

窒素ガス援用による切削加工の高度化に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2012-01-13 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 静, 弘生 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00006355

静岡大学博士論文

窒素ガス援用による切削加工の高度化
に関する研究



平成 20 年 6 月

大学院理工学研究科

設計科学専攻

静 弘生

目次

第1章 緒論	1
第2章 環境対応型切削加工技術	3
2.1 切削油剤の問題点	3
2.2 切削油剤の経済性	3
2.3 切削油剤使用に伴う環境問題	4
2.4 各種環境対向型加工技術の特徴と欠点	6
第3章 切削加工における酸素の影響	12
3.1 緒言	12
3.2 工具摩耗における酸化の影響	12
3.3 酸化皮膜の特性	13
3.4 真空中切削における酸化皮膜の影響	16
3.5 酸素噴射切削における雰囲気ガスの影響	21
3.6 不活性ガス雰囲気下における切削加工	21
3.6.1 実験概要	21
3.6.2 実験装置及び切削条件	21
3.6.3 切削抵抗	23
3.6.4 工具摩耗	25
3.6.5 切削点近傍温度	27
3.6.6 元素定性分析	28
3.6.7 考察	29
3.7 結言	33
第4章 窒素雰囲気中切削における凝着の改善	34
4.1 緒言	34
4.2 旋削加工における窒素雰囲気中切削の凝着改善	34
4.2.1 超硬合金工具を用いた窒素雰囲気中旋削加工	34
(1) 実験概要	34
(2) 実験結果及び考察	35
4.2.2 コーティング超硬合金工具を用いた窒素雰囲気中旋削加工	38
(1) 実験概要	38

(2) 実験結果及び考察	39
4.2.3 サーマット工具を用いた窒素雰囲気中旋削加工	42
(1) 実験概要	42
(2) 実験結果及び考察	44
4.2.4 サーマット工具を用いた断続旋削加工	48
(1) 実験概要	48
(2) 実験結果及び考察	49
4.3 窒素中切削のミーリング加工への適用	52
4.3.1 実験装置及び測定方法	52
(1) 実験装置	52
(2) 実験装置接続図	54
(3) 切削方法	56
(4) 測定項目と方法	56
(5) 切削環境の定義	59
4.3.2 超硬エンドミルを用いた実験	61
(1) 実験概要	61
(2) 実験方法	61
(3) 実験結果及び考察	62
4.3.3 TiN コーティングエンドミルを用いた実験	65
(1) 実験概要	65
(2) 実験方法	65
(3) 実験結果と考察	67
4.3.4 高速加工条件下における加工特性	69
(1) 実験概要	69
(2) 実験方法	69
(3) 実験結果及び考察	70
4.4 結言	74
第5章 窒素ブローによる高送りミーリングにおける工具寿命改善効果	77
5.1 緒言	77
5.2 酸素濃度と加工特性に関する検討	78
5.2.1 実験概要	78
5.2.2 実験装置と使用工具	79
(1) 実験装置	79
(2) 使用工具	81
5.2.3 切削速度と温度	81

(1) 実験概要	81
(2) 実験方法	81
(3) 実験結果と考察	82
5.2.3 酸素濃度変化と工具摩耗の関係について	85
(1) 実験概要	85
(2) 実験方法	86
(3) 実験結果及び考察	86
5.3 窒素ブロー加工の酸素含有量についての検討	92
5.3.1 実験概要	92
5.3.2 実験装置	92
5.3.3 実験条件	92
5.3.4 実験結果及び考察	93
5.4 窒素ブローによる S50C の高送り加工における工具寿命改善効果	95
5.4.1 TiN コーティング超硬エンドミルにおける切削実験	97
(1) 実験概要	97
(2) 実験方法	97
(3) 実験結果及び考察	98
5.4.2 TiAlN コーティング超硬エンドミルにおける切削実験	101
(1) 実験概要	101
(2) 実験方法	101
(3) 実験結果及び考察	103
5.5 窒素ブローによる SKD61 の高送り加工における工具寿命改善効果	109
5.5.1 切削方法の違いによる特性の調査	112
(1) 実験概要	112
(2) 実験方法	116
(3) 実験結果及び考察	117
5.5.2 送りの違いによる特性の調査	120
(1) 実験概要	120
(2) 実験方法	120
(3) 実験結果及び考察	121
5.6 結言	123
第 6 章 窒素ブロー加工の実用化に向けた検討	125
6.1 緒言	125
6.2 窒素ブローによるクランクシャフト材の断続旋削加工	125
6.2.1 実験目的	125

6.2.2 窒素ブローの断続旋削加工における工具摩耗低減効果	126
(1) 実験概要	126
(2) 実験装置及び測定方法	126
(i) 実験装置	126
(ii) 使用工具と被削材	128
(iii) 測定項目と方法	129
(iv) 切削環境の定義	132
(3) 超硬工具を用いた断続旋削加工	133
(i) 実験概要	133
(ii) 実験方法	133
(iii) 実験結果と考察	134
(4) コーティング工具を用いた断続旋削加工	138
(i) 実験概要	138
(ii) 実験方法	138
(iii) 実験結果と考察	138
(5) サーメット工具を用いた断続旋削加工	142
(i) 実験概要	142
(ii) 実験方法	142
(iii) 実験結果と考察	142
6.2.3 クランクシャフト材料の旋削加工への適用	145
(1) 実験概要	145
(2) 実験装置	145
(3) 使用工具と被削材	146
(4) 切削速度 150m/min での断続旋削実験	147
(i) 実験概要	147
(ii) 実験結果及び考察	148
(5) 切削速度 300m/min での断続旋削実験	150
(i) 実験概要及び実験方法	150
(ii) 実験結果及び考察	152

6.3	窒素ブローによる高送りミーリング加工実験	156
6.3.1	実験目的	156
6.3.2	実験装置及び測定方法	156
6.3.3	同型工具における相似性の検証	161
(1)	実験概要	161
(2)	実験方法	161
(3)	実験結果	162
6.3.4	窒素切削による工具摩耗低減効果についての実験	165
(1)	実験概要	165
(2)	実験方法	165
(3)	実験結果	166
6.3.5	より厳しい切削条件での加工実験	171
(1)	実験概要	171
(2)	実験方法	171
(3)	実験結果	173
6.4	結言	178
第7章	窒素援用 MQL 加工の可能性	180
7.1	緒言	180
7.2	実験装置	180
7.3	実験条件	181
7.4	実験結果	182
7.5	結言	186
第8章	結論	187
参考文献		189
謝辞		193
付録		194
1	切削加工とは	194
2	2次元切削モデル	194
3	切削抵抗	196
4	切削温度	198
5	仕上げ面粗さ	200

6	工具摩耗と工具寿命	201
7	工具材種	203
8	切削油剤	206
9	参考文献	208

第1章 緒論

切削加工は数ある加工技術の中でも、生産性や経済性に優れるとともに高精度の加工を行えることから、生産加工において欠くことのできない技術である。

近年は高精度で高能率の加工を短時間で行うことが求められ、工具や工作機械、加工技術の進歩がそれを可能としてきた。

このような生産性を向上させるためにはより厳しい条件における加工が求められる。切削加工においてこのような厳しい条件下における加工を可能とする役割を担ってきたのが切削油剤の使用である。

切削油剤は容易に潤滑・冷却・切りくず排出の効果を得られるため、これまで大量の切削油剤が使用されてきた。しかしながら、切削油剤の大量使用はそのまま大量廃棄を招くこととなり、これが人体をはじめ地球環境に極めて悪影響を及ぼすことが近年明らかとなってきた。

そのことから、現在切削油剤の使用を抑えた加工法が求められている。しかし、切削油剤を全く使用しない完全ドライ加工では、上記の潤滑や冷却作用がないために切削温度が高温となり、工具寿命が著しく低下してしまうという問題が生じる。このような点から、現在各種環境対応型切削加工技術（エコマシニング技術）に関する研究が頻繁に行われている。

その代表ともいえるのが微量の切削油剤を霧状に噴霧するミスト加工であり、多くの生産現場において導入されている。しかしながら、ミスト加工ではミストの周囲への付着や人体への吸引による健康被害などの問題などが生じている。また、ミスト加工では切削油剤の使用をゼロに出来たわけではないため、切削油剤のゼロエミッション化という上記の目的を完全に達成できたとはいえない。

そこで、本研究では切削油剤を全く使用しない加工技術の一つである加工雰囲気調整法について検討を行う。

切削において生じる発熱は大きく分けて切りくずのせん断変形における発熱と摩擦発熱、切りくず及び被削材新生面の酸化発熱が考えられる。本研究では、この酸化発熱に着目し、加工点を窒素ガスで覆うことによって酸素を除外し酸化を抑制することによる温度低減と、それによる工具寿命の改善を目的とした。

本論分は前8章で構成される。第1章は緒論であり、環境対応型加工技術の必要性と、本論分における窒素中切削の概要を述べる。

第2章では基礎切削理論から、切削における切削油剤の必要性と問題点、この解決法である各種環境対応型加工技術についてそれぞれの特徴や欠点について述べるとともに窒素雰囲気中切削について述べる。

第3章では、切削と酸素の関係について真空中切削や不活性ガス雰囲気中での切削を行った場合の切削特性について述べる。

第4章では、窒素雰囲気中における凝着の改善について検討を行う。通常、窒素雰囲気中で切削加工を行うと切削時に新生面の酸化皮膜が形成されないために工具に激しい凝着が生じることが確認されている。これが工具寿命の低下を招いてしまうが、凝着の改善が出来れば窒素雰囲気中切削において温度低減による工具寿命の改善が可能となることが考えられる。従って第4章では工具材種や切削条件、切削形態の検討を行い凝着問題の解決を図る。

第5章では窒素ブロー加工における高送り切削の可能性について検討を行う。これは、第4章において窒素雰囲気中加工について検討を行った結果、窒素ガス供給方法については密封容器を用いた窒素雰囲気中加工よりも窒素ガスを吹き付ける窒素ブロー加工が有効性を示したこと、また、高速・高送り条件において顕著に工具寿命改善効果が得られたことを受け、第5章では窒素ブローによって環境対応と高生産性の両立を目指し実験を行う。

第6章は窒素ブロー加工の実用化に向けた検討である。第5章では窒素ブローによってこれまで加工困難であった高速・高送り加工が可能となった。それを受けて第6章ではエンジンクランクシャフトの旋削加工及び自動車のバンパー金型におけるミーリング加工に窒素ブロー加工を適用し、その有効性について検証する。

第7章では窒素ブロー加工の応用技術について検証する。一般的にMQL加工では、冷却要素が少ないために切削温度の上昇を招いてしまう。そこで第6章ではミスト加工に窒素ブローを援用することによって冷却性の改善とそれに伴う工具寿命の改善を図る。

第8章は結論であり、全体の総括と窒素中切削の今後の可能性などについて述べる。

2章 環境対応型切削加工技術

2.1 切削油剤の問題点

現在、地球温暖化や環境汚染などの問題が非常に注目されており、これらの問題に対する意識は末端の消費者まで浸透している。加工技術とそれに関わる環境問題との関係は現在避けては通れない問題であり、その経緯を見てみると、1996年の環境マネジメントに関する国際標準ISO14001の制定があり、1997年には、京都議定書や全国各地においてのダイオキシン被害によって環境問題に対する世論の関心は大きく高まった。そんな中、1998年3月6日に廃油からダイオキシンが発生するという研究発表があり、加工分野でも環境問題がクローズアップされる結果となった。更に、2001年には有害廃棄物排出規正法（P R T R法）の制定を受け、今まで生産性のみを追及してきたと言えるこの分野でも、環境に対する配慮は必要不可欠であり、環境対応型加工技術の早期確立が早急の課題となっている²⁻¹⁾。

ここで話題を絞り、切削加工に論点をおいてみる。切削加工においても、一番問題となるのは今現在も大量に使用されている切削加工液であり、環境に配慮した加工を行うとすれば当然、加工液の在り方が重要課題となる。切削加工における切削油剤の基本的な目的や、性能については文末の付録の章に要約するので本章においては切削油剤のコストや環境への影響について述べる。

2.2 切削油剤の経済性

図 2.1 は、機械工場におけるエネルギーの消費割合を示した例である。図より、全消費エネルギーの約 8 割を工作機械が占めており、如何に工作機械がエネルギーを消費しているかがわかる。さらに、図 2.2 はトヨタ自動車在工作機械の消費エネルギーを調査した結果であるが、図に示すように切削油剤関連に約半分のエネルギーが消費されていることがわかる。つまり、概算でも、生産における全エネルギーの内、約 4 割を切削油剤関連が消費していることとなる。

さらに、図は切削加工におけるコストの割合を表した図であるが、全加工コストに占める工具関連コストが 2~4%であるのに対して、切削油剤

関連費用は 7~17%と約 3~5 倍も大きいという調査結果もある。このように、加工においていかに

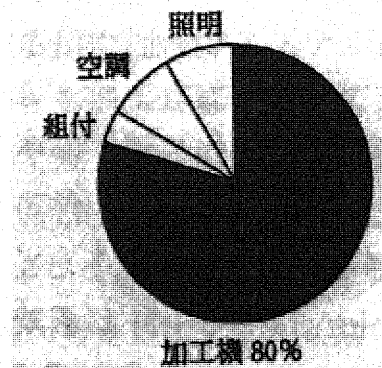


Fig.2.1 機械工場におけるエネルギー消費率²⁻²⁾

切削油剤が多くエネルギーや費用を必要としているかが近年明らかになってきた。

2.3 切削油剤使用に伴う環境問題

1990年代までは最高75気圧程度の給油装置を用いて一分間あたり約100Lを超えるような高圧給油法もまれではなかった。切削油剤はその性能から大量に使用されてきたが、ここから廃棄される使用済み切削油剤は膨大な量に及ぶ。

例えば、わが国では年間約250万kLの潤滑油が製造される。このうち切削油剤が占める割合は約13万kLであり、潤滑油全製造量の約5%に過ぎないが、そのうちの約5万kLが水で希釈して使用する水溶性切削油であり、平均希釈率を15倍と見積もるっても使用中の水溶性液量は75万kLにも達する。従って、不水溶性切削油と合わせると年間約85万kLもの廃液が排出されていることとなる²⁻⁴⁾。

図2.3は使用済み切削油剤の回収量を示したものであるが、廃棄される油剤の内、潤滑油として再生されるものは全体の約1%であり、約40%が回収不可能であるとされる。

回収された使用済み切削油剤は一般的に焼却処分されることが多い。しかし、廃液の年少は、

- ・ 化石エネルギーの消費
- ・ 二酸化炭素の排出による地球温暖化
- ・ 酸性雨による地域的な環境破壊
- ・ 揮発性有機化合物(VOC)の排出につながる。

図2.4に不水溶性切削油剤の代表的な廃油処理プロセスを示す。塩素・硫黄系の極圧添加剤を含む切削油剤では、燃焼時に塩化水素や亜硫酸ガスなどの腐食性の酸性ガスが発生する。これらは燃焼炉を傷めるばかりでなく、そのまま大気中に放

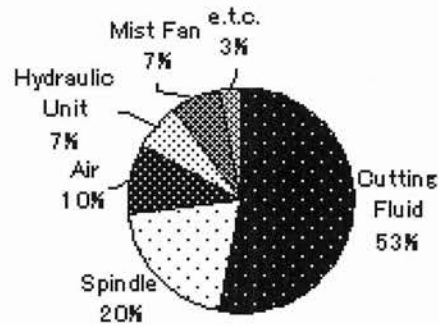


Fig.2.2 マシニングセンターにおけるエネルギー消費率²⁻³⁾

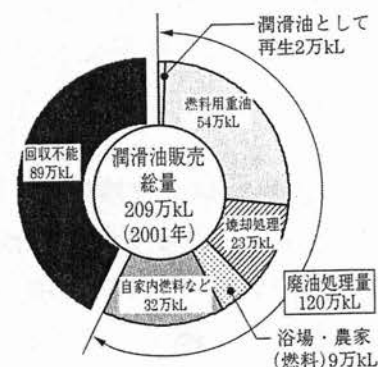


Fig.2.3 切削油の再利用率²⁻⁵⁾

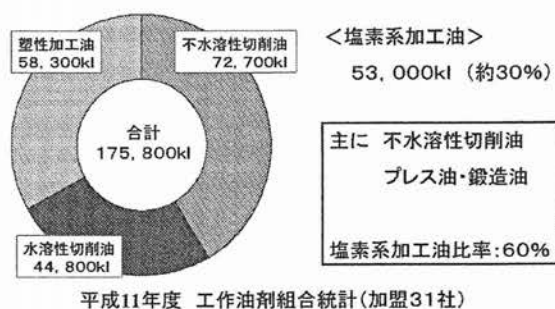


Fig.2.4 切削油剤の再利用率²⁻⁶⁾

出されると酸性雨のような環境問題を引き起こす可能性がある。大気温泉防止法では、それらの有害物質を除去するため、洗浄塔や吸収塔などの洗煙工程の設置を義務付けている。

一方、塩素系有機化合物を 600℃以下の低温で燃焼させると、ダイオキシンが発生する。塩化ナトリウム(食塩)のような無機化合物でも、有機化合物と一緒に燃やされると、同様にダイオキシンの発生が懸念される。図 2.12 は平成 11 年度における切削油剤の使用割合であるが、全体の約 30%が塩素系の加工油である。このような塩素化パラフィンなどの塩素系極圧添加剤を含む切削油剤の廃油は、直火使用の工業炉か特殊炉で焼却処理しなければならない。ダイオキシンは 850℃以上の高温で 2 秒以上かけて焼却すれば分解する。

さらに、焼却残渣を埋め立て等により処理する際には、水銀や鉛などの有害物質が含まれていないかの確認も必要である。

ダイオキシンはもちろんであるが、人体への有害性については、1980 年代にアメリカの National Toxicology Program の報告において、炭素数 10~12、塩素分 60%の塩素化パラフィンについて発がん性が指摘された例などもあり、ドイツなどの各国では早い段階から塩素系添加剤は排除される方向にあった。一方、わが国において削油剤の有害性について一般に認識されたのは、比較的新しく、平成 10 年 3 月 6 日付けの毎日新聞に大阪大学大学院の植村助手の調査による機械廃油からの大量ダイオキシンの発生が 3 面記事として掲載されたことに始まると思われる。この時期、ダイオキシン問題が注目されていたこともあり、この記事を境に加工液の有害性が一般にまで知れ渡った。それを境にわが国では JIS K2241-2000 の制定や PRTR(Pollutant Release and Transfer Register)法の制定など切削油剤の環境対策が一気に加速することとなった。図 2.5 に主な問題点とそれに対する対策をまとめる。

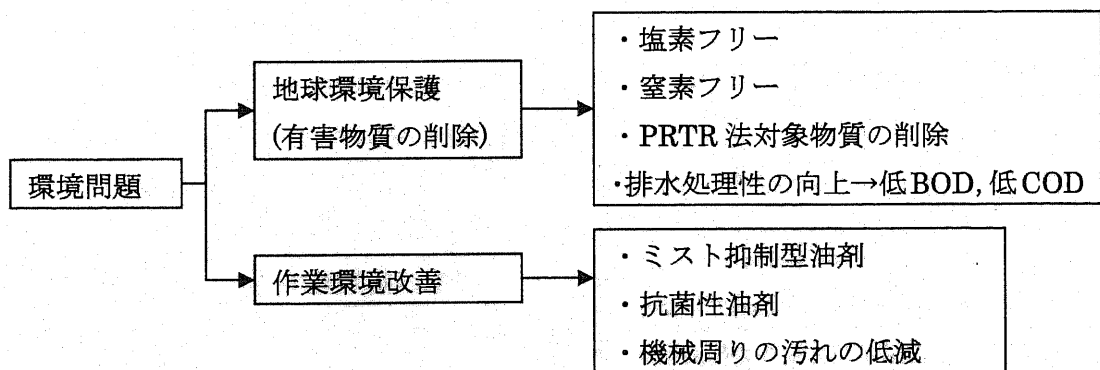


Fig.2.5 切削油剤における環境問題 2-7)

以上のように、切削油剤の大量使用はの人体、及び地球環境へ及ぼす影響が大きく、現在これらの油剤の使用の低減が求められている²⁻⁸⁾。

2.4 各種環境対応型切削加工技術の特徴と欠点

現在、切削時の切削液使用量を低減させる為、企業や大学などの研究機関において、多くの研究が行われ、その一部は既に生産現場で採用されている。本稿では、切削油剤関連に関する各種エコマシニング技術について述べる。

切削油剤を全く使用しない完全ドライ加工と、少量の切削油剤を供給するセミドライ加工の2種類に大別される。

切削油剤を全く使用しない完全無潤滑での切削では、潤滑不足や冷却不足に陥ることから、現在では微少な切削油剤を使用するセミドライ加工(MQL: Minimum Quantity Lubrication)が用いられるようになってきた。以下に代表的なセミドライ加工技術について示す。

(1)ミスト加工(噴霧法)

切削油剤を高圧空気によって切削点近傍に噴霧する方式である。従来の噴霧供給法では切削油剤を比較的大量に使用しており、使用する油剤は潤滑性より冷却性を主体として選ばれるため、不水溶性油剤よりも水溶性油剤を用いる。噴霧給油を行うときは作業者の健康や環境衛生に特別の配慮が必要である²⁻⁹⁾。

(2)複合ミスト加工

現在最も一般的に用いられているセミドライ加工法である。複合ミスト加工法では図 2.6 に示すように、微量の切削油剤と冷却水を混合したものをミスト化し切削点に供給する。油剤は主に植物性が用いられることが多いが、最近ではミスト加工専用の切削油剤も発売されている。

国内では、複合ミスト加工法は90年代より静岡大学の鈴木教授や名古屋工業大学の中村隆教授によって研究されてきたが、近年は多くの企業や大学によって研究が行われている。

複合ミスト加工で使用される油剤の量は数 cc/h から数十 cc/h 程度であり、フラッド給油と比べると 1/10000~1/100000 となることから、使用油剤を大幅に低減することが可能である。

MQL とは直訳すると微量潤滑油供給法であることから、正しくはセミドライ加工一般を意味するが、わが国ではミスト加工を指すことが多い。

複合ミスト加工は、工具摩耗の低減など切削性能に関しても良好な結果が得られていることから、生産現場における導入例も多い。中でも、トヨタ自動車がミスト加工を採用したことから、一気に普及が進んだ加工法である。さらに、ドリルによる付加穴加工などでは湿式加工以上の性能も確認されている。

しかしながら、ミスト加工では、ミスト化した油剤を作業者が吸引してしまうことからくる健康被害や、機械等に付着するなどの問題点が挙げられる。図 2.7 は、国際工作機械見本市において行ったアンケート調査の中から切削油剤の問題点について解答を集約したものであるが、切削油剤のミスト化に伴う作業環境の問題が深刻であるといえる。更に、切削油剤の供給量が少ないことから、冷却性の確保が課題である。

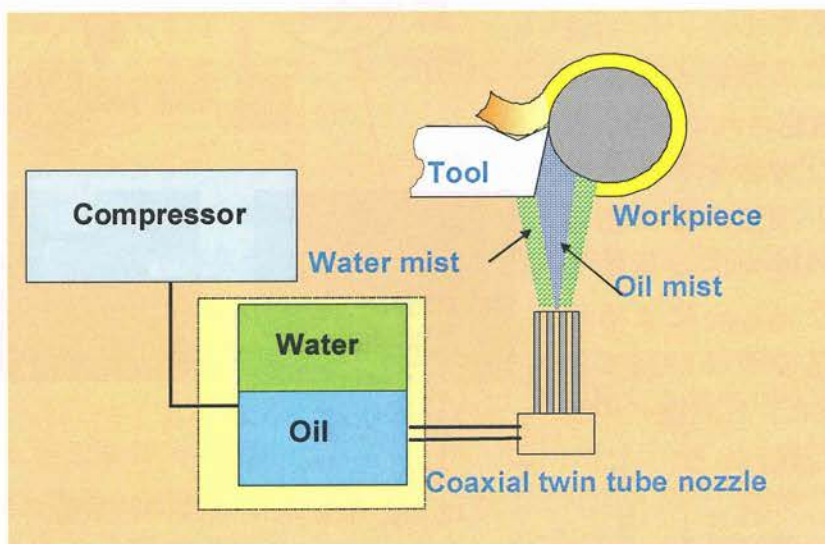


Fig.2.6 複合ミスト切削装置概要図 2-10)

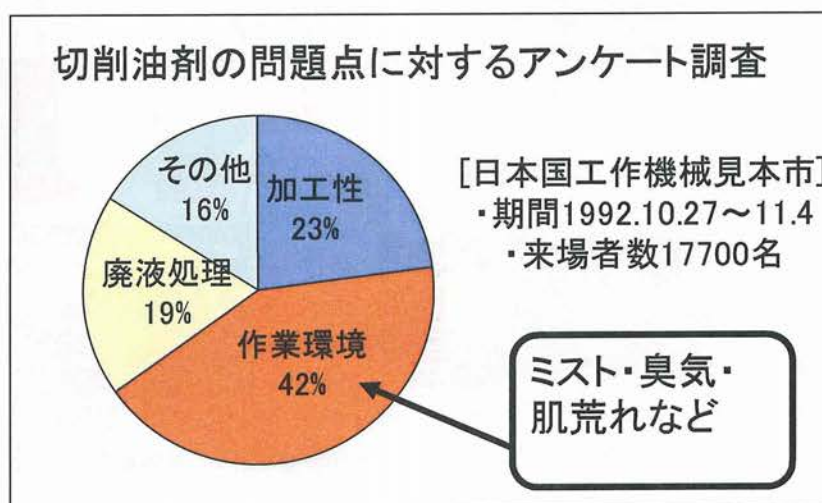


Fig.2.7 切削油剤の問題点に対するアンケート調査 2-11)

(3)極微量潤滑油供給法

主にミスト加工を除いた微量潤滑油供給法を指す。潤滑を必要する場所に最小限度の油剤を供給する方法であり、ドイツのドルトムント大学で実施されたことに始まる。現在、切削をはじめ研削など多くの加工法について複数の研究が行われている。

図 2.8 及び図 2.9 は、静岡大学における極微量潤滑油供給法の装置概要図である。このように、微量潤滑油供給法では、油剤を液滴上にし供給する滴下式やスライドピストンを用いて少量供給する細管式、あるいはローラーポンプによって連続的に油剤を供給するチュービング式などの方式によって切削油剤を供給する。

実験では、6~8cc/hの極めて少ない供給量でも工具摩耗の低減などが確認されており、有効的な方法といえるがミスト加工同様に切削油剤の絶対的な供給量が少ないことによる冷却不足の改善が望まれる。また、自動機への導入にも難がある。

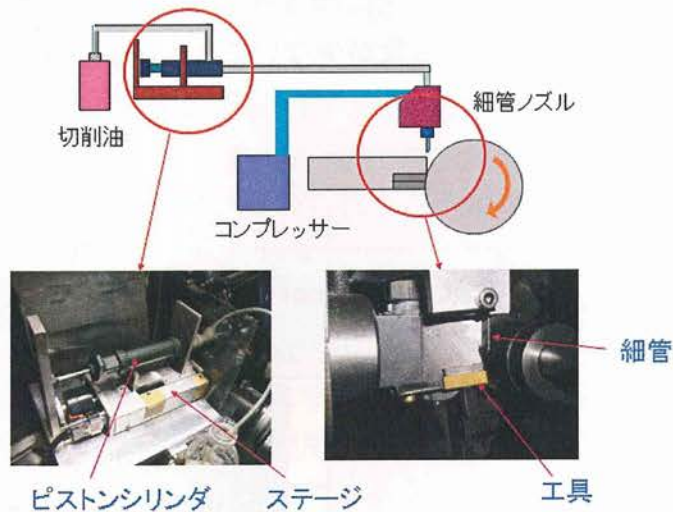


Fig.2.8 細管式極微量供給装置外略図 2-12)

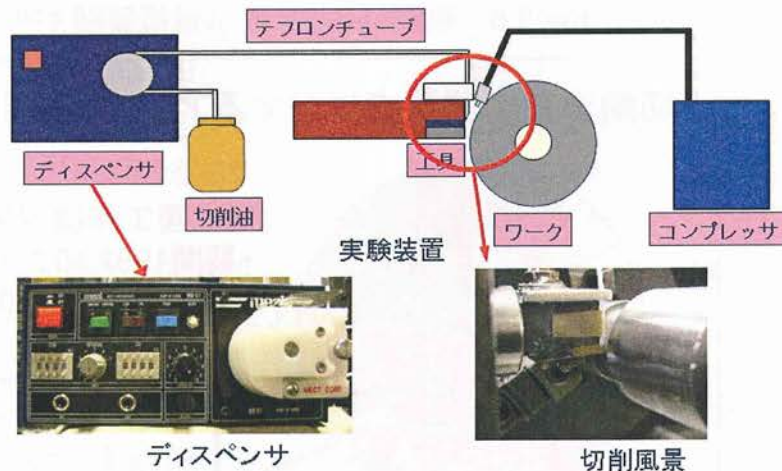


Fig.2.9 ディスプレッサー式極微量切削装置外略図 2-13)

上記のようなセミドライ加工のいくつかは既に実用化され、生産現場においてある程度の効果を発揮している。しかし、エコマシニングにおける究極の目的は完全クーラントレスによる加工であるが、この方法では、冷却・潤滑不足に陥り、工具寿命が著しく低下することから、現実的とは言えない。そのため、各種ドライ加工では、クーラントレスの環境下で如何にして冷却や潤滑を確保するかが問題となる。以下にドライ加工における主なエコマシニング技術を挙げる。

(4)冷風加工

冷風加工は冷凍機を用いてマイナス 30℃以下の冷風を加工点に大量に吹きつけ、加工点近傍の温度を零度以下に低下させ、その結果被削材を脆くして加工力を低下させるとともに、工具を冷却し刃先温度を低下させることによる硬寿命増大、加工面粗さの向上、及び切りくず排除を狙った加工法である。(図 2.10)

わが国におけるエコマシニング技術としては最も歴史があり、1995 年頃から、工学院大学の故横川先生が精力的にこれを研究されてきた。現在は同大大森先生や小久保先生を中心に明治大学等でも研究されている。ドイツでは 1990 年ごろから研究されてきた経緯を持つ。

冷風加工を行った実験では、フラッド給油と比べても工具摩耗や仕上げ面上対等に関して優れた結果が出ており、商品化や工場への導入例がある。

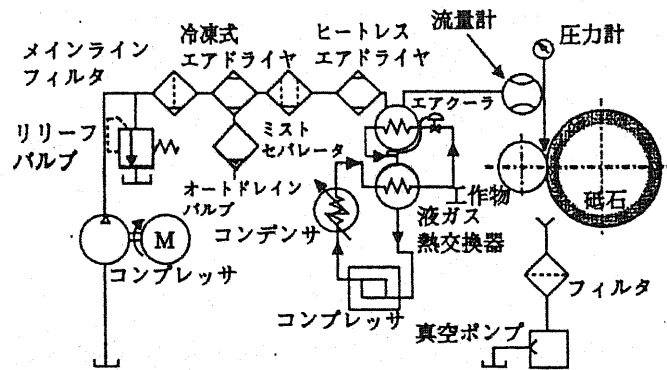


Fig.2.10 冷風加工外略図 2-14)

冷風加工の問題点としては、数 kW 要領の空気冷却装置が必要であり、システムのイニシャルコスト、及びそのランニングコストが高くなることが挙げられる。最近では冷風供給システムの改善と冷風工法の改良により、以前ほど大量に冷風を供給しなくても効果があることがわかってきたが、依然として、全加工コスト、全加工エネルギー消費量、配管及び被削材表面での結露、さらには加工点近傍での騒音発生の問題がある。なお、微量の植物性油を複合的に使用する場合もある 2-15)

(5) 吸熱工具

切削チップ内に冷却水を循環させ、切削熱を切削工具内部に吸収除去する方法である。(図 2.11)

主に日本大学の神雅彦教授により研究が行われている。ミスト加工や各種 MQL 加工法とほぼ同等の工具寿命延長が可能となるが、工具が特殊であることや、各種周辺装置が必要となることから、普及にはそれらの問題を解決する必要がある。

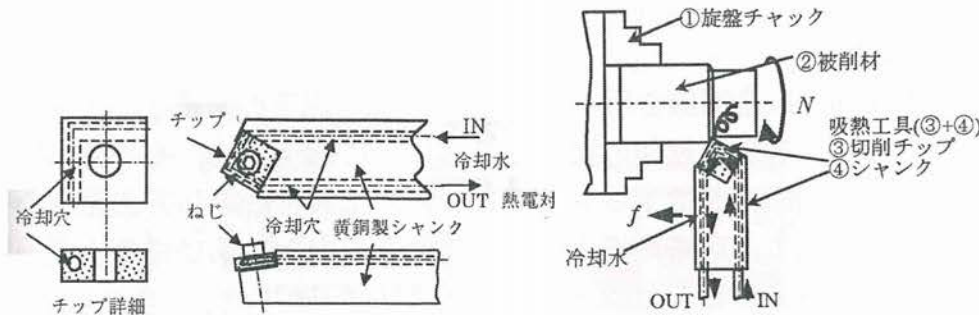


Fig.2.11 空冷切削装置外略図 2-16)

(6) 切りくず回収工具

加工に切削油剤を使用しない場合、切りくず排出性が乏しくなる。切りくずが回収されない場合、作業性の低下はもちろん、切りくずが排出されないことによる熱の問題が生じてくる。切りくず回収工具は、この解決法として図に示すように、切削直後に工具内部に切りくずを回収できる工具を用いる方法である。(図 2.12)

名古屋工業大学の中村隆教授を中心に OSG(株)などが研究を行っている。

切りくず回収工具の問題点としては、切りくずが機械内部でトラブルを起こさないことや、より実用的な装置の開発が望まれる。

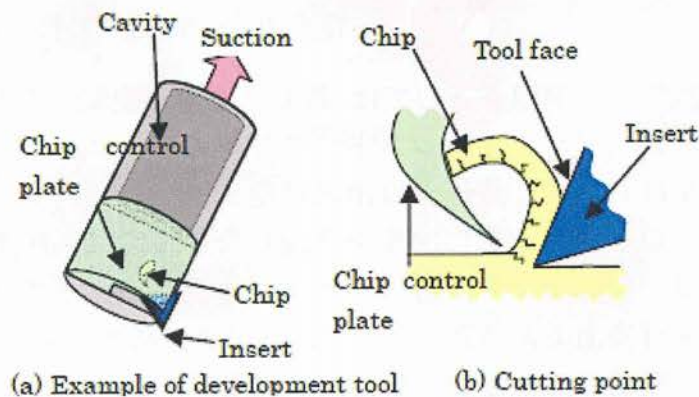


Fig.2.12 切りくず回収工具模式図 2-17)

(7)加工雰囲気調整

密封容器などを用いて加工雰囲気の調整を行う方法である。その歴史は古く 1950 年代から切削現象の解明のために行われてきた経過がある。エコマシニング技術としては、窒素、アルゴン、二酸化炭素などの不活性ガスで加工雰囲気を形成することによって酸化発熱を抑制し温度低減、工具寿命増加を図ることができる。しかしながら、凝着などの問題もあり、さらに、装置が特殊であることなどから、実用化には問題がある。

90 年後半から、静岡大学やエンシュウ㈱で研究されており、香川大学の若林教授なども同様の研究を行っている²⁻¹⁸⁾。

加工雰囲気調整法は本研究における手法であることから、次章において詳しく述べることとする。

第3章 切削加工における酸素の影響

3.1 緒言

切削加工において、酸素が切削特性に及ぼす効果については1950年代より研究が行われてきた。ここで、酸素を除外して加工を行うには大きく分けて、真空中における切削と不活性ガスを用いた切削の2種が挙げられる。本章では、これらの切削特性を述べるとともに、窒素雰囲気中における切削加工の特徴について述べる。

3.2 工具摩耗における酸化の影響

前章で触れたように、切削油剤を全く使用しないドライ加工法の一つとして、切削雰囲気調整による切削法がある。この切削雰囲気調整法の主な目的は、切削雰囲気から酸素を除外することにあるといえる。雰囲気調整による加工法が少量の切削油剤を使用する各種MQL加工と大きく異なる点として、切削による発熱を切削加工後に冷却するのではなく、切削発熱自体を低減できるという点にある。

図3.1は切削速度と工具摩耗の概念図である。切削温度は、切削速度が上昇するほど高くなるが、この図から、高い切削速度ほど、発熱が原因となる工具摩耗が進むことがわかる。従って、この発熱量事態を低減させることは工具寿命の観点からも非常に有効的な手段といえる。更に、図3.2は工具摩耗に占める要因を検討したものであるが、この図からも、切削速度が高くなるにつれ、酸化発熱による摩耗の占める割合が大きくなることがみてとれる。

また、雰囲気調整による加工法には、大きく分けて真空状態による加工と、不活性ガスを用いた加工に分けられる。前者については、真空チャンバー内に切削機構を設けることや、排出される切りくずの処理法などに問題があることから、切

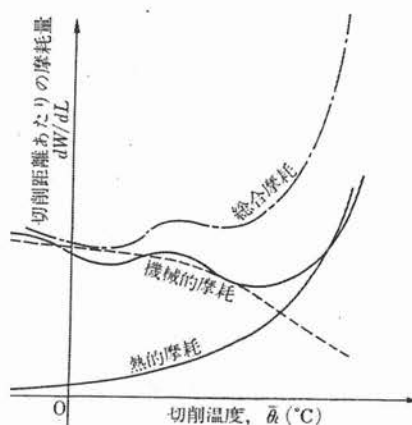


Fig.3.1 工具摩耗における熱的摩耗と機械的摩耗³⁻¹⁾

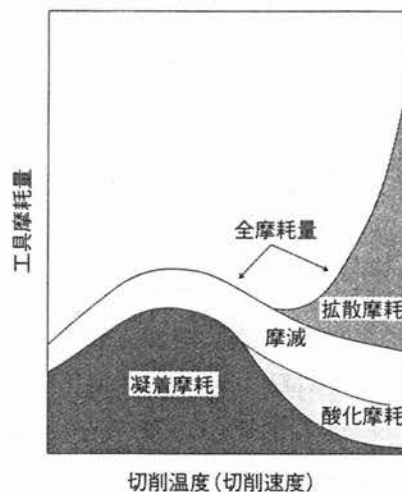


Fig.3.2 工具摩耗に及ぼす要因³⁻²⁾

削機構を解明するには適しているが、実用化には程遠いものがある。この真空中における切削加工に関しては、古くは 1960 年代より行われてきた。

一方、後者の不活性ガス雰囲気中における加工法については前者よりも構造が簡単であるものの、やはり装置の特殊化は否めない。用いられる不活性ガスに関しては、窒素ガスをはじめ、アルゴンガス（以下、Ar と略）や二酸化炭素（以下、CO₂ と略）などが使用される。

さらに、不活性ガスにおける研究に関しては、1960 年頃から切削点近傍に着たい酸素を噴射する切削法が考案され、それに伴い、以後各種ガスについても噴射による効果が研究されてきた。

しかしながら、いずれの研究においても加工における酸素の影響や摩擦に関しての切削現象の解明にとどまり、この加工法が実用化された用例は少なく、現在に至ることとなる。

3.3 酸化皮膜の特性

窒素を利用して加工を行う場合、加工雰囲気において酸素を除外する加工となるために、酸化皮膜が切削中の刃物と被削材の摩擦に及ぼす潤滑効果の欠落が、加工に影響する可能性がある³⁻³⁾。この項では、この酸化皮膜とそれに基づく潤滑について述べる。

通常、大気中にある金属の表面には金属の種類にかかわらず必ず 2~5nm の酸化物による超薄膜が生成されている。ここで、清浄な面を得るために純鉄を液体窒素で冷却し高真空中で面を切断したとする。ここで得られた清浄面は鉄の原子結合が引きちぎられた状態であるダングリングボンドが多く発生し、化学的活性が極めて高い状態になる。この状態では、周りに存在する分子を種類に関係なく吸着してエネルギーの低いより安定した状態になろうとする。これが清浄面が引き起こす激

大気中	
Fe ₂ O ₃	μ = 0.7
Fe ₃ O ₄	μ = 0.2
FeO	μ = 0.2
金属材料 μ ≥ 4?	

Fig.3.3 皮膜構成模式

しい凝着効果である。またこの表面が表面に気体分子を吸着し膜が生成される速度はきわめて早く、例えば真空度が 1Pa(約 10⁻⁵atm)であったとすると、気体分子が吸着して成膜するのに約 10⁻⁴秒しかかからない。また、この超薄膜の厚みと時間の関係は対数的に変化することがわかっており、1分で 1.1nm, 1時間で 2nm, 100時間で 3nm, 1年で 4nm, 100年で 5nm というような成長をするということがわかっている。しかしながら温度が高くなると、この酸化物の皮膜の厚みは対数的でなく、平方根に比例するような形で増加する傾向にあ

り、例として 400°Cの空气中における純鉄上の酸化皮膜は、1分で 40nm, 100分で 400nm, 約7日で 4 μ m, 一年間で 30 μ m の成長を遂げる³⁻⁴。つまり、切削加工のような高温となる工程ではかなりの厚みのある酸化膜が加工後、瞬時に成膜される事となる。

この酸化物の皮膜が生成されることによって清浄面が引き起こす強い凝着を抑制できているのである。これが酸化膜における摩擦の特性と言える。

ここで、この酸化膜を詳しく見てみると鉄の場合 FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃ という3種類の酸化物から出来ている。これらの膜形成を模式的に示したものが図.3.3である。通常、大気中で生成される酸化膜は空気に最も近い一番上には Fe₂O₃, その下に Fe₃O₄, 下地の鉄のすぐ上には FeO というような層を形成している。これら各層の特長として、Fe₂O₃は赤色で非常に硬く摩擦係数 μ は0.7以上と高く、研磨剤としても使用されているが、Fe₃O₄と FeO は黒色で柔らかく摩擦係数 μ は0.2~0.3 とかなり低く、Fe₂O₃のような研磨性は無い³⁻⁵。

図 3.4 は鉄の酸化物の Fe₂O₃ と Fe₃O₄ との厚みが 0.12 μ m という薄い膜を鉄に生成させて摩擦係数をすべり速度を変えて計測したものである³⁻⁶。この図より、Fe₂O₃が Fe₃O₄よりも大きな摩擦係数を示している事がわかる。

次に、図 3.5 は NASA の D. H. Buckley 氏による軸受け鋼同士の摩擦に及ぼす雰囲気圧力の影響に関する実験結果である³⁻⁷。

これは、周囲温度 20 度で軸受け鋼の平面に同じ鋼の球面を加重 1kgf, 滑り速度 2.16m/s で滑らせるときの摩擦係数を雰囲気圧力を変えて調べた結果である。図では圧力を大気圧 (760Torr) からグラフの横軸の右方向へと減少させるとき、10⁻⁷Torr から圧力を上げてくるとき及び乾燥空气中での測定値がプロットされている。グラフでは、圧力を減少させると摩擦係数が減少していき、さらに圧力を減少させると摩擦係数が増加している。このような摩擦の圧力による変化は、軸受鋼面に鉄酸化物を生成するのに必要な酸素が、どのくらい存在しているかということに関係している。大気圧中では表面の酸化物は Fe₂O₃ であるが、圧力が減少すると酸素を多く必要とする Fe₂O₃ が生成されにくくなり、鉄の1原子当たりの酸素量が少なくてすむ Fe₃O₄ や FeO が表面に生成され摩擦係数が減少させる³⁻⁸。さらに圧力を減少させると Fe₃O₄ や FeO を生成するのに必要な酸素量も不足するようになるので、酸化物がほとんど表面には生成されなくて 10⁻⁴Torr

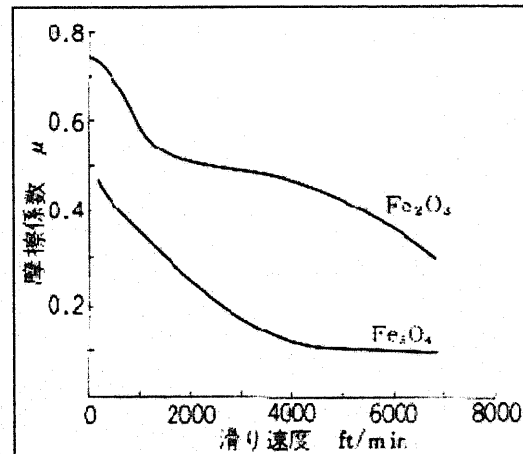


Fig.3.4 酸化皮膜特性³⁻⁶

以下では摩擦係数の増加が起こることになる³⁻⁹⁾。さらに、軸受鋼の表面に空気中で生成された酸化膜が存在しているとき、これを酸素が全くない状態で摩擦すると、はじめは摩擦係数が 0.45 くらいに低いが、存在していた酸化膜が摩耗してなくなっていき、しかも酸化膜が生成されない状態にあるので摩擦を続けると次第に摩擦係数が増加して、ついには急激に摩擦係数が 4 以上にまで増加して溶着したことも報告されている。これは、窒素雰囲気を利用した加工でもいえることである。これが酸化膜による摩擦低下効果である。

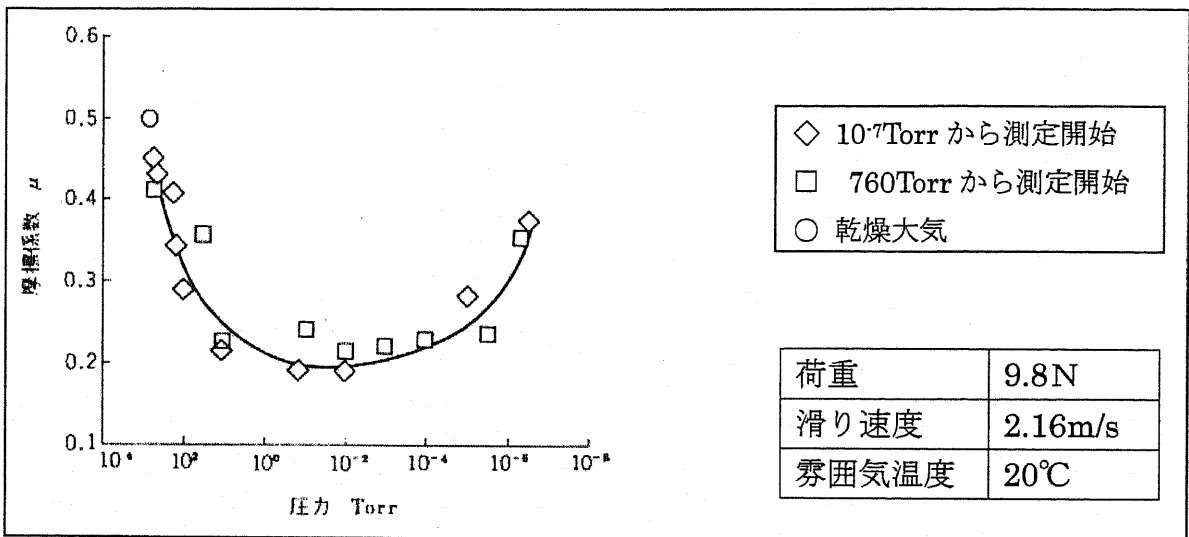


Fig.3.5 軸受け鋼同士の摩擦に及ぼす雰囲気圧力の影響

また、この膜は 2~5 μ m 程度の膜厚では可視光に対しては透明であり、金属光沢は失われないために金属光沢を表すが、膜厚が、30nm~500nm 程度になると光の干渉に基づく着色が見られるようになる。これは干渉を起こす波長の補色の色調が現れるので、短い波長から順に干渉を受けるのに対して、皮膜の色調は長い波長から順に短い波長に移るように変化する特徴がある。純鉄でいえば、1 分の加熱で厚みが 40nm 程度になると色調は黄色となり、3 分の加熱で 70nm 程度になると青い色調になるといわれている³⁻¹⁰⁾。

3.4 真空中切削における酸化皮膜の影響

金属材料における酸化皮膜の物性的な特性は前項の通りであるが、高圧・高温環境下で瞬間的に行われる切削加工においては前述の理論では完全に説明できないことが多いことから、実験で求めることが必要であると考えられる。従って、本項では切削加工における酸素の影響について述べる。

不活性ガスを用いて実験を行った場合は、切削における酸素の影響よりも、不活性ガスによる切削特性が影響を及ぼしてくる可能性があるため、切削加工における酸素の影響を調べるためには、真空中における実験が望ましい。

真空中における切削実験としては、昭和39年に古市、玉村氏が綿密な実験を行っており、その結果を参照させていただく(3-11)。

図3.6はS35Cを真空中にて切削加工したときの切削起電力の測定例である。図より切削加工においても前節で述べたように、大気圧から、 1×10^{-2} torr、 1×10^{-3} torrと真空度が上昇するにつれ切削熱起電力が大きくなっていることが見て取れる。更に、図3.7は大気中及び、真空中(1×10^{-3} torr)における主分力及び送り分力の測定例であるが、この図からも、真空状態にすることにより切削抵抗が増加することがわかる。

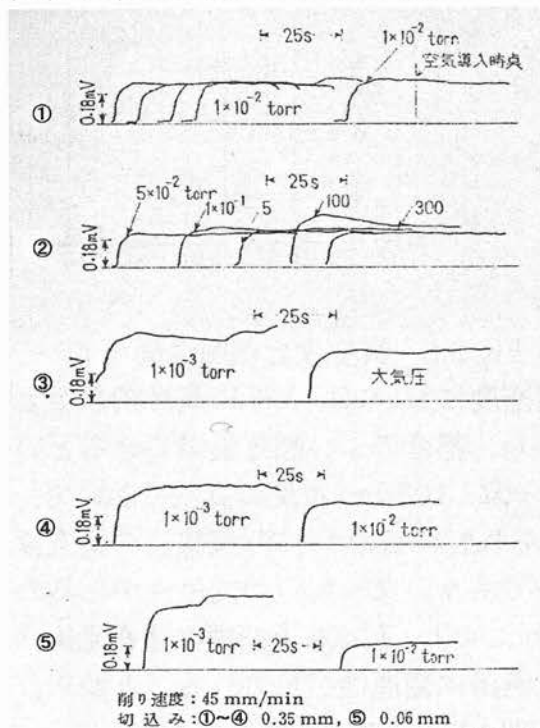


Fig.3.6 真空切削における切削抵抗

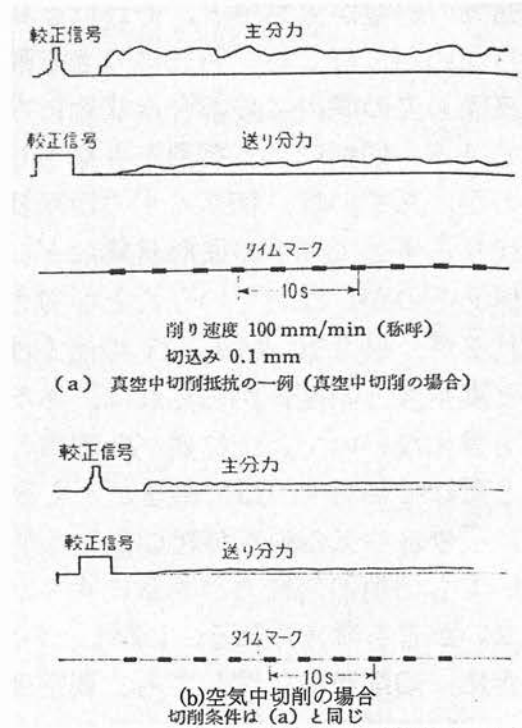


Fig.3.7 真空切削における主分力

また、図 3.8 は大気中と真空中の切削熱起電力の関係を示したものである。大気中及び、真空中 ($1 \times 10^{-3} \text{ torr}$) における切り込み深さと切削熱起電力の関係をまとめたものである。この図よりも、大気中に比べ真空中では切削熱起電力が多く、また、真空中では切り込み深さが大きくなるにつれ値が減少する傾向が見て取れる。

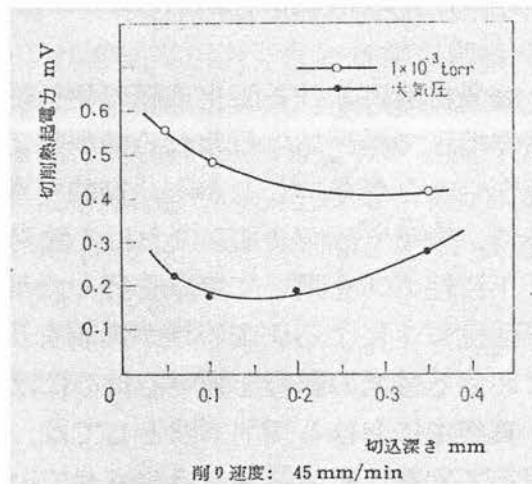


Fig.3.8 切り込み深さと切削熱起電力

更に、図 3.9 は真空度と切削熱起電力及び切削温度との関係を表したものである。これをみると、真空度が 10^{-2} torr 程度発生起電力が大気中とそれほど変わらないが、むしろ低い場合のあることを

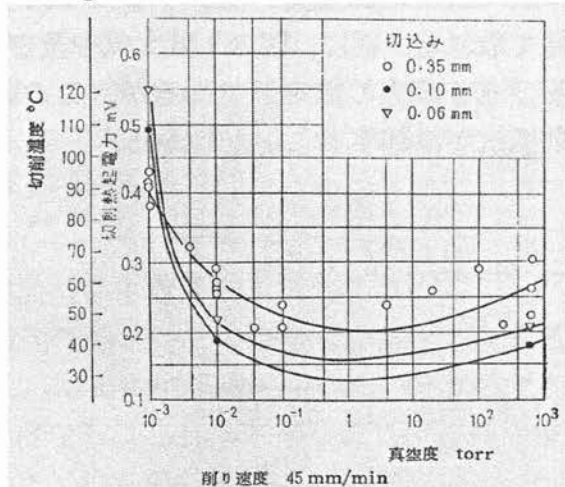


Fig.3.9 真空度と切削温度

示している。空気が希薄になって、直接の冷却効果が増すとは考えられないから、これは 10^{-2} torr 程度の真空では、雰囲気の影響が大気中と、それほど異なるから、むしろ、刃先にできる酸化皮膜刃先の潤滑に好都合な状態になって³⁻¹²⁾、切削による発熱を少なくしたのか、あるいは、切りくずの形態及び切りくずと工具との接触状態などに関係あるのか、などということが考えられるが、図 3.10 や図 3.11 の仕上げ

面と真空度との関係から見れば、ある真空度において、とくに潤滑効果がよいとも言えないので、上に述べた理由のうち、都合のよい酸化膜ができるということだけで説明は困難であるといえる。一方、 10^{-3} torr 程度の真空において、急激に吸着水蒸気の脱着が起こることが知られているのが³⁻¹³⁾、同程度の真空度においても切削熱起電力が急激に高くなっており、なんらかの関係性があるのではないかと考えられる。しかし、いずれにせよ、図 3.9 と前項の図を見比べたときに、切削現象に関しても、真空度と潤滑に関連性が見られることから、酸素が切削に影響を及ぼしていることは間違いないと考えられる。³⁻¹³⁾

以上の結果をまとめると、酸素を除外して切削を行うと、切削抵抗が上昇するとともに、それに伴う仕上げ面の荒れが発生する結果となった。この仕上げ面荒れは他の報告例にも見られ、これは皮膜が形成されないことによる工具への付着物の発生が影響していることが確認されている³⁻¹⁴⁾。

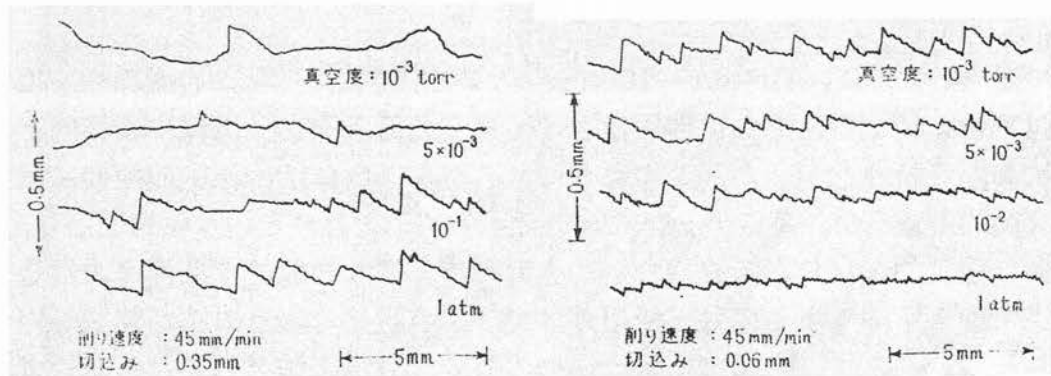


Fig.3.10 真空度と粗さ曲線

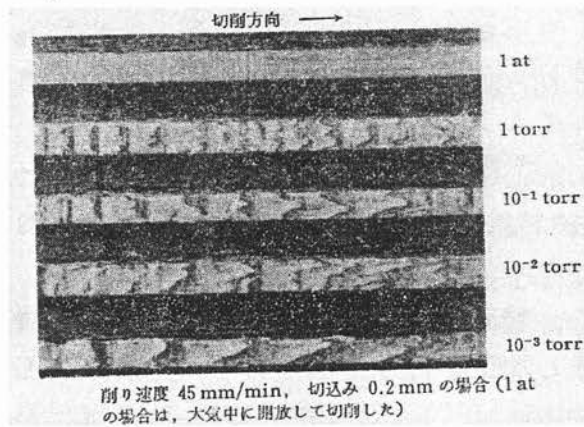


Fig.3.11 仕上げ面状態

3.5 酸素噴射切削における雰囲気ガスの影響

前項で述べたように、 10^{-2} torr $\sim 10^{-3}$ torr の真空中では、切削力の増加や、工具への付着物の発生と、それに伴う仕上げ面粗さの低下など、大気中の切削と明らかに異なる特性を示した。このように、真空中切削は切削減少の把握には非常に有効的であるが、真空チャンバー内で切削加工を行うという特殊性から、切削条件は限定的とならざるを得ない。そのため、より一般的な条件における切削加工で酸素を除外するには不活性ガスで加工点近傍を覆う方法が望ましいと考えられる。そこで、本項ではもう一つの酸素除外加工法として、不活性ガス環境下における切削加工について検討を行う。

不活性ガスを用いて加工を行う場合、使用ガスとしては主に窒素、Ar、CO₂が挙げられる。そこで、これらの不活性ガスがどのような切削特性について述べる。

不活性ガスによる脱酸素雰囲気は切削加工に及ぼす研究に関しては、国内においては1960年代より行われてきた経緯がある。これは、当時、切削加工において酸素が影響を及ぼすことが明らかになってきたことから、真空中切削や、酸素噴射切削が注目されたことに始まる。酸素噴射加工とは、切削点近傍に酸素ガスを吹き付け、準酸素雰囲気を形成し加工を行う方法であり、主に東京工業大学の奥島啓式氏や、京都大学の上神謙次郎氏、三井精機株式会社の吉祇彰男氏、中部工業大学の古市亮蔵氏らによって研究が行われてきた。^{3-19)~3-22)}

酸素噴射加工では、工具寿命や、仕上げ面粗さ、切削力等に気体雰囲気が大きく影響を及ぼし、真空中における切削や空気中における切削と違った特性を表すことが確認されている。

窒素ガスによる切削はこれらの研究の中で、脱酸素の手法の一つとして用いられた。図3.12は奥島氏らによる酸素噴射切削における気体ガスの違いと仕上げ面粗さの実験例である³⁻²⁰⁾。この研究では、(a)図のように大気中ドライ加工（以下、大気中と略）に比べ、窒素噴射加工では仕上げ面が粗くなっている。この傾向は(b)図のArでも同様に見られた。また、同研究では、酸素ガスと窒素ガスの混合比を変化させた場合の検討も行われ(c)図、噴射ガスの酸素濃度が上昇するほど良好な仕上げ面が得られることが判明した。しかしながら、(d)図のように、ただ空気を噴射した場合でも仕上げ面が良好になったことから、これらの仕上げ面粗さの変異が窒素、Arに関連するかは判明しなかった。また、図3.13は気体噴射による切削抵抗の変化を示したものであるが、ガスの種類によらず、気体を噴射すると抵抗に変化が生じたことが述べられている。

また、これら酸素噴射に関する一連の研究においても、不活性ガスを噴射した場合、工具に付着物が発生することが確認されている。

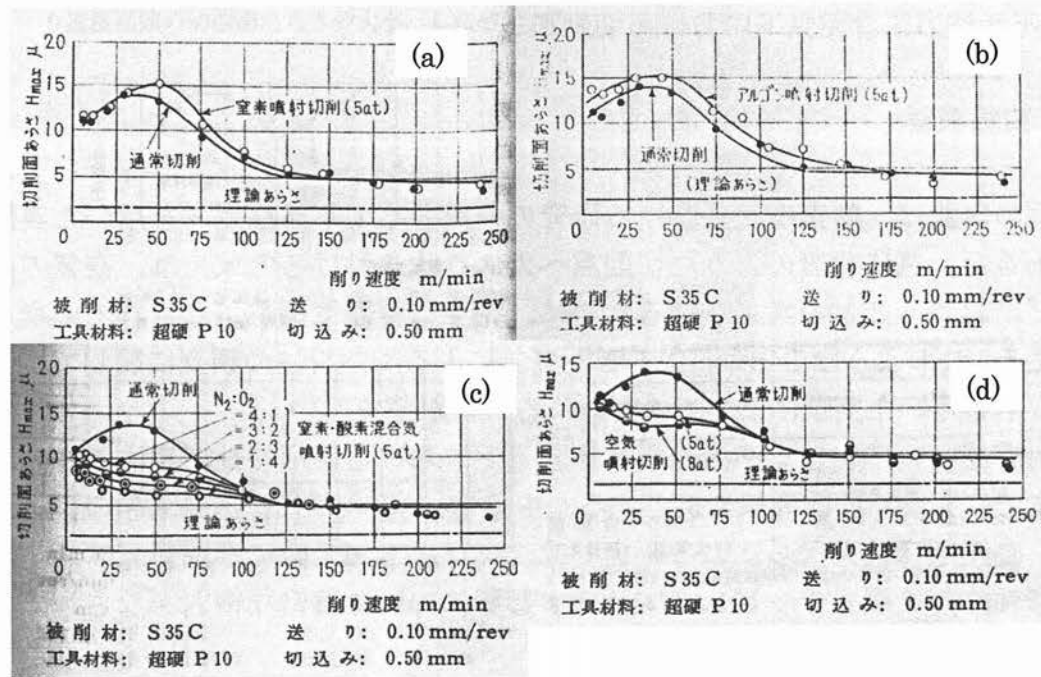


Fig.3.12 (a)窒素噴射切削における切削面粗さと切削速度(b) アルゴン噴射切削における切削面粗さと切削速度(c)窒素・酸素混合噴射における切削面粗さと切削速度 (d)空気噴射における切削面粗さと切削速度

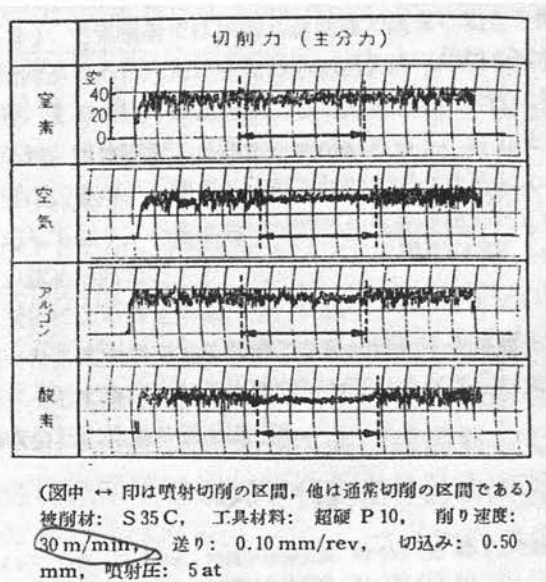


Fig.3.13 酸素噴射における切削主分力

3.6 不活性ガス雰囲気下における切削加工

3.6.1 実験概要

前項の実験は、酸素噴射における研究の一環として不活性ガスを用いた実験例であるが、気体噴射のような切削点へガスを吹き付ける方式では、空気の混入などが起こることが考えられるために、完全に雰囲気調整がなされていないと考える。このようなことから、不活性ガスによる切削特性の調査に関しては、密封容器を用いた実験によって検討されることが望ましい。

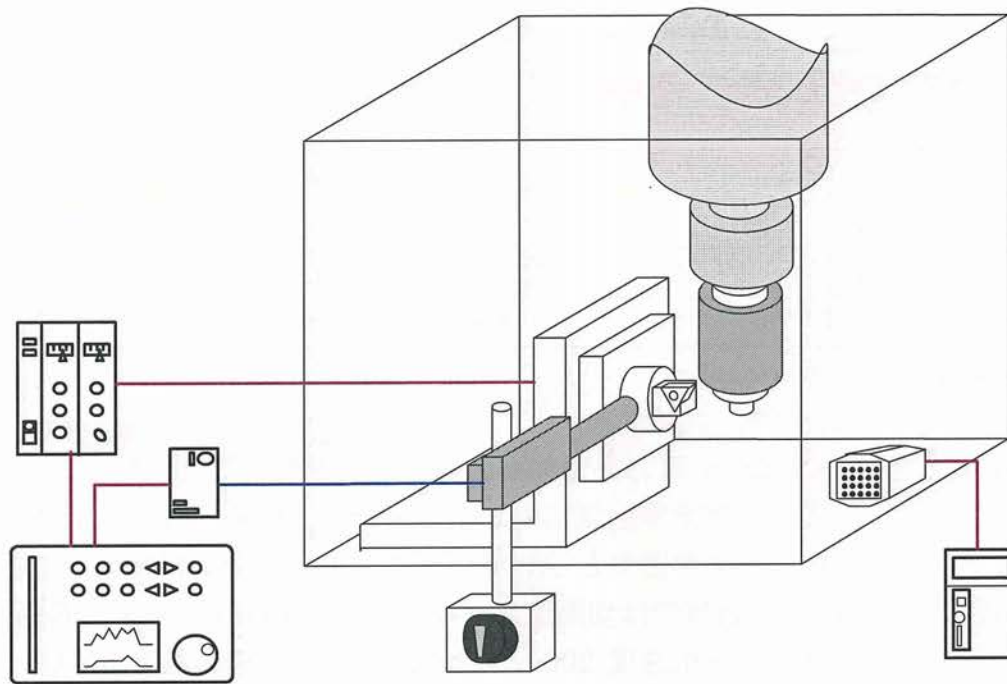
密封容器ないにおける不活性ガス雰囲気下における切削特性に関する研究は、これまでも多くの研究報告例がある、中でも、1980年代に広島大学の山根八洲男、鳴滝則彦氏両氏らによる研究では、フライス加工時に雰囲気ガスがすくい面摩耗や熱亀裂、チッピングに及ぼす影響について綿密な検討がなされている。(3-23)~(3-28)

しかしながら、これらの研究はいずれも1960年代から1980年代にかけてのものであり、現在の工具や工作機械、切削条件と異なる点が多い。従って、より現実的な条件において検討を行う必要があると考えられる。

この点について、不活性ガスが切削加工に及ぼす影響については、2000年の忠政明彦氏が詳細な検討を行っているので、本項では氏の研究より引用させていただき、結果を基に考察を行うこととする³⁻²⁹⁾。なお、切削抵抗や工具摩耗を始め、切削温度などの切削加工に関する基礎理論に関しては論文の末尾に付録として要約することとし、本論文中ではこれらの基礎知識に関する記述は省略する。

3.6.2 実験装置及び切削条件

実験は、図3.14に示すように、エンシュウ(株)製ドリルタップセンタを用いて、主軸に被削材試料を取り付け、アルミ製の密封容器を用いて切削点を密封ガス雰囲気にできるようにした。また、テーブルに円盤型動力計を介してバイトを取り付けるとともに、切削点近傍温度測定用に放射温度計を設置し、切削力及び切削点近傍温度を測定できるような装置を作成した。



①Strain amplifier,②Voltmeter (Recorder),③Optical converter and detector,
④Optical line,⑤Radiation condenser,⑥Cover,⑦Dynamometer holder,⑧Disk
type dynamometer,⑨Shank,⑩Cutting tool (throw away tip),⑪Work (S45C),
⑫ Attachment of work, ⑬ Machining center, ⑭ Oxygen concentration
mesureing system

Fig.3.14 実験装置外略図

実験は、表 3.1 に示すように、切削速度を 100~300m/min, 切り込みを 0.5~1.0mm, 送りを 0.1~0.3mm/rev にそれぞれ変化させ加工を行った。用いた被削材は S45C である。雰囲気ガスとしては、窒素, Ar, 二酸化炭素 (以下 CO₂ と略) を用い、それぞれのガスを密封容器内に充填させ、酸素濃度が 0.2%以下になったときに切削を行うこととした。なお、切削中は酸素濃度上昇を防ぐために 25L/min の流量でガスを噴射した。使用した工具は P 種の超硬工具である。なお、超硬工具を始めとする工具に関する基礎理論については論文巻末の付録の章で述べる。

Table3.1 切削条件

Cutting speed	m/min	100, 150, 200, 250, 300
Depth of cut	mm	0.5
Feed	mm/rev	0.1, 0.2, 0.3
Cutting distance	m	400
Throw away tip		TNMA331, UTi20T(M30)
Atmosphere		Air, N ₂ , Ar, CO ₂

3.6.3 切削抵抗

図 3.15(a)に切り込み 0.5mm において切削速度と送りを変化させた場合の主分力の関係を示す。図より、窒素雰囲気に対し空気中では全体的に 10~20N ほど低い値をとった。また、窒素雰囲気と Ar 雰囲気において主分力は最大 10N 程度であった。更に、CO₂ 雰囲気では切削速度が 100~150m/min では窒素雰囲気とほぼ同じ値であったが、切削速度 200~300mm/min では送りが 0.1, 0.2, 0.3mm/rev と大きくなるほど、窒素雰囲気より 10, 30, 50N ほど低くなった。しかしながら、窒素, CO₂, Ar いずれの条件においても空気中切削とさほど値に差異が生じなかったといえる。

しかしながら、(b)図に示す切り込み 1.0mm の結果では、窒素, CO₂, Ar 雰囲気ともに空気中に比べ切削主分力の値は大きくなった。特に、切削速度 200 m/min (空気中は 250 m/min) を越えると主分力は大きく増大し、空気中に比べ、CO₂ は約 60N 高い値を示し、窒素, Ar では 120N ほど高い切削力となった。

z

z

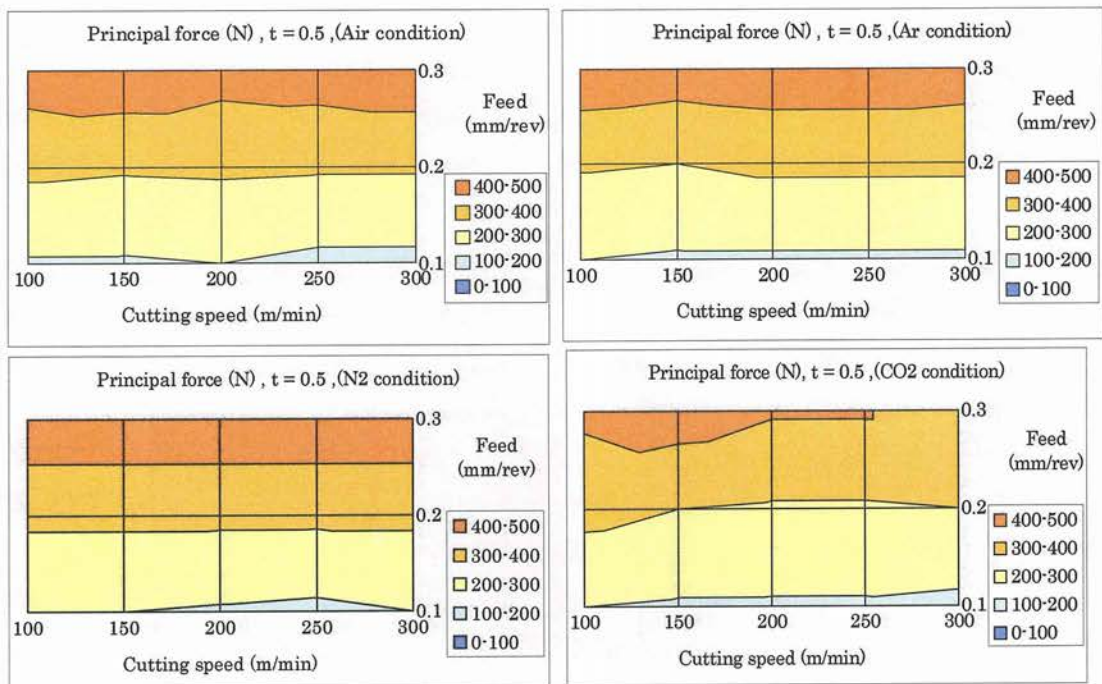


Fig.3.15 (a) 主分力(切り込み $t=0.5$ mm)

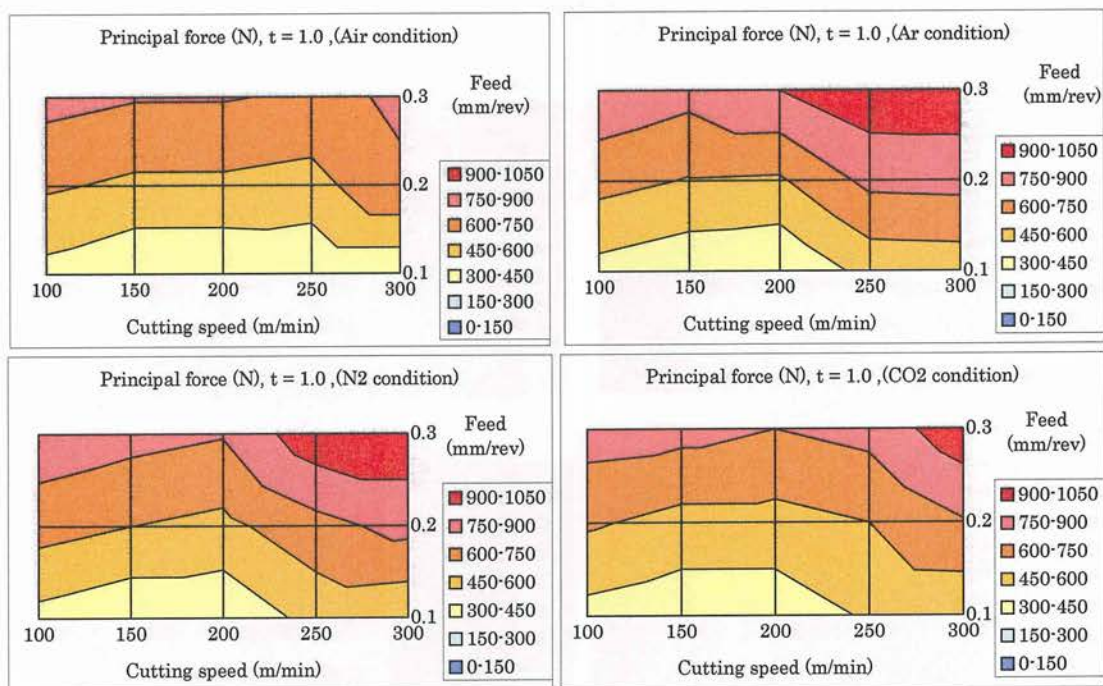


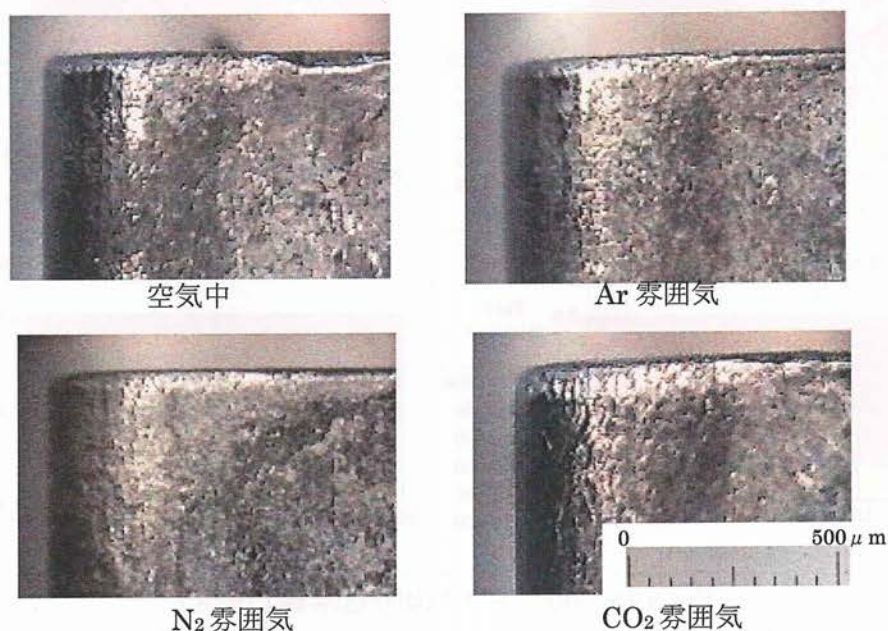
Fig.3.15 (b) 主分力(切り込み $t=1.0$ mm)

3.6.4 工具摩耗

図 3.16(a)に切削速度 100m/min, 送り 0.2mm/rev, 切り込み 0.5mm の条件における工具横逃げ面の顕微鏡写真を示す. この条件は工具の推奨条件範囲内であったことから, 空气中切削においても大きな工具摩耗は発生していないが, 空气中では横逃げ面境界摩耗が進行しているのに対し, 窒素, Ar, CO₂ 雰囲気では境界摩耗は発生しなかった. また, 逃げ面摩耗幅に関しては, CO₂ 雰囲気 が最も大きな摩耗を表し, 窒素, Ar 雰囲気に関しては空气中と同等の逃げ面摩耗をとった.

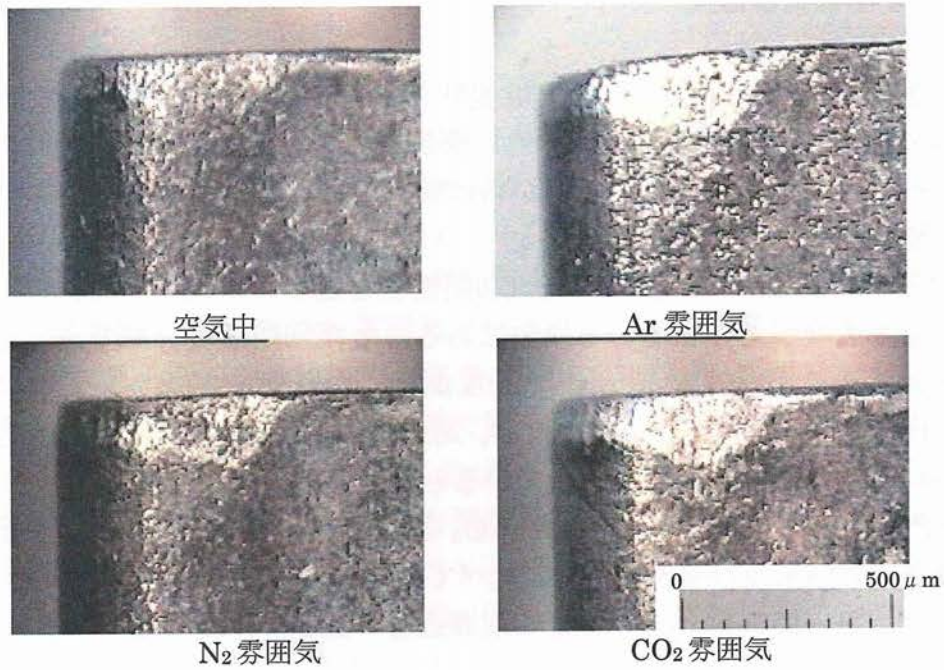
(b)図は切削速度を 200 m/min に上昇させたときの工具の様子である. この条件では, CO₂ 雰囲気中でも空气中よりも大きな摩耗を表し, 窒素, Ar, CO₂ 雰囲気中ともに, 空气中より大きな逃げ面摩耗を示す結果となった.

このような傾向は切削速度を上昇させても, 同様に見られ, (c)図に示す切削速度 250 m/min, 送り 0.2 mm/rev, 切り込み 1.0 mm の条件においても, 窒素, Ar, CO₂ とともに空气中より大きな工具摩耗幅を示した. 更に, この条件においては, 窒素, Ar 雰囲気中において工具に大きな凝着が発生した. が CO₂ 雰囲気中では凝着の発生は見られなかった.



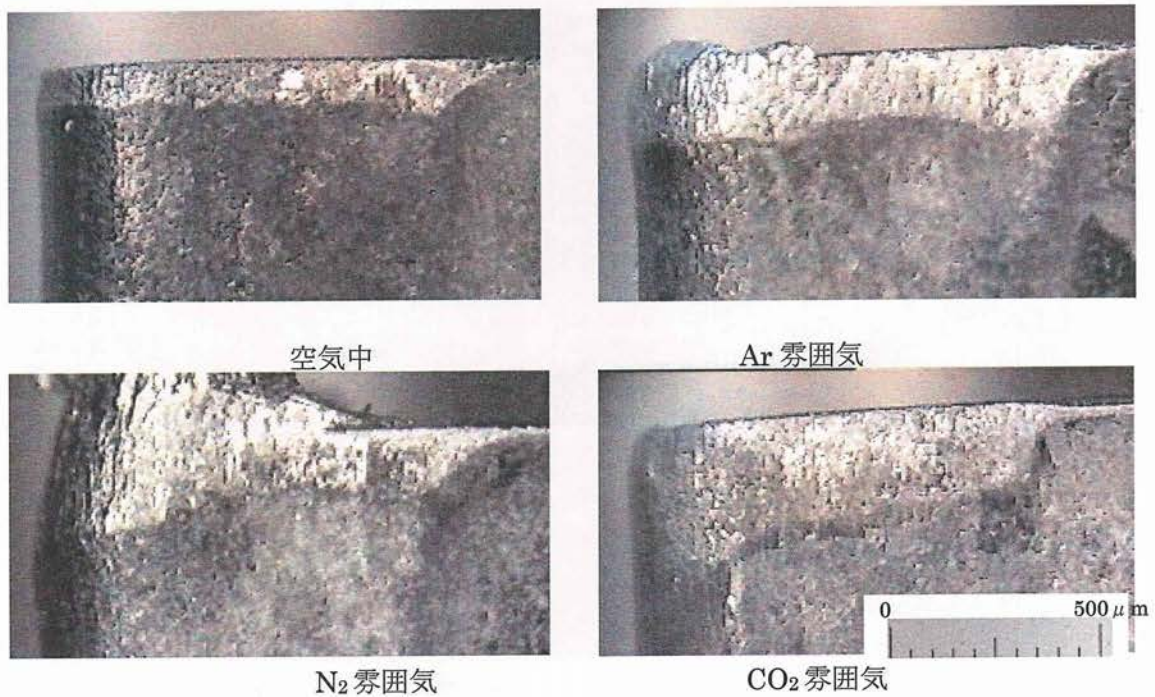
切削速度 100 m/min, 送り 0.2 mm/rev, 切り込み 0.5 mm

Fig.3.16 (a) 工具の横逃げ面摩耗写真



切削速度 200 m/min, 送り 0.2 mm/rev, 切り込み 0.5 mm

Fig.3.16 (b) 工具横逃げ面摩耗写真



切削速度 250 m/min, 送り 0.2 mm/rev, 切り込み 0.5 mm

Fig.3.16 (c) 工具横逃げ面摩耗写真

3.6.5 切削点近傍温度

図 3.14 の装置において、放射温度計を用いて切削点近傍温度を測定した結果を図 3.17 に示す。測定は工具すくい面側から刃先付近に放射温度計の焦点を絞り行った。従って、すくい面側からは切削時常に切りくずが排出されるため、測定値は切りくず温度を指す。

(a)図より温度分布は切削負荷（切削速度と送り）が大きくなれば、切削点近傍の温度が上昇している傾向にある。ただ切削速度一定で送りを変化させたとき、送りが 0.2 mm/rev で温度が低くなる傾向がある。これは送り 0.1 mm/rev だと比較的送りが遅いため、局所的に温度が上昇している状態、いわゆる熱がこもっている状態になっているといえる。

また、空気中に比べ窒素, Ar, CO₂ ともに低い切削点近傍温度を示し、空気中は窒素雰囲気及び Ar 雰囲気と比べて全体的に 30~50℃高く、CO₂ 中では切削速度 100~150 m/min のとき切削点近傍の温度が比較的低い。

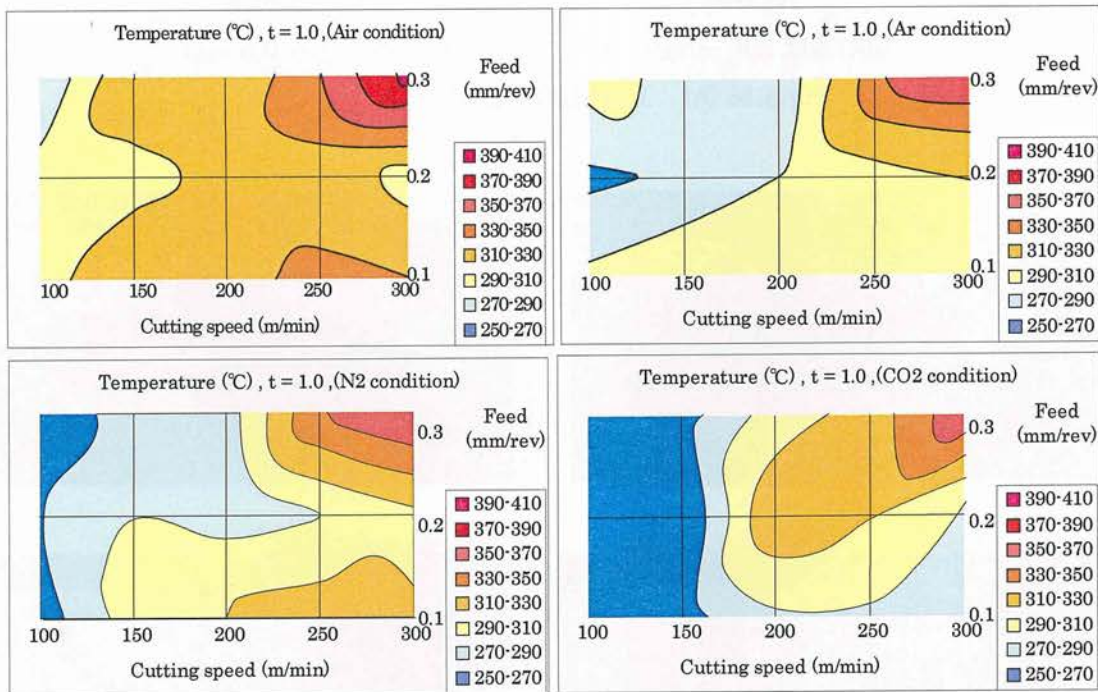
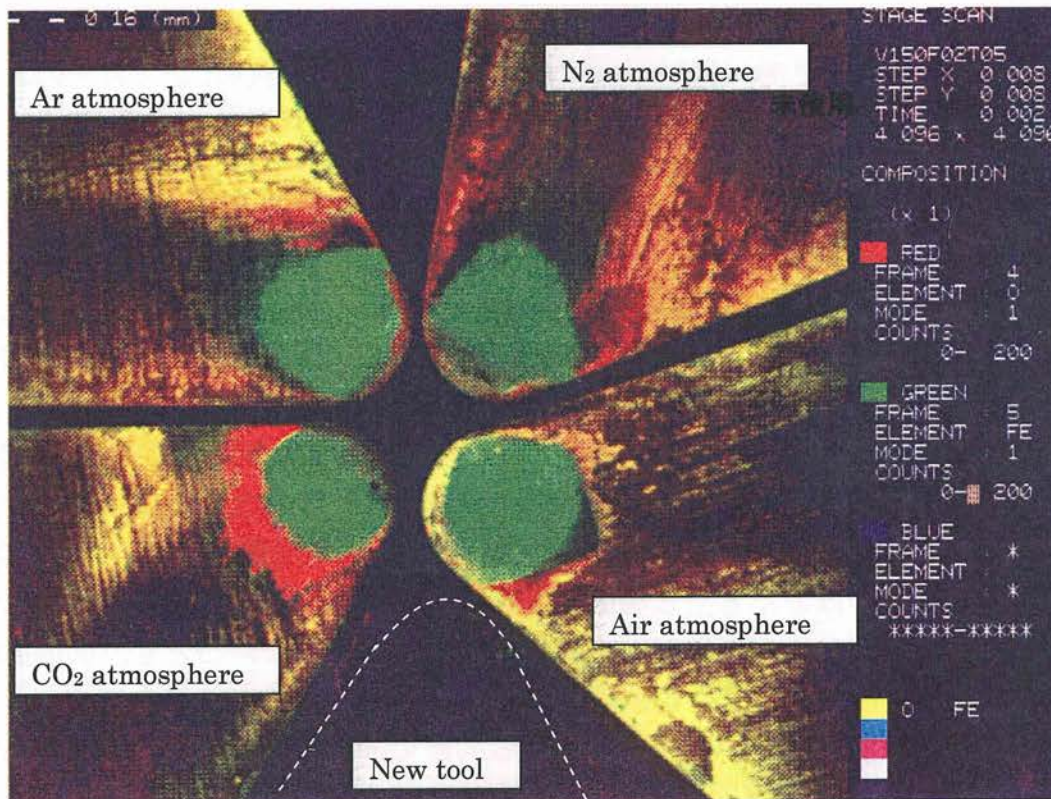


Fig.3.17 切削点近傍の温度（切り込み 1.0 mm）

3.6.6 元素定性分析

図 3.18 に中・高負荷切削条件での面分析結果を示す。中・高負荷切削条件のすべての条件で元素分析を行ったが、元素分布の形状は変わらない。ただ切削負荷が大きくなるとクレータ摩耗内の Fe (緑) の大きさは大きくなる。切削速度より送りの方がより変化が大きい。図より各雰囲気中のクレータ摩耗内に Fe が存在するが O は無い。その Fe は窒素雰囲気と Ar 雰囲気では大きさがほぼ同じで、それより空気中さらに CO₂ 雰囲気と小さくなる。また空気中の切れ刃に O と Fe が同時に見られるが、他の雰囲気では確認できない。境界摩耗の位置に Fe が無く O のみが存在場所が各雰囲気で見られる。さらにそのような場所が CO₂ 雰囲気においてはクレータ摩耗内に Fe が存在する場所より被削材から遠ざかる位置にある。Al, Si はそれらの O と同じ場所に分布している。W, Co は窒素雰囲気より空気中のほうが若干少ない。Ta, Ti は図 4.6.2 と同じようにクレータ摩耗部だけ減少した。N, Mn, Ca, P, S についてはほとんど違いが見られなかったので省略する。



Fe(緑)とO(赤)

Fig.3.18 Fe と O₂ の元素分析結果

3.6.7 考察

このように、窒素, Ar, CO₂ 雰囲気中における切削では, 切削抵抗, 加工点近傍温度, 工具摩耗などの点について大気中での加工と違った特性を表した。

実験結果からは, 窒素雰囲気中と Ar 雰囲気中の切削において似通った特性を示したのに対し, CO₂ 雰囲気中の切削は大気中切削に似た特性を示したといえる。

空気の組成は図 3.19 に示すように, N₂, O₂, Ar, CO₂, He, Ne である。このうち, Ar, He, Ne は不活性であり, 窒素は準不活性である。また, 元素分析の結果から, N 元素の濃度に関して各条件であまり差異が見られなかったことから, 切削加工に雰囲気が影響を及ぼすのは O₂ と CO₂ であると思

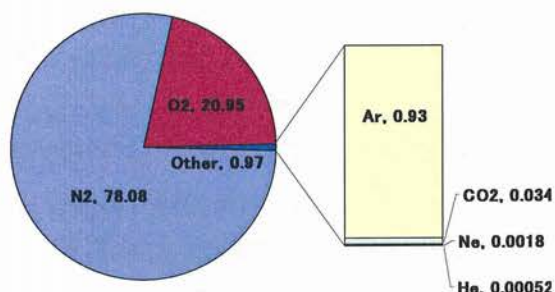


Fig.3.19 空気の組成

われる。このことから, 空気中と CO₂ が似た特性を表し, また, 窒素と Ar の切削特性が似通っていたこともこのことに影響を受けたものと思われる。

また, 切削に最も影響を及ぼす元素は O₂ であり, 窒素, Ar, CO₂ が空気中と違った結果を示したのはこのためである。切削により生じる新生面は化学的に非常に活性であることから, そこに O₂ が存在すると, 酸化反応が生じる。そのことにより, 工具や被削材表面には酸化形成物が形成される。酸化生成物は主に酸化皮膜として被削材表面層に生成され, 摩擦係数が 0.2 程度と低い。このことにより, 空気中に比べ窒素, Ar, CO₂ において切削抵抗が低くなったのもこのことによるものである。また, 切削抵抗に関しては, 切削熱も影響を及ぼしているものと考えられる。一般に, 切削温度が上昇すると, 被削材は熱軟化し, 被削材のせん断力が減少する。窒素, Ar, CO₂ 雰囲気中切削では酸化反応が抑制され, 酸化熱がほとんど生じない。これにより, 切削温度は低い値となるために, 空気中切削に比べ, 被削材の熱軟化があまり生じないことも, 切削抵抗が大きい値をとった一因であると考えられる。

切削抵抗が上昇すると, 工具に対しても大きく影響を及ぼす。逃げ面摩耗において窒素, Ar, CO₂ 雰囲気中とともに大気中よりも大きな摩耗量を示したことも, 切削抵抗に影響を受けたものであると考えられるが, 逃げ面摩耗に関しては, 上述の酸化皮膜形成による潤滑効果によるところが大きい。

さらに, 工具逃げ面に関しては, 空気中では横逃げ面境界摩耗が進行したが, 窒素, Ar, CO₂ 雰囲気中では境界摩耗はあまり見られない。工具境界部では,

大気と、切削時より生じた新生面が接していることになる。また、この部分は、切削と非切削領域の境であることから、熱的、化学的活性度ともに大きな違いがある。このことから、大気中では新生面の酸化熱と切削発熱から、熱衝撃として工具にエネルギーが伝わり、大きな境界摩耗が生じた。しかしながら、窒素、Ar、CO₂では、酸化発熱が抑制されるとともに、切削温度自体も抑制されることから、境界摩耗がほとんど生じない結果になったと思われる。

また、工具に関しては、窒素と Ar で工具すくい面に凝着が生じたが、CO₂雰囲気では凝着は見られなかった。これに関しては、図 3.18 で示した EPMA の結果から、CO₂雰囲気中では窒素、Ar と違い、空気中の結果同様に O₂ が多く検出されたことから酸化生成物が及ぼす潤滑効果の影響がうかがえる。EPMA の結果では、窒素、Ar とともに O₂ が検出されず、Fe のみが多くすくい面に見られた。これは肉眼でも観察でき、空気中と CO₂ では窒素や Ar と異なり、すくい面上に黒ずんだ所が確認され、これが酸化物であると思われる。記述のように、切削によって生じた切りくずは非常に活性度が高く酸素が存在すれば酸化物を形成する。しかしながら、酸素が十分なければ酸化物を生成できず、切りくずは活性度が高い状態のままである。このような状態の切りくずが再び工具に凝着を起こす結果となったことが、EPMA の分析で窒素や Ar 雰囲気において Fe のみが検出されたことよりわかり、また、工具に凝着を生じた原因である。また、すくい面では逃げ面と異なり、工具と切りくずは高圧下で接しているとともに、切りくずは塑性変形のエネルギーによって高温となっている。ここでは、すくい面と切りくずが見かけの接触面積内の 80% 以上が真実接触面であるとされる。従って、すくい面では摩擦力は溶着部のせん断力であり、全面接触下では、せん断力は垂直荷重には無関係な一定値（材料の降伏応力）になり、接触面積の大小が重要である。ゆえに Fe のみが凝着している面積が窒素雰囲気と比べて小さい空気中では、接触面積も小さいと考えられ、空気中で窒素雰囲気や Ar 雰囲気より常に切削力が低かった理由の一つであると考えられる。

また、窒素や Ar 雰囲気下では比較的厳しい条件において凝着が見られたことも、活性度の高い切りくずが、より高圧・高温下にさらされる条件のほうが凝着が起こりやすいことに関係するものである。

雰囲気ガスが切削抵抗に及ぼす切削特性の変化に関しては以上に述べたとおりであるが、さらに、忠政氏は雰囲気ガスの密度及び吐出温度の観点から興味深い検討を行っているので、以下に抜粋させていただく³⁻¹⁹⁾。

・ 窒素雰囲気とアルゴン雰囲気の違い

気体の特性によって切削加工が影響を受けるとしたら、両気体は化学的に不活性化それに近い気体である事を考えると、温度への影響が考えられる。つまり気体の熱伝導率や、高圧で液体として存在するガスボンベからチューブを経由してアクリル製カバー内に排出されたそれぞれの気体の温度が、影響を与える要因となる。

そこでまず熱伝達の次元解析を行い、実際に各気体の熱伝達率を求めてみる。固体表面と流体との間の熱移動の大小を示すものは、熱伝導率 α である。強制対流熱伝達において、熱伝達率に影響すると考えられる独立因子をまず列挙してみると、流体の密度 ρ 、粘性係数 μ 、熱伝導率 λ_f 、比熱 c_p 、速度 ω 、それに物体の代表寸法 l などである。これらの因子の基本次元を取り、無次元数にまとめて整理すると

$$\left(\frac{\alpha l}{\lambda_f}\right) = f\left[\left(\frac{\omega l \rho}{\mu}\right), \left(\frac{c_p \mu}{\lambda_f}\right)\right]$$

と表示される。左辺の無次元数をヌセルト数 Nu (Nusselt number), 右辺の初めの無次元数をレイノルズ数 Re (Reynolds number), 右辺第二の無次元数をプラントル数 Pr (Prandtl number) という。これらの無次元数で上式を表すと、

$$Nu = f(Re, Pr)$$

と書くことができる。関数系 f は幾何学的な形状などにより異なり、理論的又は実験的に定められる。

水平平板上の境界層が層流であるときの熱移動について考えてみる。物体の長さ l まで加熱されている平板の平均ヌセルト数 Nu は

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_f} = 0.664 \sqrt{Pr} \sqrt{Re}$$

となり、よって平均熱伝達率 α は次式で表される。

$$\alpha = 0.664 \frac{\lambda_f}{l} \sqrt{Pr} \sqrt{Re}$$

流体の種類だけを変え、あとの条件を同じとすると上式は、

$$\alpha = C \times \frac{\lambda_f}{\nu} \sqrt{Pr}$$

$$C = 0.664 \frac{\omega}{\sqrt{l}} = \text{const}$$

となり，平均熱伝達率 α の変数は動粘度 $\nu\left(=\frac{\mu}{\rho}\right)$ ，熱伝導率 λ_f ，プラントル数 Pr となる．そこで表 3.2.2 より空気，窒素，酸素，アルゴン，二酸化炭素の，常圧におけるそれぞれの温度の平均熱伝達率を求め表 3.2 に示す．さらに，各気体の蒸発熱及び昇華熱，ボンベから排出時における気体の温度測定値，切削点に温度計を設置して，気体を実験の要領で排出したときの切削点の温度測定値を表中に示す．表より，熱伝達率は Ar より窒素のほうが高い．そのため窒素雰囲気のほうが Ar 雰囲気より切削熱を冷却することができ，切削点近傍温度は下がる．またボンベから排出された気体の温度も，切削点での気体の温度も窒素と Ar では窒素のほうが低い．

また，窒素と空気の密度はほぼ同じ（標準状態で 1.25, 1.29kg/m³）．そこでアクリル製カバー内の空気を置換して書く雰囲気にする際，密度差の大きい Ar なら置換しやすいが，窒素は置換しにくいと考えられる．そのため酸素が Ar 雰囲気より多く，切削時に酸素の影響が Ar 雰囲気より多いと考えられる．

Table 3.2 雰囲気ガスの特性に関する計算結果

	Evaporation or Sublimation kJ/mol	Temperature of cutting point °C	Temperature of vapor °C	Temperature K	Heat transfer coefficient (×C) W/m ² k	Rate of heat transfer coefficient
Air	12.5			273.15	5.93	1.00
				300	5.90	1.00
N ₂	5.58	12.0	9.0	240	5.97	
				273.15	5.90	0.99
				300	5.85	0.99
O ₂	6.82			240	6.01	
				273.15	5.99	1.01
				300	5.97	1.01
Ar	6.519	11.5	8.0	240	4.22	
				270	4.18	0.70
				300	4.15	0.70
CO ₂	25.23	8.0	0.0	240		
				273.15	5.12	0.86
				300	5.26	0.89

・CO₂雰囲気

CO₂は酸化及び還元両方の特性を持っており、化学的にどのような反応が起こっているのかを考察するのは非常に困難である。それによって切削点近傍より、切削温度が低くなっていることが考えられる。さらに切削温度が低いためアブレーション摩耗が大きいのが説明できる。

3.7 結言

切削と酸素の関係を調べる方法として、真空中切削や、気体噴射切削、気体雰囲気中切削などがあり、こられは昭和30年代より行われてきた経緯がある。本項で述べたこれらの結果をまとめると、以下のようなものである。

真空中切削

- ・ 真空度が増加するほど切削抵抗が増加する。
- ・ 真空度が増加すると工具に付着物の発生が見られ、仕上げ面粗さが上昇する。

酸素噴射切削

- ・ 酸素を噴射して切削を行うと切削力の低下が見られるが、窒素ガスやアルゴンガスを噴射すると切削力は増加する。
- ・ 酸素噴射切削では、酸素濃度が減少するほど（窒素濃度が増加するほど）良好な仕上げ面を得る

窒素雰囲気中切削

- ・ 切削条件が厳しくなるほど、大気中切削と窒素雰囲気中切削では切削抵抗値に差異が見られ、窒素雰囲気中切削では大きな値をとった。
- ・ 工具摩耗や、切削点近傍温度に関しても、厳しい切削条件で大気中切削と窒素雰囲気中切削では切削抵抗値に差異が見られ、窒素雰囲気中切削では大きな値をとった。
- ・ 窒素雰囲気中やアルゴン雰囲気中切削では、工具に凝着が見られた。

このように、真空中切削や、気体噴射切削、不活性ガスを用いた雰囲気中切削など、いずれの加工法に対しても、酸素を除外した環境で切削加工を行うと、切削抵抗の上昇し、工具に激しい凝着が生じるとともに、それに伴う工具の損傷が生じるという点について一致するものである。

このことから、次章では窒素雰囲気中切削における工具への凝着の改善を図る。

第4章 窒素雰囲気中切削における凝着の改善

4.1 緒言

前章の実験により、不活性ガス雰囲気中では、切削抵抗は上昇するものの、酸化反応により生じる酸化熱を低減し、切削熱を低減させるとともに、境界摩擦を低減できることが判明した。しかしながら、窒素やアルゴン雰囲気中では、工具すくい面に凝着が生じる。このような工具への凝着が欠損やチッピングに及ぼす影響については、山根八洲男氏や鳴滝則彦氏らも同様の報告を行っている通りである^{3-23)~3-25)}。この凝着の改善ができれば工具寿命の改善が可能になると考えられるが、不活性ガス雰囲気中における工具凝着改善に関する報告はほとんどなされていない。そこで、本章では、窒素雰囲気中における工具への凝着の改善を図る。更に、本節では窒素雰囲気中切削をミーリング加工に適用し、その有効性について見当を行った。

なお、旋盤を用いた旋削加工における工具凝着問題の改善に関しては、2001年度から2002年度まで、小林直樹氏や浜崎貴裕氏、天野祥毅氏らにより、詳細な実験が行われているので、そちらの結果をあわせて引用させていただくとともに、それを基に検討を行うこととする⁴⁻¹⁾。

4.2 旋削加工における窒素雰囲気中切削の凝着改善

4.2.1 超硬合金工具を用いた窒素雰囲気中旋削加工

(1) 実験概要

窒素雰囲気中における旋削加工の切削特性を調べるにあたり、本項ではまず超硬チップを用いた連続旋削加工実験を行う。実験に用いた装置は前3.6項と同様エンシュウ(株)製ドリルタップセンタ E130 であり、主軸に被削材をセットし、アルミ製の密封容器内にて窒素雰囲気を作成し旋削加工を行った。被削材としては機械部品をはじめ、プラスチック金型など幅広く用いられる S45C を用いた。

実験は酸素濃度 0.2%以下になったときを窒素雰囲気とし加工を行った。なお、本項における実験も前項同様、加工中に酸素濃度の低下を防ぐために密封容器に常に窒素ガスを 25L/min を行っている。

窒素雰囲気中切削では、前項にて明らかになったように、通常切削条件のような、比較的負荷の低い切削条件では、大気中加工とあまり違いが見られない。従って、本項では、工具メーカー推奨値である切削速度 100m/min よりも高い

切削速度 200m/min, 送り 0.2mm/rev, 切り込み 1.0mm にて行った. 実験に用いた切削条件を以下に示す.

Table4.1 切削条件

切削速度	[m/min]	200
切り込み	[mm]	1.0
送り	[mm/rev]	0.2
チップ		UTi20T TNMG160404
雰囲気		空気, 窒素雰囲気
切削形態		連続

(2)実験結果及び考察

切削加工後に採取した切りくずの写真を図 4.1 に示す. 窒素雰囲気中加工では切りくずは被削材生材色である銀色の切りくずが発生した. このことから, 窒素雰囲気中では酸化反応がほとんど発生していないことが見て取れる. 従って, 窒素雰囲気中では切削温度の低減が図れているものと考えられるが, 図 4.2 に示す切削距離 300m における工具の写真をしてみると, 窒素雰囲気中では刃先に激しい凝着と欠損が確認できる. なお, 図の上部はすくい面を, 下部は横逃げ面である. 空気中では欠損が生じていないことから, 工具の欠損は切削条件が厳しいことによる損傷ではなく, 窒素ガスに起因するものであるといえる. また, 図 4.3 は切削時の主分力の値であるが, 切削抵抗に関しては前章にて既述の通り, 窒素雰囲気中では約 50N 程大きな値をとることがわかる. 従って, 工具の欠損は酸化皮膜の形成が大きく関与している. 窒素雰囲気中では酸化皮膜が形成されないために 3.6.3 項で述べたように切削抵抗が上昇する. このことにより, 切削時にかかる負荷が増大するため, 欠損が生じたと考えられる. また, 工具損傷状況を見てみると, 窒素雰囲気中の逃げ面はアブレッシブ摩耗が生じており, 欠損を引き起こした要因はみられない. 一方, 工具すくい面は激しい凝着が見られることから, 欠損はすくい面から起こったといえる. すくい面は常に切りくずと接しているために高温となるが, このような状態では, 摩擦や潤滑が非常に重要な要因になる. 切削によって生じた切りくずは, 非常に化学的に活性な状態にあるが, 窒素中では切りくずが酸化反応しないために, 摩擦係数は高い状態にある. 酸化皮膜を持たない Fe は 3.3 項で述べたように, 摩擦抵抗が 4 以上とも言われるが, このような状態にある切りくずがすくい面と高圧, 高温化で接していると, 排出されず再び工具に付着する. これが工具への被削材凝着のメカニズムである. このようなすくい面における潤滑不足は切削

抵抗を上昇させ、このような凝着の発生や切削抵抗の増大が欠損を招いたと考えられる。

また、窒素雰囲気中では切削距離 170m 付近から切削抵抗が急激に増加していることから、工具の欠損はこの付近で生じたと考えられる。

一方、切削時の潤滑不足はすくい面のみならず、逃げ面においても影響を与える。逃げ面はすくい面と異なり、被削材と工具が常に擦れ合うことから、アブレッシブ摩耗として進行するが、このとき潤滑不足に陥ると急激に摩耗が進行する。しかしながら、逃げ面に摩耗に関しては、酸化や温度による摩耗も密接に関係を及ぼすが、図 4.4 に示す仕上げ面の状態より、窒素中では前逃げ面においても潤滑不足に陥っていることがわかる。

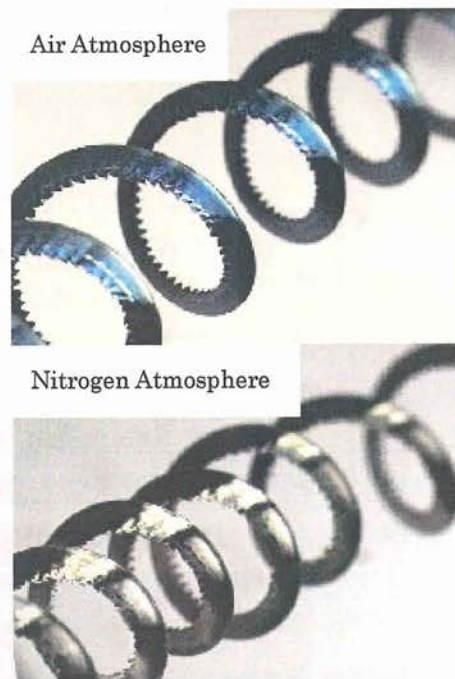


Fig.4.1 Microscopic images of chip

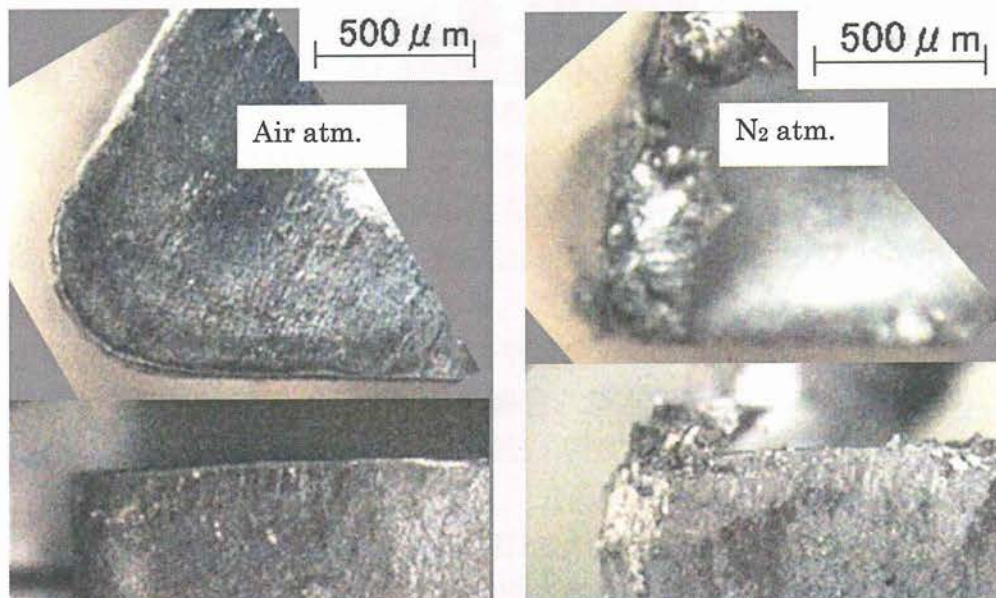


Fig.4.2 工具頭微鏡写真

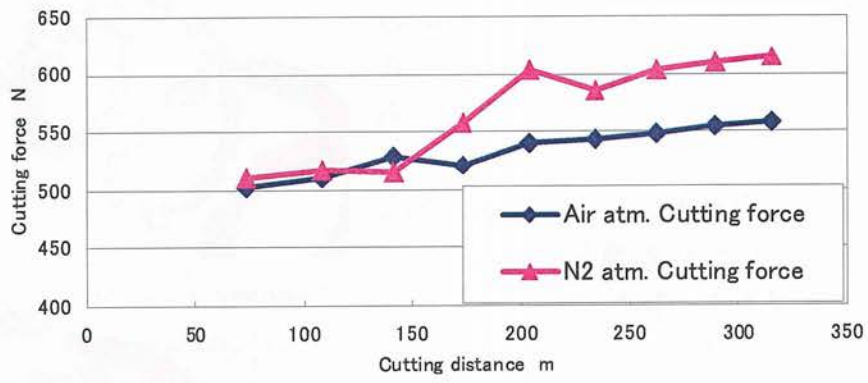


Fig.4.3 切削抵抗

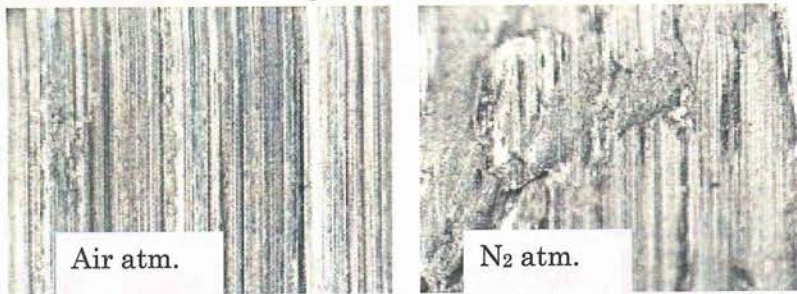


Fig.4.4 仕上げ面状態

4.2.2 コーティング超硬合金工具を用いた窒素雰囲気中旋削加工

(1)実験概要

超硬工具における実験では、窒素雰囲気中切削では工具に凝着、欠損が生じた。その原因としては潤滑不足が最も影響を及ぼしたと考えられる。このことから、本項では工具材種を変更することにより改善を試みる。

工具材種により工具欠損を改善する方法としては、摩擦係数が低く、耐溶着性、熱的安定性、対摩耗性などの高い工具の使用が挙げられる。

図 4.5 は前項の実験で用いた超硬工具の電子顕微鏡写真である。この工具 WC-TiC-Ta-Co 系の組織であり、耐熱性、対塑性変形性に優れ、バランスがよく汎用性の高い工具であるが、耐溶着性や対摩耗性に劣るという性質を持っている。従って、これよりも耐溶着性などに優れた工具材種を使用することによって窒素雰囲気中切削の凝着問題を改善できる可能性がある。そこで、本項では多層コーティング超硬合金工具（以下、コーティング工具と略）を用いて実験を行う。また、前章で述べたような種々の雰囲気調整に関する研究は、主に昭和 40 年～50 年のものであったことから、これらの実験では不活性ガスを用いた切削加工において、コーティング工具を使用した検討の例は見られない。

(b)図はコーティング工具の電子顕微鏡による組織写真である。図に示すように、コーティング工具では工具に求められる様々な要求に対して、それぞれ適切なコーティングを多層に積層させることによって、工具性能を高めている。また、(c)図はそれぞれの組織と特性を示したものである。一般的に、コーティング工具では、超硬合金を母材として、その上に Ti 系化合物や酸化アルミニウムなどを積層させることが多い。これにより、超硬合金により硬さと靱性を確保しつつ、各種コーティング層の持つ安定性や耐溶着性、対摩耗性を補うことが出来る。多層コーティングを施した工具の場合、最上部に TiN 系のコーティングを施す場合が多いが、これは摩擦係数の低い TiN による耐溶着性を得ることは勿論、TiN は金色の発色を示すことから、工具摩耗を確認しやすいという特徴もある。近年の工具では、上部から二層目には熱安定性を得るため Al_2O_3 膜を皮膜処理することが多いが、ほとんどの場合膜厚は薄い。従って、多層皮膜処理を行った工具において耐摩耗性を確保する役割を持つのは比較的圧膜である TiC 膜と最上部の TiN である。

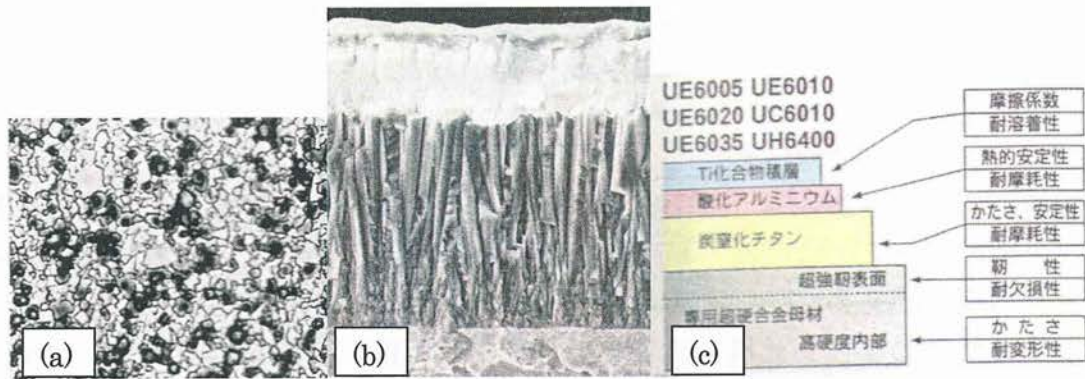


Fig.4.5 コーティング皮膜 4-2)

更に、図 4.6 は論文巻末付録第 7 節の工具材種の実験における使用工具に当てはめたものである。前節で使用した工具は UTi20T であり、本節における使用工具は UC6010 である。図からも見て取れるように、コーティング工具は超硬工具よりも基本的性能が優れているために、切削速度や送りなどの切削条件を高くすることが可能である。前節の切削条件が、切削速度 200m/min であったのに対し、本節では切削速度 300m/min に増加させ、送り 0.2mm/rev、切り込み 1.0mm にて切削実験を行った。実験に用いた切削条件を表 4.2 に示す。

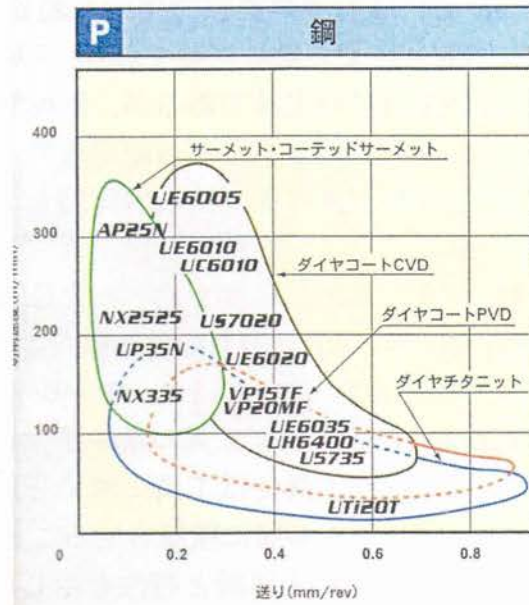


Fig.4.6 工具特性 4-2)

Table4.2 切削条件

切削速度 [m/min]	300
切り込み [mm]	1.0
送り [mm/rev]	0.2
チップ	UC6010
雰囲気	空気, 窒素雰囲気
切削形態	連続

(2)実験結果

図 4.7 に切削距離と切削抵抗の関係を示す。本実験における切削条件は、前項の超硬工具を用いた場合と比べ、切削速度が 100m/min 増加しているが、主分力と送り分力は前項の実験に比べ約 100N 低い値となった。このことから、コーティング工具が摩擦係数が低く、耐溶着性に優れていることがわかる。ま

た、超硬工具の実験結果では、窒素雰囲気中が空気中に比べ約 50N 主分力の値が大きかったが、コーティング工具では殆ど値に違いは見られない。従って、切削抵抗の結果からも、窒素雰囲気中では凝着の発生が抑制できていることが考察できる。

工具摩耗に関しては、窒素雰囲気中で加工を行った場合、図 4.8 に示すように切削距離 600m までは良好な切削が行えているが、切削距離 1200m ではすくい面に大きな凝着が生じる結果となった。凝着が切削抵抗の増大を招く一因となるとことは既述の通りであるが、本実験においても、切削距離約 900m から窒素雰囲気中では背分力の値が増加した。また、切削抵抗の変化は背分力のみならず、主分力にも影響を及ぼし、窒素雰囲気中では切削距離 800m 前後から値の乱れが生じている。従って、窒素雰囲気中ではこの付近から凝着が発生したものと考えられる。これについては、図 4.9 に仕上げ面粗さの結果からも、窒素雰囲気中で切削距離 900m から 1200m の間で粗さ値が急激に増加することからも考察できる。さらに、工具すくい面を観察してみると、切削距離 900m までは空気中、窒素雰囲気中ともにほぼ同じ場所に摩耗が見られる。窒素雰囲気中では切削距離 1200m で凝着が生じているが、凝着の発生場所は、逃げ面の摩耗場所と一致していることがわかる。このことから、窒素雰囲気中では、コーティング層が存在する間は凝着を抑制できるが図 4.10(a)、すくい面のクレータ-摩耗が進行し、(b)図のようにコーティング層が摩耗し、母材の超硬合金がむき出しになるとその場所から凝着が起こり、成長することが見て取れる。

以上のような点から、コーティング工具を用いた窒素雰囲気加工では、ある程度の切削距離までは凝着が生じず良好な切削が行えるが、切削距離が増加しコーティング層が摩耗あるいは剥離すると、超硬母材を起点に凝着が発生することが確認された。

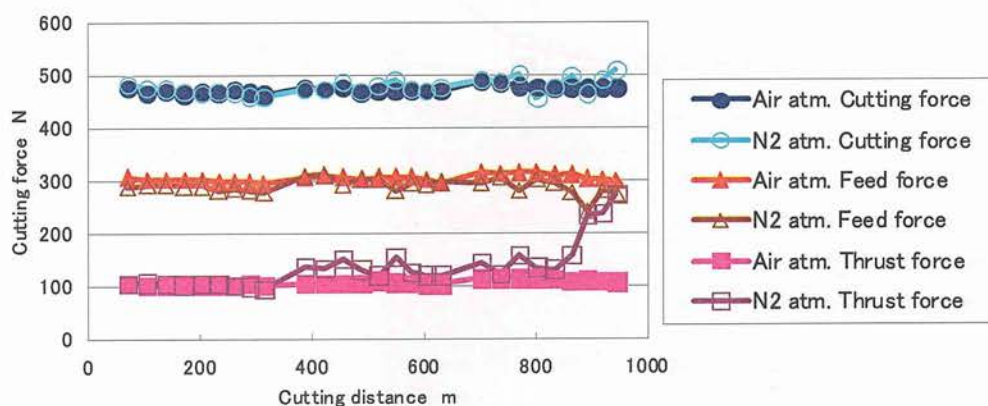


Fig.4.7 切削距離と切削主分力

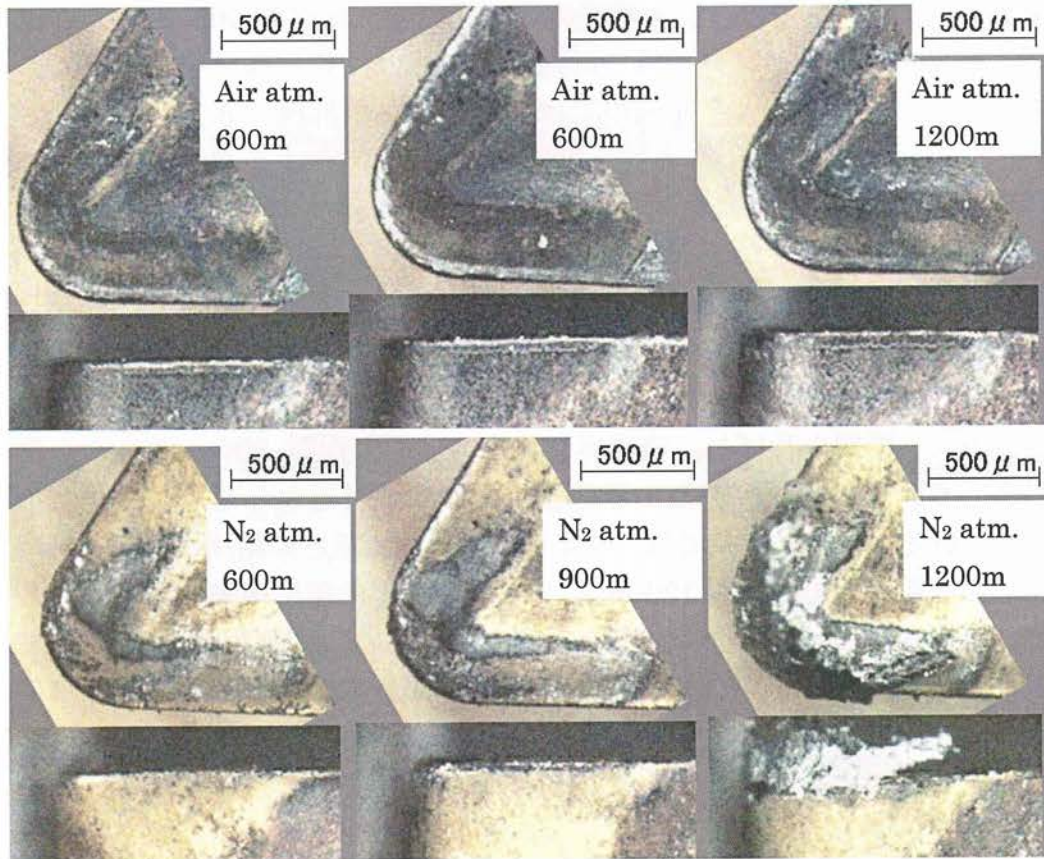


図 4.8 工具頭微鏡写真

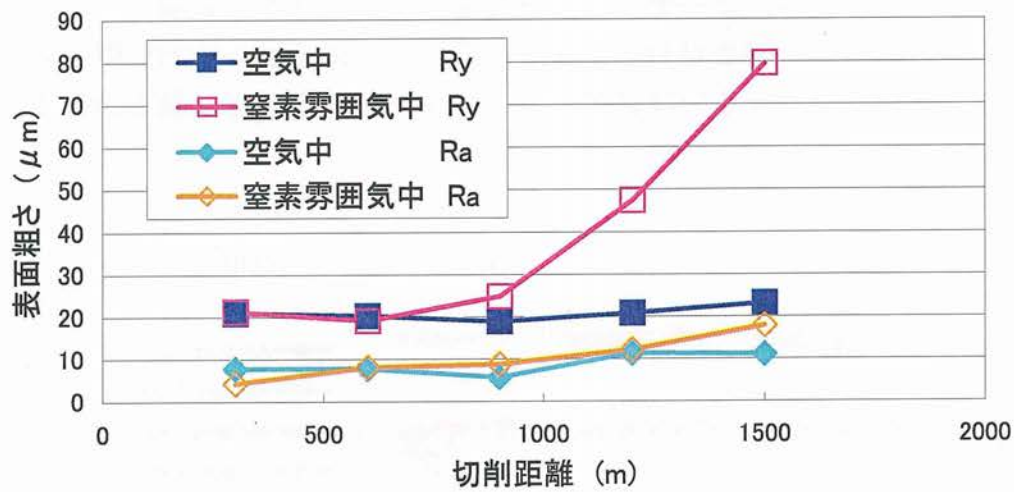


Fig.4.9 仕上げ面粗さ

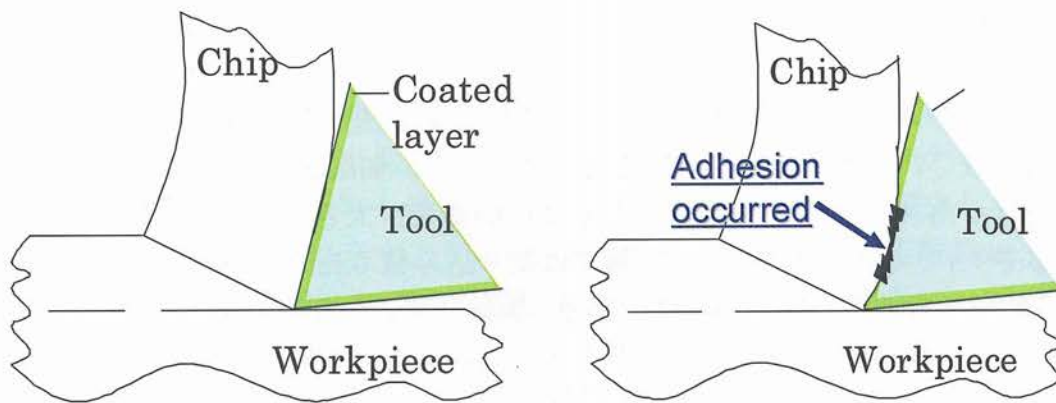


Fig.4.10 コーティング層の劣化による凝着の発生モデル

4.2.3 サーメット工具を用いた窒素雰囲気中旋削加工

(1)実験概要

前項までの実験では、窒素雰囲気中切削では、超硬工具を用いると工具に凝着が生じそれに伴う欠損が発生するが、コーティング工具を用いることによって、凝着の改善が見られたといえる。しかしながら、コーティング層が摩耗、剥離すると再び超硬母材を起点に工具すくい面に凝着が発生した。

この結果より、工具のコーティングが凝着の改善に非常に有効的であると考えられることから、本項では工具材種自体に耐溶着性、対摩耗性の特性を持つサーメット工具を用いて凝着改善を試みる。

図 4.11 は電子顕微鏡による工具断面組織写真である。前項の実験で用いたコーティング工具は超硬母材の上に耐摩耗性や熱安定性などの特性を持つ材種を多層に積層させることにより工具としての性能を向上させていたが、(b)図のサーメット工具は超硬工具における WC を TiC に、Co を Ni に置き換えることによって工具自体に耐酸化性や耐溶着性を持たせたものである。今回使用するサーメット工具は TiN 系サーメットである。TiN 系サーメットは TiC・TiN 系サーメットであり、Ni, Mo, Co を添加した細かい組織の窒化物系サーメットであり、従来サーメットに比べ、靱性、耐熱性にも優れた工具である。

窒素中切削ではコーティング層が剥離し超硬母材が現れたときに凝着が生じたが、サーメット工具では、工具自体がコ

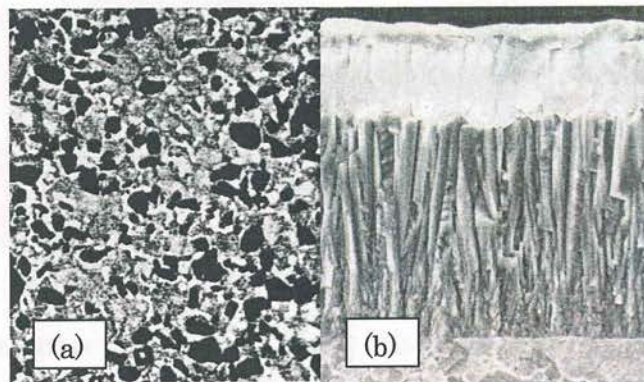


Fig.4.11 工具断面組織⁴⁻²⁾

ーティング材種であるような特性を持つため、凝着の改善が図れると考えられる。

使用するサーメット工具のメーカー推奨条件は切削速度 180m/min であるが、前項同様に厳しい条件下で切削実験を行うこととし、切削速度 200~400m/min の値にて行った。また、サーメット工具は切削負荷が大きいとチッピングや欠損が生じやすい。そのことから、本実験では切り込み値 0.5mm, 送り 0.1mm/rev とした。被削材は前項同様に S45C である。実験に用いた切削条件を表 4.3 に示す。

Table4.3 切削条件

切削速度 [m/min]	200, 300, 400
切り込み [mm]	0.5
送り [mm/rev]	0.1
チップ	NX2525 TNMG160404-FH
雰囲気	空气中, 窒素雰囲気
切削形態	連続

(2) 実験結果及び考察

図 4.12 に各条件における工具の写真を示す。なお、図の上部はすくい面、下部は横逃げ面、左下は工具先端部分を示している。前項のコーティング工具を用いた切削実験では、コーティング層の摩耗とともに凝着が発生したが、サーメット工具では(a)図に示すように切削速度 200m/min で切削距離 5km まで切削行っても、窒素雰囲気中切削では凝着が生じなかった。さらに、切削速度を 300m/min(b)図, 400m/min(c)図, と上昇させても窒素中切削ではすくい面に凝着は生じなかった。しかしながら、切削速度 300m/min や 400m/min では逃げ面に大きな溶着が生じる結果となった。窒素雰囲気をを用いた研究は昭和 30 年代より様々な報告があるが、通常はすくい面に凝着が生じるといわれており、このように逃げ面に凝着が起こるとい報告例は筆者の知る限り確認されていない。その理由としては他の報告例が比較的緩い切削条件で行われていることや、多くが超硬工具やセラミック工具を用いて行われたものであり、サーメット工具を用いて高速切削を行った例が殆どないためと思われる。この逃げ面への凝着の発生は、主に横逃げ面において確認できる。

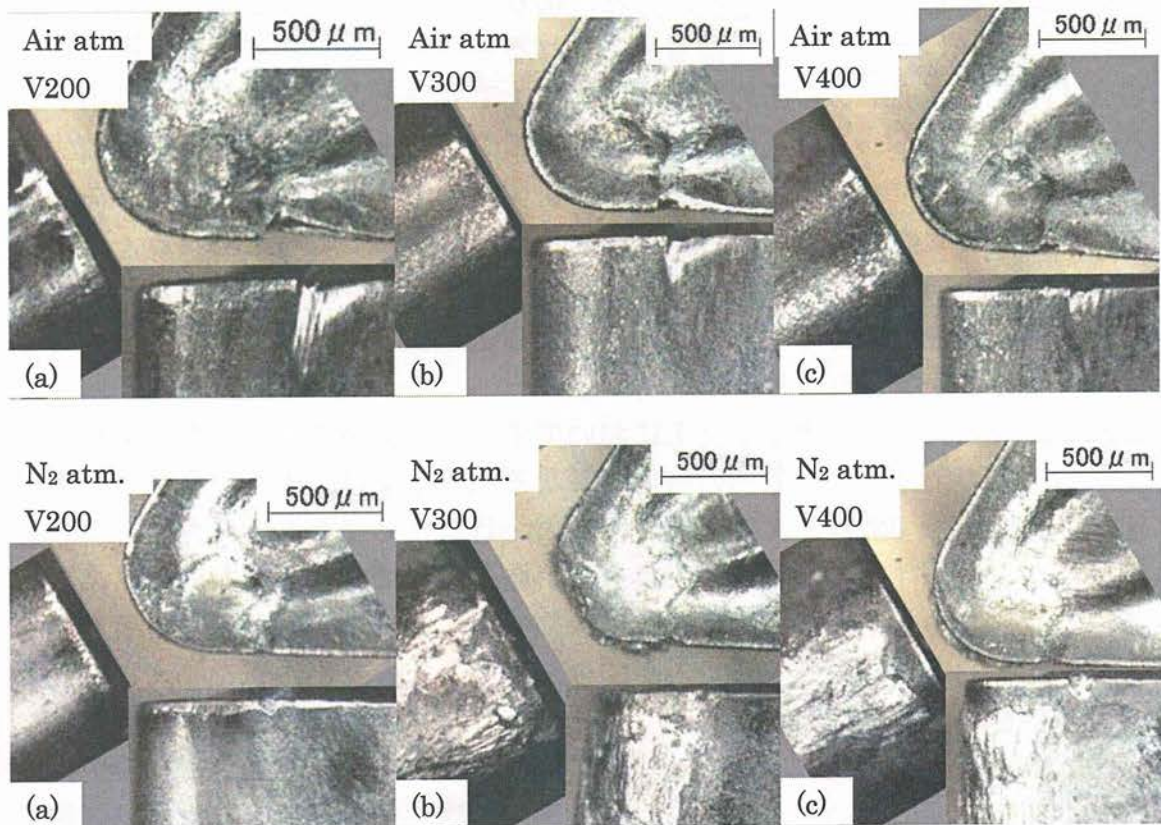
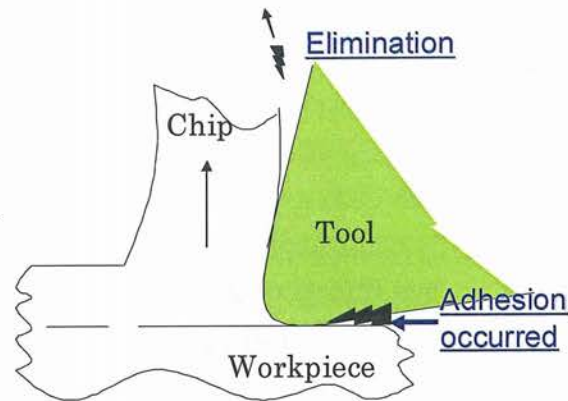


Fig.4.12 Tool wear by cermet tools (a)V200 Cutting distance 5km(b)V300 Cutting distance 2km(c)V400 Cutting distance 1km

このような、逃げ面への溶着は切削速度 200m/min では見られないことから、切削速度を 300m/min に上昇させることによって何らかの現象が生じるようになったと考えられる。その大きな要因としては切削速度の上昇が挙げられる。切削速度を上昇させると切削温度は上昇するが、そ



れに伴い新生面の化学的活性度は高くなる。切削速度 200m/min で

Fig.4.13 凝着脱落のメカニズム

凝着が見られないのはこの化学的活性度によるものと考えられる。旋削加工では、このように高い活性度を示す新生面はすくい面側切りくずと、切削により発生した仕上げ面に生じる。実験結果では、凝着の発生が見られたのは逃げ面においてのみである。ここで、すくい面と逃げ面では切りくずと接しているか否かという点において違いがある。すくい面では工具と切りくずは常に高い圧力下で接触状態におかれている。また、切りくずは常に流動性を持ち排出され続けている。したがって、耐溶着性に優れるサーメット工具による旋削加工の場合、すくい面ではこの圧力と流れにより、工具にとどまることなく排出されると考えられる。一方、逃げ面に関しては工具が仕上げ面を流れるような状態にあるものの、すくい面と違い工具に負荷する圧力が少ない。このことから、逃げ面では溶着の起こりやすい環境になるのではないかと考えられる。また、窒素雰囲気中切削では、切削が進むにつれて逃げ面では溶着と脱落が頻繁に起こっていることが確認された。しかしながら逃げ面の溶着は比較的脆く、容易に剥がせるようなものであった。

これが超硬工具やコーティング工においてすくい面に発生した凝着と異なる点である。このように、付着物の特性が異なる点としては、すくい面側では逃げ面側と異なり、切削時常に高圧環境下におかれるためであると考えられる。このような点から、逃げ面の付着物が工具を欠損させるまでの影響はないと考えられる。このことから、本論分では工具に欠損を生じさせるような強い付着を凝着とし、比較的容易に脱落することができ、工具にあまり悪影響を与えない範囲の付着物を溶着と表記する。

図 4.14～図 4.16 に切削距離と工具摩耗の関係を示す。図より、窒素中ではすべての切削速度において、空气中よりも逃げ面摩耗幅、横逃げ面境界摩耗幅、前逃げ面境界摩耗幅に関して工具摩耗を大幅に低減できていることが確認できる。特に境界摩耗では空气中では切削距離の増加とともに、横逃げ面、前逃げ

面ともに境界摩耗が進行したのに対し、窒素雰囲気中では境界摩耗がほとんど進行しなかった。

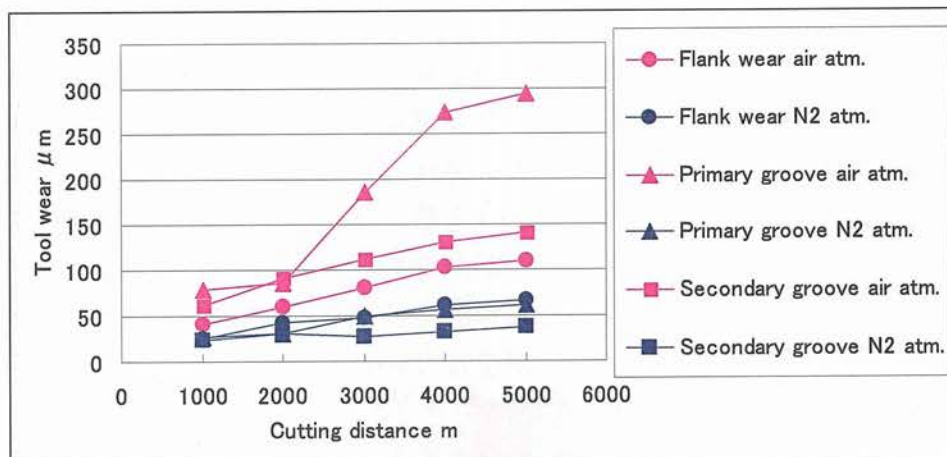


Fig.4.14 工具摩耗(V200)

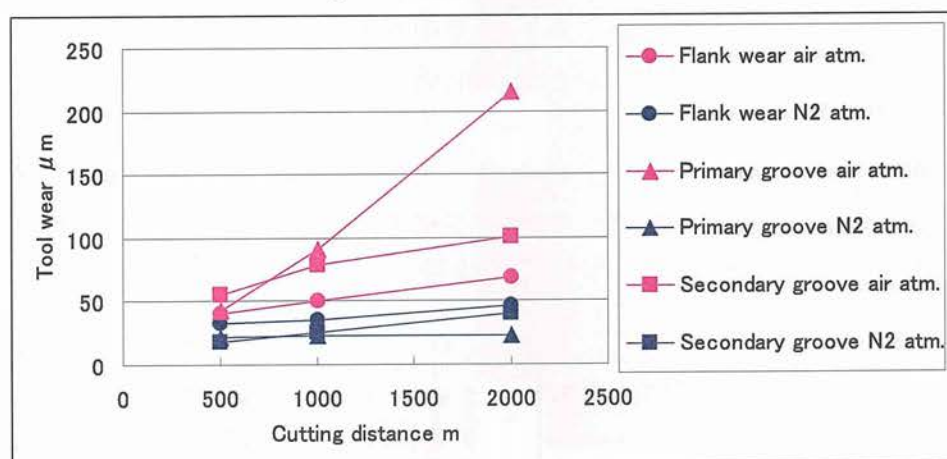


Fig.4.15 工具摩耗(V300)

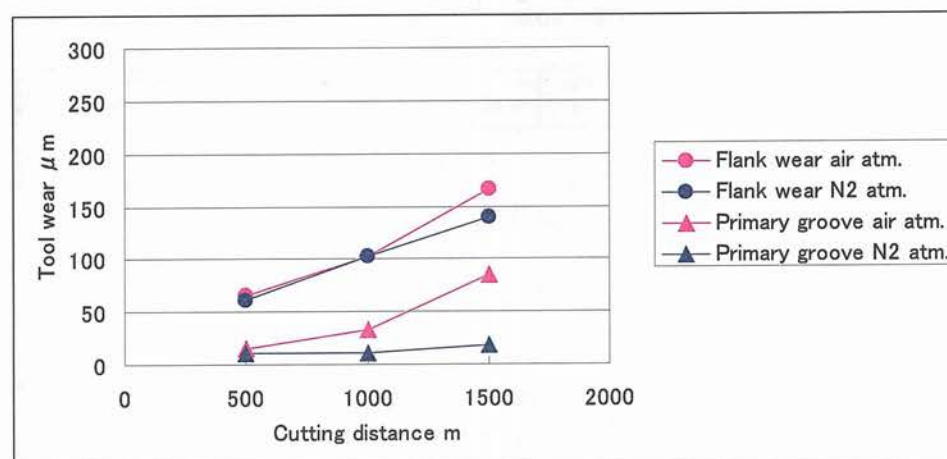


Fig.4.16 工具摩耗(V400)

工具境界部は切削部と非切削部分の境である。切削により工具はかなり高温になるが、工具の非切削部分の温度は低い。この温度差が工具に熱衝撃として働き、工具境界部分では大きな工具摩耗を示すこととなる。切削時の温度が高くなるほど温度差が大きくなり境界摩耗は進行する。このことは図 4.12 において空気中では切削速度が高くなるほど境界摩耗が大きくなることから明らかである。窒素中では、切削温度の低減が図れるため、温度差が低くなることから、境界摩耗の低減が可能になったといえる。また、切削時工具と被削材は約 80%程という非常に高い接触度であるが、非切削部分は大気開放されているために、被削材や切りくずは切削直後境界部では激しい酸素の攻撃を受けることとなる。窒素中では酸素が殆ど存在しないために、酸素の攻撃を受けることがないことから境界摩耗を低減できるわけである。

さらに、前逃げ面は直接仕上げ面と接することから、前逃げ面境界摩耗の進行は仕上げ面粗さの低下に直結する。図 4.18 は各切削速度における窒素中と空気中の仕上げ面粗さの結果であるが、窒素中が空気中よりも良好な仕上げ面を得る結果となったが、このことから、前逃げ面境界摩耗が仕上げ面に及ぼす影響がうかがえるものである。

以上の結果から、サーメット工具を用いた旋削実験では窒素中において凝着の抑制が出来るとともに、窒素中切削の本来の特徴である酸化発熱抑制とそれに伴う工具摩耗の低減や仕上げ面粗さの改善が可能になった。

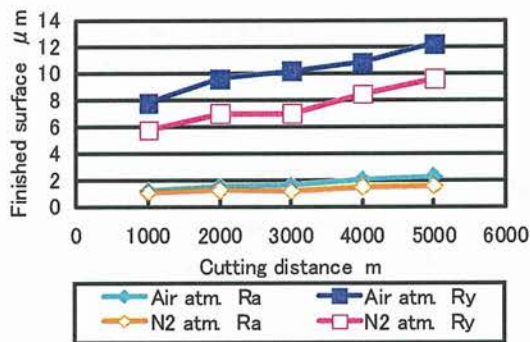


Fig.4.17 仕上げ面粗さ (V200m/min)

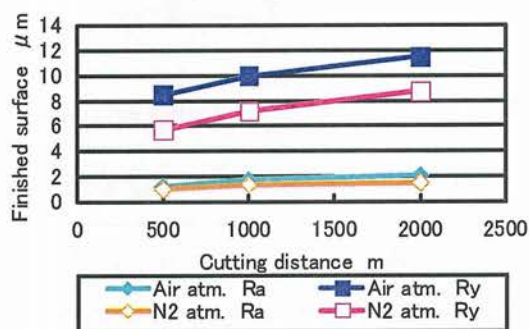


Fig.4.18 仕上げ面粗さ (V300m/min)

4.2.4 サーメット工具を用いた断続旋削加工

(1) 実験概要

前項では，サーメット工具の使用により窒素雰囲気中切削において凝着の発生を改善し，工具摩耗の低減が可能となった．しかしながら，工具逃げ面に付着物が生じたことを受け，本項ではこの改善を行うことを目的とする．

既述のように工具逃げ面の付着物はすくい面の凝着と異なり，工具との結合力は弱く，比較的容易に脱落する性質を持ったものである．従って，何かしらの衝撃力を加えることにより，切削時に生じた付着物を除くことが出来ると考えられる．そこで本項では断続切削を行うこととした．図 4.19 前項までの実験において使用した被削材形状(a)図と，本項の実験で用いる被削材形状(b)図である．本実験では，このように丸棒材料に 10mm の幅を加工することによって断続切削を行えるようにした．

断続切削では，切削と非切削を繰り返すが図 4.20 のように切削開始時に物理的衝撃が加わる．また，切削時は工具が高温となるが切削休止時に一気に冷却をされ，工具は加熱と冷却による熱衝撃を受ける．従って，このような物理的衝撃と熱衝撃によって窒素雰囲気中切削で生じた付着物の脱落が起こるのではないかと考えられる．

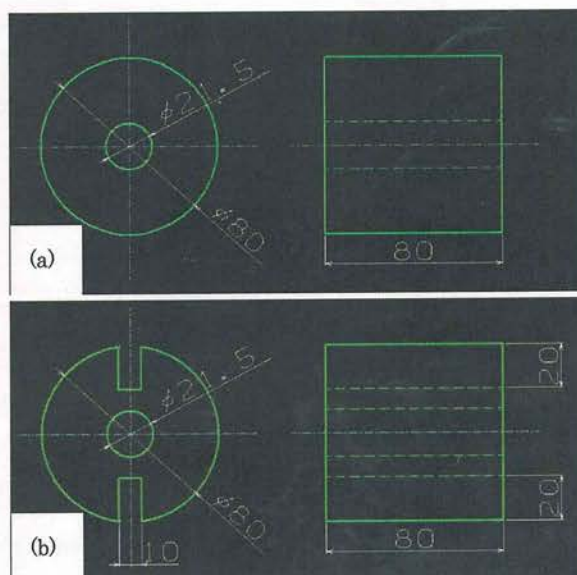


Fig.4.19 Workpiece for continuous cutting
Workpiece for intermittent cutting

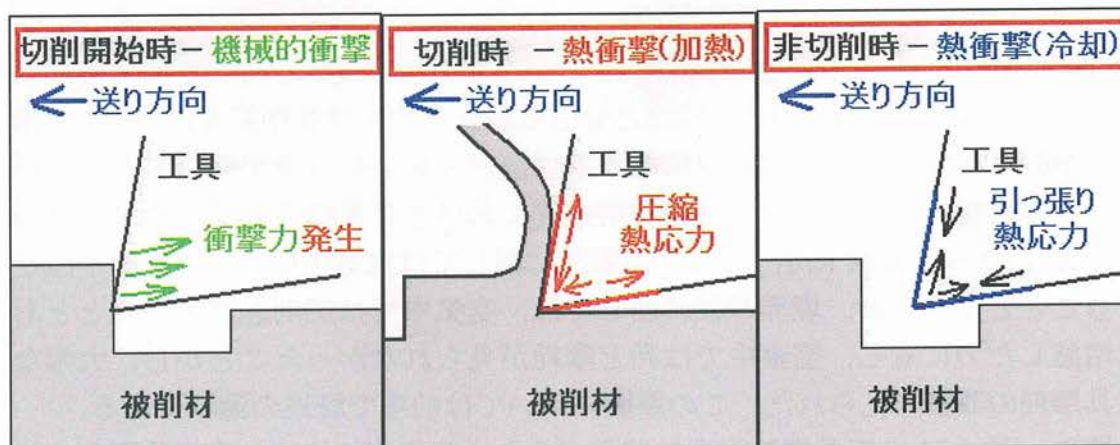


Fig.4.20 断続切削モデル

さらに、断続切削では、工具に大きな衝撃力が負荷することから工具寿命は低下する。従って、断続切削を行う場合は比較的緩い切削条件にて加工を行うことが一般的である。しかしながら、本項における実験では、前項の連続切削の実験との比較を行うことから、前項と同じ切削条件にて加工を行い検証する。実験に用いた切削条件を表 4.4 に示す。

Table4.4 切削条件

切削速度 [m/min]	200, 300, 400
切り込み [mm]	0.5
送り [mm/rev]	0.1
チップ	NX2525 TNMG160404
雰囲気	空気, 窒素雰囲気
切削形態	断続

(2)実験結果及び考察

実験結果の工具顕微鏡写真を図 4.21 に示す。図より、窒素中では前項の連続切削において発生した逃げ面の付着物が生じていない結果となった。このことから、断続切削では切削時に生じる熱衝撃や物理的衝撃によって付着物の抑制が可能になった。

断続切削では工具に大きな衝撃力が負荷するが、特にサーメット工具はコーティング工具などに比べて欠損しやすい性質を持つため、高い切削速度で加工を行うと欠損が生じやすくなる。本項において用いた工具の断続切削におけるメカ推奨条件は切削速度 180m/min であるが、それよりも高い切削速度である 200m/min(a)図で切削を行うと、空気中では横逃げ面や前逃げ面の境界において大きな摩耗が発生した。切削速度を 300m/min(b)図まで増加させると、切削発熱が増大することから、境界摩耗やクレーター摩耗が増大する。更に、切削速度を、400m/min(c)図まで増加させると、空気中では切削初期(1km)で欠損したが、しかしながら、窒素中切削では切削速度を上昇させても空気中に比べ逃げ面摩耗は少ない。それぞれの切削速度における工具摩耗の進行の関係について図 4.22～図 4.24 に示す。逃げ面摩耗に関しては窒素中切削により約半減させることとなったが、境界摩耗に関しては、空気中では切削速度の上昇とともに増減したのに対し、窒素中では殆ど摩耗が見られなかったことから、大幅な工具摩耗の改善が見られた。この原因については前項で既述の通りである。

更に、図 4.21 の工具摩耗写真に着目すると、空気中に比べ、窒素雰囲気中では、すく面の摩耗を大きく低減できていることが確認できる。窒素雰囲気中で

は、超硬工具やコーティング工具ではすくい面に凝着が生じたが、前項の実験を含め、サーメット工具を用いた実験ではすくい面側に凝着の発生は確認されなかった。更に、同図では、いずれの切削速度においてもクレーター摩耗の大幅な低減ができていることがわかる。これは、既述のように、切りくずは、すくい面が高圧・高温環境であることから、非常に化学的活性度の高く、急激に酸化するわけであるが、窒素雰囲気中では、このような酸化反応が抑制されるために、発熱量を低減し工具への損傷を緩和できたことに起因するものである。

以上の点から、断続旋削加工を行うことによって、前項で窒素中切削で発生した逃げ面の付着物を抑制することが出来た。さらに、本項では、窒素雰囲気中切削によって大幅な工具摩耗の低減が確認された。

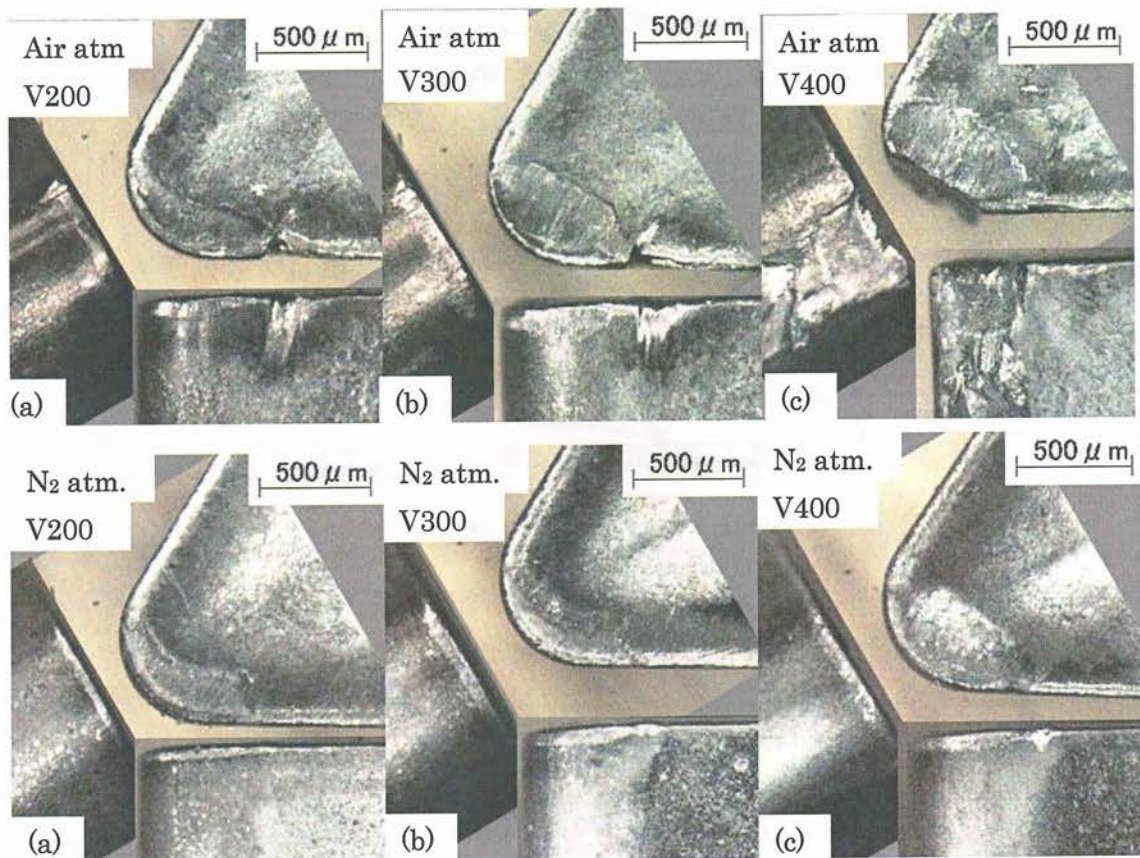


Fig.4.21 Tool wear in intermittent cutting by using cermet tools (a)V200 Cutting distance 5km(b)V300 Cutting distance 2km(c)V400 Cutting distance 1km

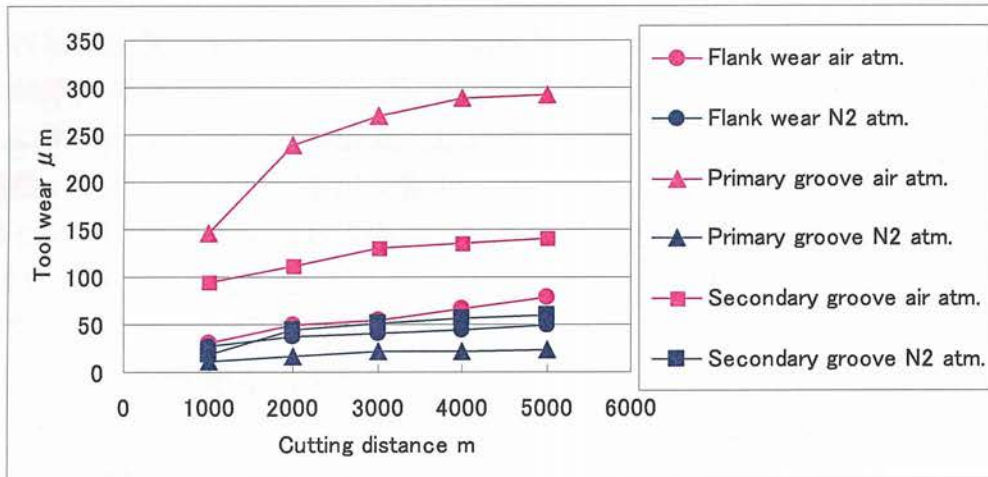


Fig.4.22 工具摩耗 (V200)

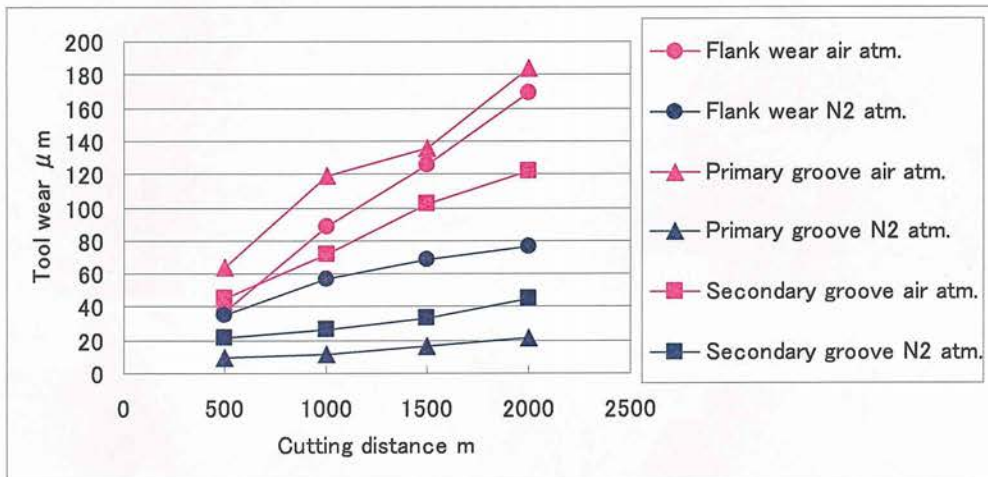


Fig.4.23 工具摩耗 (V300)

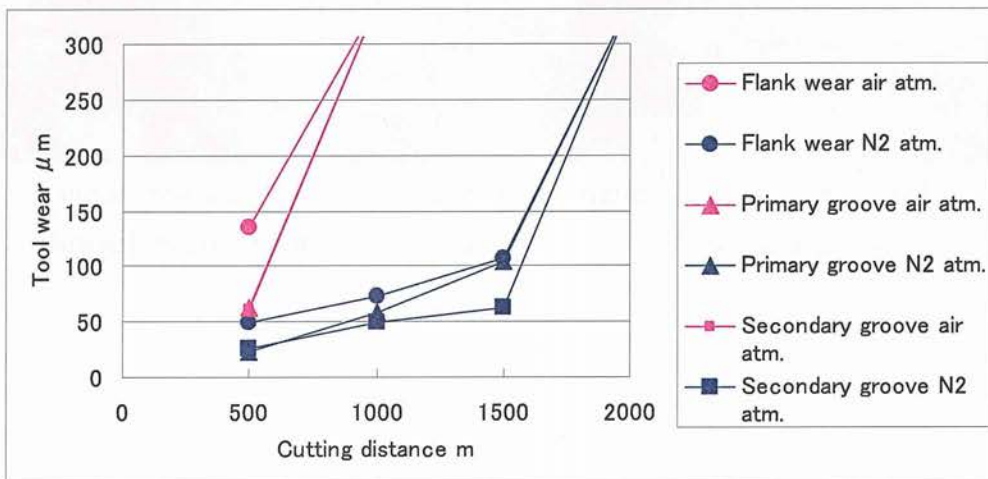


Fig.4.24 工具摩耗(V400)

4.3 窒素中切削のミーリング加工への適用

旋盤加工では、丸棒の通常切削においては連続加工となるが、試料の形状や加工の方式によっては断続形態をとることも多い。また、断続切削に関しては、フライスやエンドミルを用いたミーリング加工がある。ミーリング加工では、工具が回転して切削を行うことから、加工時は常に断続切削となる。

前節の実験では、これまで工具に凝着が発生した窒素中雰囲気加工において工具材種の検討により、凝着の改善が出来たとともに窒素雰囲気中切削の特徴である酸化熱抑制による工具摩耗の大幅な低減が可能となった。また、同実験では窒素雰囲気中において断続切削で凝着や溶着をほぼ完全に解決できた。

このことから、ミーリング加工に窒素雰囲気中切削を適用することにより、工具摩耗の低減が可能となると考えられる。そこで、本項ではマシニングセンタによるエンドミル加工に窒素雰囲気中切削を適用し工具寿命の改善を図る。

4.3.1 実験装置及び測定方法

(1)実験装置

①マグネシウム加工用マシニングセンタ エンシュウ(株)製 ES450

本研究を進めるにあたっては、気体のブローを行うと共に密閉容器を作ることが可能なマシニングセンタが必要となる。このことより、図.4.25 に示すエンシュウ(株)製 ES450 をマグネシウム加工用に改良したものをを用いた。これは汎用マシニングセンタ ES450 に密閉容器を取り付けたものである。図.4.26 は AMANO 製ドライ加工専用集塵機の上部にリコーエレメックス製マグネシウム切粉圧縮機を取り付けたもので、ES450 本体の密閉を保ちつつ、切り屑を集塵し、圧縮から排出まで行えるようにしたものである。ES450 の主要仕様を表 4.5 に示す。



Fig.4.25 マシニングセンタ外観



Fig.4.26 集塵機及び圧縮機

Table4.5 マシニングセンタ主要緒元

移動量	X 軸移動量	610mm
	Y 軸移動量	400mm
	Z 軸移動量	460mm
テーブル	テーブル上面_主軸端面までの距離	200~660mm
	テーブル作業面の大きさ	900mm × 450mm
主軸	主軸回転速度	40~12000rpm
	主軸テーパ穴	7/24 テーパ No.40
	主軸軸受内径	φ 65mm
送り速度	早送り速度	60000mm/min
	切削送り速度	1~15000mm/min

②窒素ガス発生装置 神鋼エアータック(株)製 CN2-18

昨年度までは、窒素加工を行う際の窒素の供給はガスボンベより行っていたが、ボンベの補充などの問題点から今回は図.4.27 に示す神鋼エアータック製窒素ガス発生装置を採用した。この窒素発生装置はモレキュラーシーブカーボンの吸着材を用い、ドライヤー付きコンプレッサーにより供給される空气中酸素、水分等を吸着分離して高純度の窒素ガスを得ることができる。窒素発生装置の主な使用は表 4.6 に示す通りである。この方式は、図.4.28 に示すような構造になっており、吸着剤により、酸素・窒素を選択吸着し加圧下で吸着した成分は減圧により脱着し、加圧、減圧を繰り返すことから、P S A（圧力スイング吸着）と呼ばれる。



Fig.4.27 窒素発生装置外観

Table4.6 窒素発生装置緒

窒素ガス純度	99%以上	
窒素ガス発生量	18.0 Sm ³ /H	
窒素ガス圧力	0.5 MPa 最大	
窒素ガス露点	-50°C以下	
原料空気条件	風量	1.3m ³ /min
	吐出圧	0.83Mpa
	出力	7.5kw

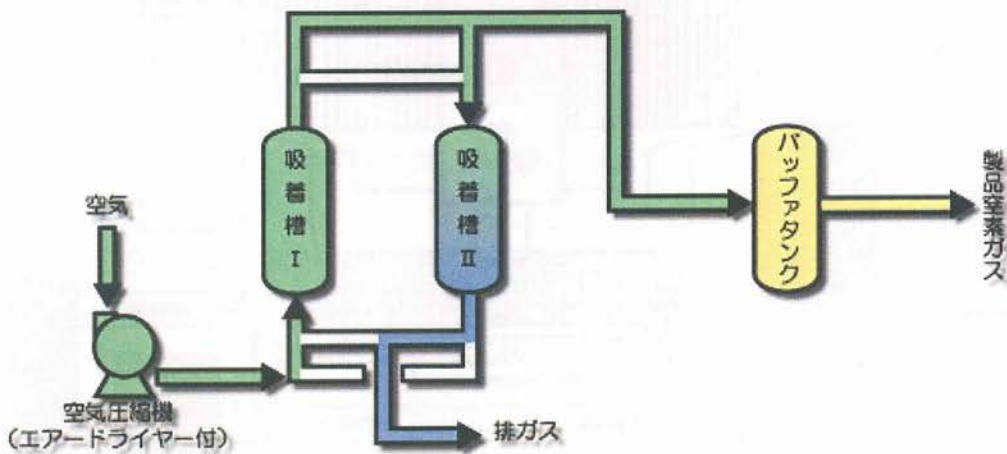


Fig.4.28 窒素発生装置システム図

(2)実験装置接続図

・ 実験装置概要

マシニングセンタ及び窒素発生装置等の周辺機器の構造を図.4.29 に示す。図中の②は密閉容器フードであり、フード内で加工が行われ、生成された切り屑が④のブロアによって作られるフード内を流れる気流により排出⑥のダクトを通してされる。集塵機に集められた切り屑はその後⑤の切り屑圧縮機に運ばれ、一定の形に固形化し、装置外に排出される。また、加工に用いられる窒素は⑧のコンプレッサーから供給される原料空気を用い、⑦の窒素発生装置にて窒素を精製する。ここで精製後の空気は①のマシニングセンタの主軸もしくは③の集塵機に供給され、加工を行うシステムとなっている。

前項までの実験では、窒素ボンベより供給される窒素ガスを用いていたが、本研究では上述のような窒素発生装置を使用している。これにより、(b)図に示す実験装置概略図に示すように、大気中から分離した窒素ガスを切削点に導入するため、環境負荷の非常に少ない加工法であると言える。またこの時、窒素発生装置の消費電力は最大でも約 500W 程であることから、ランニングコストが低いことも利点である。更に、クーラントレスであることから、脱脂などの後処理工程を省くことが出来るとともに、切削油剤関連装置及び油剤費の削減からなるコスト低減効果も期待できる。

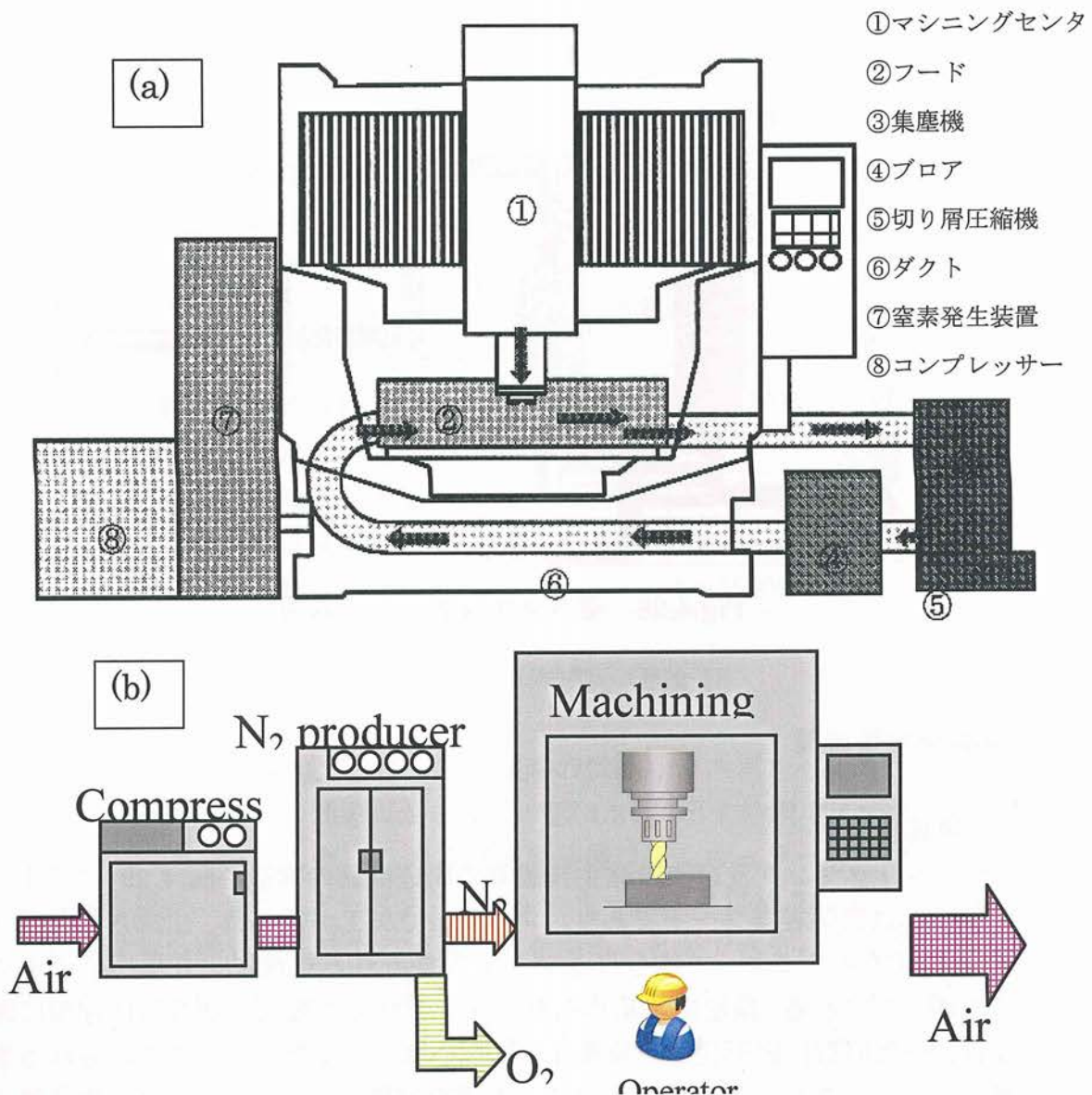


Fig.4.29 実験装置概要図

(3) 切削方法

実験を行うにおいて、切削方法を定義しておく必要がある。本実験では切削距離と工具摩耗、仕上げ表面粗さを測定するため、単一条件下の切削が好ましい。ここで四角な座を加工することを想定してエンドミルを用いた加工を行う場合、図.4.30 のような加工方向が上げられる⁴⁾³⁾。

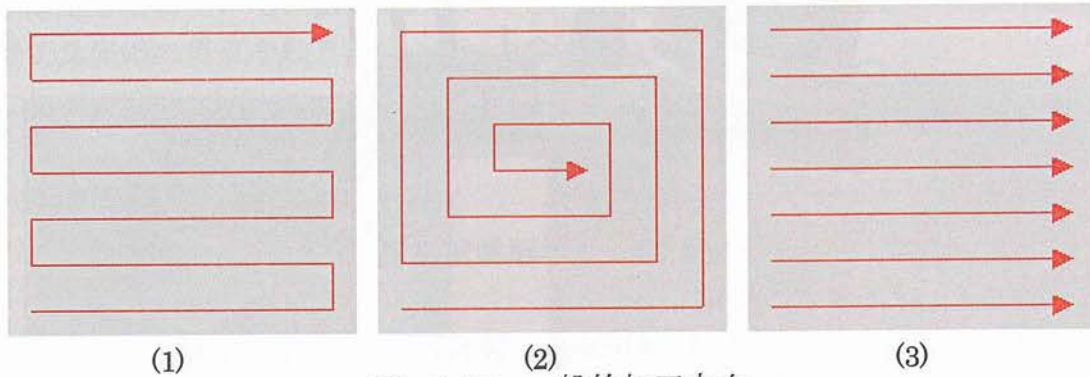


Fig.4.30 一般的加工方向

これら 3 種の加工方向の内、実加工では機械操作の無駄が少なく、加工時間が最も短い(1)の方法がよく用いられている。この加工では外周部に多少バリが発生するが、それを改善するには加工後に外周部を一周するような加工を施すことによって良い仕上げ面を得ることができる。しかしながら、(1)の加工では図の横方向に送って削った部分に多少のバリのようになってしまう。この改善策として(2)の加工が挙げられるとともに、この加工法を用いた加工では良好な仕上げ面を得る事が出来、前述のバリも出ない加工を施せるが、手間である加工であると同時に送り量が常時変化する加工法と言える。安定した加工が求められる。その点において送り方向の変化する(1)加工法や、送り量と加工方向の変化する(2)の加工法が優れているとは言い切れない。また、(1)の加工法ではこの送り方向が変わることで、ダウンカットとアップカットが変化する。それにより、切削力や仕上げ表面粗さに影響がでることから、これらが実験結果に及ぼす要因をふまえて、今回の切削では図.3.7 の(3)の加工方向を採用するとともに、エンドミルの軌跡が少し重複するような加工法を採用した。

(4) 測定項目と方法

(i) 工具摩耗の記録

加工終了後にスカラ株式会社製ビデオマイクロスコープシステム

VMS-3000(図.4.31)を用いて工具すくい面及び逃げ面, 工具先端の摩耗を撮影する.



Fig.4.31 光学顕微鏡写真

(ii) 加工仕上げ面粗さの測定

各条件下の加工を施した後, Mitutoyo 製 Surf Test SJ-301(図.4.32)を用いて加工仕上げ面粗さを測定する. このとき, 図.4.33 に示す2方向の測定を行う. 通常の測定では X 軸送り方向のみの測定であるが, 今回 Y 軸送り方向についても測定を行う理由は, 加工での Y 軸への送りにて生じるバリによる表面粗さの変化を測定するためである.



Fig.4.32 表面粗さ計

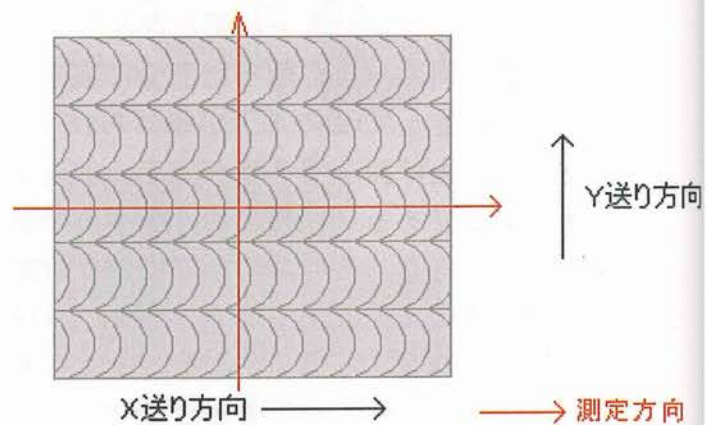


Fig.4.33 測定方向

(iii)温度の測定

加工時の加工点近傍温度に関しては図.4.34 に示すファイバ式放射温度計 (CHINO IR-FB) によって測定した。放射温度計は、物体からの熱放射 (赤外線) を捕らえて温度を測定するものである。熱伝対のような熱伝導を利用する温度計と比べ、非接触かつ高速で温度を測定することが出来るのが放射温度計の特徴である。測定された赤外線は、IR-FB ユニット内にて電気信号に変換され、図.4.35 に示すレコーダ (GRAPHTEC Co. WR7900) によって記録した。

測定方法については図.4.36 に示すように $\phi 2\text{mm}$ の測定径を持つ放射温度計を工具先端に焦点を絞り測定を行った。



Fig.4.34 温度計外観



Fig.4.35 レコーダ

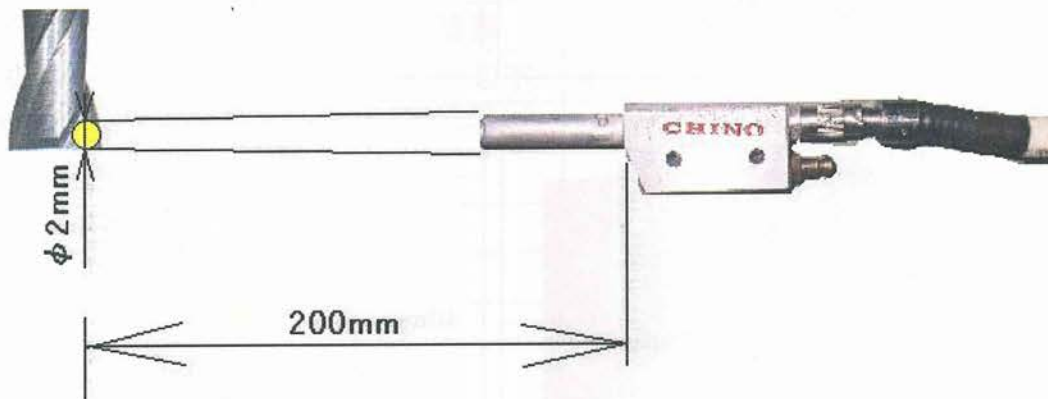


Fig.4.36 温度測定方法

(5) 切削環境の定義

昨年度までの研究では、窒素雰囲気加工と大気中加工の比較であったが、本年度は上述の 2.3 項でも述べたように、窒素を主軸近傍より吹き付けた窒素ブロー加工に付いても実験を行い検討を進める。また、このブロー加工では窒素を用いることによる影響の他に、気体吹き付け作用による冷却効果が挙げられる。したがって、加工特性がこのどちらの作用に基づくものであるか検討するために、吹き付け気体を窒素からコンプレッサーより供給される原料空気をに替えて、主軸より吹き付けた加工法（以後、エアブロー加工と略）に付いても行うこととする。よって、本研究で行う加工法は大気中加工，エアブロー加工，窒素雰囲気加工，窒素ブロー加工の 4 種であり，加工の概要図を図.4.37 に示す

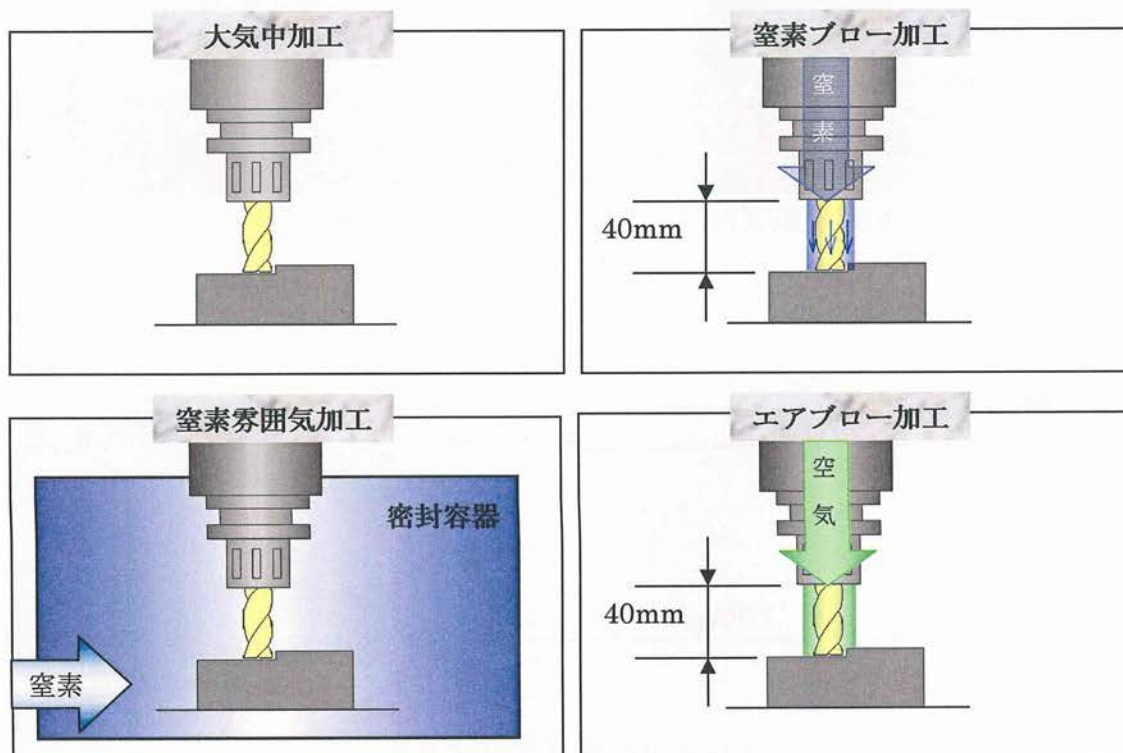


Fig.4.37 加工法の概略

次に、今定義した各加工法について今回使用したマシニングセンタを使用して加工する際の具体的な設定要項について述べる。

今回実験に用いたマシニングセンタは密閉容器を有しているが、密閉容器を開放し、なおかつ気体ブローを行わない状態を大気中加工と定める。また、窒素加工においては、99.99%以上の原料窒素を用いる。密閉容器を密閉状態にし、容器内及び集塵機内に取り付けた酸素濃度計が 100ppm 以下の酸素濃度を示した状態で窒素充填を OFF にしたときを窒素雰囲気と定める。また、窒素ブロー及び酸素ブローについては吹き付け気体を主軸センタースルーシャフトを用い、コレットチャックの溝を利用してコレットスルー形式によって刃先を包み込むように 8 方向から下向きに窒素吹き付けを行う。工具先端から吹き出し口までの距離は 4mm に設定した。この状態で流量 125L/min で窒素を噴きつけた状態を窒素ブローとし、窒素発生装置を介さず窒素精製に用いる原料空気を供給する為のコンプレッサーを直接マシニングセンタに接続して窒素ブローに用いる配管より流量 60m³/h で空気を吹き付けた状態を空気ブローと定める。加工環境の定義は表 4.7 の通りである。

Table4.7 加工環境の定義

	大気中	窒素雰囲気	窒素ブロー	空気ブロー
密閉容器	開放	密閉	開放	開放
噴付気体	—	窒素	窒素	空気
吹付気体酸素濃度	20.95	0.01%以下	0.01%以下	20.95
密閉容器内酸素濃度	20.95	—	0.01%以下	20.95
流速	—	—	125L/min	125L/min
切屑循環	—	—	—	—
刃先からの噴付距離	—	—	40 mm	40 mm

4.3.2 超硬エンドミルを用いた実験

(1) 実験概要

前節の実験では、サーメット工具を用いた断続旋削実験において窒素雰囲気中によって工具への凝着を抑制するとともに工具摩耗の大幅な低減が可能となった。また、旋削加工では超硬工具を用いた場合、窒素中では凝着が激しく、欠損をまねいたが、エンドミルを用いたミーリング加工では切削は断続形態をとるため、超硬工具を使用した場合でも窒素中で凝着の改善が図れるのではないかと考え、本項では超硬工具を用いて窒素中切削を行った。

(2) 実験方法

今回の実験では、一般的汎用切削条件下での窒素加工の有効性の検証を目的としている。したがって加工条件は使用工具のメーカー推奨値を用いることとする。使用工具は表 4.8 に示す超硬合金工具である。被削材は機械構造用炭素鋼 S50C(HV310)を用いて加工を行う。実験に用いた切削条件は表 4.9 の通りであり、工具摩耗の測定については表 4.10 のように切削距離 200mm 毎に加工を止め、光学顕微鏡にて撮影を行うと共に、工具摩耗と仕上げ面粗さの関係を調べるために同条件下で加工仕上げ面粗さを測定する。また、加工にて発生した切り屑を収集して検討を行う。

Table4.8 使用工具

工具外観	
製造元	三菱マテリアル神戸ツールズ
商品名	C-2MS
材質	超硬
直径	10 mm
刃長	25
刃数	2

Table4.9 切削条件

主軸回転数	1500 rpm
切削速度	47.1 m/min
送り	190 mm/min
1 刃あたりの送り	0.06 mm/rev
切り込み(Y 方向)	9 mm
切り込み(Z 方向)	1 mm

4.10 測定項目

使用機器	測定項目		測定範囲
光学顕微鏡	工具摩耗	すくい面摩耗	切削距離 0.2m 毎
		外周逃げ面摩耗	
		底刃逃げ面摩耗	
	切り屑		
表面粗さ計	仕上げ面粗さ		

(3)実験結果及び考察

切削距離 1m における工具顕微鏡写真を図 4.38 に示す。なお図中の左上は工具外周逃げ面を、左下はすくい面、右下は底刃逃げ面を示している。

実験では、空気中で、切削距離 0.4m で外周逃げ面境界部に、エアブローでは切削距離 0.2m で刃先に、窒素中ブローでは 0.4m で刃先に、窒素雰囲気中では 0.2m で外周逃げ面にそれぞれ欠損が生じた。従って、ブローを行わない空気中と窒素雰囲気中では刃先から外周にわたって、ブローを行う窒素ブローとエアブローでは刃先に欠損が生じたといえる。切削時は、工具と被削材の摩擦や切りくずのせん断作用により大量の発熱が起こるが、ブローを行うと上部から強制的に冷却を行うこととなる。従って、刃先の発熱と工具上面からの強制冷却が大きな温度差を生じさせることから工具に熱衝撃を加えブローでは刃先に欠損が生じたものと考えられる。

また、図より窒素雰囲気中では激しい凝着が生じる結果となったが、窒素ブロー加工では工具に凝着は確認できない。これについては、ブローを行うことによる熱衝撃が凝着を剥離させる作用として働いたか、あるいは窒素ブローでは窒素雰囲気中ほどの高濃度の窒素雰囲気が形成できなかったため、微量の酸素の混入があったため、凝着を発生させるまでの窒素濃度に至らなかったためと思われる。

このような窒素雰囲気中における凝着は仕上げ面にも密接に影響を及ぼし、図 4.39 に示す仕上げ面の表面粗さの値より、窒素雰囲気中が大きな粗さ値を示した。これは、図に示す仕上げ面の写真より、窒素雰囲気中では工具に生じた凝着による擦過痕が見られることによるものである。また、図 4.40 からは他の加工法についても工具の欠損による仕上げ面の荒れが図より確認できるが、粗さ値は、窒素雰囲気中以外の 3 種については同程度の粗さとなった。

さらに、図 4.40 は切削距離 0.6m における窒素雰囲気中での切りくずの様子

であるが，窒素雰囲気中では本来断続切削であるはずのエンドミル加工において，連続的な切りくずが発生した．これは図 4.41 に示すように通常切りくずは切削された後排出されるが，窒素雰囲気中では切削によって生じた切りくずが工具に付着したまま排出されず，次の切削まで留まることによって切りくずが連結してしまうという，いわゆる切りくずの再切削現象が生じたためである．

以上の結果より，断続切削であるミーリング加工に窒素雰囲気中切削を適用すると，旋削加工では激しい凝着が生じた超硬工具でも凝着の改善が望めるのではないかと考えたが，実験結果より，ミーリング加工でも超硬工具では窒素雰囲気中において凝着とそれに伴う工具の欠損が生じ，大気中加工よりも劣る結果となった．．

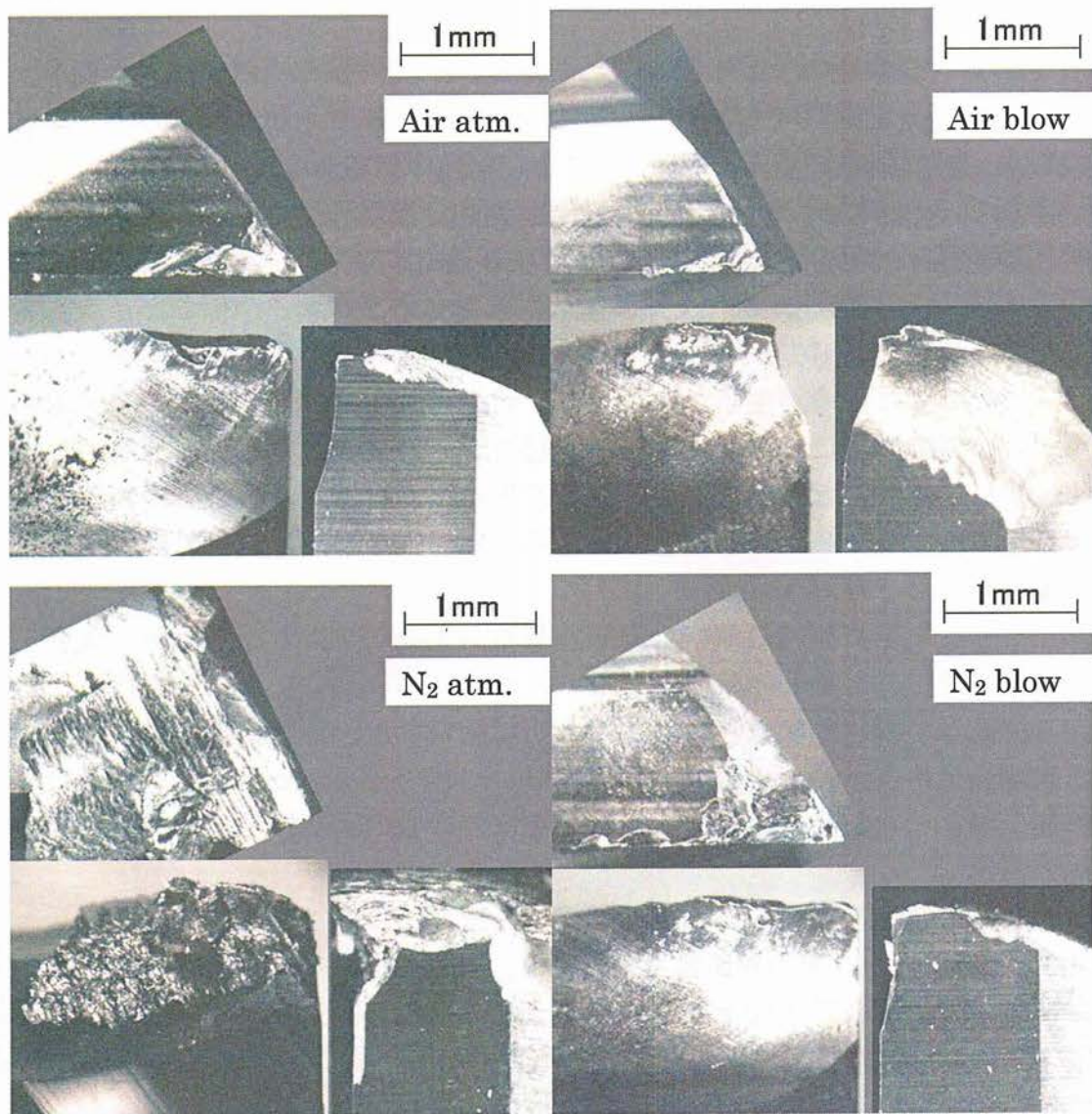


図 4.38 工具頭微鏡写真 (左上外周逃げ面，左下すくい面，右下底刃逃げ面)

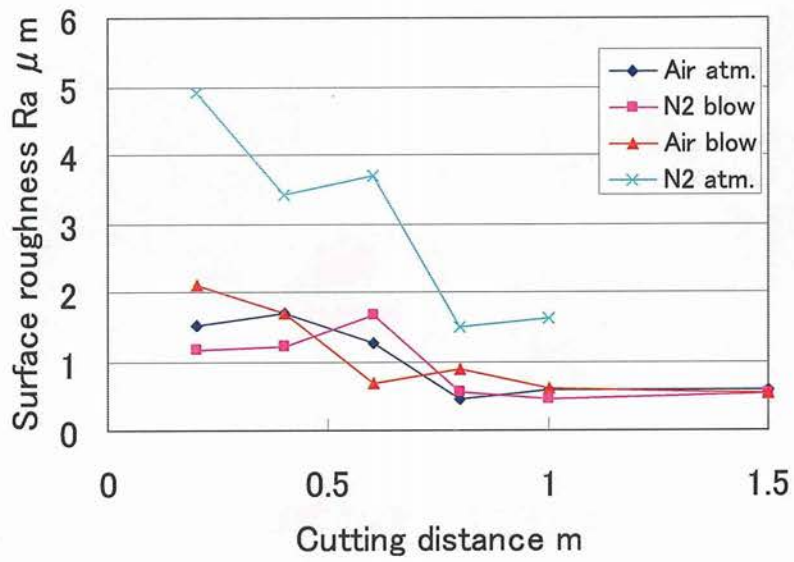


Fig.4.39 切削距離と仕上げ面粗さ

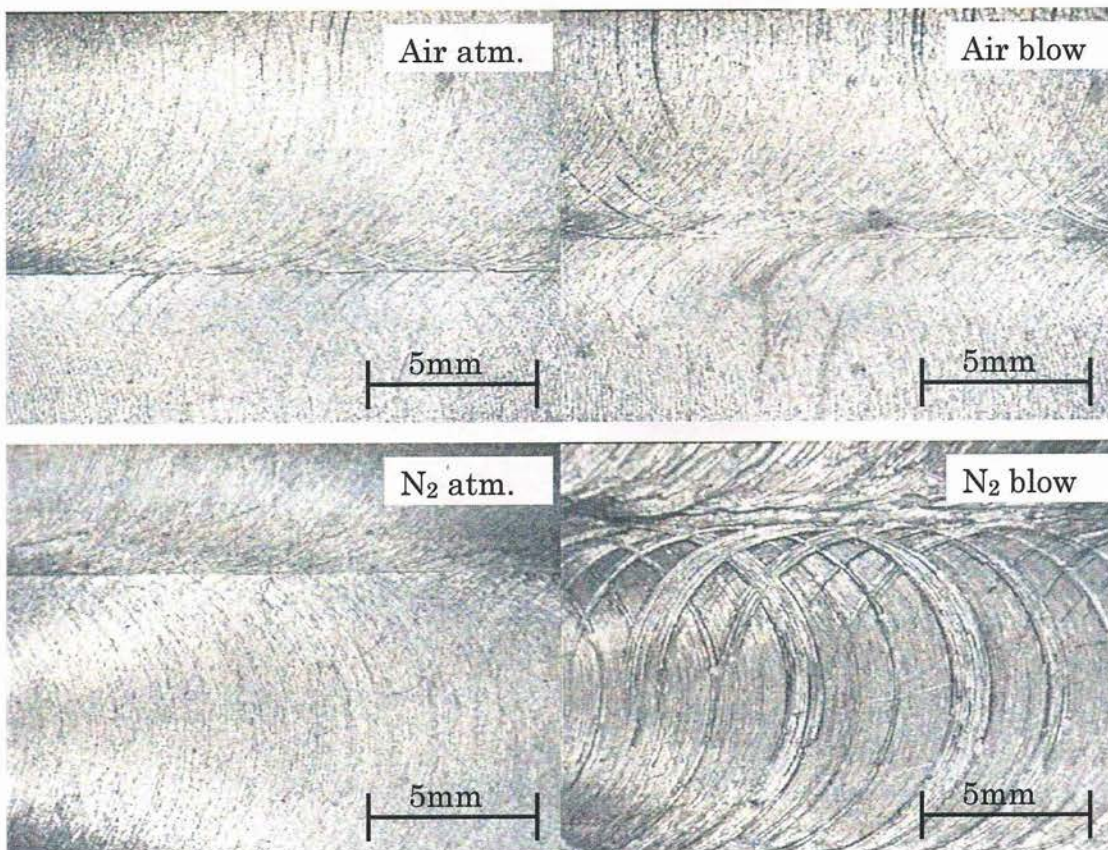


Fig.4.40 超硬ソリッドエンドミルによる切削時の仕上げ面顕微鏡写真

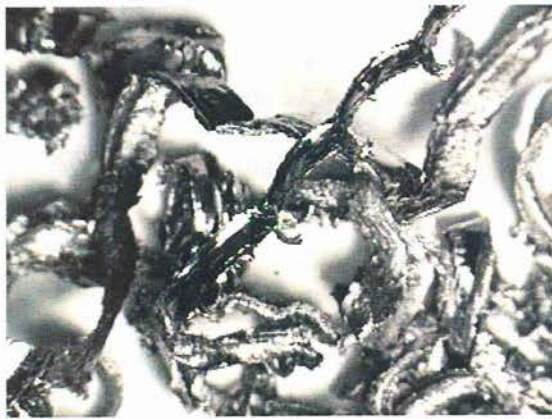


Fig.4.41 窒素雰囲気中における切りくず

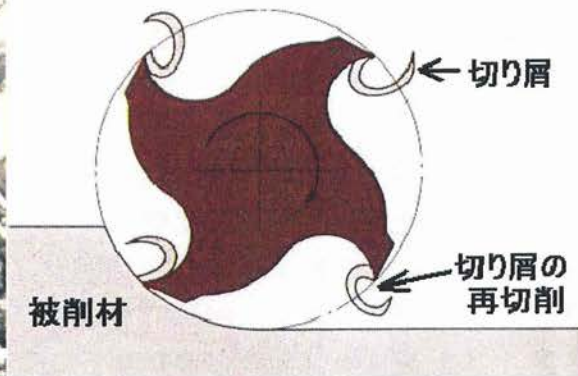


Fig.4.42 切りくずの再切削モデル

4. 3. 3TiN系コーティングエンドミルを用いた実験

(1) 実験概要

前項の実験では、ミーリング加工においても前節の旋削加工の実験同様に、超硬工具では窒素雰囲気中で切削を行った場合、工具に激しい凝着が生じ、工具寿命が著しく低下する結果となった。

このことから、切削形態を連続旋削加工から断続加工であるミーリング加工に変更しても超硬工具では、窒素雰囲気中加工において工具摩耗の低減は図れないと考えられる。従って、前節の実験によると摩擦係数が低く、耐溶着性に優れる工具の使用により凝着の改善が可能になると思われ、その最も有効的である方法としてはサーメット工具の使用が挙げられる。

しかしながら、ソリッドエンドミルにおいてサーメット工具は稀であり、一般の市場には殆ど流通していないのが現状である。エンドミル加工において最も使用されている工具は各種コーティングエンドミルである。前節の実験では、コーティング工具を使用して窒素雰囲気中加工を行った場合、コーティング層が摩滅するまでは凝着の発生を抑制し、工具摩耗、仕上げ面粗さともに大気中加工より良好な切削が行えることがわかっている。

これらのことから、本項ではコーティング工具を用いて窒素雰囲気中加工を行い検討する。

(2) 実験方法

本実験においても前章の超硬工具の実験同様、一般汎用切削への窒素加工の有効性を検討するため、実験条件は最も一般的切削条件とされる使用工具メーカー推奨値を用いることとする。使用する工具は表 4.11 に示す PVD コーティ

ング工具で、コーティングは TiN 系コーティングである。被削材も前項に続き機械構造用炭素硬 S50C(HV310)を用い切削加工を行う。切削条件及び、測定項目は表 4.12, 表 4.13 に示す通りである。

Table4.11 使用工具

工具外観		
製造元	三菱マテリアル神戸ツールズ	三菱マテリアル神戸ツールズ
商品名	C-2MS	YC-2MS
材質	超硬	TiN コーティング
直径	10 mm	10 mm
刃長	25	25
刃数	2	2

Table4.12 加工条件

主軸回転数	3200 rpm
切削速度	100.48 m/min
送り	390 mm/min
1 刃あたりの送り	0.06 mm/rev
切り込み(Y 方向)	9 mm
切り込み(Z 方向)	1 mm

Table4.13 測定項目

使用機器	測定項目		測定範囲
光学顕微鏡	工具摩耗	すくい面摩耗	切削距離 1m 毎
		外周逃げ面摩耗	
		底刃逃げ面摩耗	
切り屑			
表面粗さ計	仕上げ面粗さ		

(3) 実験結果及び考察

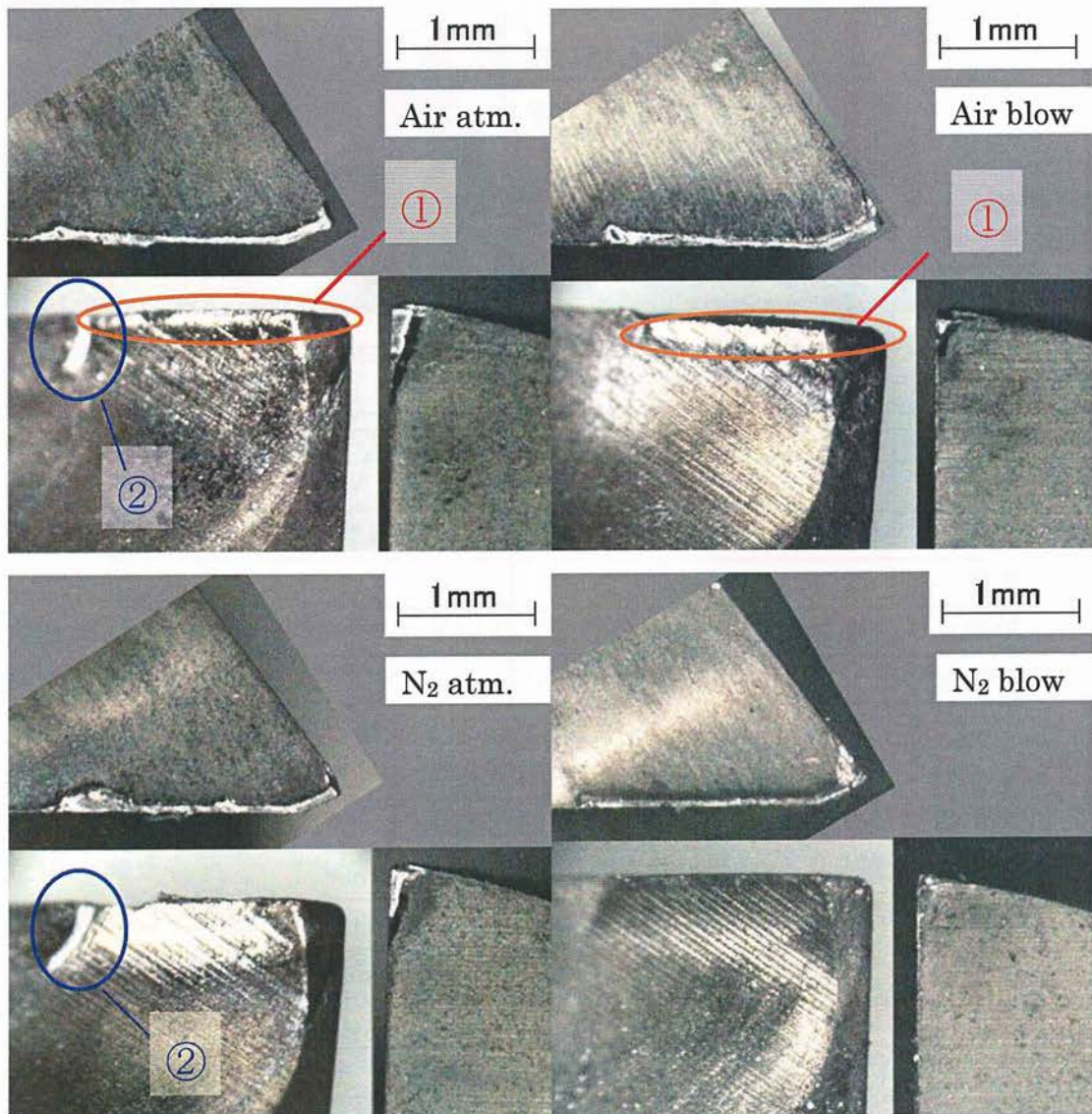


Fig.4.43 コーティングエンドミル使用時の切削距離 15m における工具写真

実験結果の工具顕微鏡写真を図 4.43 に示す。切削距離は 15m で、図中の左上は工具外周逃げ面、左下はすくい面、右下は工具底刃逃げ面である。図より、窒素雰囲気加工、窒素ブロー加工ともに工具に凝着は生じなかった。また、工具すくい面に着目すると、大気下である空気中とエアブローでは工具すくい面の切れ刃付近に摩耗が見られるものの、窒素環境下では、この部分の摩耗がみられない。このことより、窒素により摩耗の抑制が可能となったことがわかる(図中①)。さらに、窒素ブローとエアブローの気体噴射条件では大気中と窒素雰囲気中で見られた工具すくい面の境界摩耗が発生しないことが見て取れる(図

中②). フライス加工における窒素雰囲気中によるすくい面クレーター摩耗の低減は山根・鳴滝らも報告されているが³⁻²⁴，本実験では，さらに，気体噴射によりすくい面の切り込み境界部の摩耗の低減が確認された。

外周逃げ面摩耗幅に関しては各条件ともに際立った差異が見られないが，これは切削条件が緩かったことに起因すると考えられる。

また，窒素雰囲気中では切削距離を増加させると 20m の時点において再び凝着が発生した (図 4.44). この現象については，前節において既述のように，コーティング層の摩耗，摩滅，剥離によって工具母材の超硬合金がむき出しになった結果，前項のような凝着を発生させたものであると考えられる。しかしながら，窒素ブロー加工においては切削距離 20m の時点でもこのような凝着は発生しなかった。これは，ブローによる冷却作用が工具コーティング層の摩耗を低減させたことが大きく影響を及ぼしたと考えられる。

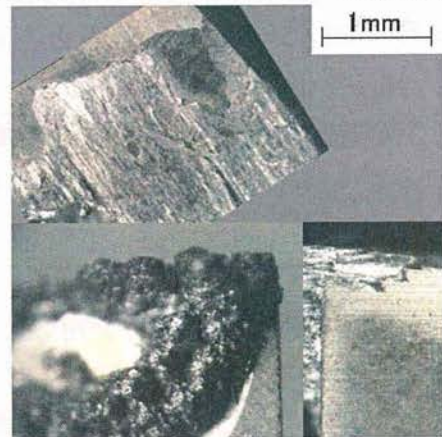


Fig.4.44 工具摩耗状況(N₂ 20m)

図 4.45 に切りくずの写真を示す。図より空气中加工では鮮やかな青色，エアブロー加工は茶色に発色しており，窒素ブロー加工は大気中加工とエアブロー加工の中間色，窒素雰囲気加工では酸化の無い被削材の発色である。エアブロー加工で空气中加工よりも発色状態が低いことから，気体噴射で温度の低減が出来ていることが確認できる。更に，窒素ブロー加工では空气中，エアブローよりは酸化発色を抑えられているが，酸化発色していないわけではない。一方，窒素雰囲気中では酸化発色は見られない。

切削によって発生した切りくずは非常に活性度の高い状態にあることは既述の通りであるが，窒素雰囲気中では切りく

ずが排出された後も密封容器内は無酸素状態であるため，切りくずの温度し，化学的活性状態が安定するまで酸化が行われぬ。一方，窒素ブロー加工では，切りくずは発生直後に切削点付近の窒素雰囲気から排出され，活性度の高いまま大気中に放出されることによって酸化するものと考えられる。また，窒素雰

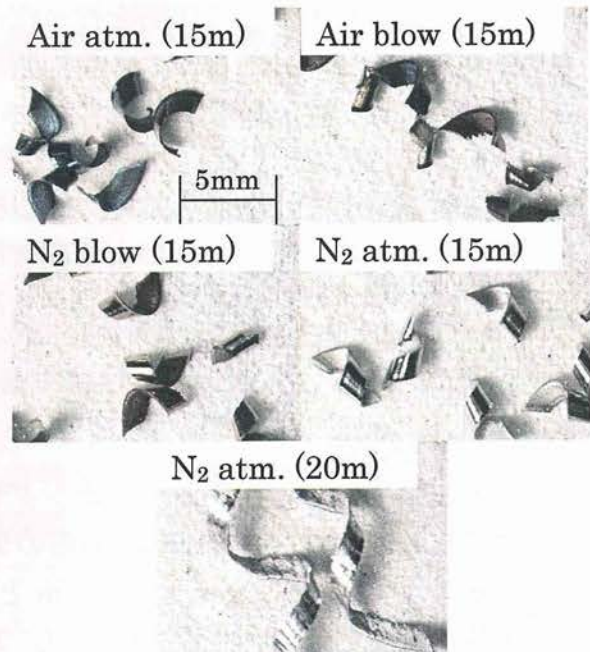


Fig.4.45 切りくず

囲気中では切削距離 20m で凝着が生じたが、このときの切りくずは前項の実験同様に切りくずの再切削により図に示すような連続型の切りくずが発生した。

以上の結果より、窒素雰囲気中におけるエンドミル加工では、コーティング工具の使用により、超硬工具で発生した凝着の問題をある程度は改善することが出来た。これにより、窒素雰囲気下でミーリング加工を行うことによって工具摩耗の低減が可能となる可能性がある。しかしながら、前節の旋削実験同様にコーティング層の剥離とともに再び蒸着が生じる結果となった。

4.3.4 高速加工条件下における加工特性

(1) 実験概要

4.3.2 項では超硬工具を用いたミーリング加工では、従来連続切削では凝着の激しかった窒素切削でもエンドミルによる断続切削によって良好な加工が可能ではないかと考え実験を行ったが、エンドミル加工においても大きな凝着が生じる結果となった。そこで前項では、使用工具をより凝着性の低い TiN コーティング工具を使用して切削を行った。その結果、ある程度の切削距離までは凝着の発生は無かったものの、切削距離が進むとコーティング層の剥離が生じ、それによって再び凝着が発生するという事がわかった。

そこで本項では、高送り・高速回転数となる切削条件を与える事によって、断続切削を施すことにより工具に生じる機械的衝撃と熱衝撃の 2 つの衝撃力が大きくなると考えて、それによる凝着問題の改善が図れるのではないかと考え、切削速度や送り、切込みを上昇させ高付加の切削条件における高速切削を行った。

(2) 実験方法

本実験では、使用するマシニングセンタの上限主軸回転数である 10000rpm に設定して、前項の実験の約 10 倍のテーブル送り値を与え切削を行った。また、Z 方向の切込みを 1mm から 2mm と変更し、切削面積を 2 倍に設定した。加工条件は表 4.14 に示すとおりである。工具は、前項の実験で良好な結果を得た TiN 系コーティング工具を使用し、被削材は S50C とした。加工は大気中加工と窒素雰囲気加工、窒素ブロー加工の 3 種の加工を行った。

加工終了後には表 4.15 に示す項目について測定、記録を行うとともに、加工の様子をビデオにて撮影し、加工後には切り屑の採取、記録を行った。

Table4.14 加工条件

工具	TiNコーティング
主軸回転数	10000 rpm
切削速度	314 m/min
送り	2000 mm/min
1刃あたりの送り	0.1 mm/rev
切り込み	(Y) 9 mm, (Z)2 mm
被削材	S50C

Table4.15 測定条件

使用機器	測定項目	測定周期
光学顕微鏡	工具摩耗	切削距離 0.5m 毎
	切り屑	
表面粗さ計	仕上げ面粗さ	切削距離 0.2m 毎
ビデオレコーダ	加工時の火花の発生	毎時
放射温度計	加工点近傍温度	毎時

(3)実験結果及び考察

加工時にビデオ撮影を行い、そこからキャプチャーした各加工の加工風景写真を図 4.46 に示す。大気中加工では火花が激しく発生している様子がわかる。この火花発生は、工具の摩耗が進行する(切削距離が増加)とともに増加する傾向があった。一方、窒素雰囲気中加工ではこのような火花の発生はまったく無い結果を得た。また、ある程度の酸素の混入が考えられる窒素ブロー加工においても火花はまったく発生しなかった。窒素雰囲気中ブロー加工では、切りくずが発生した直後に高活性度で高温状態のまま大気中に排出される。従って外気で急激に酸化することから火花が発生してもおかしくないが、火花の発生は見られない。このことから、窒素ブロー加工で生じた切りくずは温度が低く化学的活性度の低い状態、つまり大気中加工に比べ切削温度の低減が出来ているものと考えられる。

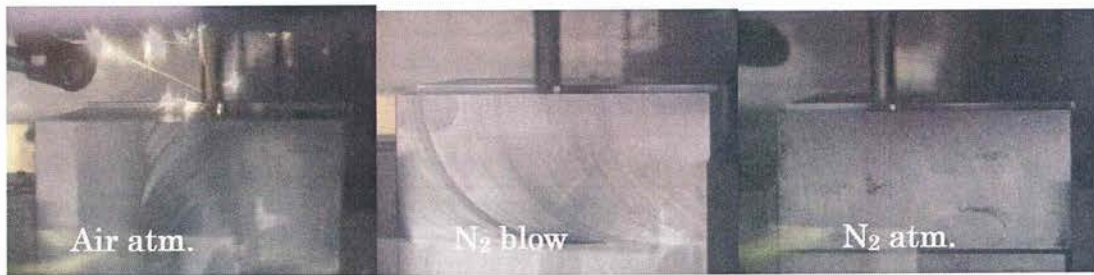


Fig.4.46 加工風景

このような火花の発生は切削温度にも密接に関係しているものと考えられる。図 4.47 は、加工時に採取した切り屑の写真である。大気中加工では青色の発色を示しているのに対して、窒素ブロー加工では茶色、窒素雰囲気中加工では被削材の生材の発色を示している事が確認できる。これは、加工雰囲気中に存在する酸素量の違いによる酸化反応の大小を顕著に示していると言える。つまり、窒素雰囲気中では酸化反応は抑制され、それに伴った切り屑の発色が温度低減が図れているということを示している。

切り屑の発色は酸化反応の大小であると共に、切削温度を示しているものでもある。図.4.58 に酸素濃度の違いによる切削点近傍温度の変化を示す。これは、放射温度計を用いて、回転している工具近傍に焦点を絞り温度測定したものである。グラフより、酸素濃度が低くなることによって、加工時に加工点近傍温度で約 50 度から 80 度の差があることがわかる。この温度の違いは、酸化反応によるものであると言え、切り屑の発色からもうかがい知ることが出来るものである。

火花や切りくず、切削点近傍温度の測定結果より、窒素雰囲気下では切削温度の低減が図れていることが確認された。このことは工具摩耗にも大きく影響を及ぼした。図 4.49 は 20m 加

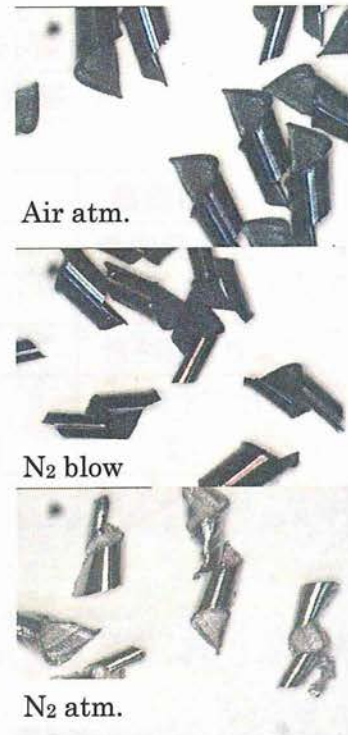


Fig.4.47 切りくず

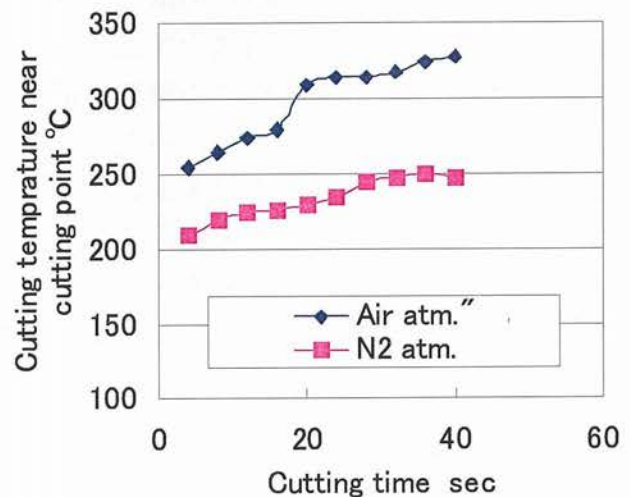


Fig.4.48 酸素濃度と加工点近傍温度

工後の工具顕微鏡写真である。

図より大気中では刃先コーナ一部から底刃にわたって大きな摩耗が生じている。エンドミル加工では厳しい条件で加工を行った場合、刃先部が高温になり、赤熱することがある。本項でも、通常推奨条件の約10倍のテーブル送り値という厳しい条件であったため、大気中加工では切削時、工具刃先が高温となり大きな摩耗に繋がった。一方、窒素雰囲気中、窒素ブローではこのような刃先の大きな摩耗は見られない。このことより、窒素雰囲気中や窒素ブローでは凝着を解決するとともに、工具摩耗の低減が可能となったといえる。しかしながら、窒素雰囲気中においては外周逃げ面に摩耗が見られる。これは酸化膜が形成されないために生じたものと考えられるが、窒素ブロー加工では刃先、外周逃げ面ともにこのような摩耗は見られず、良好な切削が可能となった。

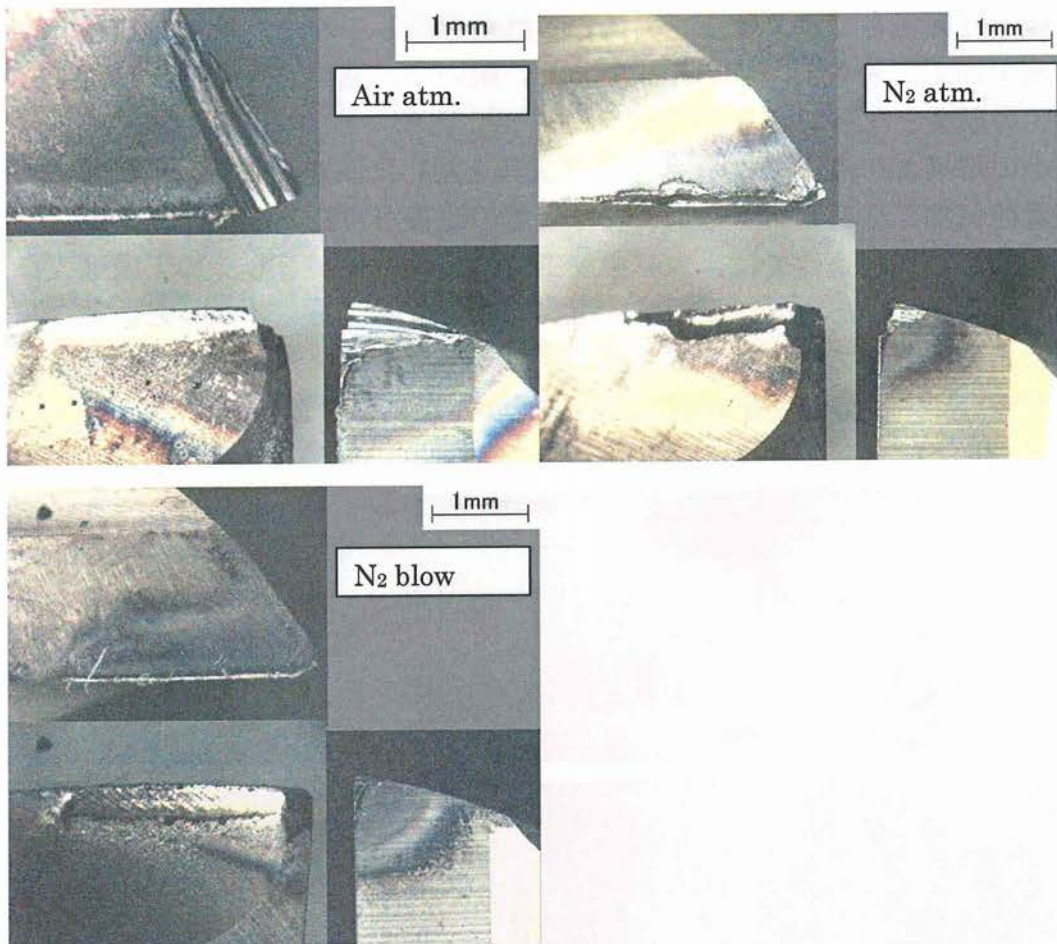


Fig.4.49 工具摩耗状況

工具刃先コーナー部や底刃部分は外周逃げ面と異なり，被削材の仕上げ面と直接接触している部分である．従って，刃先の摩耗はそのまま仕上げ面の劣化に繋がる．

切削距離 10m における加工面の写真を図.4.50 に示す．なお，写真の上段と下段は撮影倍率を変えて撮影したものである．まず，上段の低倍率の写真より，大気中加工と窒素ブロー加工は同等の表面であるのに対して，全体的に窒素雰囲気加工ではざらつきが確認でき，光沢が少ない．倍率を上げて撮影した下段では，大気中加工ではむしろ面はほとんど無く，均一な Cutter 筋があるのに対して写真からはわかりにくい，窒素雰囲気では激しいむしろがほぼ全域に発生している．窒素ブロー加工では小さなむしろが発生している．

この結果は仕上げ面粗さにも反映している．図.4.51 は仕上げ面粗さ Ra である．仕上げ面粗さでは，仕上げ面のむしろが影響しており，最もむしろの少ない大気中加工が最もよい値をとっており，続いて，窒素ブロー加工，窒素雰囲気加工の順番となっている．

以上の結果より，TiN系コーティング工具を用いた高速ミーリングにおいて，窒素雰囲気加工や窒素ブロー加工では凝着の改善が可能となった．また，このような厳しい切削条件では，大気中加工では工具摩耗が著しく加工困難であったが，窒素を用いることによって加工が可能となることもわかった．更に，窒素の供給方法としては，窒素雰囲気加工よりも窒素ブロー加工のほうが工具の損傷が少なく，良好な仕上げ面をえる加工が出来ることがわかった．

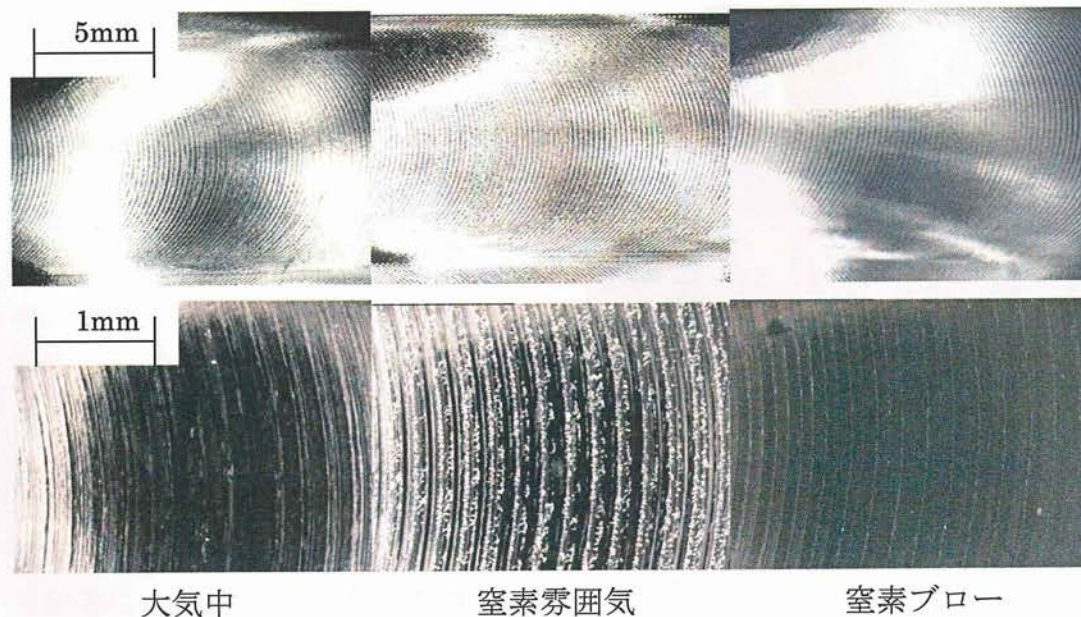


Fig.4.50 仕上げ面写真

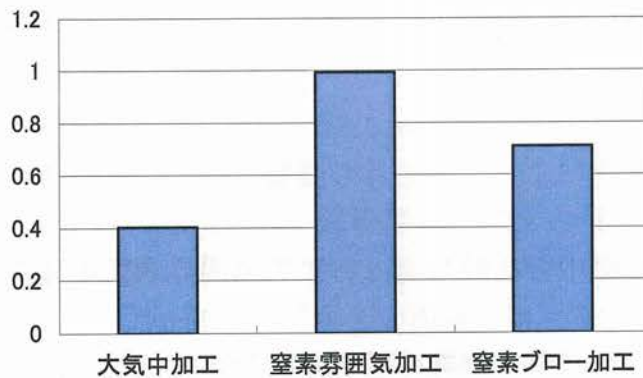


Fig.4.51 仕上げ面粗さ

4.4 結言

旋削加工実験

窒素雰囲気加工を旋削加工に適用し、超硬合金製チップを用いて S45C の連続加工を行った結果以下のような結論を得た。

- ・軽切削において、窒素切削は大気中加工よりも高い切削抵抗を示した。
- ・工具表面の元素分析の結果、窒素切削を行うと Fe の酸化を抑制することが確認された。
- ・軽切削において、窒素切削では工具に激しい凝着を生じることが原因で、工具摩耗は大気中加工よりも窒素切削のほうが大きい。

以上より、窒素切削を行うには超硬合金工具は不向きなことが分かった。それを踏まえ、摩擦係数が低く、耐溶着性の高いコーティング工具を用いて窒素切削を行った結果、

- ・窒素雰囲気中では、コーティングチップを使用することで溶着を比較的抑制できるが、切削距離が大きくなるとコーティング層の剥離が起こる。
- ・窒素雰囲気中ではコーティング層が剥離すると被削材の表面粗さの悪化および溶着を引き起こしやすくなる。

という結果を得た、つまり、コーティング工具では、超硬工具よりも良好な加工を行えるものの、切削距離の増加により、コーティング層の剥離によって下地の超硬合金が露出すると激しい凝着が発生すること、それに伴う加工特性

の悪化が起こることなどが確認されている。それを受けて、工具自体が耐溶着性に優れるサーメットチップによる加工を行い、実験を行ったその結果は以下のようなものである。

- ・サーメットチップの使用によって、工具の凝着が抑えられることが確認された。
- ・窒素雰囲気中では、大気中と比較して、特に工具境界摩耗の進行を著しく抑制することが出来た。
- ・窒素雰囲気においては先端境界摩耗の進行が抑制されるため、大気中に比べて被削材料の表面粗さが改善された。
- ・しかしながら、切削速度を上げると再び工具に凝着が発生する結果となった。また、サーメット工具を用いた旋削加工においては、断続切削を施すと付着物が発生しない等の良好な結果を得た。

このことより、これまでの凝着という問題を解決するため、断続切削の有効性に着目し、加工方法が基本的に、断続切削である、マシニングセンタを用いたエンドミル加工を行った。使用工具は超硬ソリッドエンドミルである。また同時に、エアーのかわりに窒素を吹き付けて加工を行う窒素ブロー加工についても実験し、以下のような結果を得た。

- ・連続切削から断続切削に変化させても、窒素雰囲気中での超硬エンドミルによるミーリングでは、工具に激しい凝着を生じ窒素切削の有効性は確認されなかった。
- ・窒素切削は窒素雰囲気中加工、窒素ブロー加工の違いにかかわらず、窒素を用いた加工では激しい凝着及び欠損を生じた。

したがって本来断続切削であるエンドミル加工でも、超硬工具では凝着が生じた。このことより TiN コーティングエンドミルを用いて、窒素切削を行った結果を以下のようなものである。

- ・窒素切削において TiN コーティング工具では凝着は生じなかった。
- ・しかしながら加工が進むとコーティング層の剥離とともに、凝着が生じた。

この問題を解決するために、断続切削における熱衝撃と物理的衝撃を増加さ

せて刃先付着物を積極的に脱落させようとして加工条件を厳しくし、高速・高送り条件における切削を行った。その結果を以下に示す。

- ・大気中加工では切削不可能な領域において、窒素切削は切削温度、工具摩耗共に小さな値をとった。
- ・大気中加工で見られるコーナー部の摩耗は窒素を用いることにより抑止できたが、窒素雰囲気中加工においては微小な外周すくい面摩耗が生じ、窒素ブロー加工ではコーナー部、外周すくい面共に摩耗を抑制できた。

以上の結果より、従来凝着の発生が激しかった窒素切削において、切削状態をエンドミルによる断続切削に変更するとともに、工具材質の検討や切削条件を改善する事によって工具への凝着問題を改善することが出来た。そのことにより、窒素切削の効果を得る事が可能となり、本来工具摩耗が著しく進行し切削が不可能となる高速大気中加工を窒素を用いる事により加工可能であると言う結論を得た。

第5章 窒素ブローによる高送りミーリングにおける工具寿命改善効果

5.1 緒言

前節の実験では、これまで凝着の発生のために工具の損傷が著しかった窒素雰囲気中切削において、凝着の問題を解決することが出来た。また、切削時の温度が高温となり工具摩耗の進行が早い高速切削条件で窒素雰囲気中は工具摩耗の抑制効果を発揮することも明らかになった。更に、前節では、窒素ガスの供給方法として、密封容器を用いた窒素雰囲気中加工よりも、主轴近傍から窒素ガスを吹き付ける窒素ブロー加工のほうが工具摩耗低減効果を示した。

切削条件は直接生産時間に直結する要素であるから、条件を高くすることは生産性の向上に繋がる。このことから、近年高速高送り加工が注目されている。しかし、切削条件を厳しくすると従来寿命が著しく悪化するという問題が生じるため、容易に条件を厳しくすることはかえって生産性やコストの増加を招いてしまう。

更に、高速高送り加工条件では、図 5.1 に示すように、高速切削条件では切削油剤の使用が熱衝撃を増大させ、サーマルクラックによる工具損傷を引き起こすとともに、工具摩耗を大幅に進行させることが報告されており(5-2)~(5-3)。従って、切削温度が高温となり、工具寿命が著しく低下してしまう高速高送り切削条件において窒素ブロー加工の適用が効果を示せば、生産性の向上が図れると考えられる。このことより、本項では窒素ガスを用いた高速ミーリング加工の可能性について検討を行った。

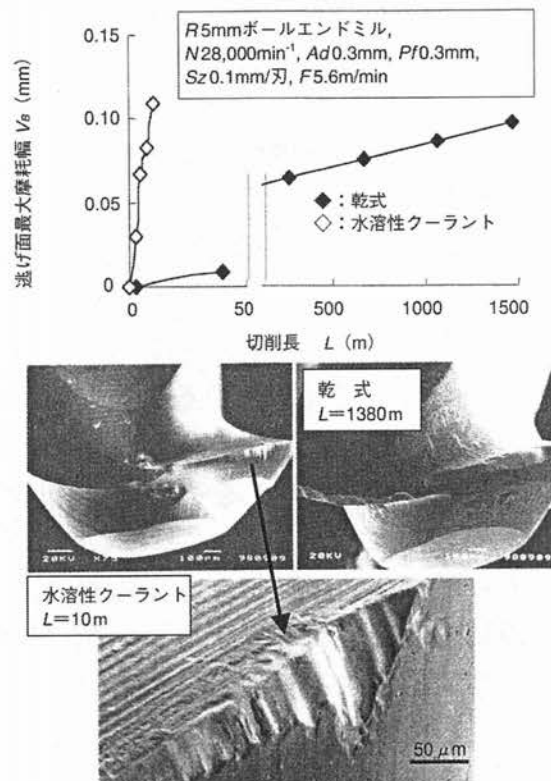


Fig.5.1 高速切削における切削油剤の影響 5-1)

5.2 酸素濃度調整に伴う加工特性の変化

5.2.1 実験概要

前節では、ミーリング加工において窒素雰囲気中切削を行った場合、窒素雰囲気加工よりも窒素ブロー加工のほうが工具摩耗を低減できた。この要因は気体噴射の有無に他ならないわけであるが、ここで、気体噴射による影響として2つの要因が考えられる。まず、1つ目に、窒素ブロー加工では、窒素雰囲気加工と違い主軸に窒素ガスを噴射していることから、噴射による冷却効果によって切削温度の低減が出来、その結果工具の損傷を抑えることが出来たと考えられる。もう一つの要因としては、窒素ガス濃度の違いが挙げられる。窒素雰囲気中では密封容器を使用していることから、高濃度の窒素雰囲気を形成することが出来るが、窒素ブロー加工では、噴射時に少量の酸素が混入してしまうのではないかと考えられる。酸素は3章3節で述べたように、少量でも新生面に酸化皮膜を形成することが出来るため、この微量の酸素が皮膜を形成することによって、摩擦係数を低減させ、工具摩耗の低減が出来たのではないかと考えられる。また、窒素ブロー加工では窒素ガスを噴射していることから、工具に損傷を与えるような反応をするだけの酸素量がないために良好な切削が行えたのではないかと考えられる。このことより、本項では酸素濃度に着目し酸素濃度と切削特性の関係について調査を行う。

切削と酸素の関係についてはまず、3章4節で述べたように真空中で切削加工を行うことが挙げられる。しかしながら、真空中で切削加工を行った場合、大気圧下と異なる特性が生じることとなる。特に、真空中では酸素の関係よりも圧力と切削の影響が発生することから、本研究のような大気圧下の切削加工における現象の把握にこれをそのまま適応することは適切ではない。

ここで、窒素ブロー加工における酸素の影響については、3章5節1項で述べたような酸素噴射の研究において調査された経緯がある。これは、酸素噴射を行う際に酸化皮膜がどのように切削に影響を及ぼすか検討を行う中で脱酸素環境として窒素ガスを噴射したものである。その結果、酸化皮膜が形成されると切削抵抗の低下などが確認されるとともに、酸素が存在しない場合は凝着が生じるというものであった。しかしながら、これらの研究では、超硬工具など、窒素雰囲気下では凝着の生じやすい工具を使用していたことから、前節で可能となったような凝着が解消された後のことには触れられていない。この点より本項では、前節で明らかとなったような凝着の生じない切削条件において酸素濃度と切削特性の関係について調査を行うこととした。

5.2.2 実験装置及び測定方法

(1) 実験装置

本項で用いた装置は前節同様，エンシュウ(株)製 ES450 と神鋼エアテック製窒素雰囲気発生装置である。

本研究に使用した実験装置の接続状況についての概略図を図.5.2 に示す。実験で用いる窒素は窒素発生装置から，酸素は酸素ボンベより供給した。酸素と窒素を各々圧力と流量を調整して混合することによって酸素濃度を変化させて密閉容器内に供給し濃度内酸素濃度を変化させた。空気の組成は Table.5.1 に示すように窒素が 78.08%，酸素が 20.95%であり，約 99%がこの 2 種で構成されている。他要素は総合しても 0.97%程度であり，不活性である。

図 5.3(a)のように流量計を配置し，Table.5.2 をもとにそれぞれの実験条件に合うように酸素と窒素を流量計で調整しながら混合気にして密閉容器内に供給する。供給した混合気の酸素濃度を(b)図の酸素濃度計で測定し，密閉容器内の混合気の酸素濃度がそれぞれの実験条件の濃度に安定した後，切削を行った。

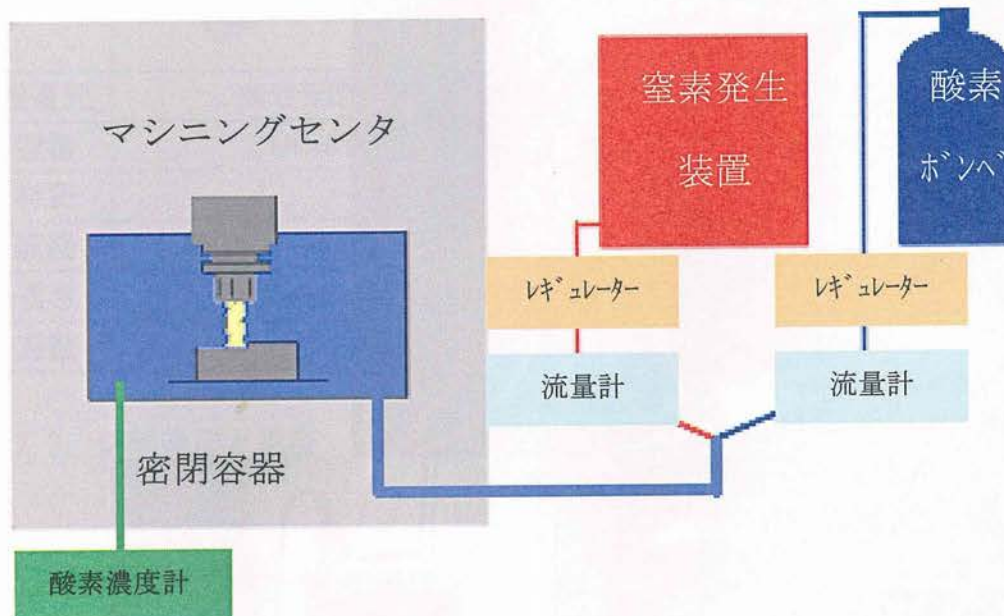


Fig.5.2 実験の概略図

Table.5.1 空気の組成

成分	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Ne	He
比率 [%]	78.08	20.95	0.93	0.034	0.0018	0.00052

Table.5.2 窒素 25[l/min]に対する酸素濃度と流量の換算表

酸素濃度 [%]	酸素流量 [l/min]	窒素流量 [l/min]
1%	0.301	29.873
3%	0.923	29.873
5%	1.572	29.873
10%	3.319	29.873
15%	5.271	29.873
20%	7.468	29.873

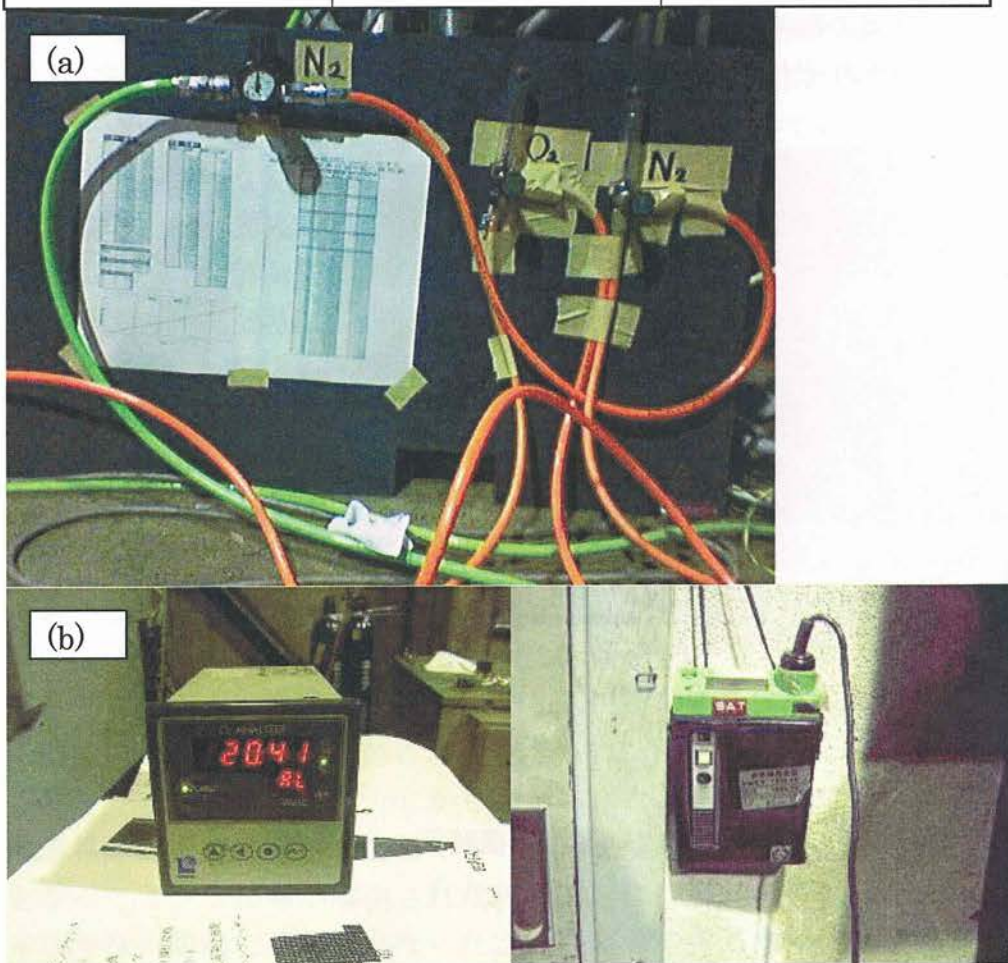


Fig.5.3 実験装置 (a)流量計とレギュレータ (b)酸素濃度計

(2) 使用工具

本項では、これまでに窒素中切削で良好な結果を得ている TiN 系コーティング工具を用いて実験を行った。また、使用工具は現象を把握しやすいように単刃のエンドミルを使用し、実験の利便性の観点からスローアウェイの工具を用いた。実験に用いたチップとホルダーについて表 5.3 に示す。

Table5.3 使用工具緒元

工具外観		工具外観	
製造元	京セラ株式会社	製造元	京セラ株式会社
型番	DMC 810-S16	型番	NDMM 090204ER-SP
材質	—	材質	TiN コーティング 超鋼
直径	φ10	幅	9.5mm
長さ	90mm	厚さ	2.38mm
刃数	1	刃先角	15°

5.2.3 切削速度と温度

(1) 実験概要

本項では、切削速度を変化させた場合、酸素濃度がどのように切削に影響を及ぼすかについて酸素濃度 0.2%以下（以下 0%と略）から 21%（大気中酸素濃度）まで密封容器内の酸素濃度を変化させて切削を行った。

(2) 実験方法

被削材は機械構造用炭素鋼 S50C(HV310)を用いる。切削速度は 100m/min から 250m/min まで変化させ、テーブル送り 100mm のアップカットを行う。酸素濃度を変化させ、それぞれの時の切削点近傍温度、仕上げ面粗さ、切り屑の

発色について調査を行う。切削条件を Table5.4 に、測定項目を Table5.5 に示す。

Table5.4 切削条件

切削速度 [m/min]	100	150	200	250
1 刃辺りの送り [mm/tooth]	0.1			
酸素濃度 [%]	0,1,3,5,10,15,21			
工具直径 [mm]	10			
切りこみ [mm]	(Y)9 mm, (Z)1mm			
工具材質	TiN コーティング超鋼			
被削材	S50C			

Table5.5 測定項目

使用機器	測定項目	測定範囲
光学顕微鏡	工具摩耗	各加工毎
	切りくず	
	被削材	
表面粗さ計	仕上げ面粗さ	
放射温度計	切削点近傍温度	

(3) 実験結果と考察

切削速度を変化させた場合の酸素濃度と切削点近傍温度の関係を図.5.4 に示す。図よりどの切削速度についても酸素濃度に関わらず切削時の温度はほぼ一定であるが、 V_c100 では酸素濃度上昇に伴い、切削温度も上昇していることがわかる。また、酸素濃度 0~1%の間では急激な温度変化が認められることから、酸素が 1%程度混入するだけで切削温度を上昇させる効果がある。これは、図.5.5 示す切り屑の発色からも見て取ることができる。酸素濃度 1~21%までの切り屑の発色はほぼ同色で、茶色(v_c100)、一部青みがかかった茶色(v_c150)、半分青みがかかった茶色(v_c200)、青色(v_c250)と変化する。しかしながら、酸素濃度 0%では 200m/min まで切削速度を増加させても切り屑は全く酸化色を示さず被削材生材の発色を示している。また、図.5.6 から仕上げ面粗さ値は酸素濃度を変化させてもほぼ一定であるが、酸素濃度 0%では僅かに増加している。これは図 5.7~図 5.10 に示す仕上げ面光学顕微鏡写真より、1%では指紋状のカッター筋が酸素濃度の上昇につれ、うろこ状のカッター筋になることと密接に関係していると考察できる。酸化皮膜はこれまでも既述のように摩擦係数が低く、切削において潤滑効果や、切削抵抗の低減に繋がるがこれが仕上げ面の様子に変化を及ぼしたものと考えられる。

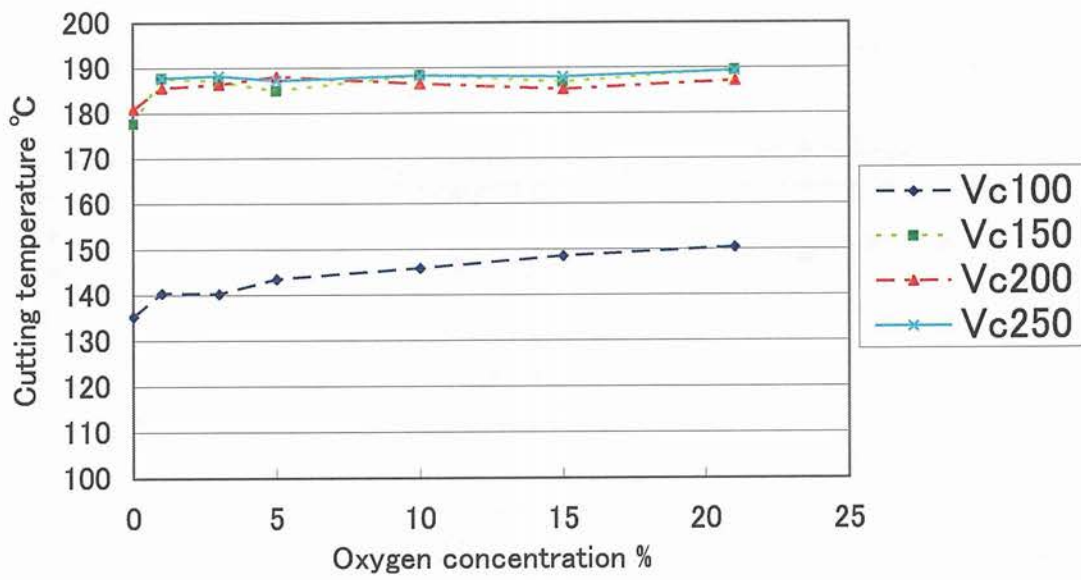


Fig.5.4 酸素濃度と切削速度の関係

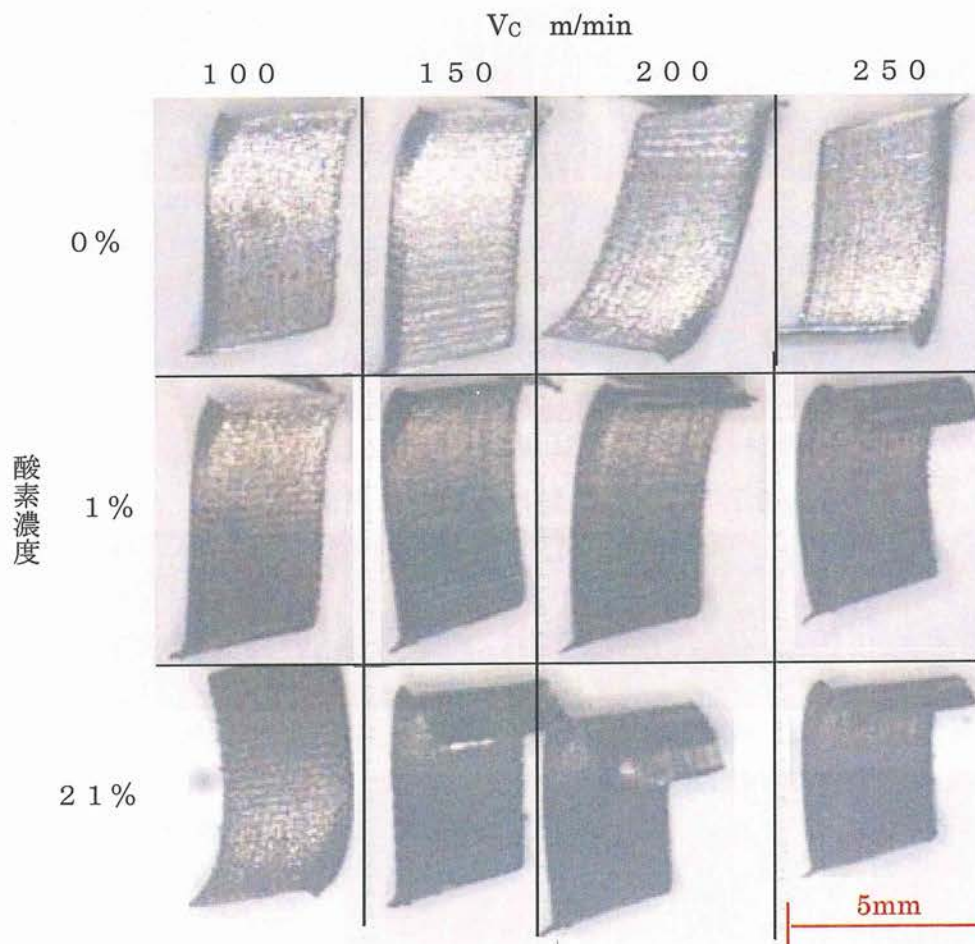


Fig.5.5 切りくず

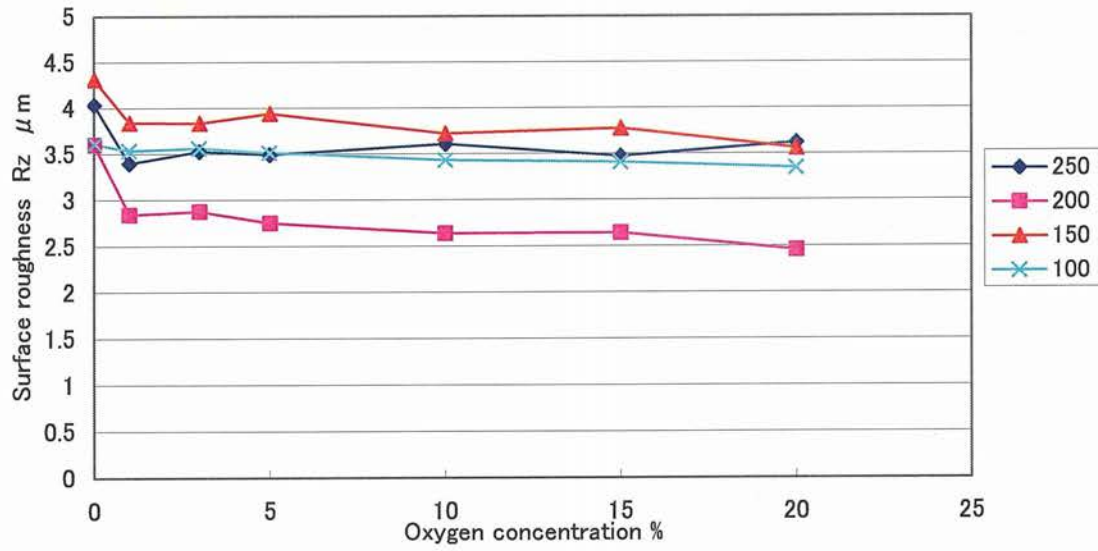


Fig.5.6 仕上げ面粗さ

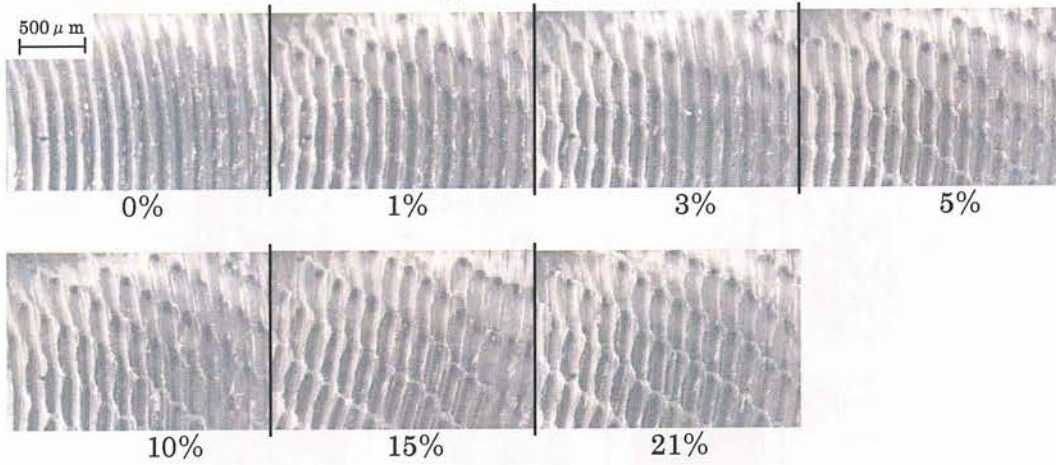


Fig.5.7 Vc100における被削材表面

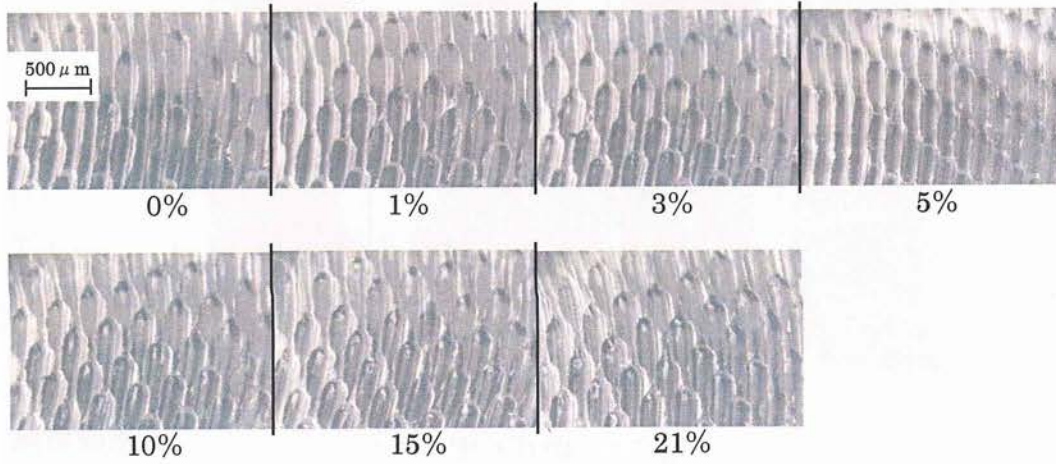


Fig.5.8 Vc150における被削材表面

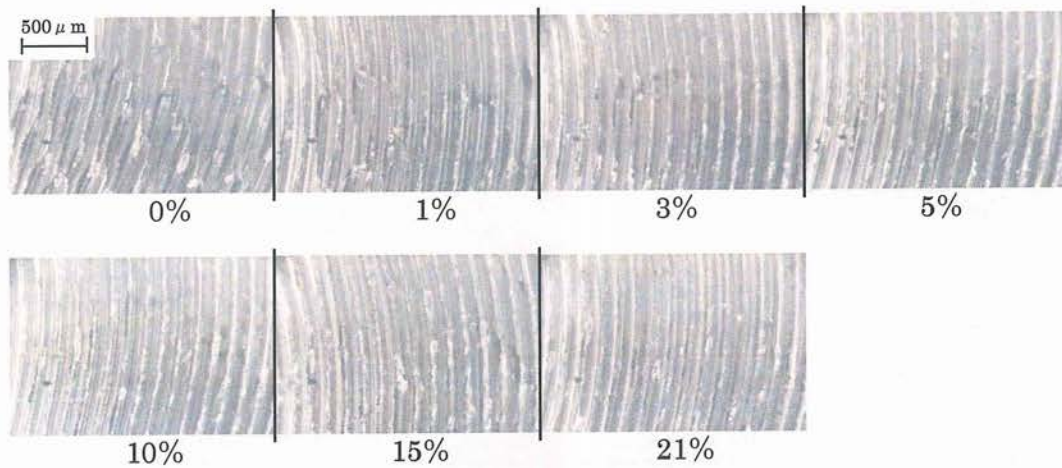


Fig.5.9 Vc200 における被削材表面

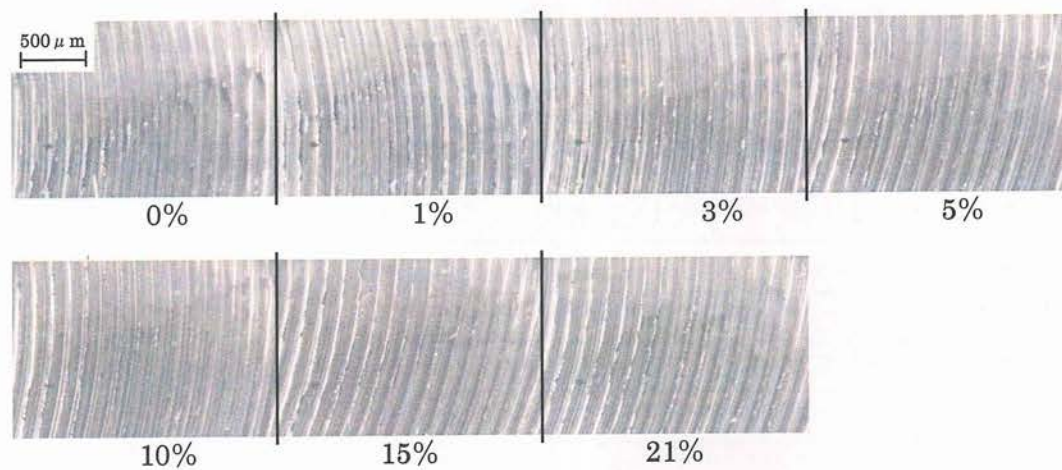


Fig.5.10 Vc250 における被削材表面

5.2.3 酸素濃度変化と工具摩耗の関係について

(1) 実験概要

前項の実験では、各切削速度値において酸素濃度が1%以下とそれ以上の条件において差異が見られた。この結果を受けて本項では、切削速度 250m/min において切削距離 20m まで切削を行い、酸素濃度変化が工具摩耗に及ぼす影響について検討を行う。

(2) 実験方法

前項と同様に酸素濃度を0~21%まで変化させる。それぞれの濃度において工具のすくい面，外周逃げ面，底刃逃げ面の摩耗を切削距離5mおきに測定し，切削距離20mまで加工を行う。使用工具をTable5.1，切削条件をTable5.6，測定項目をTable5.7に示す。

Table5.6 切削条件

主軸回転数 [rpm]	8000rpm
切削速度 [m/min]	251m/min
送り [mm/min]	800 mm/min
切込み (y)	(Y)9 mm, (Z)2mm
工具	TiN コーティング
被削材	S50C

Table5.7 測定項目

使用機器	測定項目	測定範囲
光学顕微鏡	すくい面摩耗	切削距離5m 毎
	外周逃げ面摩耗	
	底刃逃げ面摩耗	
放射温度計	切削点近傍温度	
EPMA	切りくず表面の酸化層	

(3) 実験結果及び考察

実験結果の工具顕微鏡写真を図5.11に示す。なお，切削距離は20mである。図より，どの面においても酸素濃度0%では殆ど工具摩耗は確認出来なかった。しかしながら，酸素濃度が1%になると空気中の酸素濃度である21%とほぼ同等の工具摩耗を示している。このことから，酸素の濃度に関わらず1%程度でも酸素があれば大気中切削と同じように工具摩耗は進んでしまうと考えられる。

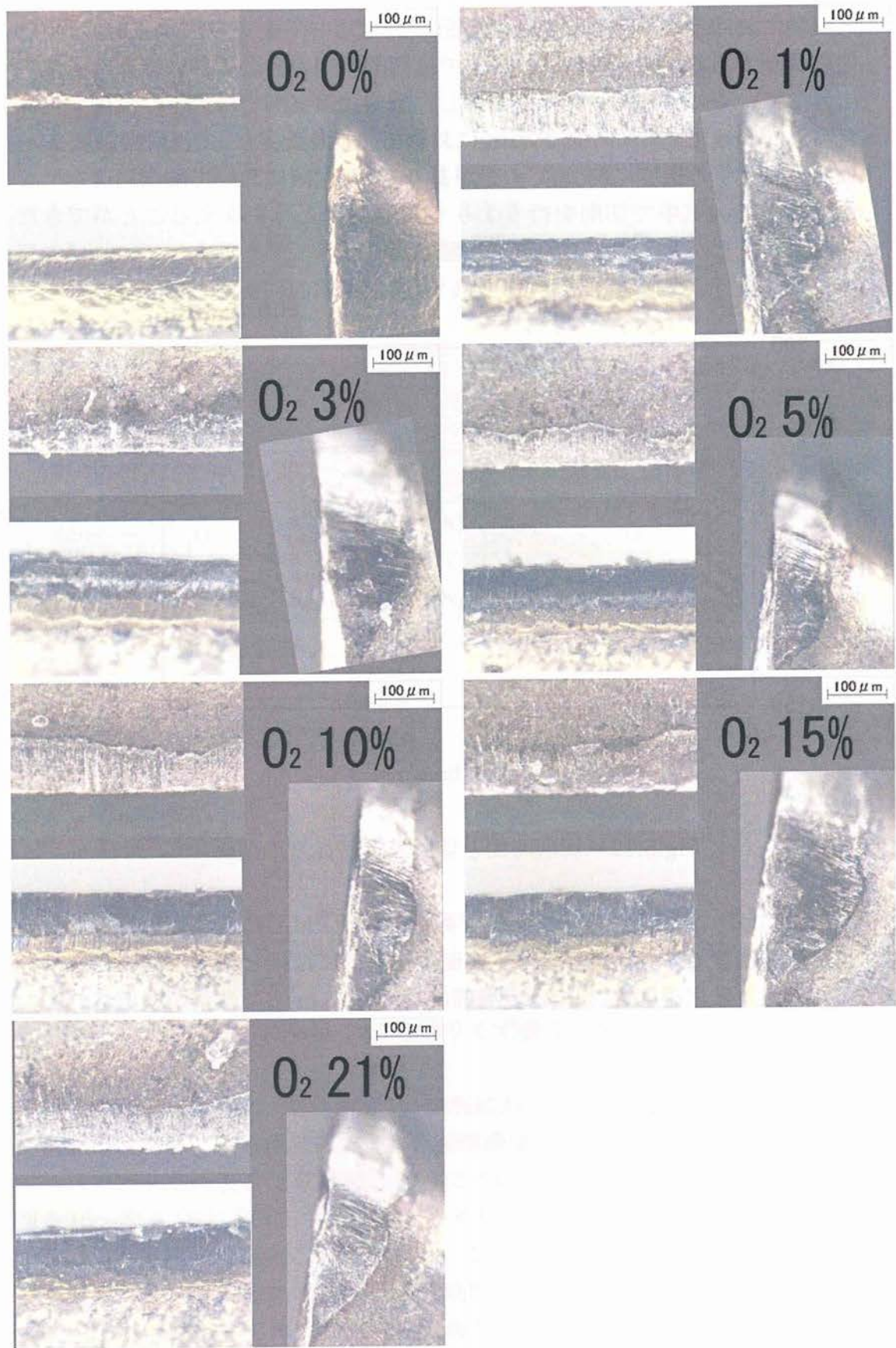


Fig.5.11 酸素濃度と工具摩耗

実験における切削点近傍の温度を図.5.12 に示す。測定方法は 4.3.1 項で既述の通りである。酸素濃度 1~21%では切削時間の経過に伴い徐々に温度が上昇していくのが確認された。しかし、酸素濃度 0%では大きな温度変化は見られなかった。切削時間 25min において、酸素濃度 0%では酸素濃度 21%に比べ発生する温度に約 90°Cの差があり、窒素切削において酸素濃度を低くすることで大気中で切削を行うよりも切削温度上昇を抑えることができたと言える。しかし、加工雰囲気中に酸素が 1%程度でも混入していれば大気中で切削を行うものとあまり変化ない温度上昇傾向にあると言える。

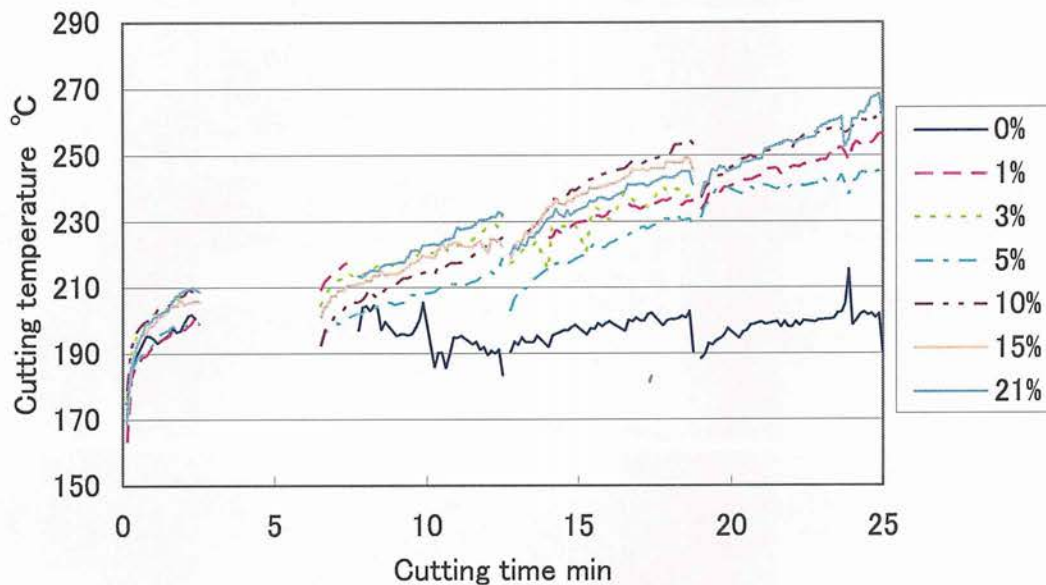


Fig.5.12 切削時間と切削点近傍温度の関係

図.5.13 は切り屑断面を電子プローブ微小分析(EPMA)にて測定を行ったものである。酸素濃度 0%では切り屑すくい面側表層部には殆ど酸素は検出されていないのに対し、酸素濃度 21%では表層部から約 50 μm まで酸素が検出されている。

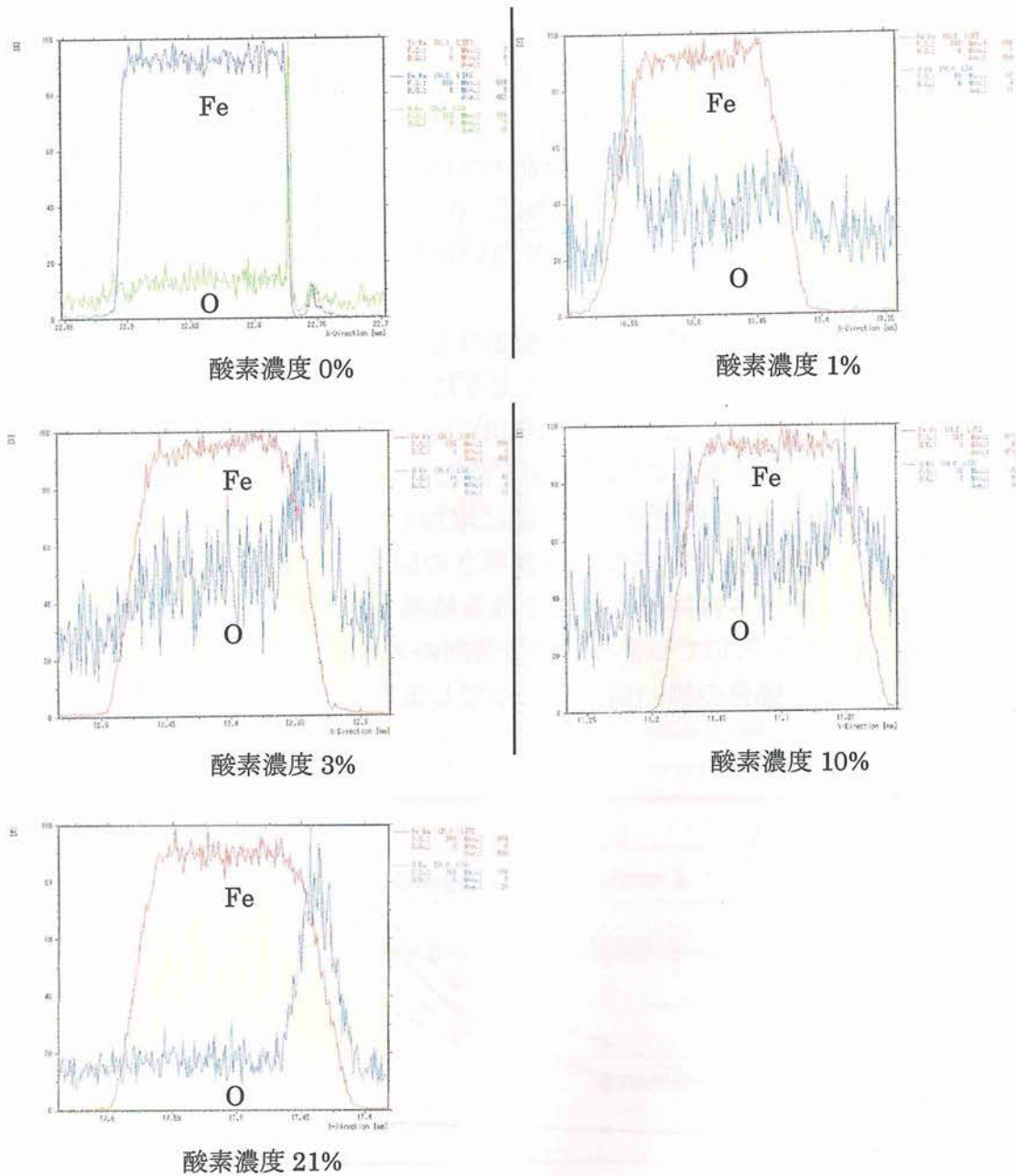


Fig.5.13 EPMA による切りくず表面の酸化皮膜の割合

前項で述べたように、酸素濃度 1~21%においては加工距離の増加とともに工具摩耗が増加している傾向にあるが、酸素濃度 0%においては極微小な摩耗を示す結果であった。この工具摩耗の推移について各面に置ける摩耗量のグラフを図.5.15~図.5.16に示す。これより、すくい面、外周逃げ面、底刃逃げ面ともに上述のような傾向にあることがわかる。この工具摩耗は前項の図.5.12の切削点近傍温度からも見て取れるように、切削時の温度に密接に関係しており、酸素濃度 1%以上については切削距離の増加とともに切削温度の上昇とそれに伴う

工具摩耗が確認できた。しかしながら、ここで着目すべき事項としては切削温度、工具摩耗ともに酸素濃度 0%においては切削距離の増加に伴う値の上昇は見られなかったという事である。つまり、本実験中について要約すると、酸素濃度 0%で加工を行うことにより、工具寿命の大幅増加が可能であるという結論を導き出すことができる。さらにいうならば、0%においては約 25min の切削時間を経ても工具は未使用時とほぼ変わらない状態であることが立証されたとと言える。

ここで、この工具寿命の推移と切削温度の上昇傾向の起因する要因について考察すると、まず酸素濃度の変化がどのように切削に影響を及ぼしているかについて述べる必要がある。図.5.17 は前項(3)で述べた EPMA の分析結果について、酸素濃度と酸化皮膜厚さの関係をまとめたものである。この図より、酸素濃度 0%と 1%の間において皮膜厚さが大幅に増加している傾向が読み取れる。しかしながら、この EPMA による酸化皮膜厚さの図についてもやはり 1~21%の濃度では酸化皮膜の厚さは同等の数値を取る結果となった。このことから切削時に酸素が 1%程混入してしまうと窒素切削のメリットは得られず、大気中における加工となんら遜色の無い切削になってしまうということが結論づけられる。

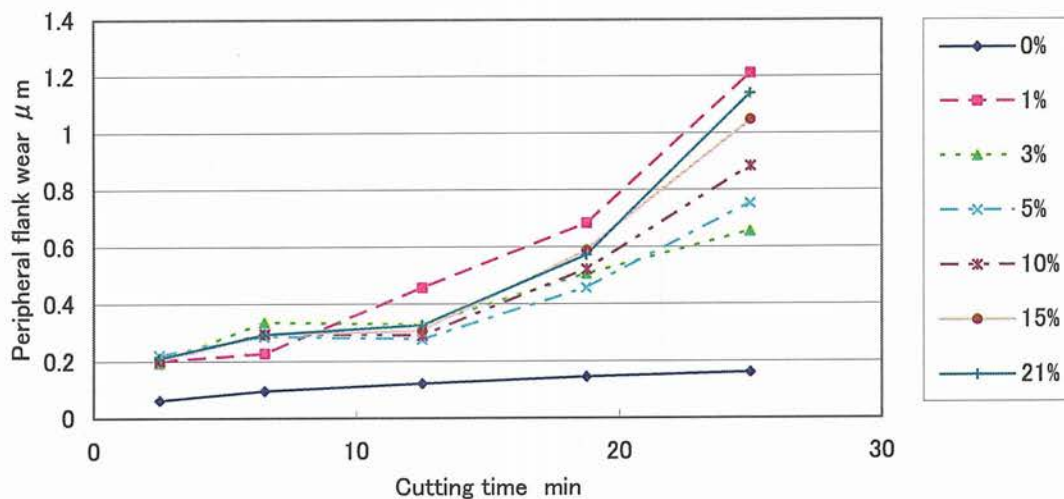


Fig. 5.15 外周逃げ面摩耗

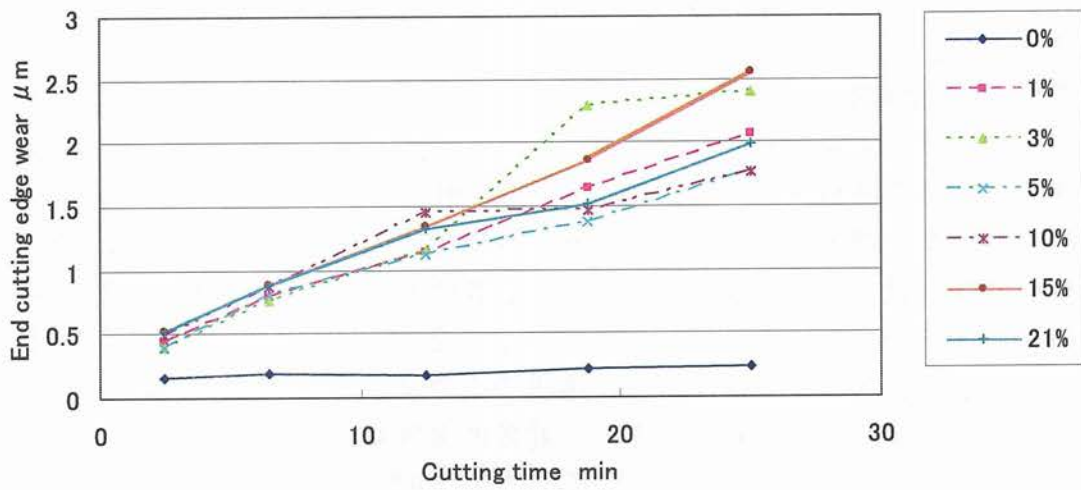


Fig. 5.16 底刃逃げ面摩耗

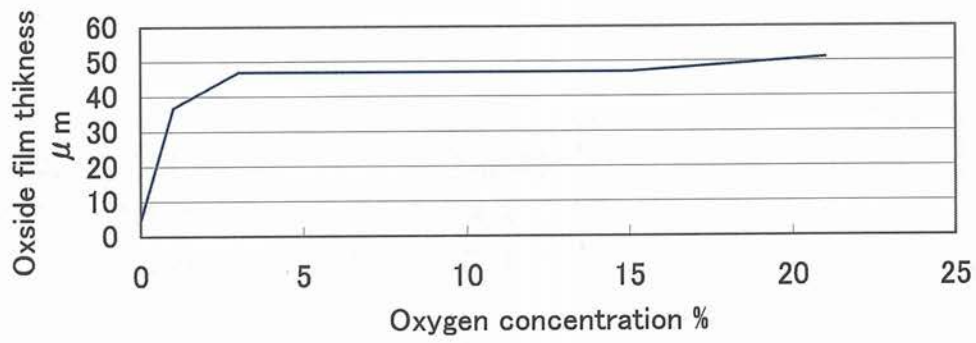


Fig.5.17 酸化皮膜厚さ

5.3 窒素ブロー加工の酸素含有量についての検討

5.3.1 実験概要

前項までの実験において、加工雰囲気窒素を窒素で満たし切削を行う窒素切削法が切削温度を低減させ、工具寿命の大幅な増加が出来る事が確認できた。

この結果を踏まえ、本項では窒素ブロー加工の有効性について検討する。窒素切削では従来雰囲気作りに密封容器を要するが、これは装置が大掛かりになり工作機械の大型化や専用機化を招いてしまう。これに比べ窒素ブロー加工では必要となる装置は窒素吹き付け機構のみで済む事から装置の簡略化、汎用機への適応性に優れていると言える。前項の実験で、窒素切削法では、酸素濃度が1%以上になると大気中での切削と同等の切削温度、工具摩耗になることが判明しており、窒素ブロー加工についても窒素による効果を得るためには、酸素濃度1%以下であることが要求される。このことより窒素ブロー加工の特性について調査した。

5.3.2 実験装置

本実験における窒素ブロー加工は密封容器を使用せず、工具先端から40mmの位置にあるコレットのスリ割り溝から窒素を供給するスリットスルー方式を用い、加工点付近を窒素でシールドする加工法を採用した。なお、吹き付け流量は125 L/minである。

5.3.3 実験条件

本実験では上記の窒素ブロー加工法が、酸素濃度1%以下の条件を保っているかを検証した。加工は窒素雰囲気加工、窒素ブロー加工、酸素濃度1%雰囲気下での加工の3つの条件について行い、それぞれテーブル送りで0m~1mまで切削を行い、切削点近傍温度と切り屑の状態の測定を行った。実験の条件についてTable5.8に示す。

Table5.8 Cutting condition

Cutting speed	251 [m/min ²]
Feed per tooth	0.1 [mm/tooth]
Depth of cut (Y, Z)	9 [mm], 2[mm]
Number of flute	1
Tool type	Throw away tool
Indexable insert	TiN coated tip
Work material	S50C

5.3.4 実験結果及び考察

切削後に切り屑を回収し、発色の具合を画像処理ソフトより近似色を求めると、図 5.18 のように、窒素雰囲気では切り屑は被削材生材に近い発色 (RGB215,207,203 ~ 230,227,226)、酸素濃度 1%では青 (RGB10,4,52 ~ 15,5,85) であるのに対して、窒素ブロー加工では茶 (R68G39B10 ~ R107G55B4) の発色を示した。窒素ブロー加工では切削により発生した切り屑は高温のまま雰囲気から外れて大気中に放出されるために切削後に酸化する事も考えられる。が考察でき、この外気での酸化分を足しても窒素ブロー加工では酸素濃度 1%での加工よりも切り屑の酸化が進んでいないことから窒素ブロー加工では加工点付近の濃度が 1%以下に保てていると考察できる。また、図.5.19 に示す切削点近傍温度では窒素の吹き付けによる冷却効果により窒素ブロー加工が窒素雰囲気加工よりも小さい値をとった。

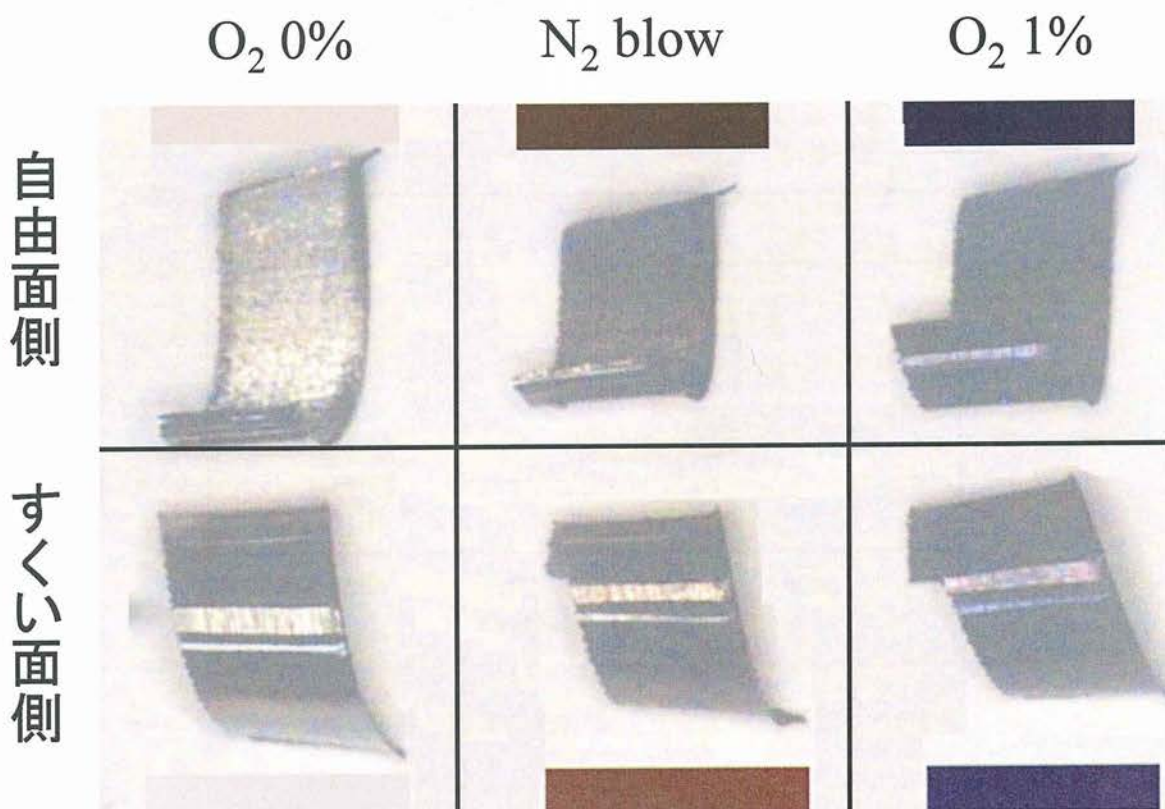


Fig.5.18 酸素濃度を変化させた場合の切りくずの発色

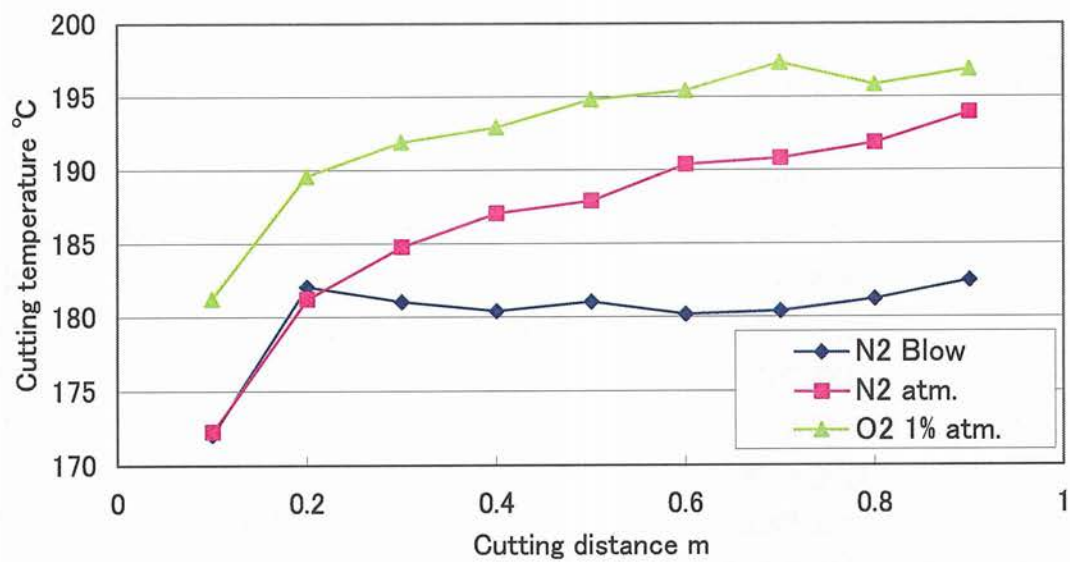


Fig.5.19 窒素ブローにおける切削点近傍温度

5.4 窒素ブローにおける S50C の高送り加工における工具寿命改善効果

前項の実験において、高速切削条件において窒素ブロー加工の有効性が確認されたことを受けて、本実験では、S50C を用いて実験を行った。S50C は快削性に優れることから、クランク軸やクラッチ部品を始め、チェーン部品、座金、傘骨など広く機械部品用材料として使用されている材料である。また、生材では HRC13 程度と硬度は低いが、焼き入れ焼き戻し処理を施すことによって約 25HRC まで硬度を上げることができることから、プラスチックや樹脂の金型にも用いられる。ここで、現在 S50C において高送り条件とされる切削条件について述べる。図 5.20～図 5.22 は S50C における高送り切削とされる切削条件を一般に公開されている資料よりまとめたものである⁵⁻⁶⁾。図より、S50C における切削ではテーブル送り値は 1000mm/min 程度で、主軸回転数は 5000rpm 程度、切削速度 150m/min ぐらいの値が高送り条件とされるといえる。これを受けて本実験では同図中 ■印に示すように標準的な高送り条件に比べ少し厳しい条件を与えて S50C における窒素ブロー加工の有効性を検証する。

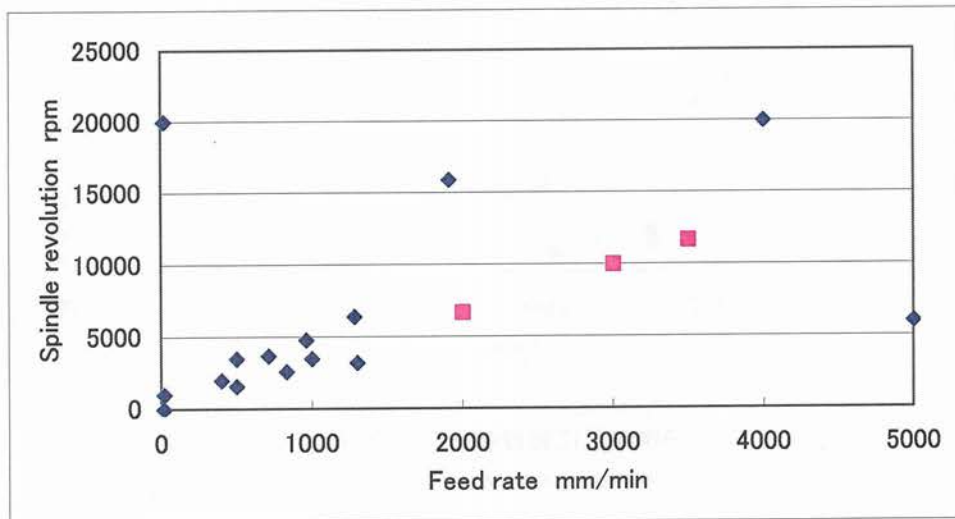


Fig.5.20 高送り加工における送りと主軸回転数

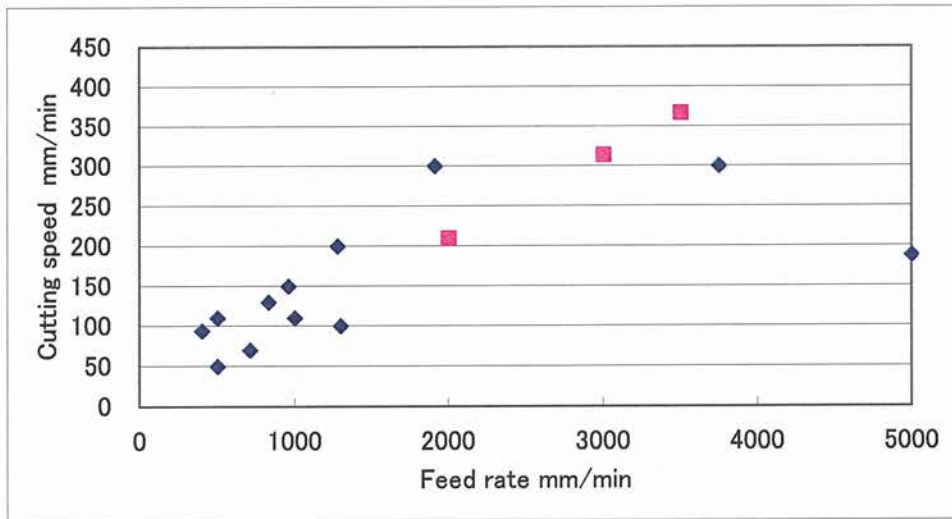


Fig.5.21 高送り加工における送りと切削速度

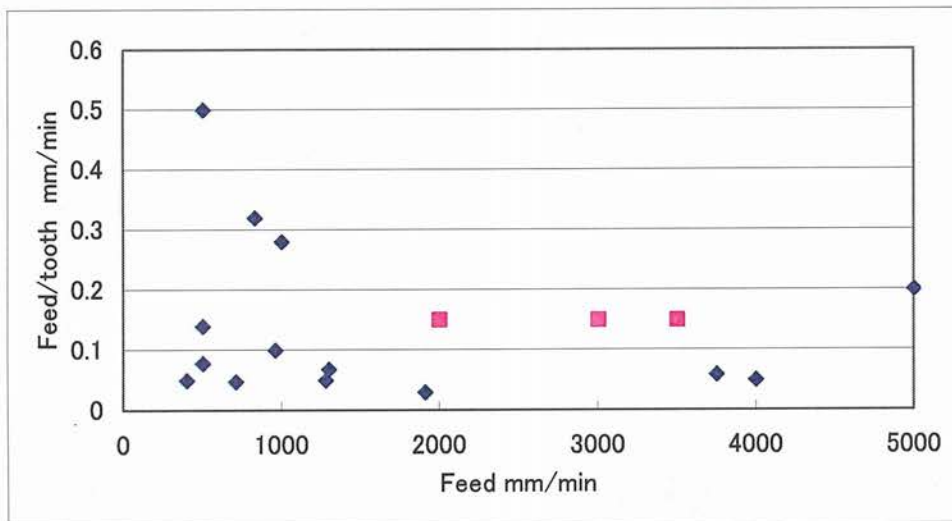


Fig.5.22 高送り加工における送りと1刃あたりの送り量

5.4.1 TiN コーティングエンドミルを用いた切削実験

(1) 実験概要

本実験では被削材に S50C を使用し、高送り条件を与えて実験を行った。実験に用いた工具は TiN コーティング工具であり、この工具における高送り加工条件での窒素ブロー加工の有効性について検証した。

(2) 実験方法

本実験で用いた切削条件を表 5.9 に示す。実験で用いた切削条件は送り速度を 2000mm/min とし、1 歯あたりの送り量を 0.1mm/rev とした。また、使用した工具は $\phi 10\text{mm}$ の 2 枚刃コーティングエンドミルであるが、半径方向に 9mm とほぼ溝切削に近い値を与え、軸方向に対しては 2mm の切込みを与えるものとした。さらに、窒素ブロー加工の有効性について検証を行うために、比較対象として大気中加工、エアブロー加工についても実験を行い加工特性の違いについて調べるものとした。また、使用した被削材は前述の通り、機械構造用炭素鋼 S50C で大きさ 100mm×90mm×80mm の直方体を使用した。そして、切削終了後には表 5.10 のように測定を行った。

Table5.9 : 加工条件

工具	TiN コーティング超硬エンドミル
切削速度[m/min]	314
送り[mm/min]	2000
1 刃あたりの送り [mm/rev]	0.1
切り込み深さ[mm]	ar9,aa2
切削方法	アップカット
被削材	S50C
工具直径[mm]	10 [2 枚刃]

Table5.10 測定項目

使用機器	測定項目	
光学顕微鏡	工具摩耗	すくい面摩耗
		外周逃げ面摩耗
		底刃逃げ面摩耗
表面粗さ計	仕上げ面粗さ	
放射温度計	刃先近傍温度	
CCD カメラ	動画撮影	

Table5.11 加工環境定義

	大気中加工	エアブロー加工	窒素ブロー加工
流量 L/min	—	125	125
供給方法	—	コレットスルー	

(3) 実験結果及び考察

図 5.23 に加工時の様子を撮影した写真を示す。大気中加工では、火花が激しく発生している様子がわかる。この火花発生は、工具の摩耗が進行するとともに増加する傾向があった。また、エアブロー加工では、14.5m 付近で赤熱と火花が発生。17m 付近から加工終了まで火花が激しく発生していた。一方で、窒素ブロー加工では、赤熱や火花の発生は加工終了時まで見ることができなかった。

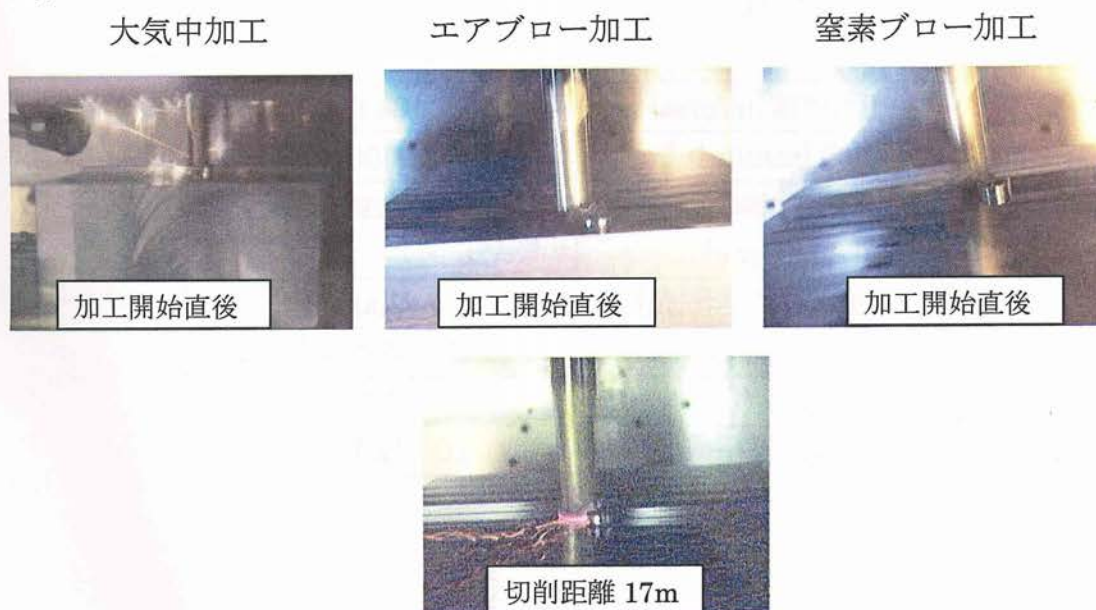


Fig.5.23 加工中の様子

このような火花の発生は工具にも大きく影響を及ぼし、図 5.24 に示す各加工距離における外周逃げ面と底刃逃げ面の写真より、大気中加工では切削初期から工具摩耗が進行し、切削距離 15m で大きな欠損が生じ切削距離 20m では欠損に加え、工具摩耗が大幅に進行した。これを受けて、大気中加工では切削距離 20m において本来の切削が不可能となったと判断し、ここを工具寿命と判断した。また、エアブロー加工においては、大気中同様に切削距離 15m において大きな欠損が生じ、さらに加工距離を進めると、欠損を生じた上に摩耗が進行した為、切削距離 20m で切削続行不可能であると判断した。このように、大気中加工とエアブロー加工ではエアーをブローしているにもかかわらず、同距離で工具寿命を向かえた。しかしながら、窒素ブローにおいては、大気中加工やエアブロー加工で工具寿命と判断した切削距離 20m において工具摩耗は殆ど進行しなかった。さらに、窒素ブロー加工ではその後切削距離を進めたところ、切削距離 35m において摩耗が生じ、切削距離 40m において大きな工具摩耗が生じ、切削継続困難となったことから、ここを工具寿命と判断した。

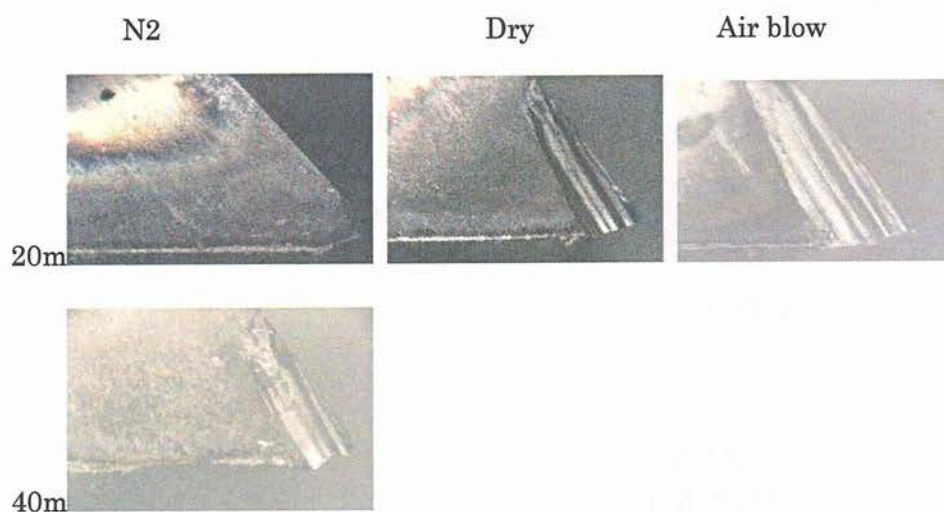


Fig.5.24 TiN コーティングエンドミルにおける外周逃げ面顕微鏡写真

図 5.25 に各条件における切削距離と工具摩耗の関係を示す。図からも、大気中、エアブロー加工が切削距離が進むとともに工具摩耗が進行しているのに対して、窒素ブロー加工では、工具摩耗の進行を抑えることが出来ている。

これらの事を受けて、TiN コーティング超硬エンドミルを用いた切削実験では、大気中加工やエアブロー加工に比べて、窒素ブロー加工では送り 2000m/min のような高い送り条件において約 2 倍の工具寿命の増加が確認できたものであるといえる。

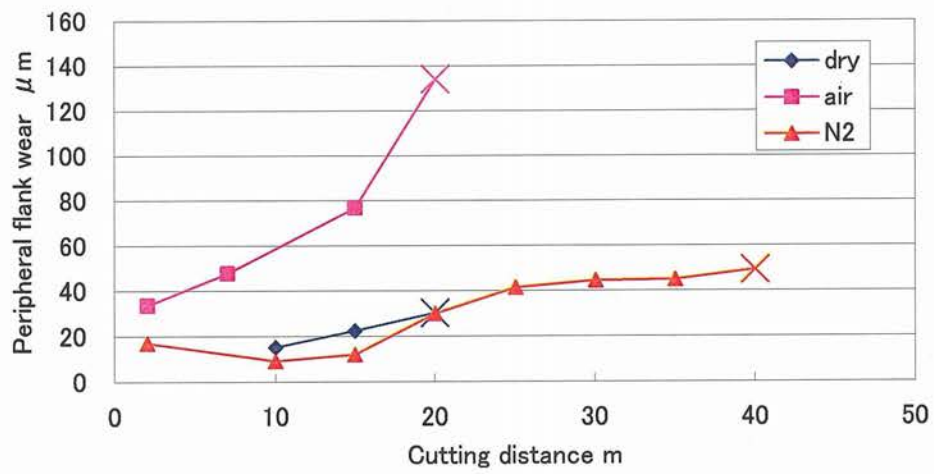


Fig.5.25 切削距離と外周逃げ面摩耗の関係

5.4.2 TiAlN コーティング超硬エンドミルにおける切削実験

(1)実験概要

前項の実験結果より、窒素ブロー加工は S50C のミーリングにおいて工具寿命を増加させることが出来るという結果を得た。また、一般的に高い送り値を与えるためにはより高い切削速度をとる傾向にあるといえる。そこで、高送り条件では送り値を上昇させると切削速度は上昇し、切削時の温度が高くなり工具寿命は低下する傾向にある。また、窒素切削では切削時の温度が上昇する、即ち発熱量が大きくなる条件であるほど、より顕著に窒素による効果が得られるものであると思われる。また、昨今は工具のコーティング技術が飛躍的に発展し、より高性能な工具が開発されてきた。ミーリングにおいては、TiAlN コーティング工具が主流となりつつあり、この工具は図 5.26 に示すように、前項で用いた TiN コーティング工具よりも高い酸化開始温度を持つ。これらの事を受けて、本項では、TiAlN コーティング工具を使用し、前項の実験よりも高い送り速度を与えた場合の窒素ブロー加工による寿命増加効果について検証を行った。

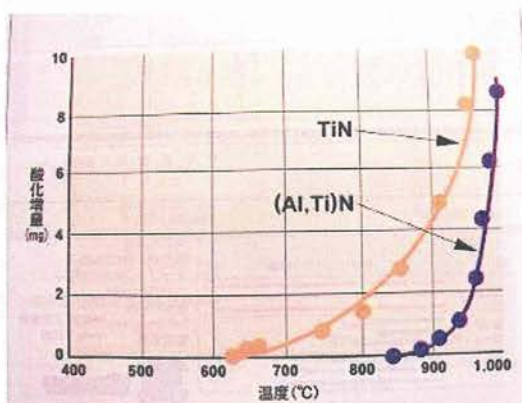


Fig.5.26 コーティング材種と酸化開始温度⁵⁻⁵⁾

(2)実験方法

前項の実験では、TiN コーティング工具を用いて送り速度 2000mm/min において切削を行ったが、TiAlN コーティング工具では更に高い送り条件でも窒素ブロー加工では切削できるのではないかと考え、本項では 2000mm/min, 3000mm/min, 3500mm/min の送り値を与え、切削条件を厳しくした際の窒素ブロー加工の有効性を検討する。また、比較条件としては前実験同様に大気中加工と、エアブロー加工の加工を行った。被削材はまた S50C を使用。大きさ 200mm×100mm×80mm の直方体である。

本実験で用いた切削条件を表 5.12 に示す。実験で用いた切削条件は送り速度を 2000mm/min とし、1 歯あたりの送り量を 0.1mm/rev とした。また、使用した工具はφ10mm の 2 枚刃コーティングエンドミルであるが、半径方向に 9mm とほぼ溝切削に近い値を与え、軸方向に対しては 2mm の切込みを与えるものとした。実験における測定項目は表 5.13 の通りである。

Table5.12 : 加工条件

工具	TiAlN コーティング超硬エンドミル		
主軸回転数[rpm]	6667	10000	11667
切削速度[m/min]	209	314	367
送り[mm/min]	2000	3000	3500
1 刃あたりの送り[mm/rev]	0.15		
切り込み深さ[mm]	ar5,aa2		
切削方法	ダウンカット		
被削材	S50C		
工具直径[mm]	10 [2 枚刃]		

Table5.13 : 測定項目

使用機器	測定項目	
光学顕微鏡	工具摩耗	すくい面摩耗
		外周逃げ面摩耗
		底刃逃げ面摩耗
表面粗さ計	仕上げ面粗さ	
放射温度計	刃先近傍温度	
CCD カメラ	動画撮影	

表 5.14 : 加工環境定義

	大気中加工	エアブロー加工	窒素ブロー加工
流量[l/min]	—	125	125
供給方法	—	コレットスルー	

(3)実験結果及び考察

切削加工中の様子を図に示す。図 5.27 より、テーブル送り 2000mm/min では 3 条件とも目立った変化は見られなかった。さらに送り値を増加させ、テーブル送り 3000mm/min では大気中加工では加工初期で火花が発生した。さらに 3500mm/min ではエアブロー加工と大気中加工で火花が発生しているのが確認できた。しかし、窒素ブロー加工ではいずれの条件においても火花は発生することがなかった。このことから、エアブロー加工では、気体噴射による冷却作用がある程度働くが、切削速度が速く発熱の大きくなるような条件においては冷却しきれず、火花の発生に繋がると考えられる。さらに、エアブロー加工では、切削時、新生面の酸化反応に必要な酸素を常に切削点に大量供給しているような状態となる。これが送り 3000mm/min 以上で火花が発生した要因である。このような加工の様子からも、窒素ブロー加工は高い送り値の切削においても切削熱を抑える効果を発揮していることがわかる。

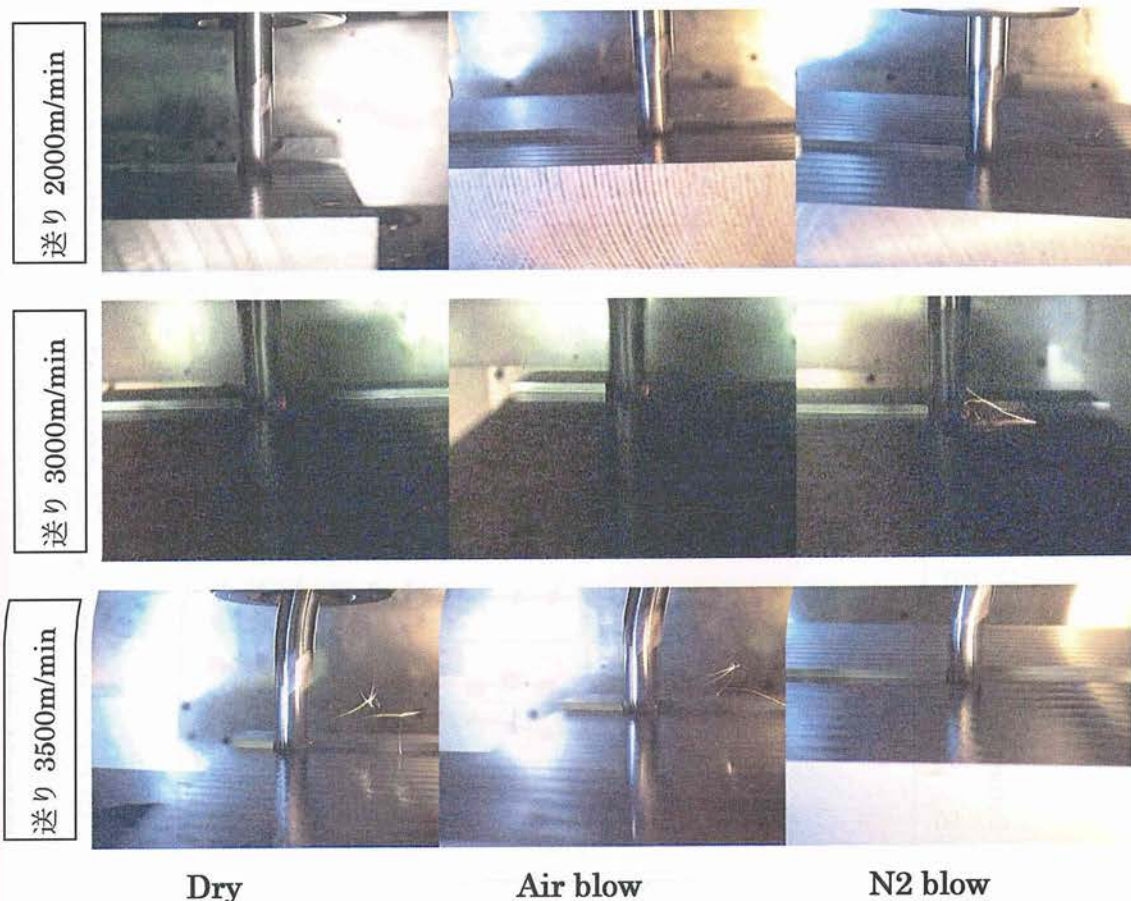


Fig.5.27 切削中の様子

各送り条件における切削距離と加工点近傍温度の関係を図 5.28 と図 5.29 に示す。

送り 3000mm/min の温度グラフをみると、はじめの 4m 付近までの温度は大気中、エアブロー、窒素ブローそれぞれに目立った温度差はみられないが、切削を進めるにつれて、大気中加工はエアブロー加工、窒素ブロー加工よりも高い温度を示すようになっていく。しかしながら、この条件では、窒素ブローとエアブローの値に大きな違いは見られない。従って、送り 300mm/min における窒素ブローと大気中との加工点近傍温度の違いは気体噴射による影響であるといえる。しかしながら、送り値を 3500mm/min まで上昇させると、図 5.29 に示すように、エアブロー加工よりも窒素ブロー加工が加工初期から低い切削点近傍温度を表す。従って、火花の様子や切削点近傍温度の結果より、窒素ガスによる効果はより厳しい切削条件下において発揮できると考察できる。

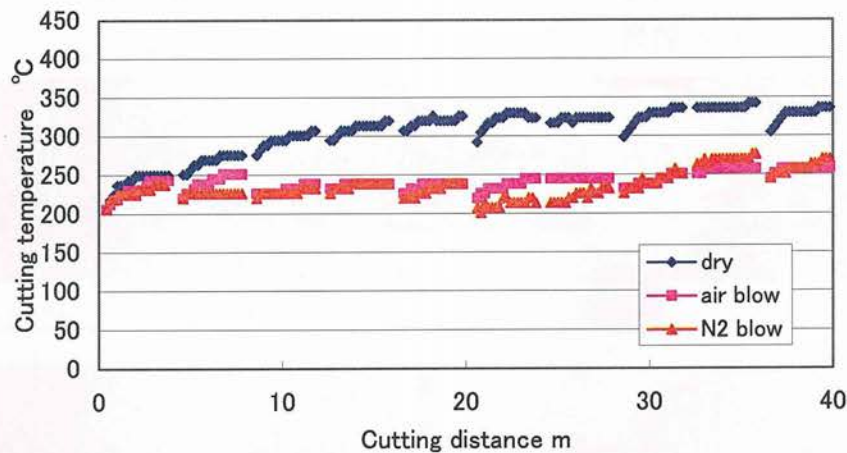


Fig.5.28 送り 3000mm/min における切削距離と切削点近傍温度

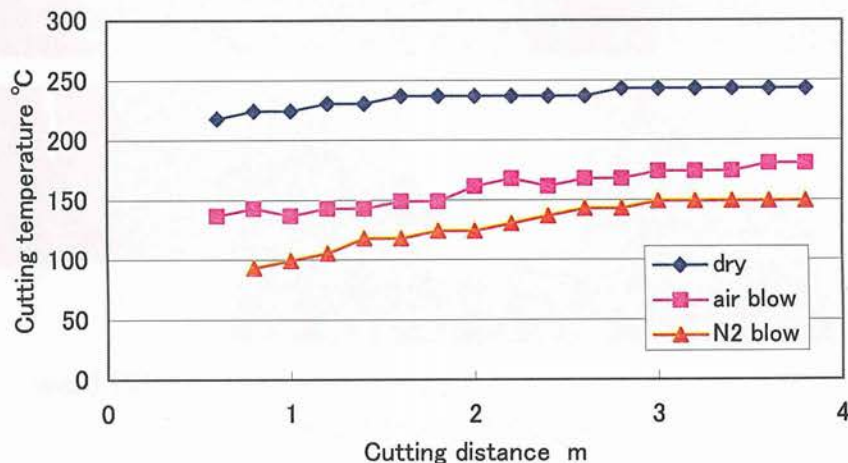


Fig.5.29 送り 3500mm/min における切削距離と切削点近傍温度

このような温度や火花の結果は工具摩耗にも同様の結果を及ぼした。図 5.30～図 5.32 は各送り条件における切削距離と外周逃げ面摩耗の実験結果である。図より、加工の様子に変化が見られなかった送り 2000m/min では空气中、エアブロー、窒素ブローともに工具摩耗にはほとんど差が見られない。一方、3000m/min では空气中加工においてのみ火花の発生が見られるとともに、切削点近傍温度も空气中で他よりも約 100 度高い値を示したが、工具摩耗に関してこの送り値において、切削距離 46m で大気中加工では欠損が生じ工具寿命と判断した。また、さらに、送り 3500mm/min では空气中、エアブローで火花の発生が確認されるとともに、加工点近傍温度も切削初期より高くなったが、工具においても、空气中では 16m、エアブローでは 8m において欠損が生じる結果となった。また、この条件では、窒素ブローでは切削距離 20m では約 100 μ m の外周逃げ面であり、引き続き加工可能であった。

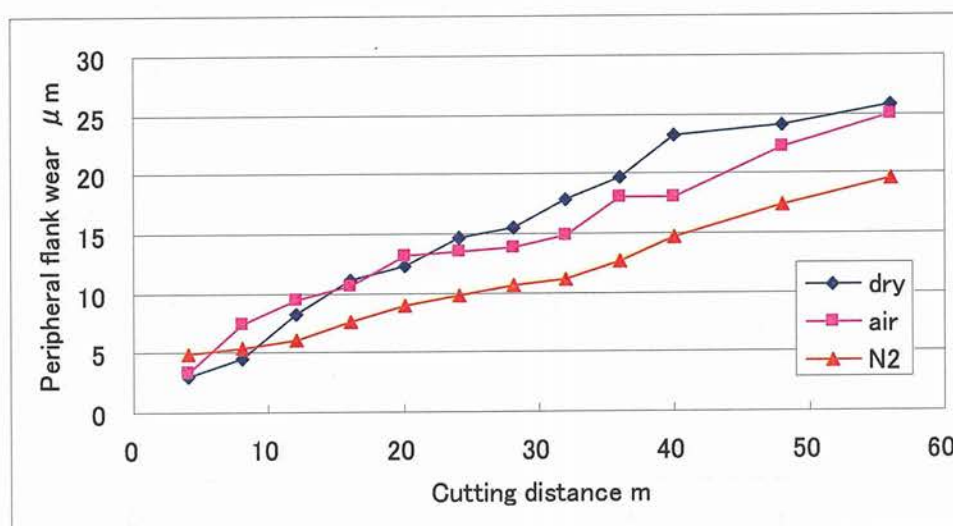


Fig.5.30 テーブル送り 2000mm/min における工具外周逃げ面摩耗の平均値

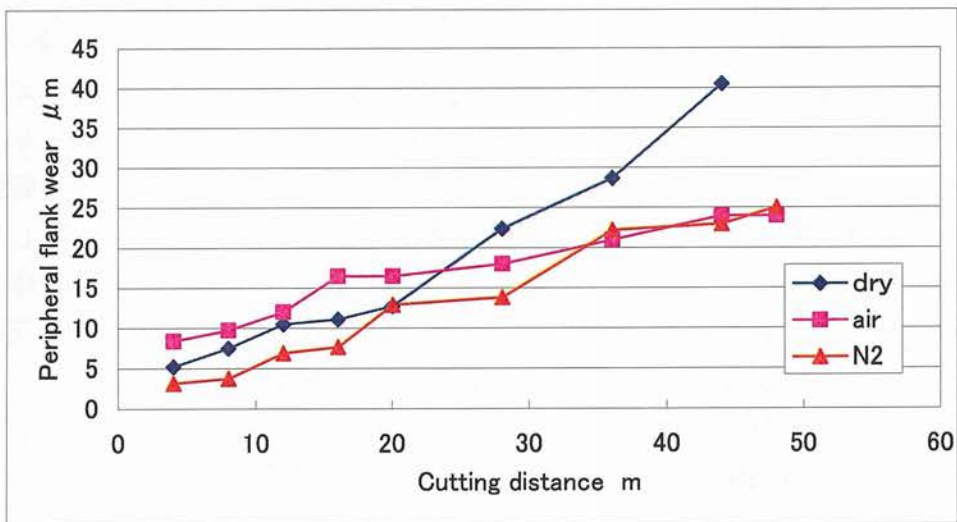


Fig.5.31 テーブル送り 3000mm/min における工具外周逃げ面摩耗の平均値

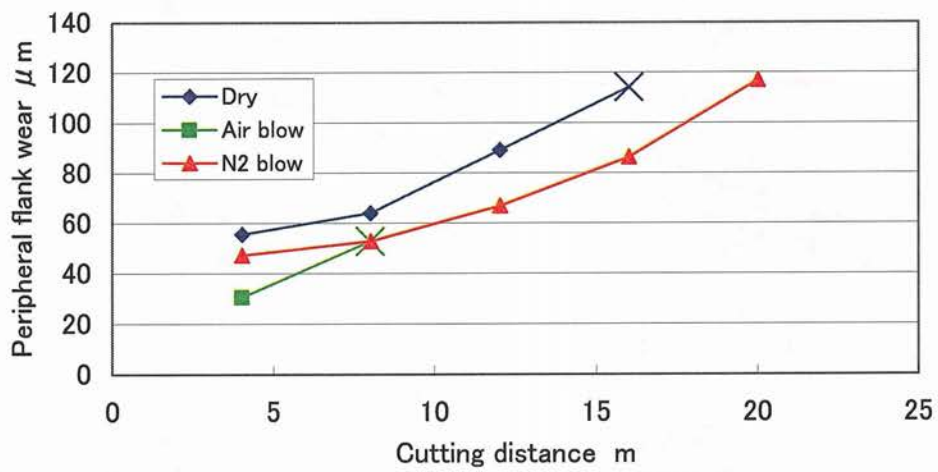


Fig.5.32 テーブル送り 3500mm/min における工具外周逃げ面摩耗の平均値

また仕上げ面に関しては、図 5.33～図 5.35 に示すように条件の違いによる値の差は殆ど見られない。これは、前節までの実験において、凝着の問題を解決できたことから、窒素ブロー加工でも凝着が生じなかったことにより、良好な仕上げ面を得ることが出来たと言える。

以上の結果より、TiAlN コーティング工具を用いた場合でも、窒素ブロー加工はより高い送り値において工具寿命改善効果を示し、空气中加工やエアブロー加工では欠損が生じるような厳しい条件においても工具寿命を増加させることが可能になったと言える。

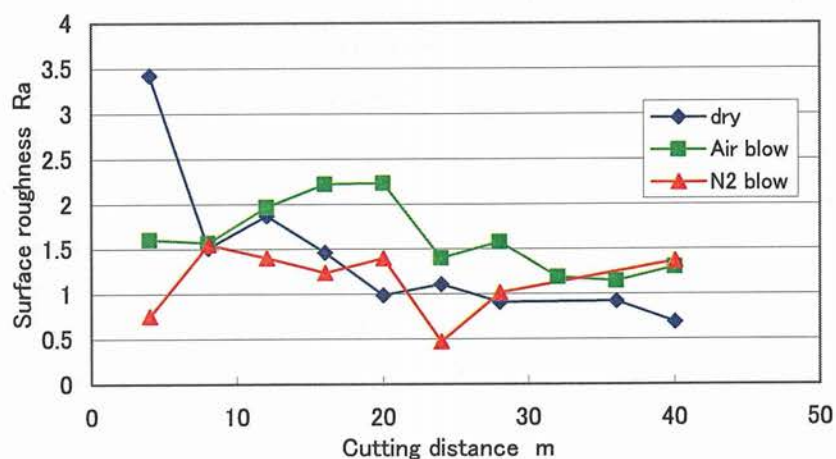


Fig. 5.33 テーブル送り 2000mm/min における表面粗さ

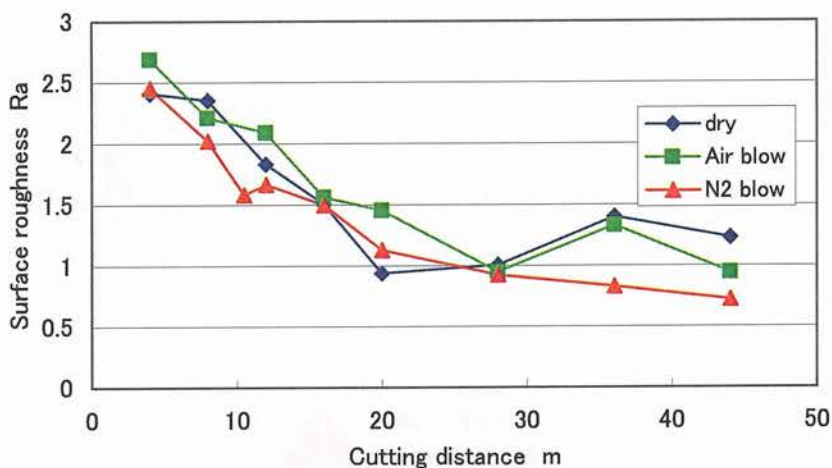


Fig. 5.34 テーブル送り 3000mm/min における表面粗さ

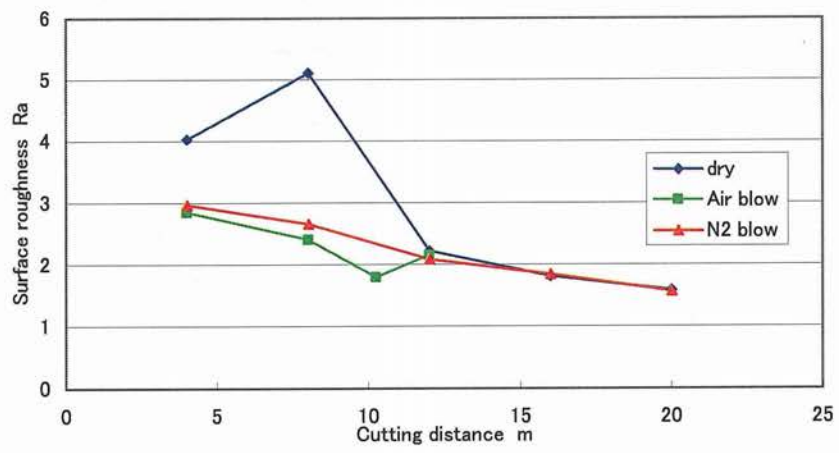


Fig.5.35 テーブル送り 3500mm/min における表面粗さ

5.5 窒素ブローによる SKD61 の高送り加工における工具寿命改善効果

昨今、工作機械や工具の技術革新により、従来放電加工でしか行えなかったような金属の加工をミーリングで加工できるようになってきた。その結果、現在ではミーリングによる金型加工が主流になりつつある。図.5.36 は論文や文献など、一般に公開されている高送り加工事例における被削材料の件数割合である⁵⁴⁾。なお、事例数は約 200 点である。図より高送り加工では、SKD61 が最もよく使用されていることがわかる。SKD61 は主に金型材料に使用される材料である為に、高送り加工は金型材加工において最も使用されている加工法であると位置づけることができる。

また、SKD61 を用いた高送り加工における切削条件を図.5.37～図.5.41 に示す。図は横軸にテーブル送り値を取り、縦軸に 1 刃あたりの送り量や切削速度等をとったものであるが、図より、現在 SKD61 を用いた高送り加工では、切削速度 100～300m/min で、1000～4000mm/min 程の送り値を与えた条件で加工を行っていることがわかる。これらの結果を受けて、本実験では焼き入れSKD61 を被削材として用い、1000～4000m/min の送り値を与え、金型材加工における高送り加工において窒素ブロー加工が有効であるか検証を行った。

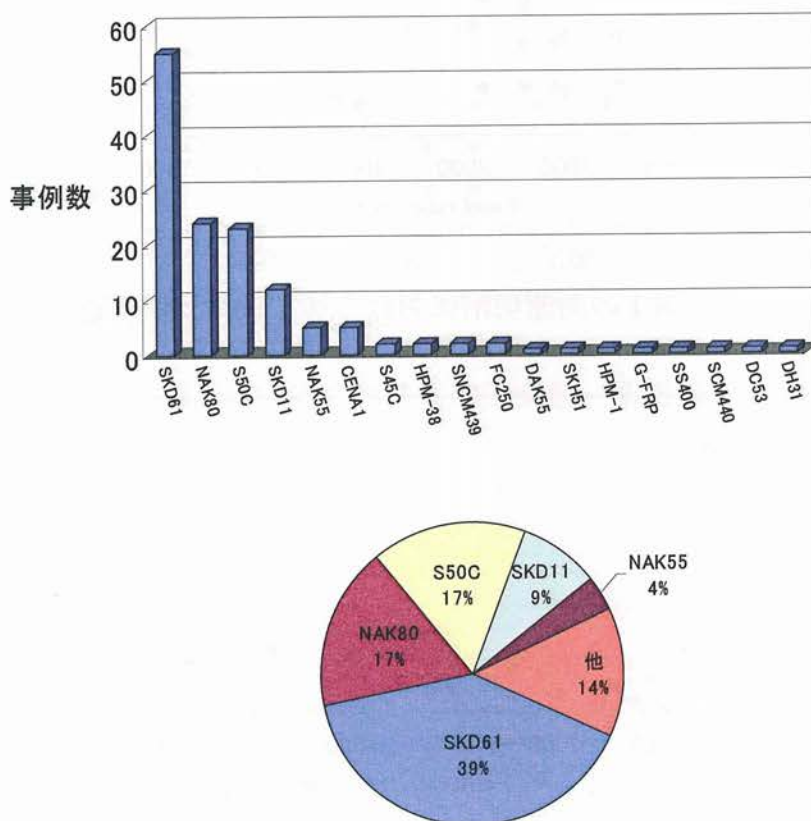


図 5.36 高送り加工における被削材料の件数割合

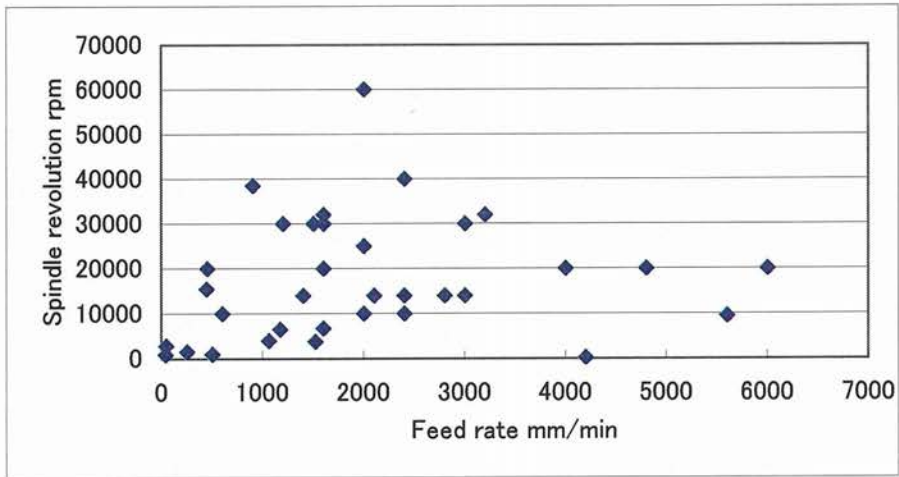


Fig.5.37 SKD61 の高速切削における加工条件 主軸回転数

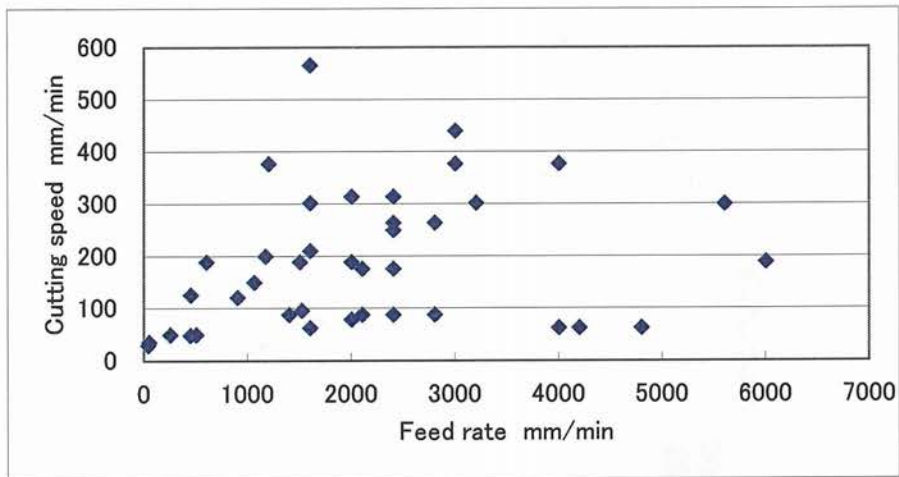


Fig.5.38 SKD61 の高速切削における加工条件 切削速度

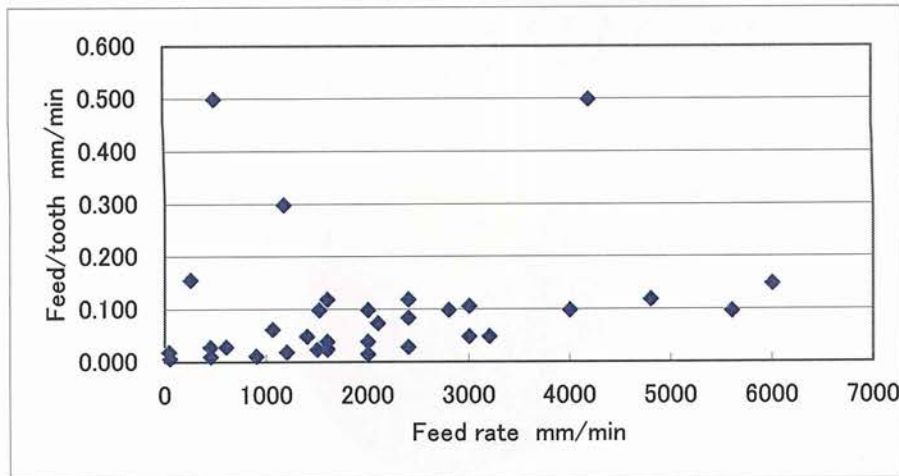


Fig.5.39 SKD61 の高速切削における加工条件 1 刃の送り

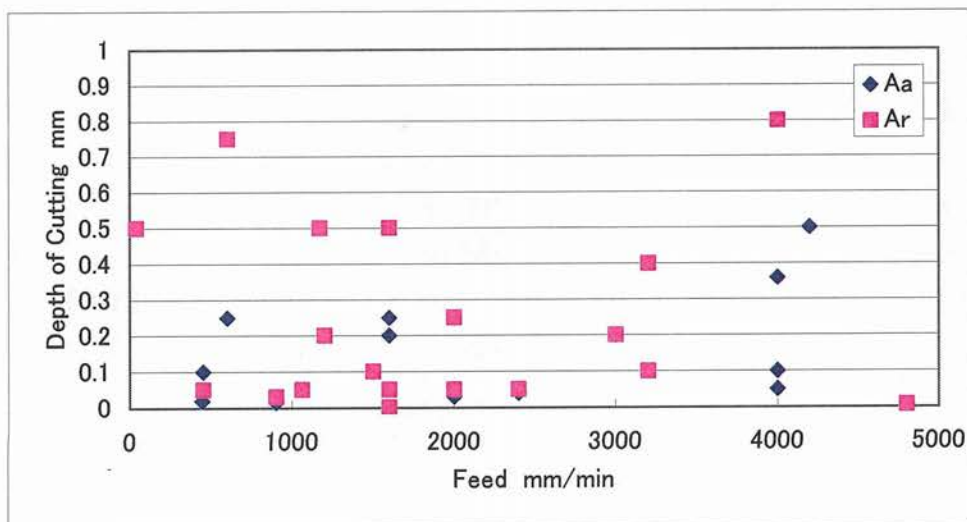


Fig.5.40 SKD61 の高速切削における加工条件 切削深さ

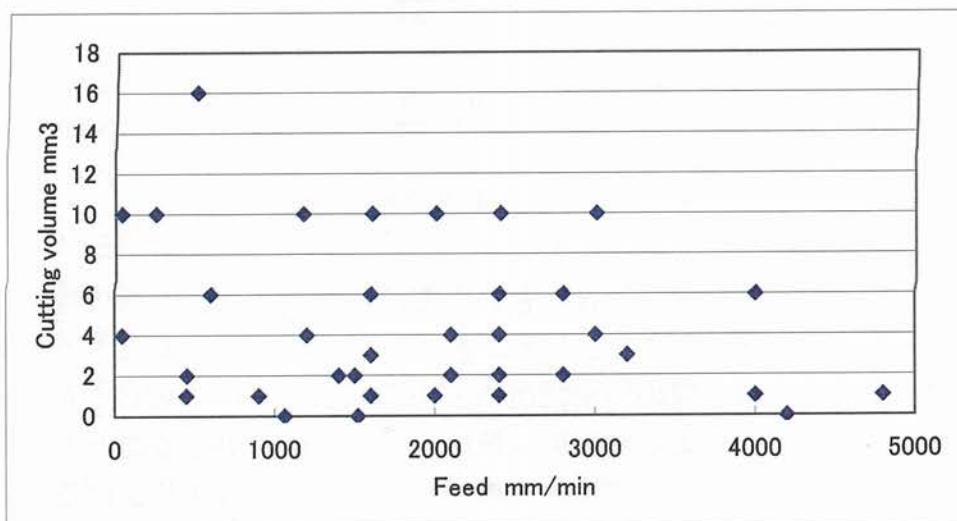


Fig.5.41 SKD61 の高速切削における加工条件 切削量

5.5.1 切削方法の違いによる特性の調査

(1) 実験概要

エンドミルを用いたミーリング加工を行う際、図 5.42 に示すように、工作物への刃先の切込みが小さいほうから次第に厚くなるアップカットと、その逆の切削方法であるダウンカットという 2 種類の切削方法が挙げられる。一般的には、加工面精度が要求される場合はアップカットを用い、除去量の多い加工ではダウンカットのほうが有利であるとされる。

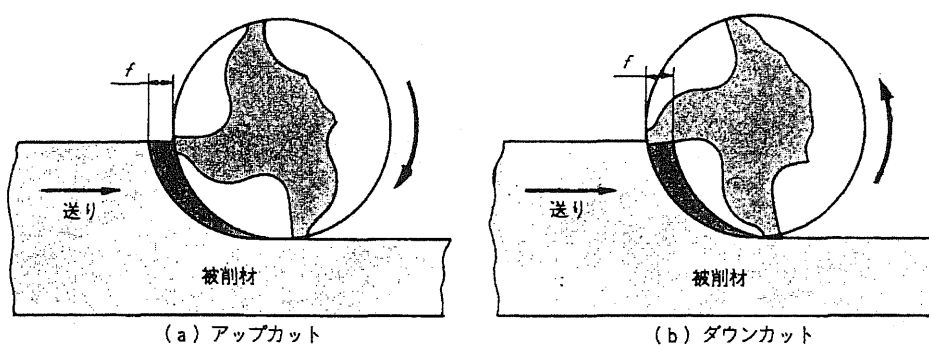


Fig.5.42 アップカットとダウンカット 5-6)

これら両者は単に切削方向の違いというだけでなく、切削抵抗や仕上げ面の性状、寸法制度に違いが生じることとなる。図.5.43 と図.5.44 はダウンカットとアップカットを行った際の切削抵抗の方向を表したものである。図より、切削方法が変化することによって切削抵抗の生じる向きが異なることがわかる。アップカットでは、切れ刃が削った面の方向から入り、こすり上げるように作用する。切込みが小さい場合には、被削材から工具を離すように作用するが、切込みが大きくなると切れ刃を被削材に引き込むように作用する。一方ダウンカットでは、被削材の表面に切れ刃が食い込んでいく加工となり、切削抵抗が工具を被削材から離す様な加工となるためである。

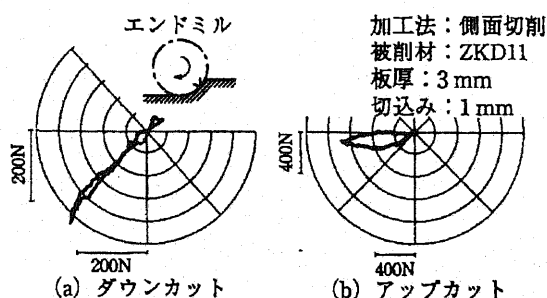


Fig.5.43 アップカットとダウンカットの切削抵抗の違い 5-7)

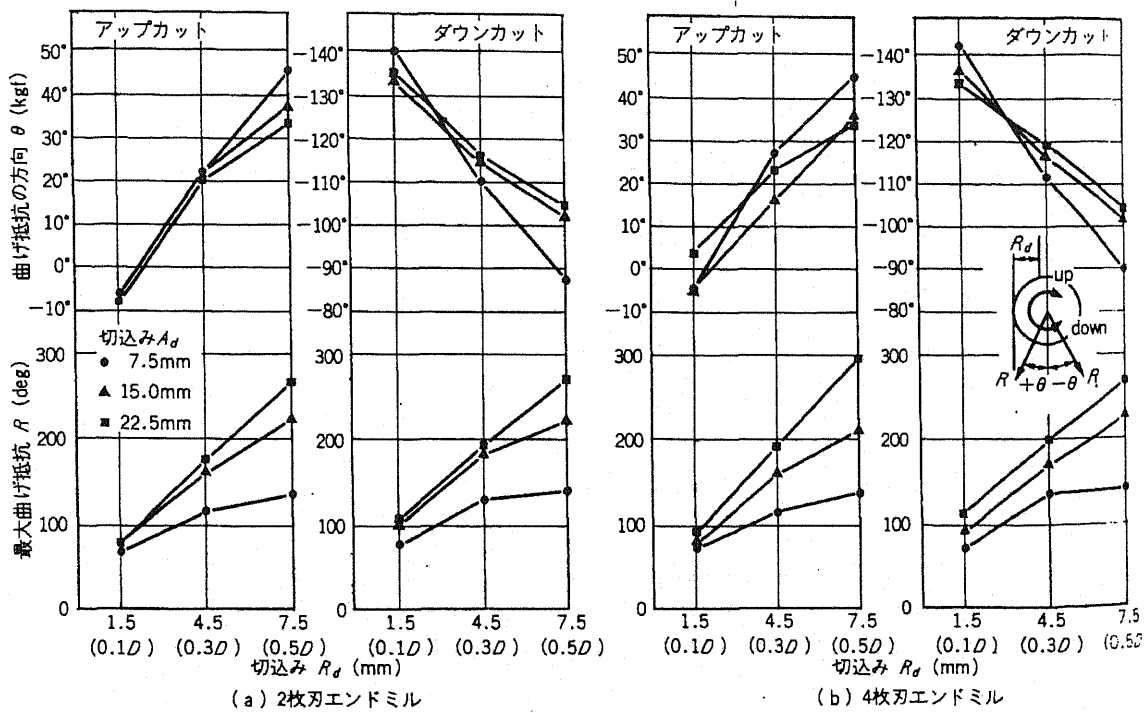


Fig.5.44 2枚刃と4枚刃の切削抵抗の違い 5-8)

このように、アップカットとダウンカットでは切削抵抗の生じる向きが異なり、工具が被削材を引き離す、あるいは引き込むように作用するために、仕上げ寸法精度も変化する。図.5.45 は送り速度を変えた場合の切削方向の影響を比較したグラフである。この図からも見て取れるように、アップカットでは切り込み過多気味に、ダウンカットでは切り残り傾向にある。更に図.5.46 はアップカットとダウンカットそれぞれ半径方向の切り込み深さを変化させた場合の切削のうねり、及び傾きを示したものであるが、この図からも、オーバーカット、アンダーカットの傾向があることがわかる。

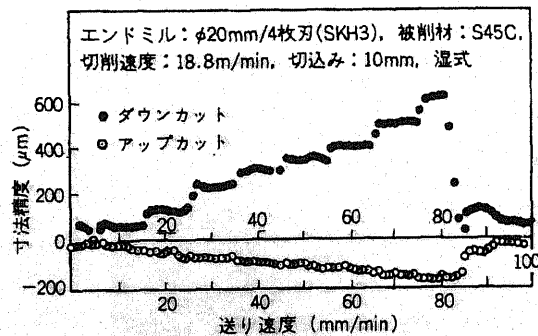


Fig.5.45 送り速度の違いによる切削方向の影響 5-9)

また、アップカットとダウンカットでは、仕上げ面の粗さにも違いが生じる。図.5.47 は加工方向が工具摩耗に及ぼす影響と加工面性状を示したものである。アップカットのほうが面性状が良好であることが言える。更に、図.5.48 は切削条件を変化させた場合の仕上げ面粗さを表したものであるが、この図からもアップカットのほうがダウンカットに比べて仕上げ面が良好であることがわかる。

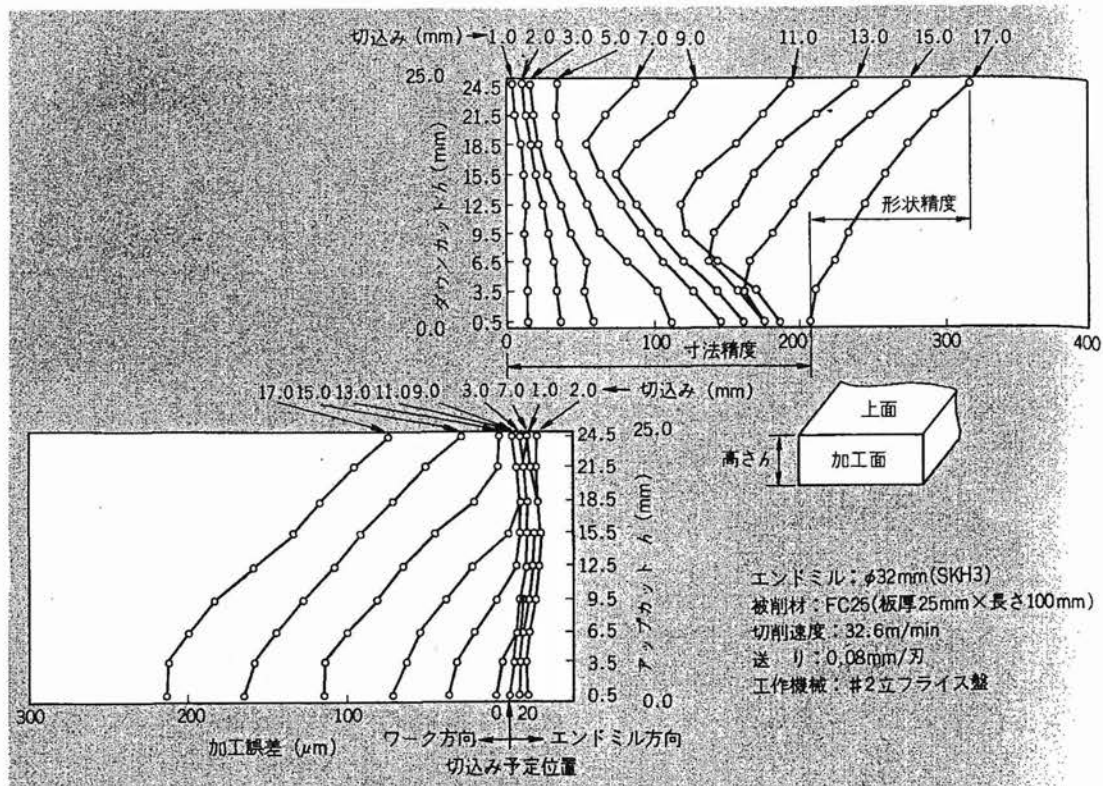


Fig.5.46 半径方向の切り込み深さを变化させた場合の切削 5-10)

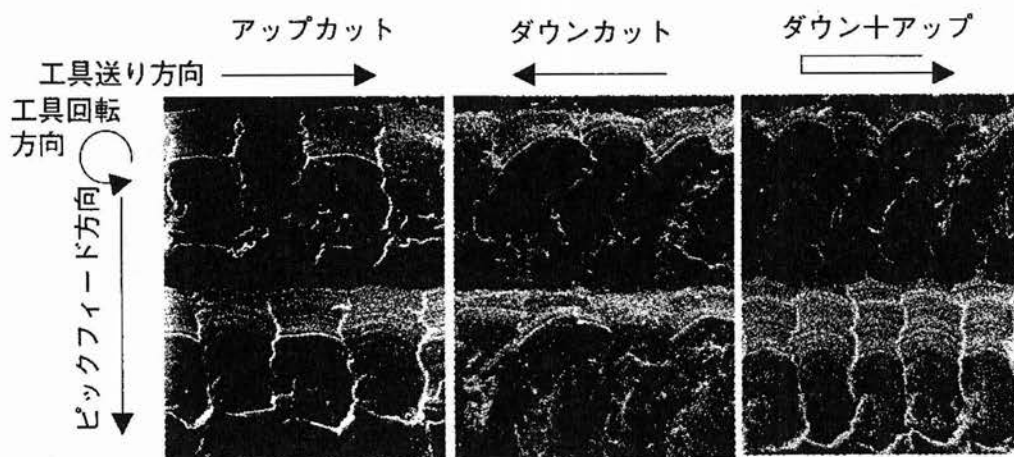


Fig.5.47 加工方向と加工面性状 5-11)

このように、アップカットとダウンカットについては面性状や寸法精度、切削抵抗については多くの研究がなされているが、工具寿命についての検討は比較的乏しいのが現実である。さらに、近年注目をされている高送り加工などの高速切削と言われる切削条件下でのアップカットとダウンカットの工具寿命、あるいは工具摩耗に対する検討はあまり報告されていない。従って、本研究では低速・高送り条件において、アップカットとダウンカットの切削方法の違い、及び、それぞれの条件において窒素ブロー加工のように工具摩耗に影響を及ぼすのか検討を行った。

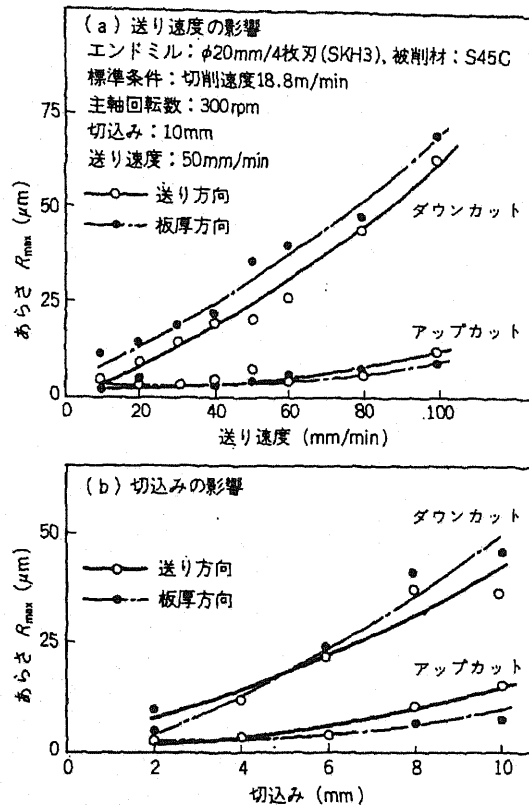


Fig.5.48 切削条件による仕上げ面粗さ 5-12)

(2)実験方法

本実験ではOSG製4枚刃TiAlNコーティングエンドミルWX-PHSを用いて実験を行った。切削条件は高送りのテーブル送り値を与え、アップカット、ダウンカット双方の切削方法について切削を行い、窒素ブロー加工がそれぞれの条件についてどのように影響を及ぼすのか検証を行った。また、比較条件として大気中における完全大気中加工と吹き付け気体をコンプレッサーから供給される原料空気に置き換えたエアブロー加工についても切削を行い、ブローによる効果や窒素ガスによる特性について調べることにした。

また、用いた被削材は100mm×100mm×80mmのSKD61であり、そこにHRC43に焼き入れ焼き鈍し加工を行った。今回使用した切削条件及び実験における測定項目をTable 5.15とTable 5.16に示す。

Table 5.15 加工条件

主軸回転数[rpm]	3125
切削速度[m/min]	98.125
送り[mm/min]	1000
1刃あたりの送り [mm/rev]	0.08
切り込み(Y方向)[mm]	5
切り込み(X方向)[mm]	1

Table 5.16 測定項目

使用機器	測定項目		測定範囲
光学顕微鏡	工具摩耗	外周逃げ面	切削距離 4m 毎
		底刃	
表面粗さ計	仕上げ面粗さ		

(3)実験結果

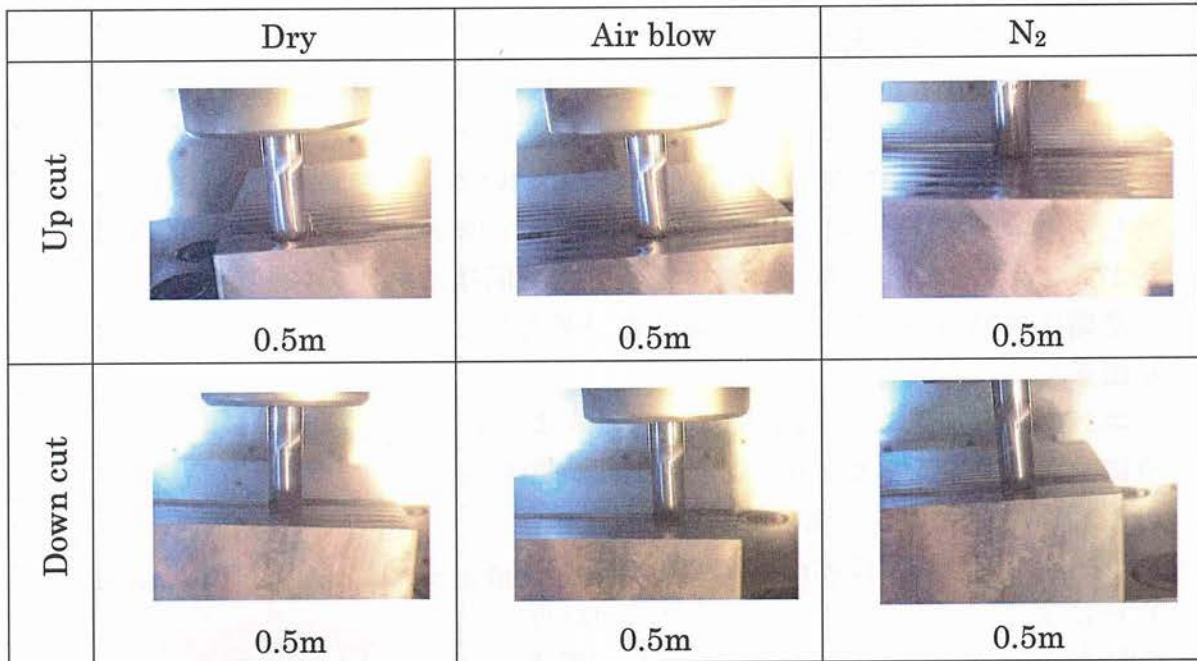


Fig.5.49 アップカットとダウンカットの切削中の様子

切削中の様子を図 5.49 に示す. 図よりアップカット, ダウンカットともに送り 1000m/min では火花の発生などは生じず, 3 種の条件において変化は見られなかったが, 工具摩耗に関しては, 図 5.50 に示すように, アップカットでは大気中加工で 6m, エアブロー加工では 8m で大きな欠損が生じたのに対し, 窒素ブロー加工では 20m で欠損が生じる結果となった. 一方ダウンカットでは, エアブロー加工でアップカットと同距離である 8m で欠損が生じたが, 大気中, 窒素ブロー加工では切削距離 40m の時点でも工具摩耗は少なく, 引き続き切削継続可能であった.

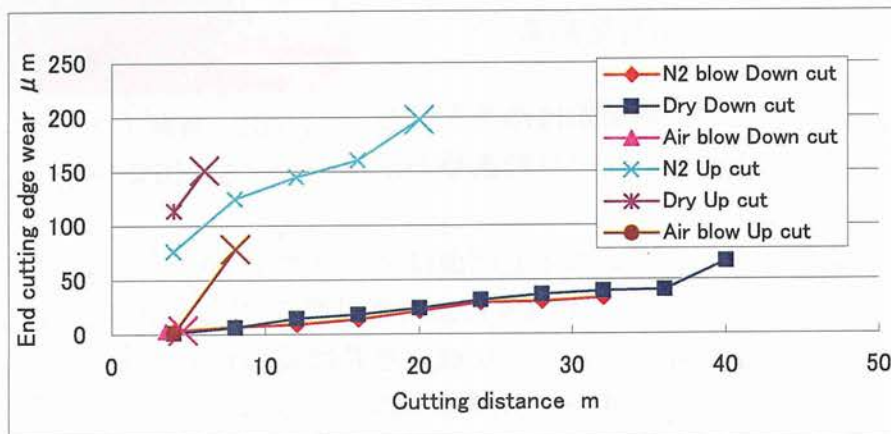
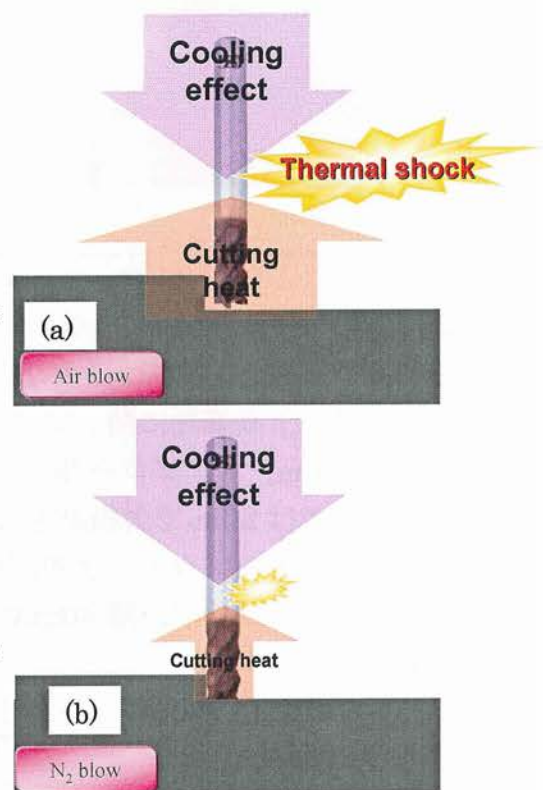


Fig.5.50 底刃逃げ面摩耗

一般的な切削条件におけるアップカットとダウンカットの切削特性については報告例が多いものの高速条件についてはあまり報告例が少ないことは既述の通りであるが、本研究においては、大気中加工においてアップカットとダウンカットで約 $176\mu\text{m}$ の底刃逃げ面摩耗の値の変化があったことから、高速条件では一般条件よりも工具摩耗値の変化が顕著に出るといえる。さらに、ダウンカットでは、空气中加工で 40m 加工時点においても工具摩耗値が低かったのに対して、エアブロー加工では加工初期の 8m の時点で工具に大きな欠損が生じたが、これについては前項における実験でも同様にエアブローでは大気中よりも早期に欠損が生じたことにも関係性が見られることから、以下のような考察が出来る。

エアブロー加工では、図 5.51(a)に示すように、大気中加工と異なり、切削点上部からの冷却作用が生じる。通常切削の場合では、切削発熱が高速切削に比べ少ないために、ブローによる冷却効果により良好な切削が可能になると考えられる。しかしながら、高速切削では、切削発熱量が大幅に増加するため、ブローの冷却との間に熱的に不安定な状態が生じ、これが熱衝撃として工具に影響を及ぼすことが考えられる。しかしながら、前項の実験や、本項の実験では同じ気体噴射環境である窒素ブロー加工では欠損が生じやすいといった性質は見られない。この点については、(b)図に示すように窒素ブロー加工では、窒素による発熱量の低減が出来ることから、エアブロー加工よりも切削発熱量が少ない



といえる。したがって、熱衝撃は温度差に依存することから、窒素ブローでは熱衝撃が緩和されたと考えられる。

また、既述のように一般的に仕上げ面はアップカットのほうが良好な面を得ることが出来るといわれるが、本実験においては図 5.52 と図 5.53 に示すように、アップカットとダウンカットで大きな値の差異は見られず、平均を考えるとむしろダウンカットのほうが良好な面が得られているともいえる傾向を示した。このように、高速切削では通常加工と異なる特性を表すと考えられる。

図.5.51 窒素ブローとエアブローにおける熱衝撃のモデル

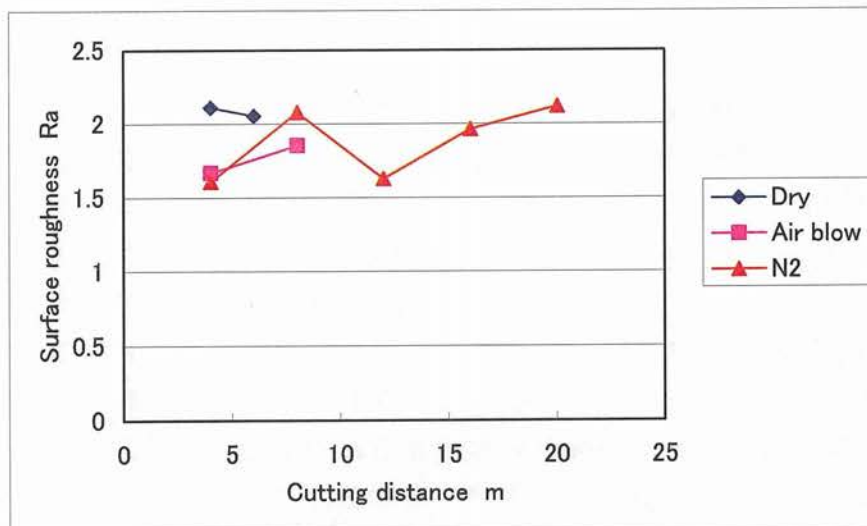


Fig. 5.52 Surface roughness Up cut F1000

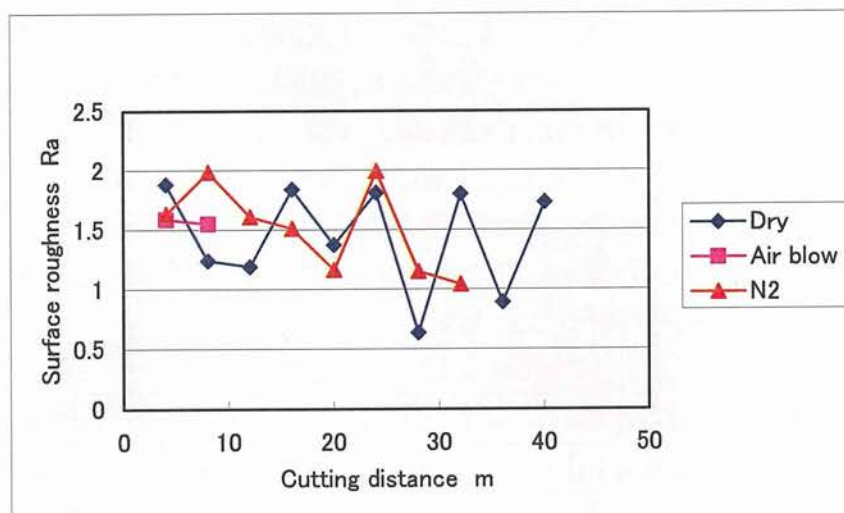


Fig. 5.53 Surface roughness Down cut F1000

以上の結果をまとめると、工具摩耗や仕上げ面粗さについて高送り加工条件ではダウンカットのほうが優れた特性を示すことが明らかとなった。

また、窒素ブロー加工はアップカットでは、空気やエアブロー加工の約 2 倍の工具寿命を示し、ダウンカットにおいても良好な結果を得た。しかしながら、ダウンカットについてはエアブロー加工では初期に欠損が生じたものの、大気中加工でも少ない工具摩耗幅を示したことから、窒素ブロー加工は大気中加工では加工困難となるような更に条件の厳しい条件においてより工具寿命の改善が図られると考えられる。

5.5.2 送りの違いによる特性の調査

(1)実験概要

前項の実験では、焼入れSKD61の高速切削ではアップカットよりもダウンカットのほうが工具摩耗を低減できることがわかった。また、ダウンカットではエアブロー加工では加工初期に欠損が生じたが、大気中加工でも加工が出来たため、窒素ブロー加工の有効性はあまり確認できなかった。ここで、前節のS50Cの実験結果では、窒素ブロー加工はより切削温度が高くなり工具が厳しい環境に置かれる条件にて工具摩耗低減効果を示すことが確認されている。従って、前節の実験では、ダウンカットではこれよりもさらに厳しい条件において窒素ブロー加工は工具摩耗低減効果を発揮できるのではないかと考えられる。そこで、本項ではさらに送り値を増加させて実験を行い、このような厳しい条件における窒素ブロー加工の工具摩耗低減効果について検討を行った。

(2)実験方法

本実験で用いた工具及び被削材は前項での実験に引き続き OSG 製 4 枚刃 TiAlN コーティングエンドミル WX-PHS と、SKD61(HRC43)である。切削条件はテーブル送り 1000~3200mm/min の送り値を与え、1 刃あたりの送り量を 0.08 に統一してそれぞれに対応した主軸回転数を与え、これらの条件において窒素ブロー加工によってどのような効果があるのかを検証した。実験に用いた切削条件及び測定項目を Table 5.17 と Table 5.18 に示す。なお、送り 1000m/min の結果は前項のものを使用することとする。

Table 5.17 加工条件

主軸回転数[rpm]	3125	6250	10000
切削速度[m/min]	98.125	196.25	314
送り[mm/min]	1000	2000	3200
1 刃あたりの送り[mm/rev]	0.08		
切り込み(Y 方向) [mm]	5		
切り込み(X 方向) [mm]	1		

Table5.18

使用機器	測定項目		測定範囲
光学顕微鏡	工具摩耗	外周逃げ面	切削距離 4m 毎
		底刃	
表面粗さ計	仕上げ面粗さ		

(3)実験結果及び考察

各条件における加工中の様子を図 5.54 に示す。図より、送り 1000mm/min では各条件ともに変化は見られない。しかし、送りを増加させ、2000mm/min では大気中加工では切削距離 24m の時点で工具に赤熱と火花が確認された。更に、送り 3500mm/min では、大気中加工では切削距離 4m、エアブロー加工では切削距離 7m で赤熱と激しい火花の発生が見られた。

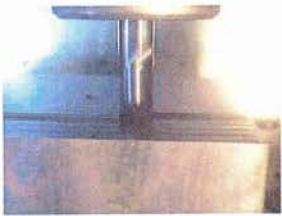





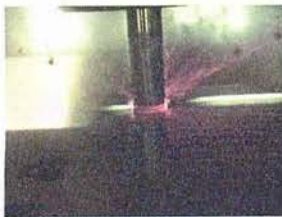


	Dry	Air blow	N ₂
Feed 1000mm /min			
Feed 2000m/ min	 24m	 24m	 24m
Feed 3500m/ min	 4m	 7m	 7m

Fig.5.54 加工風景

上記のような赤熱や火花のより切削温度を窒素ブローでは低減できていることが確認できるが、これについては図 5.55 に示す切削距離と切削点近傍温度の結果からも同様のことが言える。

図 5.56 に示す送り 2000mm/min では大気中加工で切削距離 24m、エアブロー加工では切削距離 12m で欠損が生じたため工具寿命と判断した。また、大気中加工よりもエアブロー加工のほうが寿命が短くなることは前項までの結果と一致しており、この原因については既述の通りである。また、窒素ブロー加工では切削距離 36m まで加工が可能であった。

更に送り速度を増加させ、3200mm/min で切削を行った時の結果を図 5.57 に

示す。大気中では 4m, エアブロー加工では 8m で欠損が生じ, 窒素ブロー加工では 14m で欠損し, それぞれ工具寿命と判断した。今回使用した工具の推奨切削条件は主軸回転数 1650rpm(51mm/min), 送り 470mm/tooth であったことから, この条件は約 6 倍の送り値であるが, このような厳しい条件でも, 窒素ブロー加工ではある程度の工具寿命の改善が出来ることがわかった。

以上の結果より, SKD61(43HRC)の高速高送りミーリングにおいても窒素ブローによる工具寿命の改善が可能になったといえる。

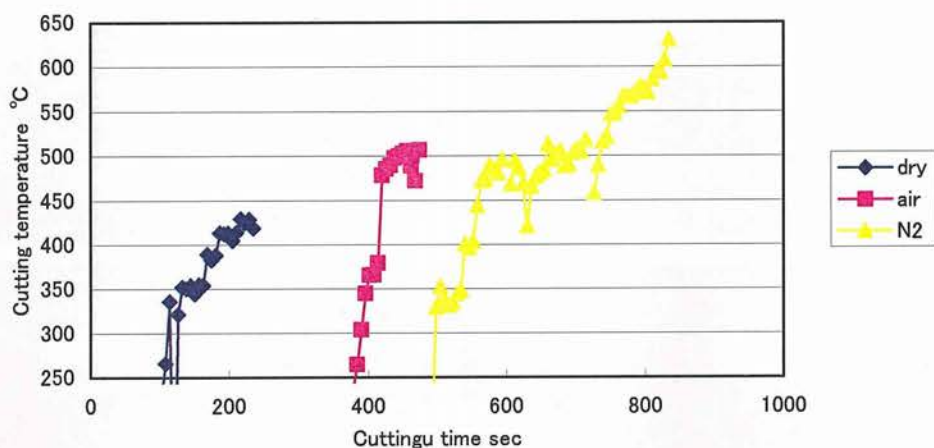


Fig.5.55 切削時間と切削点近傍温度の推移

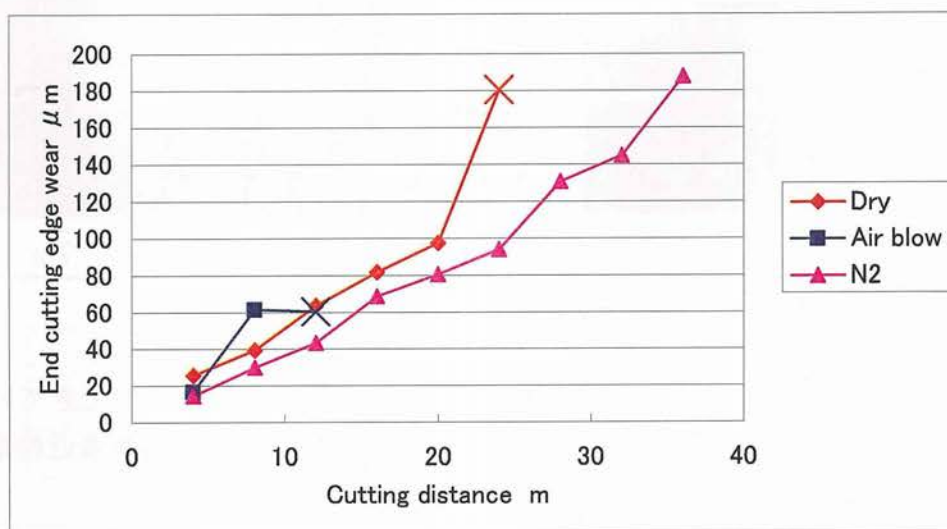


Fig.5.56 送り 2000mm/min における底刃逃げ面摩耗

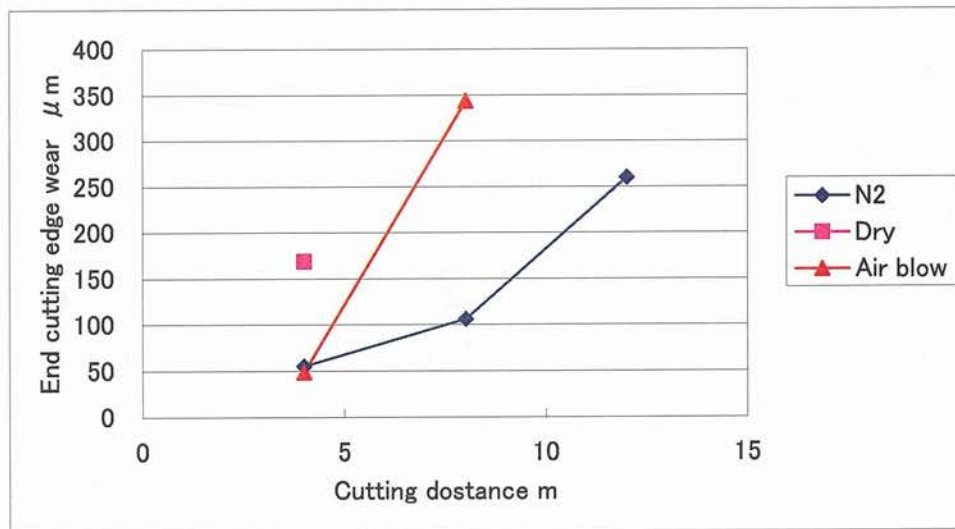


Fig. 5.57 送り 3200mm/min における底刃逃げ面摩耗幅

5.6 結言

金型材の高送り加工において、窒素ブローを用いることで工具寿命が延びるかを検証した結果、以下のようになった。

S50C の切削実験について

- ・TiN コーティング超硬エンドミルにおいて、窒素ブロー加工は加工温度を低減させる効果により工具摩耗の進行を抑えることによって大気中加工やエアブロー加工よりも寿命が約 2 倍に延びる。
- ・TiAlN コーティング超硬エンドミルでは、送り速度 2000mm/min、3000mm/min よりも厳しい条件の送り速度 3500mm/min において窒素ブロー加工の効果により大気中加工やエアブロー加工よりも寿命が約 2 倍に延びた。
- ・窒素ブロー加工は高送り加工の中でもより厳しい条件にすることで効果が表れる。

SKD61 の切削実験について

- ・アップカットとダウンカットを比べる実験においてダウンカットの方が有効であるということがわかった。
- ・送り速度 1000, 2000mm/min のダウンカットではエアブロー加工において熱

衝撃の影響と思われる欠損が起きた。

- ・送り速度 2000, 3200mm/min のダウンカットでは条件は厳しいものの、窒素ブロー加工の有効性が確認できた。
- ・今回の研究において、S50C でも SKD61 においても、窒素ブローを用いた加工のほうが、他の加工法に比べて工具寿命が約 2 倍となった。

今回検証を行った S50C と SKD61 共に窒素ブロー加工によって工具摩耗を抑制することができた。また、送り値を高くすることでより窒素ブロー効果が顕著に現れ、どちらの被削材においても約 2 倍の工具寿命の増加が確認できた。

第6章 窒素ブロー加工の実用化に向けた検討

6.1 緒言

前章の実験において、高速高送り条件のミーリング加工においても窒素ブローによって約2倍の工具寿命を示すことが明らかとなった。

このことを受けて、本章では窒素ブロー加工の実用化に向けて、自動車エンジンのクランクシャフトの旋削加工やバンパー金型のミーリング加工を例に取り、窒素ブロー加工を適用することによる効果について検証を行う。

これらいずれの加工においても、厳しい条件下での加工が求められることから、工具寿命が低下してしまう問題を抱えている。

クランクシャフトの旋削加工工程では、ジャーナル部などを切削加工する際に切削形態が断続となるために工具への負荷が大きくなり、工具寿命が短くなってしまう。また、バンパーのミーリング加工では、大型の金型であることから、生産時間の短縮のために高送り条件で加工されるために、切削温度が高温となり工具寿命が低下する。

前章までの実験において、これらいずれの加工条件においても、窒素ブロー加工による工具寿命改善効果を期待できると考えられることから、同法の実用化に向けた検証を行った。

6.2 窒素ブローによるクランクシャフト材の断続旋削加工

6.2.1 実験目的

昨今、切削加工では複合加工機の普及などによって複雑形状を少数の工程で加工することが可能となってきている。複合加工機とは一般的に1つの機械に多数の加工軸を持ち、単一の機械で旋削加工からミーリング加工まで幅広く加工できる工作機械を指す。このように切削加工で加工できる形状の範囲が広がり、加工形状が複雑化するにつれて加工の形態は多様化する傾向にある。そのことにより、1つの加工工程においても連続切削から断続切削まで変化することも多い。このように様々な加工が混在することによって加工時により複雑な加工条件を取ることから、工具に対する負荷が大きくなり、工具寿命の低下などの問題が生じることがある。

このように、加工が複雑化することによって様々な問題が発生するわけであるが、本項では、クランクシャフトの旋削加工工程において生じる問題について焦点を絞り、その改善を図る。クランクシャフトとは自動車エンジンにおいて

て用いられるピストンの上下運動を、コンロッドを介して回転運動に変える部品を指し、現在においても旋削加工によって生産されることが多い。しかしながら、形状が複雑な為に旋削加工においてこの部品を切削する際には断続的な切削形態となることが多い。現在この部品を加工する際には、加工時の火花の発生や、工具の欠損などによる工具寿命の低下などの問題が生じている。

また、前節までの実験において、加工時の温度低減を図る為に、酸化発熱に着目し、これを抑制することが出来ると考えられる窒素を用いた加工法（以下窒素切削と略）について研究が行われてきた。これはミーリング加工に対してのものであり、窒素切削によって、加工時の火花の抑制効果や工具摩耗の抑制効果などが確認されている。

そこで本節では、クランクシャフトの旋削加工工程における工具寿命低下の問題を窒素ブロー加工法を用いることによって解決を図る。

6.2.2 窒素ブローの断続旋削加工における工具摩耗低減効果

(1) 実験目的

旋削加工における窒素雰囲気中切削の有効性については前 4 節において既述の通りであるが、旋削加工における窒素雰囲気中切削の実験は密封容器内に酔うものであった。従って、クランクシャフトの加工のような量産型の NC 機などへの導入などを考えると、装置の簡易性や組み込みの容易さの点から、前 5 節で述べたような窒素ブロー加工が望ましい。しかしながら、前 5 節では密封容器を用いた窒素雰囲気中加工についての見当はなされているものの、断続旋削加工における窒素ブローの優位性については検討がなされていない。従って、本項では、断続旋削加工における窒素ブロー加工の効果について検証を行う。

(2) 実験装置及び測定方法

(i) 実験装置

本研究で使用した旋盤は図.6.1 に示す Shoun Cazeneuve 製汎用旋盤 HB500 である。本研究では旋削加工での断続切削加工の工程に窒素ブロー加工を導入しその有効性を検証するものであるため、そこに図.6.2 に示すように旋削加工用のバイトの先端に窒素を供給できるようにした。供給される窒素ガスはガスボンベを使用し、ボンベからレギュレーターと流量計を介してガスの圧力及び流量を調節した後、ホースを通じて刃先に窒素を供給できるようにした。本実験に

おける実験装置の概略図を図.6.3 に示す.

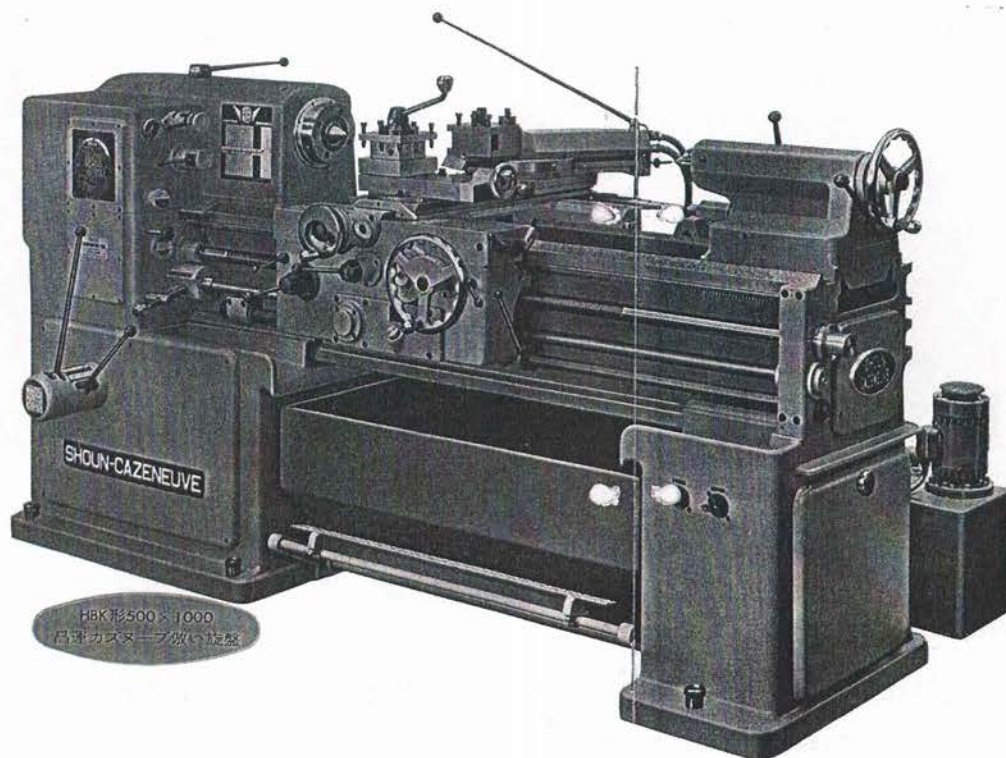


Fig.6.1 Shoun Cazeneuve 製汎用旋盤 HB500



Fig.6.2 実験装置の外観

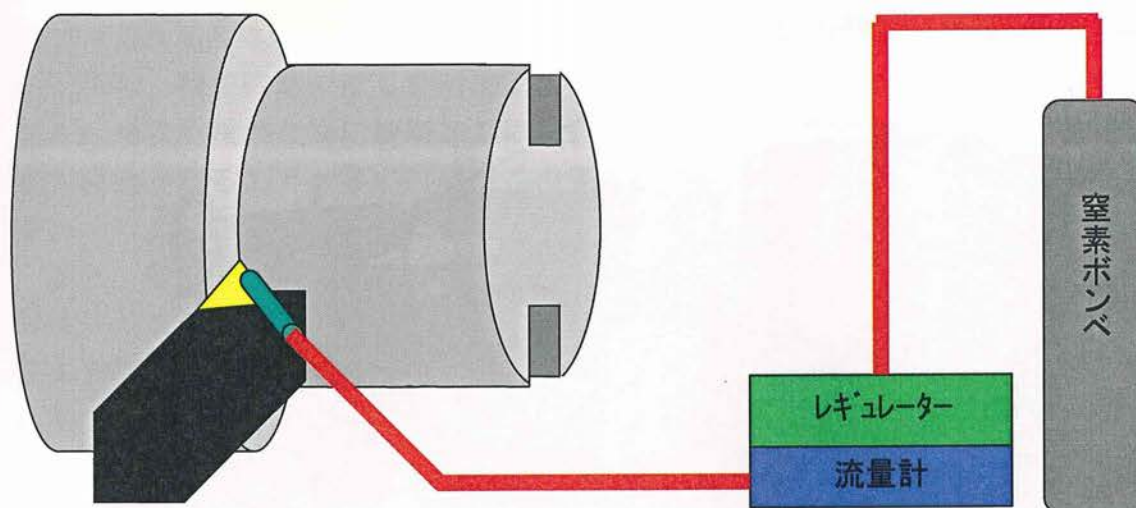


Fig.6.3 実験装置の概略図

(ii) 使用工具と被削材

前 6.2.1(1)項でも述べたように本研究は、旋削による実験で断続切削において窒素雰囲気加工が有効であったことと、ミーリング加工で窒素ブロー加工が効果的であった結果をふまえて、旋削における断続切削での窒素ブロー加工の有効性について検証するものである。また、この条件においては前 4 節の実験結果のように、連続切削では凝着の問題が生じた超硬工具や、皮膜の剥離とともに凝着が生じたコーティング工具についても断続切削によって良好な結果が得られるのではないかと考え、本実験では超硬工具とサーメット工具、コーティング工具について実験し検証を行う。今回の実験に用いた被削材は S45C で、寸法は図.6.4 に示すように $\phi 80\text{mm}$ の丸棒を長さ 80mm に切断し、旋削加工でのバランスを考慮して 10mm 幅の溝を 2 箇所設けた。

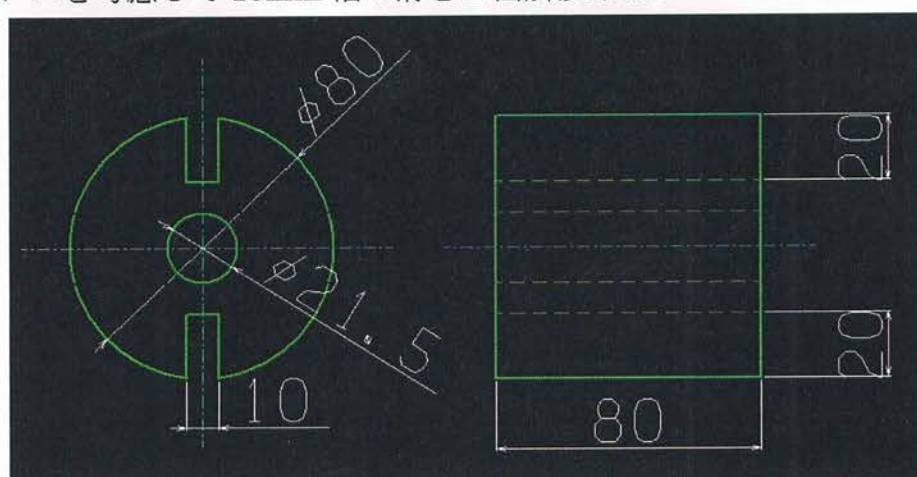


Fig.6.4 被削材の寸法

一般的に工具材料には耐摩耗性(または耐熱硬さ)と靱性が求められる。言い換えると、工具には硬さと粘り強さが求められるわけである。

超硬工具はサーメット工具やコーティング工具に比べて靱性は高いものの、摩耗しやすく使用できる切削速度域が低い。また、サーメット工具とコーティング工具はほぼ使用領域や加工上条件の領域が重なるが、一般的にはコーティング工具は耐熱・耐摩耗性に優れ、高い切削速度や大きな切り込み値、あるいは強断続加工に適しているとされ、その使用用途は幅広い。一方サーメット工具は耐溶着性に優れることから、コーティング工具では溶着が起こってしまうような加工に使用されることが多い。また、サーメット工具では、良好な仕上げ面が得られるため、高い寸法精度が求められる加工に適しているが、欠けやすいという特性も持ち合わせている。

これらの事項を受けて、本研究では工具材種の違いが窒素ブロー加工においてどのように影響を与えるのかについても検討を行うこととする。今回使用した工具は、三菱マテリアル社製の旋削用チップであり、それぞれ超硬チップ UTi20T (TNMG160404)、コーティング超硬チップ UE6020 (TNMG160404)、サーメットチップ NX2525 (TNMG160404)である。バイトは PTG NR2020K16 を使用した。

(iii) 測定項目と方法

・工具摩耗の記録

加工終了後に図.6.5 に示すスカラ株式会社製ビデオマイクロスコープシステム VMS-3000 を用いて工具すくい面及び横逃げ面、前逃げ面、工具先端の写真をそれぞれ 100 倍、200 倍、500 倍の倍率について撮影した。その写真を元に図.6.6 に示すように前逃げ面境界摩耗幅、工具先端部逃げ面摩耗幅(以下先端摩耗幅と略)、横逃げ面境界摩耗幅を測定する。



Fig.6.5 ビデオマイクロスコープ



Fig.6.6 工具摩耗の計測方法

- ・仕上げ面粗さの測定

各条件下の加工を施した後，Mitutoyo 製 Surf Test SJ-301(図.6.7)を用いて加工仕上げ面粗さを測定する．



Fig.6.7 Mitutoyo 製 Surf Test SJ-301

- ・温度の測定

加工時の加工点近傍温度に関しては図.6.8 に示すファイバ式放射温度計 (CHINO IR-FB) によって測定した．放射温度計は，物体からの熱放射（赤外線）を捕らえて温度を測定するものである．熱電対のような熱伝導を利用する温度計と比べ，非接触かつ高速で温度を測定することが出来るのが放射温度計の特徴である．測定された赤外線は，IR-FB ユニット内にて電気信号に変換され，図.6.9 に示すレコーダ(GRAPHTEC Co. midi LOGGER dual GL500A)によって記録する．

測定方法については図.6.10 に示すように工具の前逃げ面方向から放射温度計を工具先端部に向けて設置し，測定を行う．



Fig.6.8 ファイバ式放射温度計



Fig.6.9 データロガー

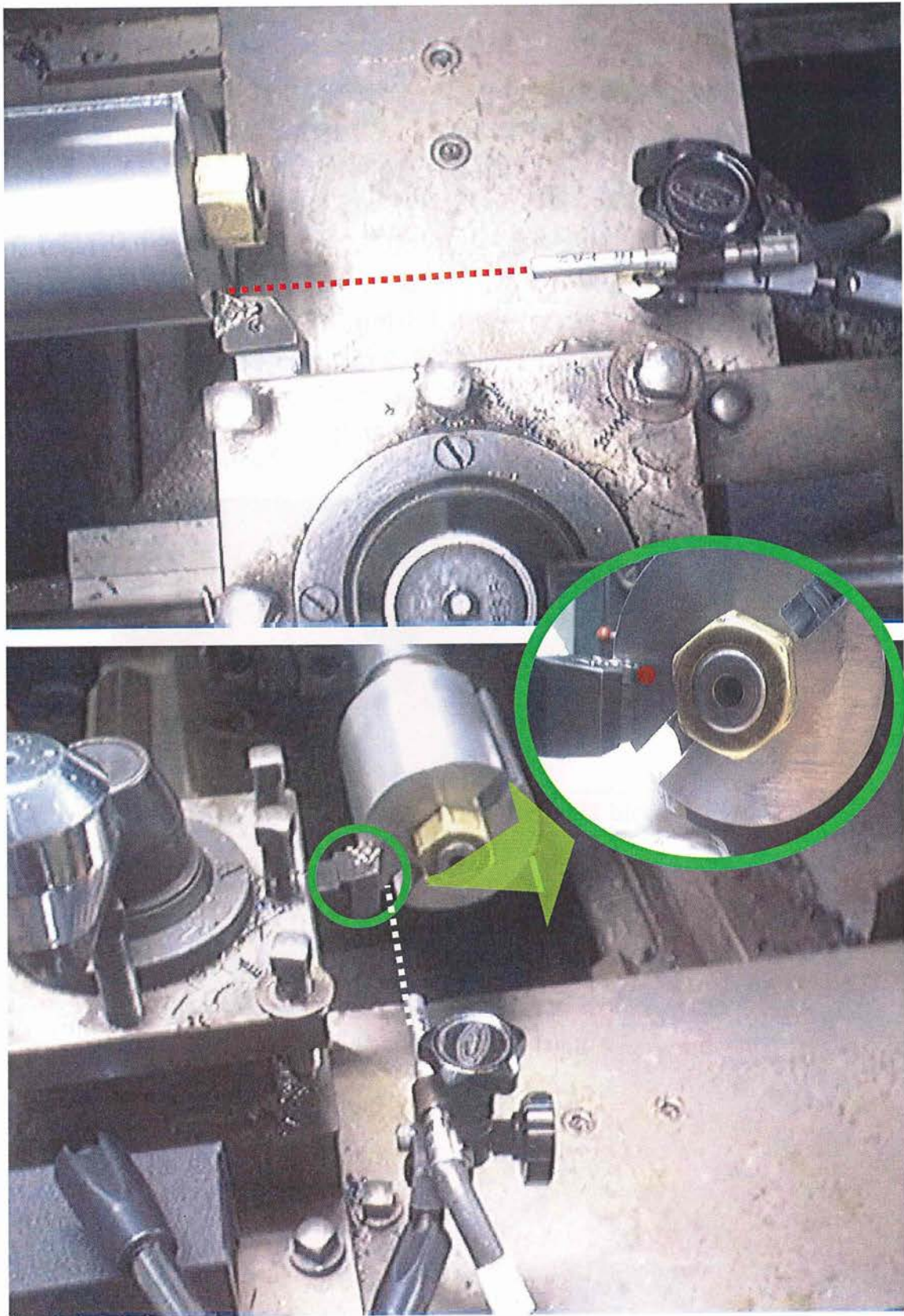


Fig.6.10 切削点近傍温度の測定方法

(iv) 切削環境の定義

これまでの研究で、窒素切削での温度上昇の抑制が確認されている。

発熱を抑制することのできる窒素切削は、より高温となる高速切削において有効であり、コスト削減や環境を考慮した切削に応えることができると考えられる。

実験では窒素ブロー加工による断続旋削加工特性について検討を行う。また、このブロー加工では窒素を用いることの影響のほかに、気体の吹き付けによる冷却効果が挙げられる。窒素ブローの効果を検討するため大気中加工も行う。このことから、大気中加工、窒素ブロー加工の2種について検討する。

窒素ブローはチップのすくい面上から先端に向けブローする。その状態を図.6.11に示す。窒素ブロー時の窒素の流量は35 [L/min]に固定して行う。



Fig.6.11 窒素ブローの方向

(3) 超硬チップを用いた切削実験

(i) 実験概要

前項でも述べたように、連続切削での実験では、超硬工具において窒素雰囲気加工は激しい凝着が発生すると報告されている。本実験では、窒素ブローによる断続切削では、凝着が発生せず良好な切削が行えるのではないかと考え、加工を行う。本実験で使用する工具は超硬チップ UTi20T であり、窒素ブロー加工による工具寿命改善を検証した。

(ii) 実験方法

本実験では、被削材として S45C を用いた。また、比較対象として大気中加工を行った。実験に用いた実験条件を表 6.1 に示す。

Table6.1 切削条件

切削速度 [m/min]	150
切り込み [mm]	0.5
送り [mm/rev]	0.15
チップ	TNMG160404 UTi20T
切削環境	DRY, N2 blow
切削形態	断続
被削材	S45C

(iii) 実験結果及び考察

大気中加工，窒素ブロー加工を行った結果，図 6.12 のように，前節のミーリング加工同様空气中加工では加工初期より火花の発生が確認され，加工終了まで火花は発生し続けることを確認した．しかしながら，窒素ブロー加工においては加工終了まで火花の発生は確認できなかった．これにより，本実験の窒素ガス供給法においても，加工点に窒素雰囲気形成できていることが確認できる．

また，図は切削点近傍温度を工具の前逃げ面方向から測定したものであるが，図 6.13 より，大気中加工に比べて窒素ブロー加工では 10～20℃低い値をとる結果となった．このような窒素ガスの火花や温度の低減効果については前 4 章や前 5 章で既述の通りである．

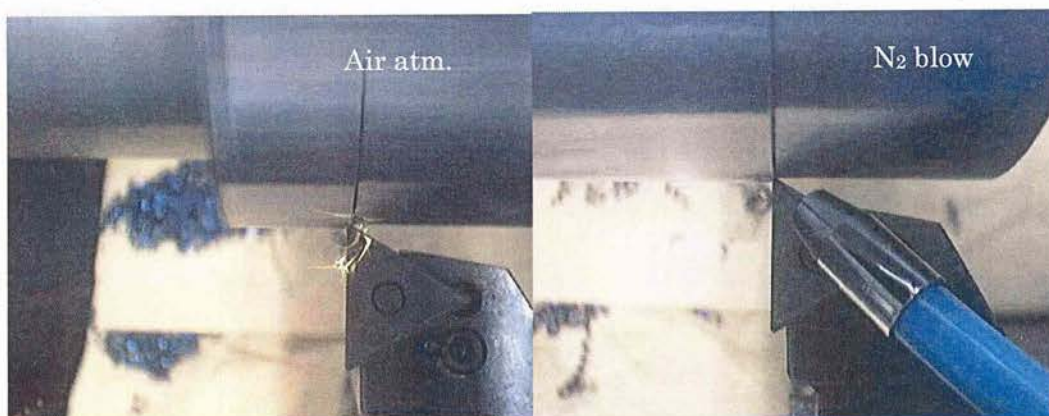


Fig.6.12 大気中加工，および窒素ブロー加工の加工風景

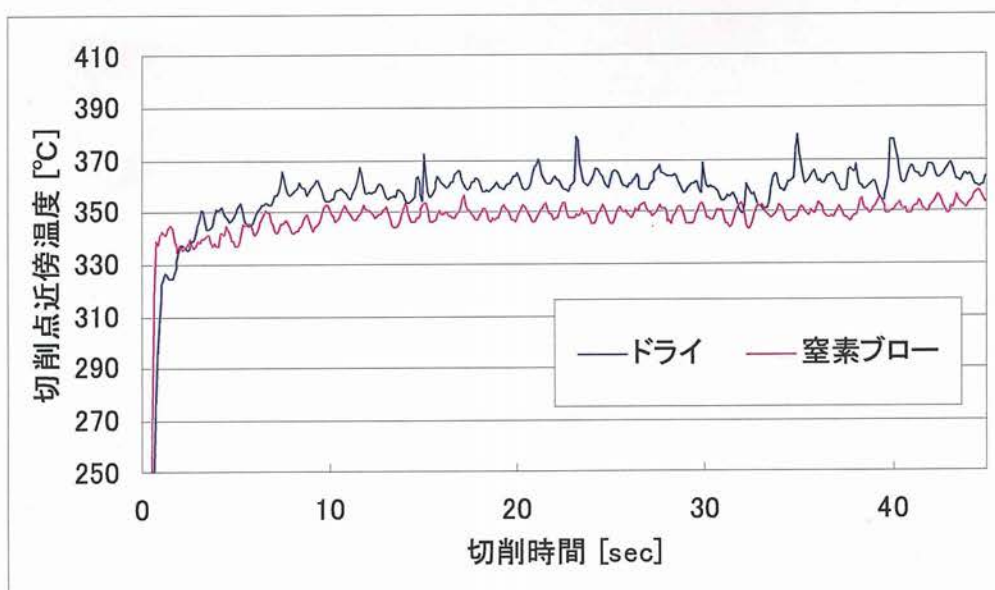


Fig.6.13 切削点近傍温度

切削距離 5km における工具摩耗の結果を図 6.14 に示す。4 章の連続旋削実験では、超硬工具では激しい凝着が見られた。また、5 章のミーリング実験では超硬工具が凝着と欠損が確認されている。しかしながら、本実験では断続切削における窒素ブロー加工では切削距離 5km まで切削を行っても工具に凝着は生じなかった。このことは工具に窒素ガスによる工具摩耗低減効果を表すこととなり、窒素ブロー加工では先端摩耗幅は大気中加工よりも小さい値となった。また、大気中加工においては横逃げ面境界部及び前逃げ面境界部共に大きな境界摩耗が生じたが、窒素ブロー加工では境界部の摩耗を抑えることが出来る結果となった。工具境界部は切削部と非切削部分の境である。切削により工具はかなり高温になるが、工具の非切削部分の温度は低い。この温度差が工具に熱衝撃として働き、工具境界部分では大きな工具摩耗を示すこととなる。切削時の温度が高くなるほど温度差が大きくなり境界摩耗は進行する。窒素中では、上記のように切削温度の低減が図れるため、温度差が低くなることから、境界摩耗の低減が可能になったといえる。

工具摩耗について、切削距離と工具摩耗の関係を図 6.15 に示す。図より、窒素ブロー加工が切削距離が増加しても工具摩耗の進行を大幅に低減できていることが確認され、逃げ面摩耗 VB や横逃げ面境界摩耗において約 $50 \mu\text{m}$ 、前逃げ面境界摩耗では約 $100 \mu\text{m}$ の摩耗低減が可能となった。

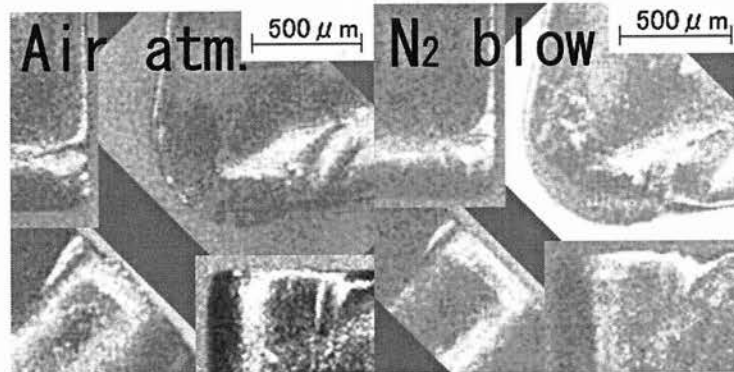


Fig.6.14 工具頭微鏡写真 (切削距離 5km)

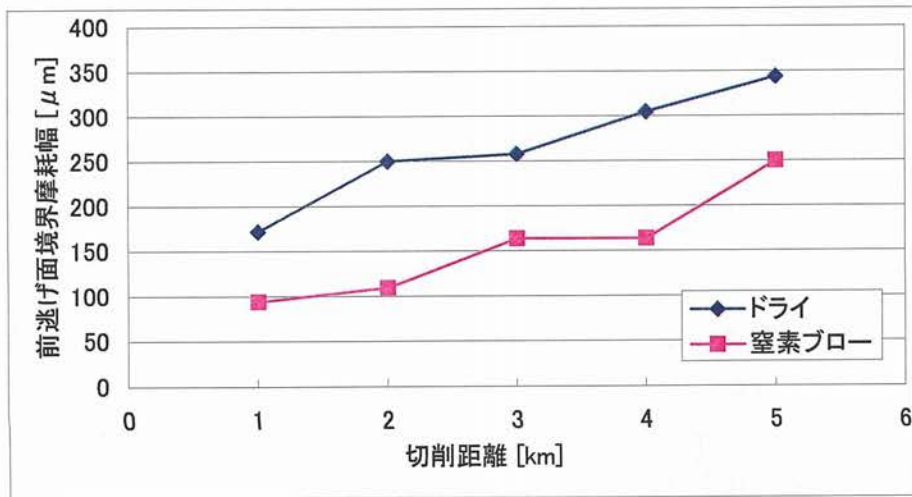


Fig.6.15 前逃げ面境界摩耗幅

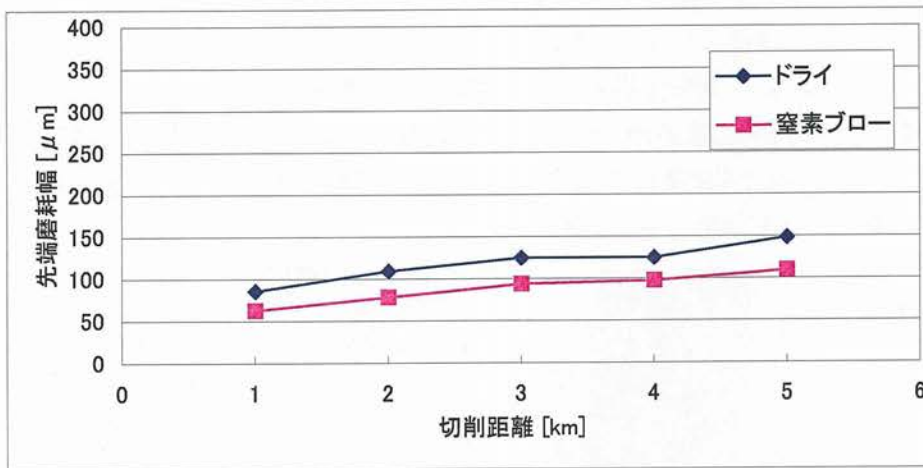


Fig.6.16 先端摩耗幅

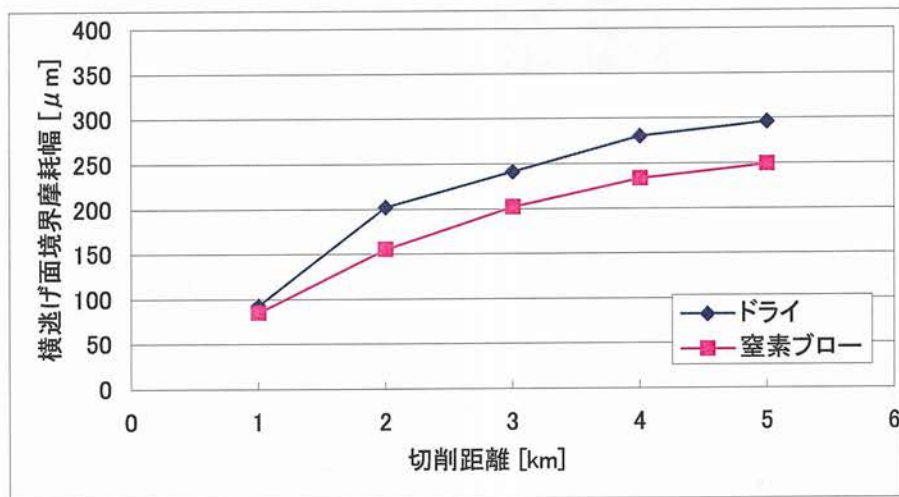


Fig.6.17 横逃げ面境界摩耗幅

図 6.18 は切削後の仕上げ面粗さの結果である。通常、連続旋削加工を行った場合、仕上げ面は切りくずが仕上げ面を擦過する影響を受けるために安定した値は確認されることは稀である。しかしながら、本実験では断続切削という形態であったため、切りくずは非加工時に強制的に排出され、繋がることはない。このことから切りくずの影響を受けることがなく安定した値をとることとなった。図より、大気中加工では、切削距離が増加すると仕上げ面は粗くなる傾向にあるが、窒素ブロー加工では切削距離が進んでも表面粗さは $Ra=3\mu m$ 程度で安定する結果となった。また、同図より、窒素ブロー加工では Ra で $4\mu m$ 、 Rz では $10\mu m$ 低い値をとったことから、良好な仕上げ面を得ることが出来たといえる。

前逃げ面は直接仕上げ面に接触している箇所であり、窒素ブローによって良好な仕上げ面が得られた理由としては、工具の前逃げ面境界摩耗を大幅に低減できたことが要因であるといえる。

以上の結果から、前 4 章の連続旋削では超硬工具において激しい凝着の発生した窒素雰囲気中加工にくらべ、本節の窒素ブローによる断続旋削加工では、凝着は発生せず、 $50\sim 100\mu m$ の大幅な工具摩耗の低減が可能となった。

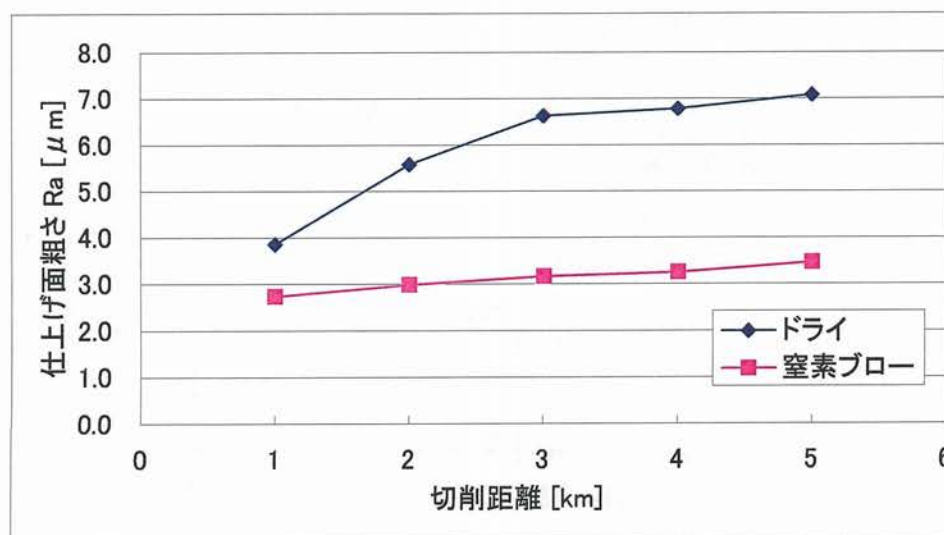


Fig.6.18 仕上げ面粗さ

(4) コーティング超硬チップを用いた切削実験

(i) 実験概要

前項の超硬工具における切削実験では、窒素ブロー加工において工具に凝着は発生せず、大気中加工よりも工具摩耗を抑えられる結果となった。

4章の実験では皮膜の剥離とともに凝着の発生が見られた窒素雰囲気中切削について、断続窒素ブロー旋削加工では皮膜が剥離し母材が露出した後も凝着が生じず良好な切削が出来るのではないかと考えられる。このことより、本項では前項と同様の旋削実験をコーティング工具についても行い、窒素ブローによる断続旋削加工における工具摩耗低減効果を検証した。

(ii) 実験方法

本実験では前項での実験に引き続き、被削材は S45C を用いた。実験に用いた切削条件を表 6.2 に示す。切削条件は前項の実験と同様である。

Table6.2 切削条件

切削速度 [m/min]	150
切り込み [mm]	0.5
送り [mm/rev]	0.15
チップ	TNMG160404 UE6020
切削環境	DRY, N ₂ blow
切削形態	断続
被削材	S45C

(iii) 実験結果と考察

大気中加工、窒素ブロー加工の加工中の様子を図 6.19 に示す。大気中加工、窒素ブロー加工を行った結果、大気中加工では加工初期より火花の発生が確認され、加工終了まで火花は発生し続けることを確認した。窒素ブロー加工では加工終了まで火花の発生は確認することはできなかった。

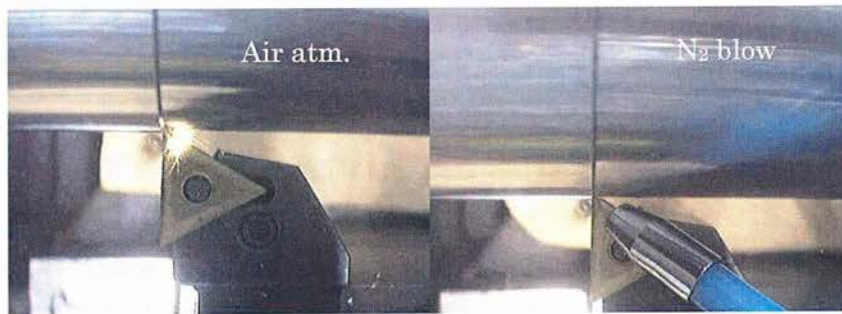


Fig.6.19 大気中加工，および窒素ブロー加工の加工風景

火花の抑制は前項の超硬工具と同様の結果であったが，図 6.20 に示す切削時の切削点近傍温度の測定結果を見てみると，超硬工具では窒素ブローによる温度低減が約 10℃であったのに対し，コーティング工具では約 50℃の低減が確認された。

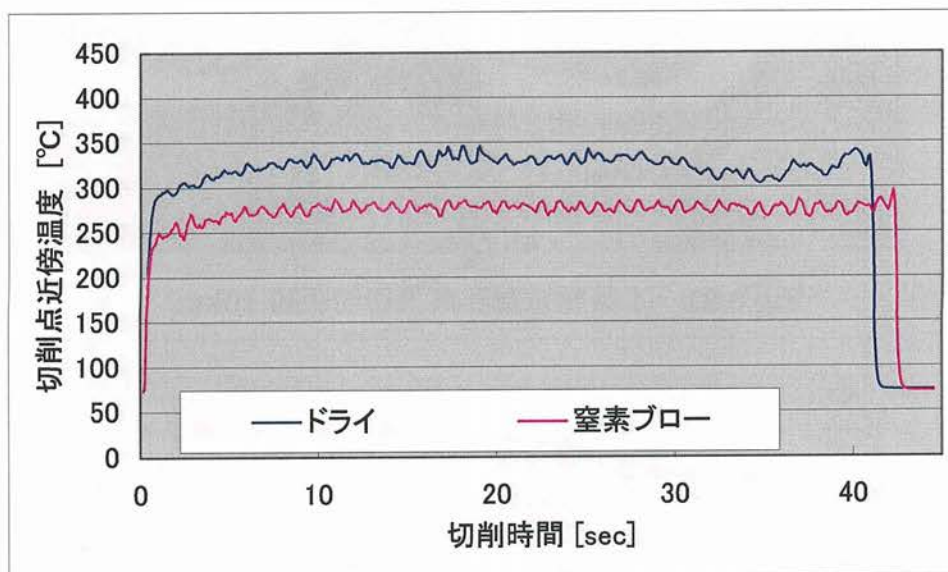


Fig.6.20 切削点近傍温度

図 6.21 に 10km 切削後の工具の写真を示す。なお，図は前項同様左上が前逃げ面，左下が工具先端，右上がすくい面，右下が横逃げ面を表している。

工具すくい面をみると，大気中加工では幅広く黒色に変色していることがわかるが，窒素ブロー加工では変色面積は少なく，横逃げ面や工具先端部分の切削時に被削材と接する部分のみであった。これは，前切削風景の項にて述べた火花の発生が影響していると考えられる。大気中加工では刃先部分を広く覆うような火花が発生したが，窒素ブロー加工では火花は全く発生しなかったが，この火花が大気中加工では工具すくい面の広い面積での変色を招いたのではないかと考察する。

工具摩耗に関しては，図 6.22 と図 6.24 に示すように，前逃げ面境界摩耗や先

端摩耗に関してはあまり窒素ブロー加工による工具摩耗抑制効果は見られなかったが、図 6.24 に示す横逃げ面境界摩耗に関しては 10km 切削後に約 $30\mu\text{m}$ 摩耗低減が可能となった。また、工具摩耗に関しては、コーティング工具ではより厳しい条件を与えることが可能であり、前節までの実験同様、そのような条件において窒素ブローは有効性を示すと考えられる。しかしながら、本項の実験はクランクシャフト旋削を念頭に置いたものであり、実際の現場の加工条件における有用性を検証することを目的としているために本項ではここまでの実験とする。

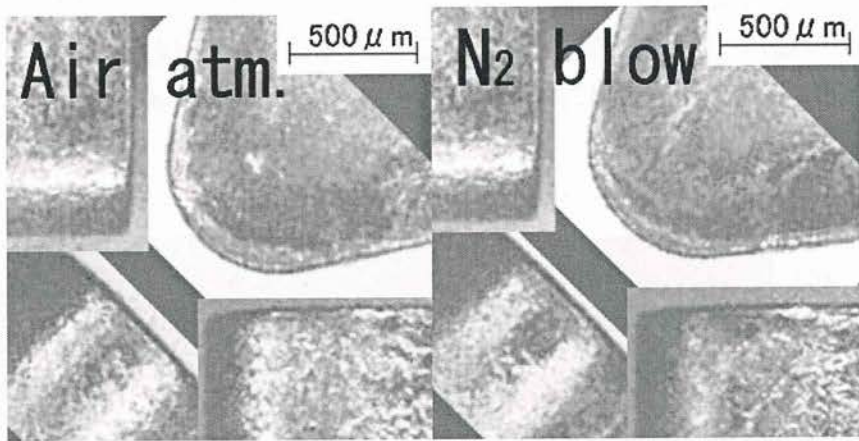


Fig.6.21 工具頭微鏡写真 (切削距離 10km)

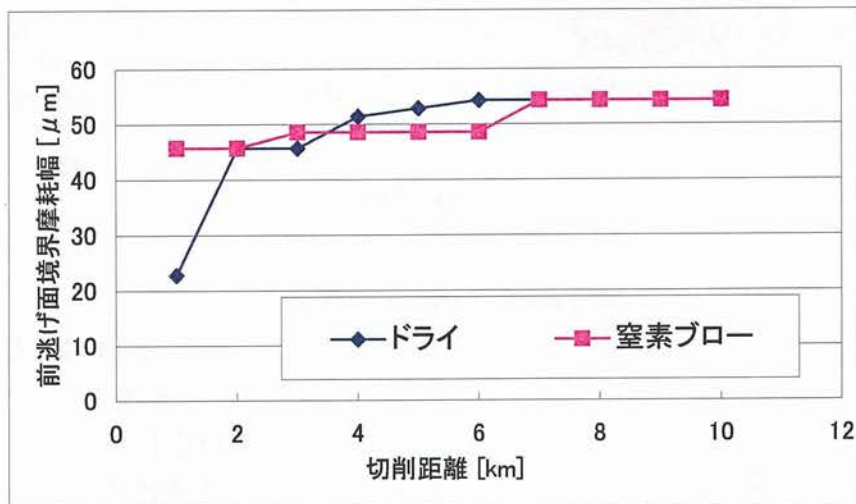


Fig.6.22 前逃げ面境界摩耗幅

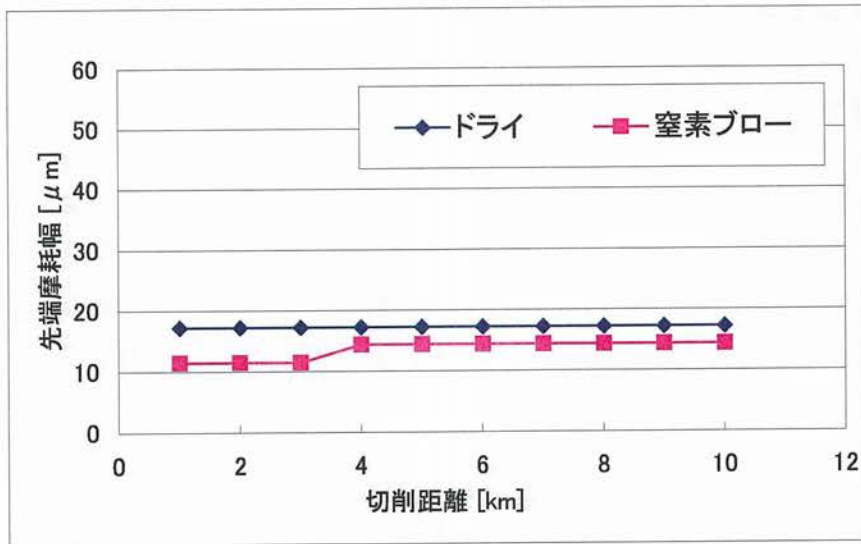


Fig.6.23 先端摩耗幅

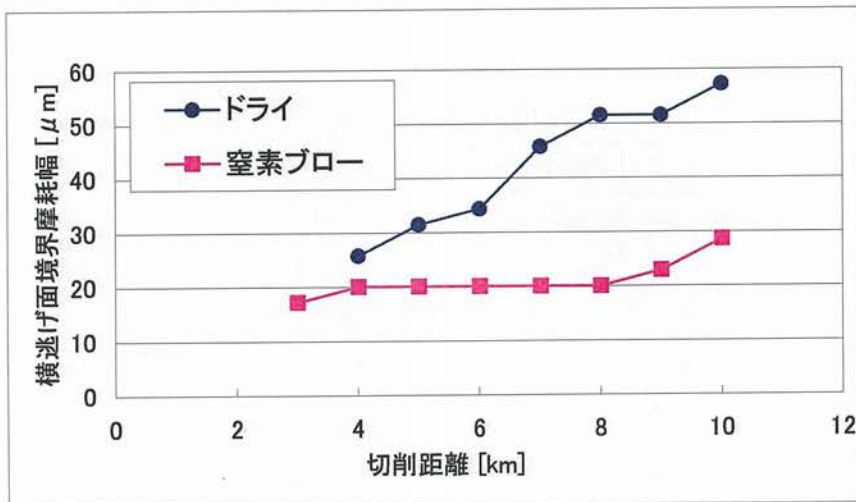


Fig.6.24 横逃げ面境界摩耗幅

(5) サーメットチップを使用した切削実験

(i) 実験概要

前節までの実験において超硬，コーティングともに窒素ブロー加工において良好な実験結果が得られた．これらの結果を受け，本項では 4 章において連続旋削加工，断続旋削加工のいずれの条件においても良好な結果を示したサーメット工具を使用し，断続旋削加工における窒素ブローの工具摩耗抑制効果について検証する．

(ii) 実験方法

本実験では前項の超硬工具での実験と同様，被削材は S45C を用いた．実験に用いた切削条件を表 6.3 に示す．

Table6.3 切削条件

切削速度 [m/min]	150
切り込み [mm]	0.5
送り [mm/rev]	0.15
チップ	TNMG160404 NX2525
切削環境	DRY, N ₂ blow
切削形態	断続
被削材	S45C

(iii) 実験結果と考察

(1)加工風景

サーメット工具を用いた実験では，図 6.25 のように，超硬工具での実験同様に大気中加工では加工中は常に火花が発生する結果となったが，窒素ブロー加工ではこのような火花は加工終了まで発生しなかった．また図 6.26 は切削点近傍温度の測定値を示した図であるが，この図から窒素ブロー加工は大気中加工よりも約 50℃加工時の工具温度が低いことがわかり，この温度差が火花の発生にも密接に関係しているものと考えられる．さらに今回の実験では，窒素ブロー加工では凝着が生じなかった．また，図 6.27～図 6.28 は工具の各加工面における切削距離と工具摩耗のグラフであるが，この図より，切削時の温度低減効果

が工具摩耗にも大きく影響を及ぼしていることが見て取れる。更に、工具摩耗に関しては工具逃げ面境界部において大気中加工と窒素ブロー加工では値に変化が見られる。まず、前逃げ面境界部に関しては 10km 切削後には窒素ブロー加工で約 $100\mu\text{m}$ の摩耗抑制が可能となったが、横逃げ面境界部では、大気中加工が切削距離の増加と共に工具摩耗が進行しているのに対して、窒素ブロー加工では切削距離が進んでも約 $50\mu\text{m}$ の初期摩耗から殆ど工具摩耗は進行しなかった。その結果 10km 切削時点では約 $180\mu\text{m}$ の工具摩耗の低減が確認できる。このように、超硬工具に引き続き、サーメット工具における実験においても、窒素ブロー加工によって火花を抑制し、切削温度を減少させると共に工具摩耗を抑制できることがわかった。また、図 6.29 は仕上げ面粗さの結果であるが、サーメット工具においても窒素ブローにより良好な仕上げ面が得られた。

以上の結果より、サーメット工具の使用において、断続旋削加工に窒素ブローを用いることにより、工具摩耗 VB の低減が可能となるとともに、境界摩耗の発生を大幅に抑制できることがわかった。

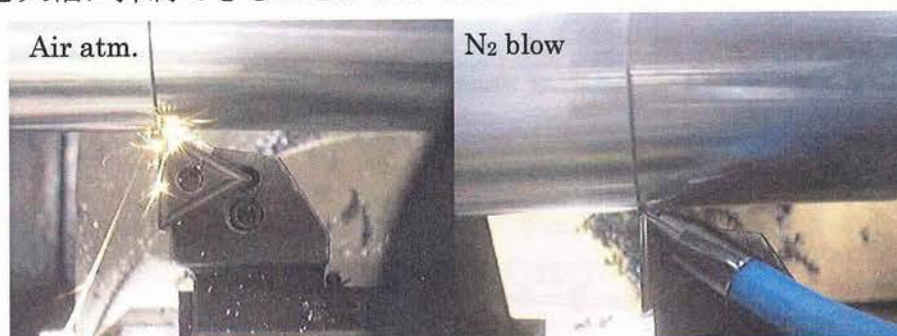


Fig.6.25 大気中加工，および窒素ブロー加工の加工風景

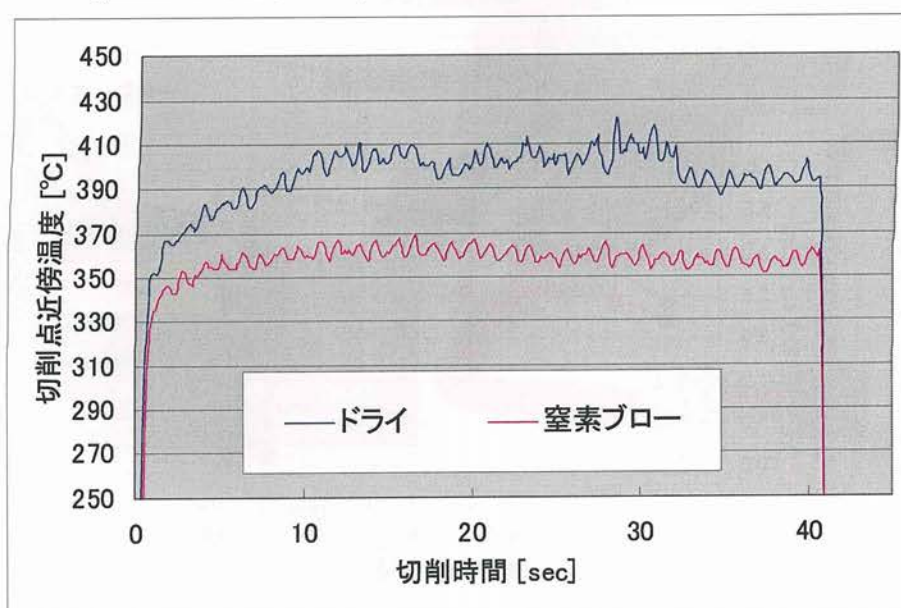


Fig.6.26 切削点近傍温度

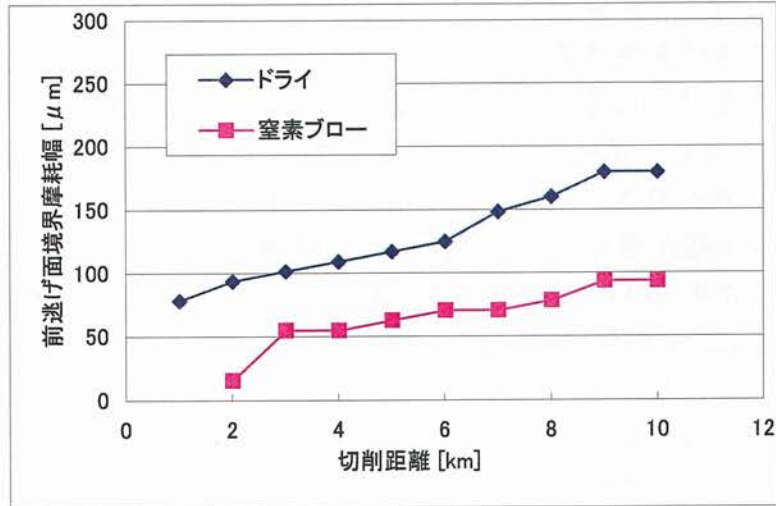


Fig.6.27 前逃げ面境界摩耗幅

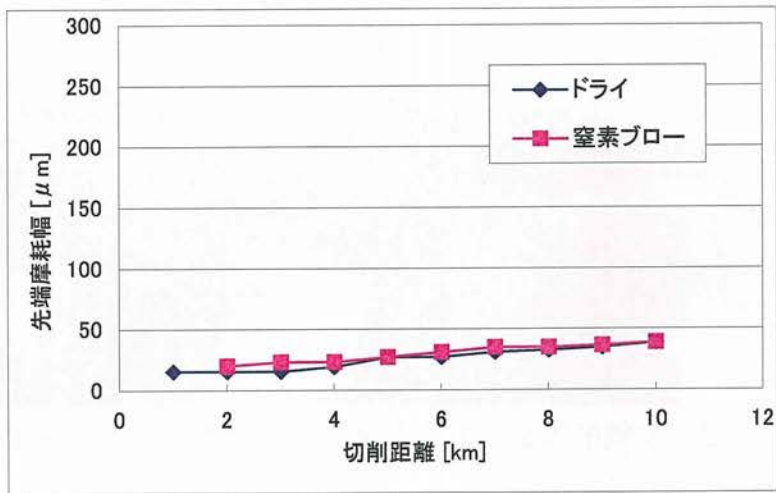


Fig.6.28 先端摩耗幅

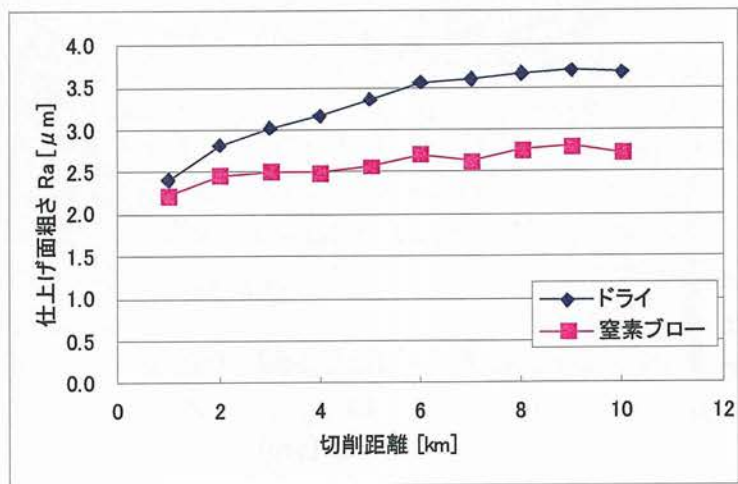


Fig.6.29 切削距離と仕上げ面粗さ Ra

6.2.3 クランクシャフト材料の旋削加工への適用

(1) 実験概要

前項の実験結果より、断続旋削加工においても窒素ブロー加工によって大幅に工具摩耗を低減できることがわかった。その結果を受けて本項では窒素ブローによってクランクシャフトの旋削工程における工具寿命の改善を図るため、生産現場にて用いられている被削材及び工具を用いて具体的な検討を行う。

(2) 実験装置

本研究で使用した旋盤は、前項と同様の Shoun Cazeneuve 製汎用旋盤 HB500 である。図 6.30 に実験装置の概観図を示す。実験ではフジ BC 技研株式会社製 EB-TOOL のホルダーを使用し、チップのすくい面側と前逃げ面側から切削点近傍へと窒素ガス及びエアを吹き付けた。このように、ホルダーにガスの供給機構が内蔵されていることから、ATC タレットをもつ NC 機への導入の容易性は高い。

窒素ガスはガスボンベから供給され、レギュレータと流量計を介して圧力と流量を調節した後に切削点近傍へ吹き付けられる。

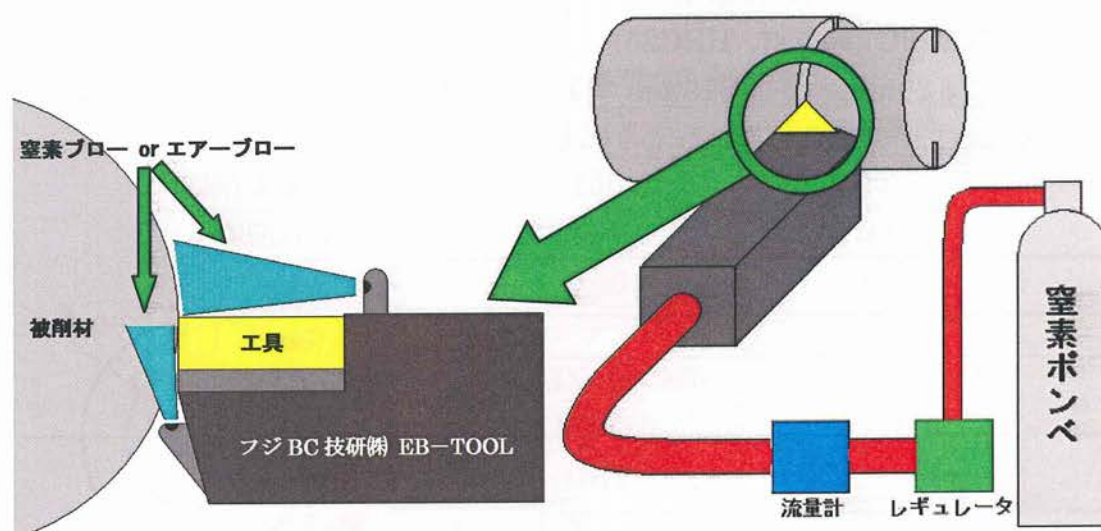


Fig.6.30 実験装置の概観図

(3) 使用工具と被削材

今回使用するコーティング超硬工具は、クランクシャフトを加工する際に使用しているチップのコーティングと同種のコーティングを施したもので、三菱マテリアル社製の旋削用コーティング超硬チップ UC5115 (TNMG160404) である。このコーティングは炭窒化チタン(TiCN)とアルミナ(Al_2O_3)を主体としている(図.6.32)。炭窒化チタンは窒化チタン(TiN)より硬度が高いコーティング物質で、耐アブレッシブ摩耗性に優れ、アルミナは熱的安定性が高く、高温の切り屑と接触するすくい面など、温度が上昇しやすい部分の耐摩耗性向上に有効な物質である。図.6.31 に使用したチップの寸法を示す。

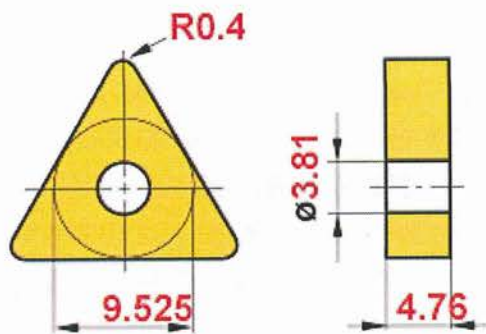


Fig.6.31 コーティング超硬チップの寸法



Fig.6.32 工具のコーティング

また、今回の実験に用いた被削材はクランクシャフトに用いられることのある材料である S48C (調質材, HRC25) を使用している。被削材の寸法は図.6.33 に示すように $\phi 80\text{mm}$ ・長さ 315mm であり、これに幅 10mm ・深さ 14mm の溝を 2 箇所設け、断続切削となるようにした。

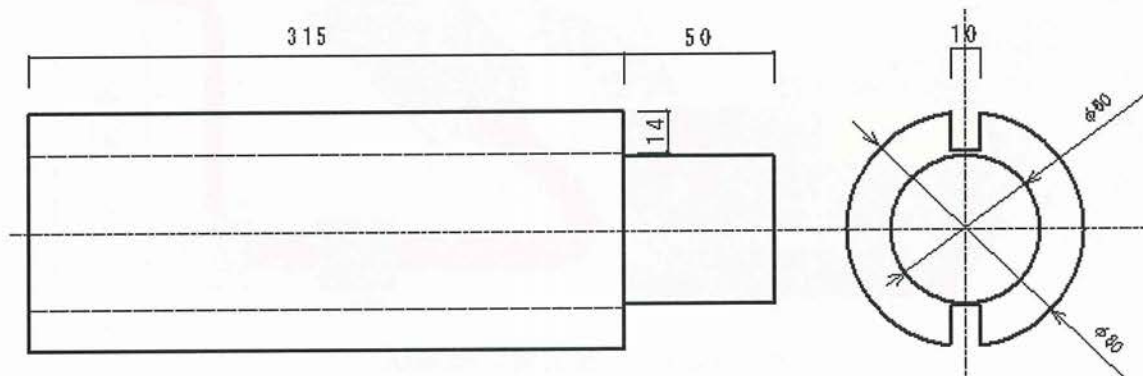


Fig.6.33 被削材の寸法

(4) 切削速度 150m/min での断続旋削実験

(i) 実験概要及び実験方法

前項の実験では、超硬、コーティング、サーメット工具において窒素ブロー加工により断続旋削加工で工具摩耗の低減が可能となった。この結果を受け、本項では、クランクシャフトの旋削工程への導入に向け実験を行う。実験は生産現場で使用されている工具と同種のコーティングの工具及び切削条件において、実際のクランクシャフト材料の切削を行い、工具摩耗の低減効果を検証する。

実際の生産現場では、生産性の観点から単位時間当たりの除去量を大きく取れる丸コマチップ(RCMX1204M0 UC5115)を用い、表の切削条件で加工を行っている。しかし、円形のチップは同じ切込みでも切削時の被削材との接触面積が三角チップより大きく、切削抵抗も大きくなる。そのため本研究室の汎用旋盤では剛性が足りず、ビビリが発生し実験が出来なかった。そこで、代替案として同種のコーティングを施した三角チップ(TNMG160404 UC5115)を用いて実験を行った。実験では大気中加工と窒素ブロー加工を行い、切削距離 1km 毎に工具摩耗・被削材の表面粗さ・切削点近傍温度などの点から窒素ブローの効果を検証した。切削条件に関しては旋盤の剛性上の問題から、送りのみ 0.10mm/rev に変更したが、切削速度と切込みはスズキと同様にそれぞれ 150m/min, 2mm に設定した。実験に用いた切削条件を表 6.4 に示す。

Table6.4 切削条件(SUZUKI)

	実加工	実験条件
切削速度[m/min]	150	150
切込み[mm]	2.0	2.0
送り[mm/rev]	0.40	0.10
チップ	三菱マテリアル RCMX1204M0 UC5115	三菱マテリアル TNMG160404 UC5115
切削環境	DRY	DRY, N ₂ blow
切削形態	断続	断続
流量[Nl/min]	—	40

(ii) 実験結果及び考察

大気中加工，窒素ブロー加工での加工中の様子を図.6.34 に示す．大気中加工では切削距離 7mm 辺りから火花が発生し始めた．一方で，窒素ブロー加工では加工中火花が発生することはなかった．

図.6.35 に切削速度 150m/min の場合の切削点近傍温度を示す．また，この図の平均を算出したものを図.6.36 に示す．図より，切削点近傍温度は大気中加工が 460℃，エアブロー加工が 442℃であるのに対し，窒素ブロー加工の切削点近傍温度は 434℃と，他の 2 条件と比較して最も低い値を取っていることがわかる．

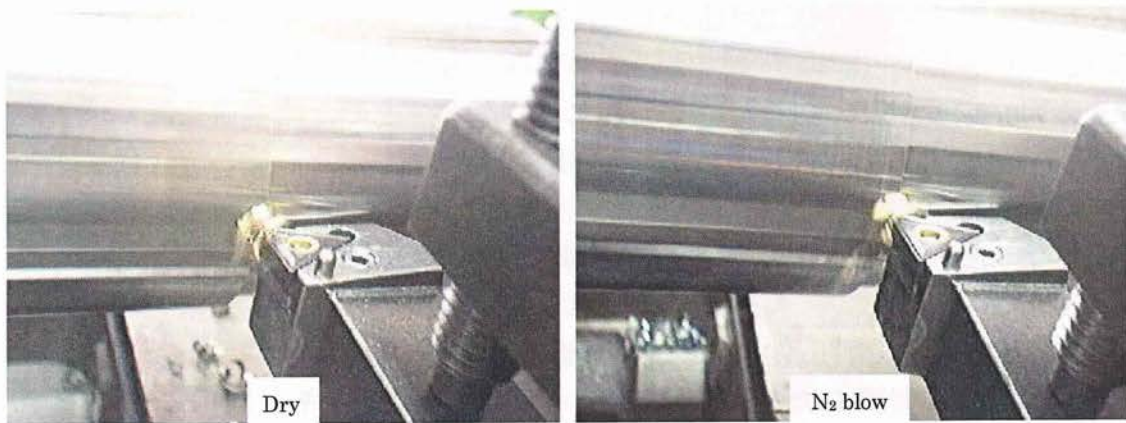


Fig.6.34 加工中の様子

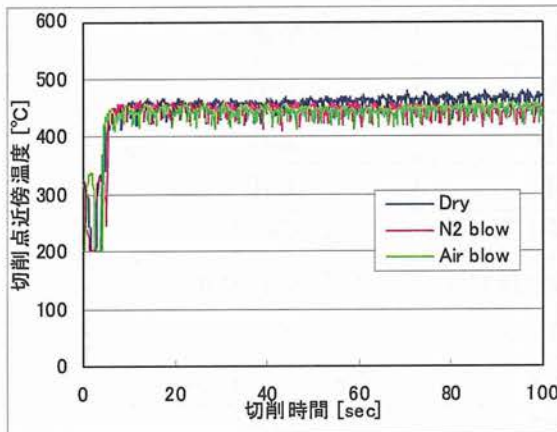


Fig.6.35 切削速度 150[m/min]における切削点近傍

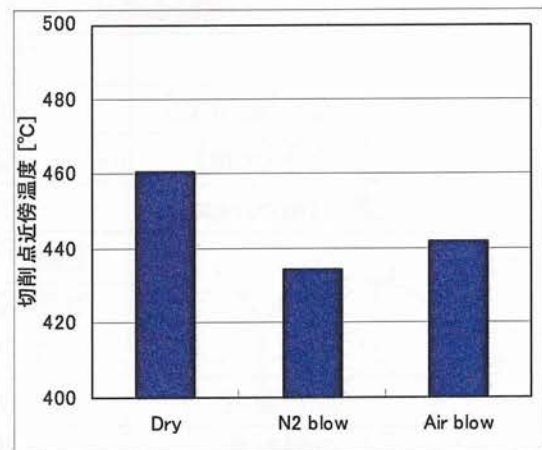


Fig.6.36 切削点近傍温度の平均値

切削距離と算術平均粗さの関係，切削距離と最大粗さの関係をそれぞれ図 6.37 に示す．図より表面粗さは大気中加工と窒素ブロー加工どちらにおいても

切削距離と共に増加しており、両者の間に大きな差は見られない。

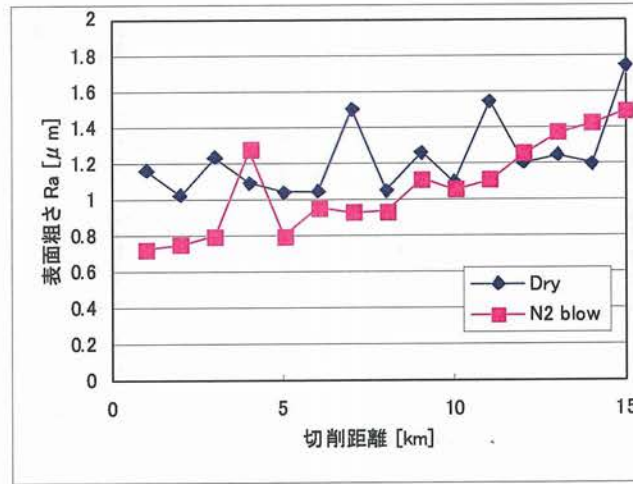


Fig.6.37 切削速度 150[m/min]における算術平均粗さ

図 6.38 に切削速度 150m/min における各条件での切削距離が 10km に達したチップの前逃げ面，先端，横逃げ面の拡大写真(倍率 200 倍)を示す。写真より，横逃げ面にはコーティングの剥離が生じているのが窺える。また，図 6.39 に前逃げ面境界摩耗と切削距離の関係を示す。窒素ブロー加工のほうが若干摩耗が抑えられている。

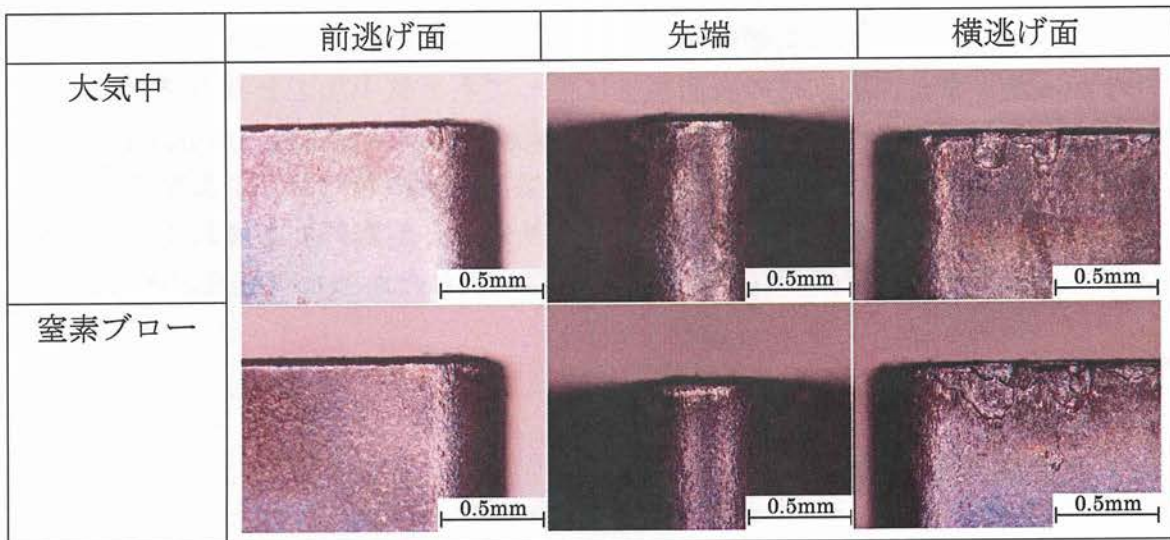


Fig.6.38 切削距離 10km での工具の拡大写真(200 倍)

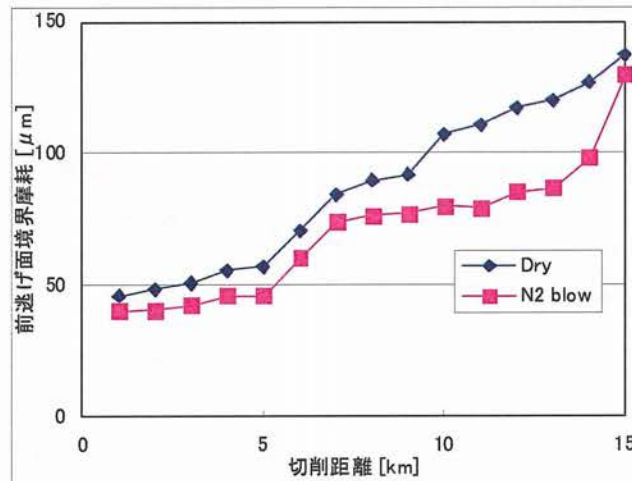


Fig.6.39 前逃げ面境界摩耗

実験結果より、窒素ブロー加工を用いることで切削点近傍の温度は低下し、加工中に火花が発生することもなくなった。これは窒素ブローにより切削点近傍が窒素雰囲気になり酸化発熱が抑制されたことと、窒素ガスの吹き付けによる冷却効果が影響していると考えられる。工具摩耗については切削距離 10km から 14km までは大気中加工に比べて窒素ブロー加工のほうが摩耗幅が $30\mu\text{m}$ ほど小さくなっているが、切削距離が 15km に達したところではその差は $10\mu\text{m}$ 弱になっている。横逃げ面に関しては大気中加工と窒素ブロー加工どちらにおいてもコーティングの剥離が所々に生じているために逃げ面摩耗幅が測定できなかった。また、被削材の表面粗さに関しても大気中加工と窒素ブロー加工の間に大きな差は表れなかった。昨年度の実験では、切削速度 $150\text{m}/\text{min}$ でコーティング工具を用いた際に切削点近傍の温度は低減したが、工具摩耗に大きな差は見られなかったことから工具の耐熱衝撃性や耐摩耗性が優れていたために摩耗が進行せず、窒素ブローの効果が顕著に表れなかった可能性がある。

(5) 切削速度 $300\text{m}/\text{min}$ での断続旋削実験

(i) 実験概要及び実験方法

切削速度 $150\text{m}/\text{min}$ での旋削実験では、窒素ブローを適用することで工具摩耗に若干の抑制効果が見られた。断続切削に関しては過去の研究において高速高送り条件で非常に有効であるとの報告がある。しかし、三角チップでは強度的に高送りは困難であるため、本実験では送り値を切削速度 $150\text{m}/\text{min}$ での実験と同様に $0.1\text{mm}/\text{rev}$ で固定し、切削速度を $300\text{m}/\text{min}$ と高く設定し、そこに

窒素ブローを用いることで加工能率の向上を図る。また、これまでは比較条件として大気中加工と窒素ブロー加工を用いてきたが、窒素ガスの吹き付けによる冷却効果についても比較するためにエアブロー加工を追加した。実験に用いた切削条件を表 6.5 に示す。

Table6.5 切削条件

切削速度[m/min]	300
切込み[mm]	2.0
送り[mm/rev]	0.10
チップ	三菱マテリアル TNMG160404 UC5115
切削環境	Dry , Airblow , N ₂ blow
切削形態	断続
流量[Nl/min]	40

(ii)実験結果及び考察

大気中加工，エアブロー加工，窒素ブロー加工での加工中の様子を図 6.40 に示す．切削速度を 300m/min まで増加させた場合も，前項同様大気中加工では加工初期から工具のすくい面付近で火花が確認され，加工終了まで火花が発生し続けた．エアブロー加工においても加工初期からわずかな火花が発生し，切削距離が進むほど火花の発生量は増加した．しかし，窒素ブローでは加工中に火花が発生することは終始なかった．

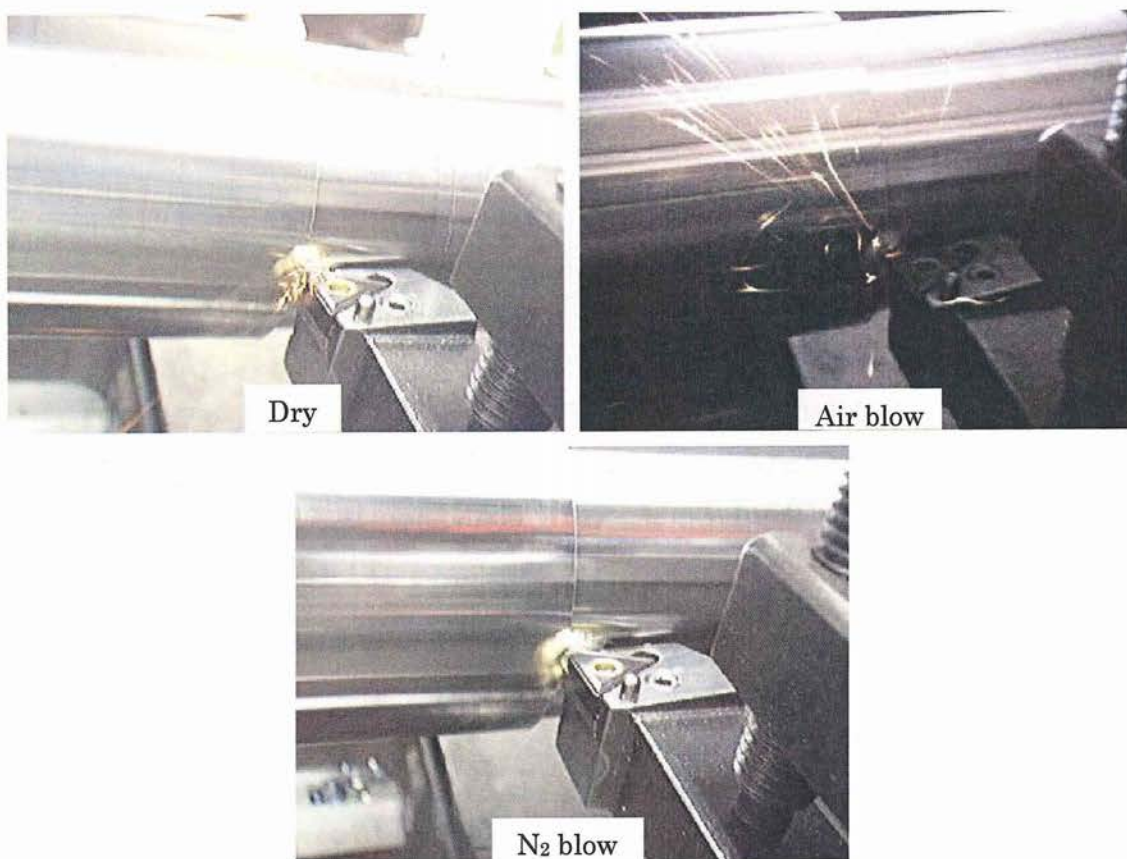


Fig.6.40 加工中の様子

図 6.41 に切削速度 300m/min の場合の切削点近傍温度を示す．また，この図の平均を算出したものを図 6.42 に示す．切削点近傍温度は大気中加工が 552℃，エアブロー加工が 551℃であるのに対し，窒素ブロー加工の切削点近傍温度は 539℃と，他の 2 条件と比較して若干低い値を取っていることがわかる．これも窒素ブローにより切削点近傍が窒素雰囲気になったために，酸化反応が抑制された結果であると考えられる．

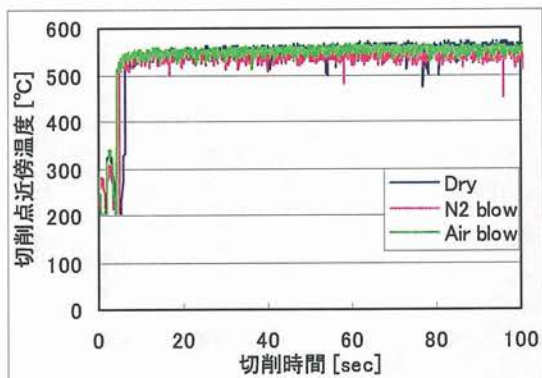


Fig.6.41 切削速度 300[m/min]における
切削点近傍温度

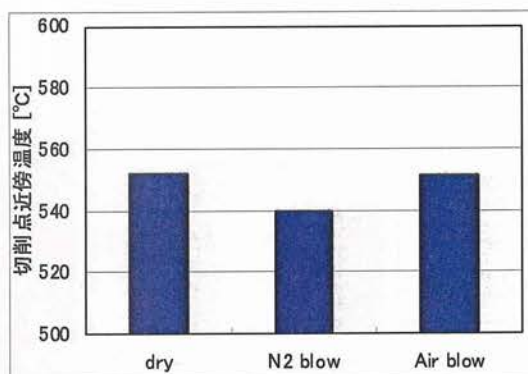


Fig.6.42 切削速度 150[m/min]における
切削点近傍温度

切削距離と算術平均粗さの関係、切削距離と最大粗さの関係をそれぞれ図.6.43 に示す. 図より大気中加工, エアブロー加工, 窒素ブロー加工の表面粗さに大きな差は見られない.

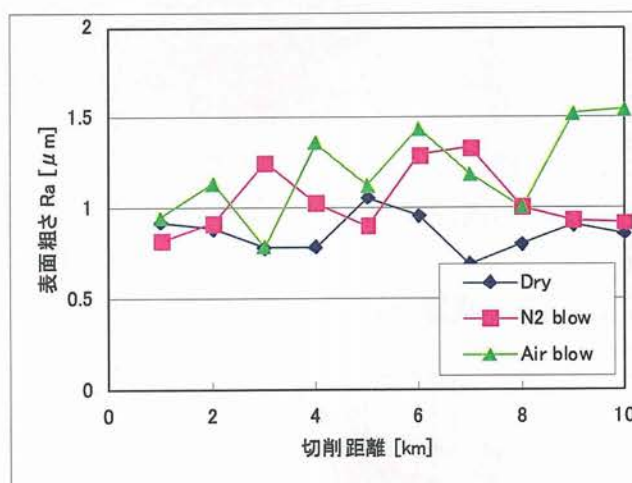


Fig.6.43 切削速度 300[m/min]における算術平均粗さ

図 6.44 に切削速度 300m/min におけるそれぞれの条件での切削距離が 10km に達したチップの前逃げ面, 先端, 横逃げ面の拡大写真(倍率 200 倍)を示す. この図より, 前逃げ面, 先端, 横逃げ面の摩耗の様子に大気中加工, エアブロー加工, 窒素ブロー加工による大きな差は見られない. また, コーティングの剥離も生じることはなかった.

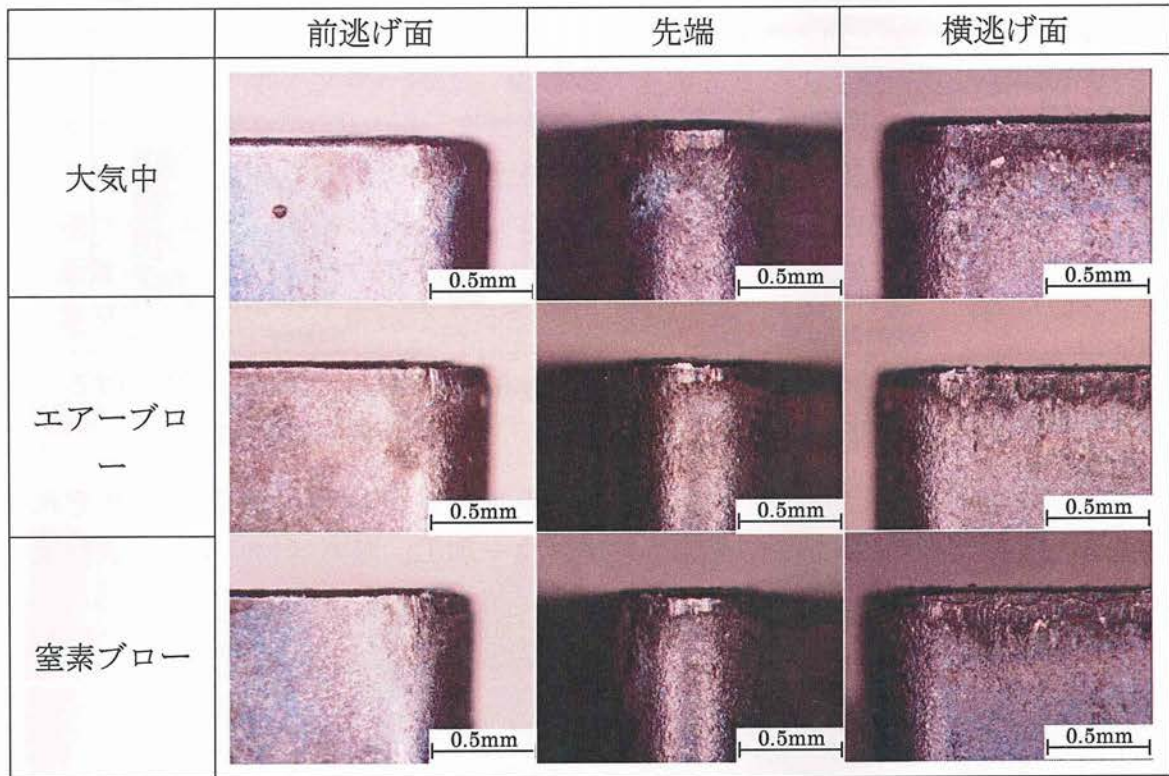


Fig.6.44 工具の摩耗の様子

また、図 6.45 と図 6.46 に前逃げ面境界摩耗切削距離の関係、横逃げ面摩耗と切削距離の関係をそれぞれ示す。これらの図からも、大気中加工、エアブロー加工、窒素ブロー加工による工具摩耗の大きな差は見られない。

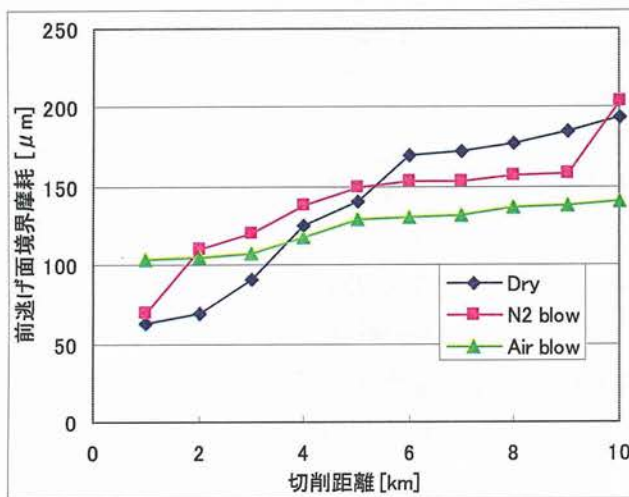


Fig.6.45 前逃げ面境界摩耗

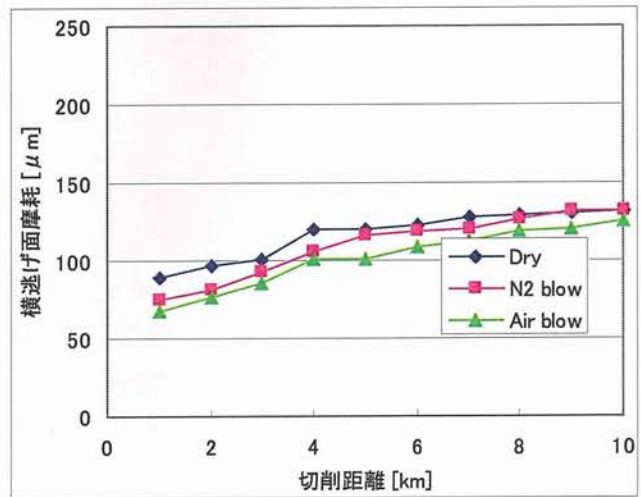

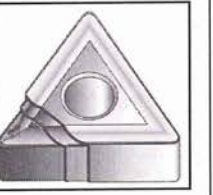
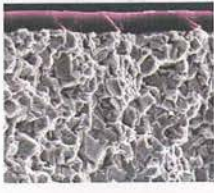





Fig.6.46 横逃げ面摩耗

実験の結果、切削速度 300m/min での高速旋削に窒素ブローを用いたところ、窒素ブロー加工では火花の発生が抑制された。また、切削点近傍温度においては昨年度の研究では窒素ブローを用いることで切削点近傍温度が約 40°C 低下しているのに対し、今回はその差は 10°C 程度であり、窒素ブローによる酸化発熱の抑制効果はあまり現れなかった。工具摩耗や表面粗さにおいてもそれぞれの切削条件による差は見られず、窒素ブローによる効果は小さかったと言える。

今回の実験で窒素ブローの効果が表れなかった要因としては工具種の違いが考えられる。過去のミーリング実験では超硬母材上に窒化チタンをコーティングした工具を使用した結果、工具摩耗や切削点近傍温度に改善が見られた。また、昨年度の断続旋削の研究においても、超硬・サーメット・コーティング工具に窒素ブローを適用した結果、同様に工具摩耗や切削点近傍温度に改善が見られた。これらの材種を比較してみると、これまでの研究において窒素ブローの効果が顕著に現れているものは TiN, TiCN, TiAlN などの Ti 系化合物である。しかし、今回用いた工具は TiCN-Al₂O₃ であり、表面が Al₂O₃ となっている点がこれまでの工具と異なっている。この点が窒素ブローが効果を示さなかった原因であると推察できる。表 6.6 に工具種と窒素ブローの効果の関係を示す。

Table6.6 工具種と窒素ブローの効果の関係

	過去の研究	昨年度の研究	二章	本章
工具種	コーティング (TiN)	サーメット (TiCN 系)	コーティング (TiAlN 系)	コーティング (Al ₂ O ₃ -TiCN)
工具模式 図				
工具断面				
窒素ブロー の効果	摩耗減少	摩耗減少	摩耗減少	効果なし

6.3 窒素ブローによる高送りミーリング加工実験

6.3.1 実験目的

自動車バンパー用金型のような大型金型の粗切削加工では、被削材の除去量が多いことから、加工時間が長くなってしまふ。そのため、現在金型の切削加工では切削時間短縮の観点から、高い送り値で切削を行う高送り加工が注目されている。しかしながら、送り値を上昇させると工具寿命が著しく低下してしまふ。

共同研究先の自動車会社においても、高送り条件によるバンパー金型のミーリング加工において約40分で工具摩耗となってしまうという問題がある。工具摩耗が低下すると、工具費の増加や工具交換のためのダウンタイムが増加してしまふ、コスト面や生産性の低下を招いてしまふ。この問題の解決を図り、同社ではこれまでフラッド給油やミスト加工による改善を図ったが、あまり効果は見られなかったことが確認されている。

このことを受けて、本章では高送り条件におけるミーリング加工に窒素ブロー加工法を適用し工具寿命の改善を図る。また、より高い送り値における切削実験を行い、窒素ブロー加工によって生産性の向上が可能となるか検証した。

なお本章において、窒素ブロー加工とは主軸センタースルーにより加工点に窒素を噴きつけながら切削を行う加工法を示すものとする。

6.3.2 実験装置及び測定方法

(1) マグネシウム加工用マシニングセンタ エンシュウ(株)製 ES450

本研究を進めるにあたっては、気体のブローを行うことが可能なマシニングセンタが必要となる。このことより、前5節同様、図6.47に示すエンシュウ(株)製ES450に窒素発生装置を付随させて窒素切削用に改良したものを使用した。このマシニングセンタは主軸から工具に直接窒素を吹き付けることができる装置である。



Fig6.47 マシニングセンタ外観

(2) 窒素ガス発生装置 神鋼エアテック(株)製 CN2-18

本研究では、5章と同様に図 6.48 に示す神鋼エアテック製窒素ガス発生装置で生産した。この窒素発生装置はモレキュラーシーブカーボンの吸着剤を用い、ドライヤー付きコンプレッサーにより供給される空気の酸素、水分などを吸着分離して高純度の窒素ガスを得ることができる。窒素発生装置の主な使用は表 6.7 に示す通りである。この方式は吸着剤により、酸素・窒素を選択吸着し加圧下で吸着した成分は減圧により脱着し、加圧、減圧を繰り返すことから、PSA(圧カスイング吸着)と呼ばれる。

また、前章の実験では窒素ボンベより窒素ガスを供給したが、本章では図 6.49 のように窒素発生装置を用いることによって、直接大気中より窒素ガスを分離して使用する。また、使用後は大気に還元することからも、当加工法は切削油剤を使用する加工法と比べ、非常に環境負荷の小さい加工法であるといえる。



Fig.6.48 窒素発生装置外観

Table6.7 窒素発生装置諸元

窒素ガス純度	99%以上	
窒素ガス発生量	383L/min	
窒素ガス圧力	0.5MPa 最大	
窒素ガス露点	-50℃以下	
原料空気条件	風量	1.3m ³ /min
	吐出量	0.83MPa
	出力	7.5kW

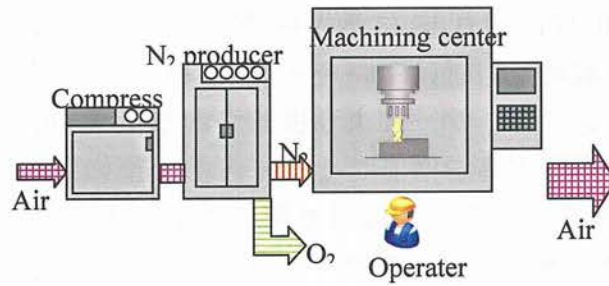


Fig6.49 窒素発生装置システム図

(3) 使用工具

本実験はバンパー金型の実加工における窒素ブロー加工の有効性を検証することを目的としている。よって、実加工で使用されている工具と同様のものを用いることが望ましい。しかし、本実験では BT40 番のマシニングセンタを使用することから、BT50 番のマシニングセンタを使用している実加工と同一の工具を使用することができない。そのため、実加工で使用されている工具と同形状の小型工具を用いることとした。実加工と本実験それぞれで使用しているインサートを表 6.8 に示す。今回使用した工具の切れ刃は、図 6.50 に示すように α 角及び β 角による主切れ刃部分と底刃となる副切れ刃部分からなる。また、実加工と本実験それぞれで使用しているホルダーを表 6.9 に示す。

Table6.8 使用工具

		実加工	実験
呼び番号		JDMT140520ZDSR- JM	JDMT080320ZDSR- JM
コーティング		FH7020	FH7020
寸法	B_3	15°	13°
	D_1 [mm]	14	8
	S_1 [mm]	5.56	3.18
	F_1 [mm]	2.8	1.4
	Re [mm]	2	2
形状			

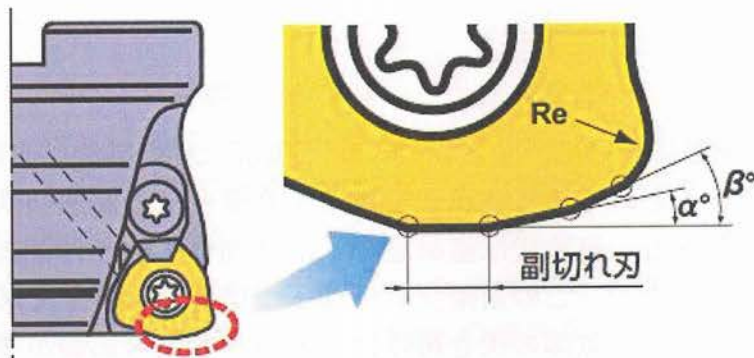




Fig.6.50 主切れ刃と副切れ刃

Table6.9 使用ホルダー

	実加工	実験
呼び番号	AJX14R08005D	AJX08R202SA20S
刃数 [枚]	5	2
工具径 [mm]	80	20
有効切れ刃径 [mm]	68.1	11.4
全長 [mm]	63	49
最大切込み [mm]	2	1.5
外観		

(4) 切削環境の定義

前章までの実験において、窒素切削による温度上昇の抑制が確認されており、発熱を抑制することのできる窒素切削はより高温となる高速切削において有効であると考えられる。実験では窒素を加工点に向けて吹き付けた窒素ブロー加工について検討を行う。この窒素ブロー加工では窒素環境下で加工を行うことによる影響のほかに、気体の吹き付けによる冷却効果の影響が挙げられる。したがって、加工特性がどちらの作用に基づくものであるかを検討する必要がある。窒素を吹き付けることによる効果を検討するために、大気中での完全大気中加工(以下、大気中加工と略)及び吹き付け気体を空気にかえた加工法(以後、エアブロー加工と略)についても実験を行うこととする。また、気体を吹き付けることによる効果を検討するため大気中加工も行う。これらのことから、大気中加工、エアブロー加工、窒素ブロー加工の3種について検討する。

窒素切削においては、窒素発生装置により濃度 99.99%以上の窒素ガスを用いる。また、窒素ブロー加工及びエアブロー加工については主軸センタースルーシャフトを用い、ホルダーのクーラント穴から工具先端に向けて下向きの吹き付けを行う。この状態で流量 383L/min で窒素を吹き付けることを窒素ブローと

し、窒素発生装置を介さず窒素精製に用いる原料空気を供給するためのコンプレッサーエアを直接マシニングセンタに接続して、窒素ブローに用いる配管より流量 125L/min で空気を吹き付けることをエアブローと定める。加工環境の定義は表 6.10 の通りである。

Table6.10 加工環境の定義

	大気中	エアブロー	窒素ブロー
吹付気体	—	空気	窒素
吹付気体酸素濃度	20.95%	20.95%	0.01%以下
流速	—	125L/min	125L/min

6.3.3 同型工具における相似性の検証

(1) 実験概要

実加工では BT50 の横型マシニングセンタによって行われているが、実験では BT40 の縦型マシニングセンタを使用するので同条件での加工ができない。そのため、同形状の小型工具を用いた場合での実加工の再現性を検証した。

(2) 実験方法

本実験で用いた切削条件を表 6.11 に示す。1 刃あたりの送りを変化させ、切りくずの発色、形状から実加工の再現性を検証する。切削速度を実加工と同じ 193.5mm/min とし、実加工で使用している工具と実験で使用する工具との寸法の比が 0.57 であることから軸方向の切込みを 0.57mm とし、径方向の切込みは実験効率を考慮して 10mm とした。使用した被削材は実加工と同種の金型材 SD18T で大きさは 200mm×200mm×80mm の直方体を使用した。

Table6.11 切削条件

切削条件	実加工	実験
切削速度 [m/min]	193.5	
主軸回転数 [rpm]	770	3080
工具径 [mm]	80	20
刃数	5	2
テーブル送り [mm/min]	5500	1232~4928
1刃あたりの送り [mm/rev]	1.4	0.2~0.8
切込み(径方向) [mm]	56	10
切込み(軸方向) [mm]	1	0.57
切削方法	ダウンカット	ダウンカット
被削材	SD18T	

(3) 実験結果

(i) 切りくず発色

切りくずは加工することで発生した熱によって酸化し、被削材の銀色から発熱量が増すごとに茶色、青色の順に発色する。図 6.51 に各送り値で得られた切りくず及び実加工で得られた切りくずの写真を示す。1刃あたりの送りが 0.2~0.4mm/rev においては、切りくずの発色から送り値が増加するにしたがって切削による発熱量が増し、切りくずの発色が茶色から青色に変化していくことがわかる。また、送り値が 0.5mm/rev を超えると青色と茶色の2色からなる発色となり、送り値が増すごとに茶色の発色部分が増加していることがわかる。送り値 0.8mm/rev は実加工における1刃あたりの送りを小型工具での送り値に換算した値であり、実加工で得られた切りくずと同様の発色が確認できた。このことから、工具の大きさの比を用いて実験条件を定めることで実加工と同様の発熱状態が得られ、実加工を小型工具で再現できると考えられる。

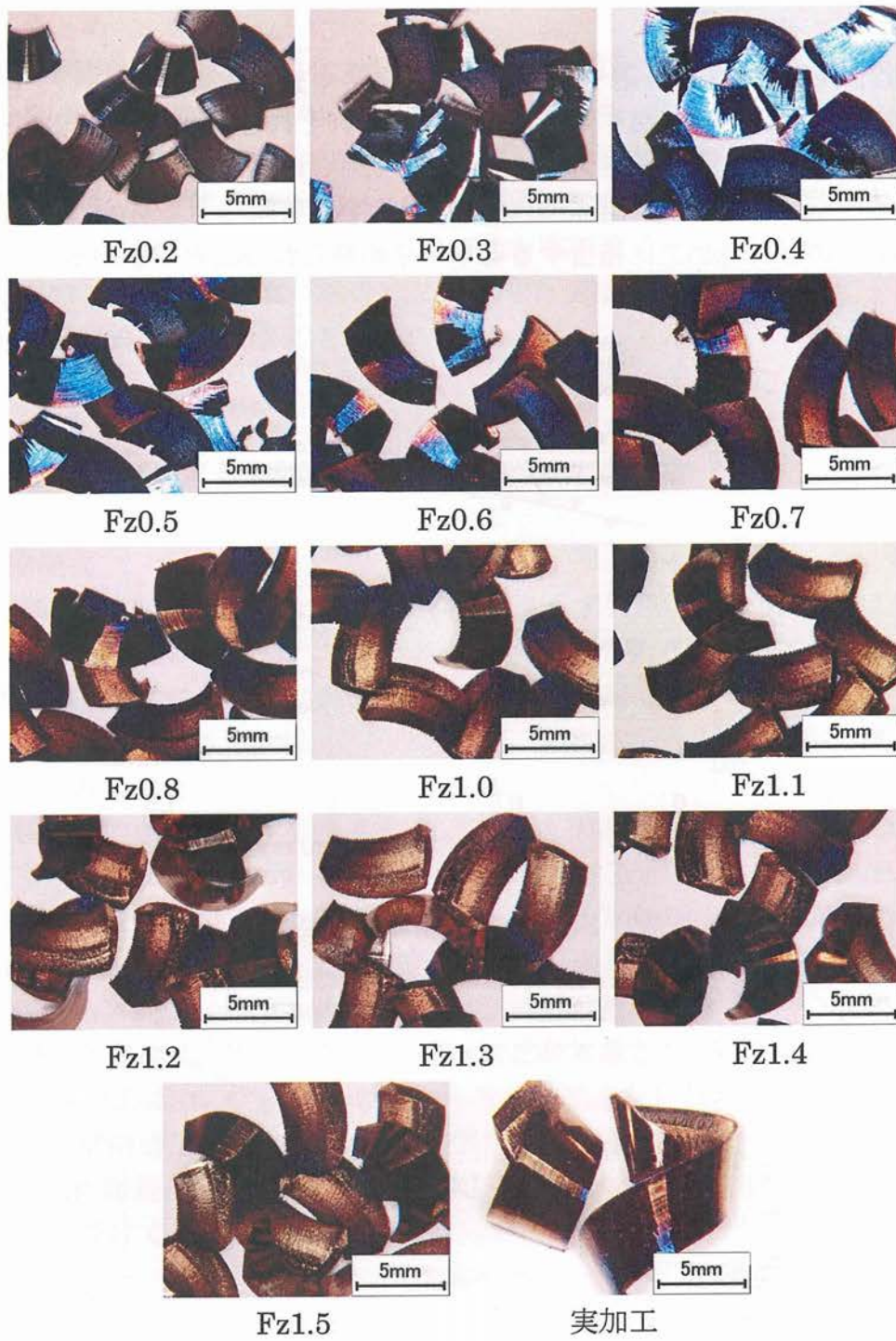


Fig.6.51 切りくずの写真

(ii) 切りくず形状

図 6.52 及び図 6.53 に各送り値で得られた切りくずの幅と厚さを示す. 図中の破線は実加工で得られた切りくずの幅と厚さそれぞれを小型工具との大きさの比で換算した値 (0.57 倍) を示す. 切りくず形状は切削条件や工具の形状などによってさまざまに変化するため単純に形状で比較はできないが, 送り値が 0.8mm/rev のとき実加工に相当する切りくずが得られることがわかる.

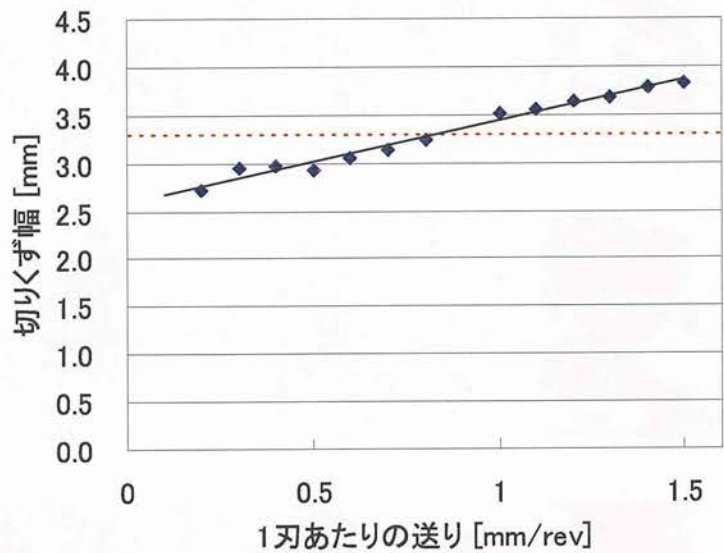


Fig.6.52 切りくずの幅

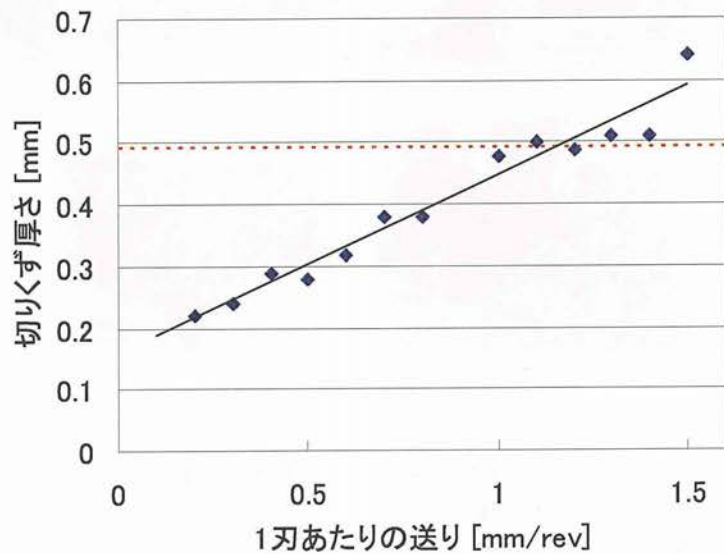


Fig.6.53 切りくずの厚さ

(iii) まとめ

実加工で使用している工具に対し、実験で使用した工具は 0.57 倍の大きさである。そのため、工具寸法の比に合わせた切削条件、切り込み 0.57mm、送り 0.8mm/rev で実加工を再現できるかを検証した。実験によって得られた切りくずの発色から、送り値 0.8mm/rev において実加工と同様の発熱形態であることがわかった。また、送り値 0.8mm/rev で最も実加工に近い切りくず形状となった。以上のことから、工具寸法の比に合わせた切削条件で加工することにより実加工を相似的に再現できると考えられる。

6.3.4 窒素切削による工具摩耗低減効果についての実験

(1) 実験概要

前項の再現実験では、切りくず形状及び切りくず発色状況より、実加工の再現が出来ていることが確認された。それを受けて、本項では窒素ブロー加工の工具摩耗低減効果について切削実験を行い検証した。

(2) 実験方法

本実験で用いた切削条件を表 6.12 に示す。1 刃あたりの送りを前項の実験によって得られた 0.8mm/rev とし、切削速度を実加工と同じ 193.5mm/min、軸方向の切込みを工具寸法の比による 0.57mm、径方向の切込みは実験効率を考慮して 10mm とした。使用した被削材は実加工と同種の金型材の SD18T で大きさは 200mm×200mm×80mm の直方体を使用した。窒素ブロー加工による効果を検証するために、表 6.13 に示すように比較対象として実加工と同じ環境である大気中加工についても同様の切削条件で実験を行い加工特性の違いについて調べた。切削終了後に表 6.14 に示す項目の測定を行った。

また、切削距離については、実加工で工具寿命が 40 分(切削距離約 200m)であることを受けて、240m まで切削を行った。

Table6.12 切削条件

切削条件	実加工	実験
切削速度 [m/min]	193.5	
主軸回転数 [rpm]	770	3080
工具径 [mm]	80	20
刃数	5	2
テーブル送り [mm/min]	5500	4928
1刃あたりの送り [mm/rev]	1.4	0.8
切込み(径方向) [mm]	56	10
切込み(軸方向) [mm]	1	0.57
切削距離 [m]	200(40min)	240(48min)
被削材	SD18T	

Table6.13 測定項目

使用機器	測定項目	
光学顕微鏡	工具摩耗	すくい面摩耗
		逃げ面摩耗
表面粗さ計	仕上げ面粗さ	
放射温度計	切削点近傍温度	
CCD カメラ	動画撮影	

Table6.14 加工環境

	大気中加工	窒素ブロー加工
流量 [L/min]	—	383
供給方法	—	センタースルー

(3) 実験結果

(i) 工具

図 6.54 及び図 6.55 に新品工具及び切削距離 240m での工具すくい面と逃げ面の写真を示す。これらは加工を施した後の同位置、同倍率のものである。本実験で使用した工具は 2 枚刃であるため、それぞれ刃 1、刃 2 として区別し、図中の Dry は大気中加工、同様に N₂ は窒素ブロー加工で使用した工具であることを示す。

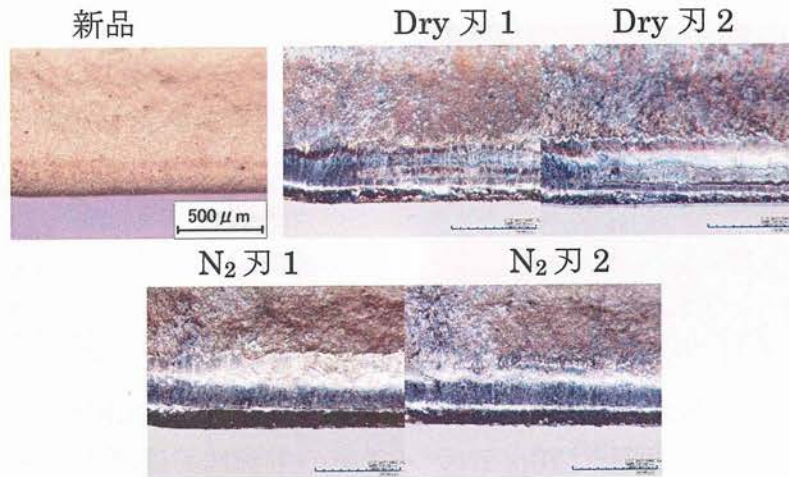


Fig.6.54 切削距離 240m での工具すくい面摩耗

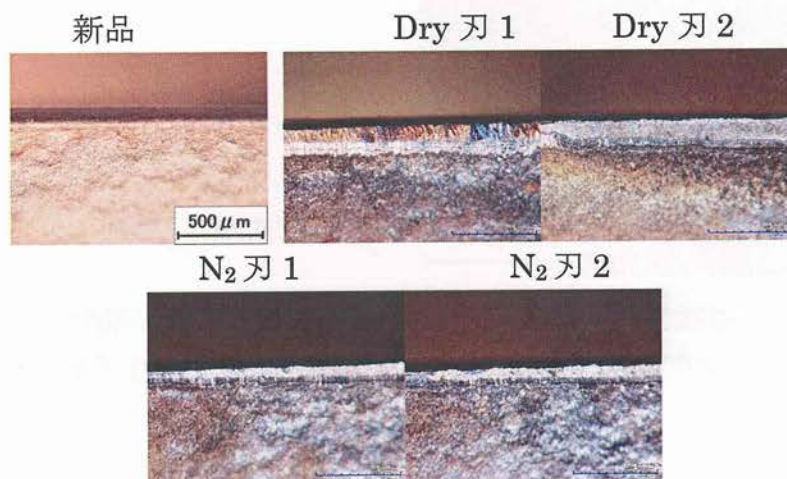
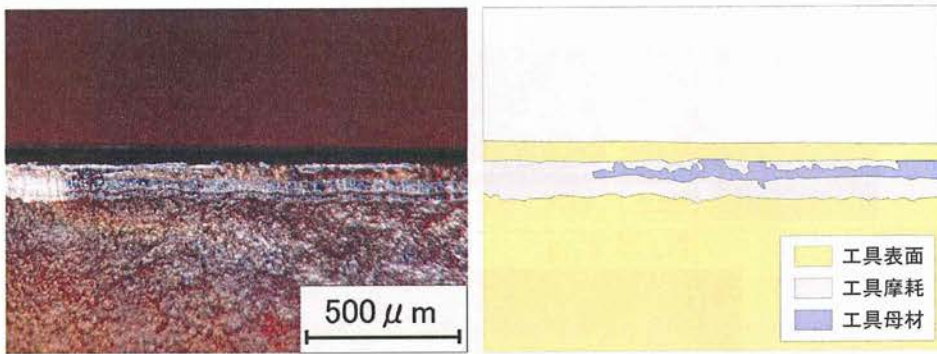


Fig.6.55 切削距離 240m での工具逃げ面摩耗

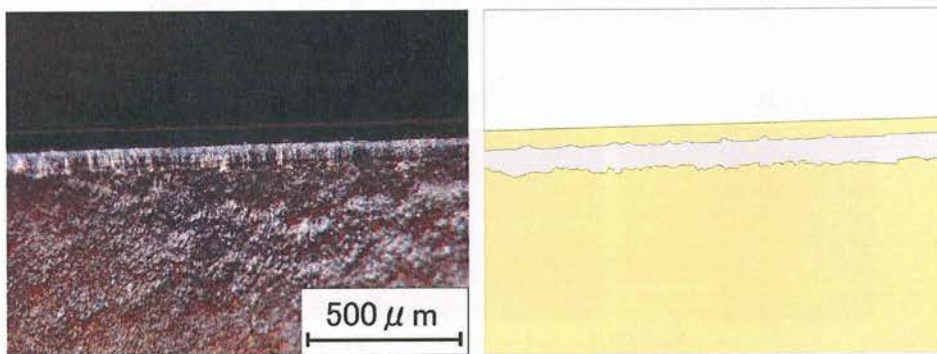
大気中加工では切削距離の増加とともに工具摩耗が進み、切削距離 240m において主切れ刃逃げ面摩耗幅の刃 1 と刃 2 の平均値は $195\mu\text{m}$ となった。一方、窒素ブロー加工では大気中加工よりも摩耗幅は小さく、 $99\mu\text{m}$ と約半分の値となった。使用工具は 3 層のコーティングが施されており、図 6.56 に示すように大気中加工では切削距離 120m で工具母材が現れ始めるが、図 6.57 に示す窒素ブロー加工では切削距離 200m になってから母材が現れ始めた。以上のことから、窒素ブロー加工は大気中加工よりも工具摩耗を低減できると考えられる。



顕微鏡写真

工具摩耗概略図

Fig.6.56 切削距離 120m Dry 刃 2 での主切れ刃逃げ面摩耗幅



顕微鏡写真

工具摩耗概略図

Fig.6.57 切削距離 120m N2 刃 1 での主切れ刃の逃げ面摩耗幅

(ii) 温度

切削時の加工点近傍温度を放射温度計にて測定した結果を図 6.58 に示す。平均温度において、大気中加工と窒素ブローとで約 50°Cの差が現れた。窒素を吹き付けながら加工をすることで気体の吹き付けによる工具冷却の効果と酸化による酸化熱の発生を抑制する効果を同時に得られたためではないかと考えられる。

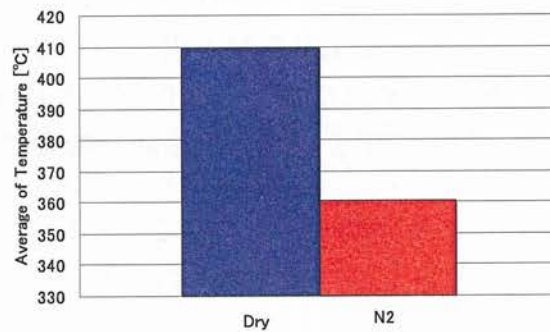


Fig.6.58 各環境における加工点近傍温度の平均値

(iii) 仕上げ面粗さ

切削距離と仕上げ面粗さとの関係を図 6.59 に示す。また、図 6.60 に粗さの平均値を示す。切削距離が増すにつれて、大気中加工と比べ窒素ブロー加工における仕上げ面粗さのほうが高い値となっていくことが読み取れる。しかし、加工初期においては必ずしも窒素ブロー加工の粗さのほうが高い値をとるとは限らず、平均値を見ると加工法の違いによる加工面粗さへの影響はほぼ大差ないものと考えられる。

しかし、従来は窒素環境下での加工は凝着が起こりやすいなどの問題があり仕上げ面がある傾向にあったことを考慮すると、高い送り値を与えることによってその問題を解決し、大気中加工と同等の仕上げ面が得られる可能性があるといえる。

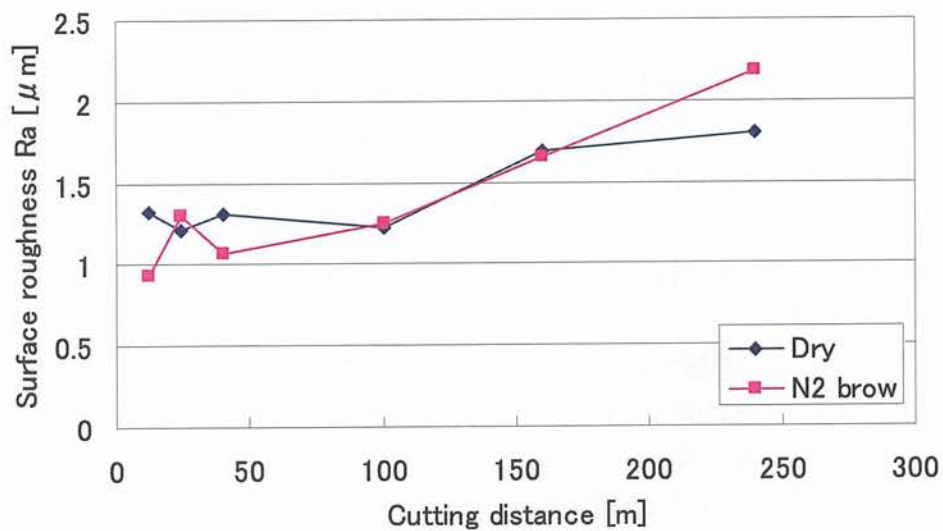


Fig.6.59 算術平均粗さ

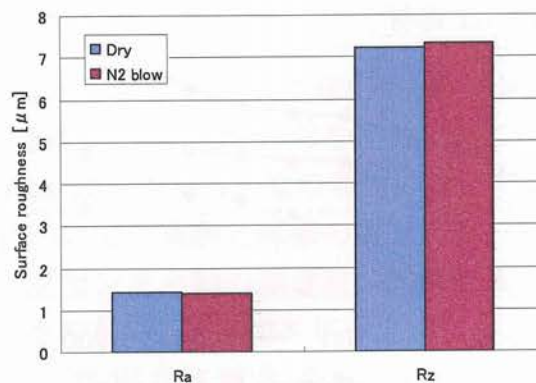


Fig.6.60 粗さの平均値

(iv) まとめ

小型工具で実加工条件を相似的に再現した実験において、窒素ブロー加工による工具摩耗低減効果についての検証を行った。

図 6.61 及び図 6.62 に各切削距離における工具主切れ刃、副切れ刃での工具逃げ面摩耗幅を示す。ここでの摩耗幅は 2 つの切れ刃における摩耗幅の平均値とした。大気中加工では主切れ刃、副切れ刃ともに切削距離の増加にしたがい工具摩耗が進行し、摩耗幅は大きくなる。切削距離 240m の主切れ刃逃げ面摩耗において、大気中加工では工具摩耗が鋼の一般的な工具寿命にあたる約 $200\mu\text{m}$ となる。これは実加工において約 40 分(200m)で寿命となるのに一致する。一方、窒素ブロー加工では約 $100\mu\text{m}$ となり工具摩耗の低減効果が確認できた。初期摩耗はどちらも同様に進行しているが切削距離が増すにつれて摩耗幅の差は大きくなり、大気中加工において工具母材が現れた後に摩耗の進行が加速し摩耗幅の差がより大きなものとなった。

また、加工点近傍の温度は、大気中加工よりも窒素ブロー加工のほうが低い値となった。これは窒素を吹き付けながら加工を行うことにより切削点近傍を冷却する効果が得られたためと考えられる。この温度差が摩耗に現れたと考えられる。ただし、エアブロー加工との比較では温度の違いは見られなかった。酸化を抑える効果が吹き付けの冷却の効果に比べて小さすぎたのでわからなかったと考えられる。

以上のことから、窒素ブロー加工によって温度上昇を抑制し、工具摩耗を低減することができ、摩耗幅という観点から工具寿命の約 2 倍の増加が確認できたものであるといえる。

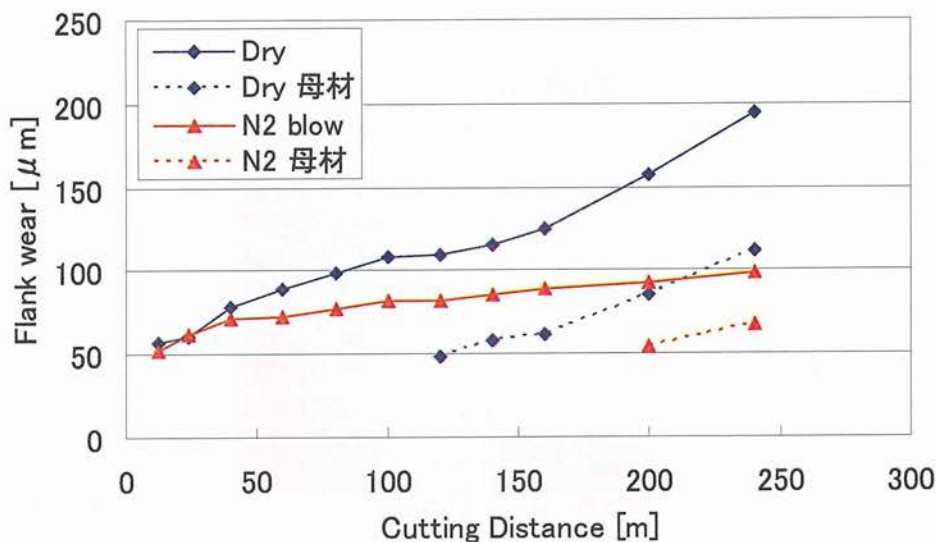


Fig.6.61 各切削距離における主切れ刃での工具摩耗幅

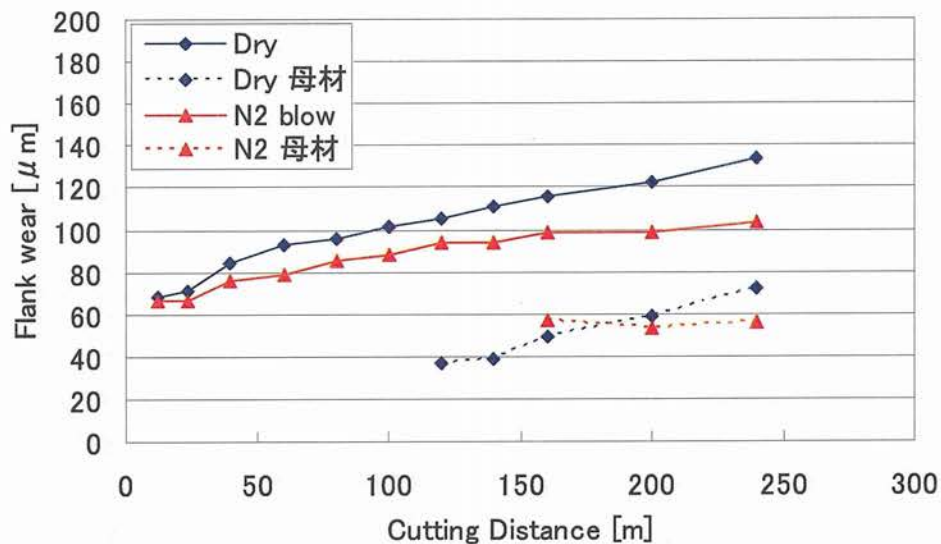


Fig.6.62 各切削距離における副切れ刃での工具摩耗幅

6.3.5 より厳しい切削条件での加工実験

(1) 実験概要

前項の結果から、窒素ブロー加工を用いることで大気中加工と比べ約2倍の工具寿命を得られることがわかった。また、昨年までの研究によって窒素環境下での加工は高送り条件において良好な結果が得られることがわかっている。このことから、窒素ブロー加工によってさらに高い送り条件で工具寿命低減が可能となれば、より生産時間の短縮が可能となると考えられる。そこで、本項では、前項の約2倍の送り値による切削実験を行い、窒素ブロー加工による更なる生産性の向上を図った。

(2) 実験方法

本実験で用いた切削条件を表 6.15 に示す。1刃あたりの送り値を前項 0.8mm/rev と比べ加工時間がほぼ半分となる 1.5mm/rev とした。これは実加工条件において 2.4mm/rev に相当する。他の条件については前項の窒素切削による工具摩耗低減効果についての実験と同様の値とした。ただし、前節と同様の加工方向ではマシニングセンタ主軸の加速度の問題により一定のテーブル送りでの加工ができない。そのため、図 6.63 に示す加工方向を用いるものとする。使用した被削材についても前章に続き 200mm×200mm×80mm の金型材 SD18T を使用した。また、窒素ブロー加工による効果を検証するために、表 6.16 に示すように比較対象として大気中加工、エアブロー加工についても同様の切

削条件で実験を行い加工特性の違いについて調べた。切削終了後に表 6.17 に示す項目の測定を行った。

Table6.15 切削条件

切削条件	実加工	実験
切削速度 [m/min]	193.5	
主軸回転数 [rpm]	770	3080
工具径 [mm]	80	20
刃数	5	2
テーブル送り [mm/min]	5500	9240
1 刃あたりの送り [mm/rev]	1.4	1.5
切込み(径方向) [mm]	56	10
切込み(軸方向) [mm]	1	0.57
切削距離 [m]	200(40min)	200(40min)
被削材	SD18T	

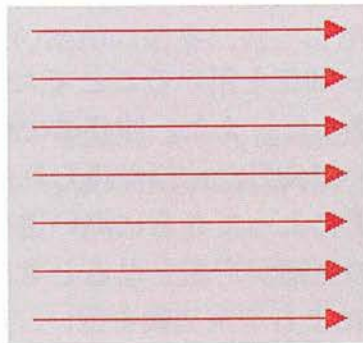


Fig6.63 加工方向

Table6.16 測定項目

使用機器	測定項目	
光学顕微鏡	工具摩耗	すくい面摩耗
		逃げ面摩耗
表面粗さ計	仕上げ面粗さ	
放射温度計	切削点近傍温度	
CCD カメラ	動画撮影	

Table6.17 加工環境

	大気中加工	エアブロー加工	窒素ブロー加工
流量 [L/min]	—	125	125
供給方法	—	センタースルー	

(3) 実験結果

(i) 工具

図 6.64 及び図 6.65 に切削距離 200m における工具すくい面と逃げ面の写真を示す。4.2 項と同様、本実験で使用した工具は 2 枚刃であるためそれぞれ刃 1, 刃 2 として区別し、図中の Dry は大気中加工, Air はエアブロー加工, N₂ は窒素ブロー加工で使用した工具であることを示す。

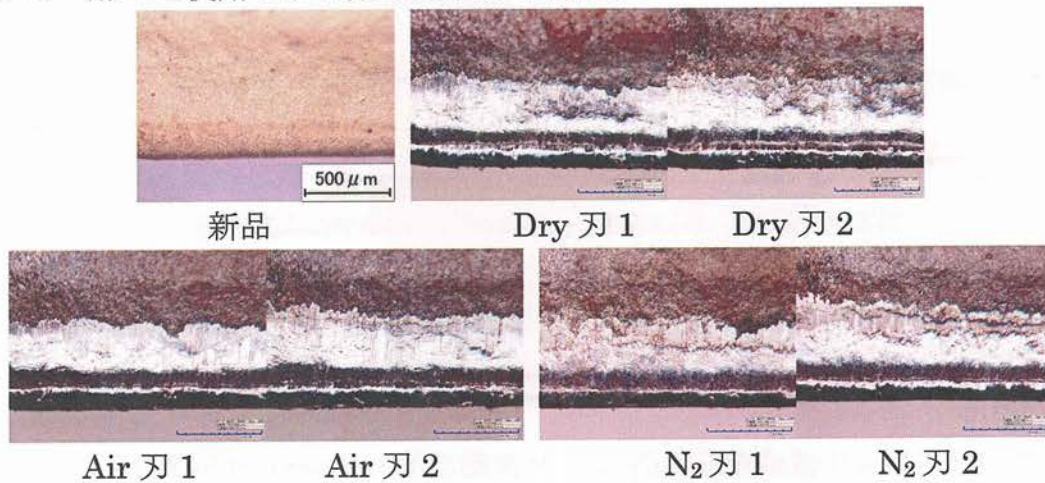


Fig.6.64 切削距離 200m での工具すくい面摩耗

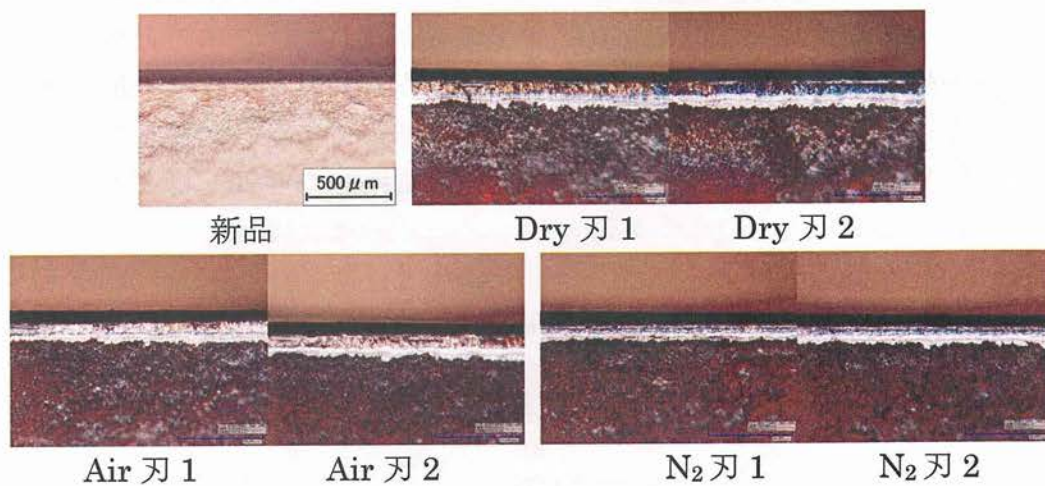


Fig.6.65 切削距離 200m での工具逃げ面摩耗

摩耗幅は大気中加工よりも窒素ブロー加工のほうが少ない結果となった。大気中加工では切削距離 120m くらいから工具母材が現れ始めるが、窒素ブロー加工では母材が確認できなかった。

摩耗の進行については大気中加工では切削距離の増加とともに工具摩耗が進み、切削距離 200m において主切れ刃の逃げ面摩耗幅の平均値は $152\mu\text{m}$ となった。また、エアブロー加工では $128\mu\text{m}$ となった。一方、窒素ブロー加工での摩耗幅は大気中加工、エアブロー加工よりもさらに小さく $99\mu\text{m}$ となった。図 6.66 の逃げ面摩耗幅概略図に示すように大気中加工、エアブロー加工では切削距離 200m において工具母材が現れているが、窒素ブロー加工では切削距離 200m になっても工具母材は確認できなかった。

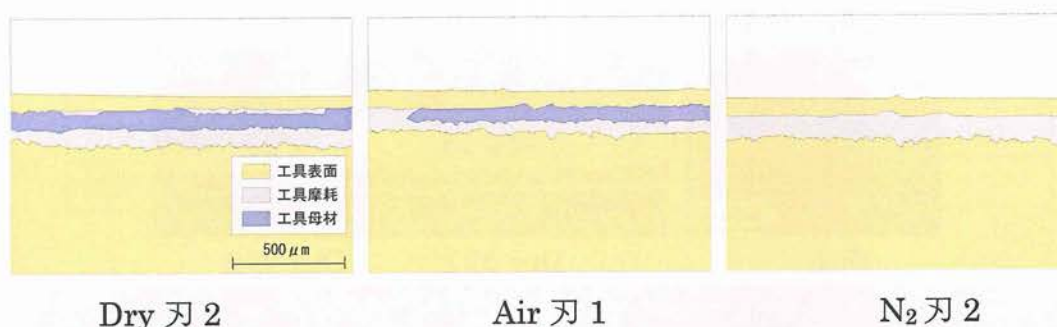


Fig.6.66 切削距離 200m 各加工法における主切れ刃の逃げ面摩耗幅概略図

(ii) 温度

1 刃あたりの送り値が 0.8mm/rev のとき及び 1.5mm/rev のときの各加工法での加工点における平均温度を図 6.67 に示す。どちらの送り値においても大気中加工の温度がもっとも大きな値となったが、送り値 0.8mm/rev とは異なりエアブロー加工と窒素ブロー加工に約 10°C の温度差が現れた。このことから、送り値 0.8mm/rev は窒素ブロー加工の酸化抑制効果が得られるには低い加工条件であったと考えられる。また、送り値が約 2 倍の増加であるのに対して温度の増加量は 2 倍とはならず、エア、窒素ブロー加工ともに約 20°C ほどの増加にとどまる結果となった。

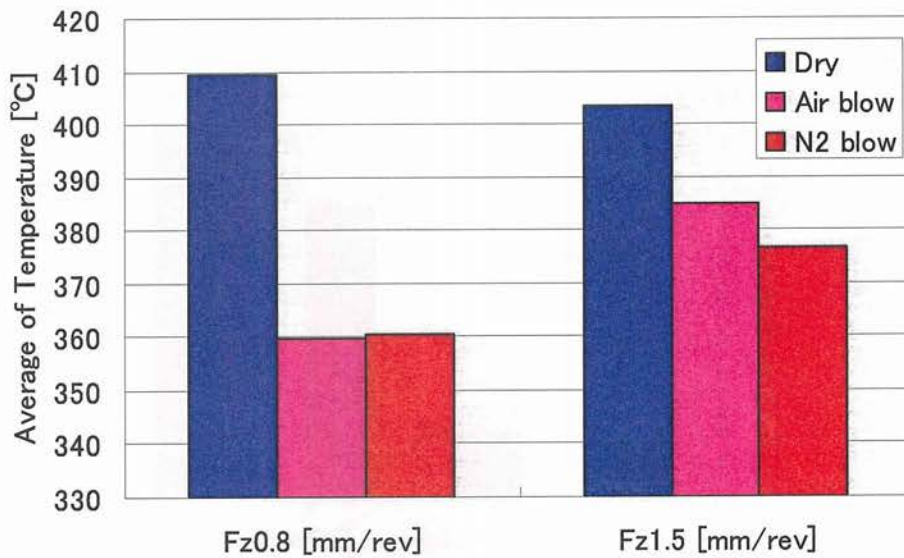


Fig.6.67 平均温度

(iii)仕上げ面粗さ

1 刃あたりの送り 1.5mm/rev での各加工方法における切削距離と仕上げ面粗さとの関係を図 6.68 に示す。また、送り値 0.8mm/rev 及び 1.5mm/rev での各加工法における仕上げ面粗さの平均値を図.2.25 に示す。これらの図から、切削距離と仕上げ面粗さとの関連性、及び加工法の違いによる仕上げ面粗さへの影響は確認できなかった。

しかし、図 6.69 を見ると、送り値が約 2 倍になっていることに対して仕上げ面粗さの増加はそれほど大きくはないことがわかる。特に Ra においてその違いは約 $0.3\mu\text{m}$ とほぼ変わらない値であるといえる。

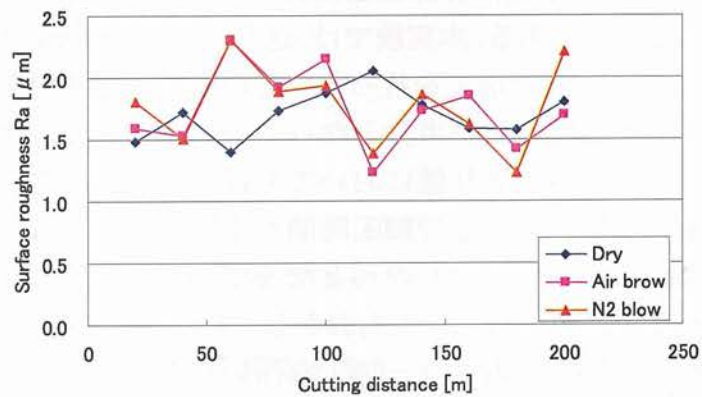


Fig.6.68 算術平均粗さ

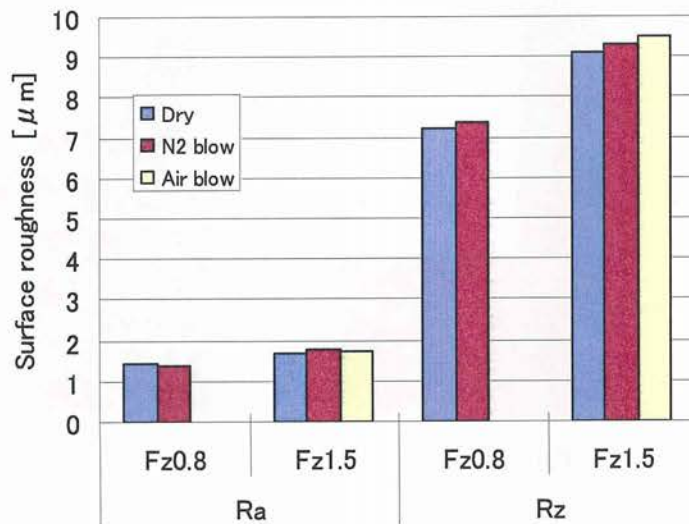


Fig.6.69 粗さの平均値

(iv)まとめ

実加工条件よりも高い送り値において、窒素ブロー加工による生産率の向上効果についての検証を行った。

図 6.70 は各送り値、各加工法における工具摩耗幅を切削距離で示したものである。ここでの摩耗幅は 2 つの切れ刃における摩耗幅の平均値とした。主切れ刃において、摩耗幅は大気中加工が最も大きく、ついでエアブロー加工、窒素ブロー加工の順に小さな値をとっている。また、副切れ刃においても同様に大気中加工法での摩耗幅が最も大きく、エアブロー加工、窒素ブロー加工の順に小さくなってゆく。

また、図 6.71 は各送り値、各加工法における工具摩耗幅の進行を切削時間の観点からまとめたものである。本実験では、送り値 0.8mm/rev では 240m まで、1.5mm/rev では 200m まで加工を行った。そのため、送り値を約 2 倍にしたことで加工終了までの切削時間が半分となっている。ここで、加工終了時の摩耗幅に着目すると、どちらの送り値においてもほぼ同等の値となっていることがわかる。送り値を倍にすることで加工時間が半減することは当然のことであるのだが、切削条件がより厳しいものへとなっているため同じ距離削ったならば工具摩耗は同等以上に進行していてもおかしくはない。つまり、約 2 倍の 1 刃あたりの送り値において窒素ブロー加工を用いることによって、現場で用いられている実加工条件での大気中加工と比べ半分の時間で倍の距離を削ることができるようになる。

さらに、仕上げ面粗さの数値には現れなかったが、図 6.72 に示すように見た目に明らかな差異が生じた。

以上のことから、窒素ブロー加工によって実加工よりも高い送り値となる厳しい条件での切削においても温度上昇を抑制し、工具摩耗を低減することができるため、生産性を向上し、工具寿命を増加させられると結論付けることができる。

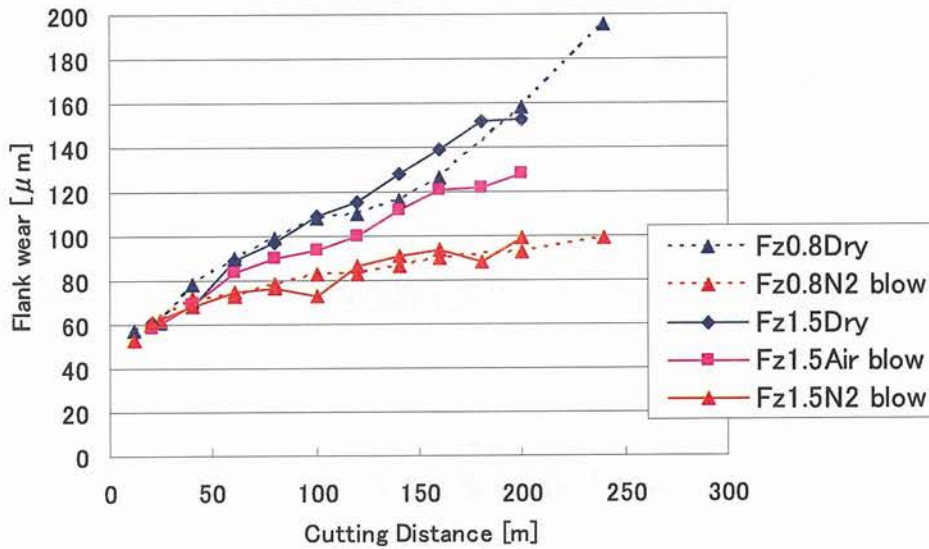


Fig.6.70 切削距離に対する主切れ刃の逃げ面摩耗

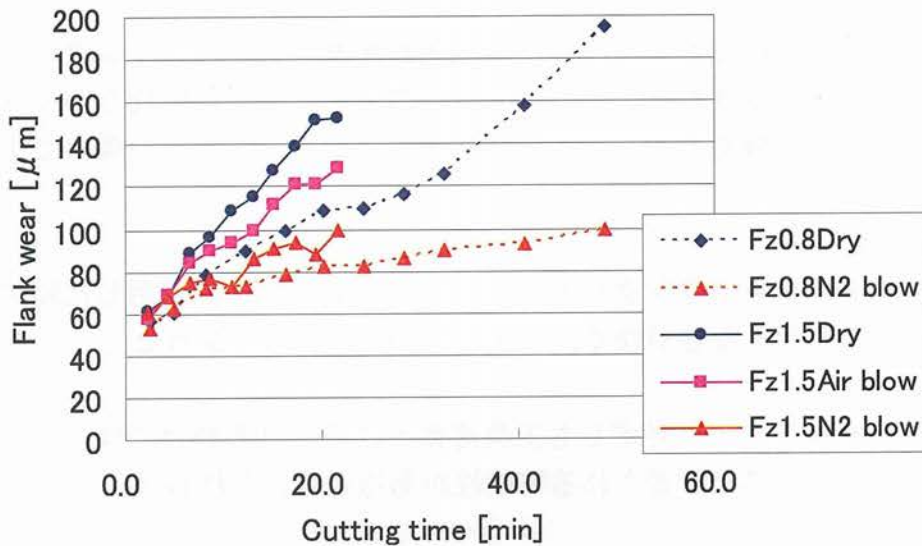
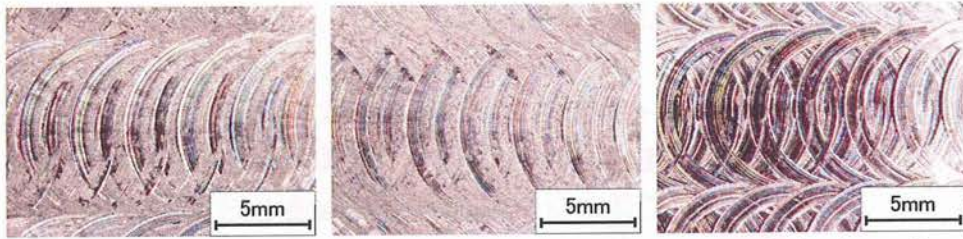


Fig.6.71 切削時間に対する主切れ刃の逃げ面摩耗



大気中加工

エアブロー加工

窒素ブロー加工

Fig.6.72 各加工法における切削距離 200m Fz1.5mm/rev での仕上げ面の様子

6.4 結言

窒素ブロー加工を用いたクランクシャフト材の断続旋削加工において次の結果が得られた。

- ・超硬工具では、工具摩耗の低減が確認できた。
- ・サーメット工具では、切削点近傍温度で約 40℃の温度低減が確認でき、それにより横逃げ面境界摩耗で約 80%の大幅な低減が確認できた。
- ・コーティング超硬工具では、チップの耐熱衝撃性や耐摩耗性が優れていたため、今回の切削条件では切削点近傍温度は低い値となり、工具摩耗もあまり進行しなかった。しかし、超硬やサーメットの結果を受け、さらに厳しい条件でより効果的だと考えられる。
- ・窒素ブロー加工をクランクシャフト材の断続旋削加工に適用した結果、工具摩耗は大気中加工と大きな差がなく、大きな改善は見られなかった。
- ・窒素ブロー加工により必ずしも工具寿命が改善されるわけではなく、工具種により窒素ブローの効果が影響される可能性があると考えられる。

以上より、クランクシャフト材の窒素ブロー加工に対しては、更なる検討が必要であると考えられる。

金型材の高送りミーリング加工の実験によって以下の結果を得られた.

- ・窒素ブロー加工を用いることによって、実加工と同条件の加工において工具寿命を約2倍に改善することが出来た.
- ・窒素ブロー加工を用いることで、送り値を約2倍にして加工することが可能となり、加工時間の短縮ができた.

このことにより、窒素ブローのバンパーミーリング加工への適用により、生産時間短縮とコスト削減が可能となることから、生産性の向上が可能となるという結果を得た.

第7章 窒素援用 MQL 加工の可能性

7.1 緒言

第2章で述べたように環境対応型加工技術の必要性より、現在切削加工では切削油の使用を極力抑えたMQL加工が注目されている。MQL加工法の代表格であるミスト加工では、切削時に切削液による潤滑効果を得ることが出来るが、油剤の供給量が少量であるために冷却性が不足するという構造的問題を抱えている。また一方で、前章までに述べたように、窒素ガス中で切削を行う事により加工時の酸化発熱を抑制し、切削温度低減や工具寿命改善が可能となることが明確となった。しかしながら、この窒素切削は前章までで明らかとなった加工条件においては効果を示すが、完全ドライ加工であることから、構造的に潤滑要素の欠如という問題を内在しているといえる。そこで、本項では上記の加工法を複合化することによって、それぞれの欠点を補完できるものでないかと考え、窒素ガスを用いて油ミストを生成し、従来のミスト加工で生じる問題の改善を図った。

7.2 実験装置

本研究に用いたミスト発生装置は扶桑精機製セミドライ式給油冷却機マジックカットeーミストである。通常ミスト加工ではコンプレッサーからの圧縮空気を用いてミストを発生させるが、本実験では窒素ポンベから供給される窒素ガスを用いて油ミストを発生させた。また、油ミスト供給は工具すくい面側から行うものとした。今回使用した装置の概観図を図6.1に示す。

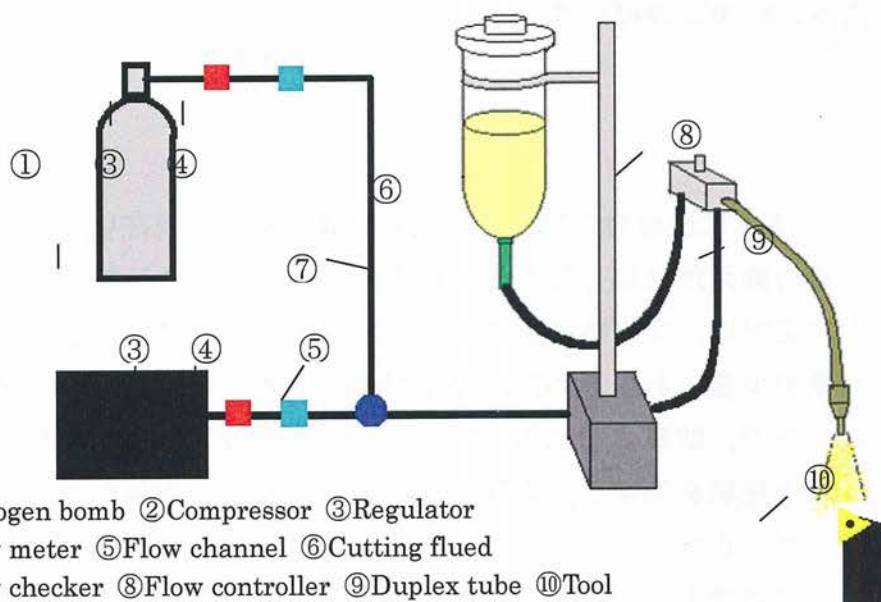


Fig.6.1 実験装置外略図

7.3 実験条件

本研究では超硬工具とサーメット工具を用いた連続旋削を行い窒素ガス併用油ミスト加工（以下窒素・ミスト併用加工と略）の効果について検証を行った。比較対象は完全ドライ加工（以下大気中加工）、窒素ブロー加工、エアを用いて油ミストを生成した油ミスト加工（以下ミスト加工）である。なお、実験に用いた切削液はフジBC技研(株)製不水溶性植物油 bluebe LB-1 である。加工条件を表1及び表2に示す。

Table1 切削条件

Cutting speed [m/min]	200	
Feed [mm/rev]	0.2	
Depth of cut [mm]	1	
Work piece	S45C [Continuous cutting]	
Tool type	Cemented carbide	Cermet

Table2 切削油剤供給条件

	Dry	Oil Mist	Oil-N ₂ Mist	N ₂ blow
Gas flow rate[l/min]	-	25		
Oil flow rate [cc/h]	20			
Cutting fluid	Water-immiscible cutting fluid			

7.4 実験結果及び考察

超硬工具及びサーメット工具を用いて切削を行ったときの加工の様子をそれぞれ図 6.2 及び図 6.3 に示す。図より、今回使用した双方の工具共に、大気中加工とミスト加工において激しく火花が発生していることがわかる。しかしながら、窒素・ミスト併用加工では加工中に火花は発生しなかった。また、図 6.4 と図 6.5 は切削点近傍温度の測定結果である。図より、ミスト加工では、潤滑性が確保され摩擦発熱を抑えことによって大気中加工に比べ超硬工具で約 40℃、サーメット工具では約 50℃の温度低減が確認された。一方、窒素ガスのみを吹き付けた窒素ブロー加工では、酸化発熱抑制により大気中加工に比べ約 20℃（超硬）と約 50℃（サーメット）の温度低減が確認された。そして、それら双方を兼ね備えた窒素・ミスト併用加工においては、超硬工具ではミスト加工同等、サーメット工具においてはミスト加工よりもさらに低い値を示す結果となった。

一方で、窒素ブローによる火花の抑制効果については前節において既述の通りであるが、本実験においてミスト加工で火花の抑制は見られないことが確認されたことより、加工中の火花の抑制をするためには温度の低減のみでは改善されないことが考えられる。

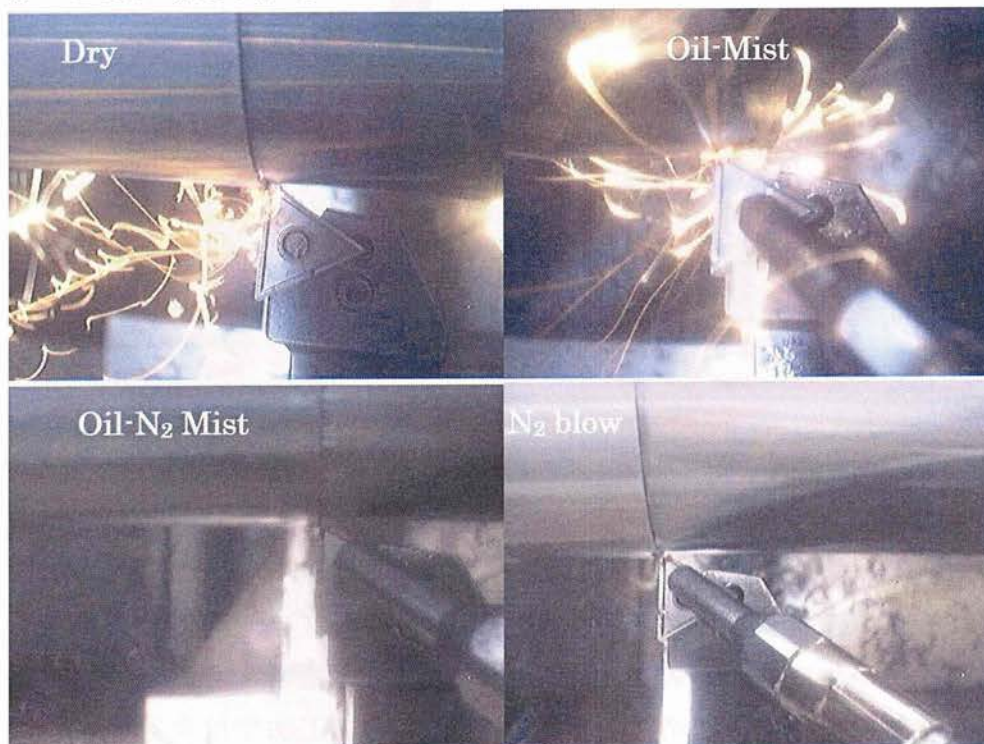


Fig. 6.2 超硬工具による切削中の様子

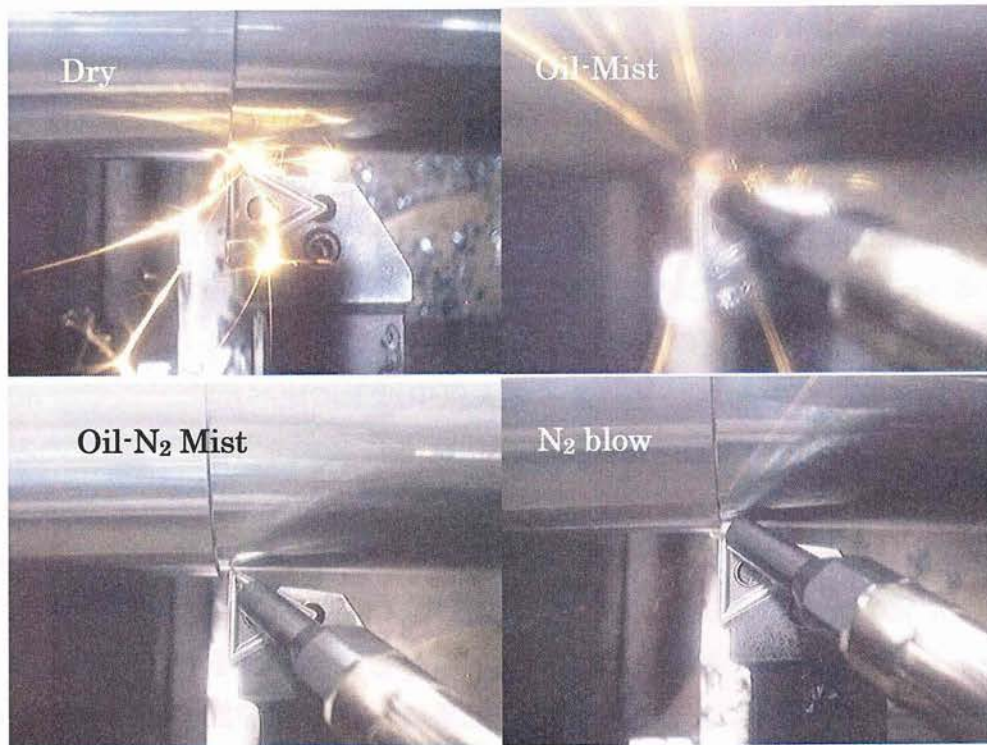


Fig. 6.3 サーマット工具を用いた切削中の様子

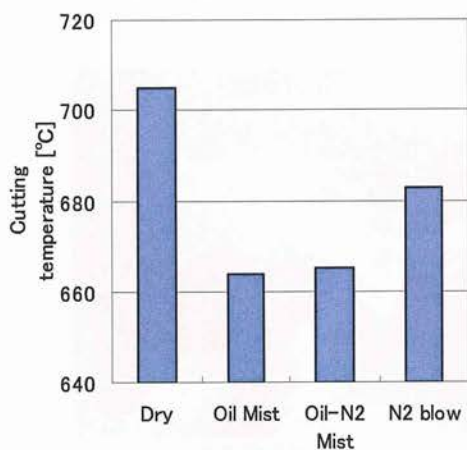


Fig. 6.4 切削点近傍温度（超硬工具）

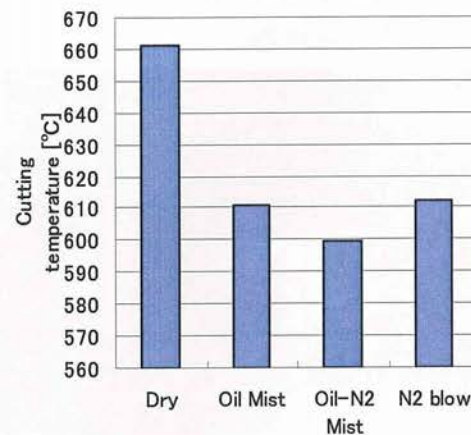


Fig. 6.5 切削点近傍温度（サーメット工具）

また、図 6.6 はサーメット工具による切削時の切り屑の様子であるが、図から見て取れるように乾式切削である大気中加工，窒素ブロー加工では細かく分断された切り屑が生成されるのに対し，ミスト加工と窒素・ミスト併用加工では連続型の切り屑を得た．このことから，両ミスト加工法では今回の実験条件である油供給量 20cc/h でも切削時に潤滑効果が確保されていることがわかる．

さらに，超硬工具における切削距離と工具摩耗の関係を図 6.7～図 6.9 に示す．

工具摩耗は図 6.9 のように横逃げ面境界摩耗幅が切削距離の進行と共に顕著に増加し、大気中加工では切削距離約 4km で工具寿命と判断する結果となった。一方ミスト加工では大気中加工よりも少ない摩耗値をとったが、切削距離 5km で欠損した。それに比べ、窒素・ミスト併用加工では切削距離 5km まで加工を行っても欠損等は生じず、摩耗値も低い値となった。このような結果は図 6.10～図 6.12 に

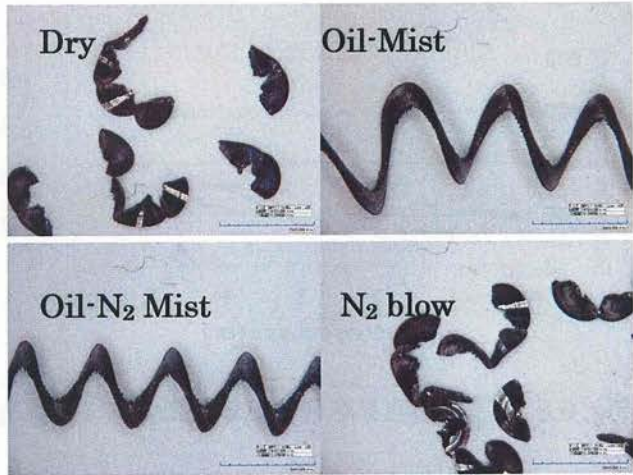


Fig.6.6 切りくず (サーメット工具)

示すサーメット工具での実験結果でも同様となり、サーメット工具では先端摩耗と前逃げ面摩耗共に窒素・ミスト併用加工がミスト加工以下の工具摩耗量を記録した。しかしながら、窒素・ミスト併用加工では図 6.12 のように横逃げ面に多少の凝着も確認された。

また一方で、これまでに窒素ガスのみを用いて切削を行うと仕上げ面粗さが粗くなる事が報告されているが²⁾、図 6.13 からわかるように窒素・ミスト併用加工の仕上げ面は他の条件同等もしくはそれ以上の良好な仕上げ面を得た。これは窒素・ミスト併用加工においては切削液が十分潤滑要素として働いた結果であると考えられる。

以上の実験結果より、窒素・ミスト併用加工ではミスト加工による潤滑効果を保ちつつ、窒素ガス援用によりミスト加工以上の冷却効果とそれに伴う工具摩耗の低減が可能であると考察できる。

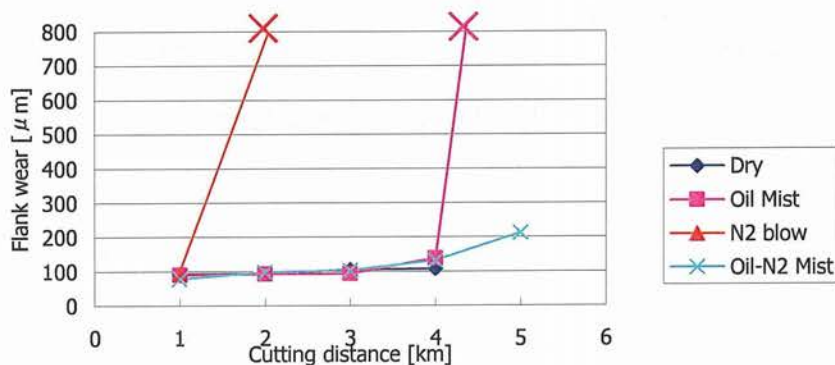


Fig. 6.7 逃げ面摩耗幅 (超硬工具)

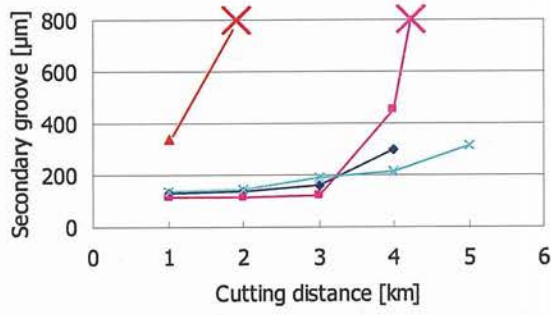


Fig. 6.8 前逃げ面境界摩耗幅 (超硬工具)

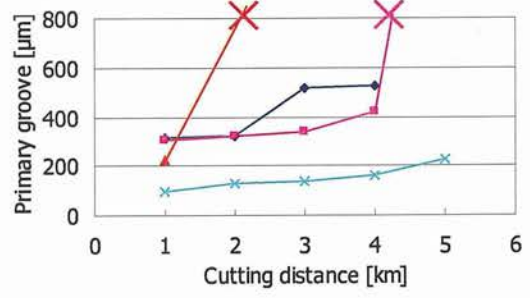


Fig. 6.9 横逃げ面境界摩耗幅 (超硬工具)

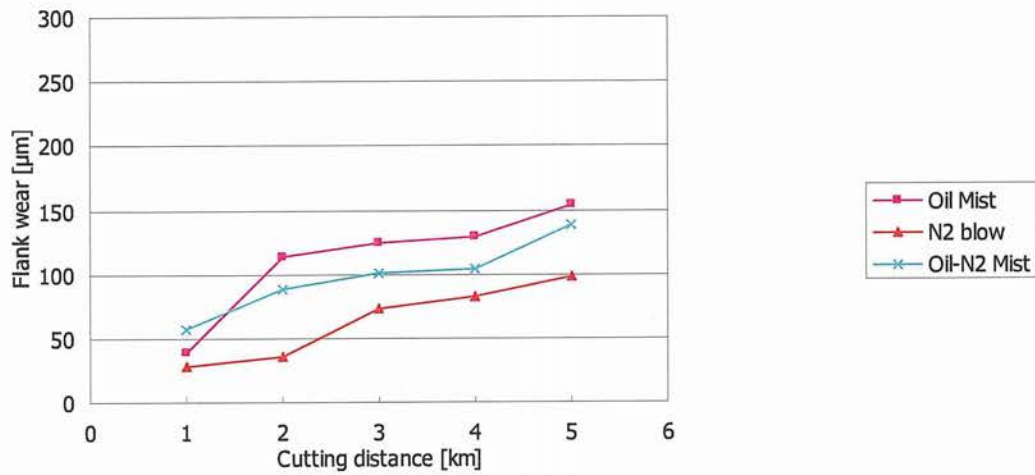


Fig. 6.10 逃げ面摩耗幅 (サーメット工具)

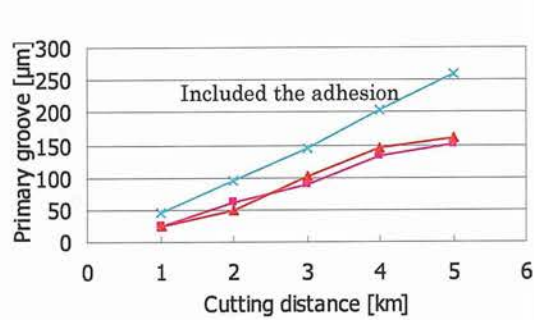


Fig. 6.11 前逃げ面境界摩耗幅 (サーメット工具)

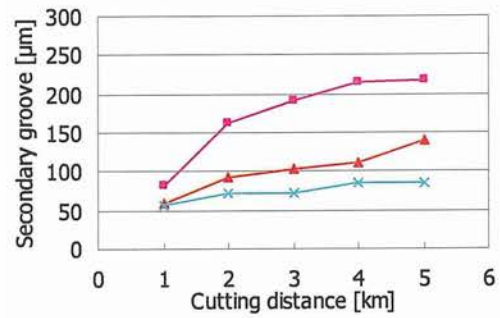


Fig. 6.12 横逃げ面強化摩耗幅 (サーメット工具)

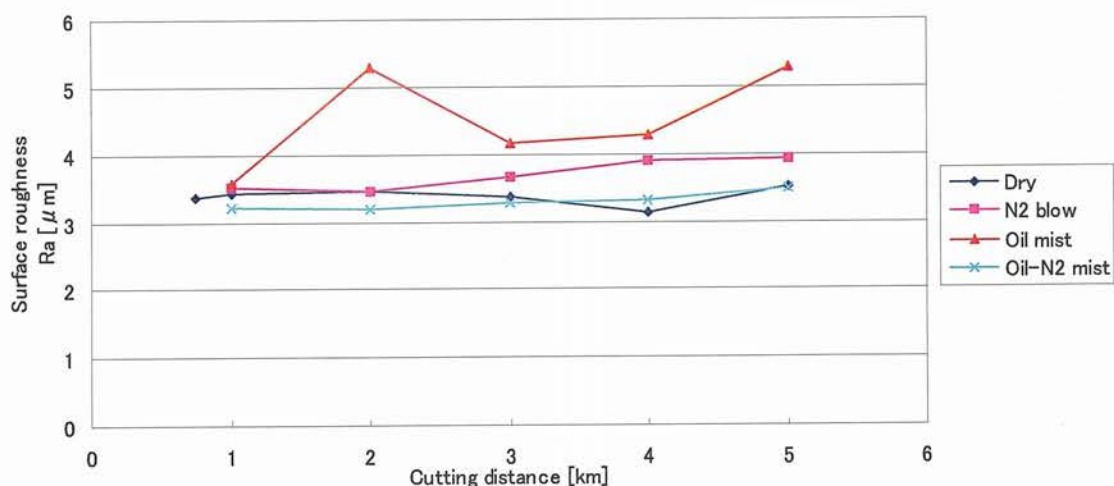


Fig.6.13. 仕上げ面粗さ Ra (超硬工具)

7.5 結言

今回、ミスト加工に窒素ガスを併用する窒素・ミスト併用加工法の効果について検証した結果、ミスト加工に比べ以下のような結果を得た。

- ・ 窒素・ミスト併用加工では切削温度の低減が可能ある。
- ・ 窒素ガスを用いても窒素・ミスト併用加工では確かな潤滑効果を確保出来る。
- ・ 窒素・ミスト併用加工により工具摩耗の低減が可能である。

以上のことから、窒素援用ミスト加工は従来のミスト加工における冷却不足の問題を改善でき、これによる工具摩耗の低減が確認された。このことから、ミストを用いた旋削加工や、ドリルによる深穴加工への応用が考えられる。

第8章 結論

本研究では、切削時の酸化発熱に着目し、窒素ガスを用いた切削加工を行ってきた。

窒素中切削では、従来工具に激しい凝着が生じてしまう問題が生じてきた。この凝着が工具の欠損や摩耗の進行など、工具寿命を著しく低下させてしまうことから、第4章において窒素雰囲気中切削で生じる凝着問題の解決を図った。その結果工具材種や切削条件、切削形態の改善によってこの問題の解決が可能となった。これによって窒素雰囲気中切削における切削温度低減とそれに伴う工具摩耗の低減が可能となった。また、高速・高送り条件において窒素雰囲気中切削ではその効果を顕著に表すことや、窒素ガス供給法としては密封容器を用いた窒素雰囲気中加工よりも窒素ブロー加工のほうが良好な結果を得ることが判明した。

それを受けて、第5章では高速・高送り加工条件において切削実験を行い、窒素ブロー加工による高速切削の実現に向け検討を行った。その結果、窒素ブロー加工では従来ドライ加工では切削困難であるような切削条件においても良好な切削が行えることが判明し、同加工法によって、環境対応と高生産性の両立が可能であるという結果を得た。

このことより、第6章では窒素ブロー加工の実用化に向けて、エンジクラクシャフトの旋削工程や、自動車のバンパー金型におけるミーリング加工に窒素ブロー加工を適用し、バンパー金型のミーリング加工においては生産時間を半減させるとともに、工具寿命を約2倍増加させることが出来た。

また、第7章では窒素ブロー加工の応用技術について検証する。一般的にMQL加工では、冷却要素が少ないために切削温度の上昇を招いてしまう。そこで第7章ではミスト加工に窒素ブローを援用することによって冷却性の改善とそれに伴う工具寿命の改善を図り、良好な結果を得た。

以上の結果を受けて、窒素ガスを切削加工に適用することによって炭素鋼や金型鋼の切削加工において工具寿命改善や切削時間の短縮などが確認されたことから、生産性の向上が可能であるといえる。

また、窒素中切削を他のMQL加工法に援用することによって、MQL加工における冷却性などの問題点を改善することが確認された。これは、ミストによるドリル深穴加工などにおいて効果を発揮すると考えられる。

更に、窒素ブローが効果を示した高速切削条件は切削油剤の使用が逆に工具寿命の低下を招くことから、当加工法がこのような条件において効果を発揮することは、窒素切削によって更なる高速切削の可能性を示すものである。

また、窒素切削は全く切削油剤を使用しない加工法であることや、窒素雰囲気発生装置を用い場合、大気中から窒素ガスを分離するから、同法によって環境対応と高生産性の両立が出来るものであると結論付ける。

参考文献

- 2-1) 松原十三生：環境対応加工技術の現状と課題，精密工学会誌，68，7，(2002)885
- 2-2) 近藤猛男：トヨタ自動車における ECO 技術への取り組み，第 27 回工作機械関連技術者会議，(1997)A2-2
- 2-3) 井川正治，岩坪正隆，宮崎国利：環境対応のためのドライ加工への取り組み，機械技術，47,5(1999)
- 2-4) 横田秀雄：MQL 切削の現状と課題，精密工学会誌，68,7(2002)903
- 2-5) 切削油技術研究会：切削油剤ハンドブック，工業調査会，(2004)133
- 2-6) 太田富士夫：弊社切削油の非塩素化現状，日石三菱工作機械シンポジウム 2001，(2001)11
- 2-7) 大胡栄一，シンセティッククーラントの最近の動向，潤滑経済，11(2001)15
- 2-8) 横田秀雄：MQL 切削の現状と課題，精密工学会誌，68,7(2002)904
- 2-9) 陳徳成：環境低付加セミドライ加工システムの開発及びその実用化に関する研究，静岡大学博士論文，(2000)20
- 2-10) 野仲拓志：油-水複合ミストによる旋削加工-供給条件の検討-，静岡大学修士論文，(2004)4
- 2-11) 小松富士夫，若林利明，塩素フリー・アンチミスト切削油剤ユニカットテラミの実用性能，日石レビュー，36,3(1994)124
- 2-12) 脇田裕之：旋削における極微量潤滑油供給法の改善およびその切削特性の評価，静岡大学修士論文，(2004)3
- 2-13) 藤井彰：極微量潤滑油供給による旋削における冷却性の改善，静岡大学修士論文，(2006)3
- 2-14) 横田宗彦：環境にやさしい（エミッションフリー）機械加工システム，自動車技術，53,12(1999)30
- 2-15) 松原十三生：環境対応加工技術の現状と課題，精密工学会誌，68，7，(2002)887
- 2-16) 神雅彦，村川正夫：吸熱工具を用いたドライ切削システムの開発，精密工学会秋季大会学術講演会，(2003)
- 2-17) 中村隆：切りくず吸引工具の開発-カバー形状とチップブレイカの検討-，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2006)
- 2-18) 若林利明：切削加工における気体潤滑剤の作用機構，日石レビュー，37,2(1995)47-51
- 3-1) 松岡甫篁，安齋正博：高速ミーリングの基礎と実践，日刊工業新聞社 (2006)25

- 3-2) 臼井英治：切削・研削加工学上，共立出版株式会社，(1971)167
- 3-3) 水谷正明義：ELID 研削を施したワーク表面に形成される酸化皮膜の正常制御
- 3-4) 増子 昇：さびのおはなし，日本規格協会，(2002) 27
- 3-5) 木村好次，野々瀬進：普及版トライボロジーの解析と対策，テクノシステム，(2003) 264
- 3-6) 田中久一郎：摩擦のおはなし，日本規格協会，(2003)94,123
- 3-7) Donald H. Buckley: "Friction, Wear, and Lubrication in Vacuum", NA (Washington, D. C.), (1971)
- 3-8) 松本 清：トライボロジ，産業図書，216, 249
- 3-9) 桜井俊夫，中清一郎：トライボロジー，産業出版，(1981)57
- 3-10) 増子昇：さびのおはなし，日本規格協会，(2002)31
- 3-11) 古市亮三，玉村謙太郎，杉本宥，ふん囲気が切削現象に及ぼす影響，日本機械学会論文集(第 3 部)，32,234(1966)
- 3-12) 飯高一郎：合金学新論，岩波新書，(1953)242
- 3-13) 林，真空装置 (工業物理学講座 B-1)，日刊工業新聞社，(1951)3
- 3-14) 上原邦雄，檀原袈裟男：炭素鋼およびチタンの真空中切削の切削状態—真空切削の研究(第 1 報)—，精密機械，38,4(1972)363-368
- 3-15) 上原邦夫，檀原袈裟男：銅及びアルミニウムの真空中の切削挙動—真空切削の研究(第 2 報)—，精密機械 41,11(1975)1043-1048
- 3-16) 若林利明：切削加工における気体潤滑剤の作用機構，日石レビュー，37,2(1995)47-51
- 3-17) 小林博文，森田昇，吉田壽太郎：特殊環境下における切削加工の研究 (第 1 報，真空内切削装置の試作と純アルミニウムの加工実験)，日本機械学会論文集(C 編)，62,603(1996)4386-4392
- 3-18) 小林博文，森田昇，吉田壽太郎：特殊環境下における切削加工の研究 (第 2 報，真空内切削加工における特異現象の支配因子)，日本機械学会論文集(C 編)，63,616(1997)4359-4362
- 3-19) 奥島啓式，人見勝人，上神謙次郎，吉祇彰男氏：切削加工における雰囲気の効果 —第 1 報，酸素噴射ふん囲気下における切削面粗さについて—，日本機械学会論文集(第 3 部)，33,229(1965)1387
- 3-20) 奥島啓式，人見勝人，上神謙次郎，吉祇彰男氏：切削加工における雰囲気の効果 —第 2 報，酸素噴射ふん囲気下における切削力について—，日本機械学会論文集(第 3 部)，31,230(1965)1549
- 3-20) 奥島啓式，人見勝人，上神謙次郎，吉祇彰男氏：切削加工における雰囲気の効果 —第 3 報，種々の気体の噴射ふん囲気下における切削面あらさ

- ならびに切削力について一，日本機械学会論文集(第3部)，
32,234(1966)341
- 3-21) 上神謙次郎，玉村謙太郎，古市亮蔵：切削現象に及ぼすふん囲気の効果，
日本機械学会論文集(第3部)，40,332(1974)1231
- 3-22) 吉川悌二，宮坂金佳，糟谷梅太郎，平尾正利，井上英夫，大野幸彦，坂田
興亜：何作材の切削加工技術の研究(第二報)—難削材の切削加工における
ガス雰囲気の影響—，機械技術研究所所報，Vol.43(1989)82
- 3-23) 山根八洲男，鳴滝則彦：「正面フライス切削時の工具損傷に及ぼす雰囲気
の影響(第1報)—すくい面摩耗への影響—」，精密機械，Vol.49,4(1983)，
521-527
- 3-24) 山根八洲男，鳴滝則彦：「正面フライス切削時の工具損傷に及ぼす雰囲気
の影響(第2報)—熱き裂への影響—」，精密機械，Vol.50,8(1984)，
1250-1254
- 3-25) 山根八洲男，鳴滝則彦：「正面フライス切削時の工具損傷に及ぼす雰囲気
の影響(第3報)—チッピングへの影響—」，Vol.52,4(1986)，521-527
- 3-26) 若林利明：切削加工における気体潤滑剤の作用機構，日石レビュー，
37,2(1995)47-51
- 3-27) 和田任弘：焼結鋼切削時における雰囲気ガスが工具摩耗及ぼす影響，奈良
工業高等専門学校研究紀要，32(1996)11-16
- 3-29) 忠政明彦：窒素雰囲気中における切削加工，静岡大学修士論文，(2000)
- 4-1) 小林直樹：窒素ガス雰囲気中における切削に関する研究，静岡大学修士論
文，(2002)
- 4-2) 三菱マテリアル総合カタログ，三菱マテリアル神戸ツールズ株式会社，
(2004)A046,A048
- 4-3) ツールエンジニア編集部：エンドミルのすべて，大河出版，(1998)92
- 5-1) 松岡甫篁，安齋正博，高橋一郎：初めての切削加工，(2002)39
- 5-2) 松岡甫篁，安齋正博：高速ミーリングの基礎と実践，日刊工業新聞社
(2006)126
- 5-3) 切削油技術研究会：フライスハンドブック，(1988)174
- 5-4) SHIZUKA Hiroo, SAKAI Katsuhiko, SUZUKI Yasuo "Study on High-Feed Milling
by using Nitrogen Gas", Joint Symposium between Sister Universities in
Mechanical Engineering, KORIA,(2006)
- 5-5) 三菱マテリアル総合カタログ，三菱マテリアル神戸ツールズ株式会社，
(2004)A041
- 5-6) 松岡甫篁，安齋正博：高速ミーリングの基礎と実践，日刊工業新聞社
(2006)21

- 5-7) 横山哲男：機械加工技術 Q&A, 工業調査会, (2004)87
- 5-8) ツールエンジニア編集部：エンドミルのすべて, 大河出版, (1998)50
- 5-9) ツールエンジニア編集部：エンドミルのすべて, 大河出版, (1998)53
- 5-10) ツールエンジニア編集部：エンドミルのすべて, 大河出版, (1998)52
- 5-11) 松岡甫篁, 安斎正博：高速ミーリングの基礎と実践, 日刊工業新聞社
(2006)167
- 5-12) ツールエンジニア編集部：エンドミルのすべて, 大河出版, (1998)53

謝辞

本研究の遂行にあたり、御指導、御鞭撻を賜りました鈴木康夫教授並びに酒井克彦准教授、また、研究全般にわたりご協力くださいました中村保教授、平尾正志技官、工作技術センターの技官の方々、浜松工業技術支援センターの田光伸也氏、大学院生諸氏並びに共同研究者諸氏に心から感謝いたします。

また、共同研究等を進めるにあたり、試料や工具を始めとして、装置等を提供して頂くとともに、貴重な御助言を賜りました、スズキ株式会社の皆様、OSG株式会社の村上氏、フジBC 技研株式会社の方々、エンシュウ株式会社の方々、三菱マテリアル株式会社の長屋氏に深く感謝の意を表します。

付録

切削理論

1 切削加工とは

切削加工とは、加工対象である工作物と工具を工作機械によって保持するとともに、両者に相対運動を与えることによって工具と工作物の間に干渉を生じさせ、工作物の不要な部分を工具によって除去し、所要の形状、寸法、精度を得る工程であると定義される¹⁾。

したがって、切りくずを出す加工法はすべて切削加工と言えるわけであるが、通常は工具としてバイト、ドリル、フライス、エンドミルなどを用いるものを切削加工といい、砥粒や砥石を用いる加工は研削や砥粒加工と言う²⁾。

数ある加工法の中でも、切削加工はエネルギー効率や生産性、経済性に優れているとともに、高精度の加工を行えることから、非常に重要な加工法である^{3)~5)}。

2 2次元切削モデル

図 2.1 に最も基本的な 2 次元切削モデルを示す。図のように、工具を用いて切削速度 V にて切り込み t_1 にて与えて切削を行った場合、被削材は工具すくい面 AC によって圧力を受けて、せん断を生じる。その結果、厚さ t_2 の切りくずが V_c の速度で流出する。このとき、幾何学的関係よりせん断角 ϕ は切り込み量 t_1 と切りくず厚さ t_2 の値から

$$r_c = \frac{t_1}{t_2} = \frac{AB \sin \phi}{AB \cos(\phi - \alpha)} \quad \frac{t_1}{t_2} : \text{切削比 } r_c \text{ (cutting ratio)} \quad (2.1)$$

となり、これを解いて以下のように求まる。

$$\phi = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \quad (2.2)$$

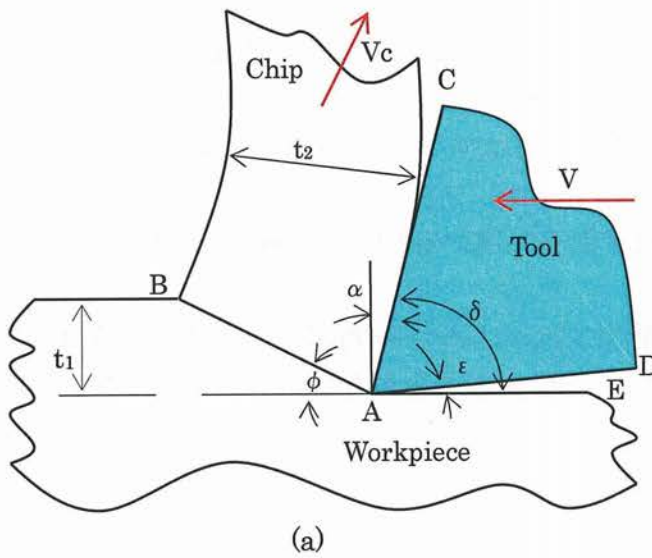
また、同図(b)より変形前に平行四辺形 $abcd$ であった部分は、変形後 $abc'd'$ となり、これより、せん断ひずみ γ は次式により求められる。

$$\gamma = \frac{dd'}{ed} = \cot \phi + \tan(\phi - \alpha) = \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} \quad (2.3)$$

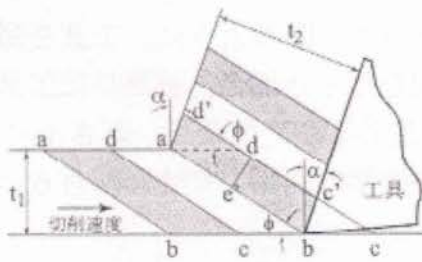
さらに、このようなせん断モデルでは、切削速度 V 、切りくず流出速度 V_c 、せん断速度 V_s は(c)に示すような閉じた三角形を形成することから、正弦定理を利用して、それぞれの速度が以下のように求められる^{6)~7)}。

$$V_c = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} V = \frac{t_1}{t_2} V \quad (2.4)$$

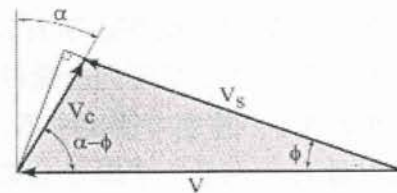
$$V_s = \frac{\cos \phi}{\cos(\phi - \alpha)} V = \gamma V \sin \phi \quad (2.5)$$



- α : rake angle
- ϵ : Relief angle
- ϕ : Shear angle
- δ : Cutting angle
- AB: Shear plane
- AC: Rake face
- AE: Finished surface
- t_1 : Depth of cut
- t_2 : Chip thickness
- V : Cutting speed
- V_c : Chip escape speed



(b)⁸⁾

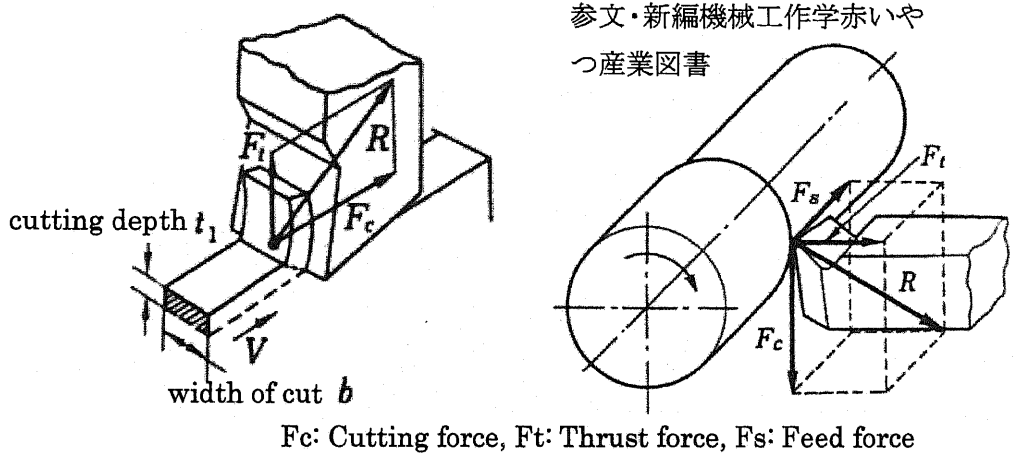


(c)⁸⁾

Fig.2.1 二次元切削モデル

3 切削抵抗

前節で述べた 2 次元切削では、図 2.2(a)のように工具に切削抵抗が生じる。しかし、旋削加工やフライス加工など、実際の切削加工はほとんどが 3 次元切削である。このような場合、工具が切削時に受ける切削抵抗は(b)図のように主分力 F_c 、送り分力 F_s 、背分力 F_t の 3 分力からなる。切削抵抗は大きくなるほど、工具は欠損などを生じやすくなる。



(a) Two-dimensional cutting model⁹⁾ (b) Three-dimensional cutting model¹⁰⁾

Fig.2.2 2次元切削モデルと 3次元切削モデルにおける切削力

図 2.3 に示すような流れ形切りくずが生成する二次元切削のモデルを考え、幾何学的な関係から力関係を求める。

図において、切削中には工具すくい面 AC に垂直力 N と摩擦力 F が作用し、この合力 R が切削抵抗として作用する。また、せん断面 AB には、せん断面上の垂直力 F_n とせん断力 F_s が作用する。さらに、 R は主分力 F_c と背分力 F_t とに分けることができる。これらの間には次のような関係がある。

$$\left. \begin{aligned} F_s &= F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \\ F_n &= F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \\ F &= F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \\ N &= F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

工具すくい面上の摩擦係数 μ は、 β を摩擦角とすると

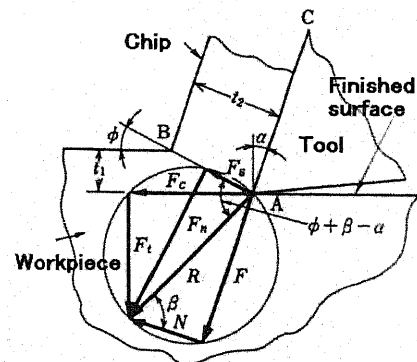


Fig.2.3 切削分力の関係¹⁰⁾

$$\mu = \tan \beta = \frac{F}{N} = \frac{F_c \tan \alpha + F_t}{F_c - F_t \tan \alpha} \quad (2.7)$$

となる。せん断面の面積 A_s は、切削面積を A_0 、切削幅を b とすると

$$A_0 = t_1 b \quad (2.8)$$

$$A_s = \frac{A_0}{\sin \phi} = t_1 \frac{b}{\sin \phi} \quad (2.9)$$

となる。せん断面上の平均せん断応力 τ_s と平均垂直応力 σ_s は

$$\left. \begin{aligned} \tau_s &= \frac{F_s}{A_s} = \frac{\sin \phi}{A_0} (F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \\ \sigma_s &= \frac{F_n}{A_s} = \frac{\sin \phi}{A_0} (F_c \sin \phi + F_t \cos \phi) \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

を得る。さらに、工具すくい面上の平均摩擦応力 τ_t と平均垂直応力 σ_t は

$$\left. \begin{aligned} \tau_t &= \frac{F}{l_c b} = \frac{1}{l_c b} (F_c \sin \alpha - F_t \cos \alpha) \\ \sigma_t &= \frac{N}{l_c b} = \frac{1}{l_c b} (F_c \sin \alpha - F_t \sin \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

となる。これより t_2 を実測することにより γ_c と ϕ が計算できる。また、 F_c と F_t

は工具動力計で測定することにより、 F_s 、 F_n 、 F 、 N 、 μ 、 τ_s 、 σ_n 、 τ_t 、 σ_t が算出できる。これらの値を求めることは、切削の良否を定量的に評価するのに重要である。

一方、 τ_s がわかっていると、逆に R 、 F_c 、 F_t を求めることができる。前述

の図 2.3 において、

$$\frac{F_s}{R} = \cos(\phi + \beta - \alpha) \quad (2.12)$$

$$R = \frac{F_s}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} = \frac{\tau_s A_0}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (2.13)$$

であり、また

$$\frac{F_c}{R} = \cos(\beta - \alpha), \quad \frac{F_t}{R} = \sin(\beta - \alpha) \quad (2.14)$$

であるから

$$\left. \begin{aligned} F_c &= R \cos(\beta - \alpha) = \frac{\tau_s A_0 \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \\ F_t &= R \sin(\beta - \alpha) = \frac{\tau_s A_0 \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

を得る。 F_c と F_t は ϕ , β , τ_s がわかれば計算できる。 β と τ_s は切削実験とは別の材料試験で得られる定数とすれば、 ϕ を理論的に求めることができると、切削実験を行うことなく、 R , F_c , F_t , γ , t_2 や切削エネルギーなどの値を知ることができる¹¹⁾。

4 切削温度

前項の切削抵抗に打ち勝ってなされた仕事のほとんどは熱に変化する。その結果、工具の軟化や反応の発生、仕上げ面の変質、残留応力の増大をまねく。そしてまた、切削温度の上昇は工具摩耗にも非常に大きく影響を及ぼす。従って、切削加工において切削温度は極めて重要な項目である。そのため、本論文においても切削温度に関しては頻繁に触れる事とする。

ここで、切削温度の熱源として図 2.4(a)に示すように 3 つ領域が上げられる

- ① 切りくずをせん断するエネルギー
- ② 切りくずが工具と接触することによる摩擦エネルギー
- ③ 工具逃げ面と被削材の摩擦エネルギー¹²⁾

また、これに加え、加工による被削材新生面の酸化反応時の参加発熱も考えられるが、これについては後述することとする。

このような熱源により、切削温度は上昇する。(b)は赤外線甲板を用いて切削温度を測定した例である。図より、切削時には切削面が極めて高温であることが見て取れる。また、同図より、工具先端でなくすくい面上に最高温度位置があることが確認できる。最高温度は切削速度が上昇するほど刃先を離れすくい面側に移動する傾向にあるが、いずれにしても、温度の上昇が工具の摩耗などに悪影響を及ぼすことから、通常は切削温度の上昇は有害であるとされる。

このように、切削加工では工具及び被削材は非常に高温となるが、その熱量の多くは図 2.5 に示すように切りくずとして排出される。

また、切削時は工具と被削材が接していることや、切削点を切りくずが覆っていることから、切削温度を測定することは極めて困難である。切削温度の測定法としては以下のような方法が挙げられる。

- ① 工具-被削材熱伝対法
- ② 双刃工具熱電対法
- ③ 本工具熱電対法
- ④ 工具内に熱電対を埋め込む方法
- ⑤ 被削材内に熱電対を埋め込む方法
- ⑥ 放射温度計による方法
- ⑦ 示温塗料による方法
- ⑧ サーモテープ又はサーモクレヨンによる方法
- ⑨ 切りくずの色判定より推定する方法
- ⑩ 赤外線写真による方法
- ⑫ 有限要素法による方法 14)~15)

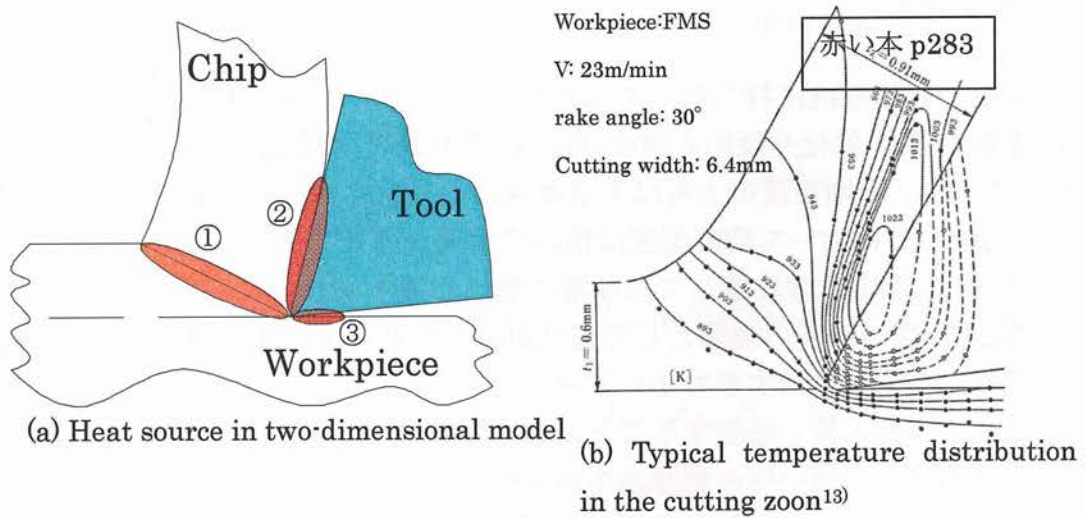


Fig.2.4 切削加工における発熱

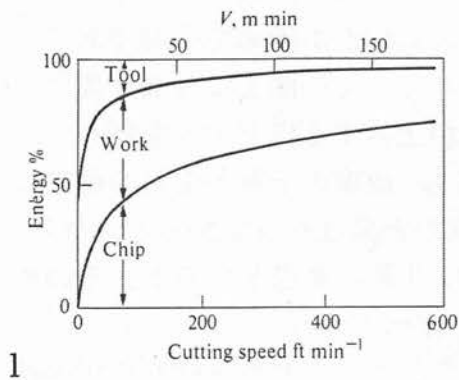


Fig.2.5 切削発熱の伝達¹⁶⁾

5 仕上げ面の粗さ

仕上げ面の輪郭が刃物の動いた軌跡通りに作られたとして、しかもその刃物の輪郭や運動が完全に設定した通りであったとすると、その仕上げ面の粗さは計算で求められる。それを理論粗さ、または理想粗さと呼ぶ。理論粗さ R_y は以下のようなになる。

$$R_y = \frac{f^2}{8r} \quad (2.16)$$

ただし f : 送り(mm/rev) r : ノーズ半径(mm)

上式から明らかなように、理論粗さを小さくするには、①送り f を小さくし、②ノーズ半径 r を大きく、③副切り込み角を小さくすればよい。

しかし、現実の切削仕上げ面の粗さはこの理論粗さよりかなり大きい場合が多い。それは下記の諸要因が加わるためである。

(1) 切れ刃の輪郭が不正確な場合

工具のノーズ部が不均一に摩耗した場合、特に境界摩耗が起こった場合は、その形が仕上げ面に転写されて粗さが増す。新しい工具でも、ノーズの丸み部と直線部のつなぎの部分に多少角が残っている場合が多く、これも粗さを大きくする原因となる。

(2) 工具と工作物の相対運動が不正確な場合

工具や工作物は必ずしも理論通りには動かないから、それも粗さ増大の原因になる。ビビリ振動によって切り込みが変動した場合は理論粗さに比べてかなり粗さが大きいことある。

(3) 切れ刃の転写が正確に行われていない場合

工作物から切りくずが分離する際、分離が切れ刃上で起こらなければ、切れ刃の輪郭はそのまま仕上げ面に転写されないから、形が乱れる。これには、亀裂形切りくずが発生する場合及び構成刃先が付く場合⁷⁾⁸⁾の二種類の原因が考えられる。

(4) 切削熱の影響を受けて被削材の軟化、変形が起きる場合

被削材の温度上昇は熱変形を引き起こし、加工精度を低下させる。刃先は高温となりやすいため、工具に溶着物が発生したとき仕上げ面が劣化する。被削材の盛り上がりとむしれを引き起こし、仕上げ面を劣化させる原因となる。¹⁷⁾

6 工具摩耗と工具寿命

前述のように、切削中の工具刃先は被削材と切りくずによって高温・高圧の苛酷な環境化におかれるため、工具刃先は様々な損傷を受ける。図 2.6 に工具損傷状態の模式図を示す。

(a)図に示すように工具摩耗はすくい面側と逃げ面側でその原因が異なる。すくい面摩耗は切りくずがすくい面上を滑ることによって生じるもので、切れ刃から少し離れた場所にくぼみ上の摩耗痕が作られる。これは、図 2.4 で述べたように、摩擦による温度がこのあたりで最高になることから生じるものである。このような摩耗をクレーター摩耗といい、切削速度や送りが大きいほど摩耗が生じやすい。一方、逃げ面摩耗は切れ刃が被削材を擦っていくとき逃げ面が当たり、接触幅全体にわたって摩耗痕が作られることによる。これをフランク摩耗という。境界摩耗は逃げ面上の工具と被削材の境界に生じ、溝状摩耗痕が作られる。

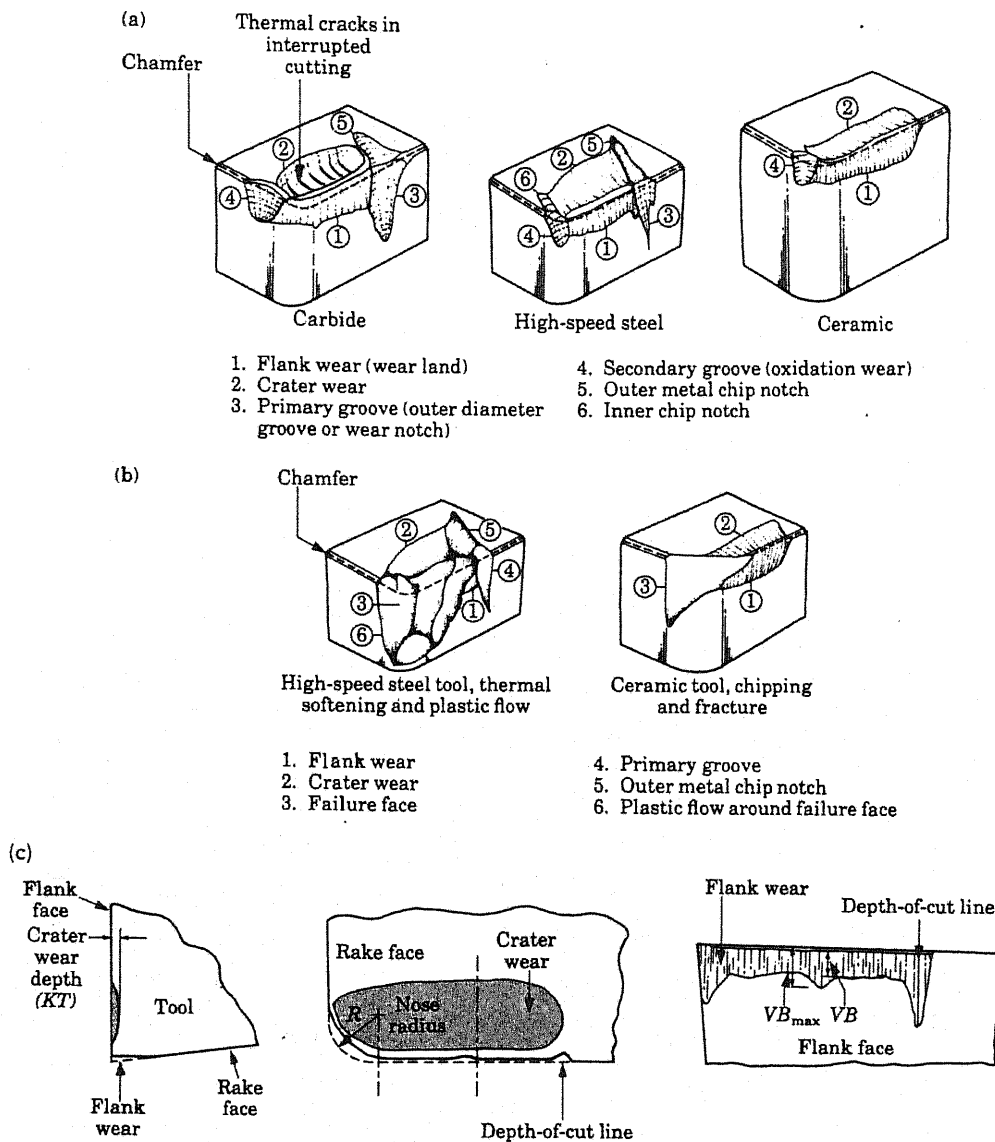
また、この他にも工具は(b)図のような脆性的チップングや欠損、破損、剥離、亀裂、塑性変形など様々な要因により損傷し、遂には切削不能となる。この限界を工具寿命と呼ぶ。

一般的に工具寿命の判定基準としては以下のような事項が挙げられる。

- ①切削仕上げ面に光輝帯が発生したとき
- ②工具摩耗量がある一定値に達したとき。
- ③切削抵抗の一定状態から急増したとき。
- ④仕上げ寸法の変化が一定量に達したとき

このように、工具寿命は工具や被削材の寸法、仕上げ面を基に設定するが、工具寿命判定基準として高速度工具鋼のバイト (JIS B 4012) に対しては前述の①の光輝帯の発生で判定し、超硬バイト (JIS B 4011) では、(c)図のように逃げ面摩耗幅 VB で判定することが多い。

本研究第...章においても切削試験による工具寿命の判定を行うが、その際に関しても、この VB0.2mm 耐力あるいは欠損等を基に寿命判定を行う (18)~(20)。



(a) Types of wear observed in cutting tool. The thermal cracks shown are usually observed in interrupted cutting operations, such as in milling. (b) Catastrophic failure of tools. (c) Features of tool wear in a turning operation. The VB indicates average flank wear.

Fig.2.6 工具の摩耗形態²¹⁾

7 工具材種

切削工具の性能は切削加工にとって極めて重要な要素である。図 2.7(a)及び(b)は工具材種の歴史とそれに伴う切削速度や切削時間の変異を表したものである。この図より、工具材種がいかに切削特性や生産性に関与しているかが見て取れる。

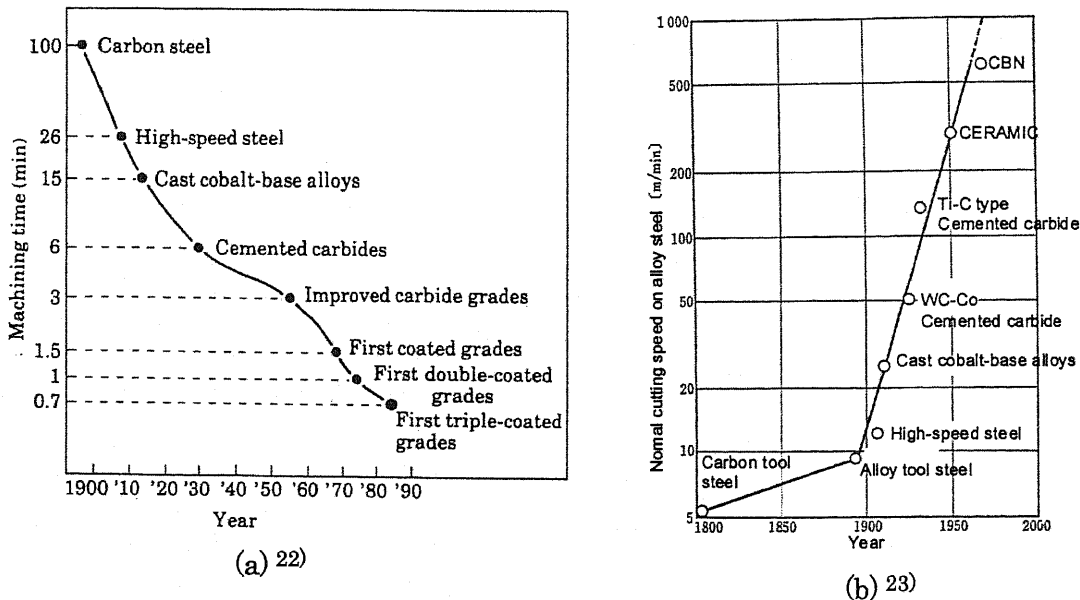


Fig.2.7 工具材種の進歩と切削条件の変異

一般的に、切削工具には以下のような特性が要求される。

- ① 高温度高度と圧縮強度が十分である
- ② 耐摩耗性が十分である
- ③ 靱性（抗折力）が大きい
- ④ 熱伝導性が良好である
- ⑤ 化学的に安定している
- ⑥ 耐熱性を有する
- ⑦ 親和性が低い
- ⑧ 研削性がよい
- ⑨ 切れ刃が十分鋭利である

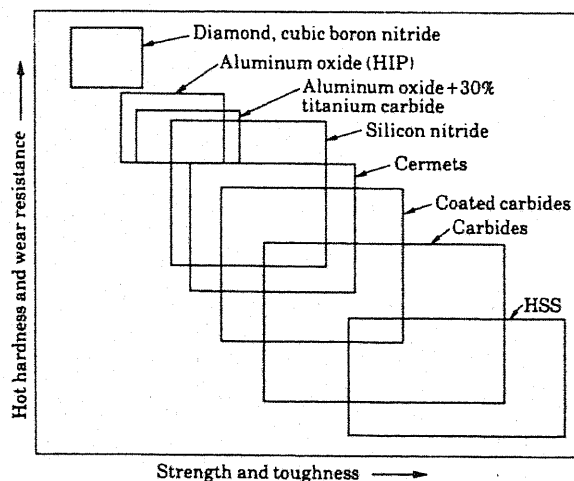


Fig.2.8 工具材種に求められる材料特性 24)

このように工具には硬度や靱性を始め様々な性能が求められる。図 2.8 は現在使用されている主な工具材種の特性である。以下に主な特徴を述べる。本研究では、主に(4)超合金工具や(5)コーティング工具、(6)サーメット工具を用いて実験を行う。

(1)炭素工具鋼

含有炭素量 0.6~1.5%の高炭素鋼で、焼入れ、焼きなましを行い、硬度と靱性を高めて使う。安価であるが、耐摩耗性と耐熱性が不十分であるため、現在は金属材料の切削にはあまり使用されず、木材加工に使用される。

(2)合金工具鋼

高炭素鋼に W, Cr, Mn, Mo, Ni, V などの合金成分を複数種入れたものである。焼き入れ、焼き戻しをして使われる。炭素工具鋼より耐摩耗性が高いが、耐熱性は低く、低速切削用のタップ、ダイ、ハクソーなどに用いる。

(3)高速度鋼

一般にハイスと呼ばれ、W, Mo, Cr, V, Co を複数種含む合金鋼である。W 系と Mo 系に大別され、W 系は耐熱性と被研削性に優れるが、靱性がやや劣る。Mo 系は靱性に優れるが、耐熱性と、被研削性に劣る。合金工具鋼の 2 倍以上の切削速度が可能である。超硬合金に比べると硬さと耐摩耗性に劣るが、靱性が高く欠けが生じにくいために断続切削をする工具に用いられる。特にフライスや歯切り工具にはなくてはならない材種であり、また、プレス金型などの塑性工具用鋼や耐摩耗機械部品にも広く使われる。

(4)超硬合金

高融点の硬質炭化物である炭化タングステン(WC)の微粉末を主成分とし、炭化チタン(TiC)、炭化タンタル(TaC)などの微粉末を適量加え、それらに結合材として Co の微粉末を加え、高压で成形し、1600~1800K の高温で焼結させた合金である。硬さは HRC87~92 と硬く、しかもこの硬さは高温においてもその低下が小さい。鋼や鋳鉄の高速切削をはじめ、非鉄金属や非金属の高効率切削に広く使われる。

超硬合金は JIS では K 種, P 種, M 種の 3 種類に分けられている。K 種は鋳鉄, 非鉄金属, 非金属材料などの切削に使用される。K 種の組成(WC と Co)では鋼の切削において鋼の切りくずが溶着しやすいため、クレータ摩耗を生じ、用途が限定される。P 種は K 種の欠点を少なくするため、TiC を、時によってはさらに TaC を加える。鋼, 鋳鉄, ステンレス鋼, 合金鋼の切削に使用される。M 種は K 種と P 種の間際の組成をもち、性質も中間的なものを持つ。

(5)コーテッド工具

硬さや靱性、化学的安定性など既述の切削工具に必要な条件を満たすため、硬さは母材で保証し、化学的安定性や耐摩耗性は表面の皮膜の性質で実現させようとする工具である。母材としては、高速度鋼, 超硬合金, さらにセラミックス等が用いられ、化学的に安定な膜としては TiC, TiN, HfN, Al₂O₃, ダイヤモンド等があり、これらを単層又は多層で用いる。コーティ

ング法には化学的蒸着(CVD)法と物理的蒸着(PVD)法があり、膜の安定性、耐剥離性、母材への影響等それぞれの特徴を有している。

コーティング工具で最も重要なことは膜及び母材の性質を除けば、膜の密着性(耐剥離性)であり、このため種々の工夫がなされている。

コーティング工具は仕上げ切削のような微小送り、微小切込みでは剥離が生じやすく不適當であり、比較的大きな送りや切り込みを与える加工に適している。

(6)サーメット工具

サーメットは ceramics と metal の合成語であり、TiC または TiC+TiN を主成分とし、Ni や Mo を加えて焼結したもので、超硬合金よりも硬さと耐熱性及び耐溶着性で優れるが、靱性や曲げ強さでやや劣る。そのことから、サーメット工具は欠けに注意が必要であるが、良好な仕上げ面が得られることから、鋼材の仕上げ加工などに適する。

(7)CBN

CBN (立方晶窒化ホウ素 : cubic boron nitride) は天然には存在せず、人工的に超高压高温 (5 万気圧以上, 1900K 以上) で合成される。この CBN 粉末を金属又はセラミックスを結合材として超硬合金の台金上に焼結結合したものを工具として用いる CBN はダイヤモンドに次ぐ硬さと熱伝導率を持ち、鉄系金属に対する反応性が少なく優れた耐熱性と耐摩耗性を持つ高硬度の焼入れ鋼やチルド鋳鉄が高速で切削できる。高硬度であることから、チップングや欠損に注意が必要である。

(8)ダイヤモンド

ダイヤモンドは物質の中で最も高い硬さと熱伝導率を持ち、熱膨張率が極めて小さい。単結晶のダイヤモンドを研磨すると非常に鋭利な切れ刃が得られ、鏡面仕上げや精密切削が可能となる。しかし、鉄系金属に対して反応性が高い。また、高価である。このため、研削仕上げに不向きである銅やアルミニウムやそれらの合金及びゴム、プラスチックなどの非金属材料の精密仕上げ用工具として使用される。微細なダイヤモンド粉末を焼結させたダイヤモンド焼結体工具は単結晶ダイヤモンドに対して方向性がなく、どの方向にも平均的な強度を持つが、切れ刃の鋭利さは単結晶に劣るため、鏡面仕上げはできない^{25)~26)}。

8 切削油剤

既述のように、切削加工とは言い換えれば熱との戦いであり、いかにして切削時の発熱量を抑えるかが良好な切削加工を行うために重要な項目となる。このこと切削加工には切削油剤を使用することが多い。

切削油剤を使用する主な目的は以下の3点である。

(1) 工具切削点の冷却

通常、工具寿命は摩耗で評価され、工具摩耗の進行は主として切削点の温度と工具面圧縮に支配されることが一般的に知られている。従って、工具刃先がクーランと供給によって効果的に冷却されれば、摩耗や溶着の進行を抑制できる。

(2) 工具、被削材接触面の潤滑

切削中の工具近傍には、せん断仕事と工具-被削材もしくは切りくず間の摩擦熱によって熱が発生する。切削熱を低減するためには冷却だけでなく摩擦熱の発生を抑えることも重要で、潤滑成分により摩擦が低減される。また、むしれなどの対策にも有効である。

(3) 切りくずの排出、除去

切削で生じた切りくずが工具へ噛み込まれたり、巻き付いたりした場合、製品の損傷や工具の破損を招きやすい。こうしたトラブルを回避するために切りくずを速やかに切削点近傍から除去する役割を果たす²⁷⁾。

以上が切削油剤の主な目的であるが、上記以外にも以下のような性能が切削油剤に求められる。

- ・ 被覆作用がよいこと（切りくずを洗い流して作業を容易にする）
- ・ 使用中粘度が変化したり、変質したりしないこと
- ・ 引火点が高くて、発火の危険が少ないこと
- ・ 滴下性が大きいこと
- ・ 発煙や霧散の少ないこと
- ・ 人間に害を及ぼさず、悪臭もないこと
- ・ 泡化しないこと
- ・ 工作機械及び加工物に錆を発生させないこと
- ・ 安価で入手しやすいこと²⁸⁾

上記の条件を完全に満たした切削油剤は存在しないが、適切な切削油剤を選定し、適量を供給することにより、工具寿命の増加や寸法精度の向上、良好な仕上げ面を得ることが可能となる。

さらに、現在用いられている切削油剤は次のようなものがある。

(1) 不水溶性切削油

鉱物油・動植物油・混成油と極圧油に分けられる。

鉱物油は軽油・マシン油・スピンドル油その他があるが、一般に油性が低く、単独では軽切削の場合以外は用いられない。

動植物油にはラード・オリーブ油・種油・大豆油その他動植物の油が用いられ、油性が高く軽切削には効果があるが、高温になると油性がきかなくなるので、低速重切削や、ねじ切り・刃切りなど刃物のプロフィールの摩耗を防ぐ必要のある場合に用いられる。

混成油は鉱油に動植物油やエステル油などを加えて油性を与えたもので、作業に応じ適当な混合比のものをを用いる。

極圧油は刃先が高圧・高温の下に摩擦を受ける場合の潤滑作用を行わせるために、鉱油や混成油に極圧添加剤として硫黄・塩素・リン・鉛その他を単体あるいは化合物として種々添加したものである。極圧添加剤は切削熱によって工作物である金属と反応し、摩擦係数の小さな反応生成物をつくる。

(2)水溶性切削油

水に希釈して用いるもので、冷却性がよくさらに種々の性質を持たせたものであって、エマルジョン形・ソリュブル形とソリューション方に分けられる。用途に応じて適当に水で希釈して、一般の切削及び研削作業に用いられる。

エマルジョン形は乳化油といわれるもので、鉱物油に乳化材として各種の石鹼水を加えて乳化させたもので、水に希釈すると白濁する。冷却性がよく、潤滑性もあり安価なので、一般の切削剤として広く使用される。通常は20倍程度に希釈し使用する。

ソリュブル形は前者より鉱油分を少なく乳化剤を多くしたもので、水に希釈すると透明又は半透明になる。普通50倍程度に希釈して用いる。

ソリューション方は無機塩基を主成分とし水に希釈すると透明な水溶液となる。また、これに界面活性剤や極圧添加剤を加えたものもある。

主として研削作業に100倍程度に希釈して用いる。

このように切削油剤には多くの種類のものが存在するが、いずれにしても、高品質で高能率の加工を低コストで行えることが求められる。

9 参考文献

- 1) 日本機械学会：JSME テキストシリーズ加工学 I - 除去加工 -, 日本機械学会, (2006)1
- 2) 中島利勝, 鳴滝則彦：機械加工学, コロナ社, (1983)9
- 3) 竹山秀彦：切削加工, 丸善株式会社, (1980)3
- 4) 平井三友, 和田任弘, 塚本晃久：機械工作法 (増補), コロナ社, (2000)73
- 5) 機械工作学編集委員会：新編機械工作学, 産業図書, (1987)122
- 6) 臼井英治：切削・研削加工学上, 共立出版株式会社, (1971)16
- 7) 星光一, 星鐵太郎：金属切削技術, 工業調査会, (1969)18
- 8) 日本機械学会：JSME テキストシリーズ加工学 I - 除去加工 -, 日本機械学会, (2006)12
- 9) 橋本文雄, 山田卓郎：新編機械工学, 共立出版株式会社, (1990)23
- 10) 機械工作学編集委員会：新編機械工作学, 産業図書, (1987)132
- 11) 機械工作学編集委員会：新編機械工作学, 産業図書, (1987)132
- 12) 松岡甫篁, 安斎正博, 高橋一郎：初めての切削加工, (2002)29
- 13) 機械工作学編集委員会：新編機械工作学, 産業図書, (1987)145
- 14) 臼井英治：切削・研削加工学上, 共立出版株式会社, (1971)133
- 15) 松岡甫篁, 安斎正博, 高橋一郎：初めての切削加工, (2002)29
- 16) MILTON C. SHAW: METAL CUTTING PRINCIPLES, CLARENDON PRESS OXFORD, (1984)277
- 17) 陳徳成：環境低付加セミドライ加工システムの開発及びその実用化に関する研究, 静岡大学博士論文, (2000)12
- 18) 平井三友, 和田任弘, 塚本晃久：機械工作法 (増補), コロナ社, (2000)84
- 19) 竹山秀彦：切削加工, 丸善株式会社, (1980)71
- 20) 臼井英治, 松村隆：機械製作法要論, 東京電機大学出版局, (1999)196
- 21) Serope Kalpakjian: Manufacturing Processes for Engineering Materials, Addison Wesley Longman, Inc., (1997)482
- 22) Serope Kalpakjian: Manufacturing Processes for Engineering Materials, Addison Wesley Longman, Inc., (1997)506
- 23) 中島利勝, 鳴滝則彦：機械加工学, コロナ社(1983)52
- 24) Serope Kalpakjian: Manufacturing Processes for Engineering Materials, Addison Wesley Longman, Inc., (1997)509
- 25) 日本機械学会：JSME テキストシリーズ加工学 I - 除去加工 -, 日本機械学会, (2006)28
- 26) 平井三友, 和田任弘, 塚本晃久：機械工作法 (増補), コロナ社, (2000)82

- 27) 松岡甫篁, 安齋正博, 高橋一郎 : 初めての切削加工, (2002)39
- 28) 橋本文雄, 山田卓郎 : 新編機械加工学, 共立出版株式会社, (1990)38