

<報文>TiNi系形状記憶合金の切削および研削に関する基礎的実験とその応用

著者	森 由喜男, 石田 重雄, 佐藤 忠行, 今野 隆, 大川 淳, 本間 敏夫
雑誌名	東北大学選鑛製錬研究所彙報 = Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University
巻	43
号	2
ページ	171-178
発行年	1988-03-25
URL	http://hdl.handle.net/10097/32934

TiNi 系形状記憶合金の切削および研削に関する 基礎的実験とその応用

森 由喜男* 石田 重雄* 佐藤 忠行*
今野 隆** 大川 淳*** 本間 敏夫****

Mechanical Working of a TiNi Shape Memory Alloy and its Application. By Yukio MORI, Shigeo ISHIDA, Tadayuki SATOW, Takashi KONNO, Atsushi OHKAWA and Toshio HONMA.

Mechanical working of a TiNi shape memory alloy by machining was discussed as well as attempts to fabricate pipe connectors. The results obtained so far are satisfactory. Although the process of machinability is difficult and complex, the working method presented in this paper offers a new possibility.
(Received November 2nd, 1987)

Keywords: *TiNi alloy, shape memory alloy, mechanical working, cutting, lathe-working, grinding, drilling, pipe-connector.*

1. 緒 言

TiNi 系形状記憶合金は種々の形状記憶合金の中でも耐蝕性、耐疲労強度に優れているため工業製品への応用については最も期待されている材料である。しかしながら、同合金を工業製品へ応用した例はまだ数少ない。その理由として、同合金の加工性の悪さが指摘されている。特に切削加工および穴あけ加工についても非常に困難な事例が多く、これらについての定量的な報告例は少ない。更に切削加工はその状況に応じての評価も困難であり、いわゆるノウ・ハウ的な要素が少なくない。

TiNi 系形状記憶合金は、一般的に難削材とされているステンレス鋼よりもはるかに困難であるとされている。この原因は切削中の発熱あるいは加工応力により相変態を生ずることにある。

本研究の目的は、種々の形状記憶合金の中においても特に注目されている NiTi 系形状記憶合金の切削加工および平面研削加工における最適加工条件についての基礎資料を得るところにある。

2. 切削加工実験

2.1 試料および実験方法

実験に使用した試料は Ti-50 at%Ni 合金である。試料は 900°C・1h の溶体化処理後氷水中に焼入れた。切削前の試料形状は 30φ×300l の棒状である。切削実験に使用した旋盤は昌運カズヌーブ (HB-500 型、無段変速装置付) である。

選鉱製錬研究所報告 第1028号

*宮城県工業技術センター

**有限会社 宮沢製作所

***東北大学選鉱製錬研究所

****東北大学選鉱製錬研究所 (昭和62年7年月16日逝去)

切削方法は長手方向に外周切削を行ない, 乾式切削条件における工具摩耗, 切削抵抗および被切削材の表面粗さを測定し, 切削条件との関連性について検討した。

工具寿命は, 横逃げ面摩耗(フランク摩耗: V_B で示す)が0.2 mm まで進行した状態を寿命とした。更に切削抵抗の測定には AST 式切削動力計, 表面粗さの測定にはタリサーフ6型表面検査機を使用した。実験に使用した工具の種類, 形状および実験条件を Table 1 に示す。

Table 1 Experimental condition of lathe turning.

Tool	Carbide bit (K-10)							Nose R
		Back rake angle	Normal side rake angle	End relief angle	Side relief angle	End cutting edge angle	Side cutting edge angle	
	Positive	15°	5°	12°	12°	15°	15°	
Negative	-5°	-6°	5°	6°	15°	15°	0.8 mm	

Cutting condition	Cutting speed (V)=5, 10, 20, 40, 80 m/min
	Tool feed (f)=0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm/rev
	Depth setting (d)=0.5 mm

TiNi 系形状記憶合金の切削には超硬バイトが使用されている例があるので, 本実験でも超硬 K-10 種を使用した。バイトのすくい角は正(ポジ)および負(ネガ)の2種類とし, ノーズ半径(R)は 0.8 mm とした。

2.2 実験結果と考察

Photo. 1 (a), (b) は切削工具の摩耗状態を示したものである。Photo. 1 (a) に示した低切削速度の条件下における工具刃先には明瞭なこすり摩耗現象が観察された。一方, (b) に示した比較的高切削速度の条件下においては切削時の発熱によるチッピング現象が認められた。

工具の寿命は切削加工にとって重大な関心事である。

Fig. 1 は工具寿命 ($V_B=0.2\text{mm}$) に至るまでの総切削量 (Z) と切削速度 (V) の関係の一例を

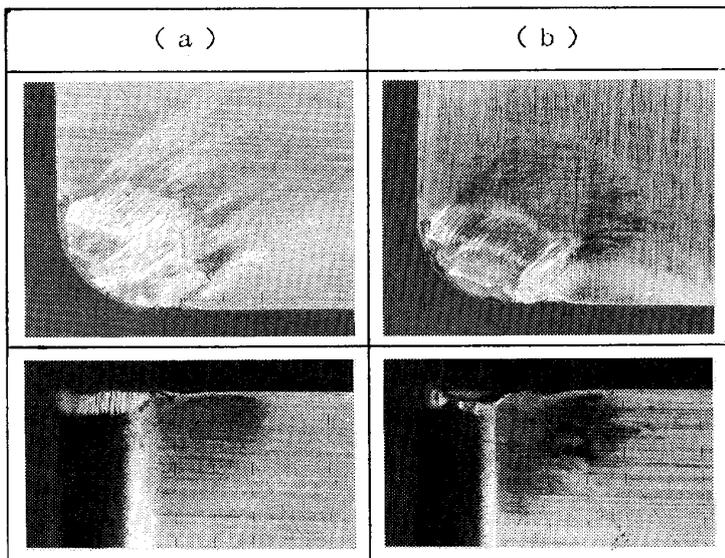


Photo. 1 Variation of wear shape of cutting tool on lathe turning.
 (a): $V=10$ m/min, $f=0.4$ mm/rev, $d=0.5$ mm, negative
 (b): $V=40$ m/min, $f=0.2$ mm/rev, $d=0.5$ mm, negative

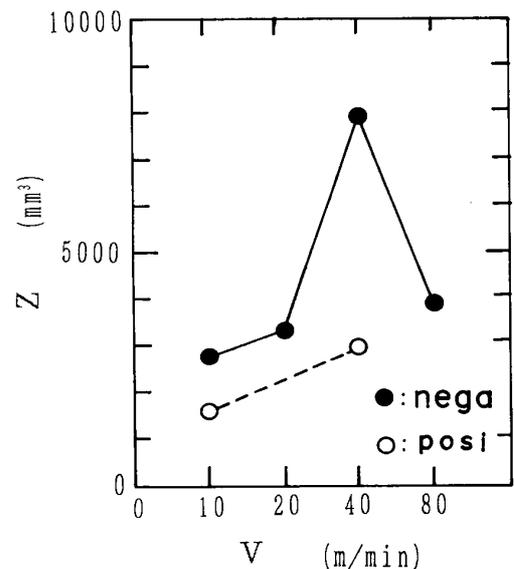


Fig. 1 Relationship between total cutting volume (Z) and cutting speed (V).
 $f=0.2$ mm/rev, $d=0.5$ mm, $R=0.8$ mm

示したものである。図中に示す切削条件下においては、バイト形状がネガ、切削速度 (V) 40 m/min の時に最も良い結果を示した。バイト形状がポジの場合はネガ形状の場合に比べ、著しく切削性が劣っていることがわかる。この原因はポジ形状のくさび角はネガ形状に比べて小さく、剛性が少ないためと推測される。

Fig. 2 に工具寿命に至るまでの総切削量 (Z) と送り量 (f) の関係を示す。切削速度 10m/min の低切削速度条件下における工具寿命までの総切削量は、本実験範囲内においては送り量が大きくなる程多くなる傾向にある。切削速度が 40 m/min の場合には逆に送り量が大きくなると総切削量は少なくなる。これらの結果から切削速度と送り量には密接な関係があり、両者を調整することにより適正な切削条件が得られることがわかった。

Fig. 3 は切削過程における工具のフランク摩耗 (V_B) 状況を示したものであるが、切削速度が比較的速い場合には初期摩耗が激しく、逆に切削速度が極端に遅い場合には工具寿命付近での急激な摩耗現象が観察された。

次いで Fig. 4 に 切削速度 (V) と工具主分力 (P_1) の関係を示す。工具主分力は送り量 (f)、切込量 (d)、ノーズ半径 (R) が一定の場合、切削速度が速くなるに従い漸次減少する傾向にあり、切削速度が一定の場合には送り量が大きくなる程増加する。これは一般鋼材の切削加工における現象と同じである。Fig. 5 は工具送り量と被加工物の表面粗さ (R_{max}) の関係を示すものである。表面粗さは送り量が大きくなる程粗くなるがこの傾向は切削速度が変わっても同じような傾向にあり、 R_{max} に大きな差は見られなかつた。

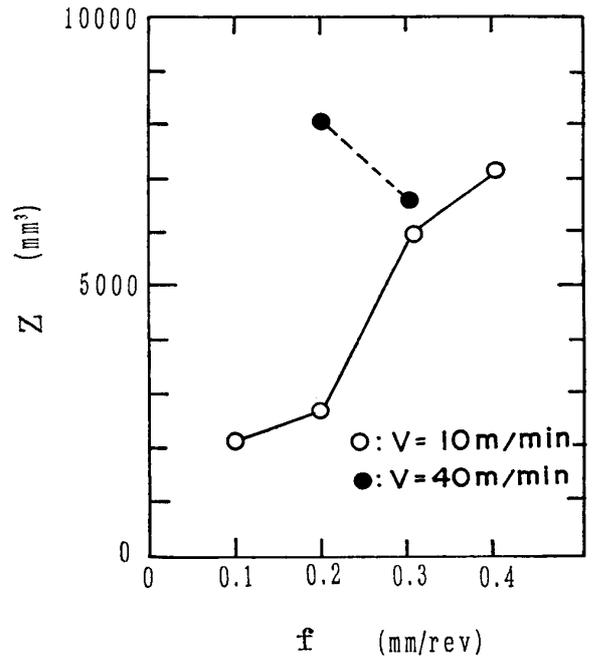


Fig. 2 Relationship between total cutting volume (Z) and tool feed (f).
 $d=0.5$ mm/rev, $R=0.8$ mm

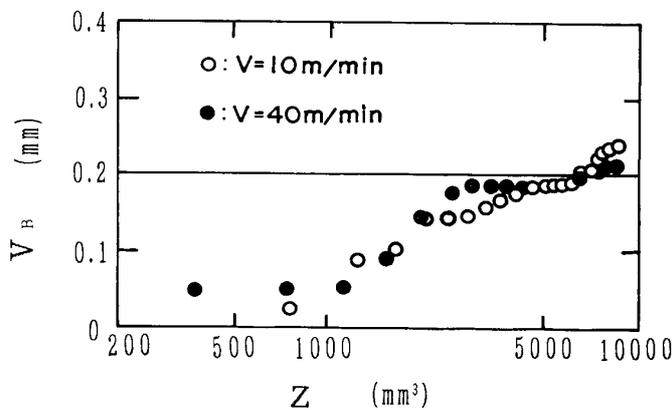


Fig. 3 Relationship between flank wear (V_B) and total cutting volume (Z).
 $f=0.4$ mm/rev, $d=0.5$ mm, $R=0.8$ mm, negative

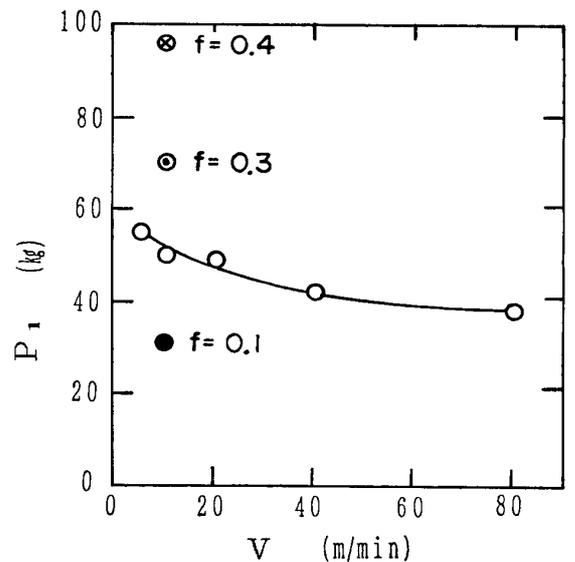


Fig. 4 Relationship between normal cutting force (P_1) and cutting speed (V).
 $f=0.2$ mm/rev, $d=0.5$ mm, $R=0.8$ mm, negative

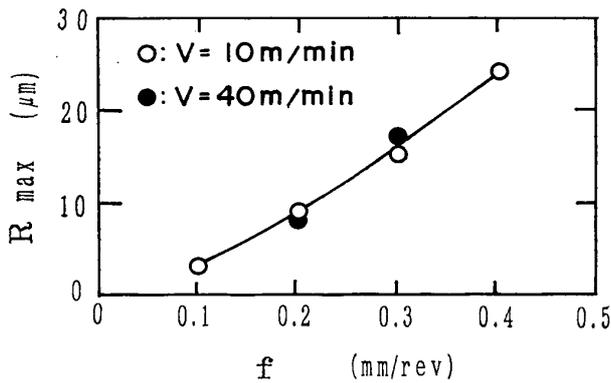


Fig. 5 Relationship between surface roughness R_{max} and tool feed (f).
 $d=0.5\text{ mm}$, $R=0.8\text{ mm}$, negative

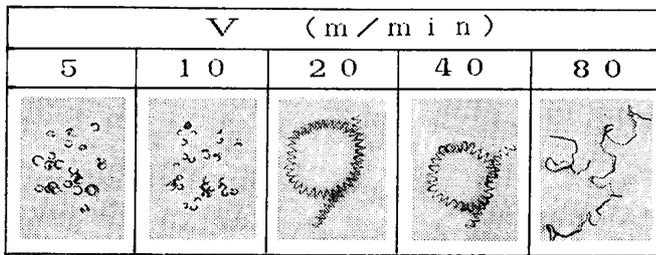


Photo. 2 Variation of cutting chip of lathe turning.

Photo. 2 には切削速度を変えた場合の切屑の状態を示した。切屑の形状は切削速度が 80 m/min の場合には不規則な連続形になり、被加工物にからまり易く正常な切削加工が行なわれなかった。また、切削速度が $20\sim 40\text{ m/min}$ の条件では流れ形を示し、 10 m/min 以下の切削速度ではチップ状となった。

3. 研削加工実験

3. 1 試料および実験方法

TiNi 系合金の研削加工においては、砥石摩耗量や仕上面粗さが大きくなり、他の金属と比べて難削性を示す。従って超砥粒による研削方法を検討しなければならないが、超砥粒は高価でもあり研削比などを的確に把握して導入の適否を定めなければならない。

本実験に使用した試料は切削加工実験で用いたと同じ Ti-50 at%Ni 合金である。

試料は $900^\circ\text{C}\cdot 1\text{h}$ の溶体化処理後水中に焼入を行ない実験に供した。実験条件を Table 2 に示す。研削加工方法は砥石摩耗量を正確に測定するために平面プランジ研削を行ない、砥石切入量はポジションスケール、砥石摩耗量は転写法により測定した。

Table 2 Experimental conditions of grinding.

Machine	Surface grinder (Okamoto DSG-5v)
Grinding method	Surface plunge grinding
Grinding tool	SDC170N100B (Resinoid bonded diamond wheel) SD170N100V (Vitrified bonded diamond wheel) GC80G9V SN80G7V (Alumina monocrystalline wheel)
Grinding fluid coolant	Noritake cool S-100NT (JIS W21)
Grinding conditions	Peripheral wheel speed: 1800 m/min Work speed : 18 m/min Depth setting : $6\ \mu\text{m}$

3. 2 実験結果と考察

Fig. 6 は砥石の種類と研削比 (G) [研削量/砥石摩耗量] および被加工物の表面粗さ (R_{max}) の関係を示した。図中に示した様に、研削比 (G) については SDC170N100B (レジノイドボンドダイヤモンド砥石) が最も大きな120の値を示した。アルミナ系砥石 (Fig. 7 Δ 印) は実験に使用

した砥石の中で最も小さい値を示し、この種の砥石はTiNi系形状記憶合金の研削加工には不適當である。

GC80G9V 砥石の研削比は14であり、一般砥石としては良好な研削性を示している。

SD170N100V (ビトリファイドボンドダイヤモンド砥石)の研削比は20程度であり、超砥粒としては小さい値を示しているのでTiNi系合金の研削には価格の面から問題があると思われる。しかし同砥石は有気孔砥石で切味が良いなどの長所もあり、砥粒の結合度を高くすれば研削比を改善できる可能性がある。

表面粗さ (R_{max}) については、GC80G9V が最も良い結果を示した。従って仕上加工にはこの種の砥石による平面トラバース研削が適している。なお本実験における表面粗さは、スパークアウトを行なわない状態で研削面を測定した値であり、通常のトラバース研削でスパークアウトを行なった場合にはこの値よりかなり小さな値になるものと思われる。

Fig. 7 は砥石の種類と研削抵抗 [法線研削抵抗 (F_n)] の関係を示したものである、研削抵抗はレジノイドダイヤモンド砥石が研削初期から一定の値を示しており、砥石寿命の長いことを示している。GC 砥石は3種類の砥石の中では最も研削抵抗が大きい。しかしながらこの砥石は他の鋼材を研削する場合でも同様の傾向を示す。この現象はGC砥石特有のドレッシング時の切刃構成が原因と考えられる。SN 砥石の研削抵抗はGC砥石より小さいが、目つぶれ状態の時に生ずる研削音を発し、白光の研削火花を多量に放出した。従って研削熱が大となり、加工変質層も深くなるものと推測され、同合金の特性に悪影響を及ぼすと考えられる。

4. 切削および研削加工に関するまとめ

NiTi 系形状記憶合金の切削加工および研削加工について検討し、従来は困難とされていた同合金の加工条件について次の様な結果を得た。

- (1) 工具寿命までの範囲における総切削量は、切削速度 (V) 40 m/min, 送り量 (f) 0.2 mm/rev, 切込量 (d) 0.5 mm の条件で良い結果を得た。
- (2) 工具すくい角は負 (ネガティブ) の方が良い。
- (3) 研削加工においては研削比 (G) を重視すれば SD170N100B 砥石が適しており、被加工物の表面粗さを良くする場合には GC80G9V 砥石が適している。

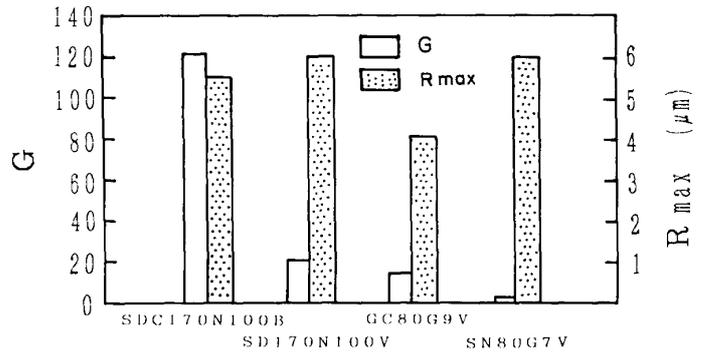


Fig. 6 Relationship between grinding ratio (G), surface roughness R_{max} and grinding tools.

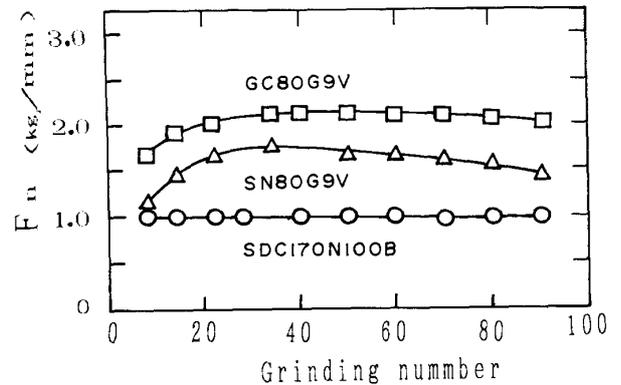


Fig. 7 Relationship between normal grinding force (F_n) and grinding tools.

5. 工業的規模における継手の試作

前項までの実験結果を基礎として一般の工業規模における継手の試作を行なったのでその結果を以下に示す。

5.1 切断加工

Table 3 に示す条件で鋸盤による切断加工を行なった。切断性はステンレス鋼とほぼ同程度であり良好な切断加工を行うことが出来た。

Table 3 Experimental conditions of sawing.

Machine	Tool	Cutting Fluid coolant	rpm
Sawing machine	H-Bi-METAL	Kurekatt W-101	23

5.2 穴あけ加工

穴あけ加工は NC マシニングセンタを使用し, Table 4 に示した条件で加工を行なった。実験をおこなった材種の中では, Table 4 に示す工具材種のみ穴あけ加工が可能であった。但しいずれの場合も刃部にシンニングを施す必要がある。その中でも超硬ドリルは最も寿命が長く, 切削速度も 9.5 m/min まで高くすることができた。

Table 4 Experimental conditions of drilling.

Machine	Tool	Cutting fluid coolant	Cutting speed (m/min)	Feed (mm/rev)
	Genter drill (SKH9-3φ)	Johnson JS 635 (JIS W22)	4.5	0.5
	Kobe KMC 2 (5φ)		3.0	0.3
	Toyo CeC (5φ)		7.5	0.5
	Goorng 556 (5φ)		2.5	0.1
	TUSA carbide drill (G2, 5φ)		9.5	0.3

5.3 外径加工

外径加工は NC 旋盤を使用した。工具材種としてアルミナコーティングを施した超硬合金を使用することにより, Table 5 の条件で良好な仕上面を得ることができた。

Table 5 Experimental conditions of lathe turning.

Machine	Tool	Cutting fluid coolant	Cutting speed (m/min)	Depth setting (mm)	Feed (mm/rev)
NC lathe	Clamped tool shank: PDJNR 2525 tip : Carbide bit (T802 Alumina coating)	Johnson	19	0.5	0.05
		JS 635 (JIS W22)	38		0.15

5.4 中ぐり加工

超硬スローウェイ工具を使用し NC 旋盤で穴あけ加工を行なった。条件を Table 6 に示す。

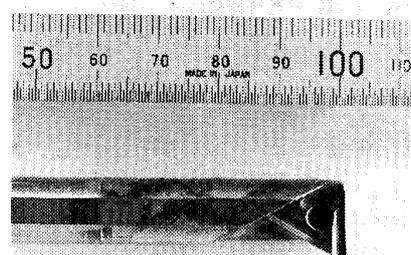
Table 6 Experimental conditions of boring.

Machine	Tool	Cutting fluid coolant	Cutting speed (m/min)	Depth setting (mm)	Feed (mm/rev)
NC lathe	Clamped tool shank: STUPS 0010 tip : carbide bit (N308 cermet)	Johnson JS 635 (JIS W22)	9	0.25	0.05
			13	0.5	0.1
	Brazing bit (T802 Alumina coating)		9	0.25	0.05

超硬スローウェイ工具は寿命が長く良好な切削性を示すがチップングが生じ易い。その対策として Photo. 3 のようなチップブレーカー付きスローウェイチップを前切り刃角が 0 度になるようにロウ付けしたバイトを使用することにより、チップングを抑止することができた。

5. 5 ねじ切り加工

NC 旋盤によるねじ切り加工条件を Table 7 に示す。この条件下でのねじ切り加工では、谷部の仕上面が良く良好な加工が得られた。タップ加工については市販品のハンドタップでのねじ切りは不可能であったので Photo. 4 に示



改良したロウ付けバイト
Photo. 3 Original boring tool.

Table 7 Experimental conditions of thread cutting.

Machine	Tool	Cutting fluid coolant	Cutting speed (m/min)	Depth setting (mm)
NC lathe	Clamped tool shank : ER-2525M16T tip : carbide bit (N308)	Johnson JS 635	13	0.1

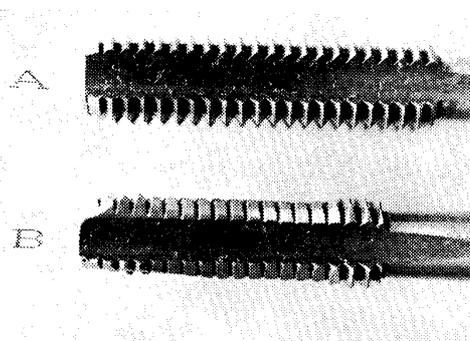
すようにタップの中央部を切除し、切刃数を少なくすることにより 1 枚の切刃にかかる応力を増大させることによりねじ切りを可能にした。この方法は従来の方法とは全く異なる方法であり、実用新案を申請した。

5. 6 突切り加工

突切り加工では切屑の排除が悪いと工具寿命が極端に低下する。これに対応するため、工具刃先上面に 0.1~0.3 mm の平行部を施すことにより切屑の排除が良くなり、良好な突切り加工が可能となった。この時の加工条件を Table 8 に示す。

5. 7 異径継手の試作

前項までの工業的規模における一連の切削加工実験により従来はガンドリルマシンでなければ不可能とされていた NiTi 系形状記憶合金の深穴加



A : 市販品
B : 中央部を切除した改良タップ
タップ形状

Photo. 4 Variation of tapping tools.
A: As received, B: Original

Table 8 Experimental conditions of cutting off.

Machine	Tool	Cutting fluid coolant	Cutting speed (m/min)	Parting width (mm)
Lathe	SKH 4	Johnson JS 635 (JIS W 22)	4~7	2
	DIACAT NACHI (SKH 9)		11	2
	carbide bit (P 20)		17~26	2.4

工が汎用の加工機でも可能となった。本研究により試作した異径継手を Photo.5 に示す。穴径の寸法精度についてみると、穴の奥行き方向での直径誤差は最大で $15\ \mu\text{m}$ 、平均値で $10\ \mu\text{m}$ であり良好な結果であった。同合金の一般的な形状変化量は直径の 1.5% 程度（直径を 20 mm とすれば形状変化量は $400\ \mu\text{m}$ ）は期待できるので、本研究で試作した継手の寸法は十分に満足できるものである。事実、Photo.5 に示す状態において引抜き力を測定したところ $93\ \text{kg}\cdot\text{f}/\text{cm}^2$ の値を示した。

**Photo. 5** An example of trial manufactured joint.

6. 総 括

TiNi 系形状記憶合金の機械加工について系統的に検討し、その結果を応用して継手の試作を試み良好な結果を得ることができた。さらに機械加工では従来困難とされて来た作業の可能性が判明し、形状記憶合金の複雑な加工も加工方法を検討することにより十分可能であることがわかった。

本研究を遂行するにあたり、多大の御支援を頂いた仙台通商産業局に対し、厚く御礼申し上げます。また、本論文の校閲および討論に有益な御助言を頂いた選鉱製錬研究所、松本實博士に深く感謝申し上げますとともに、実験に協力していただいた宮城県工業技術センターの皆様に御礼申し上げます。