN添加鋼に特有な現象であり、すくい面（前報で報告）、逃げ面のいずれにおいても摩耗が大きく減少した場合は付着が認められた。なお、ここで実験に用いた工具は全周ブレイカ付きであり切込み・送りも比較的小さい条件で切削を行っているため、すくい面摩耗KTについては測定していない。

図3はAl含有量がほぼ等しく(0.063~0.076%)、BおよびNの含有量の異なるBN4, 5, 7を超硬P20-2を用いて300m/minで切削した場合の工具摩耗進行線図をS45Cと比較して示したものである。図よりBが非常に少ないBN7では摩耗進行速度はS45Cとほぼ等しく、Al, Nのみを含有した被削材では摩耗抑制効果は見られないことがわかる。一方、これらに対してBおよびNを相当量含むBN4あるいは5では摩耗は非常に小さくなっている。なお4, 5の比較ではN含有量の多いBN4の方が摩耗が小さい。

3.2 工具中の化学成分が工具摩耗に与える影響

BN添加鋼ではTiCを含むP種の超硬工具で非常に優れた工具摩耗抑制効果が得られたが、予備実験の結果P種の中でも工具により摩耗抑制効果の程度が異なることが判明した。そこで、TiCを含む市販の超硬およびサーメット工具について、化学成分と摩耗量との関係を調べた。表3にEPMAで分析し

Tool: Carbide P20-2, v=300 m/min, d=0.5 mm, f=0.1 mm/rev

Fig. 2 Elements mapping on the end flank wear part on carbide tool P20-2 after turning of BN4 steel

Tool: Carbide P20-2, v=300 m/min, d=0.5 mm, f=0.1 mm/rev

Fig. 3 Influence of B and N content in work material on tool wear

た化学成分を示す。なお表ではC等の成分が示されていないため、個々の工具について成分の合計が100%とはならない

Table 3 Chemical compositions of tested tools

	Chemical compositions %			
	W	Ti	Ta	Co
P20-1	46.7	7.5	4.6	8.0
P20-2	48.4	9.4	4.6	5.0
P10	41.8	12.7	6.4	6.9
TiC-Cermet	2.1	33.8	5.7	0.7

が、およその含有量の多寡の比較が可能である。

図4にTi含有量の異なるP20-1 (Ti: 7.5%), P10 (Ti: 12.7%) およびTiC系サーメット (Ti: 33.8%) を用いて同一切削条件でBN4を高速切削した場合の工具摩耗進行線図を示す。いずれの工具においてもS45Cに比べBN4を切削した方が摩耗進行が遅くなっておりBN添加による効果が認められるが、S45Cの切削でもTiC含有量の少ないP20-1は最も摩耗が大きくなるなど、工具間に差が見られることから単純な比較は困難である。そこで各工具の全摩耗量から初期摩耗を除いた摩耗量について摩耗進行速度を求めた。表4に各工具の被削材ごとの摩耗進行速度を示す。なお、表中BN4/S45CはBN4を切削した場合の摩耗進行速度とS45Cを切削した場合の摩耗進行速度の比を示している。表より、Ti含有量の最も少ないP20-1ではBN4/S45Cの値が0.29と最も大きく（すなわち摩耗抑制効果が最も少なく）、Ti含有量の多いP10およびサーメット工具では0.21とほかに比べ抑制効果が大きくなっている。

以上の結果より、鋼中へのBN添加の摩耗抑制効果は工具中のTi含有量により異なり、含有量が多い方が効果も大きくなる傾向にあるが、ある一定量を過ぎると効果は頭打ちになると言える。なお今回の実験では、BNによる摩耗抑制効果は、BNを添加した場合、摩耗進行速度は最大でS45Cの1/5程度となり、かなり大きな効果が認められることがわかる。

3.3 工具付着物層の同定および摩耗抑制効果

前報あるいは本報においてBN添加鋼の切削では、工具摩耗面にAlやNが検出されることを示した。そこで付着物についてX線解析を行い付着物の形態を調査した。

図5に結果を示す。図よりAlNのピークがわずかであるが確認できることがわかる。光学顕微鏡観察から付着物の厚さはかなり薄いと考えられ（数 μm 以下）、X線解析では母材からのバックグラウンドが大きくなるが、わずかでもAlNが認められることから摩耗面上のAlとNはAlNの形で付着している可能性が高い。

AlNはコーティング膜の成分としても用いられており、高温においても安定な窒化物系セラミックスであるが、単独でコーティング膜として使用されることは少なく、主としてTiと一緒に(Al,Ti)Nの形でコーティング膜として用いられている。なお、(Al,Ti)Nコーティングの優れた耐摩耗性は、膜の硬さが高いことや、酸化性雰囲気下では高温下でAl原子が選択酸化し最表面に安定なAl酸化物の保護膜を形成して酸化の進行を抑える結果、酸化摩耗が抑制されるためとの報告²⁾がなされている。

しかし本実験のような旋削ではすくい面中央部では酸化摩耗の可能性は低く、また付着膜は切りくず流出方向に流されたような形態をしており、付着膜が(Al,Ti)Nコーティング膜

$v = 300 \text{ m/min}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.1 \text{ mm/rev}$

Fig. 4 Influence of Ti content in tool on tool wear**Table 4** Flank wear rate when turning BN added steels

	Flank wear rate mm/min			
	P20-1	P20-2	P10	Cermet
S45C	0.024	0.025	0.014	0.013
BN4	0.0071	0.0065	0.0030	0.0027
BN4/S45C	0.29	0.26	0.21	0.21

のような高い硬さを有しているとは考え難い。

そこで、AlN膜が工具表面にできた場合の摩耗抑制効果として工具と被削材間の拡散反応抑制効果を検討した。実験は

Fig. 5 X-ray diffraction spectrum from crater wear part of P10 carbide tool after machining BN1 at cutting speed of 300 m/min

Fig. 6 Size and shape of diffusion couple

図6に示す方法で工具-被削材間の反応実験を行った。工具としては市販の超硬P10を約5mm角に切断・研磨したもの、および同工具にAlNをPVDにより約5 μ mコーティングしたものを使用した。なお実験では工具と被削材間の反応性が低く接着しない場合も冷却後境界部が観察・分析できるよう、超硬P10をS45Cでサンドイッチ状に挟み込み、上下から1.7MPaの圧力で押さえ真空中1200 $^{\circ}$ C、30min加圧加熱した。

境界部における元素の線分析結果を図7に示す。コーティングを施していない工具ではWおよびFeが相互に拡散し、境界部ではCoが高濃度に集中していることがわかる。一方、AlNをコーティングした場合は境界部のAlNを境に工具中あるいは被削材中の元素はいずれも拡散が認められずAlN膜は耐拡散性を持つことがわかる。

したがって本実験でBN添加鋼が優れた摩耗抑制効果を示した原因として工具摩耗面に生成されたAlN膜が工具と被削材

(a) S45C-P10 (b) S45C-P10 with AlN coated layer

Fig. 7 Line analysis of elements of diffusion couples between S45C-Carbide tool and S45C-Carbide tool with AlN coated layer

間の元素の拡散を抑制し、それにより高速域での熱的摩耗を押さえた可能性が高い。

4. 考 察

これまでに得られた結果を要約すると、

- ① Alを含むBN添加鋼をP種の超硬工具で切削すると、高速域で工具摩耗面にAlNと推定される膜が生成され、工

- 具摩耗がBN無添加鋼に比べ大幅に減少する。
- ②なお、Al, B, Nのいずれかが低い濃度の場合は摩耗抑制効果は減少する。
- ③また、上記の摩耗抑制効果は工具中のTiC量の影響を受け、TiCが少ない場合は摩耗抑制効果は小さい。
- ④工具面上のAlNは工具と被削材間の拡散反応を抑制する効果を持つ。
- となる。

これらの結果から考えるとAlNによる摩耗抑制効果の可能性が高いが、そうするとこのAlNがどのようにして工具摩耗面に生成されたのかという点が問題となる。

摩耗面上に生成されたAlNは被削材から供給されたと考えられるが、その形態については、

- ①AlNの形で供給された。
- ②AlとNが別々に供給され工具摩耗面上でAlNが合成された。

の二つが考えられる。

鋼中のAlNについては本実験に使用したBN添加鋼は標準でBがおおよそ80ppm, Nが160ppm含まれており、全てのBがNと結合したとしてもNが過剰に鋼に残ることから、残存したNがAlと結合しAlNとなっている可能性は十分にある。

ただし、現在のところ①の可能性は低いと考えている。すなわち、もし鋼中のAlNが堆積したのであれば、Bをほとんど含まないBN7 (Al:0.063%, N:155ppm)でも鋼中に生成されているAlNが摩耗面に堆積し摩耗抑制効果を示すと思われるが、図3からも明らかにBN7はほとんど摩耗抑制効果を持たない。

一方②については、鋼中の酸可溶Alと介在物のBNが工具-被削材（あるいは切りくず）接触部における高温高压により反応しAlNを生成した可能性が考えられる。

そこで、拡散実験によりAlN生成の可能性を検討した。すなわち、超硬P10(120408)とS45C（工具と同形状）との間にAl箔（15μm）とBN粉末若干量をはさみ真空中で加圧・加熱（1.7MPa, 1200℃）した。徐冷後両者は簡単に引き離すことができた。そこで超硬工具表面およびS45Cの表面についてX線解析を行い、AlN生成の有無を調べた。結果を図8に示す。図は超硬工具側の分析結果であるが、AlNのピークが認められ、高温下において金属AlとBNよりAlNが生成する可能性があると言える。

なお、Tiを含む工具で切削した場合に摩耗抑制効果が顕著に見られた点については、工具中のTiCがAlNと工具との結合材として働いている可能性が考えられる。すなわち、被削材より供給されたBNがTiCの一部をTiNに置き換えたと仮定すれば、AlNはTiNと固溶しやすいことから、AlNが工具表面に強固に固定される確率が高い。

なお、これらを総合すると反応に伴うエネルギーから考えて可能性のある反応式としては、

Fig. 8 X-ray diffraction spectrum from diffusion couples of P10-(BN·Al)-S45C

が考えられるが、TiNおよび B_4C の生成は現在のところ未確認である。

5. 結 論

BNを添加した炭素鋼について、B, N, Alなどの含有量と被削性との関係を実験的に調査した。また、BN添加鋼を切削した場合の工具中に含まれるTiの含有量と工具摩耗との関係についても調べた。さらに、同鋼の工具摩耗抑制機構を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) Alを含むBN添加鋼をP種の超硬工具で切削すると、高速域で工具摩耗がBN無添加鋼に比べ大幅に減少する。
- (2) 鋼中のAl, B, Nのいずれかの濃度が低い場合は摩耗抑制効果は減少する。
- (3) 上記の摩耗抑制効果は工具中のTiC量の影響を受け、TiCが少ない場合は摩耗抑制効果は小さい。
- (4) Alを含むBN添加鋼を切削した場合に見られるAl, Nを含む膜はAlNと考えられる。
- (5) 工具摩耗面にAlN膜が存在すると、工具と被削材間の拡散反応が抑制される。

参 考 文 献

- 1) 山根八洲男, 田中隆太郎, 鳴瀧則彦: BN添加鋼の被削性, 精密工学会誌, **64**, 9 (1998) 1370.
- 2) 池田 孜, 佐藤廣士: PVD法によって作成したTi-Al-N系硬質膜の高温酸化特性と耐摩耗性, 日本金属学会誌, **57**, 8 (1993) 919.