

昭和41年5月23日 第3種郵便物認可
2013年12月15日発行・毎月1回15日発行

〔第58巻〕
〔第12号〕

ISSN 0915-1168
CODEN : TORAEO

トライボロジスト

JOURNAL OF JAPANESE SOCIETY OF TRIBOLOGISTS

Vol.58 / No.12 / 2013

一般社団法人 日本トライボロジー学会

特集・宇宙用機器・航空機の
トライボロジー

SPECIAL ISSUE ON TRIBOLOGY FOR
SPACE APPARATUSES AND AIRPLANES



トライボロジスト

Journal of Japanese Society of Tribologists

VOL.58 NO.12 2013

連載・トライボロジーを語る

トライボロジーも何かの縁? 竹市嘉紀 853

特集・宇宙用機器・航空機のトライボロジー

「宇宙用機器・航空機のトライボロジー」特集号発刊によせて 吉田潤平 854

解説 人工衛星用機械要素のトライボロジーに関する最近の研究動向 間庭和聡・野木 高 855

ロケットエンジン用軸受・シールの最近の研究動向 高田仁志 861

イオン液体の宇宙用潤滑剤への適用研究 羽山 誠 868

大型航空エンジンのトライボロジー 落合宏行 874

小型ビジネスジェット用ターボファンエンジンのトライボロジー 伊藤直紀・松本謙司 882

次世代航空機における難削金属素材の加工技術とトライボロジー 関本昌利 888

入門講座・トライボロジー教室

硬質膜の破壊じん性の基礎 堀川教世 894

随筆・トライボ草子

僕の履歴書 笠井春雄 898

トライボロジー・ナウ・トライボロジー海外体験記—アラウンド・ザ・ワールド—

ETH Zurich, Laboratory for Surface Science and Technology に滞在して 平山朋子 902

会のページ

第44回トライボロジー入門講座に参加して 上田真央 906

本会記事 907

次号予告, 特集号企画主旨, コーヒーブレイク 908

第58巻総目次

次世代航空機における難削金属素材の加工技術とトライボロジー

関本昌利*

Processing Technology and Tribology of Difficult-to-Cut Metal Materials for Next-Generation Airplanes

Masatoshi SEKIMOTO*

Key Words : tribology, difficult-to-cut, high pressure coolant, rotary cutting, mill turning, wear, chip

1. はじめに

わが国の新型航空機への生産協力状況は、米国航空機メーカーを代表に例をとっても機体・エンジンともに比率としては大きい¹⁾(図1, 2)。

同社によると、2013年7月時点で新型機合計では930機が各国より受注されており、うち引渡し終了しているのは、2004年の受注分56機を少し越えた約7%の66機にすぎない。

新型機の製造に必要とされる、新技術要求に対して、協力を求められるわが国としては、受注残に対する効率的生産にかかわる責任は重いと言える。

さらに、米国・欧州の航空機メーカー両社を中心に展開される次世代航空機には、燃費向上を目

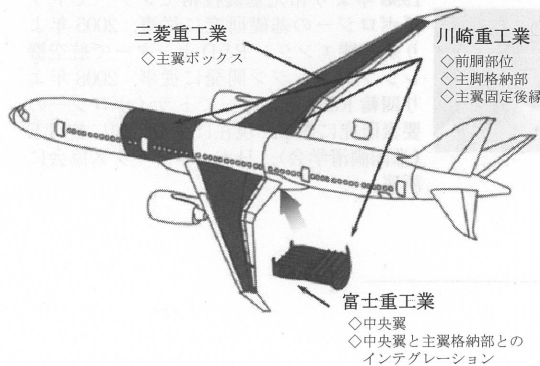


図1 米国航空機メーカーの機体における国内企業生産協力状況 [出典：文献1)]

TRENT1000 (Rolls Royce)



Image source: Rolls Royce

(日本参加企業と担当部位)

- ◇川崎重工業 中圧圧縮機モジュール
- ◇三菱重工業 燃焼器モジュール、低圧タービンブレード

GENx (General Electric)

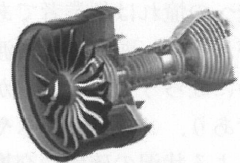


Image source: General Electric

(日本参加企業と担当部位)

- ◇IHI 低圧タービン、高圧圧縮機部品、低圧タービンシャフト
- ◇三菱重工業 燃焼器ケース

図2 米国航空機メーカーの最新エンジンにおける国内企業生産協力状況 [出典：文献1)]

的として進化した機体形状・構造材軽量化・出力装置の高効率化が取り入れられているが、それには高度な技術・素材の集約と、量産化を意識した加工技術の革新という両輪が回転することが必須である。

その実現に欠かせない機体構造材料としての難削材の概要と加工技術について解説する。

2. 航空機構造材料の変化

現在の航空機は、燃費性能が第一であり、まず機体軽量化が挙げられる。

機体構造材料に中心となりつつある複合材とチタン合金を構成重量比で見た場合、図3に示すように従来の機体と最新鋭の機体では複合材が1%から50%、チタン合金が4%から15%と大幅な

(株)トクピ製作所 営業部 (〒581-0854 大阪府八尾市大竹3-167)
TOKUPI MFG. CO., LTD (3-167, Otake, Yao-shi, Osaka 581-0854)

* Corresponding author : E-mail: tokupi21@yahoo.co.jp

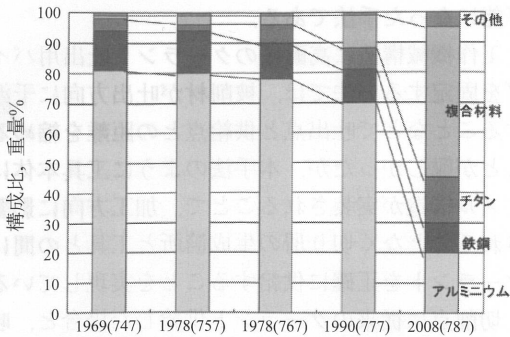


図3 米国航空機メーカーにおける民間旅客機機体構造材料の変遷 [出典：文献2)]

増加を見せている²⁾(複合材とチタンがガルバニック腐食と熱膨張率差においてアルミニウム合金より適合性がある点も、チタン使用割合が増えた理由となる)。

次に、燃費を飛躍的に向上させるのは、効率の良い高性能エンジンの搭載であり、その手段として高温化・高圧力・軽量化が挙げられる。

高温化(タービン入口温度の向上)への対応についてはタービンにニッケル基の超耐熱鋼が使用されること、高圧力の実現には圧縮機のブレードをより薄く三次元形状化していることにも現れており、軽量化については低温部分の金属部品にはチタンが主に使用され、CFRP(Carbon-Fiber-Reinforced Plastic: 炭素繊維強化プラスチック)など複合材も姿を見せている。

ここでは、難削金属素材であるチタン・チタン合金・ニッケル基超耐熱鋼(航空機・宇宙素材に使用される難削材の中でも熱伝導率が低いことが特徴となる)の加工について、幾つか挙げる。

3. 難削金属素材の特徴と加工への影響

3.1 熱伝導率が低いことによる切削工具への影響

難削金属素材は熱伝導率が低く、切削熱が速やかに切り屑に遷移しないため、切り屑による切削加工熱の除去が速やかに行われたい。

超硬工具による切削を一例に挙げると、S45Cでは、発生した熱が工具側と切り屑側に伝わる比率は1対1であるのに対して、チタン合金の場合

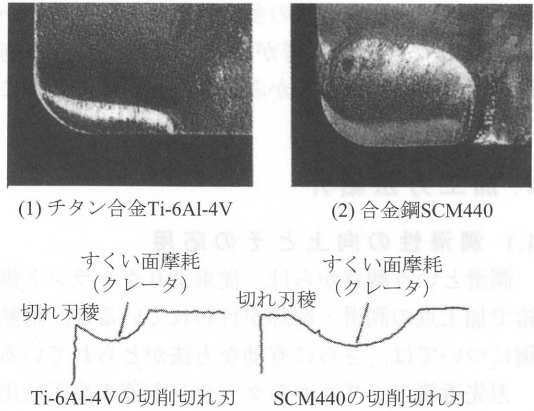


図4 工具摩耗形態 [出典：文献4)]

は4対1と工具側に伝わる比率が非常に高いことが知られている³⁾。

結果、高温に至る切削域が極度に被削材加工面および切れ刃付近に集中し、切れ刃稜近傍にすくい面摩耗を生じやすくなることを図4に示す⁴⁾。熱伝導率が低いことは、切れ刃稜近傍のすくい面摩耗による工具損傷などにつながり、工具寿命が短いことがわかる。

3.2 被削材と工具の大きな親和性

工具材質に超硬を使用しても、切削温度が高温になるため、被削材と工具の化学的反応により、溶着・構成刃先を生じやすく、切削加工面の仕上がりの悪化を招き、加工効率が改善できない。

3.3 著しい加工硬化

高速での加工を行った場合、切削域が瞬時に高温になり、熱伝導性が悪いことから、表面層のみ加工硬化を起し、送り量の確保に高剛性の機械・工具を使用しないと、高硬度な加工硬化層のみを切削することになる。

ステップフィードによる加工を行うとステップのたびに硬化層へ再突入することになり、結果として切削刃摩耗促進が起る。

3.4 高温強度の高い材質における切削温度域での被削性

ニッケル基の超耐熱鋼は雰囲気温度900~1000℃領域でも使用することができることから、その温度領域での加工を超硬工具で行うと摩耗が激しい。

逆に高温域での加工に適したセラミック刃物で

はチップブレイカ形状の多様性をとれないことから処理しやすい切り屑が生成されにくく、被削材・工具への巻付き・かみ込みなどが加工効率に影響を与える。

4. 加工方法紹介

4.1 潤滑性の向上とその応用

潤滑という観点からは、従来よりクーラント供給で加工点の潤滑・冷却が行われているが、耐熱鋼については、さらに有効な方法がとられている。

刃先近傍のノズルからクーラント液の高圧吐出を行うことによるものである⁵⁾(図5, 6)。

従来との相違点は、超耐熱鋼特有の温度上昇の顕著な加工部位に対して、効果的な供給方向と距離を考慮している点であり、工具先端にクーラント吐出ノズルをもつものが出現することにより、

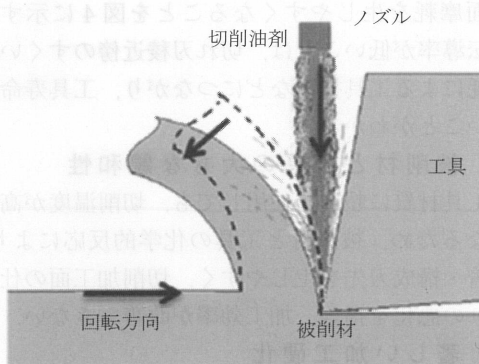


図5 高圧クーラントシステム模式図〔出典：文献5〕

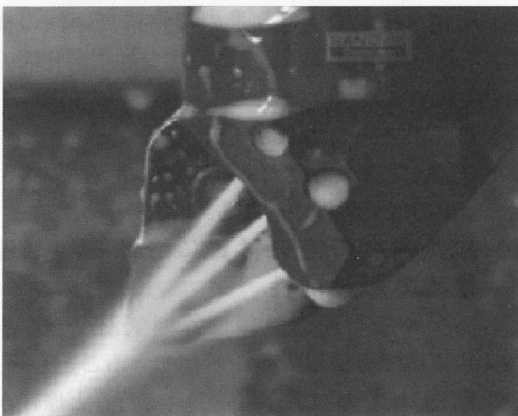


図6 刃先近傍ノズルからクーラント吐出
〔出典：文献5〕

可能になった手法である。

工作機械構造に高耐圧のクーラント吐出用パイプを固定する方法では、被削材が吐出方向に干渉することなどで吐出点と供給点との距離を縮めることが難しかったが、本手法のように工具本体にノズル構造が実装されることで、加工方向に影響されることなく切り屑の生成箇所と工具との間にクーラントを正確に供給することを実現している。

切削点に従来のクーラント供給した場合と、吐出ノズルが刃先に近接した工具で高圧クーラントを供給した場合を図7, 8に示す。従来のクーラント供給に比較して、吐出ノズルが刃先に近接した工具の方が刃先温度が低いことがわかる⁶⁾。

これは、高圧クーラント液の刃先への到達率が高くなることで、加工熱が効果的に除去されていることを表し、熱滞留が軽減され工具寿命の延長に貢献する。

また、高圧クーラントの流速・流量を確保することで、流体そのものがエネルギーとして作用し、切り屑生成へ影響を与えることが知られている。実例としては、吐出圧力の高圧化により、切り屑をすくいあげる効果(ウエッジ効果)が顕著に作用し、図9に現れているように、切り屑の分断が促進される。

前述を応用し、刃先近傍のノズルからクーラント供給を超高圧30~40 MPaで行うことによる

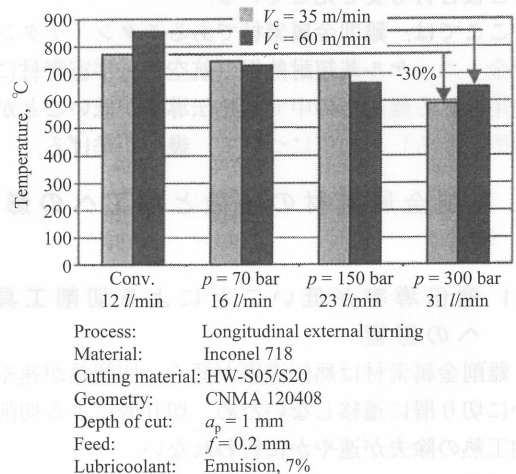


図7 従来方式のクーラント供給(Conv.)と刃先近傍ノズルから高圧クーラント供給した場合の刃先温度の違い
〔出典：文献6〕

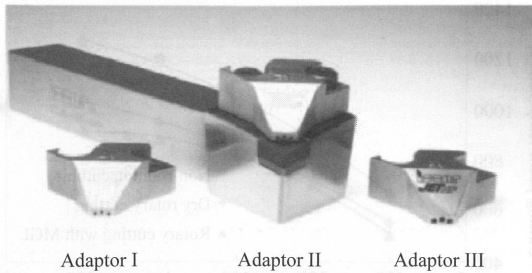


図8 図7で使用された刃先近傍に高圧クーラント供給ノズルを備えた工具ホルダの一例 [出典：文献6)]

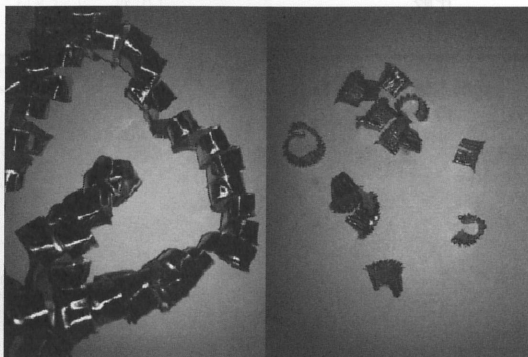


図9 インコネル718旋削加工時の切り屑分断 (左フラッドクーラント, 右13 MPaクーラント)

実験・影響についても実践研究がなされており⁷⁾、切り屑を切削域より速やかに離脱(除去)させることで、切り屑の接触を原因とする工具の摩耗改善、あるいは切削域温度の抑制についての効果が期待されている。

なお、通常の高圧域と言われる7 MPaに比較して、超高圧域でのクーラント供給は吐出流量の大きなポンプが必要との一般論もあるが、同じ流量でも吐出ノズル径を変化させることで超高圧を得ることは可能である(表1)。

4.2 摩擦の軽減とその応用

摩擦という観点から、さらにユニークな方法を紹介する。

超耐熱鋼は熱伝導率が低く、旋削加工においては熱が集中し、工具寿命が短くなる。このために、熱を拡散させる手段が有効である。

そこで、複合加工機の旋削主軸と工具主軸を同時に回転させることで難削材の高エネルギー加工を実現する、駆動型ロータリ切削およびミルターニング

表1 ノズル孔径と圧力別吐出量参考表

噴射孔詳細	吐出圧力					
	7 MPa	10 MPa	15 MPa	20 MPa	25 MPa	30 MPa
孔径φ						
0.3	0.28	0.33	0.41	0.47	0.52	0.57
0.4	0.49	0.59	0.72	0.83	0.93	1.02
0.5	0.77	0.92	1.12	1.29	1.45	1.59
0.6	1.11	1.32	1.62	1.86	2.09	2.29
0.7	1.51	1.80	2.20	2.54	2.84	3.11
0.8	1.97	2.35	2.88	3.31	3.71	4.06
0.9	2.49	2.98	3.64	4.19	4.70	5.14
1.0	3.07	3.68	4.50	5.17	5.80	6.35
1.1	3.72	4.45	5.44	6.26	7.02	7.68
1.2	4.43	5.29	6.48	7.45	8.35	9.14

加工という二つの加工法を紹介する。

4.2.1 駆動型ロータリ切削 駆動型ロータリ切削とは、丸コマ工具を主軸で回転させながら旋削加工を行う手法である⁸⁾(図10)。

工具の回転に伴い切削点が常に移動するため、刃先全周には必ず非切削時間が発生し、冷却時間を与えられることになる。切削熱は冷却部位に分散されるため、工具切削点の急激な温度上昇と熱滞留は抑制される。結果、刃先寿命に良い影響を与え、より高速な切削条件を期待できる。

切削速度を変えて通常切削と駆動型ロータリ切削で逃げ面摩耗を比較した場合を(図11)に示す。切削速度300 m/minから逃げ面摩耗の進行に明らかに差が出ている。このことにより、通常

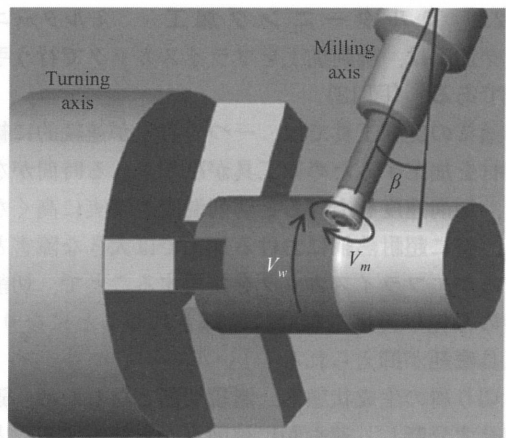


図10 駆動型ロータリ切削イメージ [出典：文献8)]

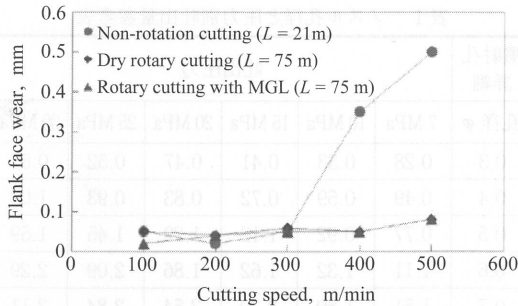


図 11 通常切削とロータリ切削の逃げ面摩耗比較
〔出典：文献 8〕

切削に比較して駆動型ロータリ切削は、工具摩耗が軽減されるため、より高速切削域の加工が可能なることがわかる。

また潤滑においても、通常工具の切削では潤滑剤を被削面に到達させるため、一例として前述のクーラント供給を近傍から高圧で供給するなどの手法を用いなければならない場合があるが、高速回転する刃物に対しては、潤滑剤を非切削点に供給することで、工具回転により同円周上の刃先と切り屑接触界面へ自動的に供給されるため、少量でも効果的に作用する。

駆動型ロータリ切削におけるドライと MQL (Minimum Quantity Lubrication: 極微量油剤潤滑) 供給での切削点温度比較を行った場合を図 12 に示す。切削速度 300 m/min から刃先温度の上昇が緩和され、駆動ロータリ切削において、MQL 供給が高速切削域で温度低減に効果があることがわかる。

4.2.2 ミルターニング加工 ミルターニング加工は、旋削加工をフライスカッタで行う手法である⁹⁾ (図 13)。

通常の旋削工具では、一つの刃先が連続的に被削材を加工するために工具が冷却される時間がなく、切削速度を上げると切削温度が確実に高くなる。特に超耐熱鋼における加工では大きな障害となるが、フライスカッタを使用することで、切削時の刃先以外は空転時に冷却されることになり、工具摩耗が抑えられる。

切り屑の生成状態も、断続切削となるため、連続せず断続し、速やかに被削点から離脱することになる。

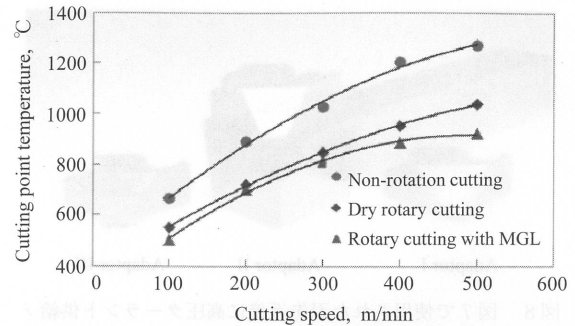


図 12 通常切削とロータリ切削 (MQL) の切削点温度比較
〔出典：文献 8〕

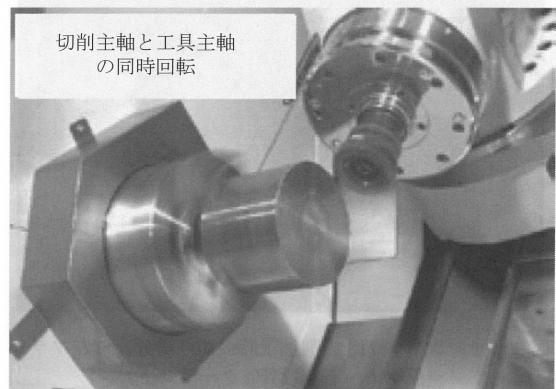


図 13 ミルターニング加工〔出典：文献 9〕

超耐熱鋼の場合、通常の旋削工具では切込みを大きく設定することで、加工時に発現する加工硬化層の再加工を避ける。しかし、本加工手法は半径方向切込みを小さくして、1回の切削時間を短くした断続切削を行うことになるため、切削温度が定常状態となる前に切削が終了し、冷却され、ドライ加工も可能になる。

また工作物を高速に回転させなくても、工具を高速に回転させることで高能率加工を実現できるため、硬度の高い材料加工に付帯する強断続切削や非対称性のある工作物においても高能率加工が可能となる等々メリットが多い。

5. おわりに

本稿では、難削金属素材の概要と加工時の工具摩耗軽減を目的とした潤滑性向上と摩擦改善の手法を数点紹介解説を行ったが、超高压クーラント供給手法については、高耐圧の工作機械の開発・

普及が必要であり，駆動型ロータリ切削・ミルターニング加工には，複雑な切削条件パラメータの選定を行う理論解明が，相揃うことにより実現する内容である。

さらには，次世代航空機に使用される素材の開発・改良は著しく，現時点で斬新・効果的な加工手法であったとしても次の新しい手法を継続開発していくことが必要となる。

技術・生産協力国であるわが国が，それを牽引することで，技術立国として世界的に必要不可欠な存在となることを期待したい。

文 献

- 1) 日本航空宇宙工業会：日本企業の海外プロジェクトへの参画状況，航空宇宙産業データベース (2013)28.
- 2) 伊牟田：航空機用構造材料の技術研究開発動向，素形材，

- 51, 11 (2010) 2.
- 3) 新潟県工業技術総合研究所：工業技術研究報告書，38 (2009) 90.
- 4) 狩野：難削材切削の基本戦略と問題解決，機械技術，60, 2 (2012) 32.
- 5) 大森・加藤・前田・上野：高圧クーラントが旋削加工の切りくず処理性におよぼす影響，明石工業高等専門学校研究紀要，55 (2013) 7.
- 6) F. KLOCKE, H. SANGERMAN, A. KRÄMER & D. LUNG : Influence of a High-Pressure Lubricoolant Supply on termoo-mechanical tool road and tool wear behaviour in the turning of aerospace material, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers Part B, Journal of Engineering Manufacture, 225 (2011) 55.
- 7) 長谷川：航空機用工具と適用事例，精密工学会誌，75, 8 (2009) 957.
- 8) 笹原：駆動型ロータリ切削における難削材の高効率加工，東京農工大学研究シーズ集 2012, (2012) 195.
- 9) 村木・山本：複合加工機の現状と今後の展望，素形材，53, 11 (2012) 12.

図 1 加工条件の異なる難削材の切削加工の様子を示す。III (標準加工条件) (標準加工条件)、II (標準加工条件) (標準加工条件)、I (標準加工条件) (標準加工条件)

