

(論文)

鉛フリー快削鋼

染川雅実*・鹿嶋正人*・松島義武*・家口 浩 (Ph. D)**

*鉄鋼部門・神戸製鉄所・条鋼技術部 **技術開発本部・材料研究所

Free Cutting Steels without Lead Addition

Masami Somekawa・Masato Kaiso・Yoshitake Matsushima・Ph.D Hiroshi Yaguchi

Because of environmental problems, bismuth-added steels have been developed as free cutting steels without lead addition. Bismuth-added steels have as good tool lives and mechanical properties comparable to leaded steels, and require half as much added material (bismuth) compared to leaded steels. Further, chip disposability and cold forgeability for bismuth-added steels are superior to leaded steels. The superior machinability of bismuth-added steels can be attributed to the enhanced liquid metal embrittlement effect of bismuth, believed to result from the higher liquid Bi wetting capability to the steel matrix.

まえがき = 自動車部品をはじめ様々な分野において切削加工により製造される材料には、その加工効率を向上させるために微量の Pb を添加した Pb 快削鋼がある。この Pb 快削鋼には、0.04 ~ 0.30mass% の Pb が添加されており、その生産量は、国内で年間 50 万 t / 年以上¹⁾である。

しかし、近年の世界的な環境問題に対する意識の高まりから有害物質使用削減の動きが活発化してきている中で、Pb の使用の削減が求められている。鋼材に対しても、Pb 快削鋼と同等以上の特性がえられる Pb フリー快削鋼の要求が高まっており、材料の供給側である鉄鋼メーカーからも Pb フリー快削鋼が提案されている^{2)~5)}。本稿では開発の考え方と新たに開発した機械構造用 Pb フリー快削鋼の特性について紹介する。

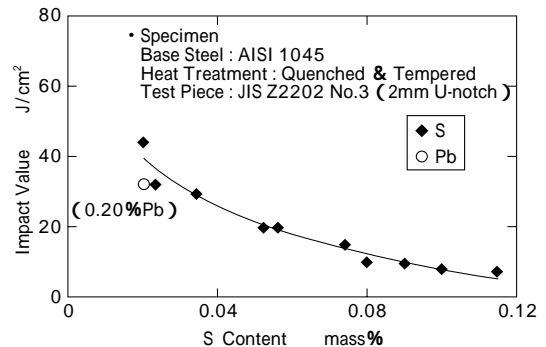
1. Pb フリー化の考え方

Pb 快削鋼は被削性のなかでも、切りくず処理性、ハイスドリル寿命に対する向上効果が大きく、Pb は鋼中に微細分散しているため機械的性質の異方性への悪影響が小さいという特徴がある。とくに、切りくず処理性は、それが悪いと、切りくずが被削材や工具に絡み付いて切削加工ラインの自動運転を障害し、生産性を低下させるという悪影響があるため、重要視される場合が多い。

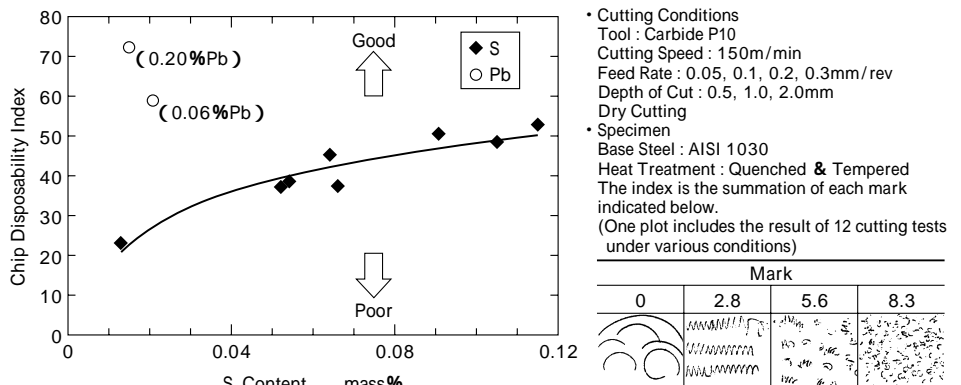
Pb 添加以外の快削鋼としてよくもちいられているものに S 快削鋼がある。S 快削鋼は、MnS 介在物が切削加工時に応力集中源として作用することによる被削性向

上効果が大きい、Pb 快削鋼にみられる溶融金属脆化⁶⁾の効果はないため、第 1 図に示すように S を 0.08 ~ 0.12 mass% レベルまで増量しても Pb が 0.10 ~ 0.30mass% レベル添加された Pb 快削鋼並の切りくず処理性がえられない。また、S を増量添加すると MnS 介在物は圧延方向に長く伸びているため、第 2 図に示すように圧延に対する直角方向の靱延性を低下させる。このため、機械的性質の異方性が大きくなるという欠点もある。Pb 快削鋼と同等の被削性および機械的性質がえられる Pb フリー快削鋼を開発するには、Pb と同様の作用効果がえられることが必要と考えた。なお、Pb の被削性への効果は以下のように考えられている⁶⁾⁷⁾。

潤滑作用：切削加工中の昇温により融点以上に加熱された Pb が溶出するため、工具と切りくずの間で潤滑



第 2 図 Pb 快削鋼と S 快削鋼の圧延直角方向の衝撃値
Fig. 2 Impact value of transversal direction of leaded steel and resulfurized steels



第 1 図 Pb 快削鋼と S 快削鋼の切りくず処理性
Fig. 1 Chip disposability of leaded steels and resulfurized steels

• Cutting Conditions
Tool : Carbide P10
Cutting Speed : 150m/min
Feed Rate : 0.05, 0.1, 0.2, 0.3mm/rev
Depth of Cut : 0.5, 1.0, 2.0mm
Dry Cutting

• Specimen
Base Steel : AISI 1030
Heat Treatment : Quenched & Tempered
The index is the summation of each mark indicated below.
(One plot includes the result of 12 cutting tests under various conditions)

Mark			
0	2.8	5.6	8.3

第1表 Pb, Biの性質

Table 1 Properties of Pb and Bi

Element	Pb	Bi
Atomic No.	82	83
Atomic Weight	207.19	208.98
Density g/mm ³	11.34	9.78
Melting Point	327	271
Boiling Point	1 750	1 564

第2表 開発鋼と従来鋼の化学成分および硬さ

Table 2 Chemical compositions and hardness of developed and conventional steels

Steel	Chemical Composition mass%									Hardness HV10
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Pb	Bi		
Developed Steels	F1	0.29	0.19	0.70	0.017	0.021	0.12	—	0.03	256
	F2	0.30	0.22	0.74	0.013	0.020	0.12	—	0.10	255
Conventional Steels	Base	0.31	0.19	0.72	0.013	0.013	0.10	—	—	246
	L1	0.30	0.19	0.74	0.011	0.021	0.13	0.06	—	253
	L2	0.29	0.18	0.68	0.014	0.015	0.19	0.22	—	258

剤となり摩擦抵抗を下げる。

溶融金属脆化：と同様、切削中の温度上昇によるPbの溶融金属脆化のため、工具刃先前方の変形領域を脆くさせ、被削材のせん断強度を下げる。さらに、切りくずに割れを発生しやすくなるため、切りくず断断性が向上する。

応力集中源：切削加工中のせん断領域で応力集中源として働き、微小な内部クラックを誘発し、切削抵抗の低減および切りくず断断性を向上させる効果がある。

また、機械的性質の異方性を損なわないことに対しては、Pb 介在物は粒状で小さく分散していることによる効果大きい。

このPb 快削鋼と同等の被削性および機械的性質をえることを目標に、Pb と同様に融点が高いBi を少量添加して開発をおこなった。Bi の物性値は第1表に示すように、元素周期表で原子番号がPb の次に位置する元素であるが、人体への蓄積性はPb と比較してもきわめて低く⁸⁾、発癌性を指摘する知見もなく⁹⁾、健康を害する元素ではない。また、国内および海外においても法的に規制される有害物質としての認識もされていない。

2. 実験方法

Pb 快削鋼には、L1 (Pb : 0.04 ~ 0.09mass%) と L2 (Pb : 0.10 ~ 0.30mass%) の2種類の鋼がある。それぞれを代替できるBi 添加鋼として、Bi 量が0.03mass%であるF1鋼と、0.10mass%であるF2鋼を試作した。

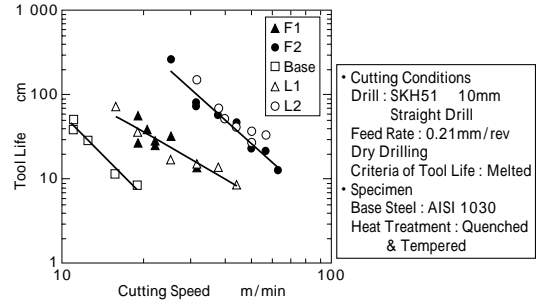
第2表に供試材の化学成分および試験材の硬さを示す。AISI 1030を基本鋼として、Bi 量とPb 量をそれぞれ2水準変化させた鋼を転炉溶製、連続鋳造後、50mm棒鋼に圧延した。この50mm棒鋼を焼入れ焼戻し(1100 × 30min, WQ 580 × 120min, WC)により、硬さを250HVにそろえた後、被削性および機械的性質を評価した。被削性は、ハイスドリルによる工具寿命、超硬旋削による工具寿命および切りくず処理性について評価を実施した。

また、冷間鍛造性については、50mm棒鋼を焼ならし(850 × 60min, AC)した後、20 × 30mmの試験片を作製、1600tfメカニカルプレスにより端面拘束圧縮試験をおこない、割れ発生限界圧縮率で変形能を評価した。

3. 実験結果

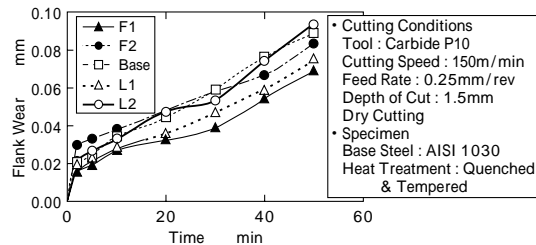
3.1 ハイスドリル寿命

第3図にハイスドリル寿命試験の結果を示す。狙いどおり、F1鋼でL1鋼と同等、F2鋼でL2鋼と同等の被削性がえられている。Bi 添加鋼は、Pb 添加量の約半分



第3図 ドリル寿命

Fig. 3 Tool life in drilling



第4図 超硬旋削工具摩耗推移

Fig. 4 Wear pattern of carbide tool in turning

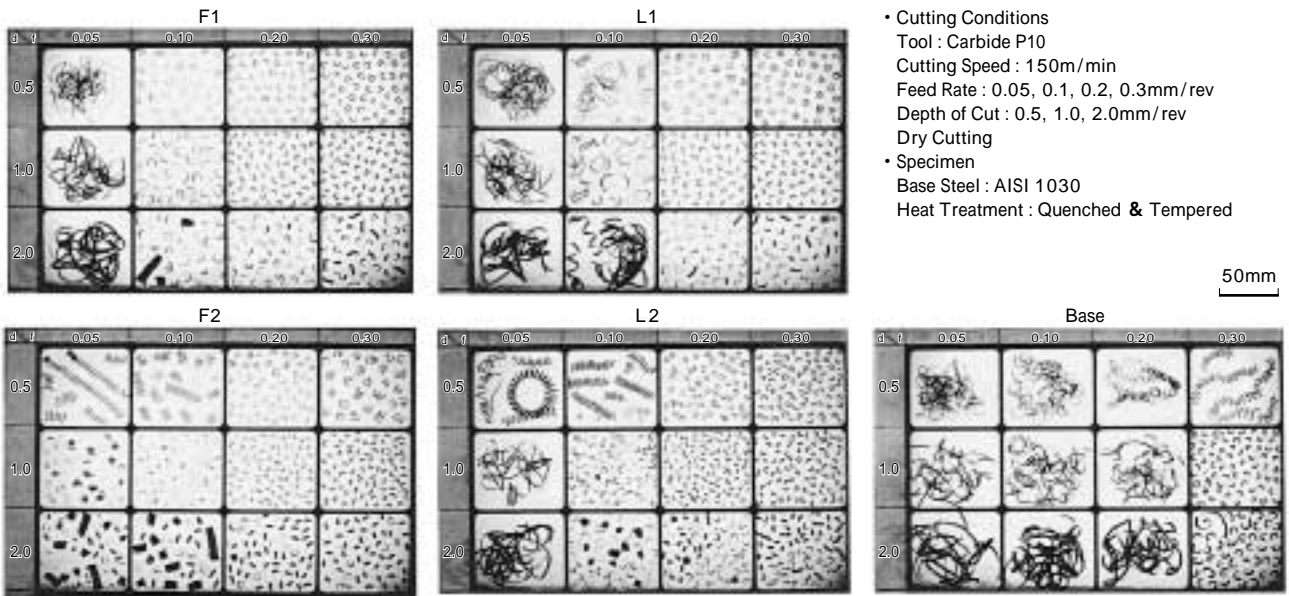
のBi 添加によりPb 快削鋼と同等のハイスドリル寿命がえられる。

Pb 添加による向上効果がえられる特性の一つにハイスドリル寿命が挙げられることは上述のとおりである。これは、Pbの被削性向上機構である潤滑作用、溶融金属脆化、応力集中源といった作用が、Pbの融点近傍の切削温度で切削される場合にもっとも効果的にえられるためである。第1表に示すように、BiはPbと同様に融点が高く、このため、BiもPbと同様被削性向上効果がえられたものと考えられる。

3.2 超硬旋削工具寿命

超硬旋削による工具寿命試験結果を第4図に示す。工具摩耗量の推移は、F1鋼とL1鋼、F2鋼とL2鋼は同等であるといえる。また、Base鋼とL2鋼の摩耗の経過はほぼ同じである。Pb 快削鋼は、超硬工具などの高速切削では工具寿命向上効果はない¹⁰⁾との報告があり、本実験も同様の結果であった。この理由としては、Pbを添加すると切削時の工具と切り屑の接触長さが短くなるため切削切刃部の温度が極端に高くなること¹¹⁾、鋼中のPbによる超硬工具(主にWC)の腐食作用があること¹²⁾により工具摩耗が促進され、上述の被削性向上効果が相殺されるといわれている。

Bi 添加鋼の超硬工具への悪影響に関する報告はみられないが、BiはPbと同様に低融点の金属で被削性向上機構も同じであるため、工具と切りくずの接触長さが短くなることにより切削切刃部の温度が上昇していること



- Cutting Conditions
Tool : Carbide P10
Cutting Speed : 150m/min
Feed Rate : 0.05, 0.1, 0.2, 0.3mm/rev
Depth of Cut : 0.5, 1.0, 2.0mm/rev
Dry Cutting
- Specimen
Base Steel : AISI 1030
Heat Treatment : Quenched & Tempered

写真1 超硬旋削切りくず

Photo 1 Chips generated during turning with carbide tools

第3表 開発鋼と従来鋼の機械的性質

Table 3 Mechanical properties of developed and conventional steels

	Steel	TS MPa	El. %	Reduction of Area %	Impact Value J/cm ²	
					Longitudinal	Transversal
Developed Steels	F1	806	20.5	68.5	218	32
	F2	804	20.9	69.7	210	31
Conventional Steels	Base	790	22.2	70.3	230	41
	L1	798	21.0	69.3	213	35
	L2	807	20.4	67.0	209	32

Heat Treatment : Quenched & Tempered

が考えられる。このため、Bi 添加鋼についても Pb 快削鋼と同様、超硬旋削時の工具寿命向上効果があまりみられなかったと考えられる。また、第4図に示した結果では、Bi 添加鋼、Pb 快削鋼とも快削成分添加量の少ない F1 鋼、L1 鋼のほうが F2 鋼、L2 鋼にくらべて工具摩耗が抑制されている。これは、快削成分の添加量が少ないほうが、上述の被削性に対する悪影響が小さかったためと考えられる。

3.3 切りくず処理性

切りくず処理性は、切削加工工程の自動化による生産性向上を達成するためには非常に重要であるが、同じ被削材であっても切削条件が異なれば、切りくず形態も異なるため、幅広い条件での評価が必要となる。写真1に超硬旋削による切りくずの状況を示すが、本評価では切削速度 150m/min とし、送りを 0.05, 0.10, 0.20, 0.30 mm/rev の4水準、切込みを 0.5, 1.0, 2.0mm の3水準として、合計 12 条件それぞれの切りくず分断性を比較評価した。

Base 鋼の切りくずから分かるように、快削成分を添加しなければ、送りがもっとも大きい 0.30mm/rev 以外の条件では長く連なった切りくずが生成している。これに対し、快削成分を添加していくと切りくずが分断する条件範囲が広がる。Base 鋼、L1 鋼、L2 鋼の順に切りくず形態を比較すると、Pb 添加量の増量にともない、切りくず分断領域が広がっている。Bi 添加鋼と Pb 添加鋼を比較してみると、同等の工具寿命をもつ F1 鋼と L1 鋼の場合には F1 鋼のほうが、F2 鋼と L2 鋼では F2 鋼



写真2 代表的な Bi 介在物

Photo 2 Typical bismuth inclusions

のほうが、いずれも切りくず処理性が優れていることが分かる。このように Bi 添加鋼で Pb 快削鋼と同等の工具寿命をえるためには、目標とする Pb 快削鋼の Pb 添加量の約半分の Bi 添加が必要であるが、この添加量では切りくず処理性は Pb 快削鋼より優れている。

3.4 機械的性質

第2表に示した各鋼種の機械的性質を第3表に示す。いずれの鋼種にも差は認められず、ほぼ同等である。写真2に Bi 添加鋼の Bi 介在物を示すが、Pb と同様に化合物をつくらず Bi 単独で分散しているため、Pb 快削鋼と同等の機械的性質を示すものと考えられる。このため、とくに機械的性質の異方性が重要視され、S 快削鋼の使用が制限されるような場合でも、Bi 添加鋼の適用は可能と考える。

3.5 冷間鍛造性

割れ発生限界圧縮率を第5図に示す。F1 鋼と L1 鋼を

比較すると、F1 鋼のほうが優れ、Base 鋼並がえられる。Bi 添加鋼は Pb より少量の添加で被削性向上効果があるため、Pb 快削鋼と同等の被削性がえられる Bi 添加鋼では冷間圧造性の向上が図れる。また、現行材が普通鋼の場合、冷間圧造性を低下させることなく被削性を向上させることができるという利点がある。

4. 考察

Pb 添加された鋼の温間での延性が低下することは良く知られており、このために被削性が優れるといわれている。Pb 快削鋼の延性は、200 以上になると低下し、融点近傍の 300~350 で極小値を示す。この原因として、Pb の溶融脆化と鋼の青熱脆性との相互作用、塑性変形に対する Pb の内部潤滑作用、溶融 Pb と鋼との接触面におけるマイクロクラックの発生・伝播などがあげられている¹³⁾。Bi についても同様な作用があるとの報告もある⁶⁾。

この作用を今回の供試材についても確認するため、被削性評価にもちいた焼入れ焼戻し後の Base 鋼、L2 鋼、F2 鋼の 3 種類の鋼材について温間引張試験をおこなった結果を第 6 図に示す。L2 鋼と F2 鋼は Base 鋼とくらべて 250~400 の間で延性が低下しており、Bi 添加鋼でも Pb 快削鋼と同様に溶融金属脆化の効果があることが分かる。

F2 鋼の Bi 添加量は、L2 鋼の Pb 添加量の半分であるにもかかわらず、溶融金属脆化の効果が同等である。このため、Bi 添加鋼は Pb 添加鋼の約半分の添加で Pb 快削鋼と同等の被削性がえられると考えられる。溶融金属脆化と濡れ性には関係があり、濡れ性がよいほど溶融金属脆化作用は大きくなるとの報告がある^{14),15)}。そこで、Pb と Bi による鋼の濡れ性の違いを検討するため、濡れ性試験を実施した。

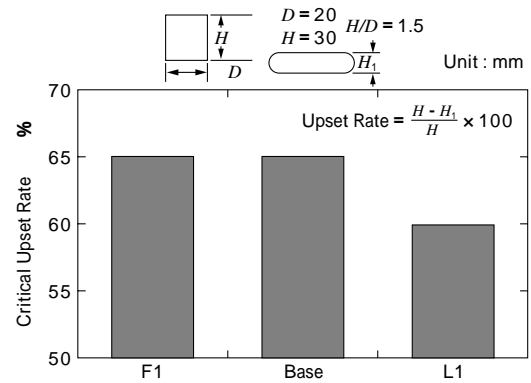
濡れ性試験は、高温界面張力測定装置（東京工業株式会社製）をもちい、Ar 雰囲気中で AISI 1030 を試料基板とし、Pb もしくは Bi を基板上にのせて昇温し、各温度にて接触角を測定した。この結果を第 7 図に示す。Bi はいずれの温度においても Pb より接触角が小さく、鋼に濡れやすいという結果を示している。Bi は Pb よりも鋼の濡れ性が良好であるため、少量の添加で溶融金属脆化作用がえられると考えられ、このため Pb 快削鋼より添加量が少なくても被削性向上効果がえられたと考えられる。

むすび = Bi 添加鋼は、Pb 添加量の約半分の添加量で Pb 快削鋼と同等の工具寿命と機械的性質がえられ、切りくず処理性と冷間鍛造性は Pb 快削鋼以上の特性がえられる。このため、少量添加で冷間鍛造性など他の特性も低下させずに被削性を向上させることが可能となるという利点がある。

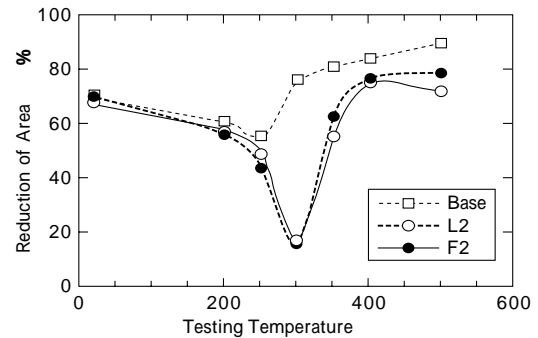
今後、Pb フリー快削鋼に代って、Bi 添加鋼の使用の拡大が期待される。

参考文献

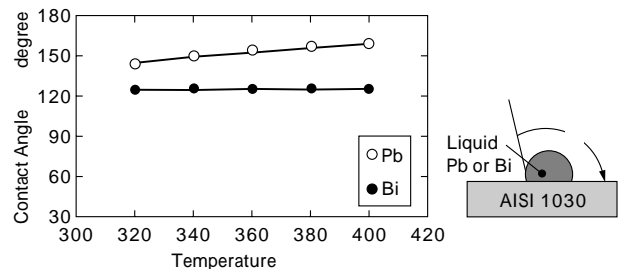
1) (集計資料): 特殊鋼, Vol.42, No.6 (1993) p.12.



第 5 図 割れ発生限界圧縮率
Fig. 5 Critical upset rate



第 6 図 引張試験温度と絞りの関係
Fig. 6 Relationship between temperature and reduction of area in tensile test



第 7 図 濡れ性試験結果
Fig. 7 Results of wettability test

- 2) 岩間直樹: 機械技術, Vol.48, No.6 (2000) p.37.
- 3) 常陰典正: 機械技術, Vol.48, No.6 (2000) p.41.
- 4) 白神哲夫: 機械技術, Vol.48, No.6 (2000) p.44.
- 5) 狩野 隆: 機械技術, Vol.48, No.6 (2000) p.46.
- 6) 家口 浩: 鉄と鋼, Vol.77, No.5 (1991) p.683.
- 7) 秋葉賢樹: 特殊鋼, Vol.38, No.9 (1989) p.16.
- 8) K. M. Koch et al.: British J. of Clinical Pharmacology, Vol.42 (1996) p.207.
- 9) 製品安全データシート (MDL Information Systems, Inc)
- 10) 佐々木敏彦: 特殊鋼, Vol.38, No.9 (1989) p.46.
- 11) 奥島啓式ほか: 機械学会論文集, Vol.28, No.187 (1962) p.404.
- 12) 荒木 透: 第 96・97 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1984) p.13.
- 13) 木村篤良: 第 96・97 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1984) p.140.
- 14) M. G. Nicholas et al.: Journal of Materials Science, Vol.14 (1979) p.1.
- 15) N. S. Stoloff: Emblittlement by Liquid and Solid Metals, Ed. MH. Kamdar, Conf. Proc. TMS-AIME (1984) p.3.