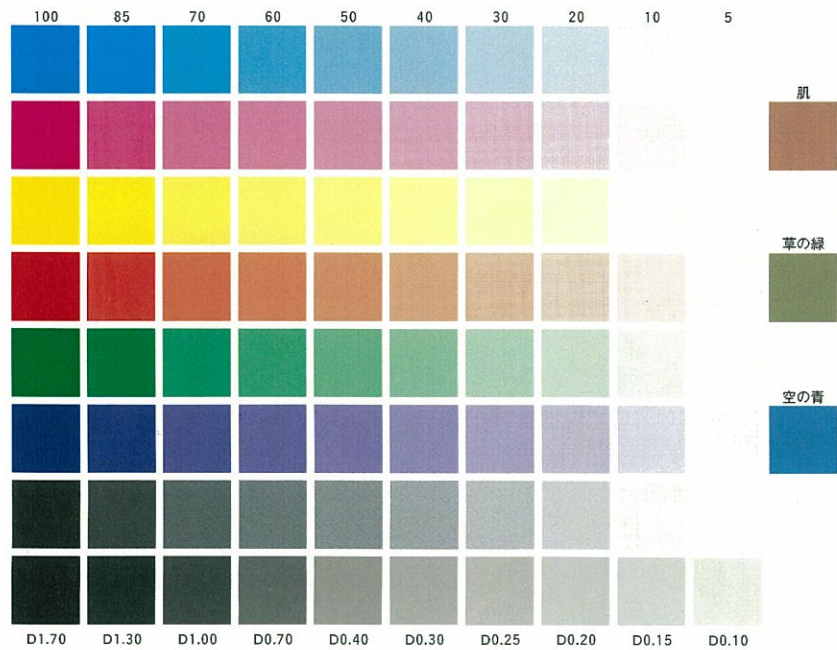


We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



We conduct many of these
We conduct many of these
We conduct many of these



乾式遠心バレル研磨法に関する 基礎的研究

平成13年9月

山本章裕

目 次

第1章 序章	1
第2章 バレル研磨法	8
2.1 緒言	8
2.2 バレル研磨法	9
2.3 バレル研磨用メディア	10
2.3.1 成形メディア	11
2.3.2 金属メディア	11
2.3.3 有機メディア	12
2.3.4 プラスチックメディア	12
2.3.5 乾式研磨用メディア	12
2.4 バレル研磨法の種類と特徴	12
2.4.1 回転バレル研磨法	13
2.4.2 振動バレル研磨法	13
2.4.3 遠心バレル研磨法	14
2.4.4 流動バレル研磨法	15
2.4.5 その他のバレル研磨法	16
2.5 乾式遠心バレル研磨法	17
2.6 遠心バレル研磨におけるマスの流動	17
2.6.1 バレル内の軌跡	18
2.6.2 バレル内の速度	21
2.6.3 バレル内の加速度	24
2.6.4 バレル内のマスの流動	30
2.7 結言	32
第3章 遠心バレル研磨装置および研磨特性の評価	33
3.1 緒言	33
3.2 遠心バレル研磨装置	34
3.3 供試工作物	35
3.4 研磨条件および供試メディア	36
3.5 研磨特性の評価	39
3.6 結言	42

第4章	バレル研磨における乾式および湿式の研磨性能	43
4.1	緒言	43
4.2	研磨量に及ぼすメディア装入率の影響	44
4.3	仕上面に及ぼすメディア装入率の影響	45
4.4	エッジ丸味半径に及ぼすメディア装入率の影響	48
4.5	メディア損耗率と研磨比	50
4.6	コストの評価	52
4.7	結言	53
第5章	メディアと工作物の接触挙動	55
5.1	緒言	55
5.2	メディアと工作物の接触挙動と研磨特性	56
5.3	メディアと工作物の接触圧	56
5.4	メディア装入率の影響	58
5.5	タレット回転数の影響	60
5.6	メディアと工作物の混合率の影響	62
5.7	結言	64
第6章	研磨特性に及ぼすメディア諸元の影響	65
6.1	緒言	65
6.2	メディア形状・寸法の影響	66
6.3	メディア混入砥粒粒度の影響	71
6.4	メディア材質の影響	73
6.5	結言	76
第7章	研磨特性に及ぼすメディア装入率の影響	78
7.1	緒言	78
7.2	研磨量に及ぼす影響	79
7.3	仕上面粗さに及ぼす影響	81
7.4	エッジ丸味半径に及ぼす影響	83
7.5	マスの流動性に及ぼす影響	83
7.6	メディア装入率と加工能率	86
7.7	結言	87
第8章	研磨特性に及ぼすタレット回転数と メディアと工作物の混合率の影響	88
8.1	緒言	88
8.2	タレット回転数の影響	89
8.2.1	研磨量に及ぼす影響	89
8.2.2	仕上面粗さに及ぼす影響	90
8.2.3	エッジ丸味半径に及ぼす影響	91

8.3	メディアと工作物の混合率の影響	92
8.3.1	研磨量に及ぼす影響	93
8.3.2	仕上面粗さに及ぼす影響	94
8.3.3	エッジ丸味半径に及ぼす影響	96
8.4	結言	97
第9章	研磨特性に及ぼす工作物の形状および材質の影響	99
9.1	緒言	99
9.2	工作物比重の影響	100
9.3	工作物硬さの影響	103
9.4	工作物表面積の影響	105
9.5	工作物材質の影響	108
9.6	結言	110
第10章	バリ取りへの適用	112
10.1	緒言	112
10.2	実験方法	113
10.2.1	供試工作物の製作	113
10.2.2	研磨条件およびバリ取りの評価	113
10.3	バリの除去プロセス	115
10.4	バリ取りに及ぼすメディア装入率の影響	118
10.5	バリ取りに及ぼすメディア寸法の影響	120
10.6	バリ取りに及ぼすタレット回転数の影響	124
10.7	結言	127
第11章	バレル研磨条件と研磨コスト	129
11.1	緒言	129
11.2	研磨コストの計算方法	130
11.3	研磨コストに及ぼす研磨特性の影響	133
11.4	研磨コストに及ぼすメディア装入率の影響	135
11.5	バレル研磨条件の選定因子	138
11.5.1	選定因子	138
11.5.2	二段階研磨法	139
11.5.3	選定因子としてのSurface Integrity	141
11.6	結言	142
第12章	総括	144
謝辞		149
学術論文および学会講演発表		150

第1章 序章

生産工程へのNC工作機械やロボットの導入により、人員の削減や生産性の向上が限界に近い状況にあるような先端的生産工場においても、製品の最終仕上工程は手作業で行われている場合が多く見受けられる。

手作業による仕上工程においては、品質の安定化ならびに仕上げ能力等が問題となり、その機械化、自動化あるいは省力化を考慮することが必要となる。その解決には、専用機の開発という方法も考えられるが、一般的にバレル研磨法の適用を検討すべきであるといわれている¹⁾。

バレル研磨法は、容器（バレル）に工作物とメディアと呼ばれる研磨石ならびに水とコンパウンド（水溶性、洗浄作用、緩衝作用、研磨作用などを調整する洗剤のような化合物）を入れ、容器に回転や振動などの運動を付与することにより、工作物とメディア間に相対運動を誘発させて研磨を行う方法である。すなわち、バレル研磨法は、メディアとバレルに付与する運動形態を選択することにより、バリ取りや梨地面から鏡面までの仕上げ工程に対して幅広い仕上げ能力を持ち、比較的部品の形状や寸法に制限の少ない仕上方法であり、一度に大量の処理が可能であると同時に仕上面が均一に仕上がる等の優れた特性を有しており、量産部品だけでなく多品種少量の部品に対しても極めて有効である。

この研磨方法は、機械部品の表面仕上げばかりでなくバリ取りやエッジ仕上げが同時に行える方法として、機械部品の仕上工程に対して多くの工場で利用されているが、単にバレル研磨機を導入しただけで仕上工程の合理化が行われる訳で

はなく、そのためには工作物に適したバレル研磨法（バレル研磨機械）、メディアおよび研磨条件等を選定しなければならない。しかし、多種類のバレル研磨機械やメディアが開発されているにもかかわらず、そのような選定に関するバレル研磨のノウハウは確立されておらず、経験と勘に頼っているところが多く、専門技術者もほとんど少ないので、必ずしも合理的に実用されているとは限らないのが現状である。

すなわち、バレル研磨は非常に応用範囲の広い仕上方法であるが、同時に研磨条件等の選択因子も多く難しいために、その研磨能力が十分に発揮できないばかりか、その研磨能力の割には余り普及していないように思われる。

一方、最近オゾン層の破壊にからむ洗浄工程におけるフロンの使用禁止や地球温暖化に関するCO₂の削減、廃棄物の焼却処分からリサイクルによる再資源化など、環境対策は環境汚染物質に対する単なる規制から将来を見すえた環境に対する負荷の軽減という一歩進んだ段階へと移行しつつある。

そのため、環境汚染に関する規制は厳しくなる一方であり、科学技術の進歩とともに今まで問題となっていなかったものまでも環境汚染物質と認定されるなど環境問題を考慮しないで、製造することはますます困難になってきており、ISO14000の規定はその典型的な例である。

そのような現状において、工場廃水は古くて新しい問題であるといえる。すなわち、工場廃水も規制基準に適合するように処理して排出していれば良いという状況から、いくら清浄に処理されていても排出することすらはばかれるという状況になりつつある。

バレル研磨では、その加工プロセスにおいてコンパウンドと工作物およびメディアの摩耗粉が混在する廃水の発生は避け難く、そのために多くの工場では高価な廃水処理設備を導入し、適切な処理を行った上で工場外に排出しているのが現状である。

すなわち、このように環境保全に対する社会的要求が厳しくなる中で、バレル研磨の廃水対策としては、最近まで廃水処理の高度化、すなわちより高価な廃水処理設備の導入しか解決方法がなかったのが現状であった。しかし、高分子材料に砥粒を混入して成形した新しいバレル研磨用メディアが開発された²⁾ことにより、従来のセラミックスメディアにない高分子材料特有の弾性によって工作物との接触時にメディア自身が緩衝作用を有するので、その根本的解決方法として水を全く使用しないバレル研磨が提案され、その研磨方法を従来の水を使用する湿式（ウェット）バレル研磨法に対して乾式（ドライ）バレル研磨法と呼んでいる。

この乾式バレル研磨法においては、研磨そのものには水を使用しないので、廃水が発生することはないが、従来のバレル研磨法でも研磨後に洗浄工程があるよ

表1.1 バレル研磨に関する主な研究

年代	研究者	種類	研究 題 目
1952	倉藤 他	回転	回転研磨法の研究（第1報） ²⁾
1956	森菌 他	回転	回転研磨の研究（第2報） ⁴⁾
1957	松永 他	回転	バレル仕上げに関する2, 3の実験（その1） ⁵⁾
1957	松永 他	回転	バレル仕上げに関する2, 3の実験（その2） ⁶⁾
1964	萩生田 他	振動	振動式バレル研磨に関する基礎的研究 ⁷⁾
1979	向山 他	振動	振動バレル加工の加工機構に関する研究 ⁸⁾
1979	Sofronas他	振動	Model development and optimization of vibratory finishing process ⁹⁾
1985	山本 他	振動	振動バレルによるバリ取りの基礎的研究 —リーマ加工のバリとバリ取り因子— ¹⁰⁾
1966	松永	遠心	遠心バレル研磨法 ¹¹⁾
1981	Punamia 他	遠心	Workpiece Kinetics in Centrifugal Barrel Finishing ¹²⁾
1972	楨野 他	流動	研磨加工の自動化研究 ¹³⁾
1994	石田 他	流動	乾式バレル研磨機（ロールフロー）による仕上げ加工 ¹⁴⁾
1993	高沢 他	全体	バレル研磨法によるバリ取りとエッジ仕上げ特性 —作業標準の設定を目指して— ¹⁵⁾

うに乾式バレル研磨法においても洗浄工程が必要な場合もあり、その際に廃水が発生することがある。しかし、その量は従来のバレル研磨法に比べて格段に少なく、バレル研磨の廃水対策としては画期的なものであるといえる。

ここで、バレル研磨法の研究の歴史の概略を振り返ってみると、表1.1に示すようになる。ここに挙げた文献^{2) - 15)}が、バレル研磨の研究の全てではなく、調べきれないほどの多くの報告が国内だけでなく外国においてもなされているが、技術解説的報告が多く研究報告と呼べるものは比較的少ないようである。

我が国における最初のバレル研磨の研究は、1947年頃から倉藤尚雄が精密大量生産法として注目して研究を始め、1952年に発表した回転バレル研磨法に関する研究²⁾であるといわれている。しかし、本研究では水やコンパウンドは使用されておらず、水とコンパウンドを使用する現在の形の回転バレル研磨法に関する研究は、1956年の森菌⁴⁾や1957年の松永^{5)・6)}のものであり、研磨量、仕上面粗さおよび角の丸味まで詳細に検討されており、現在においてもその内容は立派に通用するものである。また、回転バレル研磨法の研究に関しては、

これ以降注目すべき研究報告はほとんど見当たらない。

振動バレル研磨法に関しては、1964年の萩生田の研究⁷⁾や1979年の向山の研究⁸⁾があることはわかっているが詳細は不明である。しかし、1979年のSofronasの研究⁹⁾では、研磨条件として研磨時間、メディア寸法およびバレル振動数を取り上げ、それらと仕上面粗さ、バリ高さおよびエッジ丸味半径の関係が詳しく検討されるとともに、研磨条件と仕上面粗さ等の研磨結果の関係が実験式で明らかにされた。また、1985年の山本の研究¹⁰⁾では、リーマ加工によりバリ取り実験用の標準バリが作製され、バリの大きさと研磨条件の関係について検討されるなど、振動バレル研磨法によるバリ取りの合理化のためのデータが得られるようになってきた。

遠心バレル研磨法に関しては、1966年の松永の研究¹¹⁾につきるといえ、その理論的解析には優れたものがある。また、1981年のPunamiaの研究¹²⁾における理論的解析においても、松永の研究と基本的には同様の結果となっている。しかし、いずれの研究においてもメディア種類やメディア装入率等の研磨条件に関しては十分な検討はなされておらず、今日においても重要な問題の一つである。

流動バレル研磨法に関しては、1972年の楳野の研究¹³⁾にその理論から研磨条件の研磨量や仕上面粗さへの影響まで詳しく検討されており、これを越える研究は今のところない。また、1994年の石田の研究¹⁴⁾は乾式バレル研磨に関する初めての研究であり、砥粒混入ナイロンメディアを用いて乾式で流動バレル研磨を行い、湿式の場合と比較検討したものである。

そして、1993年の高沢の研究¹⁵⁾は氏の1980年以降の十数年にわたるバリ取りに関する成果の一部をまとめた労作であり、バリ取りと仕上げという観点から全てのバレル研磨法に関して検討された数少ない研究の一つである。

これらのバレル研磨の研究は、ほとんどが湿式研磨におけるものであり、1952年の倉藤の研究を除けば、石田の流動バレル研磨に関する研究だけが乾式研磨に関する研究である。

すなわち、前述のようなバレル研磨の廃水処理が重大な問題になりつつある状況においては、湿式から乾式バレル研磨への移行は必要不可欠であるといえる。遠心バレル研磨法は、バレル研磨法の中でも最も研磨能力が優れているといわれている¹⁶⁾ので、セラミックスメディアに比べて自身が緩衝作用を持つために研磨能力が低いと考えられる乾式用メディアの場合には、遠心バレル研磨法における乾式研磨の実用化が最も有望である。

そこで、乾式遠心バレル研磨法の実用化のために、乾式遠心バレル研磨法における研磨条件と研磨特性について検討した。

図1.1は本章を除く本論文の構成を示したもので、各章で取り上げられている内容のつながりをバレル研磨における特性要因図のように示している。

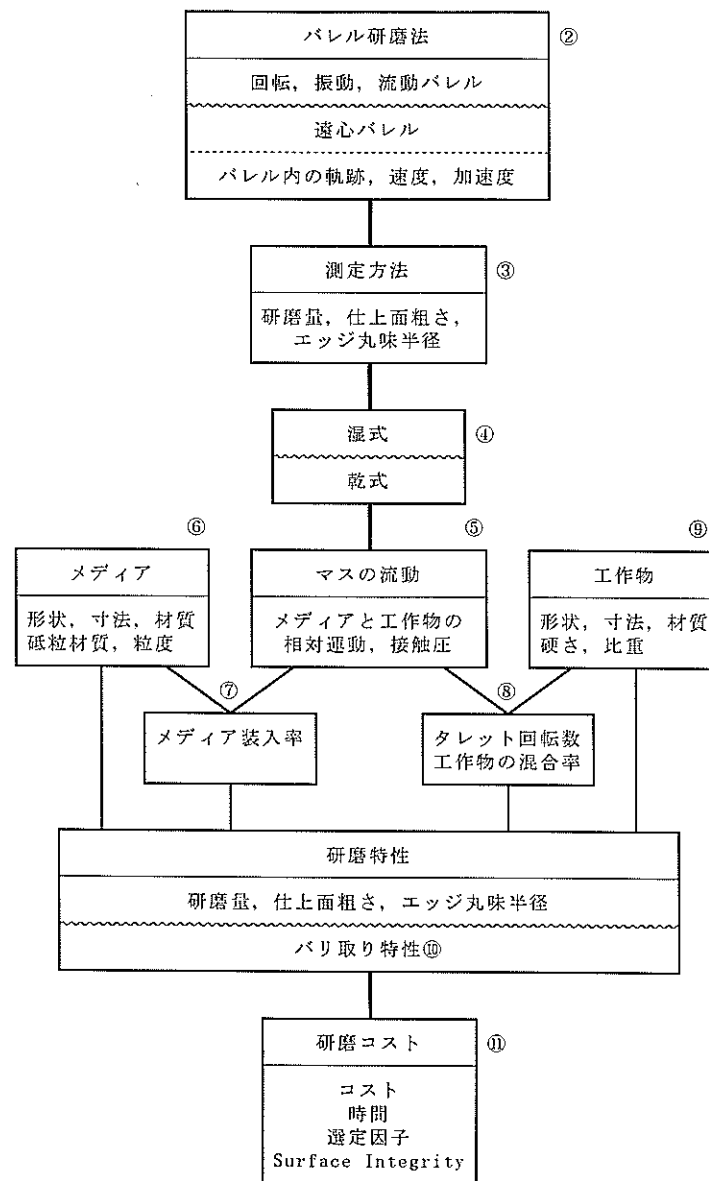


図1.1 本論文の構成 (丸数字は章番号)

本論文は12章より構成され、第2章ではバレル研磨法の種類と特徴について概説するとともに遠心バレル研磨法の理論的解析を行った。第3章では本研究において使用する遠心バレル研磨機、工作物およびメディアについて説明するとともに研磨量や仕上面粗さ等の研磨特性の評価方法について明らかにした。第4章では湿式用メディアを湿式バレル研磨に使用するだけでなく乾式バレル研磨に取って使用するとともに、乾式用メディアでも乾式および湿式バレル研磨も行い、これらの研磨性能を比較することにより、乾式バレル研磨と湿式バレル研磨の研磨性能の相違について検討した。第5章ではメディアと工作物の接触挙動への研磨条件の及ぼす影響という観点から乾式遠心バレル研磨法について検討した。第6章ではアラミド樹脂とナイロンを素材とする乾式バレル研磨用メディアを取り上げ、メディア自身の研磨特性に及ぼす影響について検討した。第7章ではメディア装入率の研磨特性に及ぼす影響という観点から乾式遠心バレル研磨法について検討した。第8章ではタレット回転数およびメディアと工作物の混合率が研磨特性に及ぼす影響という観点から乾式遠心バレル研磨法について検討した。第9章では研磨特性に影響を及ぼす因子はメディア装入率などの運動条件だけでなく、工作物の材質や形状が重要な因子となることが考えられ、工作物自身の因子が研磨特性に及ぼす影響については不明な点が多く残っているので、工作物の特性因子として比重、硬さ、表面積ならびに材質を取り上げ、それらが研磨特性に及ぼす影響について実験的に検討した。第10章では乾式遠心バレル研磨によるバリ取りを試み、本研磨法においてバリ取りが十分に可能であることを明らかにするとともに、研磨条件がバリ取りにおける研磨特性に及ぼす影響について検討した。第11章ではバレル研磨条件の選定は経験と勘で行われている場合が多く、目的に合った最適のバレル研磨が行われているかどうかは不明であるので、第4章のバレル研磨における乾式および湿式の研磨性能を例に取りながら、研磨コストによる研磨条件の選定について検討した。そして、最後に第12章において本研究の結論について論述した。

参考文献

- 1) 高沢孝哉：バリテクノロジー，朝倉書店(1980)100.
- 2) 石田喬男，吉田昭一，河野洋一郎，平賀幹敏：乾式バレル研磨機（ロールフロー）による仕上げ加工，新東技報，No.14(1994)39.
- 3) 倉藤尚雄，須田孝，門脇勤，田中浩：回転研磨法の研究（第1報），精密機械，18(1952)89.
- 4) 森箇玄堂，武山栄作：回転研磨の研究（第2報），自転車生産技術，26，1956年7月.
- 5) 松永正久，萩生田善明，内藤敏：バレル仕上げに関する2，3の実験（その1）生産研究，9(1957)134.

- 6) 松永正久，萩生田善明，内藤敏：バレル仕上げに関する2，3の実験（その2）生産研究，9(1957)305.
- 7) 萩生田善明，内藤敏，松永正久：振動式バレル研磨に関する基礎的研究，金属表面技術，Vol.15, No.5(1961).
- 8) 向山芳世，緒方勲，中込勝利：振動バレル加工の加工機構に関する研究（第1報），山梨大学工学部紀要，29(1979).
- 9) A. Sofronas and S. Taraman: Model development and optimization of vibratory finishing process, INT. J. PROD. RES., 19, 1(1979)23-31.
- 10) 山本章裕，藤尾哲一，三宅輝明：振動バレルによるバリ取りの基礎的研究—リーマ加工のバリとバリ取り因子—，精密機械，51，3(1985)128.
- 11) 松永正久：遠心バレル研磨法，生産研究，18，3(1966)71.
- 12) M. Punamia and P. T. Blotter: Workpiece Kinetics in Centrifugal Barrel Finishing, SME Technical Paper, MR81-406(1981)1.
- 13) 槇野俊文，藤本亮司：研磨加工の自動化研究，自振協技術研究報告，No.2(1972).
- 14) 石田喬男，吉田昭一，河野洋一郎，平賀幹敏：乾式バレル研磨機（ロールフロー）による仕上げ加工，新東技報，No.14(1994)39.
- 15) 高沢孝哉，山崎正雄，北嶋弘一：バレル研磨法によるバリ取りとエッジ仕上げ特性—作業標準の設定を目指して—，神奈川工科大学研究報告，B-18(1993)23.
- 16) チップトン編：バレル研磨の手引

第2章 バレル研磨法

2.1 緒言

バレル研磨法は、ラッピング、バフ加工、噴射加工、超音波加工等とともに遊離砥粒による加工法に分類されている。遊離砥粒による加工法とは、砥粒を結合剤で結合固定した研削砥石などの固定砥粒による加工法と対比したものであり、ここでいう砥粒とは、硬い鉱物質の粒子だけでなく、噴射加工に用いられる金属球やバレル研磨に用いられる研磨石などを包含したものである¹⁾。

この分類は、従来の湿式バレル研磨法に対してなされたものであるが、乾式バレル研磨法にもあてはまる。乾式バレル研磨法と従来の湿式バレル研磨法の相違は、乾式バレル研磨法では水を使用しないということであり、工作物が研磨されるメカニズムは基本的には全く同一である。

すなわち、従来行われている各種バレル研磨法を水を使用せずに実施すれば、すべて乾式バレル研磨法となり、従来のバレル研磨法の種類の数だけ乾式バレル研磨法があることになる。

バレル研磨法に関しては、特に遠心バレル研磨法の機構について、松永が詳細な研究を行っている²⁾が、回転バレル研磨法に比べて研磨機構が複雑になる分だけ解析がより複雑となり、そのためにまだ十分に検討されていないのが現状である。

そこで、本章では、従来のバレル研磨法やメディアについて検討するとともに、バレルの運動という観点から、遠心バレル研磨法の特徴を明らかにする。

2.2 バレル研磨法

バレル研磨法は、バレル（樽）の中に工作物と研磨石を入れ、バレルを回転させて工作物と研磨石に相對運動を与えることにより研磨を行ったことに始まると考えられるが、現在ではバレル研磨に樽が使われることはなく、八角柱や円柱の容器あるいは各種形状の槽に工作物と研磨石を入れ、何らかの方法で工作物と研磨石に相對運動を与えることにより研磨を行っている。バレル研磨法は、そもそも米語のバレルフィニッシング (barrel finishing) を翻訳したものであるが、その発展にともなって、米国ではマスフィニッシング (mass finishing) と呼ばれることの方が多いようである。

バレル研磨法に関する最初の文献は、1891年のH. W. PATERRSONらの米国特許第464,584号“APPARATUS FOR POLISHING SHEARS”（はさみ用研磨装置）であるといわれている。これは、図2.1に示すように研磨石で満たされた槽に蓋をするようにはさみの取り付けられた円盤を配置し、円盤を回転することにより、はさみの柄の部分の研磨するもので、現在のジャイロ研磨法の原型であると考えられる。さらに、1920年には図2.2に示す回転バレル研磨機の特許をH. C. HARTが取得したといわれているが、これはガラ研磨やタンブリング (tumbling) と呼ばれるもので、第二次世界大戦中に米国でさらにこれが精密化されて、今日見られる回

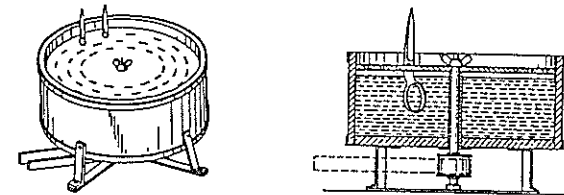


図2.1 はさみ用研磨装置

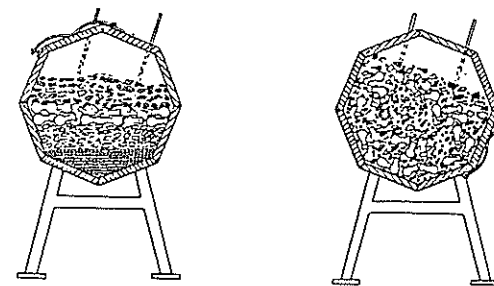


図2.2 回転バレル研磨機

転バレル研磨法となった³⁾。

わが国においては、戦後これらの技術が導入されるにいたり、1960年頃になると文献の発表⁴⁾や各種バレル研磨機の開発が盛んに行われ、急速にバレル研磨技術が進歩するとともに普及するようになり、今日に至っている。

バレル研磨法の発展の原動力は、当時の大量生産の要求に適合した特徴にあるものと考えられている。

すなわち、

- (1) 大量の工作物を同時に均一に仕上げることができる。
- (2) スケール取りなどの粗仕上げから光沢仕上げまでの広範囲の研磨が可能であり、表面とエッジの仕上げが同時にできる。
- (3) 比較的高度な加工が簡単な装置ででき、コストも低い。
- (4) 工作物の投入と排出を除けば、研磨作業には人手を必要としない。

ということである。しかし、欠点としては、

- (1) 最適な研磨条件の選定が難しい。
- (2) 選択的な加工は難しい。
- (3) 不適切な条件で研磨すると、工作物の全てが不良品となる。

ということが考えられ、研磨条件の選定はバレル研磨において非常に重要となっている。

2.3 バレル研磨用メディア

メディア (media) とは、媒介物、中間というような意味を持つ “medium” の複数形の米語であり、バレル研磨では、文字どおり工作物と工作物の中間に位置し、工作物相互の接触による傷の発生を防止するとともに、バレルの運動を媒介し研磨作用を行うものである。

バレル研磨用メディアとして、当初は花崗岩、石灰石、大理石、ケイ石、砂などの天然産の不定形研磨石が使用されていた。しかし、これらのメディアは破碎し易く、工作物に損傷を与えたり、均一な仕上げが得られないなどの欠点があったため、最近では全く使用されておらず、バレル研磨用に開発されたメディアのみが使用されている。その主要なメディアについて以下に述べる⁵⁻⁷⁾。

2.3.1 成形メディア

成形メディアは、その成形方法によって焼成メディアと焼結メディアに分けられる。しかし、成形メディアといえは、一般に焼成メディアを指すことが多く、焼結メディアは微小切削研磨石もしくは微小切削用メディアとして、分けられることもある。

焼成メディアは、アルミナ砥粒 (Al_2O_3) をビトリファイド結合剤を用いて、加熱・成形したもので、球状、三角柱状あるいは円柱状などの多くの形状・寸法のものがある。また、焼成メディアは研磨作用に優れ、寿命が長く、工作物に大きな擦過痕をつけないなどの特徴があり、スケール取り、バリ取りなどの粗仕上げからメッキの下地処理などの細仕上げまで広範囲に使用されている。

焼成メディアがよく使用される理由としては、砥粒の材質・粒度、研磨石としての構成組織・結合度ならびに形状・寸法などの選択範囲がきわめて広く、多種多様なメディアが市販されていることが考えられる。

焼結メディアは、アルミナの微粉末 (粒径 $5\mu m$ 以下) をほとんど結合剤を用いずに高温で焼結させたもので、単一微小結晶粒の緻密焼結体であり、メディア全体が砥粒で構成されている。すなわち、焼結メディアの場合、微小な砥粒が微小なピッチで並んでいる状態で研磨が行われると考えられるので、個々の砥粒による研磨量は小さく、良好な仕上面が得られ、しかも個々の砥粒の研磨量は少ないが、作用砥粒数は多くなるので、小さなメディアでも比較的大きな研磨量が得られるという特徴がある。このため、研磨量と仕上面粗さを同時に要求する工程に対しては大きな効果を発揮する。

2.3.2 金属メディア

金属メディアは、その材質によって使用目的が異なる。すなわち、工作物より硬い金属メディアは、バニッシングによる光沢仕上げに利用され、工作物より軟らかい金属メディアは、微粉研磨材と一緒に研磨仕上げに利用される。この場合の金属メディアは研磨材を保持し、研磨作用力を向上させるためのものである。

バニッシング用のメディアとしては、スチールボールが最も多く、アルミニウム合金、ステンレス鋼、銅合金などの光沢仕上げに使用される。また、研磨用のメディアとしては亜鉛または銅が主として使用され、微粉研磨材を含んだコンパウンドと併用される。

2. 3. 3 有機質メディア

有機質メディアは、竹、くるみ、木片、とうもろこしの穂軸 (corn cob) などを適当な寸法に成形または粉碎し、油脂を付けて、アルミナや酸化クロムなどの研磨材をコーティングしたものである。主に、合成樹脂 (ポタン、ツマミなどの裝飾部品や眼鏡枠など) や樹脂浸透の強化木製品の光沢仕上げに使用される。

2. 3. 4 プラスチックメディア

プラスチックメディアは、合成樹脂を結合剤として砥粒とともに成形したものであり、成形メディアに分類されるが、メディア自身の特徴を最も良く示していることより「プラスチックメディア」と呼ばれることが多い。

プラスチックメディアは、非鉄合金、特に亜鉛、アルミニウム合金のような軟質金属の仕上げに利用され、比重が小さいので工作物に加工硬化を生じることもほとんどなく、加工中の騒音や振動も比較的少ない。また、目詰まりや破砕が少なく化学的に安定しているという特徴がある。

2. 3. 5 乾式研磨用メディア

これまでに述べてきたメディアは、有機質メディアを除いて全て湿式、すなわち水と一緒に用いられるものであり、使用法で分類すれば、有機質メディアは乾式研磨用メディアになる。また、乾式研磨用メディアは、プラスチックで砥粒を成形したものであるから、組成で分類すればプラスチックメディアになる。しかし、ここでいう乾式研磨用メディアとは、湿式バレル研磨と同等の研磨を乾式で行うことを目標として開発されたメディアのことであり、有機質メディアやプラスチックメディアとは研磨性能は全く異なることにより、別種のものとして分類する。

また、有機質メディアは合成樹脂の光沢仕上げ、プラスチックメディアは軟質金属の仕上げに用いられているが、乾式研磨用メディアは湿式バレル研磨における焼成メディアの性能、すなわち一般鋼材部品の粗仕上げから細仕上げまでの広範囲の研磨を乾式で目指すものであるといえる。

なお、詳細は次章において述べる。

2. 4 バレル研磨法の種類と特徴

バレル研磨法は、バレル (正確には工作物とメディアの入った槽) あるいは工作物もしくはメディアに様々な運動を与えることによって、工作物とメディア間に相対運動を生じさせて研磨する方法である。その運動の与え方や組合せによって多くの方式が考えられているが、ここでは代表的な研磨法について簡単に述べる⁵⁻⁷⁾。

2. 4. 1 回転バレル研磨法

回転バレル研磨法は、図2.3に示すようにバレル内に工作物、メディア、水、コンパウンドを装入し、バレルに回転運動を与えることによってマスの表層部に滑りを発生させる (マスが流動する) ことにより、工作物とメディアに相対運動を生じさせ、その摩擦作用により研磨する方法である。回転バレル研磨法においては、このマスの表層部の流動層において研磨が行われるので、この流動層の深さと長さが大きいほど研磨能率が良いことになる。そのため、一般的にはバレル容積の50~60%の装入量で研磨が行われる。

ここで、コンパウンド (compound) とは、「化合物」という意味であるが、バレル研磨においては、研磨におけるケミカル効果を促進するために使用される化学薬品の総称であり、潤滑作用、洗浄作用、防錆作用等の効果があり、工作物の材質やメディアの種類、研磨の目的などに応じて使用される。

また、マス (mass) とは、「(定まった形のない) 塊、集団、質量」という意味であるが、バレル研磨においては、バレル内で形成される工作物とメディアの集合体のことであり、マスが流動することによって工作物とメディア間に相対速度を生じ、研磨されることになる。

2. 4. 2 振動バレル研磨法

振動バレル研磨法は、研磨槽内に工作物、メディア、水、コンパウンドを装入し、バレルに振動を付与することにより、マスを流動させて研磨する方法である。図2.4に示すように研磨槽の形状によりサークル型とボックス型にわけられるが、前項の回転バレル研磨法におけるマスの流動は表層のみであるのに対して、振動バレル研磨法においてはマス全体が流動するので、研磨能率は回転バレル研磨法の3~5倍になるといわれている。

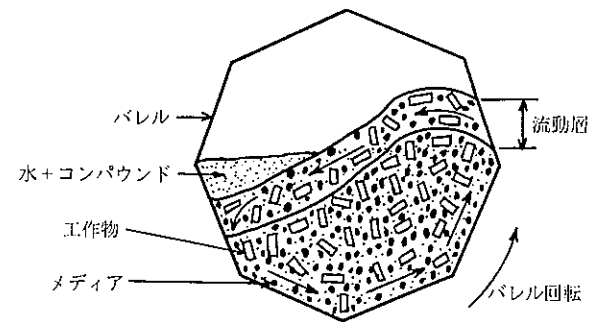


図2.3 回転バレル研磨におけるマスの流動

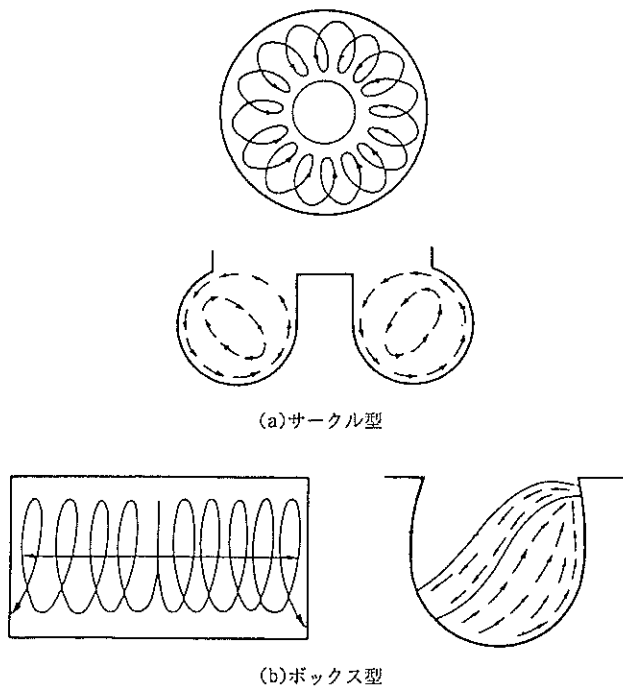


図2.4 振動バレル研磨におけるマスの流動

2.4.3 遠心バレル研磨法

遠心バレル研磨法は、回転バレル研磨法においてバレルを高速回転させたときにマスがバレル内壁に遠心力で固着して流動しなくなるため、研磨できなくなるという現象を解消し、研磨能率を向上させるために考案されたもので、図2.5に示すようにタレットと呼ばれる回転円盤に偏心させてバレルを取付け、タレット回転数と適当な比率の回転数で自転させると、バレル内のマスは遠心力により、タレット回転中心より最も離れたバレル内の位置に移動するので、タレットとバレルの回転にともなって、マスの表層はバレルの回転方向に流動し、工作物とメディアの間に相対運動が発生し、研磨されるという方法である。この場合、回転バレル研磨法のように、バレル回転数を高速にしてもマスが流動しなくなることはないので、タレットとバレルの回転数の比率さえ一定にしておけば、回転数をいくらかでも上昇させることができるので、研磨能率はいくらかでも高くすることが

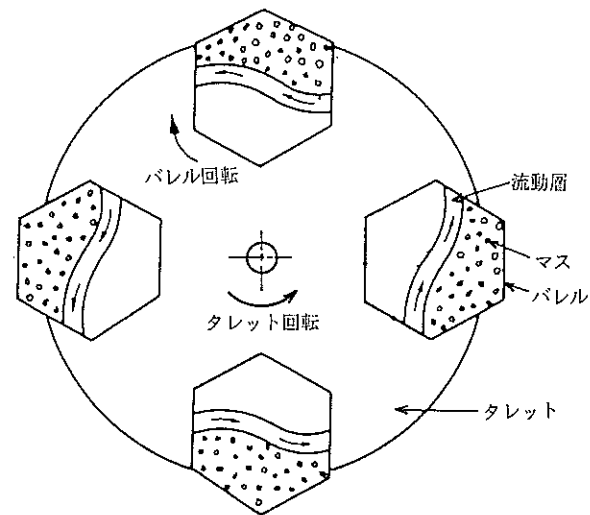


図2.5 遠心バレル研磨におけるマスの流動

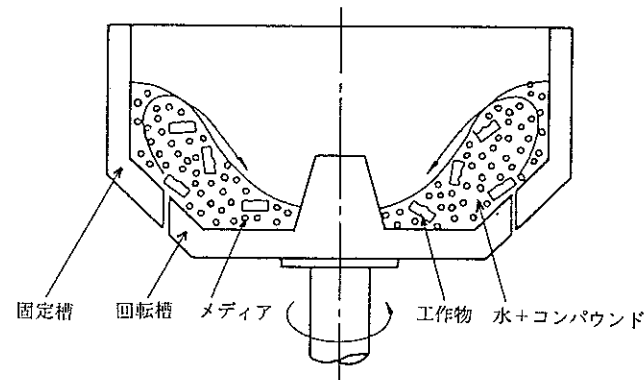


図2.6 流動バレル研磨におけるマスの流動

できることになる。しかし、現実には装置やメディアの強度に限界があり、その研磨能率は回転バレル研磨法の60倍程度にはなるといわれている。

2.4.4 流動バレル研磨法

流動バレル研磨法は、図2.6に示すように研磨槽の側壁を固定して底部を回転させると、マスは遠心力によって側壁の方向に押し出され、側壁に沿って上部に

向かうが、側壁の摩擦抵抗と重力によってやがて側壁から離れて底部に向かって滑り、底部に達すると再び遠心力により側壁の方向に押し出されるというマスのらせん状運動により発生する工作物とメディアの相対運動を利用して研磨する方法である。また、研磨能率は遠心バレル研磨法と振動バレル研磨法の間位置するといわれている。

2. 4. 5 その他のバレル研磨法

その他のバレル研磨法として、ジャイロ研磨法とレシプロ研磨法がある。

ジャイロ研磨法は、図2.7に示すように軸に取付けられた工作物をメディア、水、コンパウンドの入った研磨槽に挿入し、研磨槽と軸を同時に回転させ研磨する方法である。

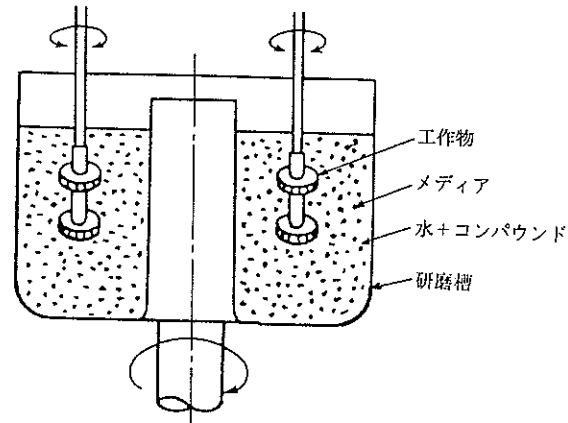


図2.7 ジャイロ研磨法

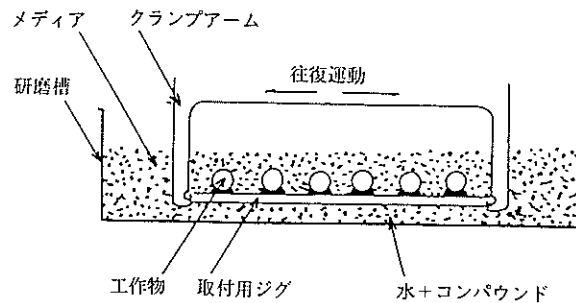


図2.8 レシプロ研磨法

また、レシプロ研磨法は、図2.8に示すようにメディア、水、コンパウンドの入った研磨槽に取付用ジグに固定した工作物を挿入し、往復運動を与えることによって研磨する方法である。

実際のバレル研磨においては、さらに多くの方法で行われているが、これまで述べてきた工作物とメディアの運動方向を変えたり、組み合わせせたりしたものであり、基本的には以上に述べたいずれかに分類されることになる。

2. 5 乾式遠心バレル研磨法

バレル研磨法の種類については、従来の方法、すなわち主として湿式で行われているものについて述べてきたが、乾式研磨用メディアを使用することによって、いずれのバレル研磨方法でも乾式で研磨することは可能であるので、乾式遠心バレル研磨法は、従来の遠心バレル研磨機を使用し、研磨槽に工作物と乾式研磨用メディアを装入して研磨する方法ということになる。

遠心バレル研磨法は、湿式のバレル研磨法の中で最も研磨能率が良いといわれている。このことは、工作物が最も良く研磨されると同時にメディアも最も良く摩耗するということになり、遠心バレル研磨での使用に耐えれば乾式研磨用メディアも寿命という観点においては、他のバレル研磨方法でも十分に使用が可能ということになる。さらに、乾式遠心バレル研磨法は、他のバレル研磨法を用いて乾式研磨を行うよりも、乾式でバレル研磨を行う場合の研磨特性がより明確に現れると考えられる。

2. 6 遠心バレル研磨におけるマスの流動

バレル研磨法においては、バレル(研磨槽)の運動を介してマスに運動を付与することにより、工作物とメディアの間に相対運動を発生させ、研磨を行うので、マスのバレル内での流動が研磨特性に重大な影響を与える。

遠心バレル研磨法は、他のバレル研磨法に比べて、バレルの運動そのものが複雑であり、そのバレル内のマスの流動の解明には、まずバレルの運動そのものについて明らかにする必要があるので、バレル内の軌跡、速度、加速度という観点から検討する。

2. 6. 1 バレル内の軌跡

遠心バレル研磨は、2.4.3項において述べたようにタレットと呼ばれる回転円板上に、回転バレルが取付けられている形態であるので、バレルは自転しながらタレットの中心に対して公転していることになる。

そこで、図2.9に示すようにタレットの回転中心を原点として、タレットの回転中心からバレルの回転中心までの距離を r_0 、バレルの中心から点Pまでの距離を r 、タレットの回転角速度を ω_0 、バレルの回転角速度を ω とし、時間 t 後の点Pの位置を求めると、

$$\begin{aligned}x &= r_0 \cos \theta_0 + r \cos (\theta + \theta_0) \\y &= r_0 \sin \theta_0 + r \sin (\theta + \theta_0)\end{aligned}$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned}\theta_0 &= \omega_0 t \\ \theta &= \omega t\end{aligned}$$

である。

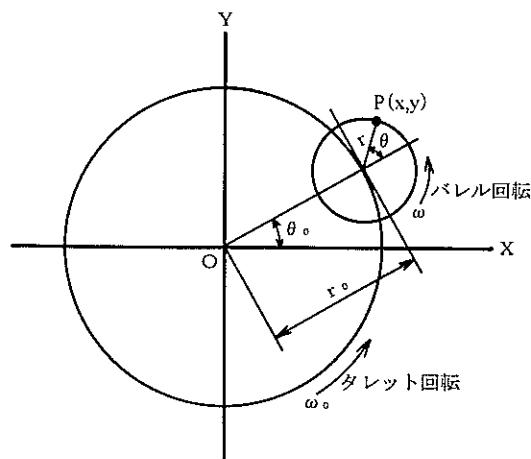


図2.9 軌跡計算のための座標

ここで、

$$\theta = (\omega / \omega_0) \theta_0$$

であり、回転比として

$$R_N = \omega / \omega_0$$

半径比として

$$R_r = r / r_0$$

を定義すると、時間 t 後の点Pの位置は

$$\begin{aligned}x &= r_0 [\cos \theta_0 + R_r \cos (1 + R_N) \theta_0] \\y &= r_0 [\sin \theta_0 + R_r \sin (1 + R_N) \theta_0]\end{aligned}$$

となり、 θ_0 だけの関数となるので、 θ_0 を $0 \sim 2\pi$ と変化させるとタレットが1回転したときの点Pの軌跡が求められる。

図2.10は、 $R_r = 0.5$ とし R_N を変化させた場合のタレットが1回転したときの点Pの軌跡を求めたものであり、 R_N によって、タレットが1回転したときのバレル内の点の軌跡は様々な形態を示し、特に R_N が0と-1の場合、軌跡は円を描くことがわかる。

また、図2.11は R_N に対するタレットが1回転したときの点Pの描く軌跡の長さを求めたものである。特に R_N が0と-1の場合、軌跡の長さは、タレットの回転中心からバレルの回転中心までの距離 (r_0) のそれぞれ1.5倍と1倍の半径の円周に相当することがわかる。

本研究で使用する遠心バレル研磨機の場合、 $R_N = -1$ であり、 $r_0 = 160\text{mm}$ 、 $r = 60\text{mm}$ (容器は正八角形なので外接円の半径) であるので、 $R_r = 0.375$ となる。この場合、 $R_r = 0.5$ ではないが、図2.10から明らかなように $R_N = -1$ の場合は、バレル半径 (r) にかかわらず、 r_0 の半径の円周を描くので、タレットが1回転すると軌跡の長さは、約 1m ($2\pi \times 160\text{mm}$) となる。

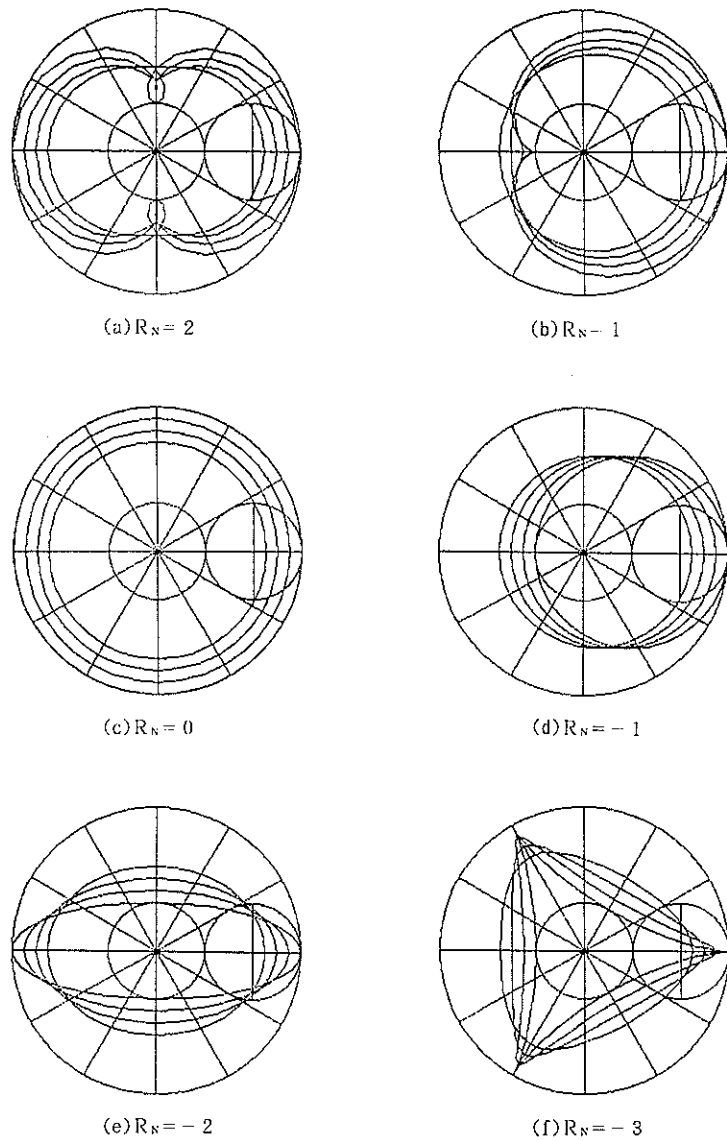


図2.10 遠心バレル研磨における軌跡 ($R_r = 0.5, r_0 = 1$)

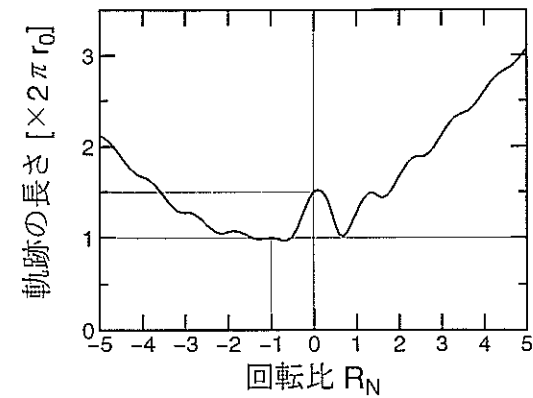


図2.11 回転比と軌跡の長さの関係 ($R_r = 0.5$)

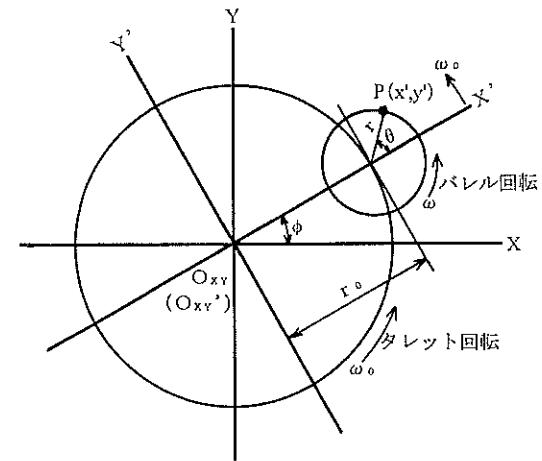


図2.12 速度・加速度計算のための座標

2.6.2 バレル内の速度

タレットとバレルの運動において、図2.12に示すようにタレットの回転中心を原点とする絶対座標 (O_{xy}) に対してタレットの回転中心を原点としてタレットの回転角速度と同一の角速度で回転する運動座標 ($O_{xy'}$) を考え、タレットとバレルの回転中心の距離を r_0 とすると、バレルの運動は原点から r_0 の位置での

半径 r の等速回転運動に置き換えることができる。

この2つの座標系において、絶対座標と運動座標が重なった瞬間 ($\phi = 0$) の位置 $P(x', y')$ の絶対速度 (V) と相対速度 (V') の関係は、

$$V_x = V_x' - \omega_0 y' \quad (V \text{ の } X \text{ 方向成分})$$

$$V_y = V_y' + \omega_0 x' \quad (V \text{ の } Y \text{ 方向成分})$$

となる⁸⁾。

ここで、図2.12に示すようにパレルの回転中心からの距離 r 、 X' 軸から θ の位置 $P(x', y')$ の速度を求めると、

$$V' = r \omega$$

であるので、

$$V_x = -r \omega \sin \theta - r \omega_0 \sin \theta$$

$$= -(\omega + \omega_0) r \sin \theta$$

$$V_y = r \omega \cos \theta + \omega_0 (r_0 + r \cos \theta)$$

$$= (\omega + \omega_0) r \cos \theta + \omega_0 r_0$$

となる。

ここで、タレットの回転角速度 ω_0 、パレルの回転角速度 ω 、タレットの回転中心からパレルの回転中心までの距離 r_0 が決まると、 r と θ を変化させることによりパレル内の任意の位置の速度を求めることができる。

また、上式に半径比 $R_r (r/r_0)$ と回転比 $R_N (\omega/\omega_0)$ を導入すると、

$$V_x = -r_0 \omega_0 R_r (1 + R_N) \sin \theta \quad (2-1)$$

$$V_y = r_0 \omega_0 [R_r (1 + R_N) \cos \theta + 1] \quad (2-2)$$

となる。

図2.13は、 $R_r = 0.5$ とし R_N を変化させた場合の速度分布を示す。

一般に、 R_N の絶対値が大きいくほど、パレルの自転の影響が速度成分に現れるので、速度分布は回転パレルの場合に近づくが、 $R_N = -1$ のときパレル内の速度が全て同一の大きさで同一方向を向いていることに注目する必要がある。

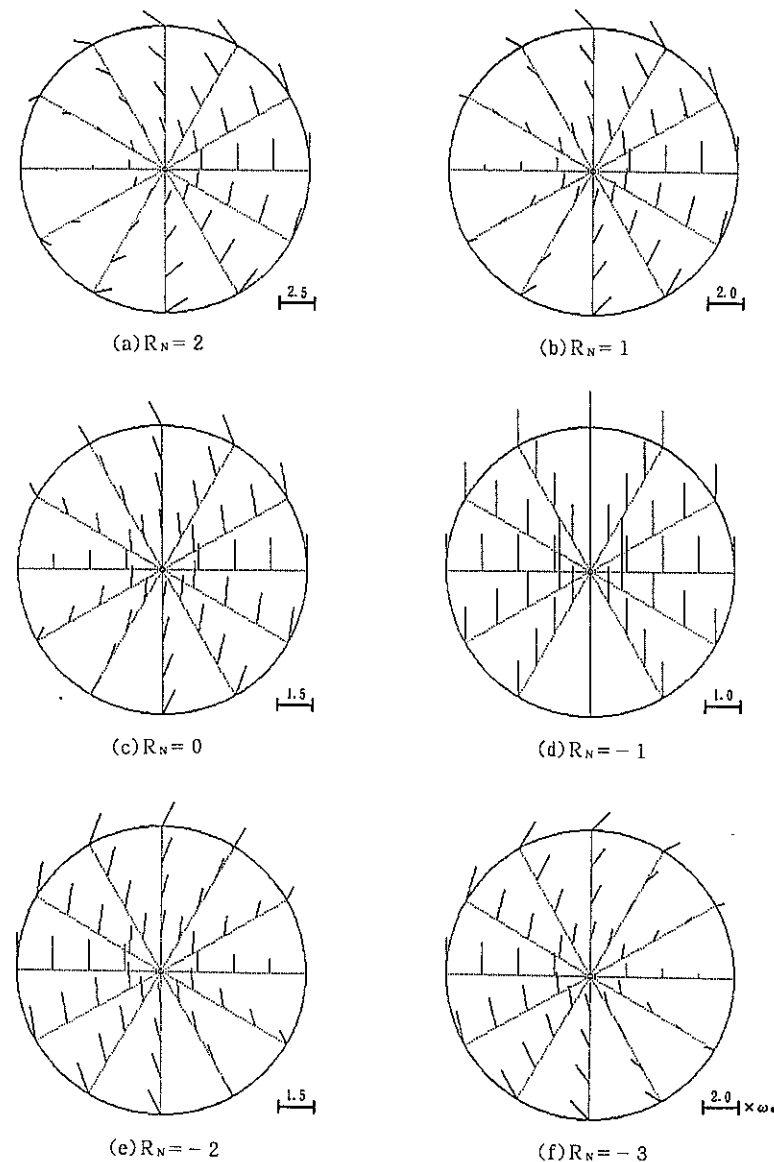


図2.13 遠心パレル研磨における速度分布 ($R_r = 0.5$, $r_0 = 1$)

これは、 $R_N = -1$ を(2-1)、(2-2)式に代入すると、 $V_x = 0$ 、 $V_y = r_0 \omega_0$ となり、 R_r には無関係であることからわかる。すなわち、 $R_r = r / r_0$ であり、 r はバレルの回転中心からの距離であるので、 R_r は無関係であるということは、 r に依存しないことであり、バレル内の速度はバレル内の位置にかかわらず、同一となる。

本研究で使用する遠心バレル研磨機の仕様も $R_N = -1$ であるので、図2.13に示すようにバレル内の速度分布のX軸方向成分は0であり、しかもバレル回転中心からの距離(r)にかかわらず、Y軸方向成分は同一の大きさ($r_0 \omega_0$)となる。

図2.14は、本研究において使用する遠心バレル研磨機のタレット回転数が増化したときのバレル内の速度を求めたものであり、タレット回転数の増大にともなってバレル内速度も比例的に増加しており、タレット回転数が本研磨機の最大である 240 min^{-1} では、バレル内速度は約 4 m/sec となることがわかる。

2.6.3 バレル内の加速度

バレル内の速度の場合と同様に絶対加速度(α)と相対加速度(α')の関係を求めると、

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \alpha_x' - \omega_0^2 \cdot x' - 2\omega_0 \cdot V_y' & (\alpha \text{のX方向成分}) \\ \alpha_y &= \alpha_y' - \omega_0^2 \cdot y' + 2\omega_0 \cdot V_x' & (\alpha \text{のY方向成分}) \end{aligned}$$

となる⁹⁾。

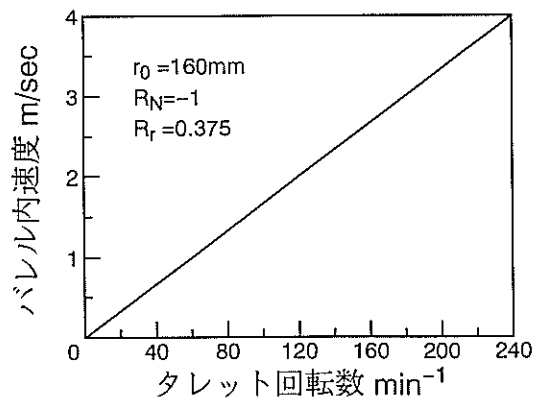


図2.14 タレット回転数とバレル内速度の関係

ここで、図2.12に示すようにバレルの回転中心からの距離 r 、 X' 軸から θ の位置 $P(x', y')$ の加速度を求めると、

$$\alpha' = r \omega^2$$

であるので、

$$\begin{aligned} \alpha_x &= -r \omega^2 \cos \theta - \omega_0^2 (r_0 + r \cos \theta) - 2\omega_0 r \omega \cos \theta \\ &= -r \cos \theta (\omega + \omega_0)^2 - r_0 \omega_0^2 \\ \alpha_y &= -r \omega^2 \sin \theta - \omega_0^2 r \sin \theta + 2\omega_0 (-r \omega \sin \theta) \\ &= -r \sin \theta (\omega + \omega_0)^2 \end{aligned}$$

となる。

ここで、タレットの回転角速度 ω_0 、バレルの回転角速度 ω 、タレットの回転中心からバレルの回転中心までの距離 r_0 が決まると、 r と θ を変化させることによりバレル内の任意の位置の速度と加速度を求めることができる。

また、上式に半径比 R_r と回転比 R_N を導入すると、

$$\alpha_x = -r_0 \omega_0^2 [1 + R_r (1 + R_N)^2 \cos \theta] \tag{2-3}$$

$$\alpha_y = -r_0 \omega_0^2 R_r (1 + R_N)^2 \sin \theta \tag{2-4}$$

となる。

図2.15は、 $R_r = 0.5$ とし R_N を変化させた場合の加速度分布を示したものである。

加速度も速度の場合と同様に、 R_N の絶対値が大きいくほど加速度分布は回転バレルの場合に近づき、 $R_N = -1$ のときにバレル内の加速度が全て同じ大きさで同一方向を向いていることがわかる。

これは、 $R_N = -1$ を(2-3)、(2-4)式に代入すると、 $\alpha_x = -r_0 \omega_0^2$ 、 $\alpha_y = 0$ となり、加速度は R_r には無関係であることからわかる。すなわち、本研究で使用する遠心バレル研磨機の仕様も $R_N = -1$ であるので、図2.15に示すようにバレル内の加速度分布のY軸方向成分は0であり、しかもバレルの回転中心からの距離(r)にかかわらず、X軸方向成分は同一の大きさ($-r_0 \omega_0^2$)となる。図2.16は本研究において使用する遠心バレル研磨機のタレット回転数が増化したときのバレル内の加速度を求めたものであり、タレット回転数の増大にと

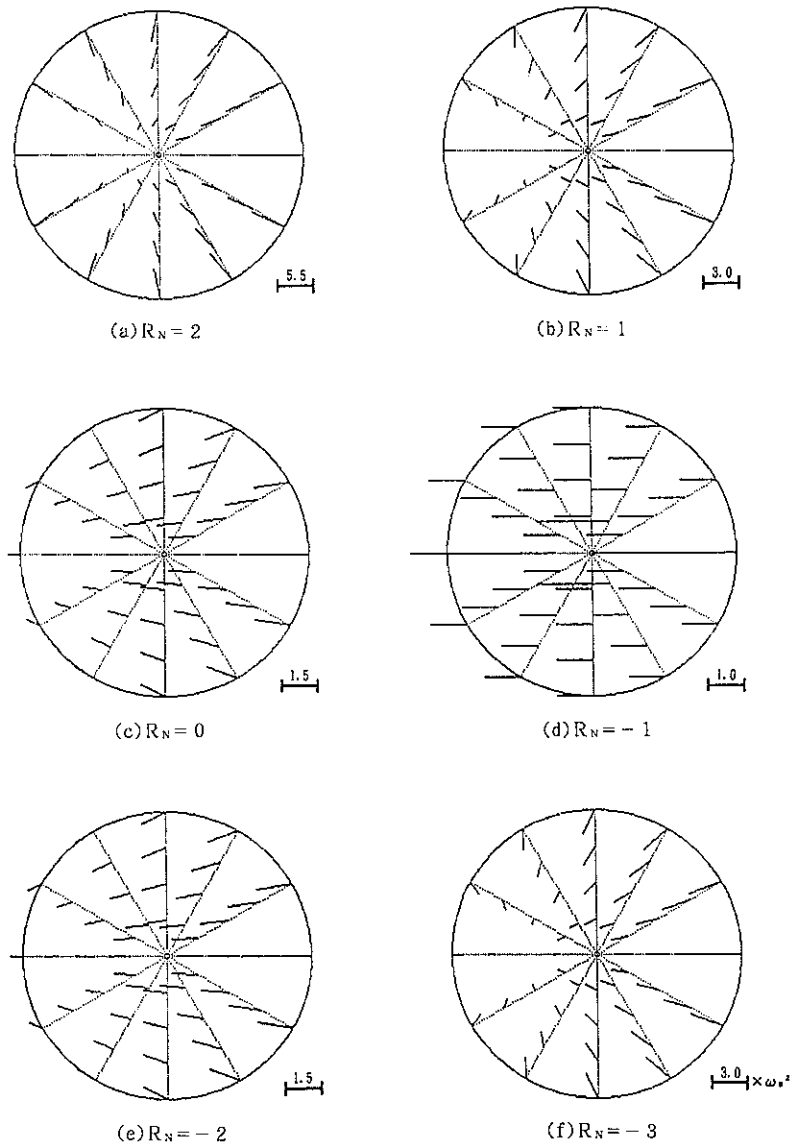


図2.15 遠心バレル研磨における加速度分布 ($R_r = 0.5$, $r_0 = 1$)

もなってバレル内加速度も二次曲線的に増加しており、本研磨機の最大能力であるタレット回転数が 240 min^{-1} では、バレル内加速度は約 100 m/sec^2 であり、重力加速度 (G) の約 10 倍になっていることが明らかである。

回転バレル研磨法においては、回転による加速度が重力の加速度より大きくなると、バレルとバレル内の工件物と研磨石 (マス) が共回りを起こして研磨できなくなることを述べたが、遠心バレルの場合には一般に回転による加速度の方が重力による加速度より大きくなるので、重力の加速度よりも回転による加速度の向きの方が重要になる。すなわち、図2.15における回転比 R_N が $2, 1, -3$ の場合の加速度はバレルのいずれの位置においてもバレルの内側に向かっており、遠心力

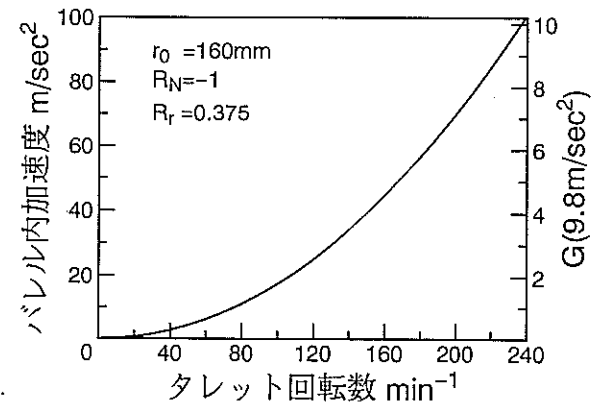


図2.16 タレット回転数とバレル内加速度の関係

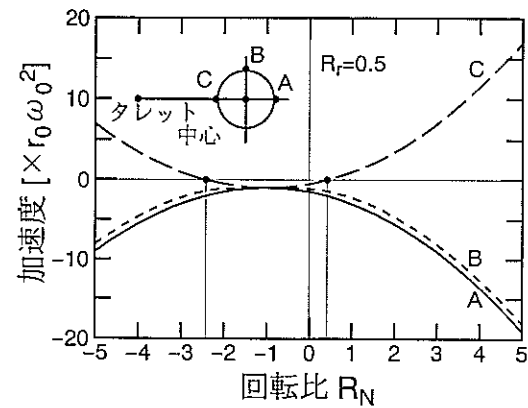


図2.17 回転比と加速度の関係 ($r_0 = 1$, $\omega_0 = 1$)

はその反対方向に作用するので、マスはバレル内壁の全周において内壁側に押し付けられ、バレルと一体となって回転することになる。

図2.17は、 $R_r = 0.5$ として R_N を変化させた場合のバレルの各位置の加速度を求めたものである。

バレルのA部の加速度は、 R_N の全域にわたってマイナスとなっている。図2.15で示したようにバレルのA部とC部で加速度のX方向成分の向きが異なり共回りを起こすので、バレルのC部において加速度がプラスとなっている範囲では共回りを起こしてうまく研磨できないということになり、マイナスとなっている R_N が約-2.5~0.5の範囲で研磨が可能ということになる。

すなわち、共回りの発生しない条件について、さらに一般化すると、バレルのA部とC部で加速度のX方向成分 α_x の符号が変化しないということになり、A部は $\theta = 0$ であるので、A部での加速度のX方向成分を α_{xA} とすると、

$$\alpha_{xA} = -r_o \omega_o^2 [1 + R_r (1 + R_N)^2]$$

となる。

ここで、

$$r_o \omega_o^2 > 0, R_r (1 + R_N)^2 \geq 0$$

であるので、

$$\alpha_{xA} < 0$$

であることがわかる。

同様にC部は $\theta = \pi$ であるので、

$$\alpha_{xC} = -r_o \omega_o^2 [1 - R_r (1 + R_N)^2]$$

となり、共回りの発生しない条件は、A部と同じ

$$\alpha_{xC} \leq 0$$

となる。

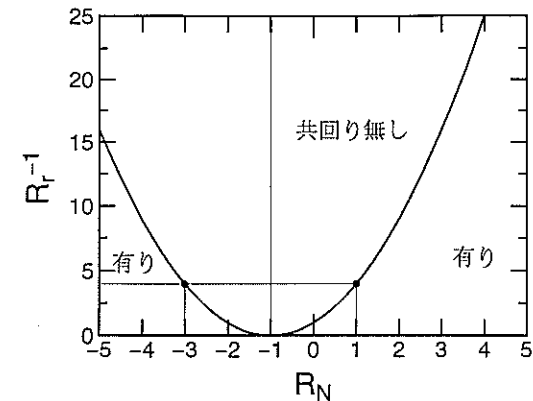


図2.18 タレットとバレルの回転比と径比の関係

ここで、

$$r_o \omega_o^2 > 0$$

であるので、

$$1 - R_r (1 + R_N)^2 \geq 0 \tag{2-5}$$

となり、これがより一般的な共回りの発生しない条件となる。

図2.18は、上式を共回りの発生におけるタレット回転数に対するバレル回転数の比(R_N)とタレット径に対するバレル径の比の逆数($1/R_r$)の関係として示したものである。

例えば、タレット径に対するバレル径の比の逆数を

$$R_r^{-1} = (r_o / r) = 4$$

とすると、共回りの発生しないタレット回転数に対するバレル回転数の比(回転比)の領域は、

$$-3 \leq R_N = (\omega / \omega_o) \leq 1$$

となることがわかる。

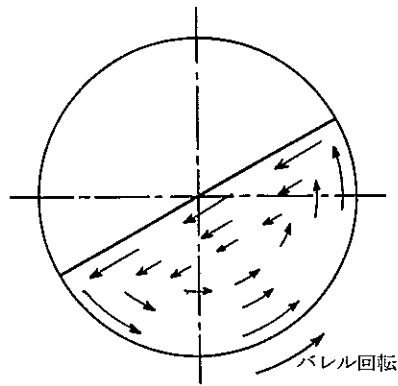


図2.19 回転バレル研磨におけるマスの流動状態

2.6.4 バレル内のマスの流動

図2.19は、回転バレル研磨におけるマスの流動状態を示したものである。

バレル下部の内壁近傍のマスは、バレルの回転にともなって摩擦力により引き上げられるが、マスに作用する摩擦力は、マスが引き上げられるとともに減少するため、重力との関係によってマスは回転する内壁から離れ、その自由表面に沿って滑り落ちて再びバレル下部の内壁に到達する。すなわち、マスは、バレル内壁に沿った摩擦力による上方への束縛運動と重力によるマス表面の下方への滑り運動により循環していることになる。このマスの循環過程における工作物とメディアの相対運動によって、研磨作用が行われることになる。

また、マスが内壁から離れて下方へ滑り始める位置は、バレルの回転速度やマスの容積等の影響を受ける。

図2.20は、遠心バレル研磨におけるタレットとバレルの回転によるマスの流動状態を示したものである。

回転比が0の場合、図2.15の加速度分布によれば共回りをしない条件の範囲内に入っているが、実際にはバレルが自転しないのでバレルとマスの位置関係に変化はなく、タレットの回転にともなう遠心力によってマスは図のようにバレル内壁に固着して、流動は発生しない。そのため、マス内の工作物とメディアには相対運動が存在しないので研磨できないことになる。

回転比が-1の場合、タレットが1回転するとバレルはその反対方向に1回転しているため、タレットは回転しているが、バレルはあたかも回転（自転）していないように見える。バレル内のマスは、バレル内壁との摩擦力によって内壁と

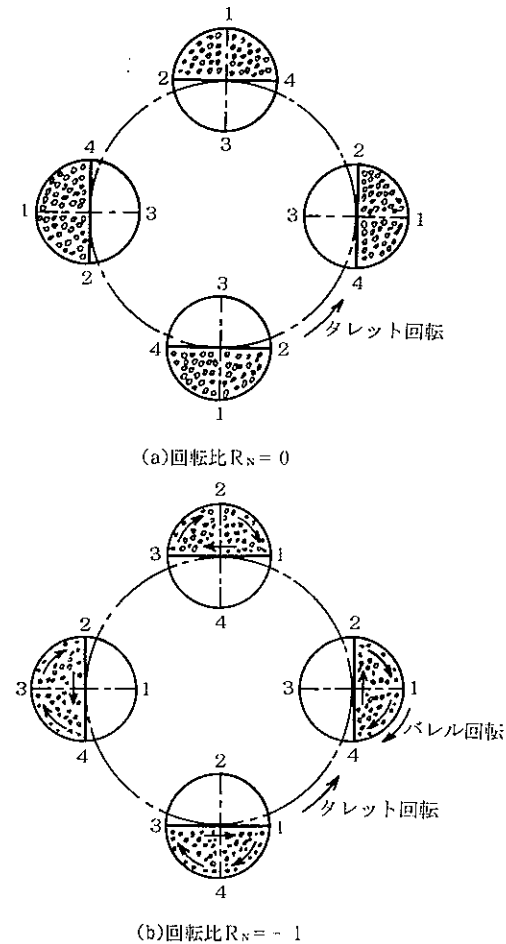


図2.20 遠心バレル研磨におけるマスの流動状態

ともに回転しようとするが、図2.15の加速度分布から明らかなように、バレル内の遠心力はタレットの回転中心から遠ざかる方向に作用しているため、常にタレット回転中心からより遠い方のバレル内壁に押し寄せられるようになる。これは、回転バレル研磨における重力の役割を遠心バレル研磨においては遠心力が果たしていると考えれば容易に理解できる。

すなわち、バレル内壁近傍のマスは、摩擦力によって内壁とともに回転しよう

とするが、マス全体としては遠心力によって、常にバレル内のタレット回転中心からより遠い方の位置に留まろうとするので、バレルの回転によりマスの位置がずれてくると、最もずれた部分のマスの自由表面が、マス全体がバレル内のタレット回転中心からより遠い方の位置になるように滑り出す。これにより、マス内において工作物とメディアの相対運動が発生し、工作物は研磨されることになる。

また、視点をかえると、図2.20の回転比-1の場合においてタレットが1回転するとバレル内をマスが1回転しており、マスの回転数はバレルの自転数と一致することがわかる。このことは、タレットの回転数が同一で、マスの回転数が工作物とメディアの相対速度や接触圧に比例するとするならば、マスの回転数、すなわちバレルの回転数の大きな方が研磨量は多くなるということを示している。

2.7 結言

従来の各種バレル研磨法について調査し、遠心バレル研磨法が最も研磨能率が高いことから、乾式バレル研磨法の研磨特性の究明には遠心バレル研磨法が適していることが明らかとなった。

また、遠心バレル研磨法におけるバレルの運動について検討した結果、バレルとタレットの径の比 R_r と回転数の比 R_n ならびにタレットの半径 r_0 と回転角速度 ω_0 がバレルの運動を決定する条件となるが、特に R_r と R_n は共回りというバレル研磨の可否にかかわるきわめて重要な条件であること、およびマスの流動はバレルの自転に比例することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 精機学会編：新訂精密工作便覧，コロナ社，(1965)775.
- 2) 松永正久：遠心バレル研磨法，生産研究，18,3(1966)
- 3) 木下直治，高沢孝哉：表面研磨・仕上げ技術集成，日経技術図書，(1984)275.
- 4) 松永正久：バレル仕上げ法，誠文堂新光社，(1959)
- 5) 精度設計と部品仕上げシステム技術，日経技術図書，(1989)502.
- 6) 新東ブレーター編：バレル研磨—装置とプロセス—(1975)
- 7) チップトン編：バレル研磨の手引
- 8) 日本機械学会編：機械工学便覧(1960)3-21.
- 9) 同上

第3章 遠心バレル研磨装置および研磨特性の評価

3.1 緒言

遠心バレル研磨法は、その名のとおりメディアと工作物の混合体であるマス(Mass)に遠心力を作用させながら、流動させることにより、大きな接触圧のもとでメディアと工作物に相対運動を起こさせて研磨を行う方法である。そのため、回転バレル研磨法や振動バレル研磨法よりも大きな研磨量が得られるので、メディアの相違による研磨性能の評価が容易になる。また、大きな研磨量が得られるということはメディア自身の損耗も大きくなるということになり、メディアの実用性を判定する上においても好都合な研磨法である。すなわち、遠心バレル研磨法に乾式バレル研磨用メディアを適用して乾式研磨を実施することによって、遠心ドライバレル研磨法の実用性の評価は容易に行われるものと考えられる。

最近では、乾式専用の遠心バレル研磨装置も開発されている¹⁾が、基本的には従来の湿式用のバレル研磨装置を用いて、乾式研磨が十分可能であり、ドライバレル研磨法においては、メディアの性能が重要となる。しかし、従来の湿式遠心バレル研磨法においても研磨特性に関する研究はほとんど行われておらず、松永の研究²⁾においてさえ研磨条件としてタレット回転数を取り上げただけで、研磨特性そのものの解明が十分なされていないのが現状であり、遠心ドライバレル研磨の実用化に際しては、ドライバレル研磨用メディアならびにそれによる遠心ドライバレル研磨法の研磨特性を体系的に解明する必要がある。

そこで、本章では、それらのための実験方法について詳述する。

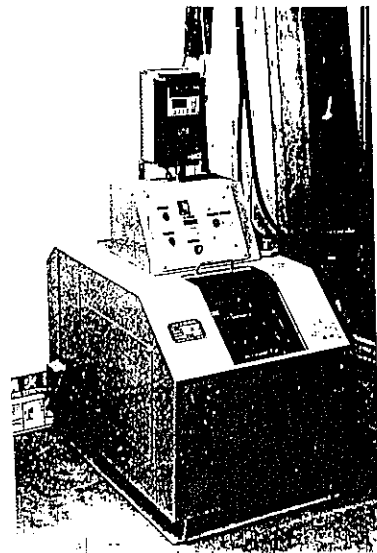
3. 2 遠心バレル研磨装置

遠心バレル研磨機は、タレット (Turret) と呼ばれる回転円板に容器 (Barrel) を等間隔に偏心させ取り付けられたもので、タレットと容器がある回転数の比で、それぞれを回転することができる構造となっている。

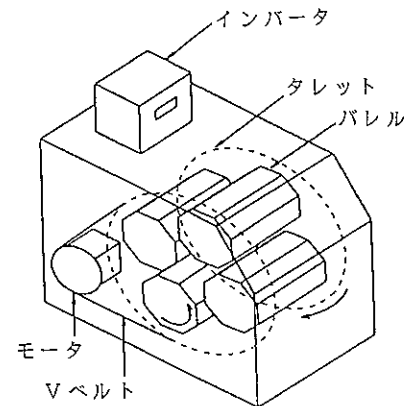
したがって、容器内のメディアと工作物 (マス) は遠心力を受けながら流動するので、バレル研磨法の中でも研磨能力が高く、同時にメディアの損耗も比較的

表3.1 遠心バレル研磨機の仕様

タレットの回転速度	0 ~ 2 4 0 min^{-1} (無段変速)
タレットと容器の回転比	- 1
タレット中心から容器中心までの距離	1 6 0 mm
容器形状と個数	正八角柱 (1.72 l) × 4 (1 辺 : 46mm, 長さ : 165mm)



(a) 外観



(b) 概略図

図3.1 遠心バレル研磨機

速い研磨法であるといえ、本研磨法への適否が、メディアにとつてきわめて重要となる。

そこで、研磨実験には表3.1に示すような仕様を持つ遠心バレル研磨機 (IK-10S型, イワサキ機工製) を採用した。また、図3.1はその遠心バレル研磨機の構造の概略を示したものである。

本遠心バレル研磨機の場合、タレットと容器の回転比は表1に示すように-1であり、タレットがモータによりVベルトを介して1回転すると、タレットに取付けられた4つの正八角柱の容器は、タレットと反対方向に1回転するようになっている。また、モータはインバータにより回転数を連続的に変化させることができるので、タレットは無段変速となっている。なお、正八角柱の容器は鋼製であるので、内壁との接触により工作物に傷が発生しないように、内壁にはゴムライニングが施されている。

3. 3 供試工作物

実際にバレル研磨の行われている部品の形状は多種多様であり、バレル研磨の実験においても、実際の部品を使用している場合が多く見受けられ、工作物の形状を統一して実験されたデータが全く見当たらないのが現状である²⁾。

供試工作物の形状としては、球、直方体、円柱等が考えられる。しかし、球は曲面だけで構成されておりエッジがなく、直方体はエッジはあるが、平面だけで構成されている。一方、円柱は平面と曲面で構成されるとともにエッジもあり、製作が容易である。そのため、本実験では供試工作物の形状を円柱とし、直径32mmの機械構造用炭素鋼 (S45C) のみがき棒鋼を切断し、厚さ10mmに研削により仕上げたものを主に使用した。

また、工作物の重量や表面積の影響について検討するため、工作物の直径と厚さを変化させたり、比重の影響について検討するため、工作物の中を空洞にしたり、その空洞に鉛を充填したりした。

さらに、材質の影響について検討するため、アルミニウム合金、銅合金、チタニウム合金および炭素量の異なる炭素鋼を用いて同様な円柱状工作物を製作するとともに、両端面を研削や研磨布で仕上げるにより前加工面粗さを変化させたり、円柱の寸法を変化させることにより重量や表面積を変化させた。

図3.2は、供試工作物の基本形状を示したものである。また、表3.2は本研究に使用した供試工作物の種類をまとめたものである。

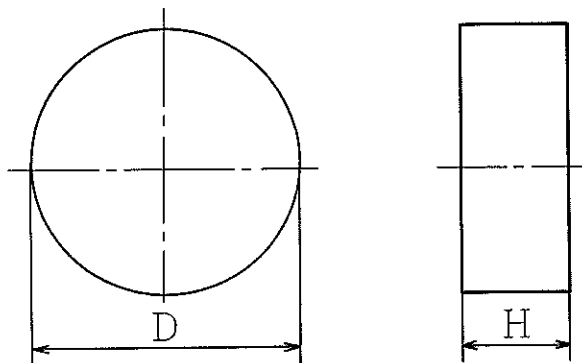


図3.2 供試工作物の基本形状

表3.2 供試工作物の種類

番号	種類	材質	D × H mm	重量 g	比重	表面積 × 10 ² mm ²	硬さ HV
1	比重	S 4 5 C	3 2 × 1 0	3 0	3 . 7	2 6	1 8 2
2		S 4 5 C	3 2 × 1 0	4 6	5 . 7	2 6	1 8 2
3		S 4 5 C	3 2 × 1 0	6 3	7 . 8	2 6	1 8 2
4		S 4 5 C	3 2 × 1 0	7 8	9 . 7	2 6	1 8 2
5	表面積	S 4 5 C	21.6 × 21.9	6 3	7 . 8	2 2	2 2 9
6		S 4 5 C	32.0 × 10.0	6 3	7 . 8	2 6	2 2 9
7		S 4 5 C	36.8 × 7.6	6 3	7 . 8	3 0	2 2 9
8		S 4 5 C	40.6 × 6.2	6 3	7 . 8	3 4	2 2 9
9	硬さ	S 2 5 C	3 2 × 1 0	6 3	7 . 8	2 6	1 8 2
10		S 5 5 C	3 2 × 1 0	6 3	7 . 8	2 6	2 1 9
11		S 4 5 C	3 2 × 1 0	6 3	7 . 8	2 6	2 3 6
12	材質	A l 合金	3 2 × 1 0	2 2	2 . 7	2 6	7 9
13		C u 合金	3 2 × 1 0	6 8	8 . 5	2 6	1 1 5
14		T i 合金	3 2 × 1 0	3 6	4 . 4	2 6	3 1 6

3.4 研磨条件および供試メディア

遠心バレル研磨法における研磨条件として、タレット回転数、メディア装入率、メディアと工作物の混合率、タレットとバレルの回転比、バレル容積、バレル形状等が考えられる。

メディア装入率とは、バレル容積に対するメディア体積の割合のことであり、体積パーセント (vol%) で示す。また、メディアと工作物の混合率とは、一般にいわれている混合比に相当するもので、混合比の場合は工作物体積を 1 とした場合のメディア体積の比であり、例えば、メディア体積が工作物体積の 8 倍であるとすると、混合比は 1 : 8 であるということになるが、混合率の場合は装入されているメディア体積に対する工作物体積の割合のことで、本研究では体積パーセント (vol%) で示している。

タレットとバレルの回転比は、研磨条件の一つではあるが、一般の遠心バレル研磨機では、回転比が変更できないので、本研究に使用する遠心バレル研磨機の回転比である 1 に固定とし、タレット回転数を変化させることにする。

表3.3は、本研究における研磨条件を示したものである。なお、混合率の影響を検討する実験を除いては、工作物は一つの容器につき一個とし、工作物同士の接触による打痕や擦過痕の発生を避けるようにした。

これらの他に、バレル研磨法において研磨特性に重大な影響を及ぼす研磨条件の一つとしてメディアの選択が挙げられる。

ドライバレル研磨においては、水とコンパウンドによる工作物とメディアの接触時における緩衝作用がないので、ドライバレル研磨用のメディアとしては、メディア自身に緩衝作用を持たせる必要がある。そのため、耐熱性および耐摩耗性に優れた高分子材料に砥粒を混入して成形したものが、ドライバレル研磨用メディアとして開発されている。本研究においては、代表的なドライバレル研磨用メディアであるメタ系アラミド樹脂およびナイロン6に炭化けい素 (SiC) やアルミナ (Al₂O₃) の砥粒を混入してメディアに成形したものを使用した。

表3.4は、メタ系アラミド樹脂とナイロン6の物理的性質を比較したもので、メタ系アラミド樹脂の方が比重が大きく、強度および耐熱性において優れており、硬さについては、Mスケールの方が硬いものを測定するのに用いるのにもかかわらず、大きな値を示しているので、メタ系アラミド樹脂の方がかなり硬いことが明らかである。また、表3.5は砥粒の物理的性質を示したもので、C砥粒の方が比重は小さいが、硬さが大きいことがわかる。

表3.3 研磨条件

メディア装入率	2 0 . 3 0 . 4 0 . 5 0 v o l %
タレット回転数	1 2 0 . 1 6 0 . 2 0 0 . 2 4 0 m i n ⁻¹
工作物の混合率	約 1 ~ 1 9 v o l %

表3.4 メディア樹脂の物理的性質

	メタ系アラミド樹脂	ナイロン6
比重	1.35	1.14
引張強さ (GPa)	0.75	0.68
ヤング率 (GPa)	3.94	2.35
融点 (°C)	430	215
ガラス遷移点 (°C)	275	50
ロックウェル硬さ	125 (Mスケール)	115 (Rスケール)

表3.5 混入砥粒の物理的性質

種類	C砥粒	A砥粒
組成	炭化けい素 (SiC)	アルミナ (Al ₂ O ₃)
比重	3.2	3.9
ヤング率 (GPa)	430	380
曲げ強さ (MPa)	550	400
ピッカース硬さ	2600	1800
破壊靱性値 (MN/m ^{3/2})	3.8	3.5

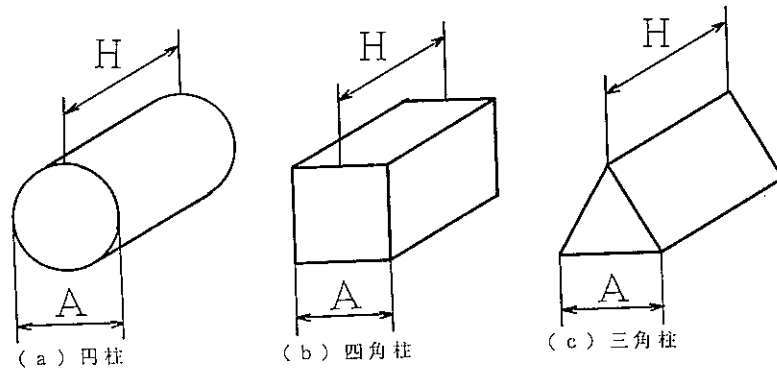


図3.3 供試メディアの形状

表3.6 供試メディアの仕様

番号	材質	形状	A × H mm	混入砥粒	研磨方式
1	アラミド樹脂	円柱	φ2.5 × 4.0	C#500	乾式
2	アラミド樹脂	円柱	φ2.5 × 4.0	C#120	乾式
3	アラミド樹脂	円柱	φ1.0 × 3.0	C#1000	乾式
4	アラミド樹脂	円柱	φ1.0 × 3.0	C#500	乾式
5	アラミド樹脂	円柱	φ1.0 × 3.0	C#240	乾式
6	アラミド樹脂	円柱	φ1.0 × 3.0	C#120	乾式
7	アラミド樹脂	四角柱	□2.5 × 4.0	C#120	乾式
8	ナイロン6	円柱	φ3.5 × 4.0	A#1500	乾式
9	ナイロン6	円柱	φ3.5 × 4.0	A#320	乾式
10	ナイロン6	三角柱	△4.0 × 4.0	A#1500	乾式
11	ナイロン6	三角柱	△4.0 × 4.0	A#320	乾式
12	ビトリファイド	三角柱	△6.0 × 5.0	A#100	湿式

図3.3は、供試メディアの形状を示したものである。また、表3.6は供試メディアの種類を示したものである。

3.5 研磨特性の評価

研磨特性を評価するための基本的な指標として、工作物においては研磨量、仕上げ面粗さおよびエッジ丸味半径等が考えられ、メディアにおいては損耗量や形状変化等が考えられる。

本研究においては、研磨条件を変化させ、所定の研磨時間毎にこれらの項目を測定し、研磨特性を明らかにする。

研磨量は、研磨前後の工作物の重量を電子天秤 (METTLER社製, AT400) を用いて測定し、その重量差より算出した。また、研磨量は比重が同一であるならば、体積あるいは重量で比較しても傾向は同一となるが、比重 (材質) が異なる工作物に対して研磨量を比較する場合には、比重の大きな工作物の方が研磨された重量が大きくても、比重の小さな工作物の方が研磨された体積が大きくなるという場合も起こり得るので、研磨前の工作物の体積に対する研磨された工作物の体積 (体積で表した研磨量) の割合を相対研磨量と定義して用いた。これは、研磨前

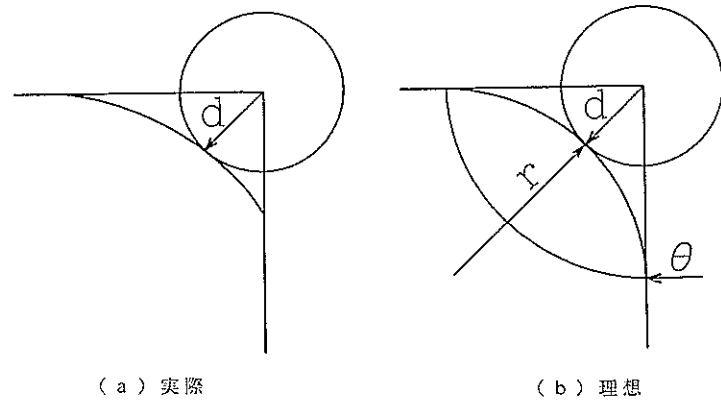


図3.4 エッジ丸味半径

の工作物の体積が同一ならば、研磨量を相対研磨量で表すと、重量で計算した値が体積で計算した値と一致し、比重の影響を受けない指標となることによるものである。

仕上面粗さは、表面粗さ測定機（糊ミツトヨ製，SURFTEST701）によって、工作物の端面の算術平均粗さ（Ra）を複数回測定してそれらの平均値を求めるとともに、一部のものについては断面プロフィールも記録した。

バレル研磨された工作物のエッジ部の形状は、図3.4 (a) に示すように理想的な円弧とはなっていないので、図3.4 (b) に示す幾何学的関係から実際のエッジ形状に近似できるものとして、研磨前の理想的なエッジ先端から最も近い研磨後のエッジ輪郭までの距離 d を測定し、次式から計算で求めたものをエッジ丸味半径 r として定義した。

$$r = \frac{d}{\sec \frac{\theta}{2} - 1} \quad (3-1)$$

また、エッジ丸味半径 r と工作物半径 R がわかると、図3.5 に示す幾何学的な関係から積分により、エッジ部の除去体積 V が算出できるので、工作物の比重 γ からエッジ部のみの研磨量 W が得られる。それらの計算式は次式のとおりである。

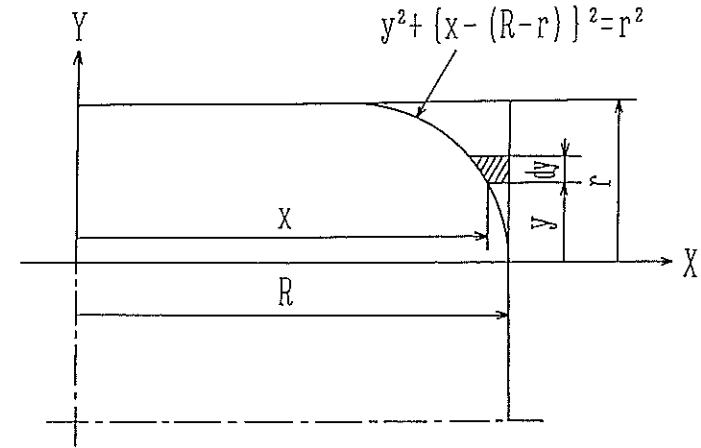


図3.5 エッジ部の除去体積

$$V = 2 \int_0^y \pi (R^2 - x^2) dy \quad (\because x = R - r + \sqrt{r^2 - y^2})$$

$$= (4\pi - \pi^2) R r^2 + \left[\pi^2 - \frac{10}{3} \pi \right] r^3 \quad (3-2)$$

$$W = \gamma V \quad (3-3)$$

さらに、研磨条件の工作物とメディアの接触挙動に及ぼす影響を調べるため、工作物の表面に圧力測定フィルム（富士写真フィルム製）をセロテープで固定し、1分間研磨後の圧力測定フィルムの変色の度合を専用の濃度計で測定し、メディアと工作物の接触圧力を求めた。圧力測定フィルムには、発色剤の入った20種類ぐらいのマイクロカプセルが適当な分布で塗布されたフィルムと顕色剤が均一に塗布されたフィルムの2種類がある。マイクロカプセルは、直径や壁厚を変化させることにより圧力に応じて破壊するようになっており、マイクロカプセルの塗布されたフィルムと顕色剤の塗布されたフィルムを重ね合わせて圧力を付加すると破壊されたマイクロカプセル内の発色剤がもう一方のフィルムに塗布

された顕色剤と反応し発色する。発色の濃度は、発色剤の量に比例するようになっているので、圧力が高いほどより多くのマイクロカプセルが破壊し、より濃く発色することになる^{4, 5)}。すなわち、工作物の表面にこれらの2種類の圧力測定フィルムをセロテープで固定し、バレル研磨を実施することにより、メディアが圧力測定フィルムを介して工作物と接触するので、メディアと工作物の接触圧力が圧力測定フィルムの発色濃度として記録されることになる。

3. 6 結言

遠心バレル研磨法の研磨特性とドライバレル研磨用メディアの研磨性能を明らかにするための実験方法について検討し、工作物エッジ部の幾何学的関係から新しいエッジ丸味半径の定義を提案するとともに、それによるエッジ部の研磨量の計算方法について明らかにした。また、工作物の研磨特性に及ぼす影響を検討するために同一材質において重量が同一で表面積の異なる工作物や同一体積で重量の異なる工作物の使用を検討するとともに、材質の異なる工作物については相対研磨量の導入の必要性を明らかにした。さらに、メディアと工作物の接触圧の測定に圧力測定フィルムの使用を提案した。

参考文献

- 1) 北嶋弘一, 渡辺昌知: ドライバレル研磨は環境に優しいエッジ仕上げ!, 機械技術, 47, 9(1999) 75.
- 2) 松永正久: 遠心バレル研磨法, 生産研究, 18, 3(1966) 71.
- 3) 松永正久: バレル仕上げ法, 誠文堂新光社(1959) 148.
- 4) 富士写真フィルム(株)編: 富士フィルム圧力測定システムカタログ
- 5) 富士写真フィルム(株)編: 富士フィルムプレスケールの使い方

第4章 バレル研磨における乾式および湿式の研磨性能

4. 1 緒言

水およびコンパウンドを使用する従来のバレル研磨を湿式バレル研磨 (Wet barrel finishing) と呼ぶならば、水もコンパウンドも使用せず、メディアだけで研磨を行うバレル研磨は乾式バレル研磨 (Dry barrel finishing) ということになる。乾式バレル研磨は、コンパウンドと工作物及びメディアの摩耗粉が混合した廃水の発生がなく、工作物の後処理をもほとんど必要としないということから、ナイロンなどの高分子材料に砥粒を混入したものが乾式バレル研磨用メディアとして開発されるに至り、研磨工程への導入が進められると同時に研究も行われるようになってきた^{1) 2)}。

基本的には、湿式バレル研磨と乾式バレル研磨では、それぞれに使用されるメディアが全く異なる材質であるので、両方式の研磨性能を単純に比較することははなはだ困難である。しかし、乾式バレル研磨の研磨工程への導入や研究に際して、湿式との研磨性能の比較を求められることが多く、両方式で全く異なるメディアを使用しながら研磨性能を比較している実験例³⁾も見られるが、この方法は必ずしも厳密な意味での性能比較とならぬと考えられる。

そこで本章では、湿式用メディアを湿式バレル研磨に使用するだけでなく、乾式バレル研磨に敢えて使用するとともに、乾式用メディアについても乾式および湿式の両バレル研磨を行い、それらの研磨性能を比較することにより、乾式バレル研磨と湿式バレル研磨との相違について検討した⁴⁾。

4.2 研磨量に及ぼすメディア装入率の影響

図4.1は、タレット回転数 240min^{-1} 、メディア装入率20, 30, 40, 50vol%で、乾式用メディアを用いて乾式研磨を行ったときの研磨量の時間的推移を示したものである。なお、本章で使用する乾式用メディアは正三角柱（ナイロン6、 $\Delta 4 \times 4\text{mm}$, A#320）状のものである。

同図において、研磨量は研磨時間にほぼ比例して増加しており、メディア装入率が低くなる方が研磨量は大きくなっている。また、研磨時間1時間経過後の研

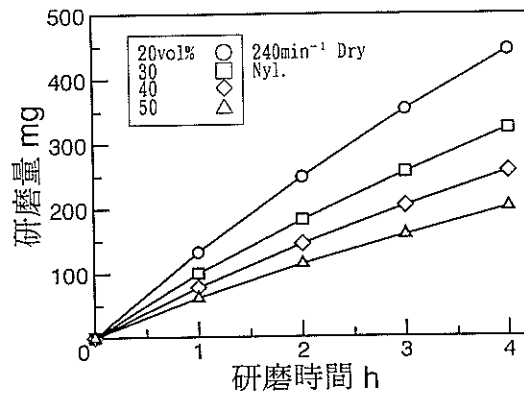


図4.1 研磨時間と研磨量の関係

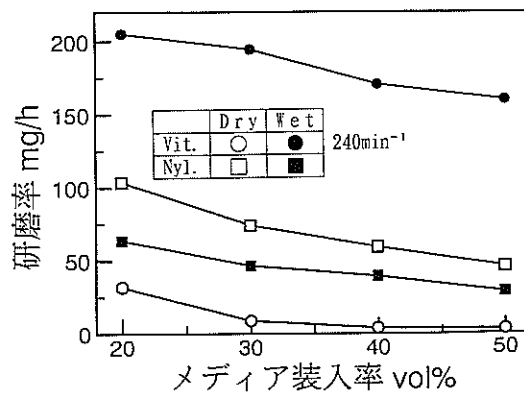


図4.2 メディア装入率の研磨率への影響

磨時間と研磨量の間は、ほぼ直線関係を示しており、この直線の傾きは単位時間当りの研磨量（研磨率）を表すことになる。

図4.2は、乾式用および湿式用メディアを使用し、メディア装入率を変化させて、乾式および湿式の両方式でバレル研磨を行い、研磨量と研磨時間の関係から直線の傾きを求めて単位時間当りの研磨量（研磨率）として示したものである。なお、本章で使用する湿式用メディアは正三角柱（ビトリファイド、 $\Delta 6 \times 5\text{mm}$, A#100）状のもので、乾式用メディアと比較するために入手可能な限りの範囲において最も仕様の近いものを選定した。

同図より、メディア装入率の減少にともなって、研磨率が增大していることがわかる。また、研磨率は湿式用メディアで湿式研磨を行った場合が最大になり、次いで乾式用メディアで乾式研磨した場合が大きくなっている。一方、乾式用メディアで湿式研磨した場合や湿式用メディアで乾式研磨した場合の研磨率は、いずれも本来の使用法で得られる研磨率よりもかなり低下しており、とくに湿式用メディアで乾式研磨した場合の研磨率の低下割合が極めて顕著に現われている。

4.3 仕上面に及ぼすメディア装入率の影響

図4.3は、タレット回転数 240min^{-1} 、メディア装入率20および50vol%で乾式用メディアを使用し、乾式と湿式でバレル研磨したときの仕上面粗さの時間的推移を示したものである。

乾式研磨の場合、研磨開始後1時間で仕上面粗さは急速に向上し、その後漸減

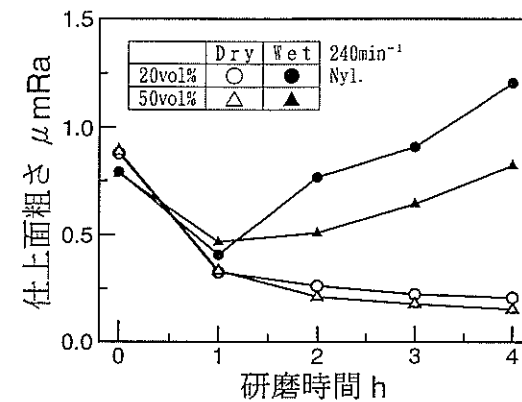


図4.3 研磨時間と仕上面粗さの関係(Nyl.の場合)

しながらそれぞれのメディア装入率で到達しうる仕上面粗さの限界値に達するものと考えられる。一方、湿式研磨の場合、研磨1時間までは乾式研磨とほぼ同様に減少しているが、その後仕上面粗さは逆に増加の一途を辿っており、乾式用メディアは乾式研磨で使用しなければならないことが明らかである。

図4.4は、湿式用メディアを使用して図4.2の場合と同様の実験を行って得られた仕上面粗さの時間的推移を示したものである。

この場合、乾式および湿式のいずれの研磨方法でバレル研磨を行っても、メディア装入率20vol%の乾式研磨の場合を除いて、研磨開始後1時間で仕上面粗さは急速に向上し、その後、ほぼ一定値を示している。また、20vol%の乾式研磨の場合も、仕上面粗さの減少割合は少ないが、研磨開始後4時間には、ほぼ一定値を示すようになり、湿式用メディアにおいては、いずれの場合も乾式用メディアで乾式研磨した場合と定性的に同様の傾向を示していることがわかる。

しかし、この場合においても湿式用メディアは湿式研磨で使用した方が仕上面粗さは良くなることが明らかである。

図4.5は、メディア装入率に対して各研磨法における4時間研磨後の仕上面粗さをまとめたものである。

乾式用メディアで湿式研磨した場合には、いずれのメディア装入率においても図4.3に示したように研磨開始初期に仕上面粗さは減少するが、4時間経過後においては図4.5のように元の仕上面粗さ(約0.8 μ mRa)以上の値となっており、乾式用メディアによる湿式研磨は表面仕上げに対して適用するには無理があることがわかる。

他の研磨方法については、いずれの場合も元の仕上面粗さよりも減少しており、

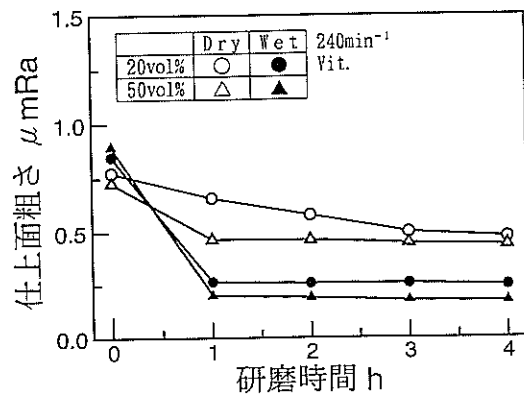


図4.4 研磨時間と仕上面粗さの関係 (Vit. の場合)

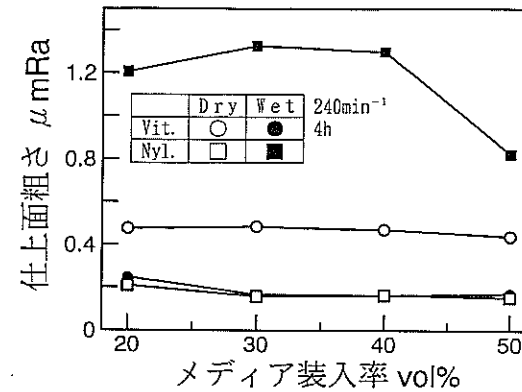


図4.5 メディア装入率の仕上面粗さへの影響

しかもメディアを本来の使用法に従って用いた方が仕上面粗さは良好な結果を呈している。しかし、研磨率の結果と比較すると、いずれのメディア装入率においても、湿式用メディアで湿式研磨した場合の研磨率は乾式用メディアで乾式研磨した場合のそれより約2倍の値となっているが、仕上面粗さに対してはほとんど差異は認められず、乾式用メディアで乾式研磨した場合の方が仕上面粗さが若干減少しているという程度である。本結果において、湿式用メディアの方が乾式用メディアより寸法が大きく、しかも混入されている砥粒粒度が小さい(粒径が大きい)というメディアの仕様の異なる影響は仕上面粗さに対してはほとんど現れていないように思われる。

これは、湿式研磨における水の効果によるものと思われるが、乾式用メディアで湿式研磨した場合には、研磨時間の増加にともなって仕上面粗さが一旦減少していたものが、再び増加して元の仕上面粗さよりも増大するという現象が見られたので、研磨後の仕上面の観察を行った。

図4.6は、乾式用メディアを用いてタレット回転数240min⁻¹、メディア装入率20vol%で4時間湿式研磨を行ったときの仕上面の表面状態を示したものである。

同図において、仕上面全体にピットのように深くくぼんだ箇所が認められ、孔食が発生していることがわかる。この孔食が研磨時間の増加にともなって、増大することにより、仕上面粗さも増大したもと考えられる。一方、湿式用メディアを用いた場合には孔食の発生は認められないことより、湿式用メディア場合には乾式用メディアに比べて研磨量のはるかに多いので、孔食が発生する間もなく工作物表面が順次除去されていることによるものと推察できる。

また、この孔食の発生原因については明らかでないが、メディアを本来の使用

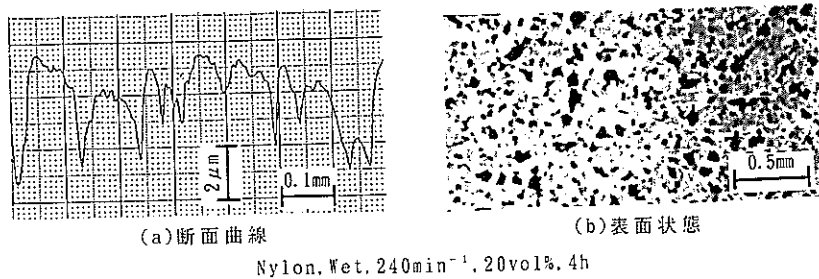


図4.6 乾式用メディアによる湿式研磨後の工作物の表面形状

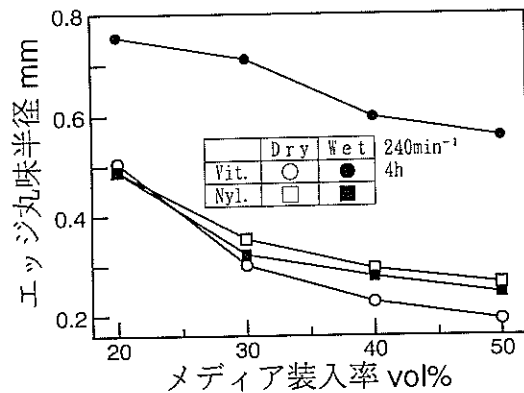


図4.7 メディア装入率のエッジ丸味半径への影響

法に従って用いた方が仕上面粗さは良好な結果を示すということは、たとえ孔食の発生がなくても、図4.3に示したように研磨時間が1時間までの仕上面粗さの減少過程において乾式用メディアで乾式研磨を行う方が小さくなっていることから推察できる。

4.4 エッジ丸味半径に及ぼすメディア装入率の影響

図4.7は、タレット回転数を240min⁻¹とし、乾式用および湿式用メディアを使用し、メディア装入率を変化させて両研磨方式で4時間の研磨を行った後の工作物エッジ部の丸味半径を求めたものである。

同図より、メディア装入率の減少にともなってエッジ部の丸味半径は増大しており、図4.1に示した研磨率の結果と定性的に同様の傾向を示していることがわかる。すなわち、研磨率が大きいということは、工作物全体としての研磨量が大きいということになるので、当然エッジ部もよく研磨されることになり、エッジ部の丸味半径は研磨率と同様の傾向を示すものと考えられる。

しかし、研磨量に関しては工作物全体の研磨量とエッジ部のみの研磨量との関連性についても明らかにする必要がある。

そこで、前節3.5の研磨特性の評価で示したように除去されたエッジ部分の体積Vは、幾何学的関係により工作物の半径Rとエッジ部の丸味半径rがわかると、積分で求めることができ、その体積と工作物の比重γよりエッジ部の研磨量Wを算出することができる。したがって、(3-2)式および(3-3)式により、R=16mm, γ=7.8とし、rは図4.7の結果を代入してエッジ部の研磨量を計算し、工作物の全研磨量に占める割合を求めた結果を示すと図4.8のようになる。

湿式用メディアで乾式研磨した場合を除き、いずれもメディア装入率の減少にともなって、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合は増大しており、図4.1に示した研磨率と定性的に同様の傾向を示していることがわかる。メディア装入率の低い範囲において研磨率等が増大しているのは、マスの流動状態が激しくなることによるものであるが、エッジ部での研磨量が増えるのもエッジ部の方がマスの流動状態の影響を受けやすいためであると考えられる。しかし、湿式用メディアで乾式研磨した場合、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合は、他のものに比べていずれのメディア装入率においてもかなり大きく、また逆にメディア

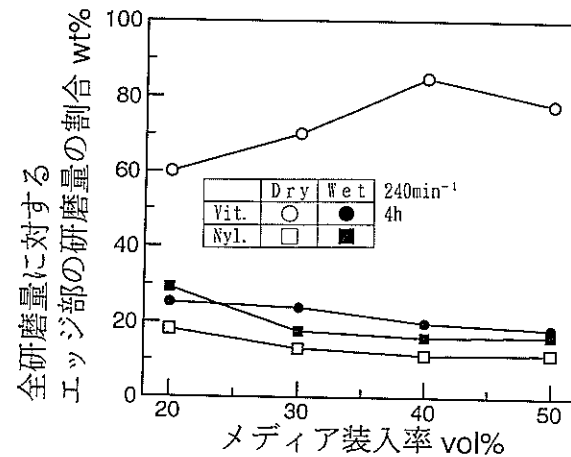


図4.8 メディア装入率のエッジ部の研磨量への影響

装入率20vol%の方が低くなっている。これは、メディア装入率20vol%においては、他のものに比べて研磨率が小さいにもかかわらず、乾式用メディアと同等のエッジ丸味半径を示していることから、湿式用メディアで乾式研磨した場合、工作物のエッジ部とメディアとの接触が最も激しくなることによるものと考えられる。さらに、メディア装入率の大きい、しかも研磨量の少ない条件において、わずかなエッジ部の研磨量であっても全研磨量が少なくなるために相対的に大きな割合となることによるものと考えられる。その結果、湿式用メディアで乾式研磨した場合に逆に他のメディア装入率に比べて全研磨量が多くなる20vol%において、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合が小さくなったものと推察される。

4.5 メディア損耗率と研磨比

図4.9は、バレル容器内に装入した最初のメディア重量と研磨後の重量差からメディアの損耗重量を求め、最初の重量に対する損耗量の割合を単位時間当たりについて算出したものをメディア損耗率とし、乾式用および湿式用メディアの損耗率について、メディア装入率との関係を求めたものである。

同図において、メディア装入率の減少にともなってメディア損耗率が增大するという傾向は、研磨率と定性的に同様の傾向を呈しているが、乾式用メディアのメディア損耗率において、湿式研磨は乾式研磨よりいずれのメディア装入率に対しても大きくなっている点が研磨率の結果と相異している。これは、湿式用メディアのナイロン6の有する吸水性の影響によって摩耗しやすくなったことに起因するものと考えられる。

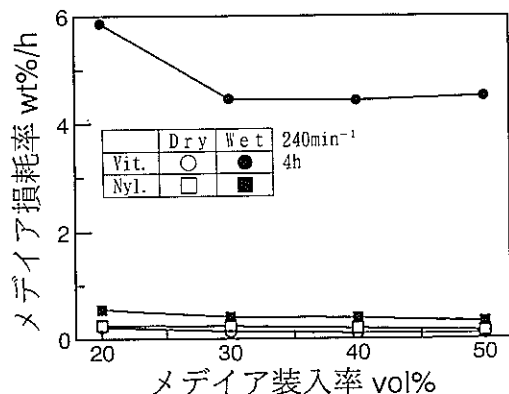


図4.9 メディア装入率のメディア損耗率への影響

また、湿式用メディアで湿式研磨した場合、研磨率は大きくなるが、メディア損耗率も同時に大きくなるので、メディアの有効利用という観点においてメディアの損耗した体積に対する研磨された工作物の体積の割合を研磨比として求め、それによって評価することが重要である。

そこで、図4.10は乾式用および湿式用のメディアの研磨比について、メディア装入率との関係を求めたものである。この場合、バレル容器内に工作物を1個しか装入していないので、研磨比は小さな値をとっているが、実際のパレル研磨においては多数個装入されるので、これよりもかなり大きな値をとることはいうまでもない。

同図より、研磨比はメディア装入率の減少にともなって増大しており、研磨率と定性的に同様の傾向を示していることがわかる。ただし、これまでの研磨率、仕上面粗さおよびエッジ部の丸味半径の結果に関しては、仕上面粗さがほぼ同等である以外は、湿式用メディアで湿式研磨する方がいずれも良好な結果を示していたが、研磨比に関しては乾式用メディアで乾式研磨した方がいずれのメディア装入率においても、研磨比が最大となり、また湿式用メディアで湿式研磨した場合に最小になるという結果が得られている。

すなわち、湿式用メディアで湿式研磨すると研磨時間は短縮されるが、メディアの損耗量に対して研磨量の割合が少なくなる。一方、乾式用メディアで乾式研磨を行うと、湿式用メディアで湿式研磨するより研磨時間は多く掛かるが、少ないメディアの損耗量で多くの研磨量が得られるということになる。このことより、基本的にはメディアはその本来の使用方法に従って用いた方がよい研磨結果が得られるということになる。

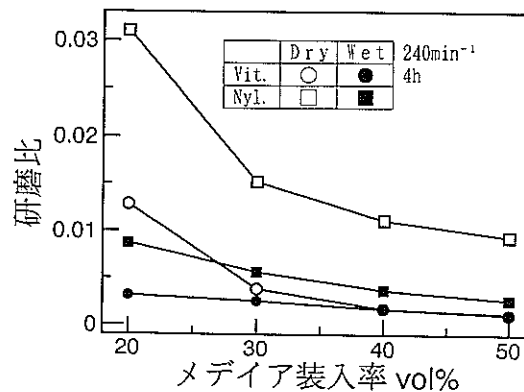


図4.10 メディア装入率の研磨比への影響

4. 6 コストの評価

表4.1は、メディア装入率50vol%、タレット回転数240min⁻¹の条件で研磨したときの1時間当りの費用を示したものである。

同表によれば、湿式研磨の研磨率は乾式研磨の約3.6倍となっていることがわかる。すなわち、工作物の研磨量を同等とした場合、乾式研磨の研磨時間は湿式研磨の約3.6倍になることになる。また、単位重量当りのメディアの価格は乾式用の方が3倍ほど高くなるが、メディア損耗率において大きな差異があるため、

表4.1 コスト比較のための諸元

	湿式研磨	乾式研磨
研磨条件	バレル 1720cc, 装入率 50vol%, タレット回転数 240min ⁻¹	
装置	償却費 75円/h, 電気費 16.5円/h 合計 91.5円/h	
メディア	36.7円/h	2.5円/h
コンパウンド+水	4円/バレル	-
研磨率	0.168g/h	0.0463g/h

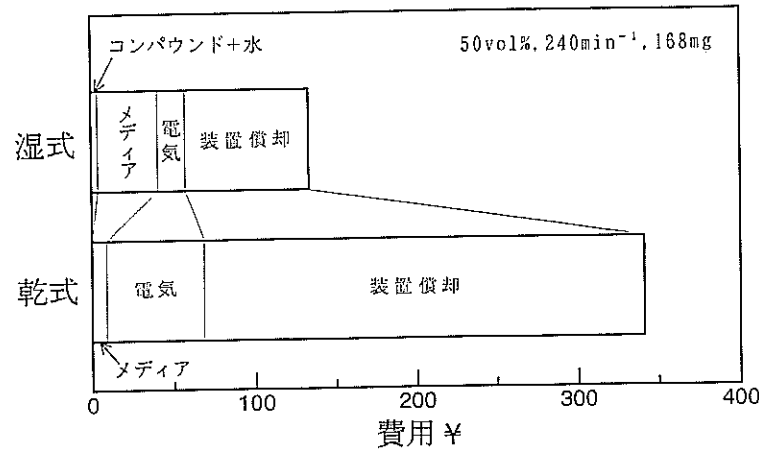


図4.11 乾式および湿式遠心バレル研磨の費用

単位時間当りのメディア費用は乾式研磨の方が逆に湿式研磨の約1/15となっている。

図4.11は、工作物の研磨量を同等（168mg）としたときの湿式用メディアで湿式研磨した場合と乾式用メディアで乾式研磨した場合の費用を表4.1に基づき算出したものである。

同図によれば、乾式研磨のメディア費用は湿式研磨のメディア費用にコンパウンドと水の費用を加えたものの約1/4となっているが、研磨時間は乾式研磨の方が約3倍以上長くなるので、電気費やバレル研磨機の減価償却費が3倍以上を要することになり、結果的には乾式研磨の方が費用が多く掛かることになる。すなわち、乾式研磨の場合、単位時間当りの電気費やバレル研磨機の減価償却費がメディア費用に比べて高いために、湿式研磨に比べてメディア費用が低いということより、研磨時間が長いということの方が大きく影響していることになる。この場合、バレル研磨後の後処理については検討されていないが、後処理に関しては乾式研磨の方がはるかに容易であると考えられるので、研磨時間を多く要する研磨に対しては湿式研磨が有利になり、後処理に費用が掛かる研磨に対しては乾式研磨が有利になるものと思われる。ただし、これはできるだけ仕様の近いメディアを使用した場合の本実験の範囲に限定されたものであり、実際の研磨作業においては、研磨目的に応じたメディアを自由に選択できるので、乾式用メディアにおいても研磨率の高いものも存在するし、湿式用メディアにおいても損耗率の低いものもあるので、研磨目的や後処理について十分に検討した上で研磨方式やメディアを選定する必要がある。

4. 7 結言

本章では、乾式バレル研磨法と湿式バレル研磨法における研磨性能を比較するため、仕様のできるだけ近い乾式用および湿式用メディアを用い、乾式および湿式で遠心バレル研磨を行い、研磨率、仕上面粗さ、エッジ部の丸味半径および研磨比について検討した。その結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 研磨率、仕上面粗さ、エッジ部の丸味半径および研磨比は、湿式、乾式にかかわらず一部の研磨条件を除いてメディア装入率の減少にともなって増大する。
- (2) 乾式用および湿式用メディアは、いずれも本来の使用法によって研磨に用いた方が、良好な研磨性能が得られる。

- (3) 研磨率は、湿式用メディアで湿式研磨したものが最大になるが、研磨比は最小値をとる。また、乾式用メディアで乾式研磨した研磨率は湿式用メディアで湿式研磨したものより低くなるが、研磨比は最大値をとる。

参考文献

- 1) 山本章裕, 北嶋弘一, 野呂田進: 砥粒混入アラミド樹脂メディアによるドラマイバレル研磨の研究, 砥粒加工学会誌, 40, 2(1996)69.
- 2) 山本章裕, 北嶋弘一, 桜田康弘, 野呂田進: 遠心バレル研磨に関する基礎的研究(第1報) -メディア装入率の影響-, 精密工学会誌, 63, 3(1997)381.
- 3) 石田喬男, 吉田昭一, 河野洋一郎, 平賀幹敏: 乾式バレル研磨機(ロールフロー)による仕上げ加工, 新東技報, No. 14(1994)39.
- 4) 山本章裕, 北嶋弘一, 瀧上晃弘, 渡辺昌知: バレル研磨における乾式および湿式の研磨性能, 砥粒加工学会誌, 42, 3(1997)124.

第5章 メディアと工作物の接触挙動

5.1 緒言

松永の総括的なバレル研磨法の定義¹⁾において「槽(バレル)に研磨材, 化学薬品(コンパウンド), 水を装入し, 適当な機構によって同一槽内の研磨材(メディア)と工作物との間に相対運動を生じさせて, 工作物表面の研削・研磨を行う方法」となっているように, バレル研磨法における「研磨材(メディア)と工作物との間の相対運動」は, 研磨機構そのものであり, また研磨特性を支配するものである。換言すれば, 「研磨材(メディア)と工作物との間の相対運動」は, 「メディアと工作物の接触挙動」のことであり, 「メディアと工作物の接触挙動」は, バレル研磨法において, 研磨特性そのものに影響を及ぼす根本的因子であるといえる。すなわち, 研磨条件によって研磨特性が変化するのは, 研磨条件によってメディアと工作物の接触挙動が変化することによるものである。

従来の研究では, 研磨条件と研磨特性の関係について論じたものがほとんどであり^{2, 3)}, 研磨条件のメディアと工作物の接触挙動に及ぼす影響に関しては, メディアと工作物の接触状態に及ぼすメディア形状の影響について定性的に検討したもの⁴⁾やラッピングにおける砥粒と工作物の接触挙動をバレル研磨に適用して検討したもの⁵⁾が見当てるだけである。

そこで, 本章では, 研磨条件がメディアと工作物の接触挙動に及ぼす影響という観点から乾式遠心バレル研磨法について検討する。

5.2 メディアと工作物の接触挙動と研磨特性

研磨特性を示す代表的なものとして、研磨量が挙げられる。前述のラッピング理論をバレル研磨に適用すると、研磨量は研磨材と工作物の間に作用する荷重と切削長に比例し、工作物の硬さに反比例することが報告されている⁵⁾。すなわち、研磨量はメディア表面の砥粒切れ刃の工作物への切込みとその切込みで移動した距離(切削長)の積であり、メディアの工作物への切込みはメディアと工作物に作用する荷重に比例し、工作物の硬さに反比例すると考えることができる。これは、メディアと工作物の1回当たりの接触における研磨量について述べたものであるが、実際の研磨量を求めるには、研磨中のメディアと工作物の全ての接触において作用する荷重(接触荷重)と接触長さ、もしくは、個々の接触荷重と接触長さとその発生頻度を明らかにしなければならない。

メディアと工作物の接触挙動と研磨量の関係における接触挙動とは、具体的には、メディアと工作物の接触荷重、接触長さおよびその発生頻度のことであり、これらによって、接触挙動を定量的に示すことができる。

メディアと工作物の接触挙動の測定は、「3.5 研磨特性の評価」で述べたように圧力測定用フィルムを工作物表面に張り付け、バレル研磨することにより可能になる。圧力測定用フィルムは、メディアと工作物の接触圧に応じた濃度で発色するようになっており、接触荷重ではなく接触圧が測定されることになるが、接触挙動の評価においては接触荷重と同じものと考えられる。また、接触長さは発色領域の大きさで、接触の頻度は単位時間当たりの発色領域の増加量で評価することができる。しかし、発色領域の定量的な測定は難しいので、本研究においては接触圧のみを取り上げることにする。また、接触圧の測定に際しても、圧力測定用フィルムの感度や圧力換算を行うための濃度測定における発色領域の大きさや濃度のばらつきに若干の問題が存在する。さらに、静的な圧力を測定するためのものである圧力測定用フィルムをバレル研磨におけるメディアと工作物の接触圧という動的な圧力の測定用に使用するという問題もあり、測定値そのものが真の接触圧であるとは必ずしもいえないが、接触圧の定性的評価は十分可能であり、得られた発色状態はバレル内におけるメディアと工作物の接触挙動の状態を表す指標の一つになるものと考えられる。

5.3 メディアと工作物の接触圧

メディアを一種の流体と考え、メディア全体があたかも固体のように運動するとすれば、メディア内の圧力は流体静力学の問題として取り扱うことができる⁶⁾。そこで、遠心バレル研磨におけるバレル内のメディアの状態を図5.1のように

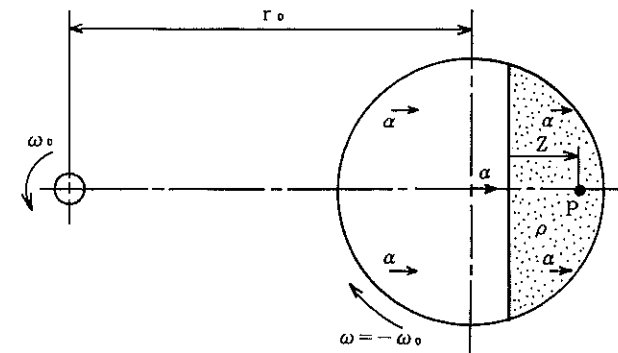


図5.1 メディア内の静的圧力

重力の加速度を無視して単純化し、メディアには加速度 α のみが作用するとした場合、メディア表面からの深さ Z の圧力 P は、

$$P = \int_0^Z \rho \cdot \alpha \cdot dZ$$

となる。ここで、 ρ はメディアの密度であり、本研究において使用している遠心バレル研磨機の場合には、タレットとバレルの回転比が -1 であるために、バレル内のいずれの位置においても加速度 α は一定値をとり、深さ Z には依存しないので、圧力 P は、

$$P = \rho \cdot \alpha \int_0^Z dZ = \rho \cdot \alpha \cdot Z$$

となる。また、加速度 $\alpha = r_0 \omega_0^2$ (r_0 : タレットの回転中心からバレルの回転中心までの距離、 ω_0 : タレットの回転角速度)であるので、

$$P = \rho r_0 \omega_0^2 Z$$

で表される。すなわち、メディア内の圧力とは、メディア内に工作物が存在する場合のメディアと工作物の接触圧のことであり、メディアと工作物の接触圧が遠心力に比例する⁷⁾というのは、メディア内の静的な圧力が加速度($r_0 \omega_0^2$)に比例することにほかならない。また、これよりメディアと工作物の接触圧はメデ

メディア装入率			
20vol%	30vol%	40vol%	50vol%

$\phi 2.5 \times 4\text{mm}$, C#120, 240min^{-1} , 1min

図5.2 メディア装入率による圧力測定用フィルムの色濃度変化

メディアの密度とメディア表面からの深さに比例することがわかる。

しかし、これはあくまでも静的な場合であって、遠心バレル研磨における研磨作用は、メディアと工作物の相対運動によって発生するので、実際のメディアと工作物の接触圧は、以上に述べた静的な圧力にメディアと工作物の相対運動による動的な圧力がさらに付加されたものと考えることができる。

5.4 メディア装入率の影響

図5.2は、直径32mm、厚さ10mmのみがき棒鋼 (S45C) の表面に圧力測定用フィルムをセロテープで固定し、アラミド樹脂メディア ($\phi 2.5 \times 4\text{mm}$, C#120) を使用し、メディア装入率を変化させて、タレット回転数 240min^{-1} で1分間研磨した後の圧力測定用フィルムの色濃度変化を示したものである。

圧力測定用フィルムは、メディアと工作物の接触圧が高くなるにともなって発色濃度が濃くなるようになっており、同図よりメディア装入率20vol%において発色濃度が最も濃く、メディア装入率の増加にともなって発色濃度が薄くなっている。また、メディア装入率20vol%において発色の分布が最も密であることからメディアと工作物の接触頻度も高いことがわかる。しかし、メディアと工作物の1回の接触当りの接触長さは、圧力測定用フィルムの1回の接触当りの発色領域の大きさに対応するが、メディア装入率20vol%および50vol%においても顕著な相違は見られない。

図5.3は、圧力測定用フィルムの発色濃度を濃度計により測定して接触圧に換算した結果を示したもので、メディア装入率が增大するにともなってメディアと工作物の接触圧が減少することがわかる。とくに、メディア装入率20vol%から30vol%の間において著しい接触圧の減少が認められる。

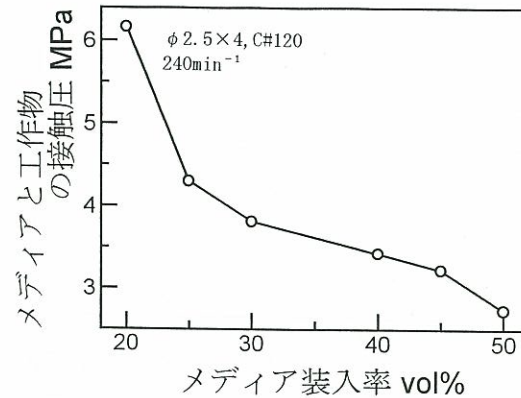


図5.3 メディア装入率とメディアと工作物の接触圧の関係

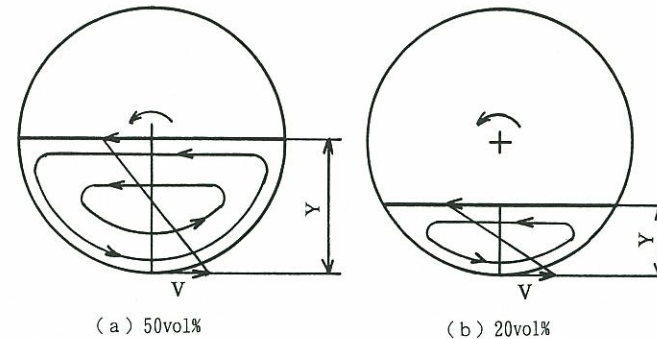


図5.4 メディア装入率によるメディアの流動状態

前節において、メディア表面からの深さZに比例して静的な圧力が高くなることを明らかにした。このことは、メディア装入率が大きくなるほど静的な接触圧が高くなるということであるが、測定結果においては、メディア装入率の低い方が逆に高い接触圧を示していることがわかる。

そこで、メディアの流動状態を図5.4に示すように単純にモデル化して考えてみる。すなわち、メディアはバレル内壁との摩擦と遠心力によりバレルの回転方向に流動しており、その周速度はバレルの周速度Vにほぼ一致することになる。また、メディアと工作物の相対速度が大きくなるほど、メディアと工作物の接触圧は高くなり、さらに、その相対速度はメディア内の速度勾配の影響を受けるも

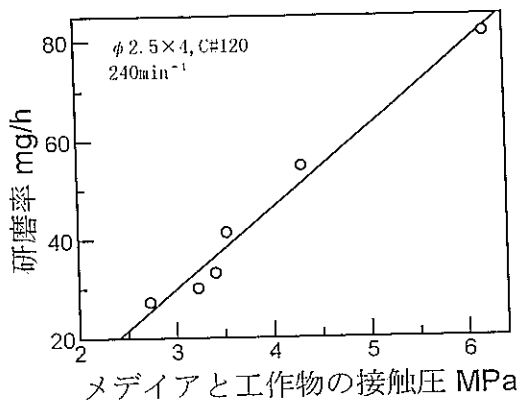


図5.5 メディアと工作物の接触圧と研磨率の関係（メディア装入率変化）

のと考えられる。したがって、図5.4に示すように、速度勾配はメディア表面からバレル内壁までの距離Yが短いほど大きくなるので、メディア装入率20vol%におけるメディアと工作物の相対速度の方が大きくなり、動的な接触圧が高くなるものと推察される。そのため、メディア装入率50vol%においては、静的な接触圧が高いにもかかわらず、図5.3に示した測定結果では、メディア装入率20vol%の方が高くなっている。このことより、遠心バレル研磨においては、静的な接触圧の増大よりもメディアと工作物の動的な接触圧の増大の影響の方が大きく現れるものと考えられる。

図5.5は、メディアと工作物の接触圧と研磨率（単位時間当りの研磨量）の関係を示したものである。同図によれば、メディアと工作物の接触圧の増加にともなって研磨率は増大しており、メディアと工作物の接触圧と研磨率は比例関係にあることは明らかであり、前述のラッピング理論が遠心バレル研磨にも適用できることがわかる。

5.5 タレット回転数の影響

図5.6は、メディア装入率20vol%および50vol%においてバレル回転数を変化させて、圧力測定用フィルムを張り付けた工作物を1分間バレル内に装入したときの圧力測定用フィルムの発色濃度より、メディアと工作物の接触圧を求めたものである。これより、いずれのバレル回転数においても装入率20vol%の方が接触圧が大きいことがわかる。また、バレル回転数の増大にともなって接触圧も増大して

おり、これはバレル回転数の増加によるバレル内のメディアと工作物の流動速度ならびにそれらに作用する遠心力の増大に起因するものと考えられる。

図5.7は、図5.6と同一の研磨条件におけるメディアと工作物の接触圧と研磨率の関係を示したものである。同図によれば、いずれのメディア装入率においても、メディアと工作物の接触圧の増加にともなって研磨率は比例して増大していることが明らかである。

また、接触圧と研磨率の関係を示す直線において、いずれの接触圧においてもメディア装入率20vol%の方が高い研磨率を示し、接触圧が同一であっても研磨率が同等とならないのは、研磨量が接触圧だけでなく、工作物との接触長さおよび

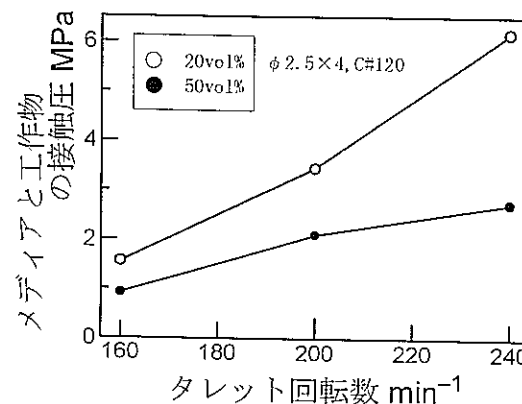


図5.6 タレット回転数とメディアと工作物の接触圧の関係

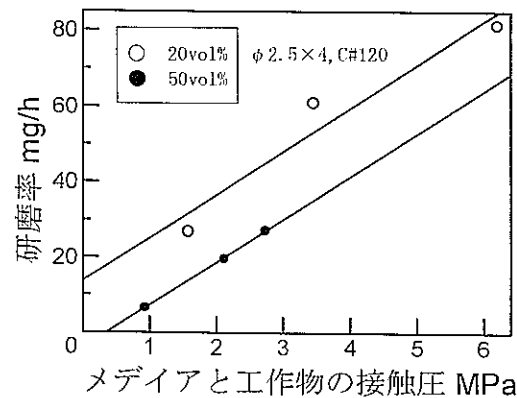


図5.7 メディアと工作物の接触圧と研磨率の関係（タレット回転数変化）

接触の起こる頻度の影響を大きく受けることによるもので、メディア装入率20vol%の方がメディアと工作物の接触の起こる頻度が高いことに起因すると考えられる。

5.6 メディアと工作物の混合率の影響

図5.8は、メディア装入率20vol%および50vol%において、ナイロンメディア(△4×4mm, A#120)を使用し、バレル内および器に装入する工作物の個数によりメディアと工作物の混合率(メディア体積に対する工作物体積の割合)を変化させて、タレット回転数240min⁻¹で1分間研磨した後の圧力測定用フィルムの色濃度変化より、メディアと工作物の接触圧を求めたものである。

同図より、いずれのメディア装入率においても、メディアと工作物の混合率の増大にともなって接触圧も上昇することがわかる。これは、工作物の装入個数の増加にともなってマスの流動性が活発になる(動的接触圧の増大)ことおよびマス全体の体積の増大とマス全体の見掛けの比重の増大(静的接触圧の増大)によることに起因するものと考えられる。

また、図5.3のメディア装入率と接触圧の関係では、メディア装入率の低い方が接触圧は高い値を示していたが、メディア装入率20vol%における混合率2.3vol% (工作物1個に相当)を除いて、メディア装入率50vol%の方が高い接触圧を示している。これは、同一の混合率においても、メディア装入率が異なるとマス内に含まれる工作物の個数が相違することによるものと考えられる。

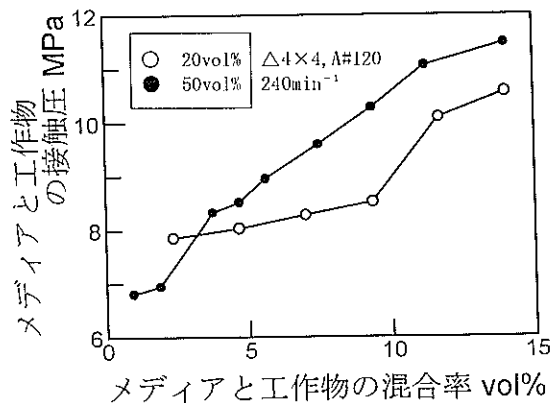


図5.8 メディアと工作物の混合率とメディアと工作物の接触圧の関係

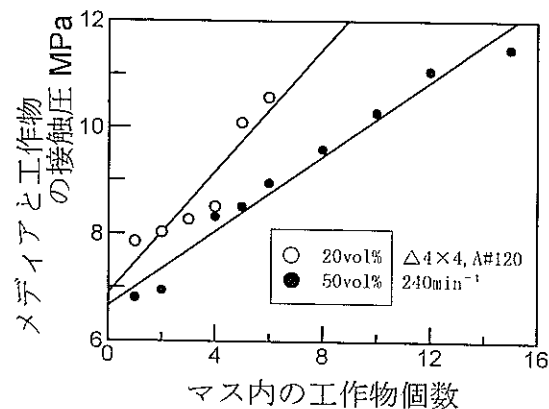


図5.9 マス内の工作物個数とメディアと工作物の接触圧の関係

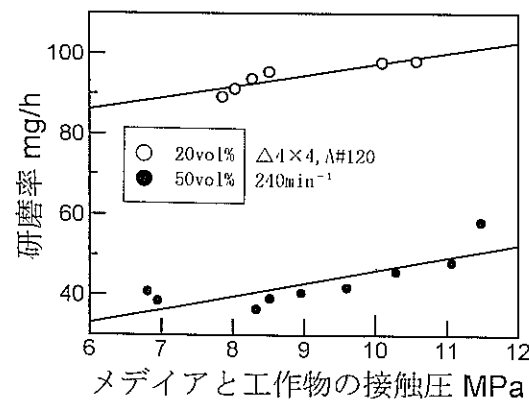


図5.10 メディアと工作物の接触圧と研磨率の関係 (混合率変化)

すなわち、図5.9は、図5.8のメディアと工作物の混合率をマス内に含まれる工作物の個数に変換して示したものである。この場合、メディア装入率の低い方が接触圧は高くなっており、マスの流動性が活発になることによりメディアと工作物の接触圧が増大するならば、図5.8の同一混合率において、より多くの工作物個数となるメディア装入率の高い方が接触圧が高くなっていることがわかる。したがって、マスの流動はメディアと工作物の混合率よりもマス内に含まれる工作物の個数の影響を受けることが明らかである。

図5.10は、図5.8と同一の研磨条件におけるメディアと工作物の接触圧と工作物1個当りの研磨率の関係を示したものである。同図によれば、いずれのメディア装入率においても、メディアと工作物の接触圧の上昇にともなって研磨率は増大する傾向を示している。また、メディア装入率20vol%の方が50vol%より高い研磨率を示しているのは、メディア装入率20vol%の方がメディアと工作物の接触の起こる頻度が高くなることによるものと推察される。

5.7 結言

乾式遠心バレル研磨における研磨機構という観点から、メディアと工作物の接触挙動と研磨特性の関係ならびにメディアと工作物の接触圧について検討するとともに、圧力測定用フィルムを用いてメディアと工作物の接触圧の測定を実際に行って、メディアと工作物の接触挙動に及ぼす研磨条件の影響を明らかにした。その結果を要約すると以下のようになる。

- (1) メディア装入率の増大にともなって、メディアと工作物の接触圧は低下する。これは、メディアの装入量の増大による静的な接触圧の上昇よりも、メディアと工作物の相対運動による動的な接触圧の低下によるものである。
- (2) タレット回転数の増大にともなって、メディアと工作物の接触圧は増加する。これは、バレル回転数の増加によりバレル内のメディアと工作物の流動速度およびメディアと工作物に作用する遠心力が増大することによるものである。
- (3) メディアと工作物の混合率の増大にともなって、メディアと工作物の接触圧は増大する。これは、工作物の個数の増加にともなってマスの流動性が活発になることに起因するものである。
- (4) 研磨率はメディアと工作物の接触圧に比例し、遠心バレル研磨における研磨量はラッピングの理論による結果と定性的に一致する。

参考文献

- 1) 精機学会編：新訂精密工作便覧，コロナ社，(1965)829.
- 2) 松永正久：遠心バレル研磨法，生産研究，18，3 (1966) 71.
- 3) 石田喬男，吉田昭一，河野洋一郎，平賀幹敏：乾式バレル研磨機（ロールロー）による仕上げ加工，新東技報，No. 14(1994)39.
- 4) 新東ブレーター編：バレル研磨—装置とプロセス—(1975)14.
- 5) 松永正久：バレル研磨における微少切削研磨材の開発とその効果，機械の研究，22，7(1970) 969.
- 6) 生井武文：流れの力学，コロナ社，(1975)28.
- 7) M. Punamia and P. T. Blotter: Workpiece Kinetics in Centrifugal Barrel Finishing, SME Technical Paper, MR81-406(1981)1.

第6章 研磨特性に及ぼすメディア諸元の影響

6.1 緒言

従来のバレル研磨法においても、コンパウンドと水を使用しないで有機メディアだけを用いた乾式バレル研磨は行われていたが、合成樹脂の光沢仕上げ等に用途が限定されていた¹⁾。しかし、本研究における乾式遠心バレル研磨法は、セラミックスの焼成メディアを用いた従来の湿式バレル研磨と同等の仕上げ、すなわち一般金属部品の粗仕上げから細仕上げまでの広範囲の研磨加工を乾式で行うものである。

乾式バレル研磨においては、コンパウンドと水による潤滑作用、洗浄作用、緩衝作用などが無いため、従来のセラミックスの成形メディアでは、工作物とメディアは過酷な条件下で接触を繰返すことになるので、工作物表面に打痕や擦過痕を発生するなど満足な仕上面が得られないことが多く見受けられる²⁾。

そのため、ナイロンなどの高分子材料に砥粒を混入して成形し、メディア自身に緩衝作用のあるドライバレル研磨用のメディアとして開発されたものが使用されている。乾式バレル研磨用メディアとしては、メディア素材に耐熱性と耐磨耗性が特に要求されるので、メタ系アラミド樹脂（以下、アラミド樹脂と略す）やナイロンに砥粒を混入したものが開発されているが、乾式遠心バレル研磨に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

そこで本章では、アラミド樹脂とナイロンを素材とする乾式バレル研磨用メディアを取り上げ、メディアの諸元（形状・寸法，混入砥粒粒度，材質）が研磨特性に及ぼす影響について検討する^{3, 4)}。

6.2 メディア形状・寸法の影響

図6.1は、メディア形状の研磨量への影響を調べるため、炭化けい素の砥粒(#120)が混入されている円柱($\phi 2.5 \times 4\text{mm}$)状と四角柱($\square 2.5 \times 4\text{mm}$)状のアラミド樹脂メディアを使用し、タレット回転数 200min^{-1} およびメディア装入率50vol%で研磨したときの研磨時間とそれらの研磨量の関係を求めたものである。

いずれのメディア形状においても、研磨量は研磨時間に比例して増加しており、研磨時間の増加によるメディアの研磨力の低下はほとんど認められない。このことより、各研磨条件における各メディアの単位時間当りの研磨量が求められるれば、研磨量を推定できることが明らかである。また、同図における単位時間当りの研磨量は、それぞれのメディアの研磨量を示す直線の傾きであり、四角柱状メディアの研磨量は円柱状メディアの約1.32倍となっていることがわかる。これは、四角柱状メディアの方がエッジが長く、工作物との接触圧が円柱状メディアよりも高くなることによるものと考えられ、四角柱状メディアの体積および表面積がともに若干大きいということも考慮しても、形状の差異の影響が現れているものと思われる。

図6.2は、アルミナの砥粒(#320)を混入した円柱($\phi 3.5 \times 4\text{mm}$)状と三角柱($\triangle 4 \times 4\text{mm}$)状のナイロンメディアを使用し、タレット回転数 240min^{-1} およびメディア装入率50vol%で研磨したときの研磨時間と研磨量の関係を示したものである。

円柱状と三角柱状メディアの研磨量を比較すると、三角柱状メディアの研磨量は多く、円柱状メディアの約1.16倍を得ていることがわかる。これは、四角柱状

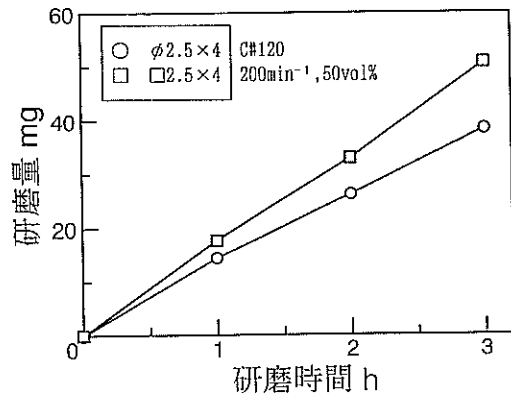


図6.1 メディア形状の研磨量への影響 (アラミド樹脂メディア)

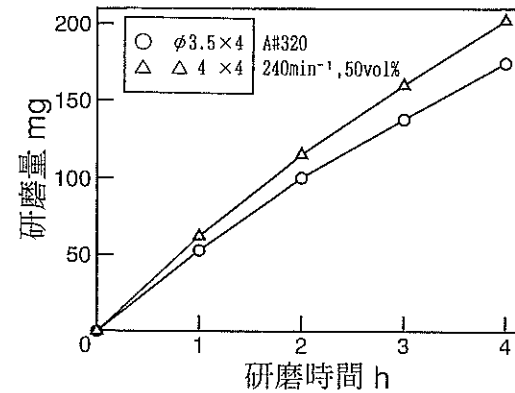


図6.2 メディア形状の研磨量への影響 (ナイロンメディア)

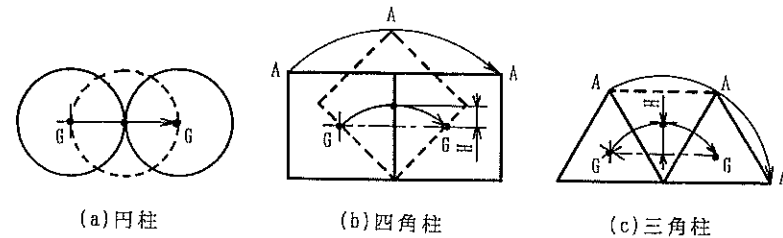


図6.3 メディアの回転による重心の移動

メディアの場合と同様に三角柱状メディアにおいてもメディアのエッジによる工作物との接触圧が円柱より高くなることによるものと推察され、メディア形状の影響が現れているものと思われる。

タレット回転数やメディア材質を無視すれば、円柱状メディアとの研磨量の比較において、四角柱状メディアの方が約1.32倍、三角柱状メディアの方が約1.16倍となっていることから、四角柱状メディアの研磨量は三角柱状メディアより多いことになる。しかし、メディアの断面形状について、一辺の長さが円柱状メディアの直径に相当する四角形と三角形の回転運動を考えると、重心の上下方向の移動量は、図6.3に示すように三角形の方が四角形よりも大きく、メディア自身が回転しにくくなるので、流動中のマス内における三角柱状メディアの圧力は四角柱状メディアの場合よりも高くなることが推測される。

すなわち、メディア形状の影響については、入手できる範囲が限られており、

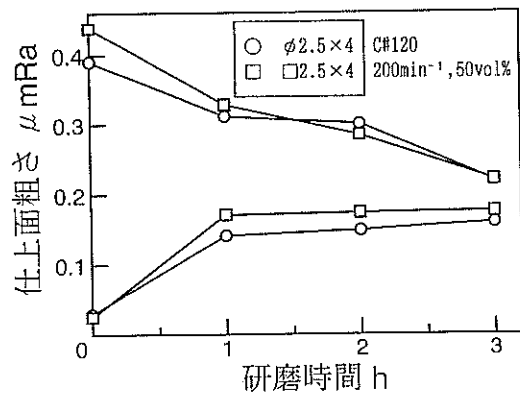


図6.4 メディア形状の仕上面粗さへの影響 (アラミド樹脂メディア)

アラミド樹脂メディアには三角柱状のものが、イロンメディアには四角柱状のものが無いので、同一材質のメディアによる比較が困難であるため、円柱状メディアに比べて四角柱状と三角柱状メディアの研磨量が多いことは明白であるが、四角柱状と三角柱状メディアとでは本研究の範囲においては明確ではない。

図6.4は、メディア形状が仕上面粗さに及ぼす影響を明らかにするため、炭化けい素の砥粒(#120)を混入した円柱(φ2.5×4mm)状と四角柱(□2.5×4mm)状のアラミド樹脂メディアを使用し、タレット回転数200min⁻¹およびメディア装入率50vol%で研削仕上げの工作物と鏡面仕上げを施した工作物をそれぞれ研磨したときの仕上面粗さの時間的推移を求めたものである。

鏡面仕上げの工作物の仕上面粗さは、円柱状および四角柱状メディアのいずれにおいても、1時間の研磨でほぼ一定値に到達し、円柱状メディアの場合には約0.16μmRa、四角柱状メディアの場合には約0.18μmRaとなっている。この数値は、本研磨条件においてそれぞれのメディアを使用して研磨した場合の限界仕上面粗さを示しており、四角柱状メディアよりも工作物との接触状態が滑らかである(メディアと工作物の接触圧の変動が少ない)と推測される円柱状メディアの方が限界仕上面粗さは小さくなったものと考えられる。

一方、研削仕上げした工作物の場合において、仕上面粗さは研磨初期で円柱状と四角柱状メディアで若干異なっているが、研磨量の多い四角柱状メディアの方が仕上面粗さの減少割合は速くなっている。しかし、研磨時間が3時間を経過すると、円柱状メディアによる仕上面粗さの方が四角柱状メディアによるものよりも若干小さくなっている。これは、四角柱状メディアの場合に仕上面粗さの減少が初期で速くなっているが、仕上面粗さの減少割合が限界仕上面粗さに近づくに

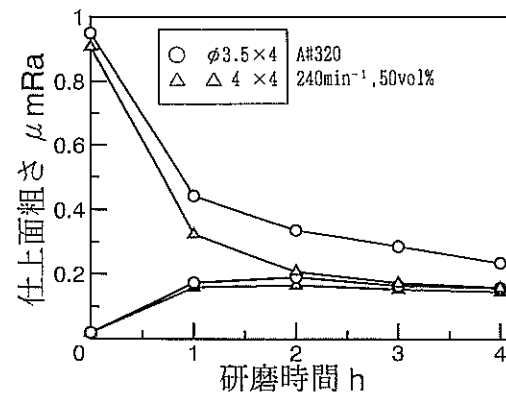


図6.5 メディア形状の仕上面粗さへの影響 (ナイロンメディア)

つれて低下するため⁵⁾、限界仕上面粗さが大きくなるほど、仕上面粗さの減少割合の低下が早く始まることによるものである。

図6.5は、アルミナ砥粒(#320)を混入した円柱(φ3.5×4mm)状と三角柱(△4×4mm)状のナイロンメディアを使用し、タレット回転数240min⁻¹およびメディア装入率50vol%で研削のままの工作物と鏡面仕上げを施した工作物を研磨したときの仕上面粗さの時間的推移を示したものである。

仕上面粗さは、研磨時間の経過に対して図6.4に示したアラミド樹脂メディアで研磨した結果とほぼ同様の傾向を示しているが、鏡面仕上げの工作物において示される限界仕上面粗さが円柱状と三角柱状メディアではほとんど差異が認められず、約0.16μmRaとなっていることがわかる。

一方、研削された工作物では、円柱状と三角柱状メディアのいずれの場合においても限界仕上面粗さに近づくにともなって減少割合は急激に低下しているが、円柱状と三角柱状メディアの限界仕上面粗さがほぼ同一であるため、研磨量の多い分だけ三角柱状メディアの方が限界仕上面粗さに接近している。

メディア形状の相違が仕上面粗さに及ぼす影響をまとめると、円柱状と四角柱状のアラミド樹脂メディアの場合、円柱状メディアの方が限界仕上面粗さは小さいので、研磨時間さえ長くすれば、四角柱状メディアよりも仕上面粗さを小さくすることができる。一方、円柱状と三角柱状のナイロンメディアの場合、限界仕上面粗さはほぼ同一であるが、研磨量の多い三角柱状メディアの方が仕上面粗さの減少割合が速くなる。

図6.6は、メディア寸法の影響を解明するため、炭化けい素砥粒(#1000)を混入した寸法の異なる円柱(φ1.0×3, φ2.5×4mm)状メディアを使用し、タレ

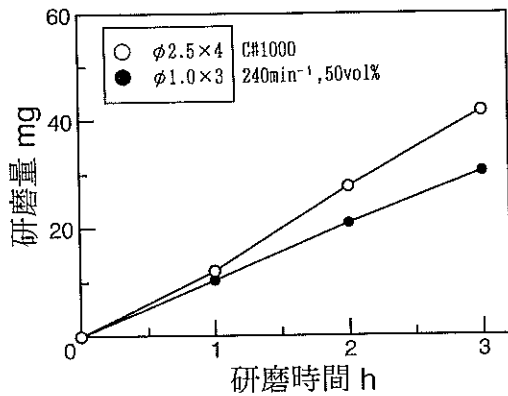


図6.6 メディア寸法の研磨量への影響

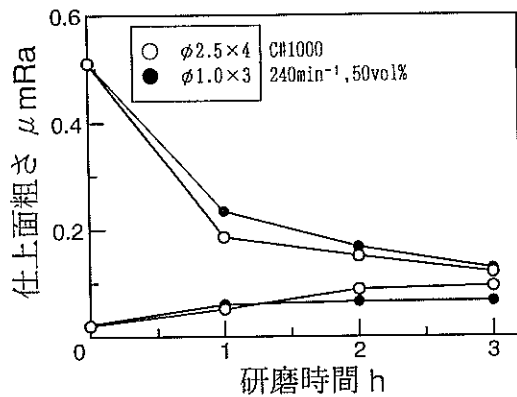


図6.7 メディア寸法の仕上面粗さへの影響

ト回転数を240min⁻¹およびメディア装入率50vol%で研磨したときの研磨時間と研磨量の関係を求めたものである。

この図より、寸法の大きなメディアで研磨した方が研磨量は多くなることがわかる。これは、メディア寸法の大きい方がメディア自身の重量も重くなり、工作物との接触圧が高くなることによるものと考えられる。

図6.7は、図6.6と同様の研磨条件で研削のままの工作物と鏡面仕上げを施した工作物を研磨した場合の仕上面粗さの時間的推移を比較したものである。

同図において、鏡面仕上げの工作物の仕上面粗さの変化より、寸法の大きい円

柱 (φ2.5×4mm) 状メディアの限界仕上面粗さが約0.09 μmRaであることがわかる。一方、寸法の小さい円柱 (φ1.0×3mm) 状メディアの限界仕上面粗さは約0.07 μmRaであり、このことから寸法の小さいメディアを使用した方が、仕上面粗さをより向上させることができるといえる。

また、研削された工作物の仕上面粗さは、寸法の大きいメディアの方が初期では速く減少している。これは、寸法の大きいメディアの方が研磨量が多いことによるものと考えられる。しかし、仕上面粗さが限界値に近づくともなると、寸法の大きいメディアによる仕上面粗さの減少割合は急激に低下するため、研磨時間が3時間では、寸法の小さいメディアによる仕上面粗さは大きいメディアに急速に接近し、小さいメディアの限界仕上面粗さに漸近するものと推察される。

6.3 メディア混入砥粒粒度の影響

図6.8は、メディア混入砥粒粒度の研磨量への影響を明らかにするために、混入する砥粒 (SiC) の粒度 (#120, #500, #1000) が異なる円柱状アラミド樹脂メディア (φ2.5×4mm) を使用し、タレット回転数240min⁻¹およびメディア装入率50vol%で研磨したときの研磨時間と研磨量の関係を求めたものである。

砥粒粒度#500のメディアによる研磨量が最も多く、次いで#120, #1000の順となっており、必ずしも砥粒粒度の順とはなっていないことがわかる。

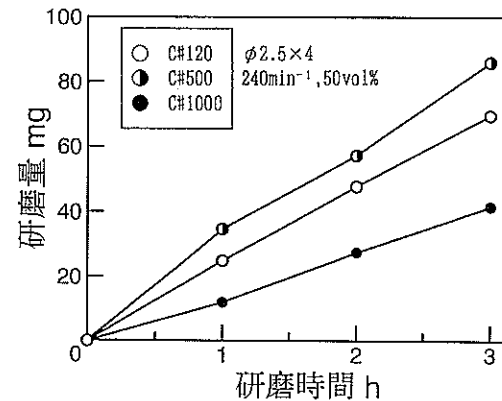


図6.8 砥粒粒度の研磨量への影響

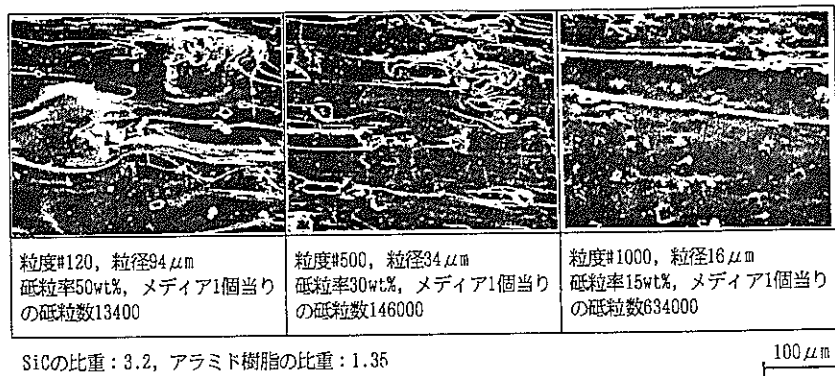


図6.9 メディアの表面状態 (アラミド樹脂メディア, φ2.5×4)

図6.9は、それぞれの砥粒粒度の円柱状メディア表面のSME写真を示したものであり、メディア1個当りに含まれる砥粒数も併せて記している。この砥粒数は、その形状をそれぞれの砥粒粒度の平均粒径⁶⁾の球であると仮定し、メディアの形状(体積)、砥粒率、砥粒ならびにアラミド樹脂の比重から算出した。同図によれば、#1000のメディアは砥粒数が最も多くなるがメディア表面からの砥粒切れ刃の突出量が小さく、また#120のメディアは砥粒数が最も少ないがメディア表面からの突出量が大きくなっている。一方、#500のメディアの研磨量が最も多くなっていることから、メディア表面における砥粒の状態は研磨量に大きく影響を及ぼし、研磨量が最大となる砥粒数ならびにその突出量(砥粒率ならびに砥粒粒度)が存在するものと推測される。

図6.10は、メディアに混入の砥粒粒度が仕上面粗さに及ぼす影響を調べるために、図6.8と同様の研磨条件で研削仕上げの工作物と鏡面仕上げを施した工作物をそれぞれ研磨した場合の仕上面粗さの時間的推移を示したものである。

同図における鏡面仕上げの工作物の仕上面粗さの時間的変化より、混入した砥粒粒度が大きい(すなわち砥粒粒径が小さい)方が、限界仕上面粗さは小さくなることわかる。

一方、研削仕上げによる工作物の仕上面粗さは、粒度#500および#1000の砥粒を混入したメディアの場合、時間的にほぼ同様の減少傾向を示しているが、研磨時間3時間後においては#500のメディア仕上面粗さは、研磨量が多い分だけ小さくなっている。しかし、さらに研磨を続行すると、限界仕上面粗さは#1000のメディアの方が小さいため、#1000のメディアで研磨した方が#500のメディアよりも仕上面粗さは小さくなると推察される。また、#120および#1000のメディアに

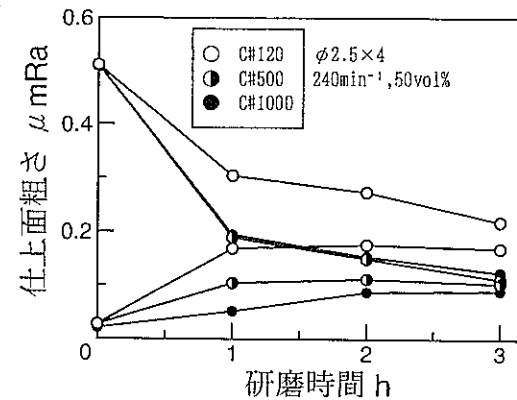


図6.10 砥粒粒度の仕上面粗さへの影響

おいては、#120のメディアの研磨量が多いにもかかわらず、#1000のメディアの仕上面粗さの減少割合は速くなっている。このことは、単に研磨量が多くなるだけでは仕上面粗さが減少しないことを示している。

すなわち、研磨量が増加すると、工作物表面の除去速度は増すことになるが、仕上面粗さの減少割合は、前加工面粗さが同一の場合、限界仕上面粗さの影響も大きく受けるので、限界仕上面粗さの差異が大きい#120と#1000のメディアにおいては、研磨量が少なくても、限界仕上面粗さの小さい#1000のメディアの方が仕上面粗さの減少割合が大きくなっている。また、限界仕上面粗さの差異が小さい#500と#1000のメディアにおいては、研磨量が#1000のメディアの約2倍であるにもかかわらず#500のメディアの方が仕上面粗さの減少割合は若干大きくなっているだけで、仕上面粗さの減少割合に対する研磨量の影響は小さいことがわかる。なお、限界仕上面粗さは、それぞれの研磨条件における各メディアの砥粒切込み深さや作用砥粒数によって決定される。

6.4 メディア材質の影響

乾式バレル研磨用メディアは、高分子材料に砥粒を混入して成形したものであり、本研究における高分子材料と砥粒の材質の組合せでは、アラミド樹脂とC(SiC)砥粒、ナイロン6とA(Al₂O₃)砥粒となっており、単にメディアによる研磨特性を比較しても、メディア寸法も混入されている砥粒も異なるので、メディア材質の影響を定量的に明らかにすることは困難である。

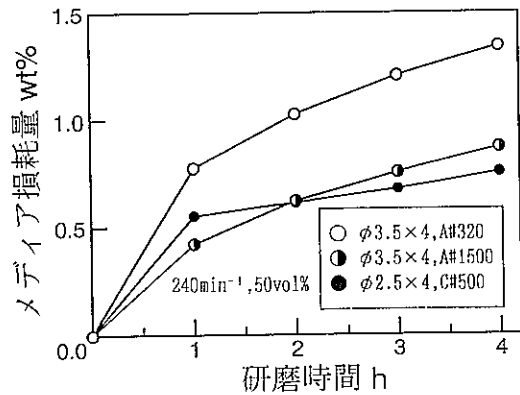


図6.11 研磨時間とメディア損耗量の関係

メディア材質の特徴は、第3章の表3.4で示したように、アラミド樹脂の方がナイロン6よりも耐熱性に優れ、引張強さと硬さが大きいという特性を有している。この特徴が最もよく現れるメディアの損耗特性について検討する。

図6.11は、円柱状アラミド樹脂メディア（φ2.5×4mm, SiC, #500）と円柱状ナイロンメディア（φ3.5×4mm, Al₂O₃, #320, #1500）を使用し、タレット回転数240min⁻¹およびメディア装入率50vol%で研磨したときの研磨時間とメディア損耗量の関係を示したものである。なお、メディア損耗量は、メディアの研磨前の重量に対する研磨前後における重量差の割合で示している。

同図より、いずれのメディアにおいても研磨初期の1時間にメディア損耗量は急増し、その後研磨時間にほぼ比例して増大している。その増大割合は、#320の砥粒を混入したナイロンメディアが最も大きく、#500の砥粒を混入したアラミド樹脂メディアが最も小さくなっている。

一般に、メディアの損耗は、マス内において工作物に対するメディアの研磨作用とメディア同士の摩擦作用の相乗作用に起因しており、工作物の研磨量を多く得られるメディアはその損耗量も多くなるものと推察される。実際に、ナイロンメディアの場合は、研磨量の多い#320の砥粒を混入したメディアの方が損耗量が多くなっているが、最も研磨量の少ない#1500の砥粒の混入されたナイロンメディアよりも同種のメディアのなかで最も研磨量の多い#500の砥粒が混入されたアラミド樹脂メディアの方が損耗量は少なくなっている。したがって、混入されている砥粒材質やメディア寸法が若干異なることを考慮しても、アラミド樹脂メディアの方が損耗量はナイロンメディアより少ないことになる。

図6.12は、図6.11と同一の研磨条件によって研磨したときのメディア損耗量と

研磨量との関係を示したものである。なお、最初の1時間のメディア損耗量は初期損耗として補正したものを示している。

同図より、図6.11と同様に混入している砥粒材質やメディア寸法が若干相異なることを考慮しても、アラミド樹脂メディアはより少ないメディアの損耗量で、多くの研磨量を得られることがわかる。また、同図を直線で近似した場合のその傾きは研磨比に相当することになり、ナイロンメディアにおいて、#1500の砥粒を混入したメディアの研磨比は#320のものより小さいことがわかる。

図6.13は、混入砥粒の粒度の異なる円柱状アラミド樹脂メディア（φ2.5×4mm、

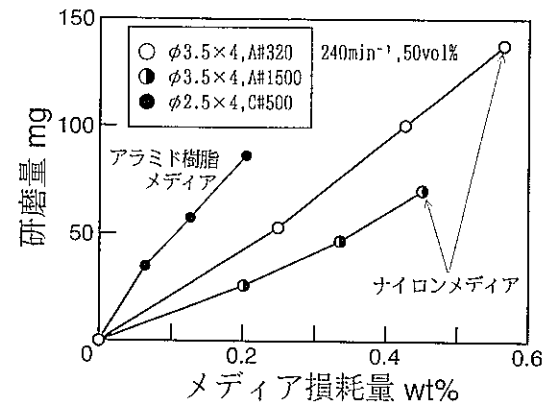


図6.12 メディア損耗量と研磨量との関係

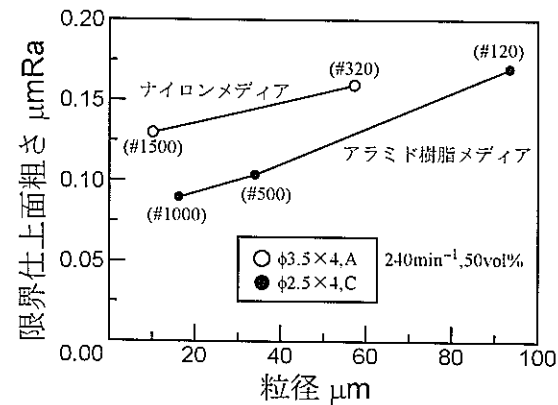


図6.13 砥粒粒径と限界仕上面粗さの関係

SiC, #120, #500, #1000) と円柱状ナイロンメディア ($\phi 3.5 \times 4\text{mm}$, Al_2O_3 , #320, #1500) を使用し, 鏡面仕上げを施した工作物をタレット回転数 240min^{-1} およびメディア装入率 50vol% で研磨したときの砥粒粒径と限界仕上面粗さの関係を示したものである。

鏡面仕上げを施した工作物を研磨した場合, 短時間の内に仕上面粗さが急増し, その後研磨時間の増加にもかかわらずほぼ一定値に収束するようになるので, そのときの仕上面粗さを限界仕上面粗さと定義した。換言すれば, 限界仕上面粗さは与えた研磨条件で到達可能な最小の仕上面粗さを示している。

同図によれば, いずれのメディア材質においても混入する砥粒粒径が大きい (砥粒粒度が小さい) ほど, 限界仕上面粗さは大きくなる。また, ナイロンメディアとアラミド樹脂メディアを比較すると, メディア寸法がアラミド樹脂メディアの方が若干小さいことを考慮に入れても, 同一砥粒粒径における限界仕上面粗さはアラミド樹脂メディアの方が小さくなることが明らかである。

メディア材質において, アラミド樹脂はナイロンよりも硬く, メディア自身の工作物との接触における緩衝作用は小さくなると考えられ, アラミド樹脂の方が限界仕上面粗さは大きくなるものと予測されたが, 逆にナイロンメディアの方が弾性変形量が大きくなるので, 工作物との接触圧も低く, 一方損耗量も多いことから, その表面上に突出する砥粒の自生作用も活発化されやすくなり, 工作物とメディア表面上の砥粒切れ刃との接触圧が増大した結果に起因するものと考えられる。

6. 5 結言

本章では, 研磨特性に及ぼすメディア諸元の影響を明らかにするため, 形状, 混入砥粒粒度および材質の異なるメディアを使用して乾式遠心バレル研磨を行い, 研磨量や仕上面粗さなどへの影響について検討した。その結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 四角柱状ならびに三角柱状メディアの研磨量は円柱状メディアと比較すると多くなる。アラミド樹脂メディアの場合, 四角柱状メディアの研磨量は円柱状メディアより多くなるが, 限界仕上面粗さは逆に円柱状メディアの方が良好である。一方, ナイロンメディアの場合, 三角柱状メディアの研磨量は円柱状メディアより多くなるが, 限界仕上面粗さは円柱状と三角柱状メディアではほとんど大きな差異が認められない。
- (2) 寸法の大きいメディアは研磨量が多く, 限界仕上面粗さも大きくなる。

- (3) メディアに混入する砥粒の粒度が大きい (砥粒粒径が小さい) ほど, 限界仕上面粗さは減少する。研磨量に関しては, 砥粒粒度だけでなくメディア表面上に突出する砥粒切れ刃の状態が影響を及ぼすため, 砥粒粒度の小さい (砥粒粒径が大きい) メディアは研磨量が必ずしも多くなるということにはならない。
- (4) アラミド樹脂メディアとナイロンメディアを比較した場合, アラミド樹脂メディアの損耗量が少なく, 損耗量に対する研磨量の割合, すなわち研磨比も大きくなる。また, メディアに混入する砥粒の粒度が同一ならば, 限界仕上面粗さはナイロンメディアの方が大きくなる。

参考文献

- 1) 新東ブレーター編: バレル研磨—装置とプロセス—(1975)197.
- 2) 山本章裕, 北嶋弘一, 瀧上晃弘, 渡辺昌知: バレル研磨における乾式および湿式の研磨性能, 砥粒加工学会誌, 42, 3(1998)124.
- 3) 山本章裕, 北嶋弘一, 野呂田 進: 砥粒混入アラミド樹脂メディアによるドライバレル研磨の研究, 砥粒加工学会誌, 40, 2(1996)69.
- 4) A. Yamamoto, K. Kitajima and Y. Sakurada: Surface Finishing by Using Dry-type Centrifugal Barrel Finishing, Proc. of ICPE'97 Taipei, Taiwan (1997)309.
- 5) A. Yamamoto, K. Kitajima, S. Norota and K. Takazawa: Dry Centrifugal Barrel Finishing by Using Aramid Resin Media, Proc. of 2nd Int'l ABTEC Conf., Taiwan (1995)527.
- 6) 木下直治, 高沢孝哉: 表面研磨・仕上技術集成, 日経技術図書, (1984)275.

第7章 研磨特性に及ぼすメディア 装入率の影響

7.1 緒言

乾式遠心バレル研磨に関する研究は、まだ緒についたばかりであり、従来の有機質メディアを使用した乾式バレル研磨の事例報告¹⁾があるだけである。また、乾式バレル研磨においても乾式用ナイロンメディアを使用した流動バレル研磨に関する報告²⁾は見当るが、現実にはほとんど研究されていないのが現状である。

従来の湿式遠心バレル研磨に関しては、かなり詳細に理論的な検討を行った研究報告^{3), 4)}もあるが、理論に重点がおかれているため、加工条件の研磨特性に及ぼす影響についてはほとんど言及されていない。しかし、ここでの理論は、湿式研磨における水の影響を考慮に入れたものではないので、本研究における乾式遠心バレル研磨に対してもこの理論は有効であるといえる。

一般に、湿式遠心バレル研磨におけるバレル容器への装入量は、工作物とメディアの容積を合わせてバレル容積の50~60%にすることが推奨されており⁵⁾、メディアの装入量を変化させて研磨を実施するという考え方自体がほとんどないという現状にある。これは、バレル容器内でのマスの流動と容器空間の有効利用を考慮すると、工作物を多く入れるほど一回当り処理量は多くなる。しかし、満杯にしまうと、マスの流動空間がなくなって研磨できなくなるので、マスに適当な流動が与えられる最大のメディア装入量という観点と回転バレル研磨における

メディア装入量に関する実験結果⁶⁾の両面からの類推によるものと考えられる。

これまでの遠心バレル研磨において、バレル容器へのメディア装入量、すなわちメディア装入率（バレル容積に対するメディア体積の比）を系統的に変化させて研磨した例は見当たらず、全く検討されていないといえる。

そこで本章では、メディア装入率が研磨特性に及ぼす影響という観点から乾式遠心バレル研磨法について検討する⁷⁾。

7.2 研磨量に及ぼす影響

図7.1は、タレット回転数 200min^{-1} およびメディア装入率20, 30, 50vol%の研磨条件で研削加工処理した工作物と研磨紙で鏡面仕上げを行った工作物をそれぞれ研磨したときの研磨量の時間的推移を示したものである。なお、本章で使用したメディアは、アラミド樹脂メディア（ $\phi 2.5 \times 4\text{mm}$, C#120）である。

研磨量は研磨時間に比例して増加しており、メディア装入率の低い方が研磨量は大きくなっている。研磨量の大きいメディア装入率20vol%においては、研削面と鏡面の前加工面性状の差異による研磨量の相違はほとんどなく、ほぼ同等の直線を呈しているが、メディア装入率30vol%および50vol%においては仕上面粗さの大きい研削面の工作物の研磨量の方が鏡面のそれより増大していることがわかる。

従来の回転バレル研磨におけるメディア装入率と研磨量に関する研究⁸⁾においては、容器内のマス内部における仕上区域を求めるために半径方向に一定の間隔

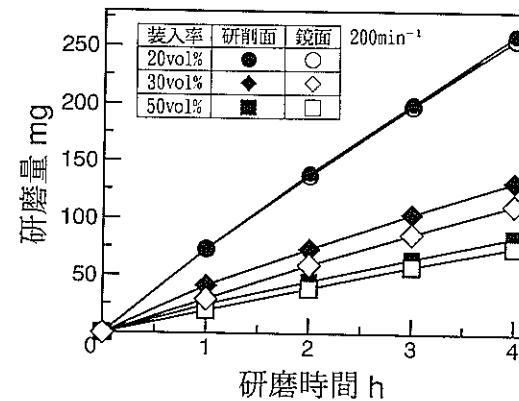


図7.1 研磨時間と研磨量の関係

で工作物を固定し、それぞれの位置における工作物の研磨量をメディア装入率を変えて検討している。その結果、メディア装入率約50vol%における容器中心部の工作物の研磨量が最大をとることより、遠心バレル研磨法の場合においても同様の結果を示すものと推測される。しかし、これはあくまでも容器内に固定した工作物とメディアの相対運動によってもたらされた結果であり、実際のバレル研磨のように工作物がメディアとともに流動したときのものではないことは自明である。すなわち、工作物を容器内に固定した場合には、装入率約50vol%の容器中心部における工作物とメディアの相対速度が最大値をとることは明らかであり、その結果として研磨量も最大となっているが、工作物がメディアとともに流動する遠心バレル研磨法の場合には、図7.1に示すようにメディア装入率の低い方が研磨量が大きくなっており、流動中におけるメディアと工作物の相対速度も大きくなっているものと思われる。

図7.2は、タレット回転数ならびにメディア装入率を変化させたときの研削加工面を有する工作物の研磨量を単位時間当たりの研磨量（研磨率）で示したものであり、鏡面の加工面を有する工作物についてもほぼ同様の傾向を呈している。同図より、メディア装入率が低く、タレット回転数が大きい研磨条件では研磨率が增大していることがわかる。とくに、タレット回転数が增大するほど、メディア装入率による研磨率の変化割合が大きくなっている。また、いずれのタレット回転数においてもメディア装入率20vol%から30vol%の間で研磨率が著しく変化していることが明らかである。

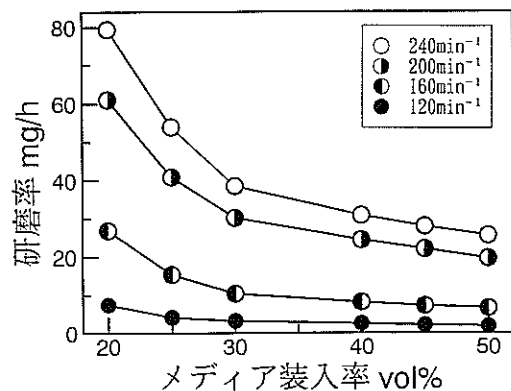


図7.2 メディア投入率と研磨率の関係

7.3 仕上面粗さに及ぼす影響

図7.3は、タレット回転数200min⁻¹およびメディア装入率50vol%において研削加工（1.03μmRa）および研磨紙で鏡面仕上げ（0.03μmRa）を施した工作物をそれぞれバレル研磨したときの仕上面粗さの時間的推移を示したものである。研削加工面の工作物では、仕上面粗さは研磨開始より急速な減少を示し、その後ゆるやかに減少している。一方、鏡面の工作物の場合には研磨開始2時間後において仕上面粗さはほぼ一定の値を示しており、研削加工面もこの値以下には仕上げられないことより、この付近の仕上面粗さが本研磨条件によって到達し得る限界値を示しているものと考えられる。

図7.4は、メディア装入率およびタレット回転数を変化させて、鏡面の工作物を4時間研磨したときのメディア装入率と仕上面粗さの関係を示したものである。

同図より、メディア装入率が低く、タレット回転数の大きい方が仕上面粗さは増大しており、図7.2に示した研磨率の結果と定性的に同様の傾向を示していることがわかる。また、この結果は本研磨条件で到達し得る仕上面粗さの限界値を示しており、このことより良好な仕上面粗さを得るためには、メディア装入率を高く、タレット回転数を低くしなければならないことが明らかである。

一方、図7.5は研削加工面の工作物を図7.4の結果と同一の研磨条件で研磨したときの仕上面粗さを示したものである。

同図において、図7.4の結果とは逆にタレット回転数が大きくなる方が仕上面粗さが小さくなっている。これは、研削加工面の粗さが約1.0μmRaと大きい値を有しており、それを除去するための研磨時間が十分でないことから、仕上面粗さが限界値にまでまだ到達していないという結果によるものである。

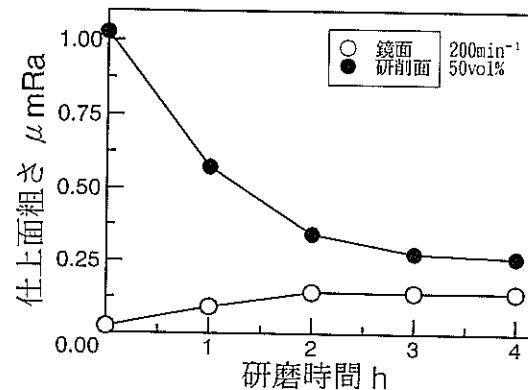


図7.3 研磨時間と仕上面粗さの関係

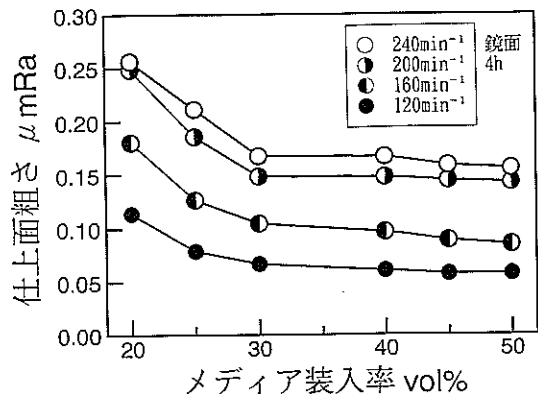


図7.4 メディア装入率と仕上面粗さの関係（鏡面）

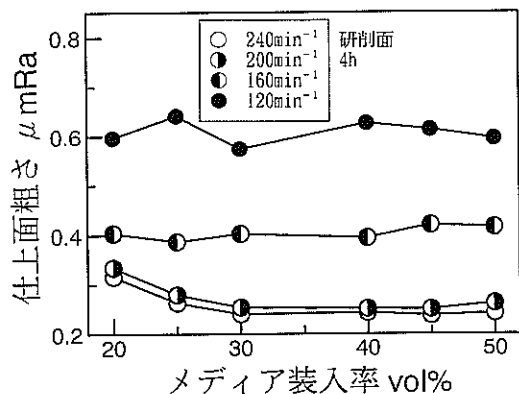


図7.5 メディア装入率と仕上面粗さの関係（研削面）

しかし、仕上面粗さが限界値にまで到達していないとはいえ、タレット回転数200および240min⁻¹の場合にはメディア装入率に対して図7.4に示した結果と定性的に同様の傾向を示しており、タレット回転数120および160min⁻¹においても研磨の進行にともなって同様の傾向を示すものと思われる。このことから、研削面の工作物が到達し得る限界の仕上面粗さを最短時間で得るには、図7.5においても明らかなように、まずタレット回転数およびメディア装入率を増加させた研磨条件で研磨を行い、その仕上面粗さが到達し得る仕上面粗さの限界値に近づいたとき、次に図7.4に示したようにタレット回転数を減少させれば容易にできることがわかる。

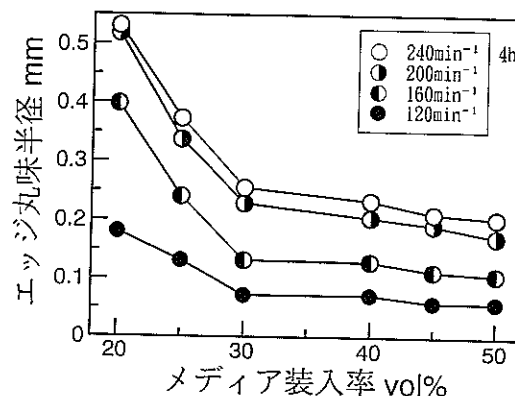


図7.6 メディア装入率とエッジ丸味半径の関係

7.4 エッジ丸味半径に及ぼす影響

図7.6は、タレット回転数を変化させた場合のメディア装入率と4時間研磨後の工作物エッジ部の丸味半径の関係を示したものである。

同図より、メディア装入率が低く、タレット回転数が大きい方が、エッジ丸味半径は増大していることがわかる。また、いずれのタレット回転数においてもメディア装入率20vol%から30vol%の間でエッジ丸味半径が著しく減少しており、研磨率の結果と全く同様の傾向を示していることがわかる。このことは、研磨率の大きい研磨条件において、エッジ部もよく研磨されていると考えれば当然の結果といえる。

7.5 マスの流動性に及ぼす影響

図7.7は、図7.2に示したそれぞれのタレット回転数においてメディア装入率50vol%の研磨率を1としたときの研磨率を相対研磨率と定義し、その相対研磨率とメディア装入率の関係を示したものである。

同図より、相対研磨率はタレット回転数の影響をほとんど受けていないことがわかる。すなわち、メディア装入率によるマスと容器の幾何学的関係により、マスの流動状態がその影響を直接的に受け、相対研磨率が変化するものと考えられる。

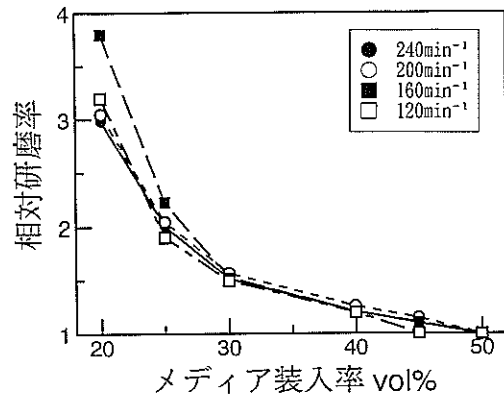


図7.7 メディア装入率と相対研磨率の関係

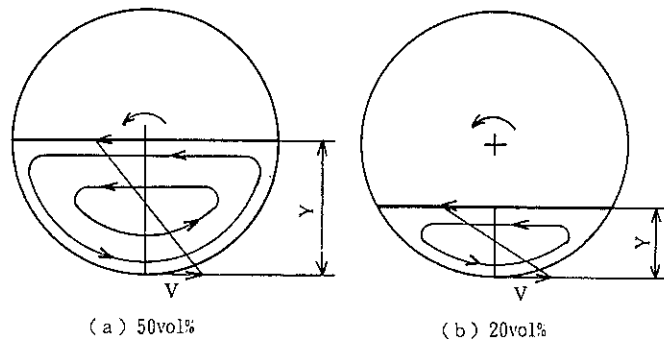


図7.8 メディア装入率とマスの流動の幾何学的な関係

図7.8は、円筒バレル容器中におけるマスの状態を単純化して示したものである。これより、マスはバレル容器との摩擦と遠心力によりバレル容器の回転方向に流動するものと考えられ、その周速度もバレル容器の周速度に比例するものと考えられる。

すでに述べたように、従来のバレル容器内に工作物を固定した研磨実験においては、メディア装入率50vol%でバレル容器中心において工作物とマスの相対速度が最大となり、しかもマスの表面長さ（流動層）も最大となるので、研磨能力が最も高くなるものと考えられていたが、実際の遠心バレル研磨においてはメディアと工作物はともに流動しており、その相対速度はマス内の速度勾配の影響を直接受けるものと思われる。すなわち、図7.8に示すように速度勾配はマスの表面か

らバレル容器の最下位置までの距離Yに反比例するので、メディア装入率が低くなるほど速度勾配は大きくなり、研磨量が増大するものと考えられる。

図7.9は、メディア装入率50vol%における速度勾配を1としたときの相対速度勾配を図7.8の幾何学的関係より求めたもので、すでに示した図7.7の実験結果と定性的に同様の傾向を示していることが明らかである。

また、マスの周長はメディア装入率が低いほど小さくなるので、バレル容器とマス間にすべりがないとすると、バレル容器1回転に対するマスの回転数（自転）はメディア装入率が低くなるにつれて増大することになる。すなわち、メディア装入率が低い方がマスの回転数が大きく、マスの周速度が増大するわけでは

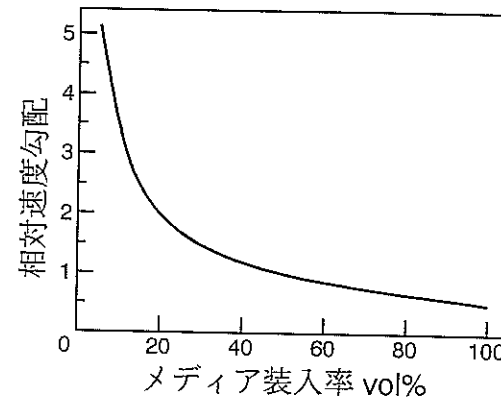


図7.9 メディア装入率とマスの相対速度勾配の関係

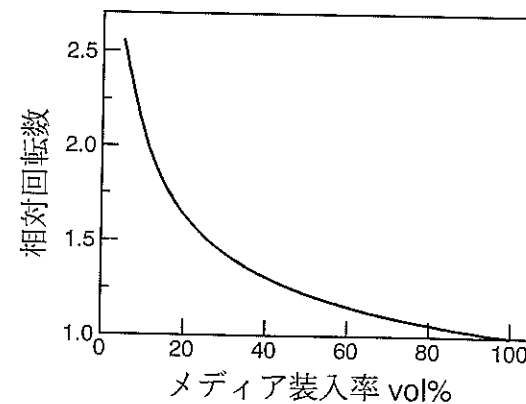


図7.10 メディア装入率とマスの相対回転数の関係

ないが、回転数の大きい方がマスも激しく流動し、メディアと工作物の相対速度は大きくなり、その結果として研磨量が増すものと考えられる。

図7.10は、メディア装入率が100vol%における回転数を1としたときのマスの相対回転数を図7.8の幾何学的関係より求めたもので、この場合も実際の加工結果と定性的に同様の傾向を示していることがわかる。

以上のように、メディア装入率はマス内の速度勾配および回転数に影響し、メディアと工作物の接触圧力や相対速度を変化させることにより、研磨量を変化させることができるものと考えられる。

7.6 メディア装入率と加工能率

メディア装入率は、本研究においては装入したメディアの体積を示すだけでなく、バレル容器内で研磨に利用される体積（マスの体積）を示している。また、実際のバレル研磨においてはメディアと工作物の体積比（混合比）が一定となるように複数個の工作物を同時に装入して研磨加工を行うのが通常である。そのため、バレル容器内で研磨に利用される体積が大きくなるほど、同一の混合比でも多数の工作物を研磨できることになり、全体としての研磨量も当然多くなる。すなわち、全研磨量はメディア装入率と相対研磨率に比例することになる。

図7.11は、メディア装入率50vol%における全研磨量を1としたときの全研磨量を相対全研磨量と定義し、図7.7に示した相対研磨率の近似曲線を用いて、各メディア装入率における相対全研磨量を求めたものである。この図から、「7.1 研磨量への影響」の項で明らかにした個々の工作物の研磨量だけでなく、全研磨量においてもメディア装入率50vol%で最高値をとらないことが明らかになった。

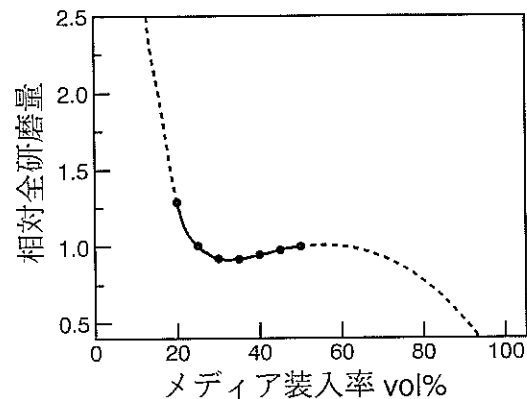


図7.11 メディア装入率とマスの相対全研磨量の関係

7.7 結言

砥粒混入アラミド樹脂メディアを使用し、機械構造用炭素鋼 (S45C) のドライバレル研磨法を行い、遠心バレル研磨におけるメディア装入率の影響について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 研磨率はメディア装入率の増加にともなって減少し、その減少割合はメディア装入率20vol%から30vol%の間で著しく大きくなる。
- (2) 到達し得る仕上面粗さとエッジ部の丸味半径のメディア装入率に対する変化は研磨率と同様の傾向を呈する。
- (3) メディア装入率50vol%における研磨率に対するそれぞれの研磨率の比を相対研磨率とすると、メディア装入率に対する相対研磨率はタレット回転数の影響を受けない。
- (4) 研磨率はマスの流動状態によって大きな影響を受ける。また、マスの流動状態は、メディア装入率の変化にともなうマスと容器の幾何学的関係によるマス内の速度勾配および回転数により影響を受ける。

参考文献

- 1) 波田野栄十, 松永光夫, 金子三樹雄: 新しい乾式バレル研磨の手法, 金属プレス, 6(1987)8.
- 2) 石田喬男, 吉田昭一, 河野洋一郎, 平賀幹敏: 乾式バレル研磨機 (ロールフロー) による仕上げ加工, 新東技報, No.14(1994)39.
- 3) 松永正久: 遠心バレル研磨法, 生産研究, 18, 3 (1966) 71.
- 4) M. Punamia and P. T. Blotter: Workpiece Kinetics in Centrifugal Barrel Finishing, SME Technical Paper, MR81-406(1981)1.
- 5) チップトン編: バレル研磨の手引
- 6) 精機学会編: 新訂精密工作便覧, コロナ社, (1981)838.
- 7) 山本章裕, 北嶋弘一, 桜田康弘, 野呂田進: 遠心バレル研磨に関する基礎的研究 (第1報) -メディア装入率の影響-, 精密工学会誌, 63, 3(1997), 381.

第8章 研磨特性に及ぼすタレット回転数とメディアと工作物の混合率の影響

8.1 緒言

第7章においても述べたように、遠心バレル研磨に関する運動力学的な観点からの理論的研究はこれまでに行われている^{1), 2)}が、メディア装入率等の加工条件が研磨特性に及ぼす影響についての研究はほとんど見当たらないのが現状である。

遠心バレル研磨における加工条件として、メディア装入率、タレット回転数、およびメディアと工作物の混合率が挙げられる。従来、タレット回転数は変速できない装置が多かったが、最近ではインバータにより無段変速ができるものが主流になりつつあり、タレット回転数の研磨特性に及ぼす影響も重要になってきている。

また、メディアと工作物の混合率とは、バレル容器に装入されるメディア体積に対する工作物体積の割合であり、メディアと工作物の混合率を大きくして研磨すると、メディアに対する工作物の割合が多くなるので、工作物同士の接触による打痕や傷が発生しやすくなる。一般的には、混合比（工作物：メディア）として、仕上条件によって1：1～1：5の範囲に設定するという大まかな指針はある³⁾が、メディアと工作物の混合率が研磨特性に及ぼす影響について系統的に検討した研究はほとんどない。

そこで本章では、タレット回転数およびメディアと工作物の混合率が研磨特性に及ぼす影響という視点から乾式遠心バレル研磨法について検討する^{4), 5)}。

8.2 タレット回転数の影響

研磨特性に及ぼすタレット回転数の影響に対して、第7章におけるタレット回転数をパラメータとしたメディア装入率の影響からかなりの部分が明らかになってはいるが、本章においてさらに検討を加える。

8.2.1 研磨量に及ぼす影響

遠心バレル研磨法における工作物の研磨量は、マスに作用する遠心力とマスの流動速度に比例すると仮定すると、タレット回転数の3乗に比例することになる。すなわち、マスに作用する遠心力はタレット回転数の2乗に比例し、マスの流動速度はタレット回転数の1乗に比例するからである。

これは、メディアと工作物の接触圧がマスに作用する遠心力に比例し、メディアと工作物の相対速度がマスの流動速度に比例すると仮定した結果にほかならない。

図8.1は、研磨量がタレット回転数の何乗に比例するかを明らかにするため、それぞれのメディア装入率で4時間研磨したときのタレット回転数と研磨量の関係を両対数グラフで示したものである。なお、本章で使用したメディアはナイロンメディア（△4×4mm, A#320）である。

同図において、いずれのメディア装入率の場合もタレット回転数の増大にともなって研磨量も直線的に増大しているので、研磨量はタレット回転数のべき乗に比例することがわかる。また、そのべき指数は研磨量を示す直線の傾きであり、メディア装入率50vol%のとき2.87で最も大きく、20vol%のとき2.33で最小となっている。このことから、メディア装入率50vol%の方が、仮定した理論により近い

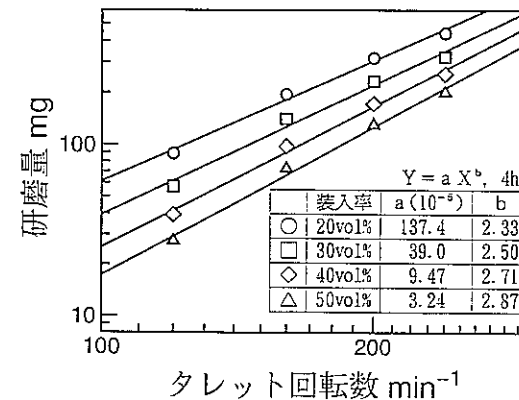


図8.1 タレット回転数と研磨量の関係

状態で研磨が行われているものと推察される。一方、研磨量を示す直線の傾き（べき指数）は、メディア装入率の低下にともない減少しているの、メディア装入率が低いとタレット回転数を増大させてもメディア装入率が高い場合に比べて研磨量はそれほど増大しないことを示している。このことは、バレル（容器）内のマス（メディア）の量が少なくなるにともなって、タレット回転数の増加による研磨量に対するマスの効果（メディアと工作物の接触圧および相対速度の増大）が減少した結果であると考えられ、必ずしもマス（メディアと工作物）の挙動が仮定したようにはなっていないことを示している。

また、メディア寸法・形状および材質もメディアと工作物の接触圧および相対速度に影響を及ぼす因子であることを考えると、メディアと工作物の接触圧および相対速度に及ぼすタレット回転数の影響はさらに複雑なものになり、べき指数も必ずしも3とはならず、ある程度の範囲を持つものと推察される。以上の結果より、研磨量をタレット回転数のべき乗で近似できることが明らかとなった。

8. 2. 2 仕上面粗さに及ぼす影響

図8.2は、研削加工を施して前加工面の粗さを約0.9 μ mRaとした工作物をそれぞれのメディア装入率で4時間研磨したときのタレット回転数と仕上面粗さの関係を示したものである。

同図より、仕上面粗さはいずれのメディア装入率においてもタレット回転数の増大にともなって減少していることがわかる。また、研磨量の場合図8.1に示したようにいずれのタレット回転数においてもメディア装入率の低い方が研磨量は多くなっていたが、仕上面粗さの場合、いずれのタレット回転数においてもメデ

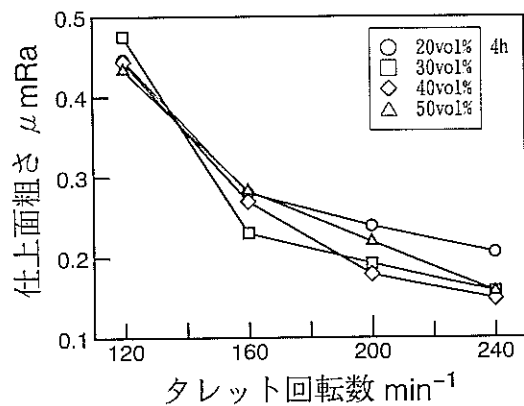


図8.2 タレット回転数と仕上面粗さの関係

ィア装入率20vol%の仕上面粗さが高くなる傾向は認められるが、タレット回転数240min⁻¹ではメディア装入率20vol%を除いて仕上面粗さがほぼ同一になるなど、仕上面粗さに及ぼすメディア装入率の影響は研磨量の場合ほど顕著には現れていないことがわかる。

以上の結果から、第7章でも明らかにしたようにメディア装入率を大きく、タレット回転数を低くした方が、到達し得る仕上面粗さの限界値は小さくなるが、その限界値に到達するまでは、高いタレット回転数で研磨した方が短時間で仕上面粗さが改善されることことがわかった。

8. 2. 3 エッジ丸味半径に及ぼす影響

図8.3は、それぞれのメディア装入率で4時間研磨したときのタレット回転数とエッジ丸味半径の関係を示したものである。

同図より、タレット回転数が高く、メディア装入率が低いほど、エッジ丸味半径は大きくなることがわかる。これは、研磨量と同様の傾向を呈しており、研磨量は工作物表面およびエッジ部の研磨量の和であることを考えると、研磨量が増大することは工作物表面およびエッジ部の研磨量が増大することであり、エッジ部の研磨量が増大するとエッジ丸味半径も増大することによるものである。

しかし、研磨量が増大するとエッジ丸味半径も増大することは明らかとなったが、工作物表面における研磨量も研磨特性の重要な因子であると考えられるので、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合についても検討した。

図8.4は、図8.3のエッジ丸味半径の結果よりタレット回転数と全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合の関係を求めたものである。

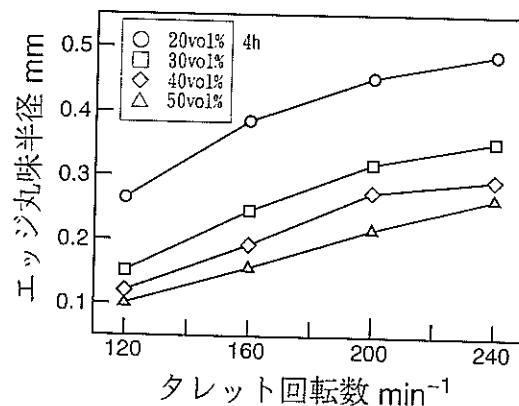


図8.3 タレット回転数とエッジ丸味半径の関係

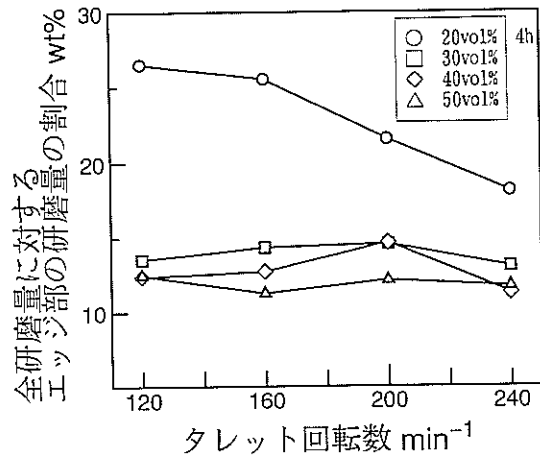


図8.4 タレット回転数のエッジ部の研磨量への影響

同図より、メディア装入率20vol%においてタレット回転数の増大にともなって全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合は低下しているが、他のメディア装入率においてはタレット回転数の変化による全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合の変化が少ないことがわかる。また、いずれのタレット回転数においても、メディア装入率の低い方がメディア装入率による全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合は高い傾向にあることが明らかである。これは、メディア装入率の低い方がマスの流動が活発でメディアのエッジ部への研磨作用が激しくなり、エッジ部の研磨量が多くなったことによるものであると考えられる。また、メディア装入率20vol%におけるタレット回転数240min⁻¹で、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合が低下しているのは、とくにメディア装入率20vol%において工作物のエッジが鋭い間はメディアのエッジへの研磨作用が激しく、エッジにある程度丸味がついてくるとメディアの研磨作用も緩やかになり、エッジ部での研磨量が急激に低下することに起因するものと推察される。

8.3 メディアと工作物の混合率の影響

本章までの研究では、工作物同士の接触による打痕や傷の発生を回避するため、バレル容器内には工作物を1個しか装入しなかったが、実際の遠心バレル研磨においてはバレル容器内に多数個の工作物を装入し、大量に研磨することによって

高い生産性を維持してきている。そこで本節では、メディアと工作物の混合率が研磨特性に及ぼす影響について検討する。また、ここではメディア装入率を一定とし、工作物の装入個数の変化によってメディアと工作物の混合率を変化させている。

8.3.1 研磨量に及ぼす影響

図8.5は、タレット回転数240min⁻¹およびメディア装入率20, 30, 50vol%の研磨条件で6時間研磨したときのメディアと工作物の混合率と工作物一個当たりの研磨量の関係を示したものである。

同図より、いずれのメディア装入率においても、メディアと工作物の混合率の増大にともなって工作物一個当たりの研磨量も増大する傾向があることがわかる。

これは、メディアと工作物の混合率の増大は、マス内の工作物の個数が増加することであり、工作物の比重はメディアの比重よりも大きいので、工作物の個数が増えることはマスの見かけの比重の増大につながり、遠心力によるマス内の静的な圧力が上昇するとともに、工作物の個数が増えることにより、工作物によるメディアの攪拌作用が増すことによってマス全体の流動が激しくなるため、メディアと工作物の接触圧および接触回数が増加して研磨量も増大するものと考えられる。

また、メディアと工作物の混合率が変化しても、メディア装入率の低い方が工作物一個当たりの研磨量が大きいのは、メディア装入率が低くなるとマスの流動が激しくなることによるものである。

図8.6は、図8.5と同一の研磨条件におけるメディアと工作物の混合率とバレル容器に装入された工作物全体の研磨量との関係を示したものである。

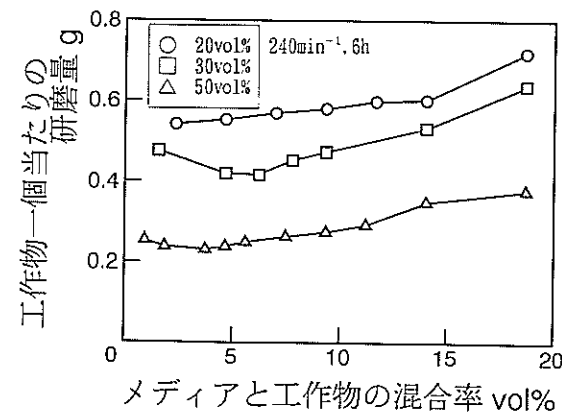


図8.5 メディアと工作物の混合率と工作物一個当たりの研磨量の関係

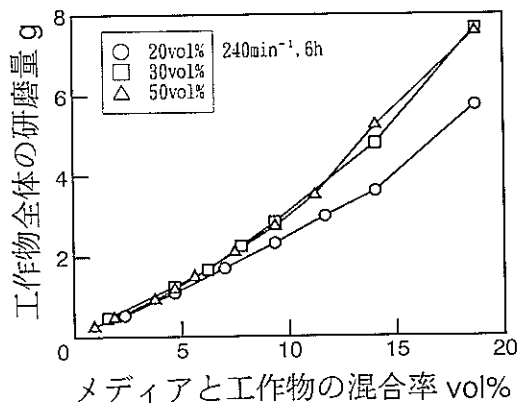


図8.6 メディアと工作物の混合率と工作物全体の研磨量の関係

同図より、いずれのメディア装入率においてもメディアと工作物の混合率の増大にともなって工作物全体の研磨量も増大していることがわかる。これは、工作物個数がメディアと工作物の混合率に比例して増えることによるものである。また、メディアと工作物の混合率に比例して工作物個数が増加する割合は、メディア装入率50vol%が最も大きく、メディア装入率20vol%の2.5 (50/20) 倍となっている。このため、メディア装入率20vol%の工作物一個当たりの研磨量が最大であるにもかかわらず、工作物全体の研磨量においては他のメディア装入率の方が大きな値を示すだけでなく、メディアと工作物の混合率の増大にともなって、工作物全体の研磨量の差も益々拡大する傾向を示している。

以上の結果より、バレル容器に複数の工作物を装入して研磨を実施する場合には、工作物一個当たりの研磨量も重要ではあるが、メディアと工作物の混合率という観点から工作物全体の研磨量についても検討した上で研磨条件を選定する必要のあることが明らかとなった。

8.3.2 仕上面粗さに及ぼす影響

図8.7は、タレット回転数 240min^{-1} およびメディア装入率20, 30, 50vol%の研磨条件で6時間研磨したときのメディアと工作物の混合率と工作物の仕上面粗さの関係を示したものである。

同図において、メディアと工作物の混合率が5vol%までは、いずれのメディア装入率においても仕上面粗さの変化は小さく約 $0.2\mu\text{mRa}$ を示しているが、5~10vol%においては仕上面粗さの若干の増大の傾向がみられる。さらに、メディアと工作物の混合率が10vol%を越えると、仕上面粗さは急激に増大して前加工面の

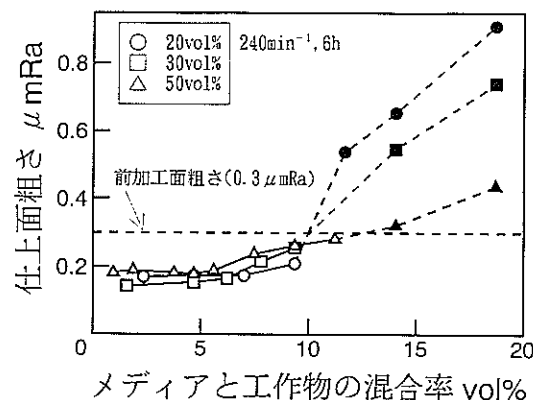


図8.7 メディアと工作物の混合率と仕上面粗さの関係

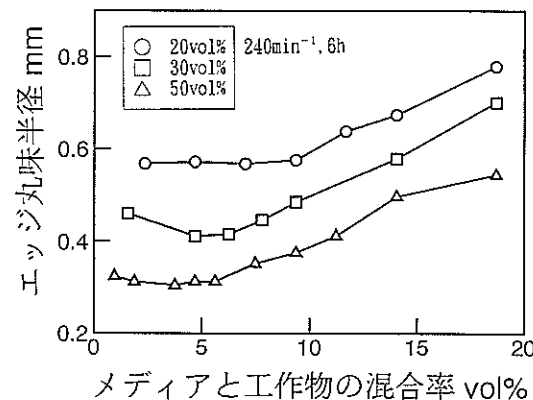


図8.8 メディアと工作物の混合率とエッジ丸味半径の関係

粗さ ($0.3\mu\text{mRa}$) を越え、その増大割合はメディア装入率の低いものほど大きくなっている。厳密には、メディア装入率50vol%の場合、仕上面粗さが前加工面の粗さを越えるのは混合率14%であり、また他のメディア装入率の場合ほど仕上面粗さは急増していないが、仕上面粗さという観点によれば、いずれのメディア装入率においても混合率10vol%がメディアと工作物の混合率の実用範囲において上限であるといえる。

8.3.3 エッジ丸味半径に及ぼす影響

図8.8は、図8.7と同一研磨条件で研磨したときのメディアと工作物の混合率と工作物のエッジ丸味半径の関係を示したものである。

同図より、メディア装入率の低い方が工作物のエッジ丸味半径は大きくなっており、いずれのメディア装入率においても、メディアと工作物の混合率の増大にともなって工作物の丸味半径も増大する傾向を呈していることがわかる。

これは、工作物一個当たり研磨量と同様の傾向を示しており、研磨量が多い場合にエッジ部においても研磨が多くなり丸味半径も大きくなるものと考えられる。

すなわち、メディアと工作物の混合率の増大によるエッジ部の研磨量の増加は、マス内の工作物個数の増加により、工作物によるメディアの攪拌作用が増し、マス全体の流動が激しくなることに起因するものと考えられ、そのために工作物エッジ部におけるメディアとの接触圧および接触回数が増加し、エッジ部における研磨量も増大する。

図8.9は、図8.8のエッジ丸味半径の結果をもとにメディアと工作物の混合率と全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合の関係を示したものである。

同図より、いずれのメディアと工作物の混合率においても、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合はメディア装入率20vol%が最も大きく、メディア装入率30vol%と50vol%では若干30vol%の方が大きい傾向を示していることがわかる。これは、メディア装入率20vol%においてマスの流動がとくに激しくなり、工作物エッジ部へのメディアの研磨作用が活発になることに起因すると考えられる。

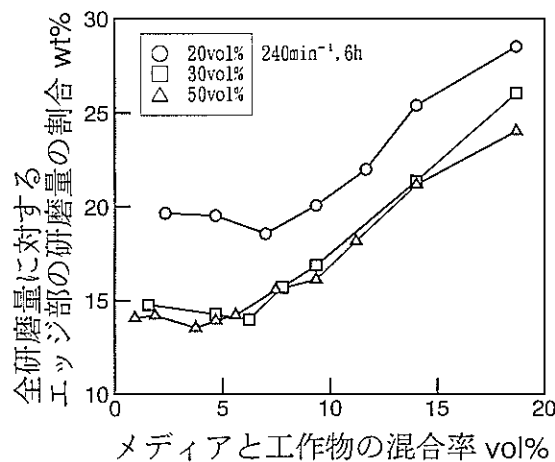


図8.9 メディアと工作物の混合率のエッジ部の研磨量への影響

また、いずれのメディア装入率においても、メディアと工作物の混合率5vol%までは、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合はほとんど変化しないが、5vol%を越えると増加し始め、エッジ部における研磨量の割合が増大していることがわかる。このことは、メディアと工作物の混合率5vol%までは、工作物エッジ部へのメディアの研磨作用はバレル容器に工作物を1個装入した場合とほとんど変わらないが、5vol%を越えるとメディアと工作物の混合率の増大にともなって工作物エッジ部へのメディアの研磨作用が活発化していることを示している。

8.4 結言

砥粒混入ナイロンメディアを使用し、機械構造用炭素鋼のドライバレル研磨を行い、遠心バレル研磨におけるタレット回転数およびメディアと工作物の混合率の研磨特性に及ぼす影響について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 研磨量は、タレット回転数の増加にともなって増大し、タレット回転数のべき乗に比例する。そのべき指数は必ずしも3とはならず、研磨条件によってある程度の範囲を有する。
- (2) タレット回転数において到達し得る仕上面粗さの限界値に到達するまでは、高いタレット回転数で研磨した方が短時間で仕上面粗さを改善することができる。
- (3) 高いタレット回転数で研磨した場合、工作物のエッジ丸味半径は増大する。とくに、メディア装入率20vol%のとき、タレット回転数が増大すると全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合の減少は大きくなる。
- (4) メディアと工作物の混合率の増大にともなって、工作物一個当たりの研磨量は増加し、またバレル容器内の工作物個数も増加するため、工作物全体の研磨量も増大する。
- (5) 工作物一個当たりの研磨量は、メディア装入率20vol%が最も大きいですが、メディアと工作物の混合率を変化させることにより、工作物全体の研磨量はメディア装入率20vol%よりも大きくすることが可能である。
- (6) いずれのメディア装入率においても、メディアと工作物の混合率10vol%を越えると仕上面粗さが急激に増大し始める。また、その増大割合はメディア装入率の低いものほど大きくなる。

参考文献

- 1) 松永正久: 遠心バレル研磨法, 生産研究, 18, 3(1966)71.
- 2) M. Punamia and P. T. Blotter: Workpiece Kinetics in Centrifugal Barrel Finishing, SME Technical Paper, MR81-406(1981)1.
- 3) チップトン編: バレル研磨の手引
- 4) A. Yamamoto, K. Kitajima and Y. Sakurada: Surface Finishing by Using Dry-type Centrifugal Barrel Finishing, Proc. of ICPE'97, 1(1997)309.
- 5) 北嶋弘一, 瀧上晃弘, 山本章裕, 渡辺昌知: ドライバレル研磨に関する研究(第7報) -メディアと工作物の混合率が研磨特性に及ぼす影響-, 精密工学会東北支部学術講演会講演論文集, (1997)129.

第9章 研磨特性に及ぼす工作物の形状および材質の影響

9.1 緒言

これまで述べてきたように, 遠心バレル研磨法におけるバレル研磨条件が研磨特性に及ぼす影響について系統的に検討した研究はほとんど見当たらない. しかし, バレル研磨機メーカーの技術資料¹⁾や機械加工に関連する便覧²⁾などにおいて, 湿式バレル研磨法に関してメディアの種類および形状・寸法やタレット回転数が研磨特性に及ぼす影響は定性的にはある程度明らかにされている. 一方, 乾式バレル研磨法に関しては, ドライバレル用メディアの開発と環境保全の立場から実用化がようやく始まったばかりであり, バレル研磨条件が研磨特性に及ぼす影響については不明な点が多々存在する.

しかし, 遠心バレル研磨機を用いた乾式バレル研磨において, メディアの選定によって従来の湿式バレル研磨と同等の仕上げが可能であり, タレット回転数やメディア装入率などの研磨条件が研磨特性に及ぼす影響は, 乾式および湿式のいずれのバレル研磨法においても基本的には同様であること³⁾が報告され, さらに乾式バレル研磨法におけるメディア装入率やメディアと工作物の混合率の研磨特性に及ぼす影響についても明らかになってきた^{4), 5)}.

ところで, 研磨特性に影響を及ぼす因子はメディア装入率やタレット回転数などのマスの運動にかかわる研磨条件だけでなく, メディアや工作物の材質・形状

も重要な因子であると考えられる。比較的歴史の長い湿式バレル研磨法においても、メディアに関しては多くの種類が販売されており、研磨目的に応じてメディアを選定するため、その研磨特性も定性的には一応検討されている。しかし、多種多様な工作物の研磨を行っているにもかかわらず、工作物自身の因子が研磨特性に及ぼす影響に関しては、乾式および湿式バレル研磨法において不明な点が多く残っているのが現状である。

そこで本章では、工作物の特性因子として比重、硬さ、表面積ならびに材質を取り上げ、それらが研磨特性に及ぼす影響について実験的に検討する⁶⁾。

9.2 工作物比重の影響

図9.1は、タレット回転数 240min^{-1} 、メディア装入率20, 30, 40, 50vol%における形状と硬さが同一の工作物の見掛けの比重（重量）と6時間研磨後の相対研磨量との関係を示したものである。なお、本章で使用したメディアは、ナイロンメディア（ $\Delta 4 \times 4\text{mm}$, A#320）であり、供試工作物の種類は表3.2のとおりである。

相対研磨量とは、研磨前の工作物の体積に対する研磨された工作物の体積（体積で表した研磨量）の割合であり、研磨量を相対研磨量で表すと重量で計算した値が体積で計算した値と一致し、比重の影響を受けない研磨量を表す指標である。すなわち、研磨量は一般的に体積で比較すべきものであり、比重が同一ならば体積あるいは重量で比較しても傾向は同一となるが、比重の異なる工作物の研磨量を比較する場合には、比重の大きな工作物の方が研磨された重量が大きくても、

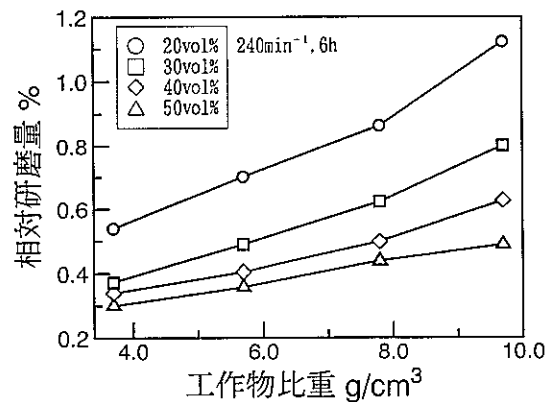


図9.1 工作物比重と相対研磨量の関係

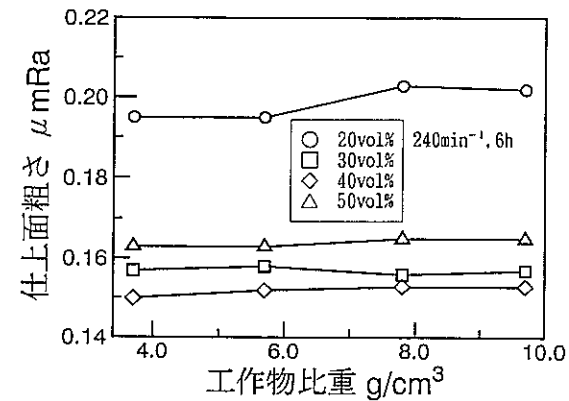


図9.2 工作物比重と仕上面粗さの関係

比重の小さい工作物の方が研磨された体積は大きくなるという場合も生じるため、本章では相対研磨量を採用した。

しかし、本章においては、工作物を中空等にするによって見掛けの比重を変化させているだけであるので、相対研磨量は電子天びんで測定した研磨前後の工作物重量の差より求めた研磨量を体積に換算した後に算出している。

同図より、いずれのメディア装入率においても工作物比重の増加にともなって、相対研磨量も増大することがわかる。これは、工作物比重が大きい方が重量だけでなく体積においてもより多く研磨されることを示しており、メディア内における工作物の流動抵抗が増大することに起因するものと考えられる。

図9.2は、図9.1と同様の研磨条件で研磨を行ったときの仕上面粗さを示したものである。この場合、相対研磨量の結果と異なり、仕上面粗さはいずれのメディア装入率においても工作物比重が増加してもほとんど変化しないことより、工作物比重に依存しないことがわかる。一方、メディア装入率50vol%を除いては、メディア装入率が減少すると仕上面粗さは増大しており、この傾向は相対研磨量の結果と同様である。また、メディア装入率50vol%の方が40および30vol%よりも仕上面粗さが大きいのは、研磨量が少なくまだ最終到達粗さに達していないことによるもので、さらに研磨を続けると仕上面粗さは減少し、メディア装入率の増大にともなって仕上面粗さが減少するという傾向に合致するようになるものと推測される。

また、メディア装入率が減少すると、研磨量や仕上面粗さが増大するのはマスの流動性が活発になることに起因するものであり、具体的にはバレル容器内におけるマスの回転数やマス内の速度勾配が大きくなることによるものである⁴⁾。さ

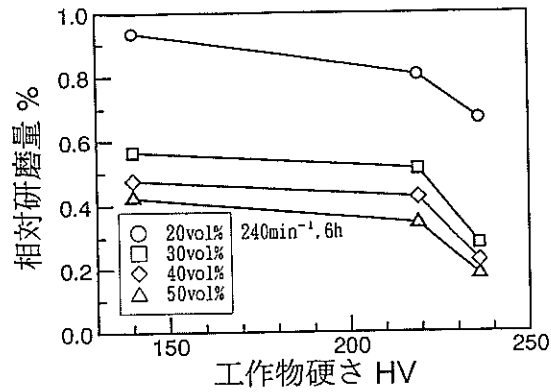


図9.5 工作物硬さと相対研磨量の関係

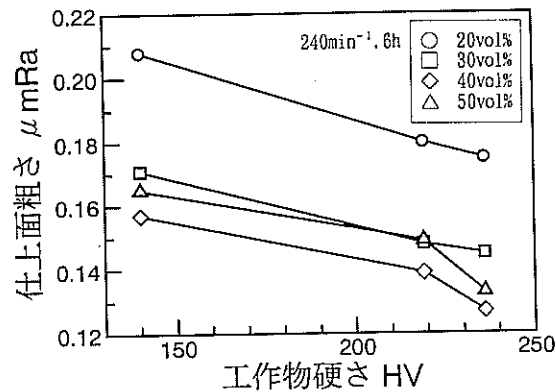


図9.6 工作物硬さと仕上面粗さの関係

においても工作物硬さの増加にともなって仕上面粗さは減少するが、メディア装入率に対してはメディア装入率50vol%を除いてメディア装入率が減少すると仕上面粗さは減少することが明らかである。メディア装入率50vol%においては、図9.5に示したように相対研磨量が少なく、まだ仕上面粗さが6時間の研磨では最終到達粗さに到達していないことによるもので、研磨を続行することによって仕上面粗さは減少し、メディア装入率40vol%よりも小さくなるものと思われる。

図9.7は、図9.5と同様の研磨条件におけるメディア装入率20および50vol%の場合の工作物硬さとエッジ丸味半径および全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合の関係を示したものである。同図より、工作物硬さの増加にともなってエッジ

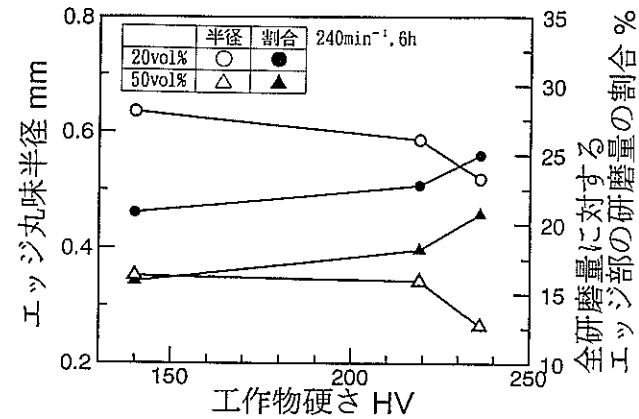


図9.7 エッジ丸味半径およびエッジ部の研磨量に及ぼす工作物硬さの影響

丸味半径は減少しており、またいずれの工作物硬さにおいてもメディア装入率の低い方がエッジ丸味半径は増大していることから、図9.5に示した相対研磨量の結果と定性的に同様の傾向を示していることがわかる。しかし、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合は工作物硬さの増加にともない増大しており、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の占める割合が増加しているにもかかわらず、エッジ丸味半径は減少していることを示している。これは、実際には工作物硬さが増大すると工作物の表面およびエッジともに研磨されにくくなるために全研磨量も減少することになるが、工作物エッジの方がその表面よりも研磨されやすいため、全研磨量が小さくなるほど、エッジ研磨量のわずかな増加によっても、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合が大きく増大することによるものである。

9.4 工作物表面積の影響

図9.8は、タレット回転数240min⁻¹、メディア装入率20, 30, 40, 50vol%において、同一の比重で表面積の異なる工作物を6時間研磨した後の工作物表面積と相対研磨量の関係を示したものである。同図より、いずれのメディア装入率においても工作物表面積の増加にともなって、相対研磨量は微増する傾向にあることがわかる。これは、工作物表面積が増加すると同時にエッジ部の長さも増加し、工作物全体としての研磨作用部の増大および作用メディア数の増加に起因するものと考

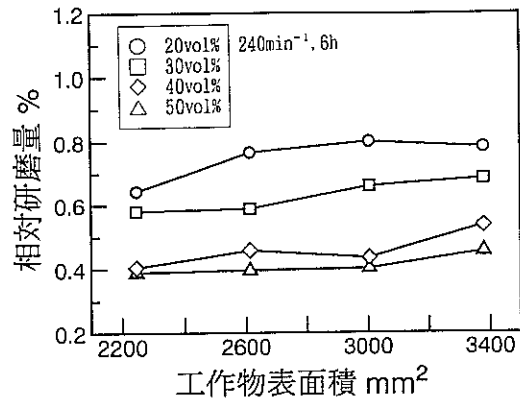


図9.8 工作物表面積と相対研磨量の関係

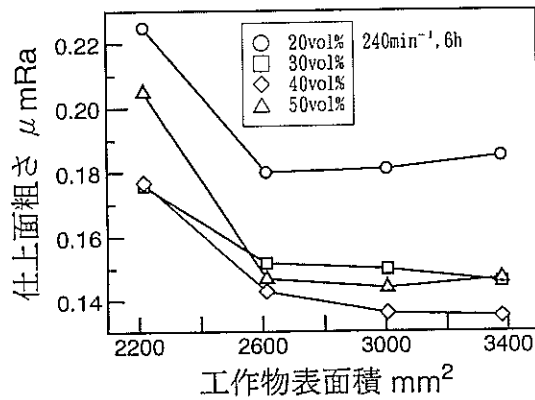


図9.9 工作物表面積と仕上面粗さの関係

えられる。また、いずれの工作物表面積に対してもメディア装入率の小さい方が相対研磨量が大きくなっているのは、これまでに述べたようにメディア装入率の減少にともなってマスの流動性が活発になることによるものである。

図9.9は、図9.8と同様の研磨条件で研磨を行ったときの工作物表面積と仕上面粗さの関係を示したものである。いずれのメディア装入率においても、工作物表面積2200mm²を除いて表面積の増加にともなう仕上面粗さの変化は少ないことより、工作物表面積の仕上面粗さへの影響はほとんどないといえる。しかし、工作物表面積2200mm²において仕上面粗さが急増している。これは、エッジ部近傍は

工作物の他の表面部と比較するとメディアが激しく衝突するため、その表面粗さは他の部分に比べて大きくなることに起因する。すなわち、小径の工作物は工作物中心からエッジまでの距離が短く、大径の工作物に比べてエッジ部近傍のメディアが激しく衝突す部分の全表面積に占める割合が多くなり仕上面粗さが増大することになる。

図9.10は、メディア装入率20および50vol%における工作物表面積と工作物のエッジ丸味半径およびエッジ研磨率との関係を示したものである。同図より、いずれのメディア装入率の場合も工作物表面積の増加にともないいったん増加した後減少し、工作物表面積2600mm²においてエッジ丸味半径は最も大きくなっている。しかし、メディア装入率50vol%の場合、20vol%の場合より相対研磨量が少ないので、いずれの工作物表面積においてもエッジ丸味半径は小さくなっている。

また、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合については、いずれのメディア装入率の場合も工作物表面積2200mm²が最も小さく、他の工作物表面積の場合は工作物表面積2200mm²と比べると全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合の差は小さいといえる。すなわち、工作物表面積2600mm²以上ではほぼ一定値になるとみることできる。

ここで、工作物の表面積とエッジ長さという観点から考察する。図9.11は、体積を一定 (V=8000mm³) とした場合の工作物直径とエッジ部長さ (EL)、表面積 (SA) およびエッジ部長さの表面積に対する比 (EL/SA) の関係を示したものである。エッジ部長さの表面積に対する比は、工作物のエッジ部での研磨量と表面での研磨量の比に関係すると考えられるので、エッジ研磨率との比較のために計

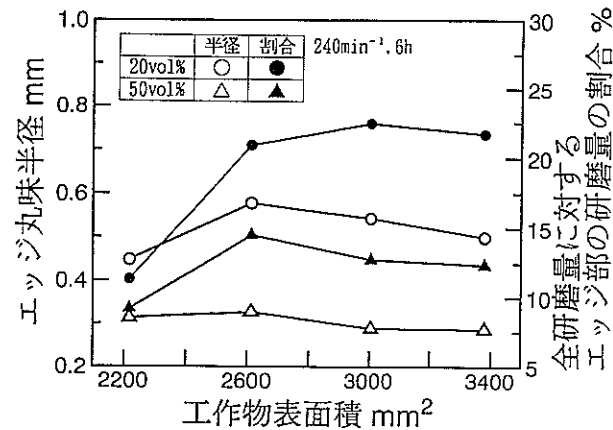


図9.10 エッジ丸味半径およびエッジ部の研磨量に及ぼす工作物表面積の影響

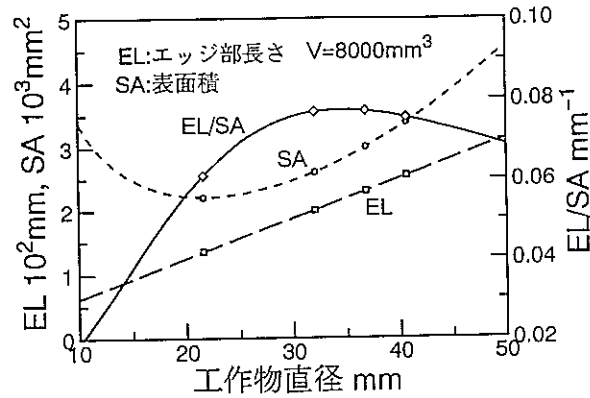


図9.11 工作物のエッジ部長さ、表面積およびその比に及ぼす工作物直径の影響

算した。また、図中のプロットは本実験に使用した工作物の仕様のものである。
エッジ部長さは、工作物直径に比例して増加するが、表面積は直径20mm付近で最小値を示す。また、エッジ部長さの表面積に対する比は、直径34mm付近で最大値を示し、その後減少に移行するが、直径30mm以上の範囲においてはほぼ一定とみなすことができ、図9.10に示した全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合の傾向とよく一致する。すなわち、全研磨量に対するエッジ部の研磨量の割合は工作物形状と密接に関係することが明らかである。

9.5 工作物材質の影響

図9.12は、タレット回転数 240min^{-1} で一定とし、メディア装入率を20~50vol%に変化させ、形状が同一で材質の異なる工作物を6時間研磨した後の相対研磨量を示したものである。

同図より、いずれのメディア装入率においても、相対研磨量は黄銅が最も大きく、チタン合金が最も小さくなっている。表3.2に示したように比重は黄銅が最も大きく、アルミニウム合金が最も小さい。また、硬さはチタン合金が最も大きく、アルミニウム合金が最も小さい。すなわち、最も比重が大きい黄銅が相対研磨量が最大となっているが、最も比重が小さいアルミニウム合金が最小とはならず、最も硬さの大きいチタン合金が最小となっており、比重と硬さの両因子の影響が重畳したものと考えられる。

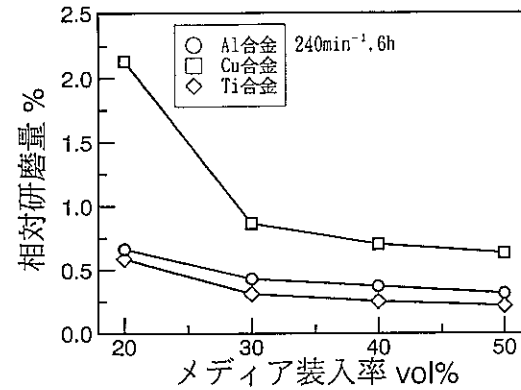


図9.12 メディア装入率と相対研磨量の関係

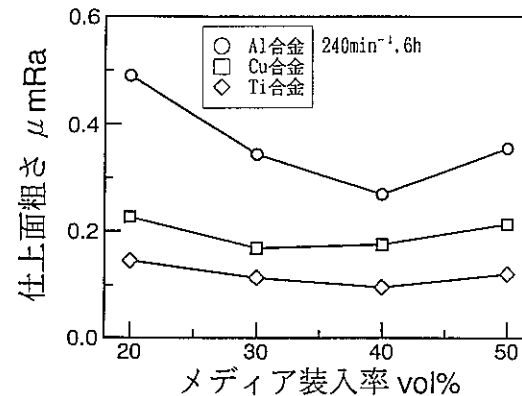


図9.13 メディア装入率と仕上面粗さの関係

図9.13は、メディア装入率と仕上面粗さの関係を示したものである。いずれのメディア装入率においても、仕上面粗さはアルミニウム合金が最も大きく、チタン合金が最も小さくなっており、硬さの低い工作物の仕上面粗さが悪化している。これは、仕上面粗さが工作物比重に依存しないという図9.2に示した結果からも推測できる。

また、いずれの工作物材質においても、メディア装入率の増加にともなって仕上面粗さは減少したのち増加に転じている。しかし、仕上面粗さが増加しているのは、6時間の研磨では、まだ最終到達粗さに達していないことによるもので、

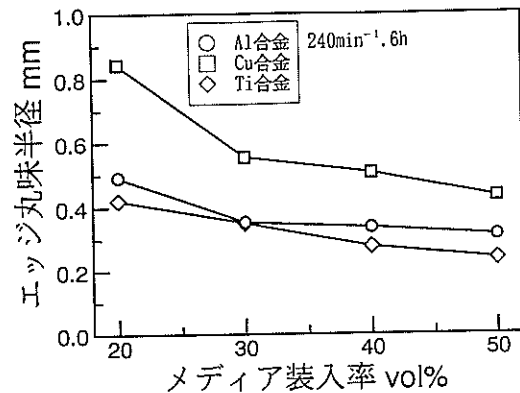


図9.14 メディア装入率とエッジ丸味半径の関係

研磨を続行することによって仕上面粗さが減少するものと思われる。また、いずれの工作物材質においても前加工面粗さは約 $0.3\mu\text{mRa}$ と一定にしているが、アルミニウム合金の場合にメディア装入率30vol%以下においては、前加工面粗さよりも悪化しており、仕上面粗さを改善することは本研磨条件では不可能であることがわかる。すなわち、仕上面粗さを重視するバレル研磨においては工作物硬さに応じて適切な研磨条件を選択する必要があることが明らかである。

図9.14は、メディア装入率とエッジ丸味半径の関係を示したものである。この場合、いずれの工作物材質においてもエッジ丸味半径はメディア装入率の増加にともなって減少し、またいずれのメディア装入率においても、エッジ丸味半径は黄銅が最も大きく、チタン合金が最も小さくなっている。これは、図9.12に示した相対研磨量の結果と定性的に全く同様の傾向を呈しており、工作物材質による比重と硬さの影響が重畳した結果の現れであると考えられる。

9.6 結言

砥粒混入ナイロン樹脂メディアを使用してドライバレル研磨を実施し、遠心バレル研磨における工作物の形状および材質が研磨特性に及ぼす影響について実験的に検討した結果、本実験の範囲において以下のことが明らかになった。

(1) 相対研磨量とエッジ丸味半径は、工作物比重の増加にともなって増大するが、仕上面粗さは工作物比重に依存せず、ほぼ一定値をとる。

- (2) 相対研磨量、仕上面粗さおよびエッジ丸味半径は、工作物硬さの増加にともなって減少する。
- (3) 相対研磨量は、工作物表面積の増加にともなって増大する。しかし、仕上面粗さは、工作物表面積が増大すると減少し、一定値に漸近する。
- (4) 工作物材質の研磨特性への影響は、比重と硬さの両因子が重畳する。また、エッジ丸味半径はメディア装入率が低い範囲では大きな変化を示すが、その増加とともにほぼ一定値を示す。

参考文献

- 1) チップトン編：バレル研磨の手引
- 2) 精機学会編：新訂精密工作便覧，コロナ社(1981)838.
- 3) 山本章裕，北嶋弘一，瀧上晃弘，渡辺昌知：バレル研磨における乾式および湿式の研磨性能，砥粒加工学会誌，42，3(1998)124.
- 4) 山本章裕，北嶋弘一，桜田康弘，野呂田進：遠心バレル研磨に関する基礎的研究(第1報)－メディア装入率の影響－，精密工学会誌，63，3(1997)381.
- 5) 北嶋弘一，瀧上晃弘，山本章裕，渡辺昌知：ドライバレル研磨に関する研究(第7報)－メディアと工作物の混合率が研磨特性に及ぼす影響－，精密工学会東北支部学術講演会講演論文集，(1997)129.
- 6) 山本章裕，北嶋弘一，瀧上晃弘，渡辺昌知：遠心バレル研磨に関する基礎的研究(第2報)－工作物の形状及び材質の影響－，精密工学会誌，64，12(1998)1821.
- 7) 松永正久：バレル研磨における微少切削研磨材の開発とその効果，機械の研究，22，7(1970)969.

第10章 バリ取りへの適用

10.1 緒言

バレル研磨法は、機械部品の表面仕上げばかりでなくバリ取りやエッジ仕上げが同時に行える方法¹⁾として、機械部品の仕上げ工程に多くの工場で行われているが、その加工プロセスにおいて、コンパウンドと工作物およびメディアの摩耗粉が混在した廃水の発生は避け難く、そのため多くの工場では高価な廃水処理設備を導入し、適切な処理を行った上で工場外に排出しているのが現状である。一方、これらの湿式バレル研磨法に対して、高分子材料に砥粒を混入して成形した新しいバレル研磨用メディアを利用した水とコンパウンドを全く使用しない乾式バレル研磨法が、環境保全に対する社会的要求が厳しくなる中で、工場の廃水対策として注目され、湿式バレル研磨法と同等の研磨能力を発揮することが期待されている。そのため、その研磨方法をドライバレル研磨法と称してこれまでにその実用化に向けた研究^{2)~6)}が行われてきた。

しかし、これまでの研究においては、主として研磨条件が工作物の表面およびエッジ仕上げに及ぼす影響について検討したものであり、バレル研磨の特質の一つであるバリ取りという観点からの検討は、湿式バレル研磨において研究された例⁷⁾はあるが、とくにドライバレル研磨によるバリ取りに関する研究はほとんど見当たらないのが現状である。

そこで本章では、乾式遠心バレル研磨によるバリ取りを試み、本研磨法においてバリ取りが十分に可能であることを明らかにするとともに、研磨条件がバリ取りにおける研磨特性に及ぼす影響について検討する^{8), 9)}。

10.2 実験方法

10.2.1 供試工作物の製作

バレル研磨によるバリ取りの実験に際しては、ある程度均一なバリを有した工作物が必要となる。そのようなバリを標準バリと称し、振動バレル研磨において、リーマ加工における加工条件を適当に選択することにより、工作物に均一なバリを生成させ、バリ取り実験を行ったことが報告されている¹⁰⁾。

本研究においては、図10.1に示すような旋削による端面削りの予備実験を行い、切削条件とバリの大きさの関係に再現性があることを確認した上で、表10.1に示すように実験に用いるバリの大きさとその切削条件を決定した。なお、バリの大きさは図10.2のように定義し、厚さはバリの根元の厚さとした。また、予備実験におけるバリの大きさは、シリコンゴムでバリを転写し、それをスライスしたものを万能投影機で拡大して測定した。図10.3は、表10.1に示す切削条件で端面削りを行うことによって生成したバリをシリコンゴムで転写した断面形状を示したものである。

供試工作物は、直径32mmの磨き棒鋼(S45C, HB229)を端面削りにより厚さ10mmに仕上げたもので、その片端面には表10.1の切削条件を選択することにより図10.3に示すような3種類の高さの供試バリを生成させた。

10.2.2 研磨条件およびバリ取りの評価

研磨条件として、タレット回転数は 240min^{-1} で一定とし、メディア装入率は20~50vol%とした。また、工作物は1つの容器に1個とし、工作物同士の接触による擦過痕の発生を避けるようにした。

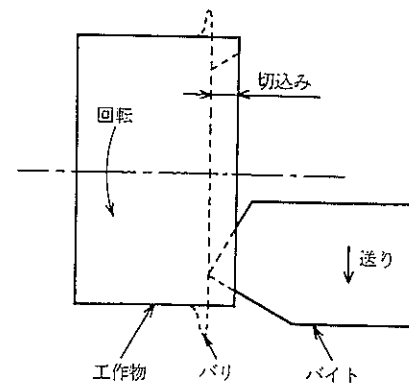


図10.1 旋削によるバリの生成

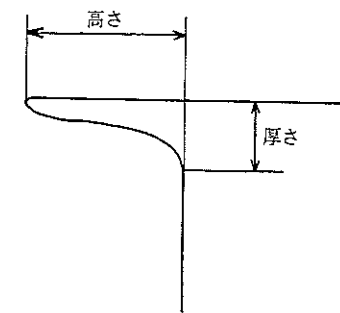


図10.2 バリの大きさの定義

表10.1 切削条件によるバリの寸法

工作物	切削条件			バリ寸法	
	切込み mm	送り mm/rev	切削速度 m/min	高さ mm	厚さ mm
S45C(HB229)	0.15	0.2	150.7	0.2	0.1
直径 32mm	0.30	0.1	95.5	0.3	0.1
厚さ 10mm	0.40	0.1	95.5	0.4	0.1



図10.3 シリコンゴムで採取したバリの断面

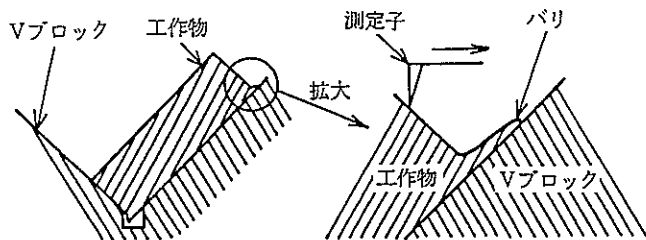


図10.4 バリの測定方法

また、実験に使用したメディアは、ドライバレル研磨用としてナイロン6にアルミナの砥粒 (A, #320) を混入し、一辺4mm、高さ4mmの正三角柱に成形したもの (NRT4) を主として用い、それとの比較として一辺の長さ6mm、高さ6mmの正三角柱状のもの (NRT6) も用いた。なお、メディアはその初期摩耗等の影響を避けるため、予め2時間の空運転を行ったものを使用した。

研磨条件を変化させ、研磨開始からバリ取り完了まで、バリを有する工作物のドライバレル研磨を行い、所定の研磨時間毎に図10.4に示すような方法で輪郭形状測定機を用いてバリ高さを測定するとともにバリが除去された後のエッジ部の形状も測定し、エッジ丸味半径を(3-1)式により算出した。

また、所定時間研磨後の研磨量を電子天秤で、仕上面粗さを表面粗さ測定機で測定した。

10.3 バリの除去プロセス

図10.5は、高さ0.4mm、厚さ0.1mmのバリを有する工作物をメディア装入率20, 30, 40, 50vol%で研磨したときのバリ高さの時間的推移を示したものである。

これより、バリ高さの減少は、メディア装入率の低い方が急激である。とくに、メディア装入率20, 30vol%において研磨時間30分まではほぼ同様に減少し、それ以降90分の研磨時間まではメディア装入率30vol%においてバリ高さの減少に停滞

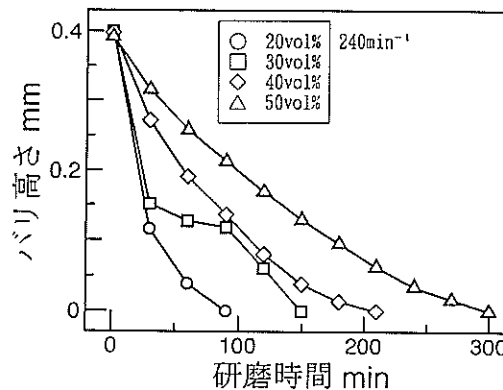


図10.5 バリ高さの時間的推移

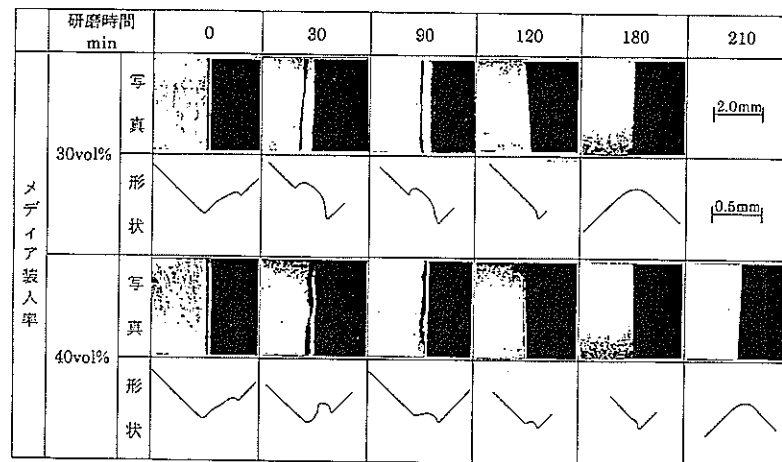


図10.6 研磨時間によるエッジ部の写真と形状

がみられるが、それ以降は再びメディア装入率20vol%とほぼ同様の減少傾向を示すことがわかる。

これは、バリ高さの減少がバリの除去メカニズムに影響されることによるものである。そこで、代表的な例として図10.5に示したメディア装入率30、40vol%の両条件についてエッジ部の写真と形状を比較したものを図10.6に示す。

メディア装入率30vol%の場合、研磨時間30分でバリは円筒面側に倒れ、円筒面に押し付けられたように接している。これは、メディアとバリの接触圧がバリの強度より大きくなるためにバリが根元から折れ曲がることによるものであり、このような状態になるとバリはこれ以上塑性変形することができなくなり、メディアからの研磨作用のみを受けることになる。すなわち、バリ全体が研磨されるようになるが、とくにエッジ部と面ではエッジ部の方が良く研磨されるようになり、バリの先端部と根元部（工作物のエッジ部）が良く研磨されることになる。そのため、研磨の進行にともなって、倒れたバリの大部分は根元部で工作物から分離し、工作物の円筒面側にはわずかな盛り上がり部分（分離しなかったバリ）が残る。このとき、すでにバリの根元部である工作物のエッジ部の研磨はかなり進行しており、円筒面側に残存したバリが除去されたときには工作物エッジにはすでに十分な丸味がついていることになる。

これを図10.5のバリ高さの時間的推移にあてはめると、研磨時間30分でのバリ高さの急減は、メディアによるバリへの作用力がバリの曲げ強さを上回ったため、バリが根元部から折れ曲がり、工作物円筒面側に押し付けられた状態になり、バリ自身は根元部で塑性変形してほとんど研磨されていない。実際に、メディアの研磨作用によりバリ高さが減少しているのは、研磨時間30～90分においてバリ高さの減少が停滞している部分である。この間にバリ高さとして示されているのはバリの中央部であり、この部分の研磨量はバリの先端部や根元部に比べて少ないと考えられるので、バリ高さの減少は停滞しているように見えるが、工作物エッジ部、すなわち折れ曲がったバリの根元部は急速に研磨されており、ついには工作物からバリの大部分は根元部のごく一部分を残して分離してしまうことになる。研磨時間90分における工作物に残ったバリ高さは、研磨時間30～90分間のバリ高さの減少量に比べるとかなり大きいですが、バリの大部分は分離してしまっており、バリの根元部も既にかかなり研磨されているので、バリ高さは急速に減少することになる。

一方、メディア装入率40vol%の場合、研磨時間30分のエッジ部形状からバリの変形と研磨が同時に進行していることがわかる。これは、メディアとバリの接触圧が、メディア装入率30vol%に比べて小さく、バリを完全に円筒面側に倒してしまふほど大きくないことによるものである。この場合、バリ高さの減少にはメディアによるバリの変形作用と研磨作用の両作用が大きく関与しているが、バリ体

積の減少は基本的にはメディアの研磨作用のみによるものである。

また、研磨時間180分におけるエッジ部の形状から、バリ高さが減少して、バリ先端が工作物のエッジ部に近づくにともなって、エッジ部自身も研磨されるようになってきていることがわかる。そのため、研磨時間180分における工作物の円筒面上に残るバリのわずかな盛り上がりが除去されると同時に工作物エッジ部には研磨時間210分で大きな丸味が生成されている。

これを図10.5に示したメディア装入率40vol%の場合のバリ高さの時間的推移にあてはめると、バリ高さが大きい間は変形作用と研磨作用の両作用によって、バリ高さの減少は比較的急速に進行しているが、バリ高さの減少にともなって変形作用が少なくなり、研磨作用だけとなり、さらにバリ厚さも根元に近づくとも厚くなるので、バリ高さの減少速度は低下するということになる。

これらの結果より、パレル研磨におけるバリの除去メカニズムをまとめてみると、図10.7のようになる。すなわち、工作物とメディアの接触圧が小さいために、バリが変形をともなわずに研磨され、完全に除去されると同時にエッジ部に丸味が形成される場合(Type A)と、工作物とメディアの接触圧が大きいことにより、バリが変形した後に研磨され、根元部でバリの大部分が分離し、さらに残ったバリが研磨され、完全に除去されると同時にエッジ部丸味が形成される場合(Type B)に分けられる。さらに実際には、メディア装入率40vol%のようなバリの変形作用と研磨作用が同時に観察される両者の中間の場合(Type A+B)が存在している。

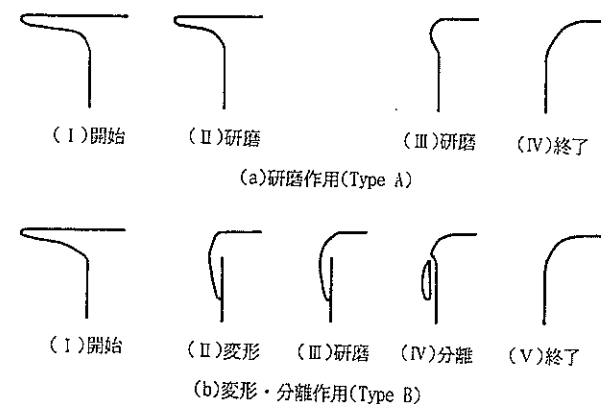


図10.7 代表的バリ取りプロセス

10.4 バリ取りに及ぼすメディア装入率の影響

図10.8は、メディアをNRT4、タレット回転数を 240min^{-1} とし、バリ高さでメディア装入率がバリの除去プロセスに及ぼす影響を示したものである。

同図より、バリ高さが高く、メディア装入率が低い研磨条件において、バリは変形・分離作用(Type B)によって除去されることが明らかである。これは、バリ高さが高くなるほどバリ根元に作用するモーメントが増大することによるものであり、またメディア装入率が低くなるとマスの流動性が活発になり、バリ自身がメディアによって大きな研磨力を受けることによるものと推察される。

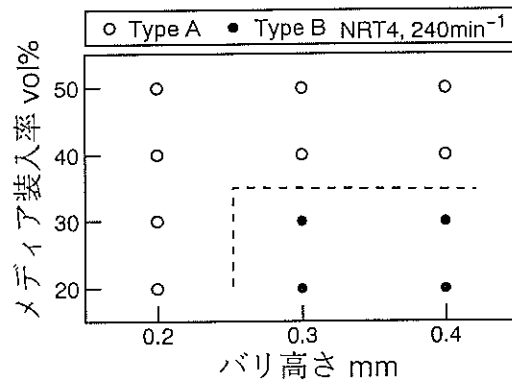


図10.8 バリ取りプロセス (メディアNRT4)

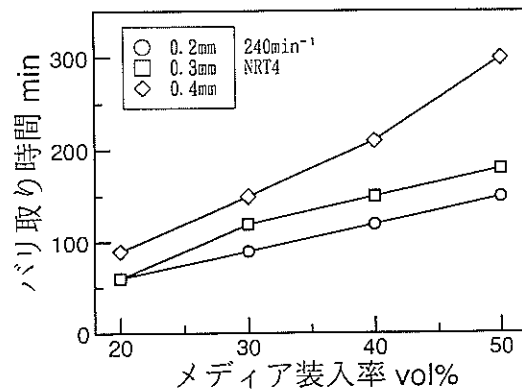


図10.9 メディア装入率とバリ取り時間の関係

図10.9は、図10.8の結果と同一の研磨条件においてメディア装入率とバリ取り時間の関係を示したものである。ここで、バリ取り時間とはバリが完全に除去されてバリ高さが0になったときの研磨時間である。同図より、いずれのメディア装入率においてもバリ高さの高い方がバリ取り時間は長くなっていることがわかる。また、いずれのバリ高さにおいてもメディア装入率の低い方がバリ取り時間は短くなっている。バリ高さ0.2mmと0.4mmにおけるバリ取り時間を比較すると、研磨作用(Type A)だけで除去されるメディア装入率50, 40vol%の場合、0.4mmの方が2.00, 1.75倍となっている。一方、バリの変形・分離作用(Type B)によってバリが除去されるメディア装入率30, 20vol%の場合、0.4mmの方が1.67, 1.50倍となり、メディア装入率の減少にともなってバリ高さでバリ取り時間の比は小さくなることが明らかである。すなわち、バリの変形・分離作用が起こると研磨作用だけでバリが除去される場合よりもバリ取り時間が短縮されることになる。

バレル研磨は、バリ取りと同時に表面仕上げも行われる加工法であり、バリ取り完了と同時に工作物表面も所定の仕上面粗さに仕上がっていることが望ましい。そのため、バリ取り完了時における仕上面粗さは、研磨条件を決定する上で極めて重要となる。

図10.10は、前加工面粗さが約 $2.0\mu\text{mRa}$ の工作物に対するメディア装入率とバリ取り完了時における仕上面粗さの関係を示したものである。

この図より、いずれのバリ高さにおいても、メディア装入率の増加にともなって仕上面粗さが減少する傾向を呈していることがわかる。これは、メディア装入率の増加にともなってバリ取り完了までの研磨時間が増大することによるものである。また、同様にバリ高さの高い方がバリ取り完了時間が長くなるので、バリ取り完了時における仕上面粗さは減少している。

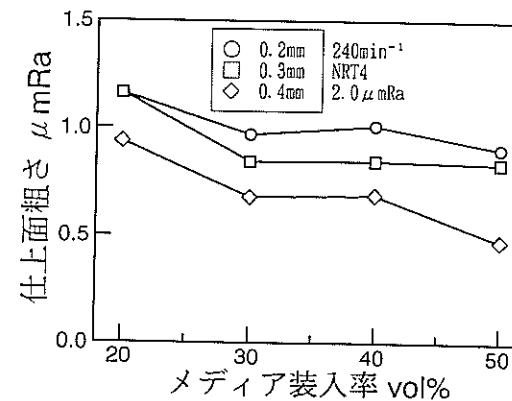


図10.10 メディア装入率とバリ取り完了時の仕上面粗さの関係

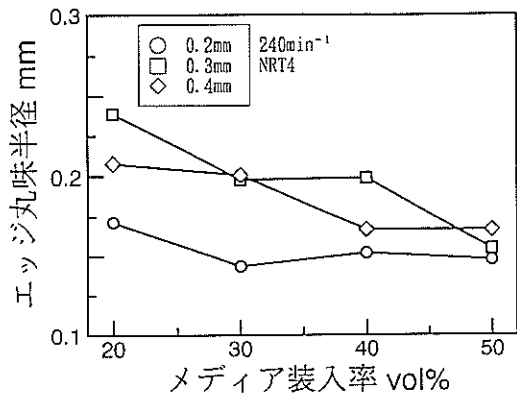


図10.11 メディア装入率とバリ取り完了時のエッジ丸味半径の関係

また、バレル研磨の場合、図10.7のバリの除去メカニズムで示したように、変形・分離作用がともなう場合(Type B)と研磨作用だけの場合(Type A)があるが、いずれの場合においてもバリ取りが完了すると同時にエッジ仕上げも完了することになる。そのため、バリ取り完了時のエッジ丸味半径は、研磨条件を選定する上で重要になる。

そこで、図10.8に示した結果と同一の研磨条件においてメディア装入率とバリ取り完了時のエッジ丸味半径の関係を求めたものを図10.11に示す。

同図より、バリ高さが大きい方がエッジ丸味半径は増大し、同じ大きさのバリ取りであっても、メディア装入率が低い方がエッジ丸味半径は増大するという傾向を示していることがわかる。これは、メディア装入率が低くなるとバレル内のマスの流動状態が活発になり、メディアと工作物エッジとの接触圧が増加することによるものと考えられる。

10.5 バリ取りに及ぼすメディア寸法の影響

図10.12は、メディアをNRT6、タレット回転数を 240min^{-1} とし、バリ高さとメディア装入率がバリの除去プロセスに及ぼす影響を示したものである。

図10.8に示した結果と比較すると、メディア装入率50vol%におけるバリ高さ0.2および0.3mmの工作物は中間的なバリの除去プロセス(Type A+B)を呈しているのを除いて、バリが変形・分離作用(Type B)を経て除去されていることがわかる。これは、NRT6のメディア寸法が大きく、バリへの作用力も大きくなるためにバリ

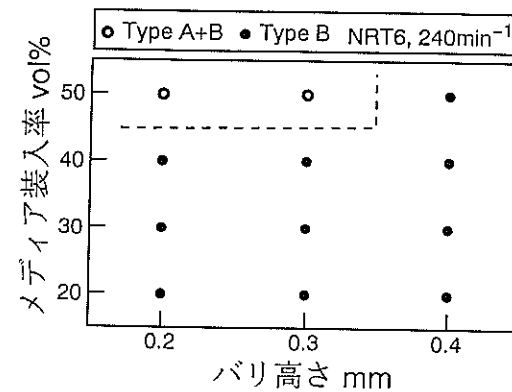


図10.12 バリ取りプロセス (メディアNRT6)

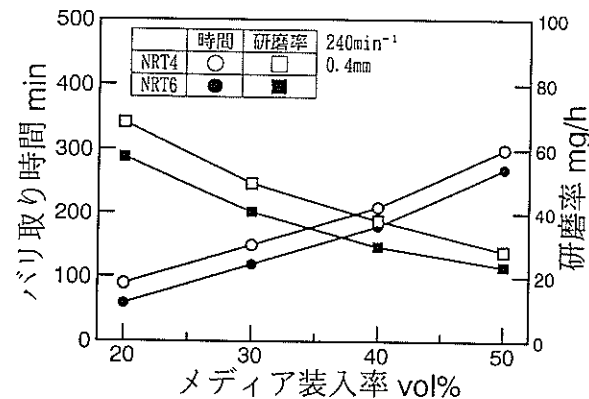


図10.13 バリ取り時間および研磨率に及ぼすメディア寸法の影響

の変形を生じる条件範囲が拡大するものと考えられる。

図10.13は、バリ高さ0.4mmの工作物を寸法の異なるメディアNRT4およびNRT6を使用してタレット回転数 240min^{-1} で研磨したときのメディア装入率とバリ取り時間および研磨率(単位時間当りの工作物の研磨量)の関係を示したものである。

いずれのメディア寸法においても、メディア装入率の増加にともなって研磨率は減少し、バリ取り時間は増大している。すなわち、研磨率が小さくなると、バリ部の研磨量も小さくなるので、バリ取り時間が増加するものと考えられる。しかし、メディアNRT4とNRT6を比較すると、研磨率の小さいNRT6の方がバリ取り時

間が短くなっている。これは、図10.12のバリの除去プロセスで示したように、メディア寸法の大きいNRT6の方がバリの変形・分離作用(Type B)をともなって除去される領域がNRT4よりも拡大しており、バリ部への作用力が大きくなることに起因するものと考えられる。

また、メディア寸法が研磨量に及ぼす影響において、研磨量は工作物に作用するメディア1個当たりの研磨量と工作物に作用するメディア数の積に比例するものと考え、図10.14に示すようにメディア寸法が大きくなるとメディアと工作物の接触圧は高くなり、メディア1個当たりの研磨量は多くなるが、工作物に作用するメディア数が少なくなる。一方、メディア寸法が小さくなるとメディア

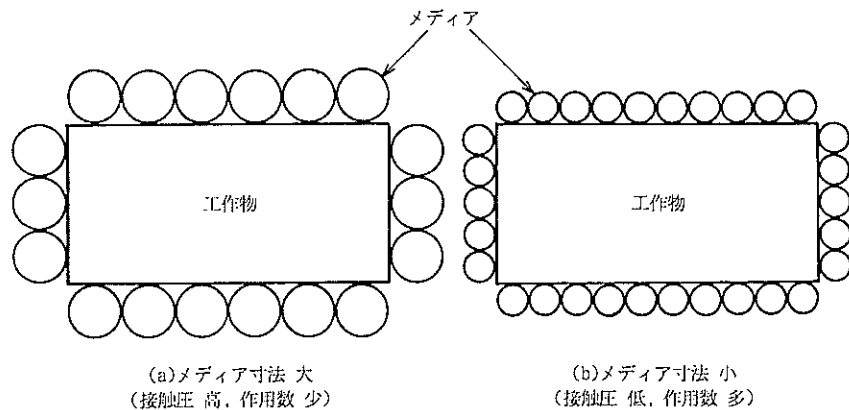


図10.14 メディア寸法の影響

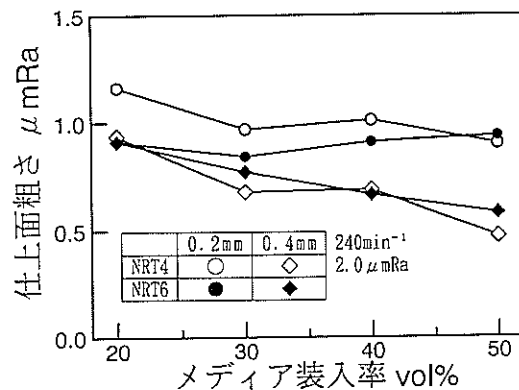


図10.15 バリ取り完了時の仕上面粗さに及ぼす影響

と工作物の接触圧は低くなり、メディア1個当たりの研磨量は少なくなるが、工作物に作用するメディア数が多くなる。したがって、メディア寸法の大きいNRT6のようにバリに作用する力や工作物との接触圧が大きいと考えられる場合でも、工作物全体の研磨量(率)は工作物に作用するメディア数の影響によってメディア寸法の小さいNRT4よりも低くなることもある。

図10.15は、前加工面粗さを約 $2.0\mu\text{mRa}$ として、高さ 0.4 および 0.2mm のバリを有する工作物をメディアNRT4およびNRT6で研磨した場合のメディア装入率とバリ取り完了時における仕上面粗さの関係を示したものである。バリ高さ 0.2mm の工作物の場合、メディアNRT4ではメディア装入率の増加にともなってバリ取り完了時の仕上面粗さは減少する傾向を示すが、NRT6ではほとんど変化を示していない。一方、バリ高さ 0.4mm の工作物の場合、いずれのメディア寸法においてもメディア装入率の増加とともにバリ取り完了時の仕上面粗さは減少しているが、メディア寸法による差異はほとんど認められない。このことは、それぞれのメディアと研磨条件による仕上面粗さの向上速度とバリ取り完了までの研磨時間との複雑な関係に起因するものと考えられる。

図10.16は、図10.13に示した結果と同一の研磨条件におけるメディア装入率とバリ取り完了時のエッジ丸味半径の関係を示したものである。

同図より、バリ高さ 0.4mm 、メディアNRT6の場合を除いて、メディア寸法の大きい方がバリ取り完了時のエッジ丸味半径は大きいことがわかる。これは、メディア寸法の大きい方が、メディア自身の重量も重くなるために流動抵抗も大きくなり、エッジ部への作用力も増大して研磨量も多くなることによるものと推察される。しかし、バリ高さ 0.4mm 、メディアNRT6の場合において、メディアNRT4の

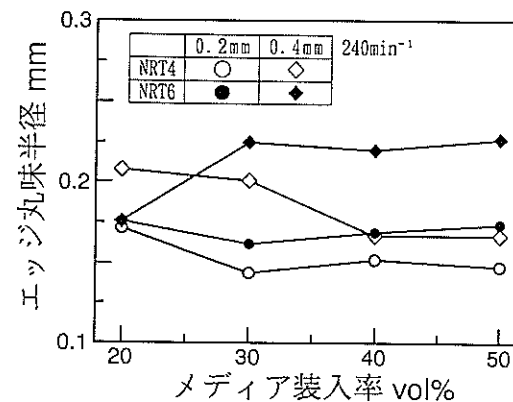


図10.16 バリ取り完了時のエッジ丸味半径に及ぼすメディア寸法の影響

場合よりバリ取り完了時におけるエッジ丸味半径が小さくなっているのは、メディアNRT6の方がバリへの作用力が大きいために、バリ取り時間が短くなり、バリ以外へのメディアの作用が少ない内にバリ取りが完了した結果であると考えられる。

また、いずれのメディアの場合も、バリ高さの高い方がバリ取り完了時のエッジ丸味半径は大きくなっている。これは、バリ高さの高い方が研磨時間が長くなることによるものである。

一方、メディア装入率の影響については、メディアNRT4の場合にいずれのバリ高さにおいても、メディア装入率の増加にともなってエッジ丸味半径の減少傾向が見られる。しかし、メディアNRT6におけるエッジ丸味半径は、バリ高さ0.2mmの場合にメディアNRT4とほぼ同様の傾向を示すだけで、バリ高さ0.4mmの場合には、メディア装入率の増加にともなってエッジ丸味半径の増大化もしくは一定化の傾向が認められる。

これは、メディア装入率の高い方がバレル内のマスの流動性が低下し、メディアと工作物エッジとの接触圧も低下することになり、メディアのバリ（エッジ）への作用力も低下する。一方、バリ取り完了までの研磨時間は増大するので、メディアNRT6の場合にはメディアのバリ（エッジ）への作用力の低下に対してバリ取り完了までの研磨時間の増大が補った結果によるものと推察される。

10.6 バリ取りに及ぼすタレット回転数の影響

図10.17は、高さ0.4mm、厚さ0.1mmのバリを有する工作物をメディアNRT4を用いてバレル研磨したときのタレット回転数とメディア装入率がバリの除去プロセスに及ぼす影響を示したものである。タレット回転数が増大し、メディア装入率が減少すると、バリの除去プロセスにおけるバリの変形・分離作用(Type B)を発生しやすくなることがわかる。これは、タレット回転数の増加にともなって、マスに作用する遠心力も増加することになり、バリへのメディアの作用力も増大することによるものである。

図10.18は、バリ高さ0.4mmの工作物をメディア装入率20および30vol%でメディアNRT4を使用して研磨したときのタレット回転数とバリ取り時間および研磨率の関係を示したものである。いずれのメディア装入率においても、タレット回転数の増加によって研磨率は増大し、バリ取り時間は減少している。また、メディア装入率20vol%の研磨率は30vol%に比べて大きくなり、バリ取り時間は短縮される。すなわち、研磨率が高い方がバリ取り時間は短縮されることになる。

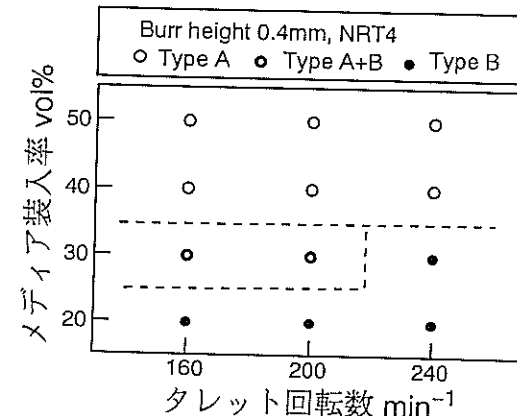


図10.17 バリ取りプロセス (タレット回転数)

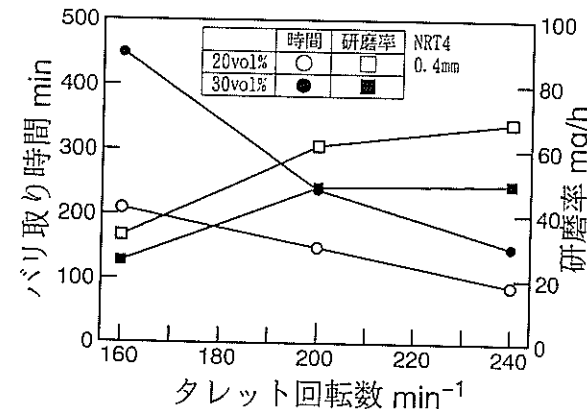


図10.18 タレット回転数とバリ取り時間および研磨率の関係

図10.19は、工作物の前加工面粗さを約2.0 μ mRaとして、高さ0.4mmのバリを有する工作物をメディア装入率20および30vol%で研磨した場合のタレット回転数とバリ取り完了時における仕上面粗さの関係を示したものである。いずれのメディア装入率においても、バリ取り完了時の仕上面粗さは、タレット回転数の増加とともに200min⁻¹までは若干減少の傾向を示し、それ以降は増大している。また、いずれのタレット回転数においても、メディア装入率20vol%のバリ取り完了時の仕上面粗さは増大していることがわかる。このような傾向は、各研磨条件におけ

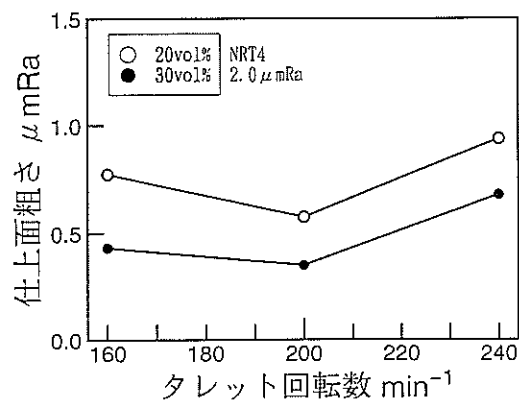


図10.19 タレット回転数とバリ取り完了時の仕上面粗さの関係

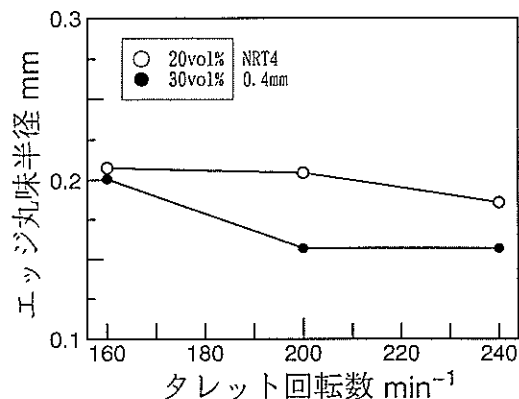


図10.20 タレット回転数とバリ取り完了時のエッジ丸味半径の関係

る仕上面粗さの向上速度とバリ取り完了までの研磨時間との複雑な関係に起因するものと推察される。

図10.20は、図10.18に示した結果と同一の研磨条件によるタレット回転数とバリ取り完了時のエッジ丸味半径の関係を示したものである。この図より、いずれのメディア装入率においても、バリ取り完了時のエッジ丸味半径はタレット回転数の増加とともに減少する傾向を示していることがわかる。また、いずれのタレット回転数においても、メディア装入率の低い方がバリ取り完了時のエッジ丸味

半径は増大している。これは、メディア装入率の低い方がバレル内のマスの流動状態が活発になり、メディアと工作物のバリ部（エッジ部）との接触も激しくなることによるものであるが、タレット回転数の高い方がエッジ丸味半径が減少するのは、メディアと工作物のバリ部（エッジ部）との接触が激しくなるが、バリ取り完了までの研磨時間は短くなるという複雑な関係に起因するものと推察される。

10.7 結言

砥粒混入ナイロンメディアを使用してバリを有する工作物の遠心ドライバレル研磨を行い、研磨条件がバリ取り特性に及ぼす影響について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) バリ取りの除去プロセスにおけるバリの変形・分離作用は、メディア装入率が低く、タレット回転数が高く、メディア寸法が大きい場合に発生しやすくなる。
- (2) メディア装入率が低く、タレット回転数が高くなると、研磨率は増大し、バリ取り時間は短縮される。
- (3) メディア寸法が大きい場合には、研磨率が小さくなるにも拘らず、バリ取り時間は短くなる。
- (4) バリ取り完了時における仕上面粗さは、メディア寸法と研磨条件に対する仕上面粗さの向上速度とバリ取りに要する研磨時間との複雑な関係によって決定される。
- (5) バリ高さが高い工作物に対して、使用メディア寸法が大きい方がバリ取り完了時におけるエッジ丸味半径は増大する。しかし、バリ取り完了時のエッジ丸味半径は、研磨条件によるマスの流動状態にともなうバリ（エッジ）へのメディアの作用力とバリ取りに要する時間の関係によって決定される。

参考文献

- 1) チップトン編：バレル研磨の手引
- 2) 石田喬男，吉田昭一，河野洋一郎，平賀幹敏：乾式バレル研磨機（ロールフロー）による仕上げ加工，新東技報，No. 14 (1994) 39.
- 3) 山本章裕，北嶋弘一，野呂田進：砥粒混入アラミド樹脂メディアによるドライバレル研磨の研究，砥粒加工学会誌，40，2 (1996) 69.

- 4) 山本章裕, 北嶋弘一, 桜田康弘, 野呂田進: 遠心バレル研磨に関する基礎的研究(第1報)ーメディア装入率の影響ー, 精密工学会誌, 63, 3(1997)381.
- 5) 山本章裕, 北嶋弘一, 瀧上晃弘, 渡辺昌知: バレル研磨における乾式および湿式の研磨性能, 砥粒加工学会誌, 42, 3(1997)124.
- 6) 山本章裕, 北嶋弘一, 瀧上晃弘, 渡辺昌知: 遠心バレル研磨に関する基礎的研究(第2報)ー工作物の形状及び材質の影響ー, 精密工学会誌, 64, 12(1998)1821.
- 7) 高沢孝哉, 山崎正雄, 北嶋弘一: バレル研磨法によるバリ取りとエッジ仕上げ特性ー作業標準の設定を目指してー, 神奈川工科大学研究報告, B-18(1993)23.
- 8) 北嶋弘一, 中岡祐輔, 山本章裕, 渡辺昌知: ドライバレル研磨によるバリ取りの研究, 砥粒加工学会誌, 43, 10(1999)437.
- 9) 北嶋弘一, 中岡祐輔, 山本章裕, 渡辺昌知: ドライバレル研磨によるバリ取りの研究(続報)ー研磨条件がバリ取り特性に及ぼす影響ー, 砥粒加工学会誌, 44, 3(2000)138.
- 10) 山本章裕, 藤尾哲一, 三宅輝明: 振動バレルによるバリ取りの基礎的研究ーリーマ加工のバリとバリ取り因子ー, 精密機械, 51, 3(1985)128.

第11章 バレル研磨条件と研磨コスト

11.1 緒言

バレル研磨法は, 前章までに述べたように部品の表面仕上げだけでなくバリ取りなどのエッジ仕上げを同時に行うことができる加工方法であり, 表面仕上げにおいてもスケール取りから鏡面(光沢)仕上げまでの幅広い範囲の仕上げが可能である. この幅広い応用範囲を可能にしているのは, 豊富なメディア種類とメディア装入率などの研磨条件の選択幅の広さに負うところが大きい. しかし, 研磨条件の選択幅が広いために同一の仕上げを行うにも多くの研磨条件の組合せが存在するはずであるが, 実際には目的の仕上げが達成できる一つの研磨条件の組合せが明らかになれば, 生産に取り掛かることが多いので, 目的の仕上げが達成できる複数の研磨条件の組合せにおいて研磨条件をそれぞれ検討した例はほとんど見当たらず, 流動バレル研磨法において乾式と湿式の比較において検討された例がある¹⁾だけである.

遠心バレル研磨法においても同様であり, 研磨条件の選定は経験と勘で行われることが多く, 目的に合った最適のバレル研磨が行われているかどうかは不明である. これは, 全ての研磨条件の組合せを試すことが不可能なことによるものであるが, 研磨条件の最適化に対する考え方や手法が明らかになっていないことにも起因しているものと考えられる.

研磨条件の選定因子としては, まずコストが考えられるが, 付加価値の高い部

品では製造コストよりも製造個数の方が優先されたり、ラインバランスが重要な場合には製造に要する時間が優先されることもあり、実際には選定因子がそれ自体戦略的要素を多分に含んだものとなっている。しかし、コストとの比較によって製造個数や製造時間を研磨条件の選定因子とすることが多いので、コストを明確にすることが最も重要である。

バレル研磨に関する研究において、研磨コストに関して言及した論文²⁾はほとんど見当たらず、解説書^{3)・4)}などにおいて若干取り上げられてはいるが、詳細な検討はほとんど行われていないのが現状である。

そこで本章では、第4章で明らかにしたバレル研磨における乾式および湿式の研磨性能を例に取りながら、研磨条件と研磨コストについて検討する。

11.2 研磨コストの計算方法

バレル研磨における研磨コストの計算式は文献によって若干の差異があるが、基本的には1サイクル当たりのバレル研磨費用Pは次式のようになる。

$$P = A + B + C + D \quad (11-1)$$

ここで、Aは研磨機械の費用、Bはメディア等の消耗品の費用、Cは処理費用およびDは人件費である。

さらに、研磨機械の費用Aの内訳として償却費、維持管理費および電力料が考えられるので、Aは次式のように与えられる。

$$A = (a_1 + a_2 + a_3) t \quad (11-2)$$

ここで、 a_1 は1時間当たりの研磨機械の償却費、 a_2 は1時間当たりの維持管理費、 a_3 は1時間当たりの使用電力料およびtは研磨機械の稼働時間である。

また、消耗品の費用Bの内訳としてメディアの費用、コンパウンドの費用および水の費用が考えられるので、Bは次式のように表わされる。

$$B = b_1 \cdot v_1 \cdot t + b_2 \cdot v_2 + b_3 \cdot v_3 \quad (11-3)$$

ここで、 b_1 は1時間当たりのメディアの損耗量、 v_1 は1kg当たりのメディアの費用、 b_2 は1サイクル当たりのコンパウンド使用量、 v_2 は1kg当たりのコンパウンドの費用、 b_3 は1サイクル当たりの水の使用量および v_3 は1kg当たりの水の費

用である。

さらに、処理費用Cの内訳として洗浄費と廃水処理の費用が考えられるので、Cは次式のようになる。

$$C = c_1 \cdot w_1 + c_2 \cdot w_2 \quad (11-4)$$

ここで、 c_1 は1サイクル当たりの工作物の量、 w_1 は1kg当たりの洗浄費、 c_2 は1サイクル当たりの廃水量および w_2 は1kg当たりの廃水処理費である。

人件費Dの内訳として研磨機械の運転のための労賃、洗浄のための労賃、廃水処理のための労賃および労働に対する間接経費が考えられるので、Dは次式のように示される。

$$D = (1 + k) (d_1 + d_2 + d_3) L \quad (11-5)$$

ここで、 d_1 は研磨機運転のための労働時間、 d_2 は洗浄のための労働時間、 d_3 は処理のための労働時間、Lは1時間当たりの賃金およびkは労働に対する間接経費の割合である。

上式の各項は、研磨コストに直接関係し、入手可能と思われるデータについて整理したもので、研磨コストに関連する全ての項目を網羅し、その正確なデータを入手することは、技術的にも経済的にも難しく、あまり現実的ではない。

実際の研磨コストの計算は、工場の管理状態に依存しており、管理が正確に行われていないと上式の項目ですら不明であったり、入手できても不正確な場合があると推察される。

本研究においても、上式的全項目のデータを入手することははなはだ困難であり、研磨コストに関連する項目の中でも研磨条件に直接関係するものの中で、入手可能な範囲内のデータで検討することにした。

表11.1は、第4章における遠心バレル研磨のコスト計算のための諸元をまとめたものであり、メディアの種類およびメディア装入率によってマスの重量が変化することになり、遠心バレル研磨機の電気使用量も研磨条件によって異なるはずであるが、いずれの研磨条件においても定格電力1.5kWを消費するものとして計算した。

図11.1は、表11.1の諸元を用いてメディア装入率を20および50vol%として湿式および乾式研磨を行った場合の研磨時間とコストの関係を示したものである。

これより、湿式および乾式研磨のいずれの場合も研磨時間の経過にともなってコストが増大しており、コストの削減には目的の研磨結果を得るまでに要する研磨時間の短縮が有効であることがわかる。

表11.1 遠心バレル研磨における研磨コスト計算のための諸元

研磨条件	湿式研磨		乾式研磨	
	バレル 1720cc, タレット回転数 240min ⁻¹			
メディア装入率	20vol%	50vol%	20vol%	50vol%
装置費用 a ₁ +a ₂	遠心バレル研磨機 150万円, 消費電力 1.5kW, 寿命 10年 償却費 75円/h, 電気費 16.5円/h 合計 91.5円/h			
メディア費用 b ₁ ·v ₁	600円/kg		1900円/kg	
	19.1円/h	36.7円/h	1.72円/h	2.52円/h
コンパウンド + 水費用 b ₂ ·v ₂ +b ₃ ·v ₃ +c ₂ ·w ₂	1.6円/バレル	4.0円/バレル	-	

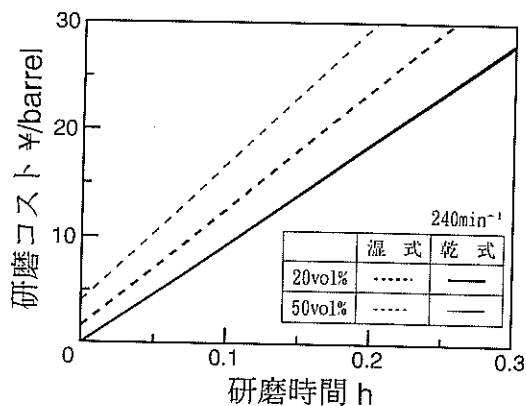


図11.1 研磨時間と研磨コストの関係

また、湿式研磨と乾式研磨を比較すると、湿式研磨の方がコストが高く、研磨時間が0においてもコストが発生しているのはコンパウンドや水などの費用が固定費として存在していることによるものである。また乾式研磨の場合、メディア装入率20vol%のコストを示す太い実線と50vol%のコストを示す細い実線が重なってわかりにくい、湿式および乾式研磨のいずれの場合もメディア装入率50vol%の方がコストは高くなっている。ただし、これはバレル容器内に工作物を1個だけを装入して研磨した場合であり、メディアと工作物の混合率を同等にすれば、メディア装入率50vol%の場合には20vol%の2.5倍の工作物を1度に研磨できるこ

とになるので、工作物1個当たりのコストは1/4になる。しかし、工作物の個数が増えることによりメディアの損耗や工作物の仕上げに影響することもあると考えられるので、ここではメディアと工作物の混合率については考慮しないことにする。

11.3 研磨コストに及ぼす研磨特性の影響

図11.1において研磨時間と研磨コストの関係が明らかとなり、第4章の実験結果において研磨時間と研磨量などの研磨特性との関係が得られているので、これらの関係を組み合わせることにより、研磨特性と研磨コストの関係を明らかにすることができる。

図11.2は、メディア装入率を20および50vol%として湿式および乾式研磨を行った場合の研磨量と研磨コストの関係を示したものである。

同図において、いずれの研磨条件においても研磨量の増大につれて研磨コストも高くなっており、研磨量と研磨コストは正比例の関係にあることがわかる。また、いずれのメディア装入率においても図11.1に示した研磨時間との関係では常に湿式研磨の方が研磨コストは高かったが、メディア装入率50vol%では研磨量が3mgを越えると乾式研磨の方が研磨コストが高く、同様に20vol%においても5mgを越えると乾式研磨の方が研磨コストが高くなっており、研磨量の極めて小さい範囲を除いては乾式研磨の方が湿式研磨よりも研磨コストが高いことがわかる。

すなわち、研磨コストを考慮すれば、研磨量の少ない研磨に乾式研磨法は最適であることがわかる。しかし、このコスト計算では人件費や工作物の後処理など

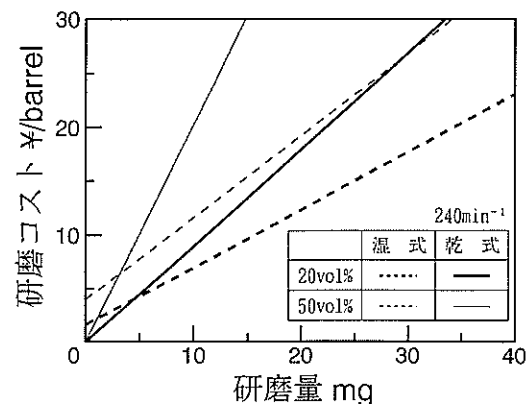


図11.2 研磨量と研磨コストの関係

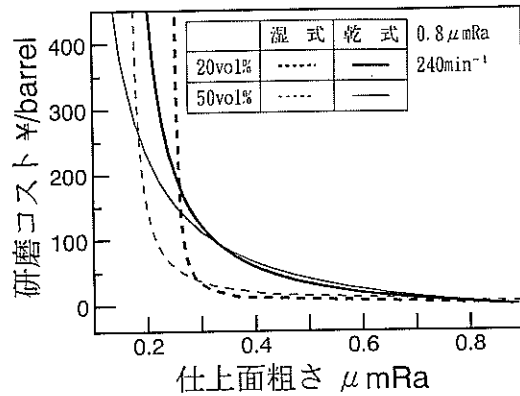


図11.3 仕上面粗さと研磨コストの関係

の乾式バレル研磨における水が不要というメリットが現れる項目を考慮していないために乾式バレル研磨の方が研磨コストが高くなっているが、実際には研磨にともなう人件費が高くなれば、研磨量の多い範囲においても湿式研磨の方が研磨コストが高くなる可能性は十分にあり、乾式研磨の適用範囲は拡大する。

図11.3は、メディア装入率を20および50vol%として表面粗さが約0.8 μmRaの工作物を湿式および乾式研磨した場合の仕上面粗さと研磨コストの関係を示したものである。

同図において、いずれの研磨条件においても仕上面粗さが低下するにつれて研磨コストは上昇し、その上昇割合は仕上面粗さが低下するほど大きくなるのがわかる。これは、その研磨条件での到達しうる仕上面粗さの限界値⁵⁾に仕上面粗さが近づくにつれて、仕上面粗さの低下に要する時間が増大するからであり、仕上面粗さがその限界値に到達すると研磨コストを示す曲線は研磨コスト軸（Y軸）と平行になる。すなわち、仕上面粗さがその限界値になると、いくら研磨コスト（研磨時間）を費やしても仕上面粗さは変化しないということである。また、湿式および乾式研磨のいずれの場合においても、仕上面粗さがその限界値に近づくまでは、メディア装入率20vol%の方が研磨コストが低くなっている。これは、メディア装入率20vol%の方が、研磨時間当たりの研磨コストは低いが、到達しうる仕上面粗さの限界値が大きく、メディア装入率50vol%よりも先に限界値に接近することになり、研磨コストが急激に上昇することによるものである。同様に湿式と乾式研磨では、仕上面粗さがその限界値に近づくまでは、湿式研磨の方が研磨コストが低く、より低い研磨コストで良好な仕上面粗さにまで研磨できることがわかる。

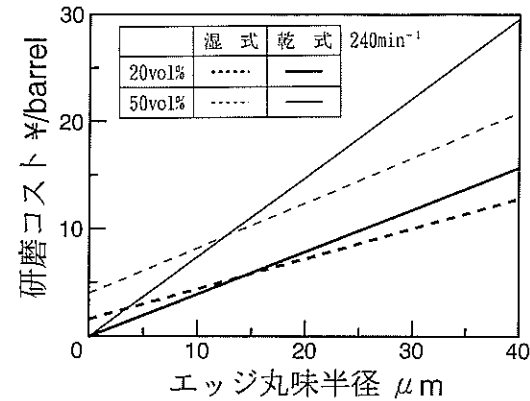


図11.4 エッジ丸味半径と研磨コストの関係

図11.4は、メディア装入率を20および50vol%として湿式および乾式研磨を行った場合の工作物のエッジ丸味半径と研磨コストの関係を示したものである。

同図において、いずれの研磨条件においてもエッジ丸味半径の増大につれて研磨コストも高くなっており、エッジ丸味半径と研磨コストは正比例の関係にあることがわかる。これは、図11.2に示した研磨量と研磨コストの関係と全く同様の傾向を示しており、工作物全体の研磨量が増えるとエッジ部における研磨量も増えることになり、エッジ丸味半径も増大するものと考えられる。

また、いずれのメディア装入率においても、エッジ丸味半径が約15 μmを越えると乾式研磨の方がコストは高くなり、エッジ丸味半径に比例して湿式研磨とのコスト差が増大するので、人件費などの乾式バレル研磨におけるメリットが現れる項目を考慮しても、乾式研磨はエッジ丸味半径の小さい範囲内の研磨に適していることがわかる。

11.4 研磨コストに及ぼすメディア装入率の影響

図11.5は、乾式バレル研磨において研磨量に対する目標値を一定としたときのメディア装入率と研磨コストの関係を示したものである。

同図より、いずれの研磨量の目標値に対してもメディア装入率が高くなることもなって研磨コストも上昇していることがわかる。これは、メディア装入率が高くなると単位時間当たりの研磨量が減少して、研磨量の目標値が一定の場合に研磨時間が増大することによるものである。同様に、メディア装入率が同等の場合、

研磨量の目標値が高い方が研磨時間が増大するので、研磨コストも上昇している。すなわち、図11.1および11.2の結果に示したように研磨コストは研磨時間および研磨量に比例しているの、研磨量の目標値を一定とすると単位時間当りの研磨量が小さい研磨条件においては研磨コストが上昇することになる。

図11.6は、表面粗さが約 $0.8\mu\text{mRa}$ の工作物を乾式バレル研磨した際に、仕上面粗さの目標値を一定としたときのメディア装入率と研磨コストの関係を示したものである。

同図において、いずれのメディア装入率の場合も仕上面粗さの目標値の低い方

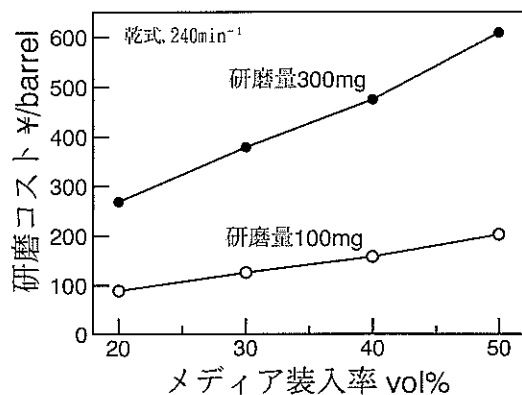


図11.5 メディア装入率と研磨コストの関係 (研磨量)

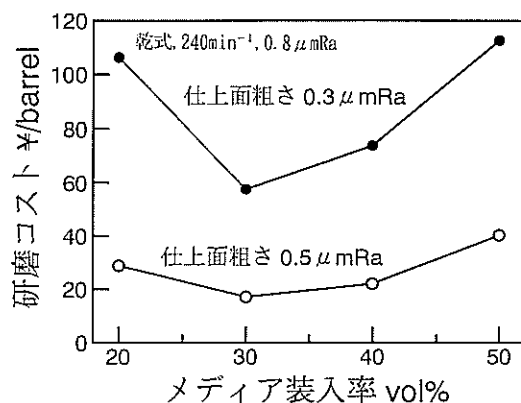


図11.6 メディア装入率と研磨コストの関係 (仕上面粗さ)

が研磨コストは高くなっている。これは、前加工面に対して仕上面粗さの目標値が低いほど、研磨時間が増大することに起因している。一方、いずれの仕上面粗さの目標値の場合も、研磨コストはメディア装入率の増加にともなって最初減少しはじめ、30vol%において最小となった後に再び増加する傾向に転じている。

ここで、メディア装入率20vol%の方が30vol%より研磨コストが高いのは、メディア装入率20vol%の方が30vol%よりも研磨開始時における仕上面粗さの減少速度は速いが、メディア装入率の低い方が到達し得る仕上面粗さの限界値は高くなり、仕上面粗さの減少速度の低下が早く起こるために、メディア装入率20vol%の方が仕上面粗さの目標値に到達する前にその減少速度の低下を来し、30vol%よりも研磨時間が増大したことによるものである。また、メディア装入率50vol%の方が30vol%よりコストが高いのは、メディア装入率50vol%の方が30vol%よりも到達し得る仕上面粗さの限界値は低いが、研磨開始時における仕上面粗さの減少速度が遅いため、30vol%よりも研磨時間が増大したことによるものである。

すなわち、メディア装入率によって仕上面粗さの減少速度および到達し得る仕上面粗さの限界値が異なるだけでなく、仕上面粗さの減少速度は仕上面粗さがその限界値に近づくにともなって低下するので、前加工面の粗さと仕上面粗さの目標値によってメディア装入率と研磨コストの関係は変化することになる。例えば、前加工面の粗さと仕上面粗さの目標値の差がたとえ僅かであるとしても、あるメディア装入率における仕上面粗さの限界値よりも目標値を低く設定してしまうと、そのメディア装入率でいくら研磨しても仕上面粗さの目標値には到達しないので、研磨コストは無限大になることもある。

図11.7は、乾式バレル研磨においてエッジ丸味半径の目標値を一定としたとき

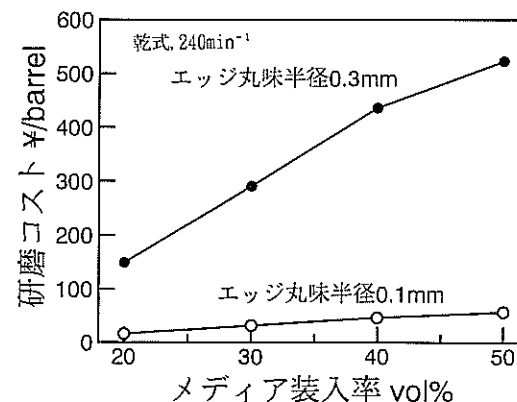


図11.7 メディア装入率と研磨コストの関係 (エッジ丸味半径)

のメディア装入率と研磨コストの関係を示したものである。

同図より、いずれのエッジ丸味半径においてもメディア装入率が高くなることになって研磨コストも上昇することがわかる。これは、メディア装入率が高くなると単位時間当たりの研磨量は減少し、エッジ部の研磨量も減少することになり、エッジ丸味半径の目標値に到達するまでの研磨時間が増大することに起因するものである。また、いずれのメディア装入率においても、エッジ丸味半径の目標値が大きい方が研磨コストは高くなっている。これは、エッジ丸味半径の目標値が大きい方がエッジ部での研磨量は多く、工作物全体としての研磨量も多く必要になり、研磨時間が増大することによるものである。

すなわち、研磨量が増大するとエッジ丸味半径も増大するので、図11.7は図11.5の結果と同様の傾向を示しており、単位時間当たりの研磨量の低い研磨条件（高いメディア装入率）では、研磨時間が増大し研磨コストも上昇することになる。

11.5 バレル研磨条件の選定因子

11.5.1 選定因子

「選定因子」とは、あるもの（こと）を選定するときの条件という意味である。すなわち、選定因子は一義的には選定という行為の目的を達成するための条件であるが、目的達成における付帯条件である場合もある。

具体的には、バレル研磨条件の最も重要な選定因子は、バレル研磨の目的を達成することであり、研磨目的に最も適合したバレル研磨を実現することである。研磨目的に最も適合したバレル研磨を実現するという事は、メディア種類、タレット回転数、工作物の装入量などの研磨条件を選定することにほかならず、選定因子を最も満足する研磨条件の選定を如何に実現するかが重要である。

選定因子を最も満足するバレル研磨とは、研磨目的（表面やエッジの仕上げ）を達成できる研磨条件で行われるバレル研磨のことになるが、研磨目的を達成できる研磨条件が複数存在する場合には、研磨条件を決定するための別な選定因子、例えば研磨時間が最短あるいは研磨コストが最小などを追加する必要がある。

また、このような二次的選定因子に、最近では環境への影響が考慮されることもあり、選定因子の決定は経営戦略的な面もあるので難しい問題である。

しかし、これまでの人件費等を考慮しない結果において、研磨時間と研磨コストが比例していることは明らかとなっており、最短の研磨時間は最少の研磨コストとなるので、ここではバレル研磨条件の選定因子を研磨目的の達成と研磨時間の最短化として、バレル研磨条件の選定について検討する。

11.5.2 二段階研磨法

研磨目的が研磨量やエッジ丸味半径にある場合には、どのような研磨条件であっても研磨時間さえかければ研磨目標とする研磨量やエッジ丸味半径を達成することができるので、研磨目的を達成できる研磨条件は無数に存在することになる。すなわち、この場合の二次的選定因子を満足させることは、無数に存在する研磨条件の中から単位時間当たりの研磨量が最も大きい研磨条件を選定することであり、実際には既知の研磨条件の中から単位時間当たりの研磨量が最も大きい研磨条件を選定することである。

一方、研磨目的が仕上面粗さの場合には、研磨条件によって仕上面粗さの減少速度が異なるばかりでなく、その到達し得る仕上面粗さの最小値が決まっているので、複雑な様相を呈することになる。

図11.8は、このことを説明するための典型的な例として、研磨条件Aと研磨条件Bを仮定し、研磨時間と仕上面粗さの関係を示したものである。

例えば、仕上面粗さの目標値を $0.5\mu\text{mRa}$ とすると、AとBのいずれの研磨条件においても目標値の達成は可能であるので、この場合の最適化とは、より短い研磨時間で目標値に到達できる研磨条件Aを選択することになる。しかし、仕上面粗さの目標値が $0.3\mu\text{mRa}$ になると、研磨条件Aの到達し得る仕上面粗さの最小値は約 $0.4\mu\text{mRa}$ であると考えられるので、研磨条件Aでは目標値の達成は不可能となり、選定因子を満足する研磨条件はBということになる。

これは、表面仕上げの開始から終了までを同一の研磨条件で行うとした場合のことであり、図からも明らかなように、まず仕上面粗さの減少速度が速い研磨条件Aで研磨を開始し、適当な時期に研磨条件をBに変更することによって研磨時

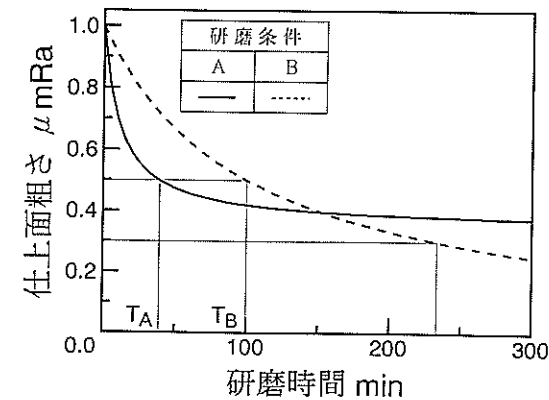


図11.8 研磨時間と仕上面粗さの関係

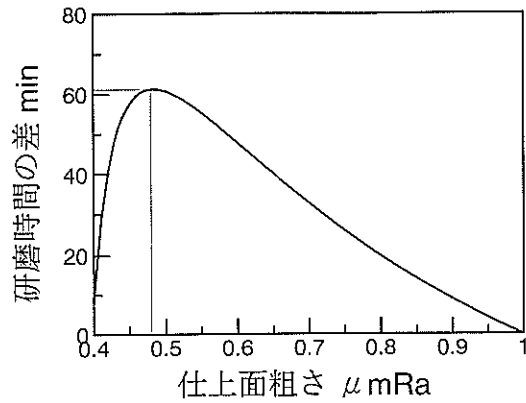


図11.9 仕上面粗さと研磨時間の差の関係

間の短縮($T_B - T_A$)が可能である。

図11.9は、仕上面粗さとその仕上面粗さに到達するまでの研磨条件BとAの研磨時間の差($T_B - T_A$)を求めたものである。

同図より、仕上面粗さ $0.48 \mu\text{mRa}$ において研磨条件BとAの研磨時間の差異は最大値を示し、61分となっていることがわかる。すなわち、研磨条件Aで仕上面粗さ $0.48 \mu\text{mRa}$ まで研磨した後、研磨条件Bで研磨することにより研磨時間を61分短縮できることになる。すなわち、このように2種類の研磨条件を組み合わせることにより研磨時間を短縮する方法を二段階研磨法と呼び、研磨時間の短縮化に有効な方法の一つである。しかし、研磨条件をAからBに変更するのに61分以上必要であったり、研磨時間短縮によるコストダウンが研磨条件変更にもなう人件費等によるコストアップより小さい場合には、最初から研磨条件Bで研磨する方がよい。研磨条件の選定においては、1種類の研磨条件で研磨目標を達成するのが基本であるが、複数のバレル研磨機の利用が可能であったり、工作物やメディアの交換が短時間に自動的に可能なシステムが構築できるのであれば、二段階研磨法だけでなく多段階研磨法も可能になる。

乾式バレル研磨用のメディアは、湿式研磨用のセラミックスメディアに比べてその重量が軽く水も必要としないので、メディアの交換が容易であり、乾式バレル研磨法の方が多段階研磨法に適した研磨法であるといえる。また、最近の遠心バレル研磨機は無段変速になっている場合が多いので、タレット回転数の変更は殆ど時間を必要としない最も簡単な研磨条件の変更方法であり、二段階研磨法における最も有効な方法であると考えられる。

実際の遠心バレル研磨法の場合、乾式研磨だけでなく湿式研磨においても、メ

ディアの種類を始めとして多くのパラメータが存在するため、必ずしも最適な研磨条件で研磨が行われているとは限らないのが現状であり、より効率的な研磨条件の選定のためには、メディアの研磨特性に関連するデータベースの構築およびそれらの充実が必要であることは言うまでもない。

11.5.3 選定因子としてのSurface Integrity⁶⁾

これまで、バレル研磨条件と研磨特性の関係からバレル研磨条件の選定因子について検討してきた。しかし、研磨特性として、研磨量、仕上面粗さおよびエッジ丸味半径を取上げただけであり、これらが必ずしも全ての研磨目的に対応している訳ではない。とくに、最近では仕上面粗さだけでなくSurface Integrityも考慮されるようになってきている。

Surface Integrityとは、加工変質層とそれがトライボロジー、部品の疲労、腐食、変形などの部品の機能に及ぼす影響を含めたものことであり、バレル研磨の究極の目的はSurface Integrityの向上ということになるかもしれない。すなわち、仕上面粗さは部品表面の幾何学的形状を示すだけのものであり、バレル研磨条件の選定においてもSurface Integrityという観点からも検討する必要がある。具体的には、Surface Integrityとは加工変質層のことであり、表面酸化物、メディア砥粒などの異物埋込み、亀裂、残留歪み、応力、組織変化、合金生成ということになるが、バレル研磨においてもほとんど検討された例はない。

そこで、Surface Integrityの中でも比較的測定のしやすい残留応力をPSPC微小部X線応力測定装置(理学電気㈱, PMSF-1200S)で測定した結果について検討する。

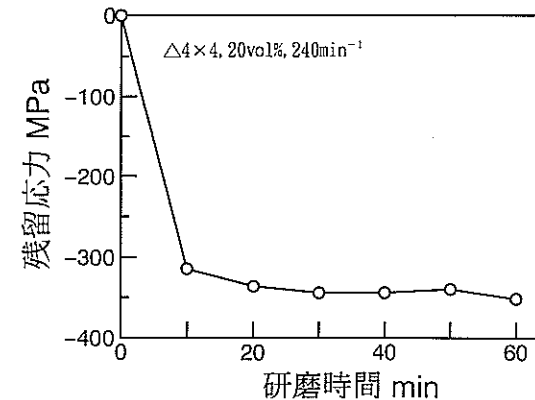


図11.10 研磨時間と残留応力の関係

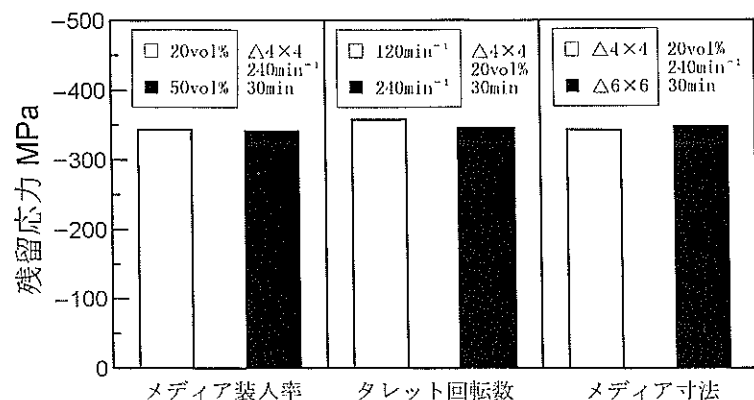


図11.11 研磨条件による残留応力の比較

図11.10は、これまでの実験に使用してきたみがき棒鋼 (S45C) に真空熱処理炉で焼なまし処理 (810℃, 炉冷) を施し残留応力を除去したものをナイロンメディア (△4×4mm, A#320) を使用し, メディア装入率20vol%, タレット回転数240min⁻¹で研磨したときの工作物表面の残留応力と研磨時間の関係を示したものである。

同図によれば, 研磨開始から10分で工作物表面の残留応力が約-310MPaまで急激に増大し, それ以降はわずかに変化するが, 研磨時間が30分を越えるとほぼ一定値を示すようになる。

そこで, Surface Integrityとしての残留応力に及ぼす研磨条件の影響をこの一定に到達した値で行うと, 図11.11のようになる。

同図によれば, いずれの研磨条件においても残留応力は約-350MPaとなっており, バレル研磨における工作物の残留応力は研磨条件に依存せず, 工作物の材質に依存すると考えられる。

Surface Integrityを選定因子とすることは今後の課題であるが, バレル研磨における工作物表面の残留応力は研磨条件の影響を受けないので, 残留応力を選定因子として研磨条件を検討する必要はないことは明らかである。

11.6 結言

バレル研磨法における研磨コストの計算式を提案し, 遠心バレル研磨法の乾式および湿式における研磨性能を例にして, 研磨条件による研磨特性と研磨コスト

の関係について検討した結果, 以下のことが明らかになった。

- (1) 乾式研磨および湿式研磨のいずれの方法においても研磨時間に比例して研磨コストは増大し, 湿式研磨の方が乾式研磨よりも研磨コストは高くなる。同様に, 研磨量に比例して研磨コストも増大するが, 研磨量の極めて少ない範囲を除いて乾式研磨の方が研磨コストは高くなる。
- (2) 乾式研磨および湿式研磨のいずれの場合においても仕上面粗さの減少にともなって研磨コストは増大する。とくに, それぞれの研磨条件における仕上面粗さの限界値に接近するまでは, 湿式研磨の方が乾式研磨よりも研磨コストは低くなるが, 湿式研磨の方が急増の割合が大きいため, その急増が先に始まるので, 湿式研磨における仕上面粗さの限界値付近では湿式研磨の方が研磨コストは高くなる。
- (3) 乾式研磨および湿式研磨のいずれの方法においてもエッジ丸味半径に比例して研磨コストは増大する。また, エッジ丸味半径は研磨量に比例して増大するため, 研磨量の場合と同じ傾向を示す。
- (4) 研磨量およびエッジ丸味半径のいずれにおいても, メディア装入率が高い方が研磨コストも高くなるが, 仕上面粗さにおいてはメディア装入率30vol%付近で研磨コストは最小値を示す。
- (5) 研磨条件の選定において, メディア交換にともなうコストアップよりも研磨時間短縮によるコストダウンの方が大きければ, 二段階研磨法は有効である。
- (6) 工作物の残留応力は研磨条件に依存せず, 工作物の材質に依存する。

参考文献

- 1) 石田喬男, 吉田昭一, 河野洋一郎, 平賀幹敏: 乾式バレル研磨機 (ロールフロー) による仕上げ加工, 新東技報, No. 14(1994)39.
- 2) J.B.Kittredge: The Mathematics of Mass Finishing, SME Technical Paper, MR81-399(1981)16.
- 3) チップトン編: バレル研磨の手引
- 4) 高沢孝哉: バリテクノロジー, 朝倉書店(1980)91.
- 5) 山本章裕, 北嶋弘一, 桜田康弘, 野呂田進: 遠心バレル研磨に関する基礎的研究 (第1報) -メディア装入率の影響-, 精密工学会誌, 63, 3(1997)381.
- 6) 木下直治監修: 精度設計と部品仕上げシステム技術, 日経技術図書(1989)17.

第12章 総括

従来のバレル研磨法は、容器（バレル）に工作物、メディア（研磨石）、水およびコンパウンドを装入し、容器に回転や振動などの運動を与えることにより、工作物とメディア間に相対運動を誘発させ研磨するという方法である。この研磨法は、処理できる工作物の形状や寸法に制限が少なく、表面仕上げだけでなくバリ取りやエッジ仕上げが同時に行うことができる方法として、機械部品の仕上工程においてよく利用されている。しかし、その加工プロセスにおいてコンパウンドと工作物およびメディアの摩耗粉が混在した廃水が発生するために、厳しい法規制と環境保全の要求から高価な廃水処理設備を導入し、適切な廃水処理を行うことが必要とされるようになってきている。

これまでのバレル研磨に代わる仕上方法やそれを上回る研磨法が出現しないので、水を使用しないでバレル研磨を行うという乾式バレル研磨法が検討されるようになってきた。実際、従来のバレル研磨法においても、水を使用しない有機メディアを用いた乾式バレル研磨は行われているが、研磨力が低いために合成樹脂の光沢仕上げ等に用途が限られているのが現状であり、セラミックスメディアを用いた湿式バレル研磨法と代替するには研磨力が低すぎるという欠点を有している。

すなわち、本研究の目標とする乾式バレル研磨は、セラミックスの焼成メディアを用いた従来の湿式バレル研磨と同等の仕上げ、すなわち一般金属部品の粗仕上げから細仕上げまでの広範囲の研磨を乾式で行おうとするものである。

乾式バレル研磨においては、コンパウンドと水による潤滑作用、洗浄作用、緩衝作用などが無く、従来のセラミックスメディアを乾式で使用すると工作物とメディアは過酷な条件下で接触を繰返し、工作物に打痕や擦過痕を発生することになるので、ナイロンなどの高分子材料に砥粒を混入して成形したメディア自身に緩衝作用を備えた乾式バレル研磨用のメディアが開発された。特に、乾式バレル研磨用メディアとしては、メディア素材に耐熱性と耐摩耗性が要求されるため、メタ系アラミド樹脂とナイロンに砥粒を混入したものが開発されている。

しかし、コンパウンドと水を使用する従来の湿式バレル研磨には、仕上工程で長年にわたって使用されているという十分な実績があるが、乾式バレル研磨の実績はほとんど皆無に近いので、この乾式バレル研磨の普及には、乾式バレル研磨用メディアで研磨した場合の研磨条件と研磨特性の解明が必要不可欠であるばかりでなく、従来の湿式バレル研磨との研磨能力の比較も必要となることは言うまでもない。

そこで、本研究論文においてはバレル研磨法の中でも最も研磨能力が高く、メディアの損耗も激しいと考えられる遠心バレル研磨法において、メディア性能の評価および乾式バレル研磨の実用化を検証するために実験を行い、種々の観点より検討した。本研究で得られた結果を要約すると、以下のようになる。

第2章では従来の各種バレル研磨法について調査し、遠心バレル研磨法は研磨能率が最も高いので、乾式バレル研磨法の研磨特性の究明に適していることを明らかにした。また、遠心バレル研磨法におけるバレルの運動について検討し、バレルとタレットの径の比 R_t と回転数の比 R_n は共回りというバレル研磨の可否にかかわるきわめて重要な条件であることと、マスの流動はバレルの自転に比例することを明らかにした。

第3章では遠心バレル研磨法の研磨特性と乾式バレル研磨用メディアの研磨性能を明らかにするための実験方法について検討し、工作物エッジ部の幾何学的関係から新しいエッジ丸味半径の定義を提案するとともに、それによるエッジ部の研磨量の計算方法を明らかにした。また、工作物の研磨特性に及ぼす影響を解明するための工作物の仕様を検討するとともに、材質の異なる工作物については相対研磨量の導入の必要性を明らかにした。さらに、メディアと工作物の接触圧の測定に圧力測定フィルムの使用を提案した。

第4章では乾式バレル研磨法と湿式バレル研磨法における研磨性能を比較するため、仕様のできるだけ近い乾式用および湿式用メディアを用い、乾式および湿式で遠心バレル研磨を行い、研磨率、仕上面粗さ、エッジ部の丸味半径および研磨比について検討し、以下のような結果が得られた。

- (1) 乾式用および湿式用メディアは、いずれも本来の使用法によって研磨に用いた方が、良好な研磨性能が得られる。

(2) 研磨率（研磨量）は、湿式用メディアで湿式研磨したものが最大になるが、研磨比（メディアの損耗に対する研磨量の割合）は最小値をとる。また、乾式用メディアで乾式研磨した研磨率は湿式用メディアで湿式研磨したもののより低くなるが、研磨比は最大値をとる。

第5章では乾式遠心バレル研磨における研磨機構という観点から、メディアと工作物の接触挙動と研磨特性の関係ならびにメディアと工作物の接触圧について検討するとともに、圧力測定用フィルムを用いてメディアと工作物の接触圧の測定を実際に行い、メディアと工作物の接触挙動に及ぼす研磨条件の影響を明らかにした。その結果を要約すると以下ようになる。

- (1) メディアと工作物の接触圧は、メディア装入率の増大にもなって低下するが、タレット回転数およびメディアと工作物の混合率の増大にもなって増大する。
- (2) 研磨率はメディアと工作物の接触圧に比例し、遠心バレル研磨における研磨量はラッピングの理論による結果と定性的に一致する。

第6章では研磨特性に及ぼすメディア諸元の影響を明らかにするため、形状、混入砥粒粒度および材質の異なるメディアを使用して乾式遠心バレル研磨を行い、研磨量や仕上面粗さなどへの影響について検討し、以下のような結果を得た。

- (1) 寸法の大きいメディアは研磨量が多く、限界仕上面粗さも大きくなる。
- (2) メディアに混入する砥粒の粒度が大きい（砥粒粒径が小さい）ほど、限界仕上面粗さは減少する。研磨量に関しては、砥粒粒度だけでなくメディア表面上に突出する砥粒切れ刃の状態が影響を及ぼすため、砥粒粒度の小さい（砥粒粒径が大きい）メディアは研磨量が必ずしも多くなるということにはならない。
- (3) アラミド樹脂メディアの方がナイロンメディアよりも損耗量が少なく、研磨比も大きい。また、メディアに混入する砥粒の粒度が同一ならば、限界仕上面粗さはナイロンメディアの方が大きい。

第7章では砥粒混入アラミド樹脂メディアを使用し、機械構造用炭素鋼(S45C)の乾式バレル研磨法を行い、遠心バレル研磨におけるメディア装入率の影響について実験的に検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 研磨率は、メディア装入率の増加にもなって減少する。また、到達し得る仕上面粗さとエッジ部の丸味半径のメディア装入率に対する変化は研磨率と同様の傾向を呈する。
- (2) メディア装入率50vol%における研磨率に対するそれぞれの研磨率の比を相対研磨率とすると、メディア装入率に対する相対研磨率はタレット回転数の影響を受けない。

(3) 研磨率は、マスの流動状態によって大きな影響を受ける。また、マスの流動状態は、メディア装入率の変化にともなうマスと容器の幾何学的関係によるマス内の速度勾配および回転数により影響を受ける。

第8章では砥粒混入ナイロンメディアを使用し、機械構造用炭素鋼の乾式バレル研磨を行い、遠心バレル研磨におけるタレット回転数およびメディアと工作物の混合率の研磨特性に及ぼす影響について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 研磨量は、タレット回転数の増加にもなって増大し、タレット回転数のべき乗に比例する。また、高いタレット回転数で研磨した方が、そのタレット回転数における仕上面粗さの限界値に到達するまでは、短時間で仕上面粗さを改善することができ、工作物のエッジ丸味半径も大きい。
- (2) メディアと工作物の混合率の増大にもなって、工作物一個当たりの研磨量は増加し、またバレル容器内の工作物個数も増加するため、工作物全体の研磨量も増大する。
- (3) いずれのメディア装入率においても、メディアと工作物の混合率10vol%を越えると仕上面粗さが急激に増大し始める。また、その増大割合はメディア装入率の低いものほど大きくなる。

第9章では砥粒混入ナイロンメディアを使用し、乾式バレル研磨を実施し、遠心バレル研磨における工作物の形状および材質が研磨特性に及ぼす影響について実験的に検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 相対研磨量とエッジ丸味半径は、工作物比重の増加にもなって増大するが、仕上面粗さは工作物比重に依存せず、ほぼ一定値をとる。
- (2) 相対研磨量、仕上面粗さおよびエッジ丸味半径は、工作物硬さの増加にもなって減少する。
- (3) 相対研磨量は、工作物表面積の増加にもなって増大する。しかし、仕上面粗さは、工作物表面積が増大すると減少し、一定値に漸近する。

第10章では砥粒混入ナイロンメディアを使用してバリを有する工作物の遠心ドライバレル研磨を行い、研磨条件がバリ取り特性に及ぼす影響について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) バリ取の除去プロセスにおけるバリの変形・分離作用は、メディア装入率が低く、タレット回転数が高く、メディア寸法が大きい場合に発生しやすくなる。
- (2) メディア装入率が低く、タレット回転数が高くなると、研磨率は増大し、バリ取り時間は短縮される。また、メディア寸法が大きい場合には、研磨率が小さくなるにもかかわらず、バリ取り時間は短縮される。

- (3) バリ取り完了時のエッジ丸味半径は、研磨条件によるマスの流動状態ともなうバリ（エッジ）へのメディアの作用力とバリ取りに要する時間の関係によって決定される。

第11章ではバレル研磨における研磨コストの計算式を提案し、遠心バレル研磨の乾式および湿式の研磨性能を例にして、研磨条件による研磨特性と研磨コストの関係について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 乾式および湿式研磨のいずれの場合も研磨時間に比例して研磨コストは増大し、湿式の方が乾式研磨よりも研磨コストは高くなっている。同様に、研磨量に比例して研磨コストも増大するが、研磨量の場合は研磨量の極少ない範囲を除いて乾式研磨の方がコストは高くなっている。
- (2) 乾式および湿式研磨のいずれの場合も仕上面粗さの減少にともなって研磨コストは増大する。とくに、それぞれの研磨条件における仕上面粗さの限界値に接近するまでは、湿式の方が乾式研磨よりも研磨コストは低い。湿式の方が急増の割合が大きく、先に急増が始まるので、湿式研磨における仕上面粗さの限界値付近では湿式研磨の方が研磨コストは高くなっている。
- (3) 研磨量およびエッジ丸味半径のいずれの場合も、メディア装入率が高い方がコストも高いが、仕上面粗さの場合は、メディア装入率30vol%付近で研磨コストは最小値を示す。
- (4) 研磨条件の選定において、メディア交換にともなうコストアップよりも研磨時間短縮によるコストダウンの方が大きければ、二段階研磨法は有効である。

本研究の結果より、乾式遠心バレル研磨法における研磨条件の研磨特性に及ぼす影響が明らかとなり、また適正な研磨条件を選択すれば乾式遠心バレル研磨法でも従来の湿式バレル研磨法と同等の仕上げができることが判明したので、乾式バレル研磨により湿式バレル研磨が代替できることが明確になった。

謝辞

本研究は、平成4年10月に関西大学工業技術研究所委託研究員としてお世話になって以来続けてきた研究をまとめたものであり、以後本研究の遂行に始終変わらぬ懇切なご指導、ご助言、ならびに格別のご尽力を賜った関西大学工学部機械工学科北嶋弘一教授に衷心より感謝の意を表します。

本研究をまとめるにあたり正鵠を射るご討論、ご教示を賜った関西大学工学部機械工学科中桐明和教授と機械システム工学科樋口誠宏教授に厚く感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり貴重なバレル研磨に関する資料をいただくとともにバレル研磨とバリ取りについてご討論とご教示を賜った神奈川工科大学高沢孝哉名誉教授ならびに本研究全般にわたり懇切なご助言と格別のご助力を賜った兵庫県立工業技術センター電子部三宅輝明部長に心から感謝の意を表します。

さらに、本研究において有益なご指導を賜った兵庫県立工業技術センター機械金属工業指導所脇坂彰一所長ならびに生産技術部杉本護部長に感謝します。

本研究において力強いご支援とご助力を賜った兵庫県立工業技術センター山中啓市主任研究員、岸本正主任研究員、佐伯靖主任研究員ならびに実験の実施において格別のご協力とご尽力を賜った関西大学工学部機械工学科生産システム研究室院生角野寿朗氏、桜田康弘氏、瀧上晃弘氏、中岡祐介氏、佐々井充氏および学生の諸氏に厚く御礼申し上げます。

また、実験の実施に協力していただいた帝人佃野呂田進氏、新東ブレーター(株)渡辺昌智氏ならびにご支援いただいた兵庫県立工業技術センター諸氏に御礼申し上げます。

さらに、委託研究員として受け入れてくださり本研究の端緒を与えてくださった関西大学田中行雄名誉教授に感謝の意を表します。

最後に、平成7年1月の阪神・淡路大震災では大変な苦勞のなか仕事に支障をきたさないように気遣ってもらったことなど、いつの日も支え続けてくれた父；護と母；須美子に心より感謝します。

学術論文および学会講演発表

学術論文

- 1) 山本章裕, 北嶋弘一, 野呂田進: 砥粒混入アラミド樹脂メディアによるドライバレル研磨の研究, 砥粒加工学会誌, 40, 2(1996)69-74.
- 2) 山本章裕, 北嶋弘一, 桜田康弘, 野呂田進: 遠心バレル研磨に関する基礎的研究(第1報) -メディア装入率の影響-, 精密工学会誌, 63, 3(1997)399-403.
- 3) 山本章裕, 北嶋弘一, 瀧上晃弘, 渡辺昌知: バレル研磨における乾式および湿式の研磨性能, 砥粒加工学会誌, 42, 3(1998)124-129.
- 4) 山本章裕, 北嶋弘一, 瀧上晃弘, 渡辺昌知: 遠心バレル研磨に関する基礎的研究(第2報) -工作物の形状及び材質の影響-, 精密工学会誌, 64, 12(1998)1821-1825.
- 5) 北嶋弘一, 中岡祐輔, 山本章裕, 渡辺昌知: ドライバレル研磨によるバリ取りの研究, 砥粒加工学会誌, 43, 10(1999)437-441.
- 6) 北嶋弘一, 山本章裕, 中岡祐輔, 渡辺昌知, 高沢孝哉: ドライバレル研磨によるバリ取りの研究(続報) -研磨条件がバリ取り特性に及ぼす影響-, 砥粒加工学会誌, 44, 3(2000)138-141.
- 7) 北嶋弘一, 山本章裕, 中岡祐輔, 佐々井充, 渡辺昌知, 辻宣佳: セミドライバレル研磨法による純チタン材料の鏡面加工の試み, 砥粒加工学会誌, 45, 2(2001)73-78.

総説・解説・紀要・その他

- 1) 北嶋弘一, 山本章裕, 渡辺昌知, 高沢孝哉: ドライバレル研磨法のバリ取りへの適用, 関西大学工学研究所技苑No. 98(1999)5-10.
- 2) K. Kitajima, A. Yamamoto, A. Takigami and M. Watanabe: The Influence of Workpiece Shape and Material in Dry Centrifugal Barrel Finishing, Technology Reports of Kansai University, No. 41(1999)17-33.

国際会議

- 1) A. Yamamoto, K. Kitajima, S. Norota and K. Takazawa: Dry Centrifugal Barrel Finishing by Using Aramid Resin Media, Proceedings of 2nd Int'l ABTEC Conf., Taiwan(1995)527-532.
- 2) K. Kitajima, Y. Sakurada, A. Yamamoto and K. Takazawa: Surface and Edge Finishing by Using Dry-type Centrifugal Barrel Finishing, Proceedings of 4th Int'l Conf. PSFBT, Germany(1996)84-91.
- 3) A. Yamamoto, K. Kitajima and S. Sakurada: Surface Finishing by Using Dry-type Centrifugal Barrel Finishing, Proceedings of ICPE'97, Taipei, Taiwan(1997)309-314.
- 4) K. Kitajima, A. Yamamoto, Y. Nakaoka M. Watanabe and K. Takazawa: Deburring Characteristics by Utilizing Dry Centrifugal Barrel Finishing, Proceedings of 3rd International Conference on Abrasive Technology (ABTEC'99), Brisbane, Australia(1999)283-288.
- 5) K. Kitajima, A. Yamamoto and M. Watanabe: Mirror Polishing of Pure Titanium Utilizing Semi-Dry Centrifugal Barrel Finishing, Proceedings of 3rd International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT 2000), Hawaii, USA(2000)349-356.

学会発表

- 1) 北嶋弘一, 田中行雄, 角野寿朗, 山本章裕, 野呂田進: ドライバレル研磨に関する研究(第1報) -砥粒混入コーネックスメディアの適用-, 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 501-502.
- 2) 北嶋弘一, 角野寿朗, 山本章裕, 野呂田進, 高沢孝哉: ドライバレル研磨に関する研究(第2報) -コーネックスメディアの仕上特性-, 1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 507-508.
- 3) 山本章裕, 北嶋弘一, 野呂田進: 砥粒混入コーネックスメディアによるドライバレル研磨の研究, 1994年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, 365-370.
- 4) 山本章裕, 北嶋弘一, 野呂田進, 高沢孝哉: ドライバレル研磨に関する研究(第3報) -コーネックスメディアの装入率の影響-, 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 109-110.

- 5) 山本章裕, 北嶋弘一, 野呂田進, 高沢孝哉: ドライバレル研磨に関する研究 (第4報) - コーネックスメディアと工作物の接触について -, 精密工学会1995年度関西地方定期学術講演会講演論文集, 15-16.
- 6) 北嶋弘一, 桜田康弘, 山本章裕, 渡辺昌知: ドライバレル研磨に関する研究 (第5報) - 砥粒混入ナイロンメディアの適用 -, 精密工学会1996年度関西地方定期学術講演会講演論文集, 57-58.
- 7) 山本章裕, 北嶋弘一, 桜田康弘, 渡辺昌知: ドライバレル研磨に関する研究 (第6報) - 乾式および湿式における研磨性能 -, 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 215-216.
- 8) 山本章裕, 北嶋弘一, 瀧上晃弘, 渡辺昌知: バレル研磨における乾式および湿式の研磨性能, 1997年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, 89-94.
- 9) 北嶋弘一, 瀧上晃弘, 山本章裕, 渡辺昌知: ドライバレル研磨に関する研究 (第7報) - メディアと工作物の混合率が研磨特性に及ぼす影響 -, 精密工学会東北支部学術講演会講演論文集 (1997年郡山), 129-130.
- 10) 山本章裕, 北嶋弘一, 瀧上晃弘, 渡辺昌知: ドライバレル研磨に関する研究 (第8報) - 工作物の形状及び材質の影響 -, 1998年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 315.
- 11) 北嶋弘一, 山本章裕, 渡辺昌知: ドライバレル研磨に関する研究 (第9報) - 工作物の形状および材質が研磨特性に及ぼす影響 -, 精密工学会1998年度関西地方定期学術講演会講演論文集, 21-22.
- 12) 北嶋弘一, 中岡祐輔, 山本章裕, 渡辺昌知: ドライバレル研磨によるバリ取りの研究, 1998年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, 211-214.
- 13) 山本章裕, 北嶋弘一, 中岡祐輔, 渡辺昌知: ドライバレル研磨に関する研究 (第10報) - 研磨条件がバリ取り特性に及ぼす影響 - 1999年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 715.
- 14) 山本章裕, 北嶋弘一, 中岡祐輔, 渡辺昌知, 高沢孝哉: ドライバレル研磨に関する研究 (第11報) - 研磨条件とバリ取り挙動の関連性 -, 精密工学会1999年度関西地方定期学術講演会講演論文集, 43-44.
- 15) 北嶋弘一, 山本章裕, 中岡祐輔, 渡辺昌知, 高沢孝哉: ドライバレル研磨によるバリ取りの研究 (続報) - 研磨条件がバリ取り特性に及ぼす影響 -, 1999年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, 115-118.
- 16) 北嶋弘一, 山本章裕, 中岡祐輔, 佐々井充, 渡辺昌知, 辻宣佳: セミドライバレル研磨法による純チタン材料の鏡面加工の試み, 2000年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, 391-396.

