

はじめに

まず、三菱伸銅は、2020年4月合併により、三菱マテリアルになったことを報告します。

素材メーカーとして、以下の理由により、自動車分野において、多くの用途で、銅合金の Pb フリー化が可能であると考えております。

鉛フリー銅合金「エコプラス」は、日欧米でのエコプラス生産・販売実績において、2017 年度には 4 万トンを超え、Pb を含有する黄銅の 4% 近くを置き換えることができていると推測される。そして 2019 年には、エコプラス累計販売量が 30 万トンを超えた。30 万トンという量は、代表的な Pb 含有黄銅、CuZn39Pb3 の Pb の量に換算すると、約 9,000 トンであり、エコプラスの使用で約 9,000 トンの Pb を削減することができたことになる。エコプラスの本格生産・販売から約 20 年が経過し、飲料水の分野を中心に、自動車部品など様々な分野で使用され、材料としての信頼性も十分に確認され、切削技術も確立されつつある。さらに今後、エコプラスの高い強度、優れた耐摩耗性、耐食性などを活かし、部品の軽量化の可能性を探ることにより、環境への負荷も低減されると思われる。

本報告では、エコプラスの特性については既に報告しているので、エコプラス生産・販売の更なる広がり、いくつかの切削加工メーカーの協力によるエコプラス切削加工事例、エコプラスの切削に適した工具選定を中心に報告する。また、幾つかの切削加工事例の中で、切削条件を開示する。同時に、弊社で新たに開発した Pb フリー快削黄銅「グロープラス」に関し、その特性と切削加工事例の一部を紹介する。

## 要旨

### -エコプラスの使用実績

- 日欧米でのエコプラス生産・販売は、2017 年には 4 万トンを超え、そして 2019 年には累計で 30 万トンに達した。
- エコプラスは、Pb 含有黄銅、主として CuZn39Pb3 (以下、C36000 と称する) からの置き換えがほとんどであり、ステンレスからの置き換えは僅かであると聞いている。
- 欧州における 2017 年、2018 年のエコプラス生産・販売実績は、15,000 トンを超え、また、2018 年までの累計販売量は、約 90,000 トンである。エコプラスの使用で、計算上、年間約 400 トン、累計で約 2,500 トンの Pb を削減できている (C36000 換算)。
- 1 つの部品に使用される素材の重量を 20g とすると、欧州で年間約 7.5 億個の部品が製品に組み込まれ、累計では、45 億個以上の部品が製品に組み込まれ、様々な環境で使用されている。
- エコプラスは、材料供給、機械加工、性能、耐久性、リサイクルに問題はなく、約 3% の Pb を含有する銅合金 C36000 からの切替がスムーズに進んでいると聞いている。

### -機械加工工程の適応を含めた代用材への置き換えの可能性

- 複数の顧客から、エコプラスは、C36000 とほぼ同等の機械加工性、生産性が確保されているとの確認を得ている。
- 切削条件によるが、表面品質、寸法精度は、C36000 と同等であるとの確認を得ている。
- 切削加工メーカー 2 社の協力で実施した大量生産切削設備である六軸自動旋盤を使用した部品切削加工で、2 社ともに、1 万個レベルの連続切削に問題がないことを確認している。
- 切削加工メーカー 2 社の協力で実施した商用 NC 旋盤を使用した 1000 個レベルの部品切削加工



の試作で、2社ともに、外周切削、ドリル、ねじ切り、ローレット、溝あけなど各切削の方法で品質に問題がなく、工具にほとんど損傷も認められず、切屑の処理性に問題がないことを確認している。

- 切削加工メーカー1社の協力により実施した製品重量0.4gから10gの8種類の小型部品の切削加工試作で、外周切削、φ0.7の細穴あけ、外及び内ねじ切り、ローレットなどの各切削方法で品質に問題がないことを確認している。
- 以上、5社の切削加工メーカーの協力により実施した15種類の様々な切削加工方法を駆使した部品は、切削加工のすべてを網羅しているとは言えないが、商業切削する上で、いずれの切削加工メーカーにおいても、問題がないことが確認できている。
- エコプラスに適した工具を使用することにより、エコプラスの切削抵抗をC36000の十数%増にとどめ、C36000と同様に分断された切屑が排出されることを確認している。

#### -信頼性

- エコプラス販売の1/2以上は、部品使用からすでに5年以上経過しており、市場、顧客(複数)から高い信頼性を得ている。
- エコプラスは、飲料水に関わる部品、自動車部品などに使用され、様々な水質、土壌、高温、極寒、多湿など多様な環境下で耐食性、耐久性に優れていることが、部品使用実績により実証されている。
- ある自動車重要部品に関し、エコプラスは、C36000より性能、耐久性に優れ、高い信頼性を得ている。その結果、計算上、毎月100万台以上、累計で10,000万台を超える欧米日の自動車に搭載されている。

#### -将来に向けて

- エコプラスは、材料の信頼性がすでに確認されてきているので、エコプラスの高い強度や優れた耐摩耗性、耐食性などを活かし、部品の軽量化を図ることが可能な状態にある。軽量化は、自動車の燃費を向上させることができ、素材の使用量を減らすことにより、環境への負荷を低減することができる。そのためには、積極的に、部品の設計段階から取り組む必要がある。
- 当社で、新たなPbフリー快削黄銅を開発することができた。エコプラスと併用することにより、より一層、多くの用途で多量のPbを含有する黄銅の代替が可能となると思われる。

## I エコプラスの世界販売量と使用実績

Fig.1 にエコプラスの日欧米での生産・販売の推移を示す。

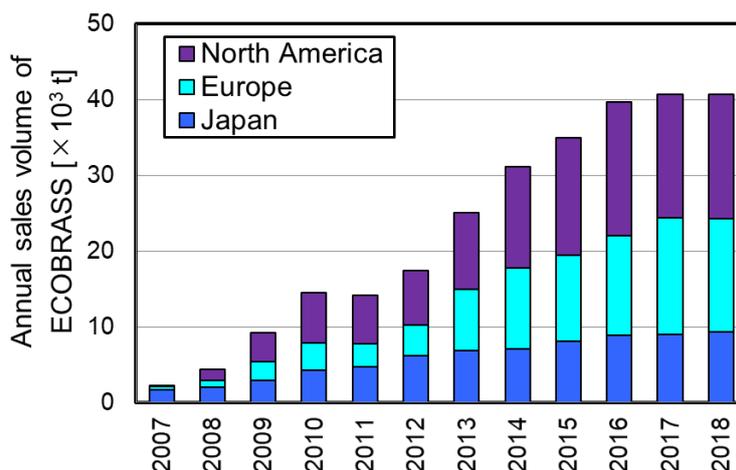


Fig.1 エコブラスの世界販売実績

- 有害物質 Pb の排除の強い要望により、毎年販売量が増え、2017 年、2018 年の日欧米の生産・販売量は、4 万トンを超え、Pb 含有黄銅の 4% 近くを置き換えることができていると推測される。
- エコブラスの供給や経済上の大きな問題はないと聞いている。
- エコブラスは、Pb 含有黄銅からの置き換えがほとんどであり、ステンレスからの置き換えは僅かであると聞いている。
- エコブラスの使用により、素材の段階で、年間約 1,200 トンに相当する Pb を削減できている計算 (C36000 換算) になる。
- エコブラスの世界累計販売量は、2019 年 4 月に 30 万トンに達した。エコブラスの使用は、計算上、9,000 トンの Pb の削減に貢献している。
- 欧州でのエコブラスの生産・販売は、特に 2013 年に急増し、2017 年には、15,000 トンに達した。
- 製造中に発生した切屑や使用済製品の分別、再溶解も容易と聞いている。
- スクラップが分別管理され、回収、再利用が混乱なく実施されていると聞いており、リサイクルに問題はないと聞いている。
- エコブラスは、飲料水の分野での Pb 規制強化により飲料水に関わる部品を中心に、そして自動車部品など種々の産業分野で使用され、様々な水質、土壌中や、高温多湿、極寒環境などの多様な環境下での耐久性、耐食性が実証されている。最近では、自動車部品の中で、エコブラスが欧州の EV 車の部品にも使用されている。
- 部品 1 個の必要素材重量を 20g とすると、計算上、約 150 億個分に相当する部品が製品に組み込まれ、使用されている。その中ですでに 5 年以上使用されている部品は、約 80 億個あり、製品使用実績から、エコブラスは材料としての高い信頼性を得ている。
- エコブラスの販売増は、世界的な Pb フリー化のトレンドとともに、材料として、部品としての性能に優れ、信頼性が実証され、機械加工が困難ではなく、リサイクル性に問題がないことが、大きな要因であると思われる。

## II エコブラスの自動車部品採用事例

代表的な採用事例として、4種類の車載用部品を紹介する。

### 1) カーエアコン小型重要部品 A-逆止弁

Fig.2 に、自動車のエンジンルームに近いカーエアコン用の小型重要部品を示す。

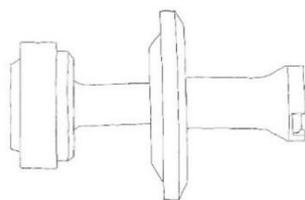


Fig.2 カーエアコン用小型部品 A、逆止弁

- 小型部品 A は、2 個のエコブラス製部品で構成されており、それぞれ  $\phi 10$  (現在は  $\phi 8$  にサイズダウン)、 $\phi 5$  から製造されている。1 個当たりの重量は、各々  $0.42\text{g}$ 、 $0.66\text{g}$  であり、小型の部品に相当する。

Fig.3-1 に同部品用の素材の販売量の推移を示す。

- 販売量は、2014 年以降、毎年約 60 トン販売され、2020 年 9 月末までの同部品向けの累計素材販売量は 440 トンに達する。

Fig.3-2 に各部品の推定生産個数の推移を示す。尚、推定生産個数は、製品寸法から素材重量を概算し、素材販売重量を推定素材重量で除した計算値(推定計算生産個数)である。

- 生産部品数は年々増加しており、2019 年には、約 3,400 万個、約 1,700 万台の自動車に搭載され、累計では 1 億台以上の自動車に搭載されたことになる。

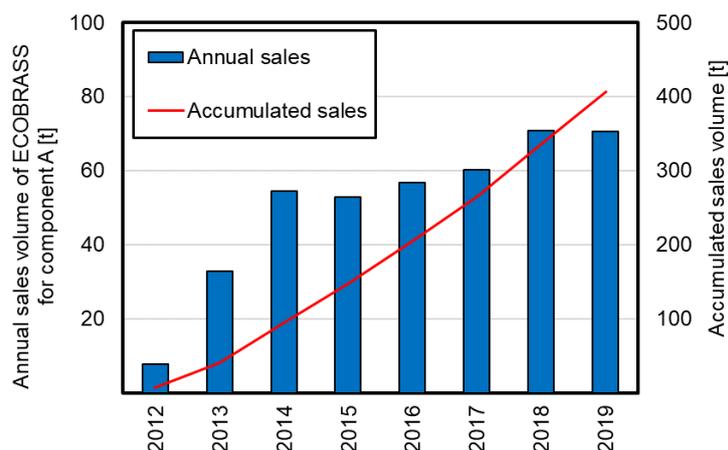


Fig.3-1 カーエアコン用小型部品 A 向け素材の販売量

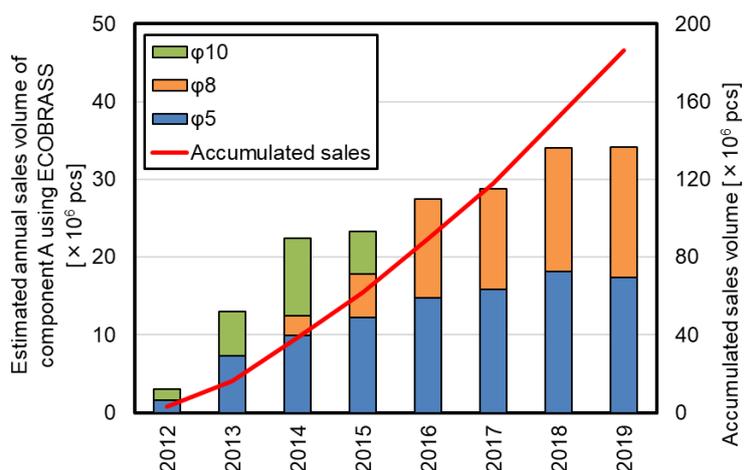


Fig.3-2 カーエアコン用小型部品 A の推定製造個数

## 2) カーエアコン重要部品 B-可変容量コンプレッサー用制御弁

Fig.4 は、別のカーエアコン重要部品 B (Fig.4 左から重さ: 36.8g、34.3g、23.7g) を示す。本部品は、特に高い寸法精度、 $2\mu\text{m}$  が求められている。

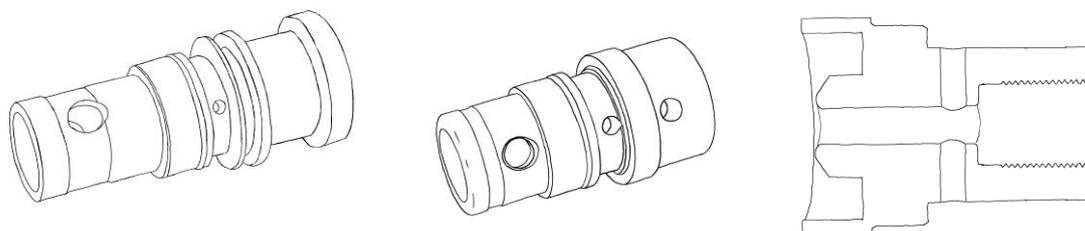


Fig.4 カーエアコン用部品 B、可変容量コンプレッサー用制御弁

Fig.5-1 は素材販売推移、Fig. 5-2 は推定生産個数の推移を示す。尚、推定生産個数は、部品寸法から素材重量を概算し、素材販売重量を推定素材重量で除した計算値とした。

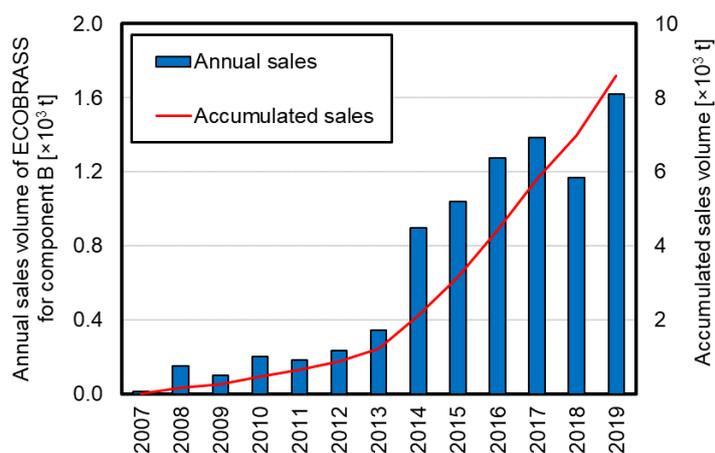


Fig.5-1 カーエアコン用重要部品 B 向けの素材販売量推移

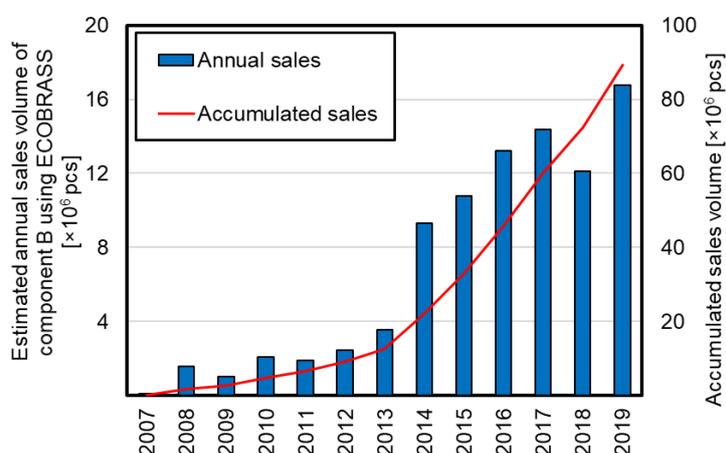


Fig.5-2 カーエアコン用重要部品 B の推定生産部品個数

- カーエアコン用重要部品 B の素材の販売量は、2014 年から急増し、2019 年の年間販売量は約 1,600 トンに達した。また、2007 年 1 月からの同部品向けの累計素材販売量は約 8,600 トンに達する。
- 同部品の推定生産個数は、年間 1,000 万個以上であり、累計で 8,900 万個以上に達し、約 8,900 万台の自動車に搭載されている。
- 高度な寸法精度を求められる同部品の 2014 年の量産切削加工の情報では、「C36000 と比較して、90%またはそれ以上の生産性が確保され、ドリルの工具寿命は 80%以上で量産切削加工している」とのことであった。
- 2007 年から 2012 年までの素材販売数量は、約 877 トンである。8 年以上搭載された当該部品は、単純計算で約 900 万個であり、部品の耐久性、信頼性に問題がなかったことが実証されている。
- 当該部品は、重要な車載部品に位置付けられ、2008 年に 150 万個の本格量産生産がスタートし、部品の信頼性が確認された 6 年後の 2014 年に急増したものと推測される。
- 特性・性能、耐久性が C36000 より優れ、製品使用実績からその信頼性が確認され、同時に、切

削を含む機械加工性が C36000 と大差がないことから、2014 年に急増し、2015 年以降、毎年 1000 万台以上の自動車に搭載されていると推測される。

### 3) 車載小型部品 C、D-インサートナット

Fig.6 に自動車用インサートナット C、D の量産事例を示す。

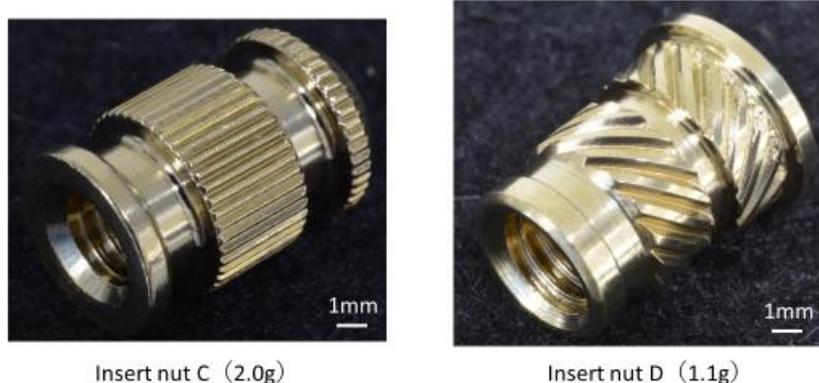


Fig.6 自動車用インサートナット量産事例

- インサートナット C は、2016 年から量産を開始しており、 $\phi 7\sim 10$  の素材を使用し、2020 年 9 月までに累計 50 トンの素材を使用し、量産している。インサートナット C は、部品重量、歩留まりから計算して、約 500 万個の製品が生産され、使用されている。
- 別メーカーで、2015 年から  $\phi 7\sim 9$  の素材を使用し、インサートナット D を量産しており、2020 年 8 月までに 95 トンの素材を使用している。インサートナット D は、部品重量、歩留まりから計算して、2,000 万個以上の製品が、生産され、使用されている。
- これらの製品は、表面品質がよい。特に、外周のローレット部分は転造ローレットで加工しており、ヒゲや割れなどの表面欠陥は認められず、良好な表面状態に加工されおり、ローレット加工の量産加工条件も確立されている。

### Ⅲ エコプラスの切削加工事例

いくつかの切削加工メーカーの協力を得て、実操業中の切削設備を借りて、1) 自動車部品、電気・電子部品を想定した細棒切削事例、2) 最量産設備、六軸自動旋盤での切削事例、3) 汎用の NC 旋盤を用いた 1000 個クラスの切削事例を以下に紹介する。

#### 1) 細棒切削事例(事例 1)

切削加工メーカー A (資本金 300 万円、従業員 10 名) で各々 100~200 個を試作した。

Fig.7 に、直径 3 mm~12 mm の細棒素材を切削した事例を示す。NC 旋盤を使用し、製品重量が 0.4 g~10g の自動車部品、電気・電子部品を想定した 8 種類の小型部品を試作した。



Fig.7 自動車部品、電気・電子部品想定の細棒切削事例 1（素材寸法/部品重量）

- 外周、細穴あけ（ $\phi$ 0.7 ドリル穴）、側面の穴あけ、外側、内側のねじ切り、ローレット加工など、良好な切削ができており、製品品質も C36000 と同等である。8 種類の部品とも、C36000 に順じた切削加工条件であるが、残念ながら、切削加工条件の開示は不可である。
- 細棒の切削も問題なく、小型部品の製造が可能であることが実証されている。

## 2) 六軸自動旋盤を使用した切削事例(事例 2・3)

六軸自動旋盤は、同時に 6 か所の切削が可能で最も生産性に優れるが、製品形状に制約があり、寸法精度は多少ラフである。この大量生産を目指す切削量産設備を使用して、切削加工メーカーB（従業員 240 名）と切削加工メーカーC（資本金 2000 万円、従業員 100 名）で、エコプラスの量産切削性を評価した。

Fig.8、Fig.9 に六軸自動旋盤を使用した切削事例を示す。穴あけ加工を含む 2 種類の C36000 製量産品を選定し、C36000 と同じ切削条件で 2.3 万個および 1.2 万個の連続切削を実施した。



Fig. 8 六軸自動旋盤での切削事例 2



Fig.9 六軸自動旋盤での切削事例 3

- 六軸自動旋盤による切削加工は、1個当たりの切削に要する時間は約 10 秒と短時間で、生産性が優先される反面、工具への負荷は大きい。
- 両製品とも 1 万個レベルの連続切削が可能であった。
- 切屑が嵩張る、工具に絡むなどのトラブルはなかった。また、製品自体の公差外れや表面状態等の不具合もなかった。

切削加工メーカー2 社で、六軸自動旋盤を使用し、違った形状の製品の切削加工を実施した結果、C36000 と同じ切削加工条件であっても、切削の生産性と切削の品質において問題点は見当たらず、量産は可能と判断される。

### 3) NC 旋盤での連続切削事例(事例 4・5)

切削加工メーカーD(資本金 1200 万円、従業員 25 名)、E(資本金 2000 万円、従業員 57 名)で、NC 旋盤を使用した 1000 個の切削加工事例を 2 件紹介する。

#### 3)-1. バルブ部品の切削事例 4

切削加工メーカーD で、実際に量産切削で使用している NC 旋盤でφ 20 エコプラス棒材を使用し、バルブ用部品を昼勤のみであるが、4 日間連続運転で 1000 個の連続切削を実施した。

Fig.10-1 に切削加工部品の外観、発生した切屑を示す。また、Fig.10-2 に 1000 個切削後の工具の外観を示す。



Fig.10-1 バルブ用部品の切削事例 4-1

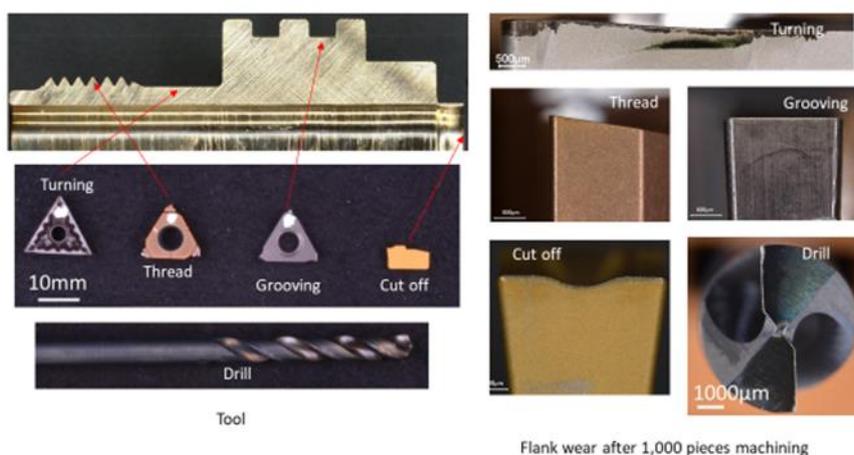


Fig.10-2 バルブ用部品の切削事例 4-2

- 1000 個切削後の切削表面品質や製品の寸法に変化がなく、工具に絡みついて製品を傷つける等の不具合は発生しなかった。また、Fig.10-1 から、処理が容易な切屑が排出されている。
- Fig.10-2 から、外周、溝、ドリル、ねじ切り、突っ切りのいずれの工具も、目視で確認できるような摩耗は認められず、この後の連続切削は可能であると判断される。
- 切削加工時間を 3 分間とすると、1 時間で 20 個、1 昼夜フル操業で 480 個の切削加工品ができる。被削性が良いとは、すわなち、C36000 と同等の被削性とは無人で、少なくとも 1 昼夜連続運転ができること、その間、部品の品質に問題がないこと、切屑の処理のトラブルがないこと、工具交換がないことである。したがって、工具寿命は長いほうが良いが、NC 旋盤の点検等、装置を止めるタイミングで切屑処理や工具交換が実施できれば、実質的に問題は無い。

### 3)-2. ウォームギア類似部品の切削事例 5

切削加工メーカーEで、商用の量産切削で使用している NC 旋盤でφ15 エコプラス棒材を使用し、ウォームギア類似部品の連続切削を実施した。

Fig. 11 に、850 個切削加工後のウォームギア類似部品の外観写真、切削後のローレット駒を示す。

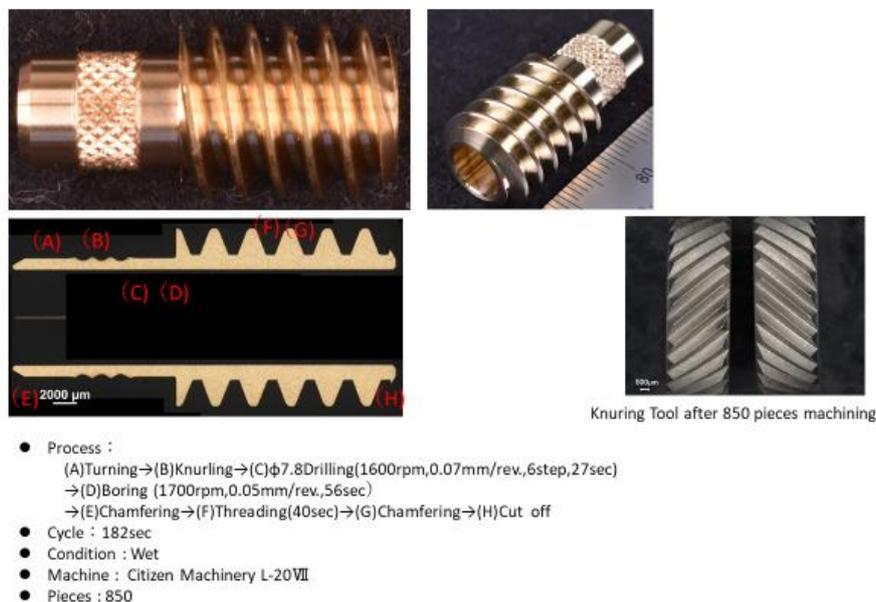


Fig.11 ウォームギア類似部品の切削事例 5

- 製品形状は、正面、斜面、断面からわかるように、薄肉で高度な切削が施され、切削表面品質が良いことが確認できる。また、切削加工品の断面の情報から、素材のほとんどが、切削屑になることが理解される。
- 850 個切削後、表面品質、寸法の変動はほとんどない。
- 850 個切削後、ローレットを含むいずれにも工具摩耗は認められない。
- 製品形状や切削表面に影響するような切屑の連続や詰まりは認められない。

約 1000 個の量産設備での切削評価から、実験室での切削抵抗の大小も重要であるが、切削表面、寸法精度がよく、切削品質が維持され、工具摩耗が少なく、短時間で、トラブルなく、連続して切削できるかがより重要であり、量産対応可能な素材であることは確認できた。今後、さらに切削条件を見直し、工程短縮の可能性を検討していく。なお、今回の切削試作は、湿式で、商用の量産切削設備を用いて実施したが、4章の適切な工具の選定で、実験室において乾式でも評価し、乾式での切削に問題がないことを確認している。

## 4) サイクルタイム

### 4)-1. NC 旋盤使用の切削加工事例-6

切削加工メーカーDの協力で、商用の量産切削で使用している NC 旋盤でφ10 エコプラス棒材を使用し、細穴ドリル切削加工を含む切削評価を実施した。

Fig.12 に、水温センサー類似形状の切削事例を示す。



- Process :  
Outer : Turning→Threading→Deburring→Chamfering→Cut off  
Inner : End face→Center hole→φ8.0 Drilling(2000rpm, 0.1mm/rev., 2step)  
→Center hole→φ4.0 Drilling(2000rpm, 0.07mm/rev., 3step)
- Cycle : 83sec (Outer-43sec, Inner-40sec)
- Condition : Wet
- Material : φ10 × 2500
- Machine : Outer-Star Micronics JNC25, Inner-Takamaz XC-100

Fig. 12 水温センサー類似部品の切削事例 6

- 外周・ねじ加工後に、別の NC 旋盤で薄肉・細穴・深穴切削加工を実施している。
- ドリル切削は、ステップ加工を導入することでドリルの折損もなく加工が可能である。
- 切屑の排出に問題はなく、工具に絡みついて製品を痛める等の不具合は発生していない。

NC 旋盤は、①切削品の寸法精度が要求される、②複雑な形状である、③穴あけ、ねじ切り、エンドミル、ローレットなどの複数の切削方法が必要とされる、或いは、④部品が少量の場合に使用される、最も一般的な切削加工機である。C36000 を使用した場合でも、切削時間は、1 分間から 5 分間であり、部品の寸法精度、表面粗さ、形状、切削方法の数、切削量に左右される。

C36000 が車載部品に採用される主な理由の 1 つに、複雑な形状に、精度よく、そして短時間に切削加工できることが挙げられる。自動車部品、電気・電子部品は、単純な形状は少ない。製品の多くは、単純な外周切削だけでなく、溝明け、エンドミル、ねじ切り、穴あけ、ローレットなどが含まれ、内面の寸法精度が要求される場合は、ドリル穴あけ後、再度旋削されるなど、一般的には、合計で約 10 の切削工程で実施され、相応の時間を要する。さらに、前記のカーエアコン部品のように要求寸法精度、例えば  $2\mu\text{m}$  に応じ、送り速度を小さくする必要があり、製品の要求品質や形状によって切削時間は変化する。

日本の多くの切削加工メーカーは、品質面と万一のドリル折損に備え、複数のステップでのドリル切削を採用している。エコプラスは大よそ、C36000 と同じ条件でも切削が可能であり、幸いなことに、後述するように、表面粗さは C36000 より大きな送りで得られるので、切削時間を短縮できる。

#### 4)-2 表面粗さと送りの関係

**Fig.13** に表面粗さと送りの関係を示す。

切削表面粗さに関して、エコプラスは以下の利点を保有しており、切削時間短縮に活用されている。

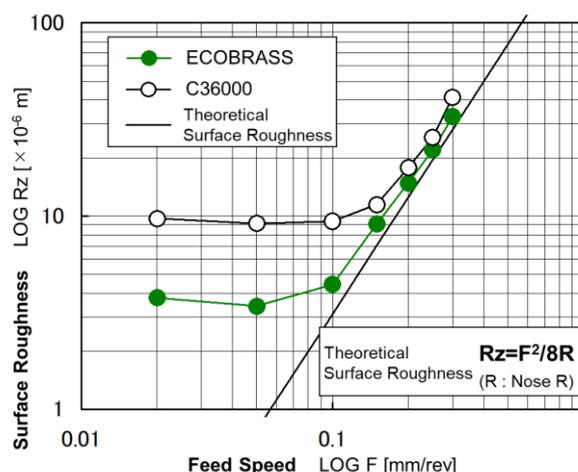


Fig.13 表面粗さと送りの関係

- 一般的に、表面粗さは送りと密接な関係があり、送りが小さいほど理論表面粗さから離れる。切削でより鏡面(凹凸の小さな表面)が必要な場合、送りを小さくする必要がある。
- エコプラスは、C36000 よりも小さい送りまで理論表面粗さに沿った表面が得られるので、C36000 より大きな送りで同じ表面粗さが得られる。送りを大きくすると、切削時間の短縮につながる。

#### 5) 切削加工メーカーの協力による切削加工事例まとめ

従業員数十名、資本金 10 万ユーロの規模の切削加工メーカー 4 社を含む、5 社の協力を得て、エコプラスを使用して、商用の量産設備を用い、様々な形状の部品の切削加工試作を行った。結果は、いずれの切削加工メーカーも、トラブルもなく実施できた。切削加工メーカーの了解も得られ、量産されている自動車部品も含めた 15 種類の切削加工品について、部品形状、表面品質などの多くの情報を開示することができた。一部であるが、工具の摩耗状況、切屑の状態、切削工程を開示することが可能となった。

自動車部品、電気・電子部品のすべてを網羅しているとは言えないが、外周切削、溝あけ、様々なねじ切り、ローレット、薄肉切削、様々な穴あけなどの切削加工方法を駆使し、試作した結果から、商業切削する上で、大きな問題がないことが確認できたと言える。

## IV エコプラスに適した切削工具の選定

エコプラスに適した工具を選定するために、幾つかの切削工具を使い、実験室で湿式・乾式での切削試験を実施し、切削抵抗と切屑の分断性を評価した。尚、以下に示す実験室の切削試験結果は、一部であり、必要であればさらに技術情報を開示する。

### 1) NC 旋盤での湿式切削

実験室の NC 旋盤を使用し、インサート A、インサート B を使い、湿式で切削抵抗を測定した。切削抵抗を示すチャートは、主分力の測定結果であり、3%の Pb を含有する快削黄銅 C36000 との比較で

示している。尚、実験室で切削評価したエコプラス、C36000ともに、直径 20 mmの丸棒である。

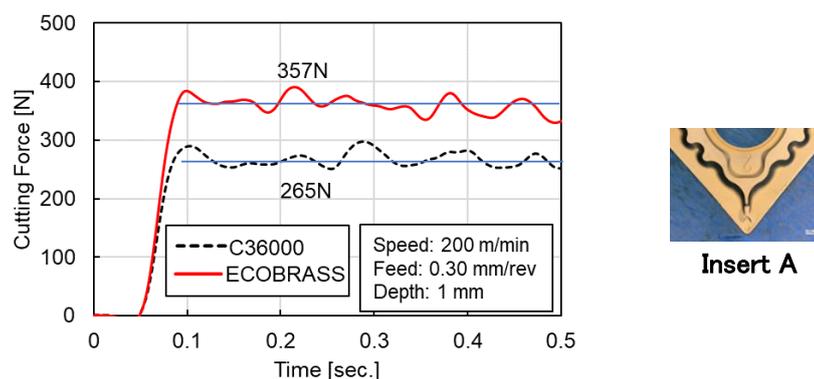


Fig.14 インサート A 使用時の切削抵抗(湿式)

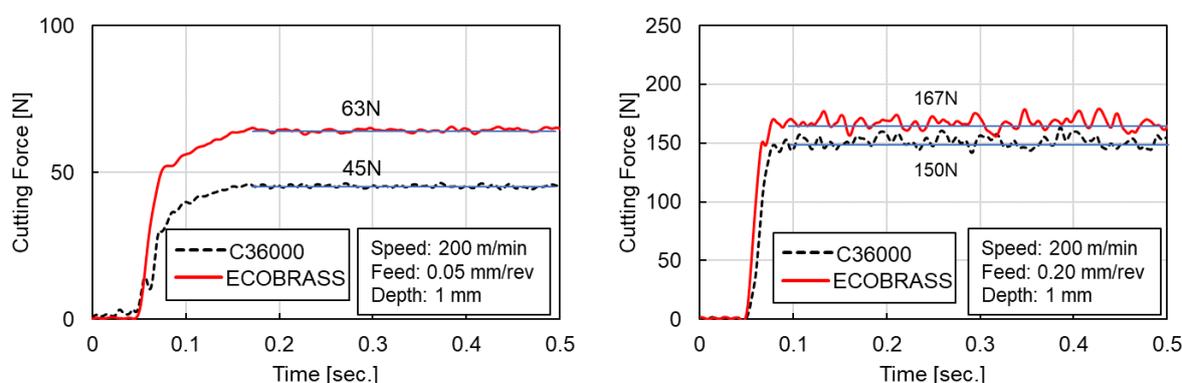


Fig.15 インサート B 使用時の切削抵抗(湿式)

- エコプラスは C36000 の約 1.4 倍の強度を持つ。切削抵抗は材料強度に依存するので、切削抵抗増加は避けられない。
- 言い換えれば、エコプラスの切削抵抗が、C36000 の切削抵抗の 1.4 倍より小さければ (C36000 の切削抵抗が、エコプラスの切削抵抗の 0.71 倍より大きければ)、良好な切削ができていると言える。
- **Fig.14** は、インサート A を使用し、比較的高速、高送りの範疇に入る、200m/min、0.3mm/rev.の切削条件で切削した結果である。エコプラスの切削抵抗は C36000 の 1.35 倍であり、材料強度差を考慮すれば、C36000 と同等の切削と言える。
- **Fig.15** は、インサート B を使用し、切削速度を 200m/min で一定とし、送りを 0.05mm/rev.と 0.2mm/rev.で切削した結果である。エコプラスの切削抵抗比(エコプラスの切削抵抗/C36000 の切削抵抗)は、各々1.40、1.11となる。
- インサート B を使用し、より送りの大きな条件、200m/min、0.2mm/rev でエコプラスを切削すると、C36000 の切削抵抗のわずか 11%増にとどまり、エコプラスの強度を考慮すると、切削自体は C36000 より良好に行われたことが示唆される。

湿式の切削試験結果を整理すると、エコプラスに適した切削工具、切削条件を選定することで、切削抵抗の上昇を避けることができる。Fig.13 に示すように、エコプラスは、C36000 より大きな送りで、C36000 と同等の表面粗さが得られ、サイクルタイム(切削時間)短縮が可能である。

## 2) 手動旋盤での乾式切削

実験室の手動旋盤で、インサート C、インサート D を使い、乾式で切削し、切削抵抗の測定および切屑を評価した。

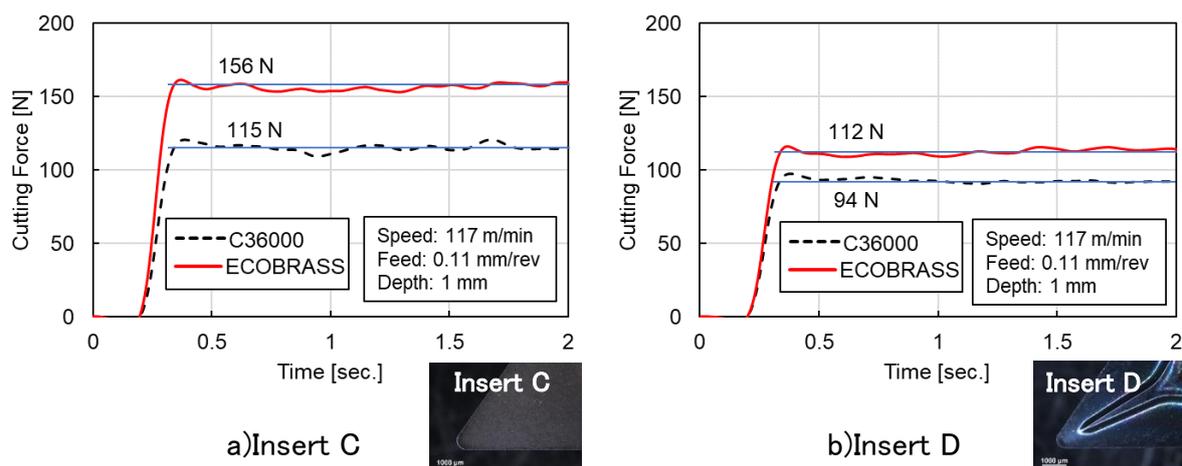


Fig.16 切削抵抗に及ぼすインサートの影響(乾式)

- Fig.16 に、インサート C、インサート D を使い、切削速度:117m/min、送り:0.11mm/rev、切込深さ:1.0mm、乾式の条件で切削した時の切削抵抗のチャートを示す。この条件は、切削加工メーカーD、E で約 1000 個の切削試験を実施した切削条件に近い。
- インサート C 使用の場合、エコプラスの切削抵抗は、C36000 の切削抵抗の 1.36 倍に対し、インサートd使用は、1.19 倍であり、インサートの選定により、エコプラスの切削抵抗の上昇を防ぐ効果があることを示している。また、使用工具により、切削抵抗の絶対値も変化する。

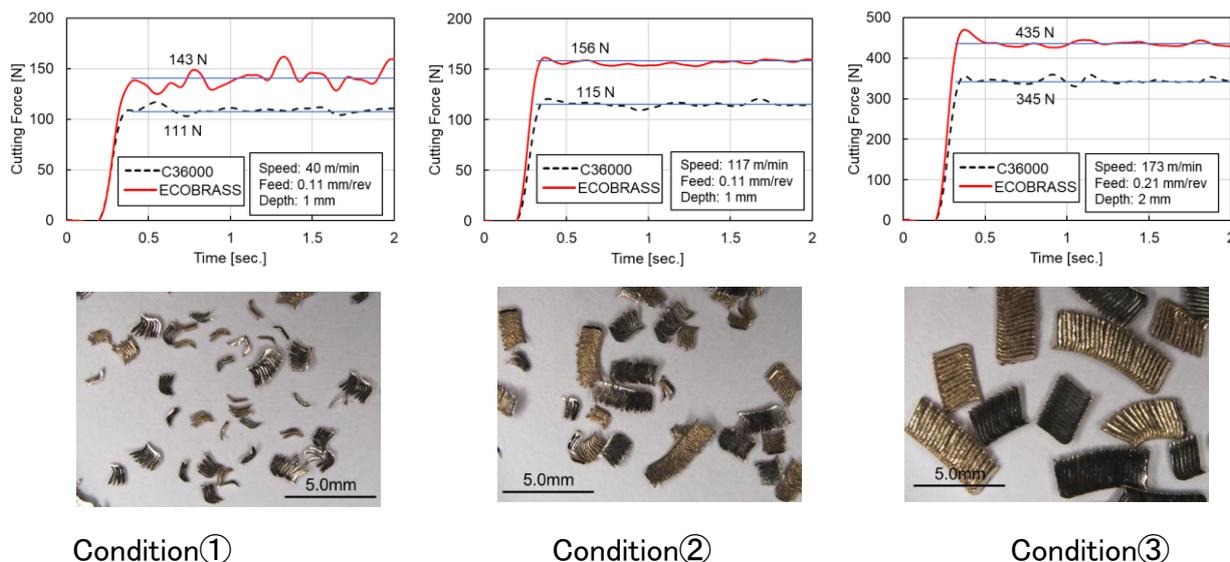
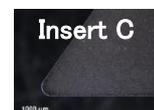


Fig.17 インサート C での切削抵抗と切屑外観



- Fig.17 にインサート C を使用し、3 つの切削条件で切削した時の切削抵抗のチャートと切屑外観を示す。
- 主として切削速度の影響を見るために、乾式で切削速度を 40m/min、117m/min、173m/min、送りを 0.11 mm/rev、0.21 mm/rev、切込深さを 1.0mm、2.0 mmに変化させ、切削試験した。その内訳は、切削速度、送り、切込深さが各々、①40m/min、0.11 mm/rev、1.0mm、②117m/min、0.11 mm/rev、1.0mm、③173m/min、0.21 mm/rev、2.0mm の 3 条件である。
- インサート C では、切削速度などの切削条件に関わらず、切削抵抗比は約 1.3 で変化はなく、切削速度が速くなるに連れ、切屑の長さが少し長くなる。
- インサート C では、切削抵抗が C36000 よりも約 30%増加し、切屑分断性が少し低下することがある。

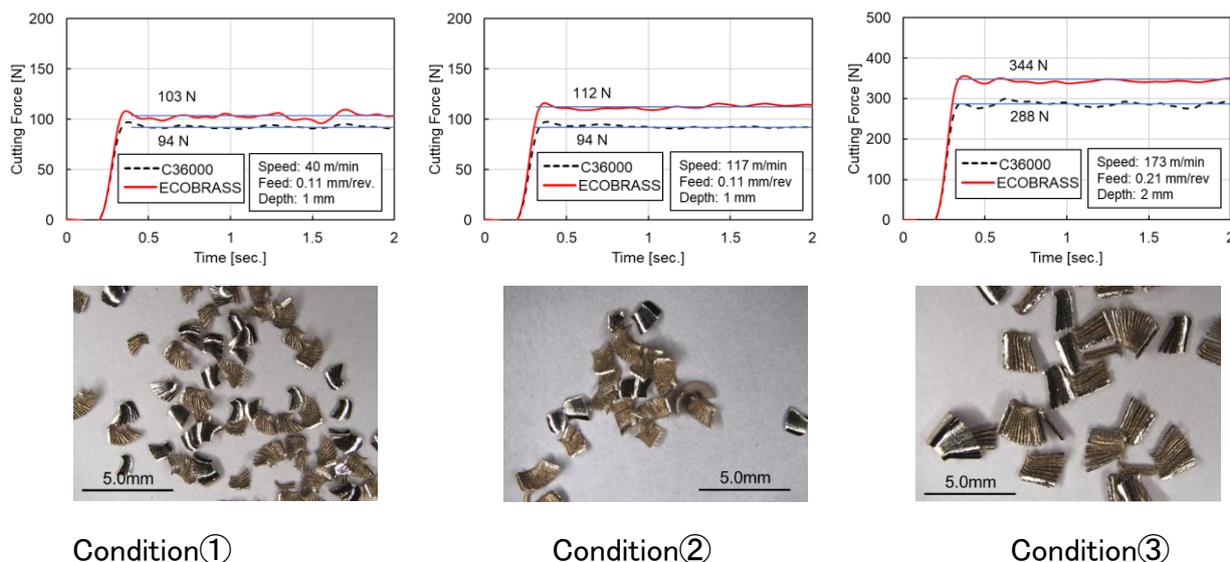


Fig.18 インサート D での切削抵抗と切屑外観



- Fig.18 にインサート D を使用し、インサート C と同様に 3 つの切削条件で切削した時の切削抵抗のチャートと切屑外観を示す。
- インサート D 使用では、切削条件に関わらず切削抵抗比は 1.1～1.2 で大よそ一定であり、インサート C 使用に比べ、切削抵抗が低い。すなわち、インサート D の使用は、C36000 に比べ、わずか 10%～20% 増の切削抵抗の増加にとどまる。この結果は、エコプラスの強度を考慮すると、C36000 よりも良好な切削が行われたことが示唆される。
- 切屑の形状は、3 つの切削条件でほとんど変化なく、切屑は細かく分断され、切削条件に関わらず良好な被削性を示すことが確認できる。

乾式での切削試験結果を整理すると、エコプラスは、乾式においても、湿式と同様良好な被削性を示した。そして、適切なインサートを選定することで、C36000 に比べ切削抵抗の大幅な上昇を避け、具体的には、十数%の増加にとどめ、C36000 と同等の切屑分断性を得ることができる。

### 3) 乾式でのドリル切削

高速度鋼製ドリルと超硬ドリルを使用し、穴あけした時の切削抵抗を切削動力で評価した。

高速度鋼製ドリルは、超硬ドリルに比べ安価であり、実際の C36000 のドリル切削に多用されている。複数の工具メーカーの銅合金用の高速度鋼製ドリルの推奨切削条件として、切削速度が約 30m/min、送りが約 0.2mm/rev と記載されている。3 章で記載したエコプラスの試作に協力した 5 社切削メーカーは、ドリルにいずれも高速度鋼を使用している。要求品質、ドリルの特性やドリル寿命などを鑑み、各々の切削加工メーカーのノウハウにより切削条件に幅があり、切削速度が 23～50 m/min、送りが 0.07～0.15 mm/rev の条件で実施されている。

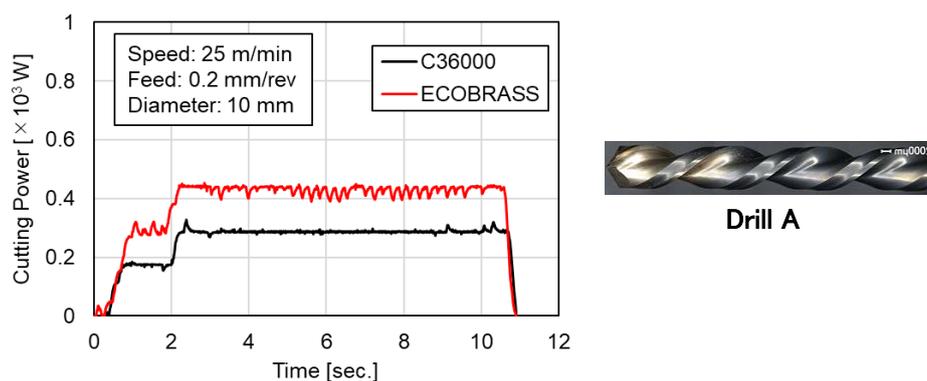


Fig.19 高速度鋼製ドリル A 使用時の切削動力

- Fig.19 に、 $\phi 20$  mmのエコブラスを用い、NC 旋盤を使用し、高速度工具鋼製の直径 10 mmのドリル a を選定して穴あけした際の切削動力を示す。
- 切削条件は、メーカー推奨条件である切削速度 25m/min、送り 0.2mm/rev を採用し、L(ドリル深さ)/D(直径)=3.0、乾式の条件で実施した。
- ドリル切削時の切削動力で重要なのは、ドリル折損にも繋がる切削動力の最大値である。この切削動力の最大値を C36000 比(エコブラスの動力最大値/C36000 の動力最大値)で比較する。
- ドリル切削でも前述の切削加工と同様に、エコブラスの切削抵抗が C36000 の切削抵抗の 1.4 倍より小さければ、良好な切削ができていると言える。
- ドリル A を使用した場合、エコブラスの切削動力は C36000 の 1.39 倍であり、材料強度比どおりの数字であり、C36000 と大よそ同じドリル切削が出来たと言える。
- 発生した切屑の写真は割愛したが、第 3 章に示すように、C36000 と同様切屑処理性の良いものであった。

超硬ドリルは、高速度鋼製ドリルに比べ、高回転数、高送りのドリル切削が可能であるが、高価であるため、C36000 での使用頻度は低い。工具メーカーのカタログには多数の超硬ドリルが掲載され、他の金属材料では超硬ドリルが多用されている。超硬ドリルの場合、いくつかの工具メーカーの銅合金の推奨切削条件として、切削速度約 100m/min、送り約 0.3mm/rev と記載され、エコブラスの場合も、高速度鋼製ドリルを使用するより、生産性の向上が期待されるので評価した。

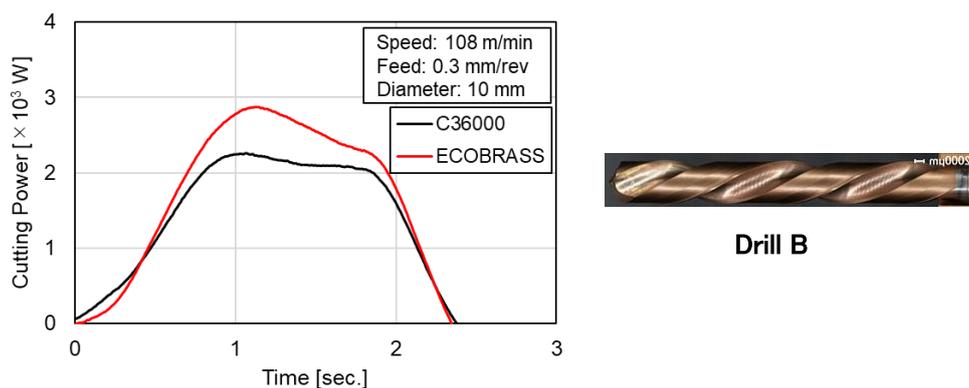


Fig.20 超硬ドリル B での切削動力

- Fig.20 に、 $\phi 20$  mmのエコブラスを用い、NC 旋盤を使用し、超硬製の直径 10 mmのドリル b を選定して穴あけした際の切削動力を示す。
- 切削条件は、メーカー推奨条件である切削速度 108m/min、送り 0.3mm/rev を採用し、L(ドリル深さ)/D(直径)=3.0、乾式の条件で実施した。
- ドリル B を使用した場合、エコブラスの切削動力は、C36000 の 1.27 倍であり、材料強度比よりも小さい数字であり、C36000 と同じドリル切削が行われたと言える。
- 発生した切屑は、C36000 と同様切屑処理性の良いものであった。

本誌面での高速度鋼製ドリル、超硬ドリルの切削事例は各々1 件しか掲載していないが、ドリルの切削抵抗は、いずれも C36000 の 1.36 倍、1.29 倍である。C36000 との強度比 1.4 倍よりもわずかに小さい切削抵抗であり、切削抵抗に関しても問題ないと言える。

#### 4) 実験室での切削試験まとめ

エコブラスに適した切削工具(インサート、ドリル)を選定すること、また、適切な切削条件で切削することにより、C36000 を少し上回る切削抵抗にとどめ、C36000 と同様に切屑分断性の良い切削試験結果が得られた。C36000 は非常に被削性に優れるため、専用の切削工具は少ないが、Pb を含有する快削鋼、一般的な炭素鋼、ステンレス鋼などそれらに適した切削工具が、世界中で多数存在し、容易に入手できる。これらの切削工具からエコブラスに適した切削工具を選定することにより、さらに切削抵抗が小さい、切屑分断性の優れた、工具寿命の長い切削工具を見つけるのに、大きな労力を必要としない。

エコブラスは、日欧米で 30 万トンを超える生産・販売され、部品点数で大よそ 150 億個にも達する。多くの切削加工メーカーは、まず、C36000 の切削条件からスタートし、製品に要求される品質や切削加工条件にあった切削工具の選定により生産性が向上し、トラブルなく、商業切削されている。今回開示した技術情報は 1 例であるが、必要があれば、さらに技術情報を開示する。

## V GloBrass

グローブラスは、弊社が開発した Pb フリー快削黄銅で、エコブラスと同様、Pb が 0.1% 以下の Cu-Zn-Si 合金であり、その他の元素もすべて 0.1% 以下 (Cd は 0.01% 以下) である。但し、エコブラスの Cu 濃度が約 76% に対し、グローブラスの Cu 濃度は 60% 台の前半であり、グローブラスの金属組織は、C36000 と類似し、エコブラスとは異なる。グローブラスは、良好な被削性、機械的性質を備えており、詳細は必要に応じて開示可能である。Table 1 に C36000 とエコブラスとグローブラスの特性比較を示す。尚、グローブラスの導電率は、自動車部品や電気・電子部品に多用されている Sn を 6% または、5% 含有するりん青銅より高く、熱・電気伝導性が必要な部品にも使用が可能と思われる。エコブラスとグローブラスを併用することにより、さらに多くの用途に使用できるものと確信する。

Table 1 GloBrass の特性

	GloBrass	C36000	ECOBASS
Tensile Strength	○	△	○
Wear Resistance	○	△	○
Corrosion Resistance	△	△	○
Machinability	○	○	○
Hot Forgeability	◎	-	○
Castability	○	-	○
Conductivity/%IACS	16	26	8

### 1) グローブラスの切削加工事例

エコブラスと同様に、切削加工メーカー D、E の協力を得て、商用の NC 旋盤を使用して量産切削性を評価した。



Fig.21 バルブ用部品の切削事例 7



Fig.22 ウォームギア類似部品の切削事例 8



Fig.23 フライス加工を含む部品、温度センサー類似部品の切削事例 9

- Fig.21 に切削加工メーカーD で実施したバルブ用部品の 1000 個の切削事例、Fig.22 に切削加工メーカーE で実施したウォームギア類似部品の 1,000 個の切削事例、Fig.23 に切削加工メーカーE で実施したフライス加工を含む部品、温度センサー類似部品の各々100 個の切削事例を示す。尚、切削加工条件は、エコプラスと同じ条件で実施した。
- Fig.21～Fig.23 から、外周、溝明け、ドリル、側面の細穴ドリル、ねじ切り、突っ切り、ローレット、フライス、エンドミルの各切削加工は問題なく実施できた。バルブ用部品、ウォームギア類似部品は、いずれも表面品質はエコプラスと同様に良好であり、切削初期の部品と 1000 個切削後の部品の表面品質に変化はなく、寸法の変動はほとんどなかった。切削表面品質は、エコプラスと同様に良好であった。

- バルブ用部品、ウォームギア類似部品、フライス加工を含む部品、温度センサー類似形状部品ともに、切屑処理が容易な切屑が排出された。また切屑が工具に絡みついて製品を傷つける等の不具合は発生しなかった。
- バルブ用部品、ウォームギア類似部品ともに 1000 個切削後、外周、溝明け、ドリル、ねじ切、突っ切り、ローレットのいずれも目視で工具の損傷は観察されず、この後の連続切削は可能であると判断された。
- グローブラスは、エコプラスの切削評価とほぼ同じ結果が得られた。

グローブラスは、エコプラスと同様に、被削性が良好で、切削品質がよく、薄肉で高度な形状に商用切削加工でき、様々な加工方法に対応できることが確認できた。1000 個の連続切削であるが、切削品質の低下がなく、切屑分断性が良好で、量産対応可能な素材であることが確認できた。また、実施した切削加工メーカーのオペレーターからも C36000 に近い切削性を有する素材であるとのコメントもあり、量産可能と判断される。

## 2) グローブラスの切削抵抗

### 2-1) 湿式および乾式での切削

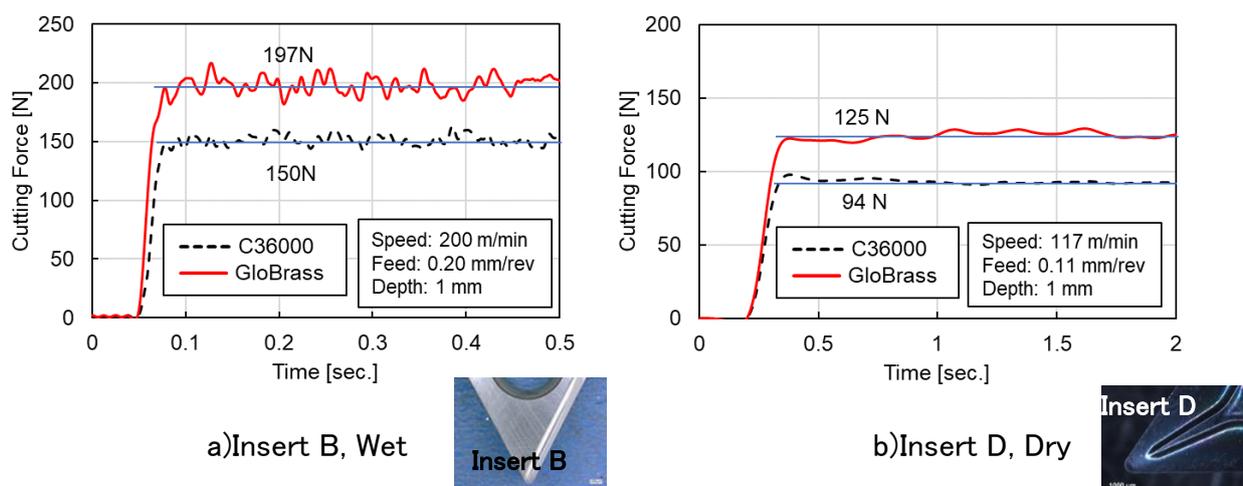


Fig.24 インサート B での切削抵抗(湿式)とインサート D での切削抵抗(乾式)

- **Fig.24** に一例として、実験室で、NC 旋盤を使用し、インサート B を用いて湿式で切削抵抗を測定(切削速度 200m/min、送り 0.20mm/rev、切込深さ 1 mm)した結果と、手動旋盤を使用し、インサート D を用いて乾式で切削抵抗を測定(切削速度 117m/min、送り 0.11mm/rev、切込深さ 1 mm)した結果を示す。尚、切削評価したグローブラス、C36000 ともに、直径 20 mm の丸棒である。
- グローブラスは、C36000 の約 1.3 倍の高い強度を保有し、高い強度の分、切削抵抗に不利に働く。湿式、乾式の切削抵抗は、各々 C36000 の 1.31 倍、1.33 倍であり、大よそ C36000 と同じ強度差であり、エコプラス同様、切削自体は C36000 と概ね同じ切削ができたと言える。
- 発生した切屑は、切削加工メーカーの協力を実施した時の切屑、Fig.21、Fig.22 に示すように、C36000 と同様に、細かく分断され、切屑処理性のよい切屑であった。

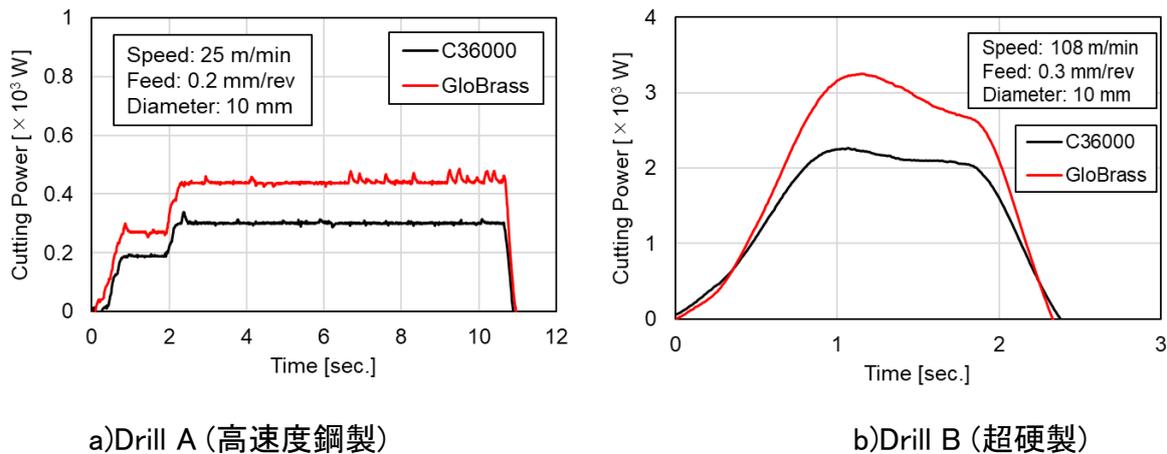


Fig.25 高速度鋼製ドリル A、超硬ドリル B 使用時の切削動力

- Fig.25 に、NC 旋盤を使用し、高速度鋼製ドリル a、超硬製ドリル b を選定して穴あけした際の切削動力を示す。切削条件は、ドリル A が 25m/min、0.2mm/rev、ドリル B は切削速度 108m/min、送り 0.3mm/rev で、いずれも L(ドリル深さ)/D(直径)=3.0、乾式の条件で実施した。
- 高速度鋼製ドリル A、超硬製ドリル B とともに、グローブラスのドリルの切削抵抗は、C36000 に比べて約 1.4 倍であり、C36000 との材料強度比を少し上回る結果であった。エコプラスとの比較においても、約 10% 高い結果であった。
- 発生した切屑は、切屑処理性のよい切屑が排出された。

### 3) グローブラスの切削まとめ

グローブラスは、C36000 に比べ、約 1.3 倍高い強度を保有していることを考慮に入れると、旋削、ドリルともに良好な切削が可能である。現在、グローブラスは、エコプラスとともに、適した切削工具の選定、適した切削条件を見つけるための様々な評価を実施し、実用的な切削評価も行っている。今回開示した技術情報は一例であり、必要に応じて、さらに技術情報を開示する。

## VI 結論

三菱マテリアルが知りうる技術、情報として以下のようにまとめられる。

- エコプラスは、以下の項目が確認されている。
  - 1) エコプラスは、計算上、累計で約 150 億個の部品に加工され、その約 1/2 は多様な環境下で 5 年以上使用され、高い信頼性が得られている。
  - 2) 強度、耐食性等の特性および耐久性の両面で高い信頼性が得られている。
  - 3) 適正な機械加工、切削加工条件を選定することで C36000 とほぼ同等の生産性、工具寿命、寸法精度、表面品質が得られている。
  - 4) スクラップが分別管理され、回収、リサイクルが混乱なく実施されている。
  - 5) 車載部品で、累計でおよそ 1 億台の車に搭載されている複数の部品が存在し、その使用実績から高い信頼性が得られている。
  - 6) 複数のローレット加工を含む自動車部品が確認され、各々 500 万台以上の車に搭載されており、

複雑な製品形状、高い寸法精度等の品質要求にも応えることができている。

- 従業員が数十名の 4 社を含む切削加工メーカー5 社の協力を得て、C36000 を切削している商用設備を使用し、5 社ともに、エコブラスの商業切削に問題がないことを確認している。
- 切削加工メーカーの協力を得て実施した 13 種類の様々な切削加工方法を用いた部品の切削加工結果から、自動車部品のすべてを網羅しているとは言えないが、商業切削する上で大きな問題がないことが確認できている。
- エコブラスに適した切削工具の使用により、一例であるが C36000 に比べ、わずかに約十数パーセント高い切削抵抗にとどめ、切屑分断性の良い試験結果が得られている。
- C36000 は、切削抵抗が低く、工具寿命に優れるため、専用の切削工具は少ないが、Pb を含有する快削鋼、ステンレス鋼などそれらに適した切削工具が、世界中で多数存在し、容易に入手できる。その中から、エコブラスやグローブラスに適した工具を選定することにより、生産性をさらに向上させることが可能と思われ、必要であれば、弊社で所有する切削技術情報を開示する。
- エコブラスは、鉛を 3% 含む現行材よりも、高強度で、優れた耐摩耗性、クリープ特性、耐食性を備える銅合金であり、部品の厚みや重量を減らすことが可能と推測される。鉛フリーでより軽量の部品は、環境への様々な負荷を軽減できると信じる。
- エコブラスと組成、金属組織、特性の異なる新たな Pb フリー快削黄銅、グローブラスを開発できている。エコブラスとグローブラスを併用することにより、さらに多くの用途に使用できるものと確信する。