

難削材料の平面研削加工における高精度平面の確立 (第2報)

—Ti基合金, Co基合金の適正加工条件とデータベース化—

藤原 和徳・寺澤 章裕・大柴 勝彦

The Establishment of High Precision Surface Grinding for Difficult -to-cut Materials (2nd report)

— The Database of Machining Conditions for Ti and Co-based Superalloy —

Kazunori FUJIHARA, Akihiro TERASAWA and Katsuhiko OSIBA

要 約

近年, 自動車, 航空機および真空機器など高機能化が進むに従い, 耐熱や耐食性の優れた合金などが多く用いられ, 高い精度の加工を要求されてきている状況である。そこで, 本報ではチタン基合金(以下, Ti-6Al-4Vと称す)とコバルト基合金(以下, KOVARと称す)を対象に, 平面研削加工のデータベース化の確立を目標に実施した。

Ti-6Al-4VおよびKOVARをダイヤモンド砥石(SD)とCBN砥石(B)を用いて平面研削加工を行った結果, 荒研削(#170)から中仕上げ研削(#325)における研削動力値(F_z)は, いずれの加工条件においても第1報で実施したニッケル基合金(INCONEL625, HASTELLYC-22)の研削動力値と比較すると, 最大で1/5程度と低い値を示した。

Ti-6Al-4VおよびKOVARをダイヤモンド砥石とCBN砥石で研削加工したときの研削動力値を比較すると, どの加工条件においても多少の変動はあるもののほぼ同様な値を示し, 第1報で研削加工を行ったニッケル基合金に見られるような砥石の違いによる優位性は見られなかった。

また, 研削加工面と研削切り屑および砥石表面の観察結果から, KOVARは切削領域に近い状態で加工が行われているのに対し, Ti-6Al-4Vはすべりを伴った領域で加工が行われていることが推察される。

さらに, ブランジ研削加工とトラバース研削にスパークアウトを加えた加工を比較すると, 後者の表面粗さ値は最大で1/4に減少し良好な研削加工面が得られた。

1. 緒 言

近年, Ti-6Al-4Vは自動車部品をはじめ航空機部品や真空機器部品などに多く用いられ, またKOVARは光通信関連機器部品などを中心に用途が拡大してきている。これらの被削材料は, 耐熱や耐食性を必要とする部分に使用されるとともに精密加工が要求されている。

これらチタン基合金, コバルト基合金, ニッケル基合金さらには鉄基合金などは一般的に難削材料と呼ばれ高融点金属であり熱伝導度は低く, さらには工具との親和性が高いなどの特徴を有し, 加工が難しい材料と言われている¹⁾。

これらの被削材料を用いた切削加工分野では, 加工条件, 工具選択, 工具摩耗や加工表面粗さなど²⁾(独)産業技術総合研究所が中心となり行った難削材料切削加工データベースなどがあるが³⁾, 研削加工の分野においては, Ti-6Al-4Vの加工が一部報告^{4), 5)}されているのみであり, KOVARについての報告はほとんどなく, 各方面において十分な研究がなされていないのが実状である。

そこで, 本研究では平面研削盤を用い難削材料の中でもTi-6Al-4VとKOVARを対象に, 研削加工における加工条件

の確立と加工データベース化の構築を目的に, 研削動力値, 研削加工面の粗さおよび砥粒表面, 研削屑を観察し検討を行った。

2. 実験方法

本研究に用いた被削材料は, 一般に市販されているTi-6Al-4VとKOVARを30×30×15mmにそれぞれ切り出したものを用いた。

表1 使用した砥石の種類

ダイヤモンド砥石	CBN砥石
SD170N100B	B170N100B
SD170N75B	B170N75B
SD170N50B	B170N50B
SD325N100B	B325N100B
SD325N75B	B325N75B
SD325N50B	B325N50B
SD600N100B	B600N100B
SD600N75B	B600N75B
SD600N50B	B600N50B

砥石外径: 200mm, 砥石幅: 10mm

表2 研削加工条件

砥石周速度 (m/sec)	15, 20, 25
テーブル送り速度 (m/min)	10, 15
切込量 (μm) (荒研削)	#170 : 5 (一定)
(中仕上げ研削)	#325 : 3 (一定)
(仕上げ研削)	#600 : 1 (一定)
パス数 (回)	30回
スパークアウト	なし

研削加工実験は、精密平面研削盤（ユング社製JF520型）のテーブル面に研削動力計（キスラー社製 Type9257B）を取り付け、被削材料を同研削動力計に固定しプランジ研削を行った。

表1に使用した砥石を、表2に研削加工条件を示す。評価の方法としては、研削動力値（Fz）の測定、研削加工前後の砥石表面のSEM観察、研削加工後の被削材料の表面粗さ測定およびSEM観察、研削加工層のSEM観察などで評価した。

3. 結果及び考察

3-1 砥石集中度と研削抵抗

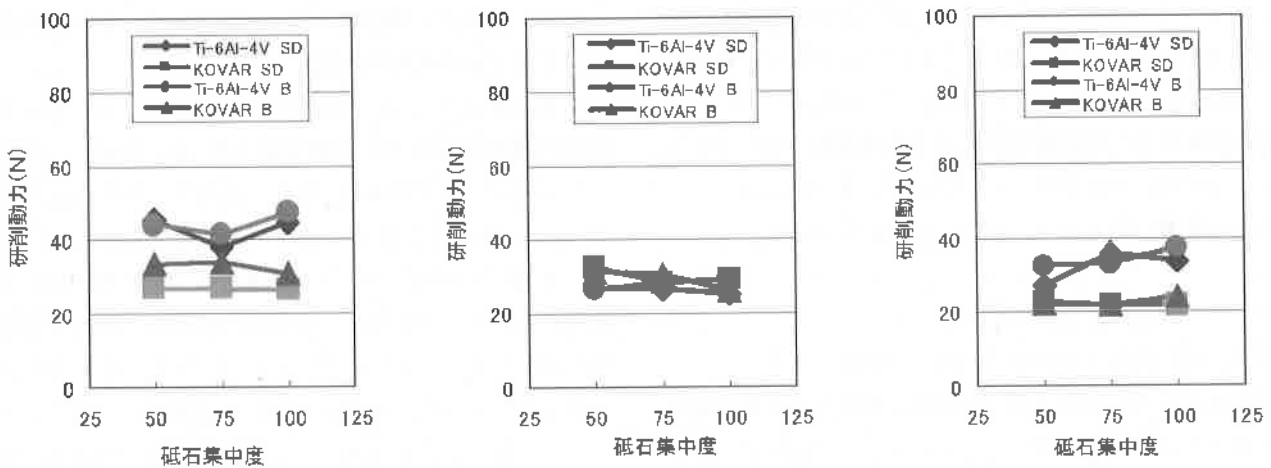
表1に示した砥石を用いて、表2の加工条件で加工したときの研削動力値を測定した結果の代表例を図1および図2に示す。

図1はテーブル送り速度10m/min、砥石周速度20m/sec、図2はテーブル送り速度15m/min、砥石周速度25m/secにおける砥石集中度と研削動力値の関係を示したものである。

Ti-6Al-4Vを研削加工した場合、図1と図2からテーブル送り速度、砥石周速度が低く、また砥石粒度が大きくなると、研削動力値は小さくなる傾向を示した。

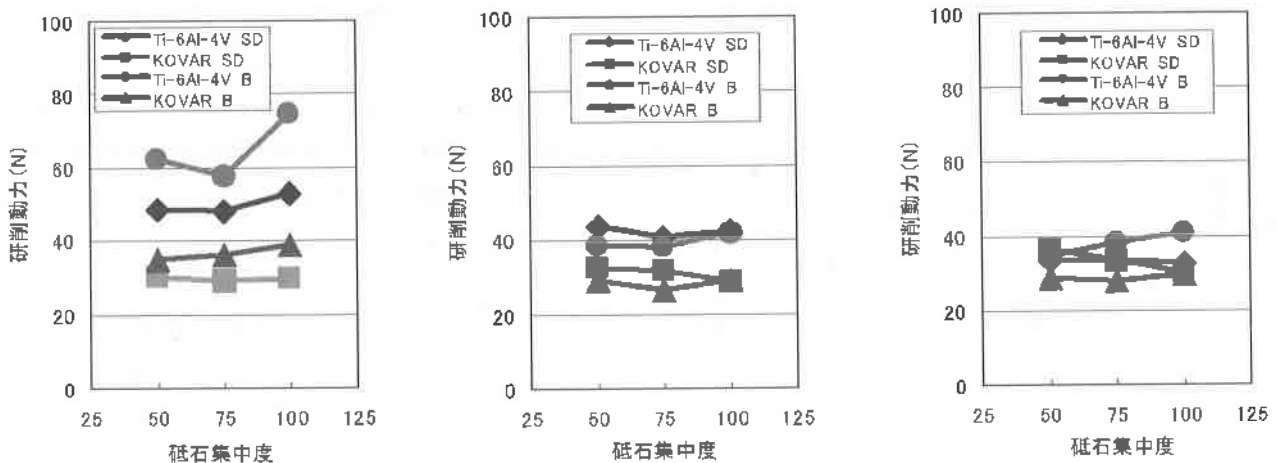
これに対しKOVARは、どの加工条件においてもほぼ一定の研削動力値を示し、Ti-6Al-4Vの研削動力値と比較すると、砥石の種類により多少の違いはあるが最大で約40MPa程度の低い値を示した。

これは、被削材料の機械的強度^{6,7,8,9)}で比較すると、高温強度（500℃）がKOVARは約300MPaに対しTi-6Al-4Vは約560MPaと高いこと、また硬度はKOVARが220HVに対



(a) 砥石粒度：#170 (b) 砥石粒度：#325 (c) 砥石粒度：#600

図1 砥石集中度と研削動力（テーブル送り速度：10m/min、砥石周速度：20m.sec）



(a) 砥石粒度：#170 (b) 砥石粒度：#325 (c) 砥石粒度：#600

図2 砥石集中度と研削動力（テーブル送り速度：15m/min、砥石周速度：25m.sec）

しTi-6Al-4Vは320HVと高く、さらに伸びはKOVARが40%に対しTi-6Al-4Vは約10%と低いことなどが研削動力値を高めている要因と推察される。

さらに、CBN砥石を用いTi-6Al-4Vの荒研削において得られた研削動力値をダイヤモンド砥石と比較すると、テーブル送り速度と砥石周速度が高くなると、ダイヤモンド砥石よりCBN砥石の方が研削動力値は高くなる傾向を示した。

本実験で用いた2種類の被削材料の研削動力値は、第1報で報告したニッケル基合金（INCONEL 625, HASTELLY C-22）と比較すると、同一加工条件において最大で1/5程度と低い値を示した。

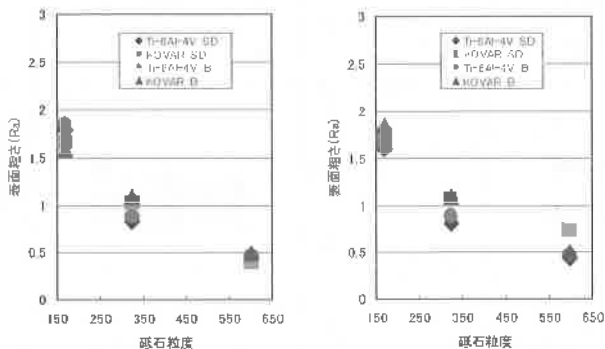
これらの一要因として、研削加工において砥石砥粒と被削材料の研削点近傍の温度は、加工条件により異なるが被削材料の融点に近い温度に達している¹⁰⁾とも言われており、今回用いたTi-6Al-4VおよびKONVARは、ニッケル基合金と比較すると高温強度が低く、また伸びも小さい¹¹⁾ことによるものと推察される。

砥石集中度の違いによる研削動力値の変化は、ダイヤモンド砥石、CBN砥石とも集中度の異なる砥石を用いて研削加工を行ったところ、図2(a)に示すようにTi-6Al-4Vを研削加工すると、多少バラツキはあるものの砥石集中度が高くなると研削動力値も高くなる傾向を示した。しかし、その他の加工条件においては砥石集中度の違いによる顕著な影響は見られず、ほぼ一定の値を示した。

3-2 砥石粒度と表面粗さ

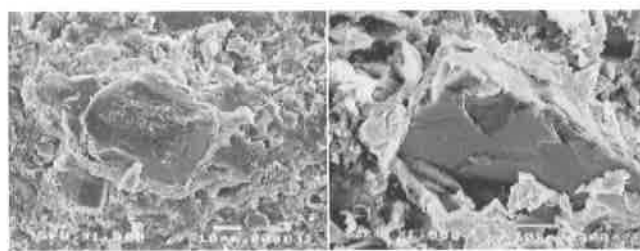
図3に砥石粒度と表面粗さ(Ra)の関係を示す。

研削加工後の表面粗さは、研削加工条件および被削材料に関係なくほぼ同様な傾向を示し、砥石粒度170番で約1.5~1.8 μm 、325番で約0.8~1.2 μm 、600番で約0.3~0.8 μm 程度であり、被削材料、砥石種類、テーブル送り速度や砥石周速度など加工条件を変化させても、表面粗さ値に一



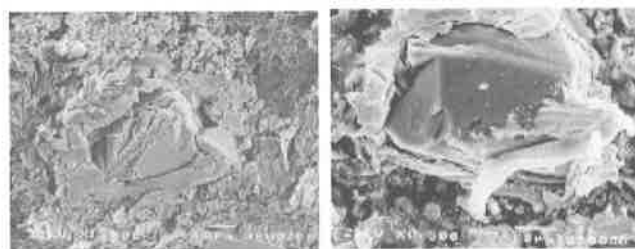
(a) テーブル送り速度：10m/min (b) テーブル送り速度：15m/min
砥石周速度：20m/sec 砥石周速度：25m/sec

図3 砥石粒度と表面粗さ (Ra)



(a) 加工前 (b) 加工後

図4 研削加工前後の砥石表面 (SD325-75)



(a) 加工前 (b) 加工後

図5 研削加工前後の砥石表面 (B325-75)

定した傾向は認められなかった。

3-3 砥石の表面観察

使用した砥石の研削加工前と研削加工後における砥石表面SEM写真の代表例を図4と図5に示す。

図4はダイヤモンド砥石で、砥石粒度325番、砥石集中度75の研削加工前(a)と研削加工後(b)を示し、図5はCBN砥石で、砥石粒度325番、砥石集中度75を研削加工前(a)と研削加工後(b)を示したものである。

第1報¹⁾で報告したニッケル基合金の加工後の砥石表面観察において、ダイヤモンド砥石は切れ刃が存在し良好な砥石表面であったが、CBN砥石は、砥粒の先端が摩耗し平坦となっていた。本実験に用いた被削材料の場合、ダイヤモンド砥石、CBN砥石とも研削加工前と研削加工後には大きな変化は見られず、研削加工後においても微細な切れ刃が存在していることが確認できる。このことから、ニッケル基合金の研削加工と比較し研削動力値が小さくなっている要因の一つと考えられる。

また、両砥石とも研削加工前の砥粒周辺にはドレッシングに使用したWAスティック砥石の付着が見られるが、研削加工後には被削材料の付着が見られ、工具である砥粒との親和性が高いことが推察される。

3-4 被削材料面および切り屑のSEM観察結果

研削加工後の研削加工表面のSEM観察結果を図6に示す。図6はKOVARとTi-6Al-4Vを砥石粒度325番、砥石集中度75のダイヤモンドおよびCBN砥石を用いて、砥石周速度：20m/sec、テーブル送り速度：10m/minで加工した例である。

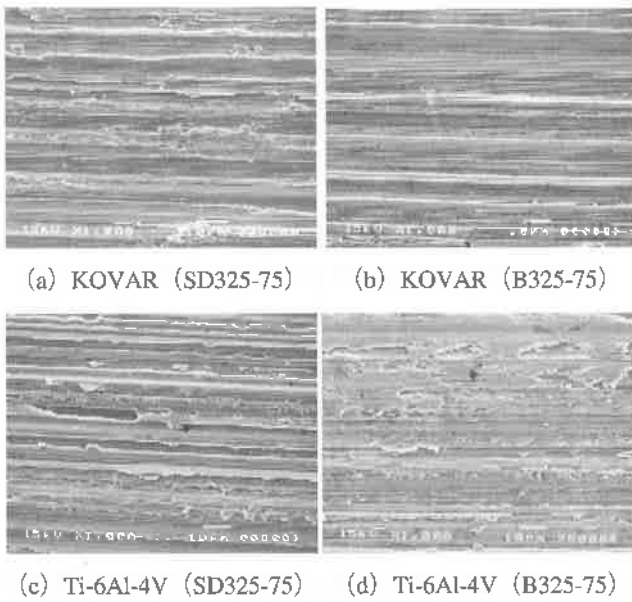


図6 研削加工後のSEM観察結果

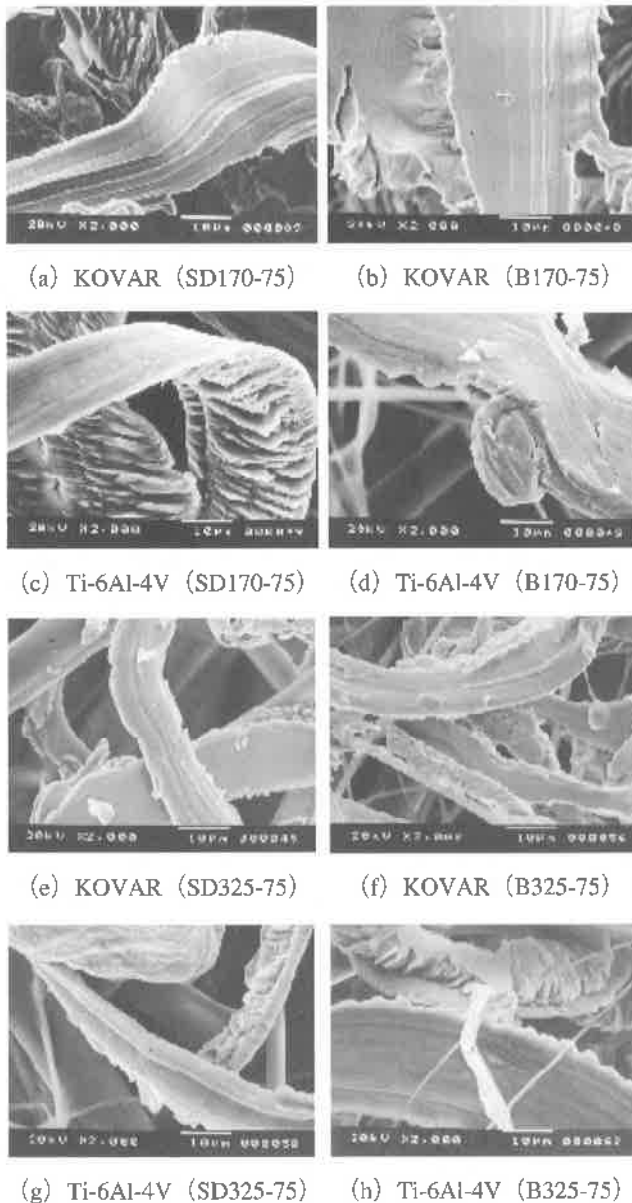


図7 研削加工層のSEM観察結果

図6 (a) は、KOVARをダイヤモンド砥石で研削加工したときの観察結果であるが、研削加工面にはプラウイング条痕¹¹⁾が目立ち面の性状を悪化させていたが、図6 (b) に示すCBN砥石で研削加工した面は、プラウイング状痕は減少し良好な研削加工面が確認できる。

Ti-6Al-4Vをダイヤモンド砥石において研削加工した面を(c)に示す。研削加工面には(a)のKOVARを研削加工したときと同様なプラウイング条痕が見られ、研削加工面の性状を悪化させている。また、CBN砥石で加工した研削加工面(d)は、プラウイング条痕に加え、砥粒によりむしり取られたような状痕が見られることから、加工形態としては、すべりを伴った領域¹²⁾で加工されていると推察され、図1 (b)に示す研削動力値が高くなる要因の一つとも考えられる。

また、研削加工時に排出される研削層を採取し、SEM観察した結果を図7に示す。図中(a)～(d)は砥石粒度170番の砥石で研削加工したときの切屑を示し、(e)～(h)は砥石粒度325番で研削加工したときに排出された切屑の状態を示す。なお、加工条件としては、砥石集中度：75、砥石周速度：20m/sec、テーブル送り速度：10m/minとした。

図中(a)および(b)はKOVARをダイヤモンドおよびCBN砥石で研削加工時に排出された研削層の拡大写真を示すが、両者とも砥粒切れ刃が接触する側の面はきれいな流れ型切削痕¹³⁾を呈していることが確認できる。また、(c)のTi-6Al-4Vをダイヤモンド砥石で研削した場合も同様にきれいな流れ型切削条痕が見られるが、(d)のTi-6Al-4VをCBN砥石で研削したときの研削層は、砥粒切れ刃が接触した側の面には、材料が破断している箇所も見られ、(a)、(b)、(c)のようにきれいな流れ型切削条痕とは異なり、図6 (d)の研削加工面の性状と類似しており、すべりを伴った領域で加工が行われていることが研削層から推測できる。

さらに、図8はTi-6Al-4VをCBN砥石、砥石粒度325番で研削加工した後の砥石表面を観察した結果であるが、砥石表面には被削材料が付着しており、その表面には微細な球状の凹凸が明確に確認できることから、すべりを伴った領域で加工が行われていることが推察でき、研削層の観察結果と良い一致をした。



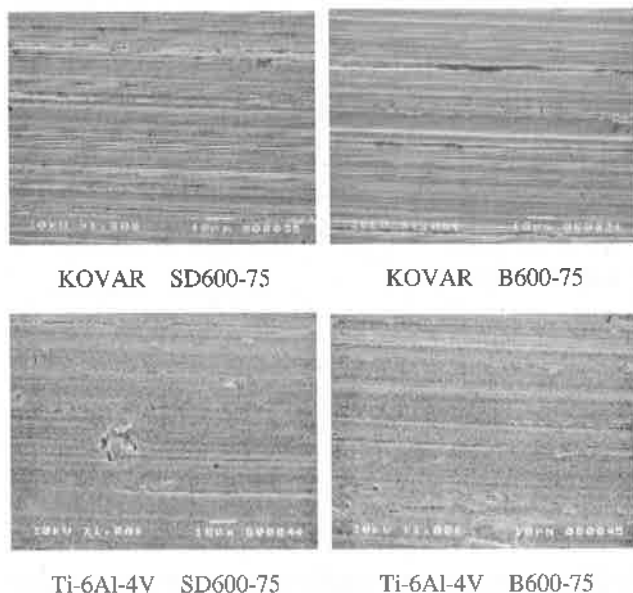
図8 Ti-6Al-4V研削加工後の砥石表面観察結果

3-5 トラバース研削における加工結果

これまでの加工実験の結果を基に実作業に用いられるトラバース研削加工を試みた結果を以下に示す。

加工条件として、砥石周速度：20m/sec，トラバース速度：10m/min，砥石切込量：表2と同様，研削除去数：30回，スパークアウト回数：10回で実施した。

図9に研削加工後の研削加工面の観察結果を示す。



KOVAR SD600-75

KOVAR B600-75

Ti-6Al-4V SD600-75

Ti-6Al-4V B600-75

図9 トラバース研削における研削加工面の観察結果

砥石粒度325番では，多少のプラウイング状痕が認められたが，砥石粒度600番では，図9からも明確なように，研削加工面にはプラウイング状痕が認められなくなり，良好な研削加工面となっていることが確認できる。

また，表面粗さ値をプランジ研削とトラバース研削で比較した結果を表3に示す。

表3 研削方法の違いによる表面粗さ (Ra) の比較

	Ti-6Al-4V		KOVAR	
	SD#170	SD#325	B#170	B#325
SD#170	1.79	0.79	1.66	0.81
SD#325	0.83	0.35	1.02	0.42
SD#600	0.47	0.24	0.39	0.09
B#170	1.85	0.64	1.58	0.76
B#325	0.88	0.38	1.09	0.43
B#600	0.47	0.26	0.49	0.13

(中抜き文字がトラバース研削加工)

トラバース研削加工を行うことにより，Ti-6Al-4VおよびKOVARとも表面粗さの値はプランジ研削加工と比較し1/2以下に減少していることが確認できる。

これは30回の研削除去後に行ったスパークアウトによる微細なプラウイング状痕などが除去されたものと推察される。このことから，研削加工後のスパークアウトは加工面を向上させるためには重要な工程であることが分かる。

4. 結 言

難削材料の中でもチタン基合金 (Ti-6Al-4V) およびコバルト基合金 (KOVAR) の研削加工のデータベース化の構築を目標として実施した結果，次のことが明らかとなった。

- (1) KOVARとTi-6Al-4Vの研削動力値を比較すると，砥石種類，砥石集中度，砥石周速度やその他加工条件に関係なく，Ti-6Al-4Vの方が大きくなる傾向を示した。
- (2) 研削加工後の表面粗さは，各加工条件別に比較すると加工条件による明確な差は認められなかった。
- (3) ダイヤモンド砥石，CBN砥石表面において，研削加工後でも砥粒の切れ刃の確認ができ，第1報のような顕著な砥粒摩耗は確認できなかった。
- (4) ダイヤモンド砥石を用いて研削加工した後の研削加工表面は，両被削材料ともプラウイング状痕が明確に確認できたが，CBN砥石を用いたKOVARの研削加工は，良好な研削表面であったのに対し，Ti-6Al-4Vの研削加工では，すべりを伴った領域で加工されていることが推察される。
- (5) プランジ研削とトラバース研削加工を比較すると，トラバース研削では研削加工面にプラウイング状痕が減少するとともに，表面粗さの値も1/2以下に減少することが確認できた。

参考文献

- 1) 藤原和徳，西村通喜，大柴勝彦：山梨県工業技術センター研究報告，No.18 (2004)
- 2) 狩野勝吉，難削材・新素材の切削加工ハンドブック，工業調査会
- 3) (独) 産業技術総合研究所：難削材切削加工データベース
- 4) 田中善衛，小関隆博，金田亮，菅野幹男：チタン合金の鏡面研削加工，砥粒加工学会誌，46，6 (2002) 45.
- 5) 岡田芳雄，竹保義博：Ti-6Al-4Vの平面研削加工実験，広島県東部工業技術センター
- 6) 三菱マテリアル技術データ
- 7) 相山正孝：非鉄金属材料，コロナ社 (1963) 245.
- 8) 神戸精鋼技術データ
- 9) 日立金属技術データ
- 10) (財) 機械振興協会技術研究所加工データファイル研削研磨加工基礎編
- 11) 横川和彦，横川宗彦：CBNホイール研削加工技術，工業調査会 (1988) 45～.