難削材切削時の凝着機構に関する基礎的研究 (第1報)*

—各種 Ti 合金と超硬工具との凝着性評価方法の提案—

篠崎 賢二** 生田 明彦*** 増田 秀基*** 山根 八洲男**
黒木 英憲** 有年 雅敏† 深谷 保博††

Fundamental Study on Adhesion Mechanism of Difficult-to-Machine Materials during Cutting (1st Report)
- Estimation on Properties of Adhering Titanium Alloys to Cemented Carbide Tool -

Kenji SHINOZAKI, Akihiko IKUTA, Hideki MASUDA, Yasuo YAMANE,
Hidenori KUROKI, Masatoshi ARITOSHI and Yasuhiro FUKAYA

In this study, both a short-time cutting and a friction welding tests were carried out to evaluate the properties of adhesion quantitatively between the titanium alloys such as Ti, Ti-6Al-4V, β C-Ti and the cemented carbide tool, K10. The bonding phenomenon in the friction welding was very similar to the adhesion phenomenon in cutting from the metallurgical point of view. β C-Ti alloy was easy to adhere on the tool comparing with Ti and Ti-6Al-4V alloys. Moreover, the reaction layer in which titanium and carbon were enrich, was observed at the interfaces between the alloys and the tool in the friction weld joint even if the friction time was only 0.4s. The morphologies of reaction layers were different among the alloys. It was concluded that the properties of adhesion depend on the reaction at the interface between titanium alloys and tools, and the morphology of the reaction layers. Furthermore, the adhesion phenomenon in cutting may be reproduced using the friction welding.

Key words: titanium alloys, cemented carbide, adhesion, friction welding, reaction products, difficult-to-machine materials

1. 緒言

従来から、切削時の工具と被削材との凝着による工具寿命の低下が問題となっている。その対策として、個々の被削材と工具の組合せにおいてのみ、工具寿命低下の原因が凝着に起因していることを明らかにし、その工具摩耗低減のための切削条件を求めているのが現状である。しかし、切削時の凝着に起因する工具寿命低下の改善には、凝着機構を明らかにすることが重要と考えられる。

これまでの切削時における凝着に関する研究を通覧すると、著しい工具寿命の低下が凝着に起因していることを明らかにした報告¹⁾²⁾、工具の初期表面粗さが凝着におよぼす影響を検討した報告³⁾や、工具上の凝着物を微視的に観察し、元素分析を行うことにより付着状況を明らかにした報告⁴⁾、さらには、工具表面の凝着面積率と凝着物の生成自由エネルギーの関係を求めた報告⁵⁾などがある。これらの報告で共通の問題と考えられる第一点は、切削中の凝着が微小な領域で発生し、多くの因子が重複してかかわっているため、そのモデル化が困難であること、第二点として、凝着を定量的に取り扱う評価方法が確立していないことがあげられる。また、凝着には被削材と工具との化学反応が影響をおよぼすと考えられているが、工具表面の観察および分析結果からの間接的論議が中心で、切削工具と被削材の界面現象を検討した研究は皆無であり、このことが凝着現象を明確化できない一因になっているとも言える。切削中の凝着が両者の界面において被削材と工具の化学反応をとまっている以上、微視的には接合機構が関与していると考えられる。

そこで、本研究では切削時の凝着現象を接合現象の一つとしてとらえ、被削材と工具の界面現象を組織学的に検討し、難削材における凝着機構を解明することを目的とした。

従来の研究より、切削過程における被削材と工具との接合現象は、高応力が負荷され、被削材と工具が相対的に高速ですべりながら、高温になった状態での接合現象と見なせる。固相接合法の一つとして広く使われている摩擦圧接法は、摩擦熱により短時間で接合する方法である。その接合プロセスでは界面に高圧力とすべりを負荷し接合させるため、切削過程での接合現象と極めて類似した接合現象が得られると考えられる。

そこで本報告では、難削材としてTi合金を用い、切削時の再現方法として摩擦圧接を採用し、この摩擦圧接や切削実験後、界面部の観察や元素分析を行うとともに、界面の付着物について定量化し、凝着性の評価を行った。これらより、凝着性の新たな評価方法および切削時の再現方法について提案することを試みた。

2. 供試材料および実験方法

2.1 供試材料

本実験においては、被削材料として、各種Ti合金、工具材料として超硬合金K10種を使用した。Ti合金は、凝着性におよぼす母材組織の影響を調査するため、 α 型の純Ti（以下Ti）、 $\alpha+\beta$ 型のTi-6Al-4V、 β 型のTi-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr（以下 β C Ti）を使用した。これら各Ti合金および超硬合金の化学組成を表1(a)ならびに(b)に示す。

2.2 実験方法

2.2.1 凝着試料作製方法

マシニングセンタを用いた乾式フライス削りを行い、凝着性評価試料および凝着界面の観察用試料を作製した。この時の切削条件を表2に示す。試料は、以下のような手順で作製した。すなわち、凝着性評価試料の場合、ごく初期の凝着状態を評価

* 原稿受付 平成11年6月9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

† 兵庫県立工業技術センター（神戸市須磨区行平町3-1-12）

†† 近畿大学工学部（呉市広古新開5-1-3）

Table 1 Chemical compositions of materials used (mass%)
(a) Titanium alloys

	Al	V	Cr	Mo	Zr	Fe	O	C	H	N	Ti
Ti	-	-	-	-	-	0.005	0.011	-	0.001	-	Bal.
Ti-6Al-4V	6.2	4.18	-	-	-	0.213	0.156	0.005	0.0048	0.0045	Bal.
βC Ti	3.57	7.74	6.05	3.99	4.04	0.09	0.01	0.008	0.001	0.009	Bal.

(b) Cemented carbide tool

	WC	TiC + TaC	Co
K10	92	2	6

Table 2 Cutting conditions

	For observing interface of adhesion	For measuring adhesion area
Way of cutting	Milling	Milling
Cutting fluid	Dry	Dry
Width of work mm	30	10
Cutting speed m/min	105	30, 60, 105, 150
Cutting feed mm/tooth	0.1	0.1
Depth of cut mm	0.5	0.5
Cutting time s	60	-
Number of cutting	-	3

するため、被削材の幅を10mmと短くし、工具すくい面を15μmのダイヤモンドペーストで研磨した超硬工具を用いて、切削速度のみを変化させて3回切削を行った。また、凝着界面観察用の試料の場合、定常的な凝着界面を得るため、幅30mmの被削材について、凝着性評価用試料と同様に研磨した工具を用いて切削速度105m/min、切削時間60sで切削を行った。

2.2.2 凝着性評価方法

EPMA分析の結果、凝着性評価試料においては、工具すくい面および切りくず上に被削材および工具材が付着した痕跡がみられた。そこで、凝着性評価方法は、これらの凝着物の分布状況をSEMの反射電子像で観察し、画像解析ソフトを使用して凝着物の面積を測定した。すくい面および切りくず上の凝着部の面積和を求め、この面積を凝着性評価のパラメータとした。

2.2.3 凝着界面観察方法および元素分析方法

工具に切りくずが付着した状態で、凝着界面のミクロ組織観察および元素分析を行った。ミクロ組織観察の際、用いた腐食液はクロール液（40%ふっ酸：1mL、硝酸：3mL、蒸留水：96mL）で、60s間試料を浸して腐食を行った。界面付近に見られた微小な反応相の元素分析をAESを用いて行った。分析条件は、表面汚染物質除去のため、2kVでArスパッタリング後、加速電圧10kV、ビーム電流10nA、ビーム径50nmとした。

2.2.4 摩擦圧接方法

切削時の被削材と工具の界面現象をより詳細に検討するためのモデル実験として、ブレーキ式の摩擦圧接機を用いて摩擦圧接を行った。試料には接合界面を15μmのダイヤモンドペーストで研磨した各Ti合金（φ8×60mm¹）と超硬合金（φ10×40mm¹）を用いた。各Ti合金を固定側、超硬合金を回転側とし、表3に示す摩擦圧接条件で、アップセットなしで接合を行った。なお、摩擦圧接条件のうち、回転数は摩擦圧接時の摩擦速度が、切りくず流出速度とほぼ対応するように選定した。工具先端にかかる圧力は約1GPaであるとの報告結果⁶⁾を考慮し、試料の破損なしで健全な摩擦圧接継手が得られる最大の圧力を摩擦圧力として選んだ。

Table 3 Conditions of friction welding

Rotational speed rpm	3600
Friction time s	0.02, 0.05, 0.2, 0.4
Friction pressure MPa	300, 500

2.2.5 摩擦圧接界面観察および元素分析方法

摩擦圧接によって得られた試料を用い、試料を圧接界面から破断させ、その破面について、中心部と中心部から半径方向の距離1, 2, 3mmの位置において、破面を観察した。また、EPMA分析により、切削時と同様、工具側および被削材側に被削材および工具材が付着した痕跡がみられた。そこで、ここでも凝着性評価方法は、これらの凝着物の分布状況を観察倍率800倍におけるSEMの反射電子像で観察し、画像解析ソフトを使用して凝着物の面積を測定した。工具側および被削材側の凝着部の面積和を求め、得られた観察像における凝着面積率を凝着性の評価パラメータとした。また、試料を圧接界面に対して垂直に切断し、その切断面を研磨した後、SEMによる組織観察および加速電圧20kV、ビーム電流20nAでEPMA線分析を行った。この時のEPMAによる分析元素はTiおよびCである。

3. 切削時の凝着現象

3.1 切りくずの付着状況

図1は切削速度105m/min、切込み0.5mm、送り0.1mm/toothでTiを切削した場合の工具先端を観察したものである。これより、工具先端には切りくずが付着しており、切りくずと工具が何らかの接合状態にあると考えられる。なお、Ti-6Al-4VやβC Tiを切削した場合についても同様に、工具すくい面に切りくずが付着しており、この界面においてTi合金と工具との間に凝着が起こっている可能性が推察される。

3.2 切りくずと工具の界面

図2は各Ti合金を切削速度105m/minで60s間切削した場合の、切りくずと工具すくい面界面部の組織について示したものである。この結果より、TiおよびTi-6Al-4Vについて、界面は比較的平滑で、反応相も観察されない。これに対し、βC Tiについては界面が平滑でなく、矢印で示したようにβC Ti内部に工具側から分離したと思われるWC粒子が観察される。これは

Fig. 1 Chips of titanium alloys on cutting tool

Fig. 2 Microstructure of adhesion interface between titanium alloys chip and K10 tool (Cutting speed : 105m/min, Depth of cut : 0.5mm, Cutting feed : 0.1mm/tooth)

Fig. 3 AES spectrum of fine particles located on adhesion interface

工具側が切削時の切りくずの付着により剥離し、切りくず内部に巻き込まれたものと考えられる。さらに、界面には約0.01 μ m程度の微細な粒子が多く観察される。この微細な粒子のAESによる点分析結果を図3に示す。AES分析によれば、微細な粒子はTiおよびCが富化しており、切削時に形成された反応相と考えられる。このようにTi合金によって、切りくずと工具の界面組織に違いがみられることがわかる。

3.3 すくい面における被削材の付着状況

3.2項の結果より、切削時に凝着しやすい被削材は、工具にその痕跡が残るはずである。そこで図4は切削後、切りくずと工具を分離させた工具すくい面のSEM観察結果、ならびにEPMA面分析結果を示したものの一例である。これらの結果から、工具すくい面上の反射電子像において黒く観察される領域とEPMAによるTiの分析結果がよく一致している。同様に、切りくずの反射電子像において白く観察される領域とEPMAによるWの分析結果がよく一致している。これより、工具と切りくずは接合されていたと判断できる。さらに、図5は、切りくずと工具を分離させた工具すくい面および切りくずについて、高倍率でのSEM観察結果を示したものである。これらを見ると工具側にはTi合金の付着が観察される。同様に、切りくず側にも超硬合金粒子の付着が観察され、微視的にみても両者が接合されていたことがわかる。このように工具に被削材が接合していた部分を凝着物と見なすと、定性的には、この面積が大きいほど、凝着しやすいと考えることができる。そこで、

Fig. 4 Example of reflective electron image and EPMA area analysis on tool surface in the case of β Cu Ti cutting

Fig. 5 Fractured surface on tool and chip interface in the case of β Cu Ti cutting

Fig. 6 Relation between adhesion area and cutting speed of titanium alloys using K10 tool

この面積を凝着面積と定義し、各Ti合金について測定した結果を図6に示す。この結果から、 β Cu Tiの凝着面積は他のTi合金と比較して、切削速度全域において約2倍の凝着面積となっており、凝着性が非常に高いことがわかる。ここで、 β Cu Tiは同じTi合金でありながら、Ti-6Al-4Vと比較して、工具寿命が1/2～1/10程度であると報告されており¹⁾、この凝着性の高さが β Cu Ti切削時の工具寿命低下に関係していると考えられる。

4. 摩擦圧接時の接合現象

4.1 摩擦圧接界面の破面形態

図7は、摩擦圧接した継手の破面について、マクロ観察結果の一例を示したものである。これによりTi合金側には同心円状の傷が観察される。また、超硬合金側にも同様の傷が観察される。これらから、摩擦圧接界面は切削時の工具すくい面同様、高速ですべりながら接合されていたと考えられる。しかし、摩擦圧接界面には大きな付着物は観察されない。そこで、さらに詳細な観察を行うため、SEMを用いた破面観察を行った。図8は、摩擦時間0.02sで摩擦圧接した各Ti合金の継手について、中心から半径方向に1mmずれた位置で観察した破面

Fig. 7 Microstructure of fractured surface of friction welded joint between titanium alloys and K10

Fig. 8 Microstructure of fractured surface of friction welded joint between titanium alloys and K10

Fig. 9 Relation between area fraction of adhesion and friction speed

である。超硬合金側の破面では、Ti および Ti-6Al-4V の場合、Ti 合金の付着が観察されず、 β C Ti の場合、矢印に示すように Ti 合金の付着が観察される。一方、Ti 合金側の破面では、いずれの合金においても WC 粒子が観察される。これらのことから、摩擦圧接において Ti 合金と超硬合金の圧接界面には凝着が発生しており、図 5 に示した切削実験の際の工具すくい面上に付着した Ti 合金と破面が酷似していることがわかる。

4.2 摩擦圧接界面における接合性評価
前節で観察した超硬合金に付着している Ti 合金部および Ti 合金に付着していた WC 粒子を凝着物とみなし、これらの面積率を測定した。図 9 はその面積率を測定し、凝着面積率によらず摩擦速度の影響を示したものである。なお、摩擦速度は、圧接条件に用いた回転数での円周方向の速度である。ここでも β C Ti の凝着性が他の Ti 合金より高いことがわかる。

5. 凝着機構

5.1 摩擦圧接による凝着現象の再現性

摩擦圧接により、切削時の凝着現象を再現できると考えられたので、摩擦圧接継手の詳細な解析を行い、切削時の凝着機構について考察することにした。

摩擦速度は工具すくい面上にある被削材、すなわち切りくずと工具との相対速度と考えられ、通常の切削速度とは異なる。一般に切りくず流出速度 V_f は切削速度 V と切削比 r_c の積で求められる⁷⁾。切削比を 0.5 と仮定すると、前出の図 6 に示した切削速度は切りくず流出速度では 10 ~ 80 m/min 相当となる。この切りくず流出速度と摩擦速度を比較すると、ほぼ同等の速度範囲において、 β C Ti の凝着面積率が他の Ti 合金より大きくなっている。このことから、摩擦圧接が被削材の凝着性を比較的簡単に知る一つの方法であると言える。

5.2 凝着界面における反応相

図 10 は摩擦圧接界面部の組織の一例として、摩擦時間 0.4s における観察結果を示したものである。これより、Ti においては界面に 0.03 ~ 0.1 μ m 程度の反応相が所々に観察される。さらに、Ti 内部にも圧接時に界面から持ち去られたと考えられる 0.1 ~ 0.5 μ m 程度の反応相が観察される。また、Ti-6Al-4V においても、界面に 0.03 ~ 0.1 μ m 程度の反応相が所々に観察される。一方、 β C Ti においては、界面に 0.04 ~ 0.2 μ m 程度の層状反応相が観察される。また、摩擦時間 0.05s においても、ごくわずかであるが同様の反応相が観察された。これらのことから、接触時間が非常に短時間であっても、反応相が生成されることがわかる。

図 11(a) および (b) は Ti ならびに β C Ti と超硬合金との摩擦圧接界面について、EPMA 線分析結果をそれぞれ示したものである。界面近傍の Ti 側で C 量が少し高くなっており、K10 側から Ti 合金側へ C と W が拡散したと考えられる。さらに、前述したように Ti の反応層厚さが 0.03 ~ 0.1 μ m 程度、 β C Ti の反応層厚さが 0.04 ~ 0.2 μ m 程度あったことを考えると、C がわずかに富化した領域と寸法的によく一致する。このことから、反応相は Ti と C から構成されていると考えられる。同様に (a) において Ti 内部に観察された 0.1 ~ 0.5 μ m 程度の反応相についても、Ti と C のピークが検出されることから、この反応相につ

Fig. 10 Microstructure of bonded interface of titanium alloys/K10 joint

Fig. 11 EPMA line analysis of Ti/K10 and βC Ti/K10 joints

Fig. 12 Relation between thickness of reaction layer of βC Ti/K10 joint and square root of friction time

いてもTiとCから構成されていると考えられる。なお、Ti-6Al-4Vについても同様の分析を行ったが、これらでも同様にTiとCのピークが検出された。よって、各Ti合金は異なっても反応相はTiとCから構成されていると言える。切削時における凝着界面に観察された反応相もTiとCから構成されていたことから、これらの反応相は同一のものであると見なせる。

また、反応性は、凝着性が高いβC Tiでは界面に層状に、凝着性が低いTiでは、界面から離脱してTi内に粒状に観察されたように、両被削材の間では反応相の形態に違いがあったことから、両者では界面強度に大きな差異が生じ、このことが凝着性に影響をおよぼしていると推察される。

5.3 反応相の成長

摩擦圧接は切削時の凝着現象を再現できると考えられた。ここではさらに、界面の反応相の大きさに着目し、その再現性について検討することにした。図12はβC Tiと超硬合金における摩擦圧接界面部での反応層厚さと摩擦時間の平方根の関係を示したものである。この図より、反応層の成長は摩擦時間の平方根に比例しており、反応層成長の速度定数を求めた結果、その値は $0.32 \mu\text{m/s}^{1/2}$ となった。そこで、この値を用いて、切削時においても摩擦圧接界面と同様に反応相が生成し得るか否かを検討した。この時の切削時におけるモデルを図13に示す。前述したように、切りくず流出速度 V_f は切削比を0.5とした場合、切削速度の1/2で表される。また、図13のA点で工具に接触した被削材は工具に接触したままA'点まで移動するとすれば、

Fig. 13 Cutting model

A点からA'点までの距離が凝着幅となる。A点からA'点までの切りくずの接触時間は式(1)で与えられる。

$$t = AA' / V_f \quad (1)$$

t: 接触時間

前述した切削実験において、切削速度105m/minでβC Tiを切削した際の凝着幅の実測値は約400μmであった。よって、これらの実測値および式(1)を用い

て、接触時間を求めると 4.0×10^{-4} sとなる。さらに、求めた速度定数を用いて反応層厚さを計算すると $0.007 \mu\text{m}$ となり、切削時の凝着界面に観察された反応相が約 $0.01 \mu\text{m}$ であったことと寸法的によく一致する。このことより、切削中の凝着界面においても反応相が生成する可能性があると考えられる。

6. 結 言

凝着性の新たな評価方法および切削時の再現方法について提案するため、Ti、Ti-6Al-4VおよびβC Tiと超硬合金K10との切削実験ならびに摩擦圧接を行い、凝着性や界面状態について調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 切削実験において凝着面積を測定した結果、凝着が著しいとされるβC Tiの凝着面積は、TiおよびTi-6Al-4Vの約2倍になることがわかった。
- (2) 切削の再現モデル実験として摩擦圧接を行った結果、摩擦速度22.6～45.2m/minにおいて、βC Tiの凝着性が他のTi合金と比較して高くなっており、切削実験の結果と同様であった。また、摩擦圧接した継手の圧接界面部の破面形態は、切削時の工具すくい面の破面形態に酷似していた。
- (3) βC Tiと超硬工具の切削時における凝着界面では、TiとCから構成されている反応相が生成していることがわかった。一方、摩擦圧接により圧接界面に反応相が観察され、いずれのTi合金においてもTiとCで構成された反応相が0.4s程度のごく短い摩擦時間であっても生成する可能性があり、その形態はTi合金によって異なることがわかった。これらのことより、反応相の形態が凝着性に影響をおよぼすことが推察された。

参 考 文 献

- 1) 臼杵 年，鳴瀧則彦，山根八洲男：Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zrの切削加工，精密工学会誌，**61**，7(1995) 1001
- 2) 小石川勝男：CBN工具の凝着による摩擦過程の解析（第4報），茨城県工業技術センター報告，14(1986) 21
- 3) 竹山秀彦，飯島 昇，山本幸広：切削工具の凝着欠損に及ぼす工具表面仕上げの影響—切削工具材の表面工学的解析と欠損防止に関する研究（第1報）—，精密工学会誌，**52**，2(1986) 279
- 4) 飯島 昇，竹山秀彦，山本幸広：切削工具の凝着機構の微視的解析と欠損防止法—切削工具材の表面工学的解析と欠損防止に関する研究（第2報）—，精密工学会誌，**52**，8(1986) 1335
- 5) 片山 昌，橋村雅之：快削鋼と工具との切削界面凝着に及ぼす工具材種の影響，精密工学会誌，**59**，12(1993) 1991
- 6) 臼井英治，常川利之，白樫高洋：難削材の切削過程の解析（第2報）—格子線解析と有限差分法による応力分布・温度分布の数値解析—，精密工学会誌，**52**，9(1986) 133
- 7) 鳴瀧則彦，中島利勝：機械加工学，コロナ社，(1979)