

グラファイトの鏡面創成に関する研究

学生 K 指導教員：井原之敏

Making mirror surface of graphite

Student K

1 緒 言

近年、炭素材料はダイヤモンドやフラーレンなど様々な構造があることから特徴や使用用途が多岐にわたることから注目を集めている。その中でグラファイトは特性として軽量で、電気伝導性を持ち、耐熱性に優れており航空分野や原子力分野において需要がある。また、高精度な面を得ることができれば更なる使用用途が増えることが予想されている。しかし、グラファイトは炭素粒子にバインダを用いて焼結する構造上多気孔であるため、表面には様々な形態で孔が存在する。よってグラファイトは精度の求められる場面では使用されている事例が少ない。

高精度な面として鏡面が挙げられる。鏡面とは鏡のように映る面であり、金型などの製品に使用されることが多い。しかし、JIS 規格などの国際規格に定義されておらず、大変曖昧である。また、鏡面を創成するためには大変高価な設備、工具などを必要とするものが多く、高価で製造したとしても需要を増やすことができるかどうか不明である。そのため本研究では、グラファイトを安価な機械加工によって鏡面創成の技術確立することを目指す。

2 グラファイト¹⁾²⁾

グラファイトは軽量、高耐熱性、電気伝導性に優れていることから放電加工用の電極やるつぼなどに用いられている。このようにグラファイトは様々な場面で注目を集めている材料である。しかし、欠点として炭素の粉を焼結して製造されているため、材料内部に気孔が存在し表面性状を改善することが難しい。さらに切りくずが工作機械内部の摺動面に侵入することやフィルターをすり抜けて切削油に混在してしまうことも問題となっている。そのため、優れた特徴を持っているにも関わらずグラファイトの加工が行われている研究例は少ない。

3 鏡 面³⁾

3.1 概要

鏡面とは、鏡のように映る面のことをいう。傷がほとんどない状態や非常に表面性状が良好でない限り鏡面にならないため精密な加工が要求される。しかし、JIS、ISO などの国際規格によって定義されていないため、鏡面かどうか判断するために表面における像の映りや傷の度合いといった外観による定性的な評価が行われていることが多い。金属材料に関しては表面が鏡になるような表面粗さを経験上から導き目標値を独自に設定す

ることで定量的に評価を行っている。鏡面を評価するパラメータとしては表面における輪郭の凹凸を平均にする算術平均粗さ Ra、対象物における光の反射度合を定量化した光沢度が一般的に挙げられている。グラファイトの鏡面に関する研究事例は存在しないため、本研究では独自に外観とパラメータを比較し評価を行う。

3.2 グラファイト鏡面の製造方法

(a) 手仕上げ

切削加工などを行った面に対してバフ研磨など手作業で行う加工方法である。加工の中で最も良好な仕上げ面が得られることから鏡面創成の最も一般的な方法として挙げられる。しかし、切削加工とは別に設備が必要な事や、熟練のある技師が必要であることから加工コストがかかる上、加工後の面精度が悪いため安定しない製造方法である。

(b) 切削加工⁴⁾

近年、金属を切削加工によって鏡面創成することが一般的になりつつある。その理由として手仕上げに比べて大幅に加工能率を改善することができるからである。グラファイトは切削加工によって鏡面化された研究例が無い場合、表面性状に影響を及ぼす切削速度、送り速度、切込み量を変更し、グラファイト鏡面のための最適加工条件を模索する。

(c) バニシング加工

バニシング加工は材料表面に圧力を加えることによって表面を平滑にする加工方法である。グラファイト表面に存在する気孔を平滑にすることでグラファイトの鏡面化を目指す。バニシング工具は市販で販売されているものが高価であるため、本研究では、自作したバニシング工具を用いた。自作したバニシング工具の外観を図 1、構造を図 2 およびバニシング工具内部のばねの仕様を表 1 に示す。



図 1 バニシング工具の外観

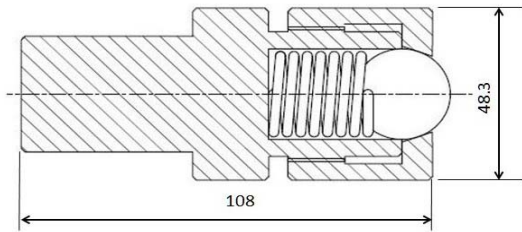


図2 バニシング工具の構造

表1 バニシング工具内部のばねの仕様

型番	AP240-033-2.6
外径 [mm]	24
自由高 [mm]	33
線径 [mm]	2.6
最大荷重 [N]	144.76
ばね定数 [N/mm]	10.15

4 切削加工による炭素鋼の鏡面創成

前述のとおり、本研究は鏡面創成を安価な方法で行うことが最終目的である。そのため、過去の実験を通してすでに所有している切削工具や20年前に販売された工作機械を使用することでコストの削減を図っている。そこで、鏡面創成を実現することができるかどうか確かめるために一般的な鏡面創成として用いられる炭素鋼を用いて鏡面創成を目指す。表面性状に影響を及ぼす加工条件である切削速度、送り速度、切込量を変更し、フライスによる正面切削を行った。その結果、切削速度 301.6m/min、送り速度 5mm/min、切込量 5 μ m で算術平均粗さ 0.04 μ m、光沢度 500 の鏡面を創成することができ、今回の設備で鏡面創成を実現することができることを証明した。

5 切削加工によるグラファイトの鏡面創成

5.1 加工条件の変更による影響

4章にて今回の設備にて S45C の鏡面化を実現した。グラファイトは機械加工が行われている研究例が少なく、加工条件は明らかにされていないため、適切な加工条件が不明である。そこで、炭素鋼にて鏡面創成を実現した際の加工条件を基準に切削速度、送り速度、切込量を変更してグラファイトの鏡面創成に対応しい加工条件を検討した。

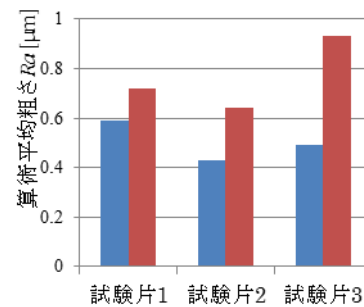
(1) 切削速度の変化による影響

4章の金属加工実験と同じ設備で粗加工、中仕上げ加工、仕上げ加工の順番にグラファイトの加工を行う。切削速度による影響を見るため、仕上げ加工の切削速度を 301.6、603.2m/min の2種類に設定し、1つの加工条件につき試験片3つの加工を行った。表2に切削速度 V、回転数 S、送り速度 F、送り量 f、切込量 t を示す。

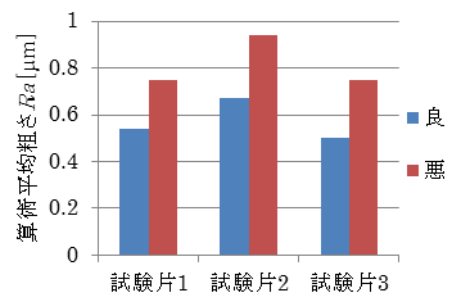
表2 各加工工程における加工条件

加工工程	V [m/min]	S [min ⁻¹]	F [mm/min]	f [μ m]	t [μ m]
粗					100
中仕上げ	201.1	800	25	31	50
仕上げ	301.6	1200	5	4.2	20
	603.2	2400		2.1	

測定結果仕上げ切削速度別にプロットしたグラフを図3に示す。



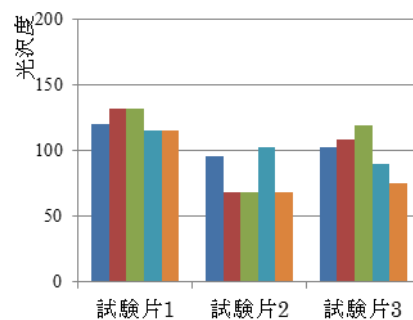
(a) 切削速度 301.6m/min



(b) 切削速度 603.2m/min

図3 仕上げ切削速度別の算術平均粗さ Ra

各試験片における5か所の光沢度測定結果をグラフに表す。図4は切削速度 301.6m/min、603.2m/min における光沢度のグラフである。



(a) 切削速度 301.6m/min

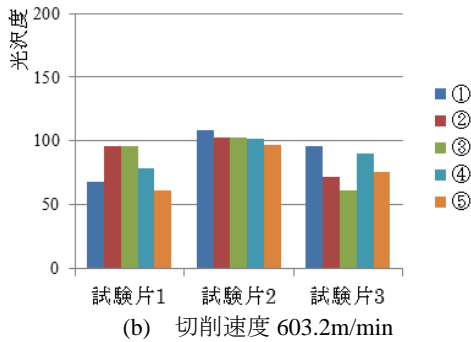


図4 各試験片における光沢度測定結果

図3および図4より表面粗さは切削速度 603.2m/min よりも 301.6m/min のほうが良好であることが分かる。しかし、切削速度 301.6m/min に関して良いところを測定した場合、3つの試験片の中で最も算術平均粗さが高いのは試験片1であるが、光沢度も最も高くなっている。このことから、グラファイトは金属とは異なり算術平均粗さおよび光沢度の相関が強くない可能性がある。また、各切削速度の3つの試験片における光沢度の平均値を計算すると、切削速度 301.6m/min は 101 であるが、603.2m/min は 87 となった。光沢度は測定箇所および測定範囲ともに十分に測定できているため、切削速度 301.6m/min のほうが良好な仕上げ面が得られることが分かった。

5.2 切削工具変更による影響

加工条件を変更すると表面性状は改善されたが、鏡面創成は実現することができなかった。鏡面創成を行うためには加工条件とは異なる要因が関係していると考え工具径が小さい工具およびインサートチップの形状を変更することで加工面がどのように変化するか確認した。その結果、工具径の小さい方が表面性状は改善されたものの改善幅は算術平均粗さが $0.15\mu\text{m}$ 低くなり、光沢度が7程度しか改善されず、工具径の大きい方が能率的には大幅に良好である。したがって、以降の実験においても工具径が大きい工具を用いることとした。

5.3 ダイヤモンド切削工具

これまでの加工実験を踏まえて、超硬工具による切削加工の鏡面創成は困難であることが考えられる。そこで、本研究が目指している安価な鏡面創成ではないが、多結晶ダイヤモンド切削工具を用いてグラファイトを加工することで、切削加工によるグラファイトの鏡面創成が可能かどうか見極める。また、鏡面創成が困難な場合でもどの程度まで表面性状が改善されるかどうか調べる。多結晶ダイヤモンド切削工具を用いて切削速度、送り速度のパラメータを変更して加工を行うことで、グラファイトを加工するための最適加工条件を模索する。その結果、算術平均粗さは超硬工具の時に比べて改善され、最も小さかったのは切削速度 603.2m/min、送り速度 1mm/min であり、算術平均粗さが $0.45\mu\text{m}$ であった。

しかし、光沢度に関しては全て 60 より低くなり、最も算術平均粗さが低かった条件でも 48 と大変小さかった。その原因として、これまで使用した超硬工具にはさらい刃が付いており気孔に切りくずを埋めている部分があるが、ダイヤモンド工具はさらい刃が無いので気孔が全く小さくならずそのまま残ってしまうことが考えられる。そのため、グラファイトの鏡面に最も重要な点は気孔であると言える。

6 バニシング加工によるグラファイトの鏡面創成

6.1 加工条件の変更による影響

切削加工によってグラファイトの鏡面創成できなかった原因はグラファイトの材料上に発生する気孔が鏡面の妨げになっていることを確認した。そのため、気孔に粉を埋める加工方法が必要であると考え、バニシング加工に着目した。バニシング加工において重要だと考えられているパラメータはバニシ量、ピックフィード量、送り速度、加工圧である。これらのパラメータを変更して加工を行った。

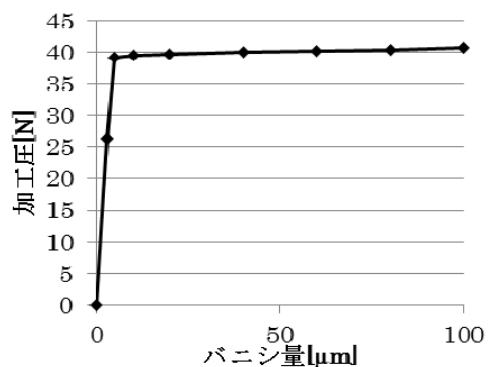
(1) バニシ量の変化による影響⁵⁾

バニシ量を大きくする事で材料表面にかかる加工圧が大きくなることによって表面性状を改善することができると考え、バニシング加工時のバニシ量を 3, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 μm に変更して実験を行った。実験を行う際には表3の加工条件を用いた。以降、表中の送り速度を F、ピックフィードを pf、バニシ量を t、加工面積を S、カスプ高さを h と表す。

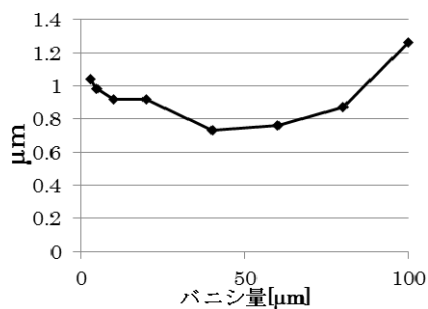
表3 バニシング加工条件

F [mm/min]	pf [mm]	t [μm]	S [mm^2]	h [μm]
700	0.3	3, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100	765	0.44

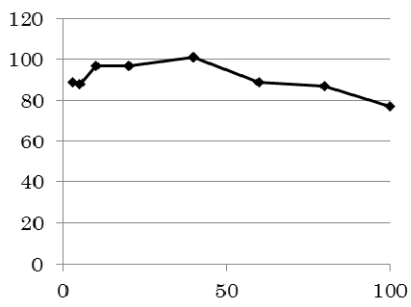
それぞれの表面性状および加工圧の測定結果とバニシ量による関係を表したグラフを図5に表した。



(a) 加工圧



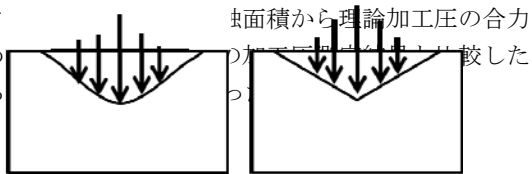
(b) 算術平均粗さ



(c) 光沢度

図5 バニシ量および表面性状の関係

図5 (a) より、バニシ量を与えるごとに加工圧は増加していることがわかる。しかし、バニシ量 100 μm における表面性状の値が最も良好にならず、バニシ量 40 μm の方が最も算術平均粗さおよび光沢度が良好な値となった。バニシング加工圧に関しては、鋼球および被削材が変形するため、図6の通り一様でなく算出することは難しい。しかし、鋼球が被削材にめり込む面積を三角形に近似す



(a) 近似前 (b) 近似後

図6 加工圧分布図

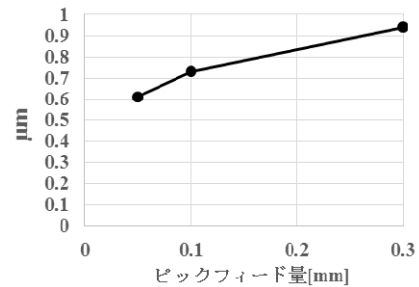
(2) ピックフィード量の変化による影響

ピックフィード量の変化による影響を調査するため、バニシング加工時におけるピックフィードのみを変更して実験を行った。実験には表4の加工条件を用いた。

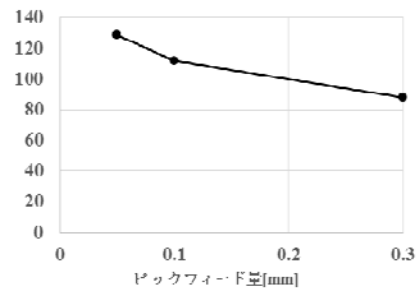
表4 ピックフィード変更したバニシング加工実験

F [mm/min]	pf [mm]	t [μm]	S [mm^2]	h [μm]
700	0.05, 0.1, 0.3	20	765	0.44

それぞれの表面性状の測定結果とピックフィード量による関係を表したグラフを図7に表した。



(a) 算術平均粗さ



(b) 光沢度

図7 各ピックフィード量における表面性状

図7より、pf0.05mm と小さくすることで pf0.1mm の時に比べてわずかに表面粗さが改善された。しかし、これ以上ピックフィードを小さくすることによる改善はあまり期待できない。4章より、グラファイト切削加工と同じ算術平均粗さ値であっても光沢度はバニシング加工の方が 20 程高く、バニシングの方が鏡面創成に適していることが分かる。

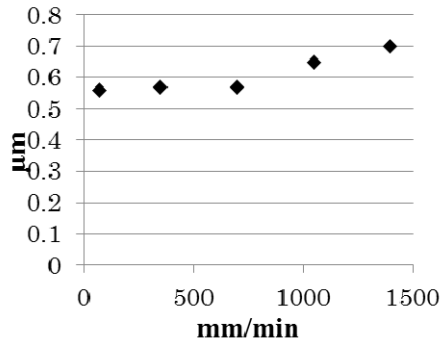
(3) 送り速度の変化による影響

5.1 (1) の結果からバニシング加工においても同様に送り速度を変更することで表面性状が改善されると考え、仕上げ加工における送り速度のみ変更して実験を行った。加工条件を表5に示す。

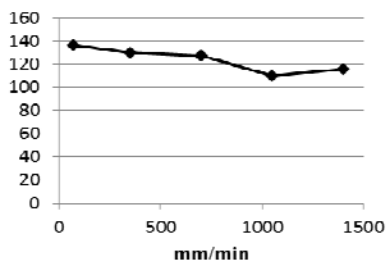
表5 送り速度を変更したバニシング加工実験

F [mm/min]	pf [mm]	t [μm]	S [mm^2]	h [μm]
70, 350, 700, 1050, 1400	0.1	20	765	0.44

表面性状測定結果は図8のようになった。



(a) 算術平均粗さ



(b) 光沢度

図8 送り速度と各パラメータの関係

図8より、F700をF1400に変更すると表面性状は悪化した。これは加工速度の増加により気孔が多く残った、もしくはXZ方向の分力が増加したことにより余計に削ってしまったと考えられる。(図9参照)F700に比べるとF70、F350は光沢度が大きくなっており表面性状の改善はみられるが、算術平均粗さおよび見た目は変わらなかった。よってFを700より小さくしても表面性状に影響は少ないことが分かった。そのため今後の実験では、送り速度はF700で行うことにする。

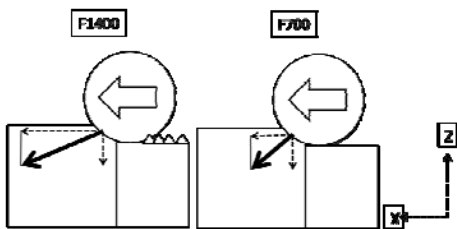
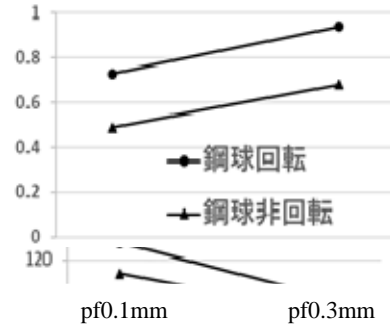


図9 送り速度の違いによる分力の様子

6.2 鋼球の回転の有無による影響

鋼球が回転する場合と回転しない場合で比較しどちらが鏡面創成に向いているか検証を行った。鋼球を回転させるために工具内部に板を入れることで改善した。ピックフィード以外は表4と同条件(ピックフィードは0.1, 0.3mmの2種類)で加工を行い実験結果は図10の通りとなった。



(b) 光沢度

図10 鋼球回転の影響

6.1(1)の考察ではバニシ量40μm以下の範囲では加工圧が高くなる程表面性状が良くなったことから、同様に表面性状が改善されることが分かった。グラフアイトにおいてもバニシング工具は回転した方がよいことが分かった。

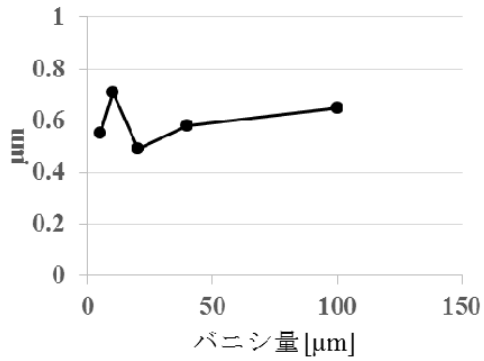
6.3 加工範囲変更による影響

これまでの実験では高いバニシ量において試験片の角がボロボロになっていた。そのため、バニシ量が大きい程表面性状が悪化したと考えられる。そこで、加工開始位置と加工軌跡を変更し、破片の発生を防ぐ。前回の加工範囲と表面性状の比較検証を行った。範囲変更後におけるRaの平均値は0.57μmであり範囲変更前の0.56μmと比較すると大きな変化は見られなかったが表面性状に範囲変更前における加工表面の擦ったような痕は範囲変更後になくなった。光沢度は範囲変更後で127と範囲変更前の121より大きくなり、今後の実験でも範囲を変更して行う方が好ましいことが分かった。

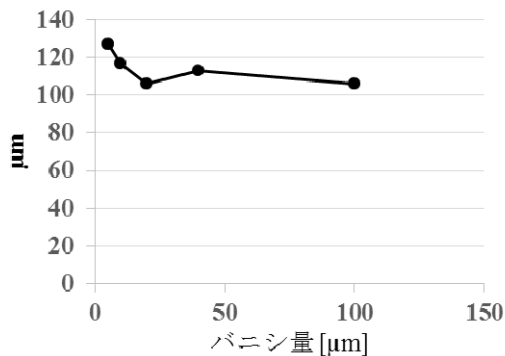
6.4 鋼球回転の有無における表面性状の変化

(1) バニシ量変更による影響

6.1の実験より回転工具のほうが鏡面創成に適していると考え、再度鋼球が回転する工具によるバニシ量変更実験を行った。加工条件は表3のpfを0.1mmに変更したものをを用いた。バニシ量毎の算術平均粗さおよび光沢度の測定結果を図11に示す。



(a) 算術平均粗さ



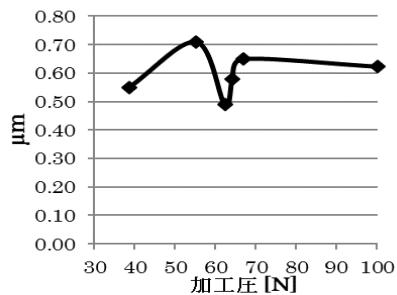
(b) 光沢度

図 11 鋼球回転時バニシ量変更実験

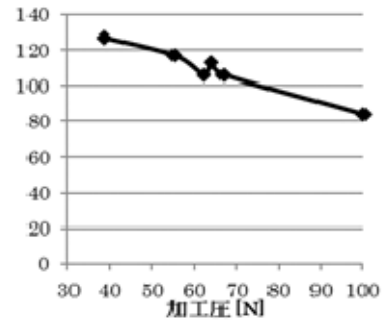
これまで小さいバニシ量の方が算術平均粗さは小さくなっていった理由としては加工時の被削材に接触する際、過度の加工圧によってグラファイトの破片が発生し破片と共に材料を転圧するため、小さいバニシ量程破片が小さくなり算術平均粗さの増加につながる事が分かった。

(2) 加工圧を変化させた場合による影響

6.4 (1) の実験より、顕著な加工圧の違いを見る必要性があることが分かった。工具の構造上これ以上加工圧を小さくすることは難しいと考えたため、加工圧を大きくし比較を行う。



(a) 算術平均粗さ



(b) 光沢度

図 12 加工圧増加実験

図 12 より、加工圧が小さい程光沢度が増加する結果になった。加工圧が下がるほど表面性状が改善された原因は、加工圧を下げることで鋼球の傷や試験片上の炭素の粉による加工面への傷つきが少なくなったからであると考えられる。初期段階の表面性状と比較すると、改善しているが鏡面を創成することはできていない。加工条件の変更による表面性状の改善に限界があると考えた。加工条件以外に表面性状に影響を与える要因を模索し変更することによって鏡面性状を改善した。

7 結言

本研究では様々な加工方法や加工条件にて実験することで以下の成果を得た。

- 1) 現有の設備において切削速度 301.6m/min, 切込量 10 μm で算術平均粗さ 0.03 μm , 光沢度 500 前後の S45C 鏡面創成を実現することができた。
- 2) グラファイトのバニシング加工は切削加工に比べて気孔を除去することができ、同じ算術平均粗さであるが光沢度が高いという結果が得られた。
- 3) 工具が回転している方がより良好な仕上げ面を得ることができた。

参考文献

- 1) 山田恵彦, カーボン材料応用技術, 日刊工業新聞社 (1992)
- 2) 東洋炭素株式会社, 機械用カーボン製品, 特性データ http://www.toyotanso.co.jp/Products/Mechanical_carbon/data.html
- 3) Nimeroff, Two-Parameter Gloss Methods, Journal of Research of the National Bureau of Standard, vol. 58, No. 3, March(1957)
- 4) 澤武一, 絵ときフライス加工 基礎のきそ, 日刊工業新聞社 (2007)
- 5) 神宮利夫, 球押し込みにおける接触面下内部応力分布の究明, 精密機械 vol. 40, No.10, (1974) pp.70-76