

## 超硬合金と鋼との複合化に関する研究

宮腰 康樹, 酒井 昌宏, 鴨田 秀一,  
柴田 功\*, 丸山 正男\*, 金山 達也\*

## Study on Graded Bonding of WC-Co Alloy and Steel.

Yasuki MIYAKOSHI, Masahiro SAKAI, Shuichi KAMOTA,  
Isao SHIBATA\*, Masao MARUYAMA\*, Tatsuya KANAYAMA\*

## 抄 録

超硬合金と鋼との間に、中間的な熱膨張係数となる粉末を介在させ焼結する方法で、両者の接合を試みた。その結果、C含有量の比較的高い鋼種を選定することにより、組織的にも、強度的にも満足される接合体が得られた。

## 1. 緒 言

超硬合金は、セラミックスに匹敵する硬度を有し、靱性、耐熱性、耐食性にも優れている。これらの性質より超硬合金は、切削工具の分野をはじめとして耐摩耗、耐衝撃、耐食性が要求される工具および部品としてその需要が増加している<sup>1)</sup>。しかし、難加工材料であることに加え高価格であるため、その用途には制約を受けている。したがって、超硬合金の適用範囲を拡大するには、安価で加工性に優れる鋼などとの接合による複合化が有効であり、一般にはろう付が採用されている。

超硬合金と鋼を接合する場合、熱膨張係数の違いにより生じる熱応力の発生が重要な問題となる<sup>2)</sup>。この応力緩和を図るために、AgあるいはCu系の軟質ろう材を用いたろう付が多くなされている。しかし、この方法においても、ろう材が高価であったり、ろう材の性質上高強度が得られなかったり、広面積部を接合した際ろう切れを生じるなど多くの問題を残している<sup>3)</sup>。また、ろう材の融点が比較的低いことから、高温で使用される部品への適用が困難となる。

本研究では、通常用いられている超硬合金組成の焼結体と鋼との間に中間的な熱膨張係数となる組成の粉末を介在させて焼結と接合とを同時に行う方法（焼結接合法と称す）で接合を行った。得られた接合体については、組織観察、元素分析、硬さ試験および強度試験にて評価した。

## 2. 実験方法

## 2.1 供試材料

鋼には軟鋼(S25C)と工具鋼(商品名: YK30, 大同特殊鋼(株)製)の二種類を用いた。表1に各鋼材の化学成分を示す。

表1 各鋼材の化学成分

鋼材	化学成分 (wt %)								
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
S25C	Bal.	0.27	0.18	0.55	0.22	0.15	0.10	0.04	0.08
YK30	Bal.	1.05	0.34	0.95	0.02	0.01	0.12	0.08	0.45

超硬合金には、耐摩耗、耐衝撃工具用としては一般的な組成である WC: 89.3wt%, Co: 10.7wt%のもの (A0 と称す)の他に、Co量をそれぞれ20, 40wt%としたもの(各々A2, A4 と称す)の計三種類を用いた。これらの内、A0 およびA2は、粉末を金型プレス法により圧力 19.6MPa で冷間プレス成形したのち、真空炉にて真空度約 1.33Pa, 焼結温度 1620~1630K, 保持時間 3.6ks, 無加圧の条件で焼結して用いた。焼結後のA0 およびA2は、ダイヤモンド平面研削盤により所定の厚さ(1.0~8.0mm)まで研削した。

## 2.2 焼結接合法

焼結接合法は、A0 と鋼との間に中間的な組成となる一層あるいは何層かを介在させ、ホットプレス法にて焼結と接合を同時に行うものである。図1(a), (b)に焼結接合法の模式図を示す。(a)は、最下層となるA0部に粉末を用いた場合で、(b)は焼結体を用いた場合である。この際、焼結接合条件は、真空度 1.33Pa, 焼結温度 1523K, 保持時間 3.6ks, 加圧力 1.5MPa とし、加熱保持後は炉冷した。

\* 北海道住電精密(株)

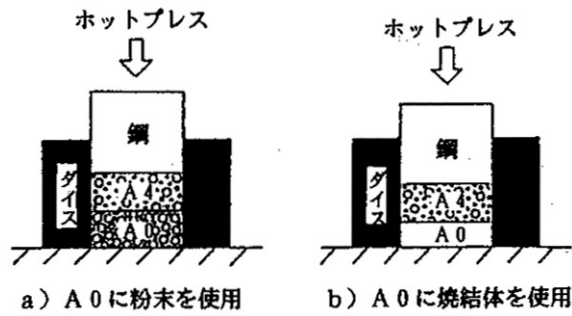


図1 焼結接合方法

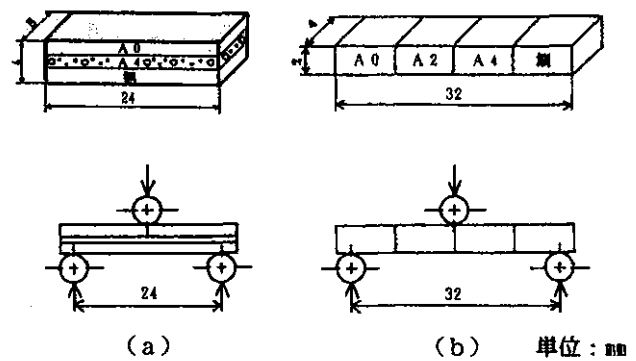


図2 抗折試験方法

2.3 各種試験方法

2.3.1 組織観察

接合試料および抗折試験後の試験片の断面を鏡面仕上げし、ナイトルおよび村上試薬（赤血塩のアルカリ溶液）でエッチングして組織を観察した。組織観察には金属顕微鏡および走査型電子顕微鏡（SEM と称す）を用いた。また、一部の試料については、エネルギー分散型X線微小分析装置（EPMA と称す）により元素分析も行った。

2.3.2 強度試験

接合体の強度は、図2(a), (b)に示すような直方体形状に加工した試験片を、抗折試験（三点曲げ法）で評価した。(a)は超硬合金部の厚さの小さい場合、(b)は超硬合金部の厚さが大きい場合の試験方法である。抗折試験には、オートグラフ試験機を用いた。

抗折力の算出は次式より求めた。ただし、試験片が完全破断まで至らない場合は超硬合金に亀裂が生じたときの荷重を破断荷重とし、また、試験片が中央から離れた位置より破断した場合もそのときの破断荷重を単純に以下の式に代入し抗折力とした。

$$\sigma = 3wl / 2bh^2$$

- $\sigma$  : 抗折力（3点曲げ応力）(MPa)
- w : 破断荷重 (N)
- l : 支点間距離 (mm)
- b : 試験片の幅 (mm)
- h : 試験片の厚さ (mm)

2.3.3 硬さ試験

接合体における各相の硬さを、ロックウェル硬さ計にて測定した。超硬合金の硬さ測定にはHRAスケールを用いる場合が多いが、本試料は超硬合金から鋼までの組成傾斜体であり硬さの幅が広がるため、測定スケールをHRC（圧子：円錐ダイヤモンド、荷重：1470N）に統一した。

また、代表的な接合体については、マイクロビッカース硬さ計にて硬さ分布も測定した。この際、試験条件は荷重0.98N、保持時間15sとした。

3. 実験結果および考察

3.1 A0厚さの違いによる接合体の組織

写真1に、A0部の厚さ（焼結体を使用）を1.0～2.0mmとした場合の接合体のマクロ断面組織を示す。いずれの試料にも割れなどの欠陥は観察されず、良好な接合状態が得られている。写真2に、厚さ8.0mmのA0焼結体を用いた場合のマクロ組織を示す。写真に見られるように、A0とA4の接合端部から生じた亀裂がA0部に向かって進行した割れが観察される。この亀裂発生は、A0焼結体の厚さ増加により熱膨張係数の違いによる熱応力の影響が大きくなったことが原因であると推測される。A0部の厚さが小さい場合には、A0自体にある程度の塑性変形能があり、これにより応力を緩和できるが、A0が厚くなると、この変形がほとんど起こらないため界面に高い応力が残留したものと考えられる。

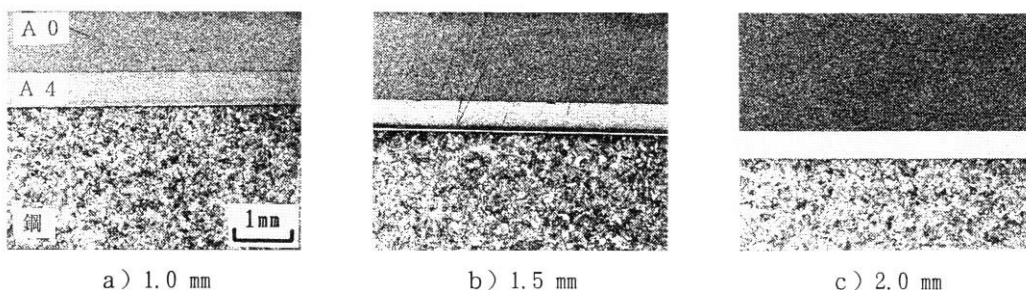


写真1 接合体のマクロ断面・その1

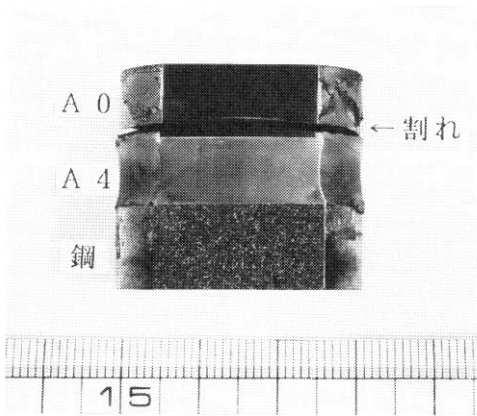


写真2 接合体のマクロ断面・その2

以上のことから、A0焼結体を8.0mmまで厚くした場合、鋼との間にA4を介在させるだけでは熱応力を緩和しきれないと判断された。そこで、A2を一層追加することを試みた。これは、図3に示すように、予め積層方法(a)によりA0/A2の複合体を作製し、これを用いて(b)の積層方法にて焼結接合する手法である。ここで、A0/A2複合体は、A0とA2との間にろう材の代わりにA2粉末を少量介在させ、接合温度1573K、保持時間3.6ks、加圧力1.5MPaの条件で焼結接合したものである。この結果、写真3に示すような割れのない四層接合体が得られた。以上のようにA0部の厚さを大きくした場合、A2のように中間的な層を段階的に増加させることで応力緩和が図られ、この接合方法の有効性が確認された。

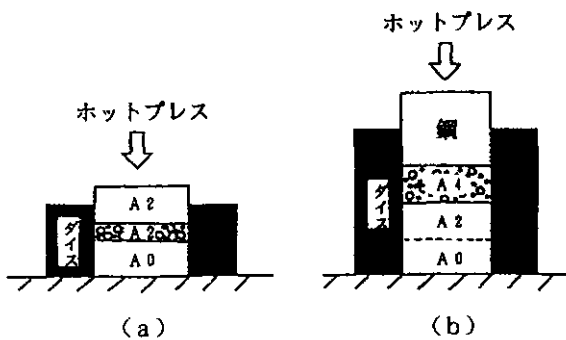


図3 四層積層方法

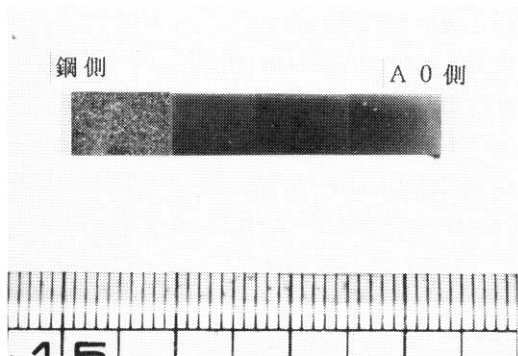
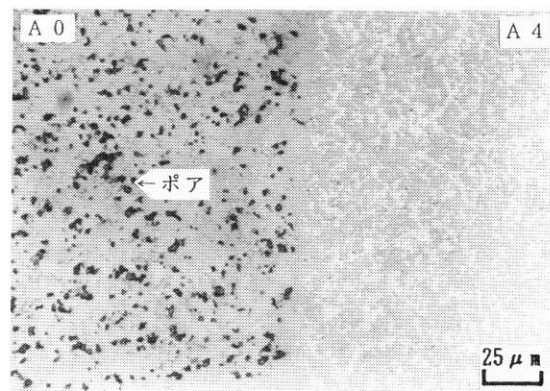


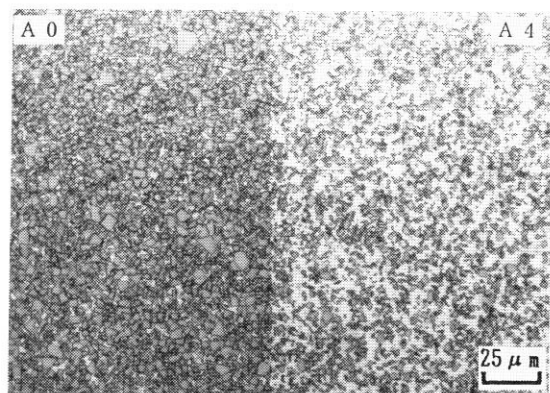
写真3 四層接合体のマクロ組織

### 3.2 接合部の組織

写真4(a),(b)に加熱温度1523K、保持時間3.6ksで焼結接合した接合体のA0/A4界面近傍の断面組織を示す。(a)はA0、A4ともに粉末を用いた場合で、(b)はA0部に焼結体を用いた場合である(図1参照)。写真4(a)のA0部分には黒い斑点状に観察されるポアが存在する。このポアは、超合金の機械的性質を低下させるため組織中に存在することは望ましくない。ポアを生じた原因として、加熱温度が低かったことが考えられるが、本焼結温度1523Kより高温にすると鋼が溶融する恐れがある。したがって本加熱温度より高温にはできず、A0部に粉末を用いる限りポアの発生は避けられないと考えられる。一方、A0よりも結合相の多いA4部は、ほぼ焼結がなされており、ポアは観察されなかった。写真4(b)に示したA0部に焼結体を用いたものは、A0部が最適焼結条件での焼結体を用いているためポアはなく、A0/A4界面はマトリックスが完全に結合した良好な組織を呈している。以上の結果より、以後の接合体は、あらかじめ焼結したA0を用いて作製した。



a) A0に粉末を使用



b) A0に焼結体を使用

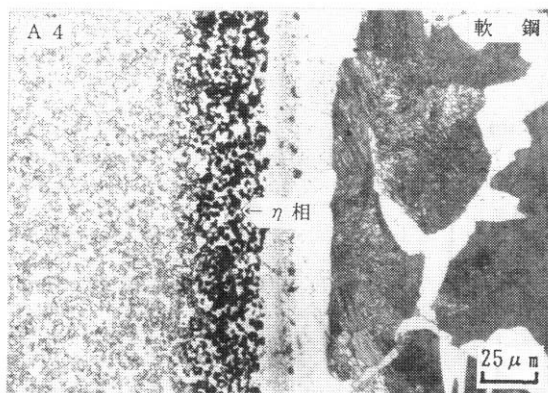
写真4 A0/A4界面近傍の断面組織

写真5(a),(b)に、A4/鋼界面近傍の断面組織を示す。(a)は鋼側に軟鋼を用いた場合、(b)は工具鋼を用いた場合である。(a)の界面近傍のA4側にはη相(Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C)と思われる黒い帯

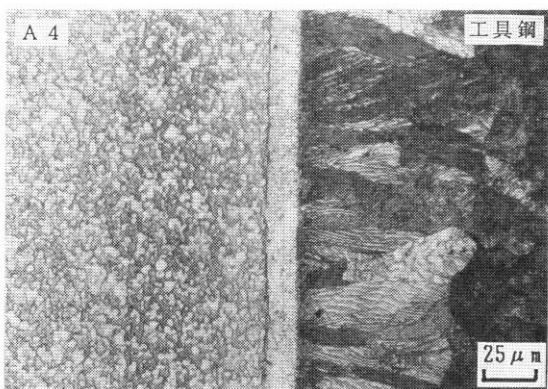


状の組織が存在している。 $\eta$  相は、脆弱で機械的性質に悪影響を及ぼす恐れがあるため、接合体中に存在することは望ましくない。本実験での  $\eta$  相は、A4 側から軟鋼側へ C が拡散し、A4 部の C が部分的に低濃度となったために生じたものである。また、軟鋼側のパーライトは粗大化しており、このことから C の拡散が裏付けられる。一方、(b)の A4/ 工具鋼においては、 $\eta$  相が見られず、良好な組織が得られている。また、界面には白色の反応層が形成されている。写真 6 に A4/ 工具鋼界面近傍における主要元素の分布状態を示す。反応層は、A4 からの Co と鋼からの Fe とが相互拡散して形成された層であり、強固な接合状態にあることがわかる。Co-Fe 系状態図から判断すると<sup>4)</sup>、この反応層は  $\alpha$  相であると推測された。工具鋼を用いた接合体において、 $\eta$  相は観察されなかったが、これは C 濃度の比較的高い工具鋼を用いたことで、超硬合金側から鋼側への C の拡散が抑制されたためと考えられる。

以上のことから、焼結接合では、A0 部に焼結体を用いることによりポアがなくなり、工具鋼を用いることで  $\eta$  相の形成が抑制された。また、各界面は元素の拡散により完全な結合相となり、組織的にほぼ満足できる接合体が得られた。



(a) 軟鋼を用いた場合



(b) 工具鋼を用いた場合

写真 5 A4/鋼界面近傍の断面組織

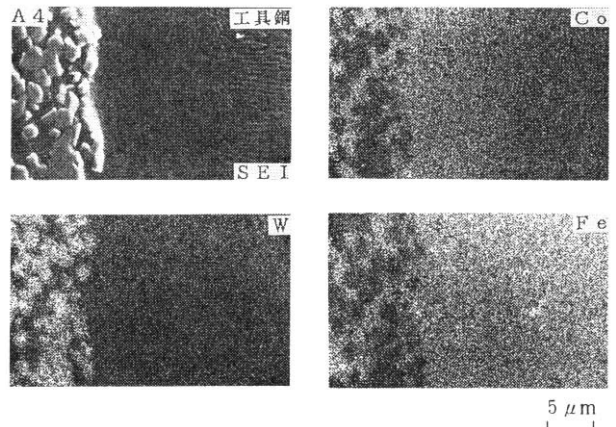


写真 6 主要元素の分布状態

### 3.3 抗折試験結果

A4 部の厚さを約 0.5mm に統一し、A0 部の厚さを変化した場合の抗折試験結果を図 4 に示す。試験はいずれも接合面に対して垂直方向 (図 2 参照) に負荷する方法で行った。軟鋼を用いた接合体では A0 部を厚くするにつれて抗折力が向上し、工具鋼を用いた接合体では抗折力が低下する傾向を示した。

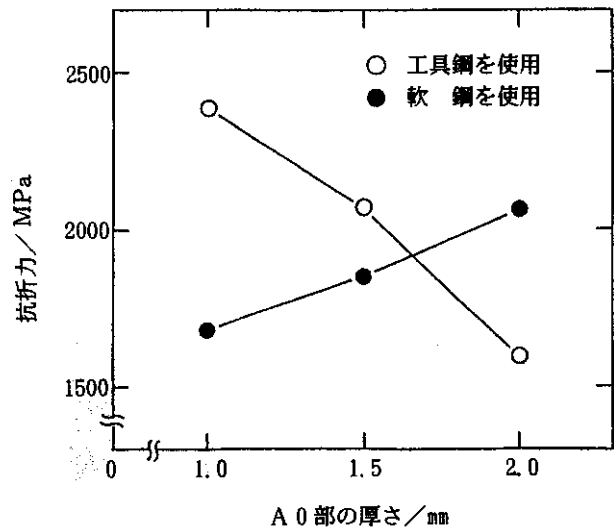
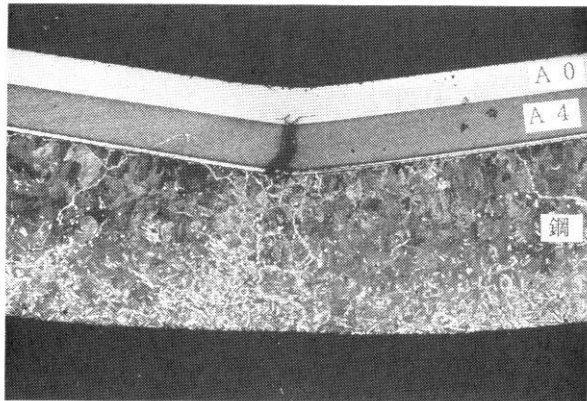


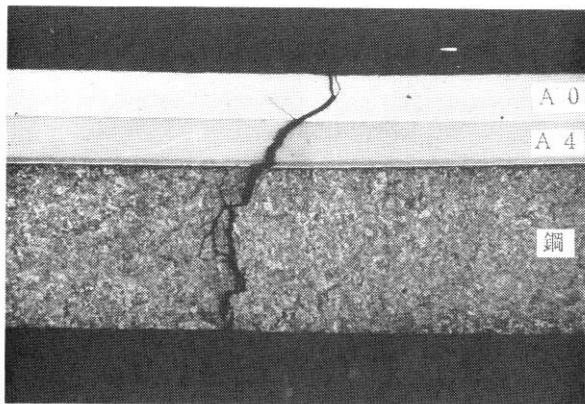
図 4 A0部の厚さの違いによる抗折力

試験後の接合体断面を観察すると、軟鋼を用いたものは写真 7(a) に示すように、A0、A4 の両超硬合金に亀裂が生じているが、軟鋼には亀裂が生じず、塑性変形しているのみである。一方、工具鋼を用いた接合体では、写真 7(b) に示すように、超硬合金、工具鋼の全てが破断している。写真 8 に前者の断面組織を示す。本試料は亀裂の状態を観察するためエッチングを行っていないが、明らかに  $\eta$  相が存在すると思われる部分に微細な亀裂が生じている。このことから、 $\eta$  相が脆弱であることが裏付けられる。写真 9 は、後者の破面を SEM 観察したものである。工具鋼の結晶粒が著しく粗大化しているのが

認められる。



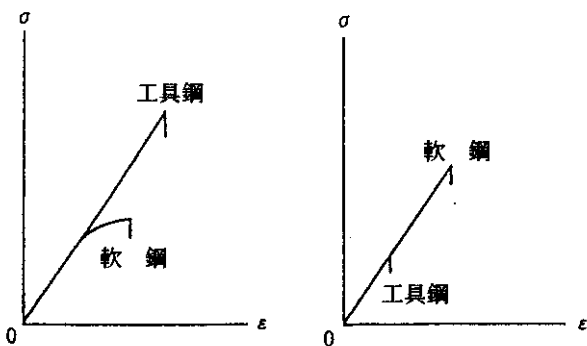
(a) A0/A4/軟鋼



(b) A0/A4/工具鋼

写真7 抗折試験後のマクロ断面

図5に本実験における代表的な接合体の応力-歪曲線を示す。A0厚さが1mmと小さい場合の破断は、接合体の弾性限を過ぎ、塑性域に達してから起こるのに対し、A0厚さが2mmと大きくなると弾性域で破断するのがわかる。



(a) A0部の厚さが小さい (b) A0部の厚さが大きい

図5 抗折試験における応力-歪曲線

以上のことから、A0部の厚さが小さい場合の強度は、鋼部の性状、特に塑性変形のし易さに支配され、弾性限の大きな

工具鋼を用いたものの方が軟鋼を用いたものより強度が高くなったと考えられる。これに対し、A0部の厚さが大きく、試料に占める超硬合金部が多い接合体の場合は、この超硬合金部が強度を支配する。超硬合金は、一度亀裂が生じると急速にこれが進展し、破断に至る性質がある。本試験の場合、亀裂が生じ易いのは試験片の引張側となる鋼部である。したがって、鋼部に亀裂を生じるまでが問題となるため、結晶粒が粗大化し脆化した工具鋼よりも延性な軟鋼の方が有利となり高強度になったと推定される。

A0部を8mmとし、A2、A4(ともに8mm)を介在させ鋼と接合した接合体について抗折試験した結果について述べる。この場合、図2(b)に示したように、試験片は長手方向に組成傾斜させたものを用い、接合面と平行の方向に負荷して抗折試験した。図6に抗折試験後の破断箇所を模式図化したものおよびそのときの抗折力を示す。抗折力は、軟鋼より工具鋼を用いた接合体の方が高い値となった。工具鋼を用いたものでは試験片の中心となるA2/A4界面で破断したのに対し、軟鋼を用いたものではA4/軟鋼の界面で破断が起こった。この結果は、軟鋼を用いたものがA4/軟鋼の界面にη相を生じていたため、この部分の強度が低かった理由による。

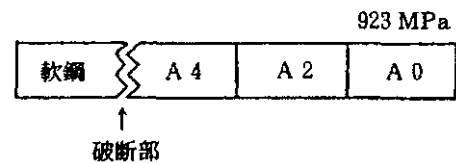
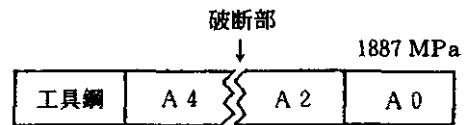


図6 抗折試験後の破断箇所および抗折力

以上に示した各強度の数値が意味するところは定かでないが、超硬合金と鋼との接合体を作製する場合、η相の存在が接合強度の低下を招き、これを形成させない鋼種の選定が重要であることがわかった。

### 3.4 接合体の硬さ分布

図7に、A0/A2/A4/鋼接合体における各層の硬さを示す。当然のことながら、A0部が最も高い値で、Co量の増加とともに硬さが低下している。

図8に、A4/鋼界面近傍における硬さ分布を示す。工具鋼を用いた場合、界面近傍の反応層部分で母材より硬さが低いことが認められる。この結果は、反応層がα相であるとした前述の推察と一致している。この軟質層が界面に形成されるこ



とは、接合を考えた場合、応力緩和の効果が期待でき、望ましいことである。軟鋼を用いた場合は、硬さ分布から軟質層の形成が認められるが、界面近傍の  $\eta$  相に対応した部分で高硬度となっている。

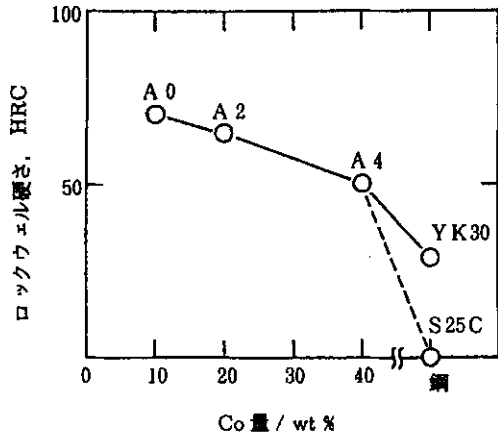


図7 接合体の硬さ変化

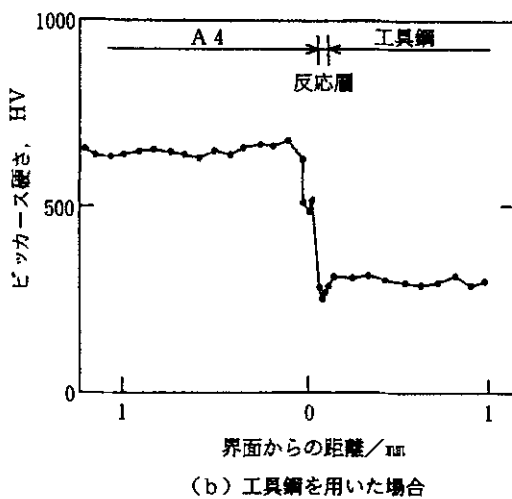
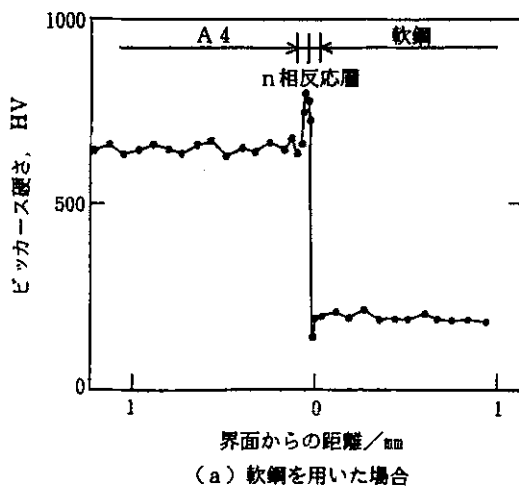


図8 A4/鋼界面近傍の硬さ分布



写真8 破断部近傍の断面組織  
(軟鋼を使用)

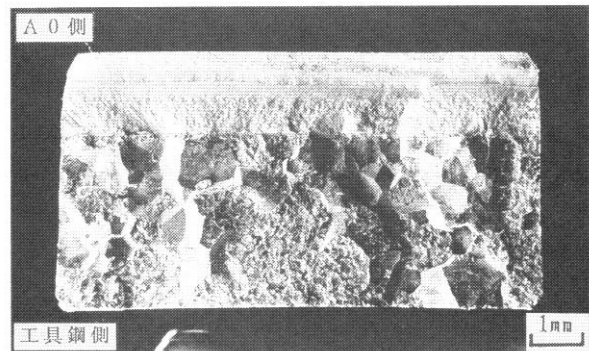


写真9 破断面の組織  
(工具鋼を使用)

#### 4. 結言

焼結接合法により、組成を段階的に傾斜させ相手材を最終的に鋼とした接合体(複合超硬合金)を作製した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 接合体のA0部は、その厚さが比較的小さい場合はA4を介在させるだけで複合化できたが、厚さが大きくなると割れを生じた。この場合、A2の層をさらに一層追加することで割れを防止できた。
- 2) 接合体は、A0部に焼結体を用いることでポアがなくなり、さらに工具鋼を用いることで  $\eta$  相の形成を抑制することができた。各界面は、元素の拡散により完全な結合相となり、組織的に満足される接合体が作製できた。
- 3) 接合体の強度は、 $\eta$  相形成の有無により影響を受けた。

以上のように、A0焼結体の適用、適正な鋼種の選定、などにより、ほぼ満足される接合体を作製することができた。今後、掘削工具部品、農業機械部品、各種機械部品などを始めとした多くの耐食、耐摩耗部品に本複合超硬合金の適用が期

待される。

#### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、種々の実験に協力して頂いた当時北海道工業大学学生 菊地博己君、村上智英君、平林 真君に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 鈴木壽：超硬合金と焼結硬質材料基礎と応用，丸善株式会社，(1986)，1．
- 2) 中島義行，江崎宏樹，飛岡正明：日本金属学会誌，51 (1987)，228．
- 3) 高治男，平山和夫，山本直樹：実用セラミックス接合とハイテクラウ付，産業技術サービスセンター，(1987)，259．
- 4) 日本金属学会編：金属データブック，(1974)，431．