

技術論文

SiC セラミックスの大幅適用拡大のための 新 2 段反応焼結法の開発

New Development of Two-Step Reaction Sintering Method
Enabling Widely Expanded Applications for SiC Ceramics



技術開発センター
商品・生産技術開発室 係長
博士(工学) 肖 陽
Yang Xiao

技術開発センター
商品・生産技術開発室 課長
花田 喜嗣
Yoshitsugu Hanada

技術開発センター
商品・生産技術開発室 室長
博士(工学) 園田 晃大
Akio Sonoda

技術開発センター
副センター長
博士(工学) 姜 孝京
Hyo-Gyoung Kang

技術開発センター
センター長
博士(工学) 永吉 英昭
Hideaki Nagayoshi

要 旨

高温構造部材や高摩耗環境部材の耐久性の向上を目的として、耐摩耗性、耐熱衝撃性、耐腐食性に優れ、かつ軽量である炭化ケイ素 (SiC) セラミックスの適用拡大を可能にするため、新しい 2 段反応焼結法を開発した。その特長は、複数部品の一体化による複雑形状製造を可能にする接合技術と、SiC セラミックスへの高い導電性の付与による放電加工での寸法仕上げを可能とする精密加工技術である。この技術確立により従来の製造方法にある製作形状の制約が解消され、SiC セラミックスへの部材置換による大幅な適用拡大が実現でき、保全コストの削減などの様々な課題解決が期待される。本稿では、新しい製造工程の開発までの成果と、その試作品を用いた実装評価から得られた結果を報告する。

Synopsis:

Silicon Carbide (SiC) has the good characteristics such as low density, superior abrasion resistance, high thermal shock resistance and high corrosion resistance. Therefore, SiC ceramics are expected to be applied widely to increase the durability of various structural facilities, which are used in the severe environment of high temperature and high abrasion hereafter. In order to achieve the purpose, new type two-step reaction sintering method is developed in this study. Various SiC parts can be bonded by this new sintering method and these SiC ceramics products with high electrical conductivity can be precise machined by electric discharge machine (EDM). The developed method can solve the machining problems of products by conventional procedure method so that SiC ceramics applications can expand widely. And low preservation costs will be realized in the future.

1. 緒言

製鉄所の熱間圧延工程等の高温鋼材の搬送ローラーや圧延ロール、発電所や焼却施設等の粉末ダストを伴う排気ダクト（特に配管エルボ部）等には、高温構造用部材や高耐摩耗性部材が多用されている。しかし、現在使用されている金属およびセラミックス複合部材（高クロム鋳鉄系、ハイス系、超硬 WC-Co 系等）は、高温雰囲気では使用

状況によって軟化、腐食および熱歪みにより性能が著しく低下する場合があります、1ヶ月～半年毎に交換が必要となっている。このことにより事業者は多大な設備保全コストや設備休止が大きな課題となっているのが現状である。この課題を解決する方法の一つとして、現行の硬化肉盛溶接品からより耐用の優れたセラミックスへの転換による部材の長寿命化が望まれている。当社では、これまで

炭化ケイ素 (SiC) の性能に着目して製造方法の研究を行ってきた^{1,2)}。SiC は耐摩耗性、耐熱性に優れると共に、また耐食性、低熱膨張、高熱伝導などの特性を持つ。このように SiC は多くの特性を持つことから、厳しい使用環境下でも適応可能なセラミックス複合材料として新しい展開に期待され、各所で利用されている³⁾。

しかし、SiC に関わらずセラミックスの場合、金属との接合や形状加工が極めて困難であり、適用はプレス成形可能な形状に限定され、多様な要求形状に対応できていない。それでもセラミックスを適用する場合、一般的に加熱加圧の環境下で製造するため、焼結前後の体積収縮を考慮した成形用モールドを用意して、大量に生産をしなければならない。焼結後の製品寸法公差を満足するには、金型寸法を調整しつつ焼結後の寸法への合わせ込み作業が必要となる。微細な寸法調整は磨き加工が必要となる。そのため、少量品や大型部材の製造は高コストとなり、また表面の研削傷が発生しやすくなる。このように製造時の形状制約のために、適用がなされていない部材は潜在的に多くあると考えられる。

上記背景より当社では、2 段反応焼結法を応用し形状の自由度を高めた製造技術を開発した⁴⁾。その技術を用いて SiC セラミックスの適用拡大を図った。本稿では、方法確立までの研究結果と、その試作品での実機評価から得られた実績を報告する。

2. 研究内容と結果

2.1 新規の 2 段反応焼結法

Fig.1 に新しく開発した 2 段反応焼結法による SiC セラミックスの作製工程を示す。一般的に反応焼結法による SiC の作製は、C 粉末をベースに配合したプリフォームに Si 系合金を反応させて SiC 化を行う方法である。

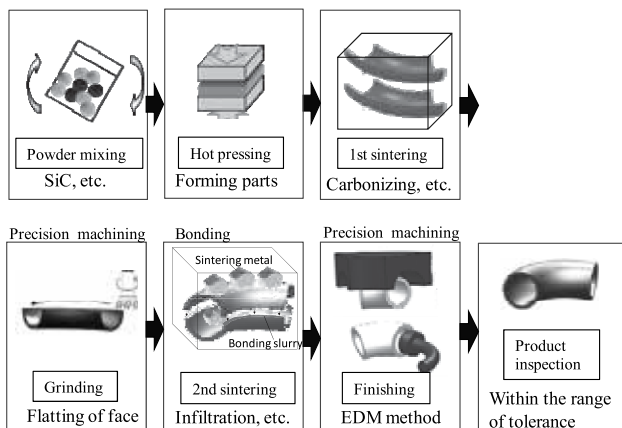


Fig.1 Process of new two-step reaction sintering method to product SiC ceramics

この工程の前段に炭素化および予備反応焼結を行うこと、原料に SiC を使うこと、含浸剤に Fe-Si 合金を使うことを特長として、必要に応じて部品の接合を同時に行い、最終寸法への仕上げは放電加工 (Electric Discharge Machining: EDM) による寸法調整が可能になった新しいプロセスを確立した。

工程順序として、原料粉末の混練、プレス成形、1 次焼結、1 次加工および接合準備、2 次焼結、仕上げ加工とする。1 次焼結はバインダーである樹脂の炭素化、2 次焼結は含浸金属中のケイ素 (Si) と 1 次焼結体内の炭素 (C) との SiC 反応が主目的である。

また、これまでの研究の結果、1 次から 2 次の焼結までの体積変化率は 0.06% 以下と最小化が可能であり、ほとんど歪が発生することがなくニアネットシェイプ焼結法になった。そのため、1 次焼結後に最終寸法に近い形状に加工することで、2 次焼結後の仕上げ加工の時間が削減され加工コストを低減することができる。このことは接合における部品間の歪を解消することとなり、形状の自由度を高めることが可能になった。

さらには、これは 1 次焼結体に対応した専用の加工チップの開発、2 次焼結体に対しては導電性を改善することで放電加工を可能にした。いずれもそれぞれの材質において加工条件の最適化を行うことで、高い精密加工の技術を確立することができた。以下にこれらの研究結果を報告する。

2.2 接合技術の確立

接合境界部の組織を部品本体と一体化するために接合補助剤を開発した。成分は焼結後に本体と同組織になるように調整し、Fig.2 のようにスラリー状にして接合部に塗布する。



Fig.2 Slurry of bonding agent

曲がったパイプ状の製品の場合、プレス成形ができない。このような形状では通常液状化材料を流し込むしか手段がなく、加圧成形ができないため気孔率が高い状態の製品とならざるを得ない。そこで接合法を適用することにより、プレス成形と同じような強度を得ることができる。Fig.3 に接合法の模式図とその接合境界部の顕微鏡観察写真を示す。パイプは半円ずつの部品としてあらかじめ作製しておき、2

次焼結時にパイプ状にする。ここで接合状態の基準として、マイクロ組織の調査において、気孔が確認される場合は接合されていないと判断する。ただし、非接合部の健全な場所においても、 $5\mu\text{m}$ 以下の気孔が存在することから、接合部での気孔サイズの目標を $5\mu\text{m}$ 以下とした。

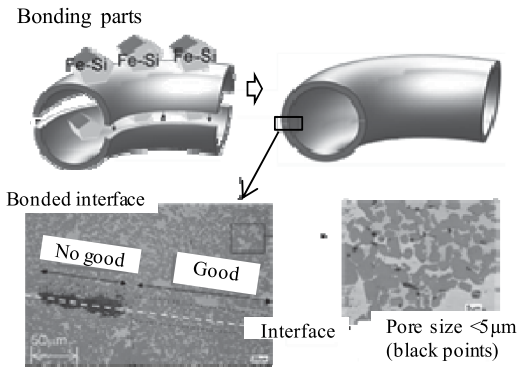


Fig.3 Schematic figure showing bonding process and microstructures of bonding

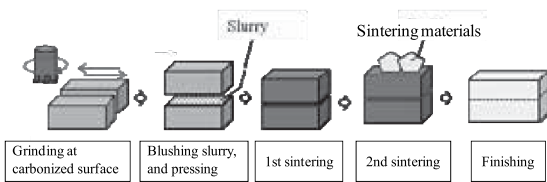


Fig.4 Illustration showing bonding process

小型サンプルの事例としての接合工程を Fig.4 に示す。1 次焼結を終えたサンプルの接合面を開発した SiC 製の加工用チップを用いて平面加工した。加工チップの研究結果は後述するが、加工面粗度は $Ra\ 2.2\text{mm}$ となった。この面に Fig.2 に示したスラリー状の接合補助剤を塗布し、隙間が生じないように圧着した。その後は再度 1 次焼結工程に戻し、2 次焼結を行い、本体の SiC 化と同時に接合部も SiC 化させた。

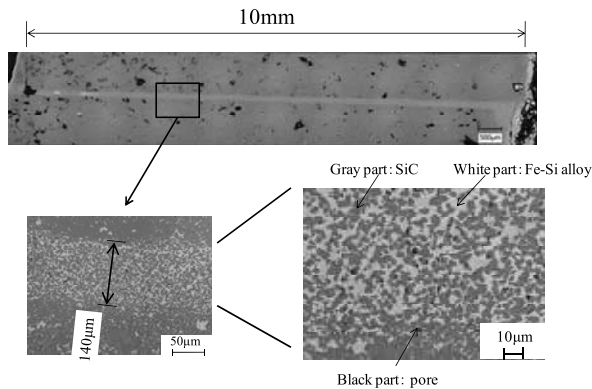


Fig.5 Micrographics showing cross-sectional microstructures of bonding interface

Fig.5 に接合部の断面組織を示す。試験片の幅 10mm に対して、筋状に見える部分が接合部であ

る。全体的に境目がなく良い状態で接合できていることが確認できた。補助剤塗布部と本体との焼結時の体積変化の違いで含浸不良や亀裂分断が懸念されたが、欠陥はほとんど見られなかった。結果として気孔サイズは $1\sim 3\mu\text{m}$ となり、目標としていた品質レベルが達成できた。ただし、接合部境界の厚みは $140\mu\text{m}$ 程度であることが確認された。これはスラリーの塗布量に影響されることがわかっている。また、接合面付近の本体の組織と比べて灰色の SiC 粒が占める割合が小さくなった。今後、塗布時条件や補助剤の成分調整により SiC 成長の制御が必要である。

2.3 精密加工技術の確立

SiC セラミックスは高硬度であるため、金属加工のような切削加工は難しく、ダイヤモンド砥石を用いた研削加工による方法しか対応できなかった。研削加工は表面に傷が残りやすく、表面に存在する傷が微小予備亀裂の作用を招き、割れの原因となる場合がある。そこで、本研究では、SiC セラミックスに対して放電加工による精密仕上げ加工ができるように検討を行った。目標値として加工精度を $10\mu\text{m}$ 以下とした。

Fig.6 に形彫放電加工機を示す。放電加工はアーク放電によって瞬時にワークを溶かして表面の一部を取り去る加工方法である⁵⁾。1 秒間に数 10 万回の放電を発生させ、それによって生じる多数の放電痕の累積によって加工が行われる。ごく表面を薄く取り去るため所定の形状になるまでの加工時間は長くなるが、一般切削のように高い負荷を掛けて削る方法とは異なり、ワークへの損傷が少なく導電性の材料であれば、硬度によらず均一な加工が可能である。SiC は半導体としても利用されるように、金属ほどではないが導電性はある。今回は含浸金属に Fe 成分を加えることで導電性を改善し、放電加工性を向上させることに成功した。これにより精密な仕上げ加工が可能になった。

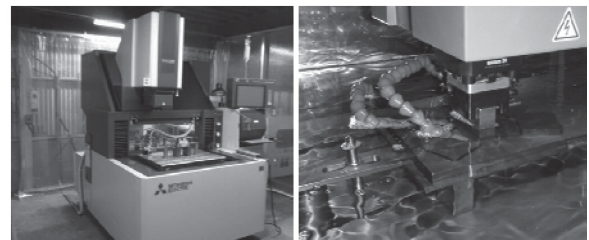


Fig.6 3-axis CNC electric discharge machining center

放電加工には電極が必要である。形彫加工は電極の形状がワークに転写されるため、電極製品の反転した形状となる。微細な放電加工を行うには電極も精密加工を施しておく必要がある。つまり粗い加工

面であれば、製品面も粗くなってしまう。電極の材質には一般的にグラファイト (Gr) や銅 (Cu)、銅タングステン (CuW) などを用いられている。電極の加工には Fig.7 に示す高精度 3 次元加工機を用いる。放電加工はアークの放電によりワークだけでなく電極も消耗を伴うため、加工中に電極の寸法が変化する。そのためワークを高い精度で仕上げるには、多くの電極を利用し加工寸法を調整する必要である。さらに今回作製した SiC は独自で開発した材質であるため他の研究実績はなく、最初に電極の材質とワークである SiC の相性を十分に把握しなければならない。そこで、放電加工条件と電極の消耗量やワークの表面粗度、加工時間の条件設定の最適化を行った。



Fig.7 3-axis CNC high-precision machining center

まず、Cu の電極を用いて、形彫放電加工テストを行った。その結果を Fig.8 に示す。電極サイズは 10×20mm とした。印加電流が高いと焼け爛れたような肌になった。徐々に電流値を小さくするにつれて肌は良くなったが点状の異常放電が発生しやすく数点の凹みが生じた。これはアーク放電が集中する際に起こる。電流値が高いと表面上突起している場所や局所的に導電性が高い場所に集中して電流が流れるため、高温になり点状に焦げる。この原因は、SiC の組織に起因することが多く、局所的な気孔の集まりや組織成分の偏りによって生じやすい。それでも条件を調整することで Ra 0.5μm、Ry 9μm の粗度まで抑えることが確認でき、目標としていた加工精度 10μm 以下を達成することができた。

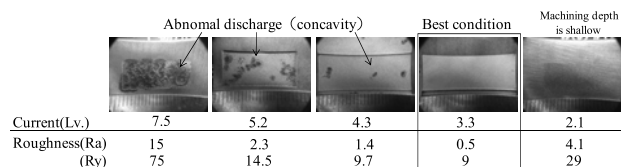


Fig.8 Optimums conditions of electric discharge machining to decrease surface roughness

放電加工では一般的に作業時間短縮のため荒加工と仕上げ加工に分けて行い、それぞれ別の電極材質を使用する。荒加工用としての電極材質は Gr が広く用いられている。Gr は快削性や剛性に優れ、安価である。特に、加工量が多い場合は、電流を大きくす

ることで加工速度を高めることができ、電極の材料コストを抑え加工時間を短縮することができる。その反面、加工面の粗度は大きくなる。また仕上げ加工の電極材質は Cu が主流であり、特に電極の消耗を抑える必要がある場合は Cu-W や Cu-Te などの Cu 合金がワークに合わせて使用されている。

まず、荒加工のための電極材質について検討を行った。材質として Gr と銅グラファイト (Cu-Gr) を選んだ。Gr は粒径が 2~3μm、4~7μm、7μm 以上の 3 種類を用意し、それぞれ Gr(A), Gr(B), Gr(C) とした。Cu-Gr は粒径が 4~7μm を用いた。Cu-Gr は Gr や Cu よりも比較的新しい電極素材であり、Cu と Gr の良い特徴を併せ持つ材料として、近年注目されている。

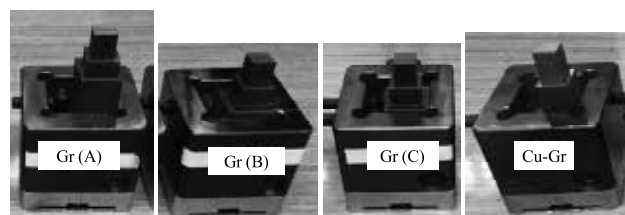


Fig.9 Electrodes of electric discharge machining for roughing work

Fig.9 に調査に使用した電極の形状を示す。凸部が電極でありその端面を放電面とした。先端部は 10×10mm とし、ワーク面を凹状に加工する。放電加工条件は Table 1 に示した。Z 方向は鉛直方向として、ワーク端面から 3.0mm の深さの形彫放電加工を行った。

Table 1 Conditions for electric discharge machining test

Work		Peak current	Jump		
Direction	Depth		Distance	Interval	Speed
Z-axis	3.0mm	17A	6.0mm	0.5s	1.5m/min

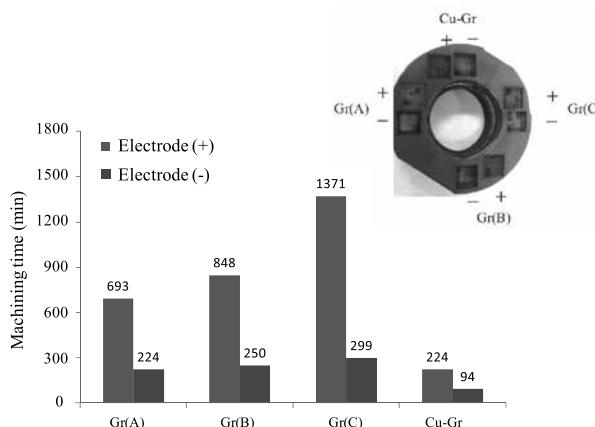


Fig.10 Effect of electrode material on machining time of electric discharge machining

各電極において 3.0mm の深さになるまでの加工所要時間を Fig.10 に示す。Gr の電極では粒径が小さくなるほど加工時間は短くなった。さらに、Cu-Gr では

Gr(A)に対して、1/2 倍以下に減少した。電極が負極 (-) において、加工時間が短縮する傾向であった。電極とワーク間においては、放電中は電圧が掛かっており、通常は電極側に正極 (+) が設定されてある。電極やワークの材質の相性やワークを機械軸に取り付ける場合など、状況に応じて電極の正負を使い分けることで、加工時間の削減につながる場合がある。今回は、電極側を負極 (-) に設定することで、大幅な時間短縮ができることがわかった。

放電加工の所要時間は放電によるワークの溶損状態によって変化する。これは、電極やワークの材質や形状、電極の消耗量、ワークの面粗度などによって、放電の状態が微小な変化を伴う。加工中の変化は累積され、結果として大きな変化となる場合がある。そのため、全体的な所要時間は、実際に加工を実施しないと正確に把握できないのが現状である。したがって、最終の加工寸法は設定が可能であるが、途中の加工量は制御できないことが通常である。さらに放電による単位時間あたりの加工量は切削加工に比べてかなり少ないため、放電加工の所要時間の削減は大きな課題となっている。

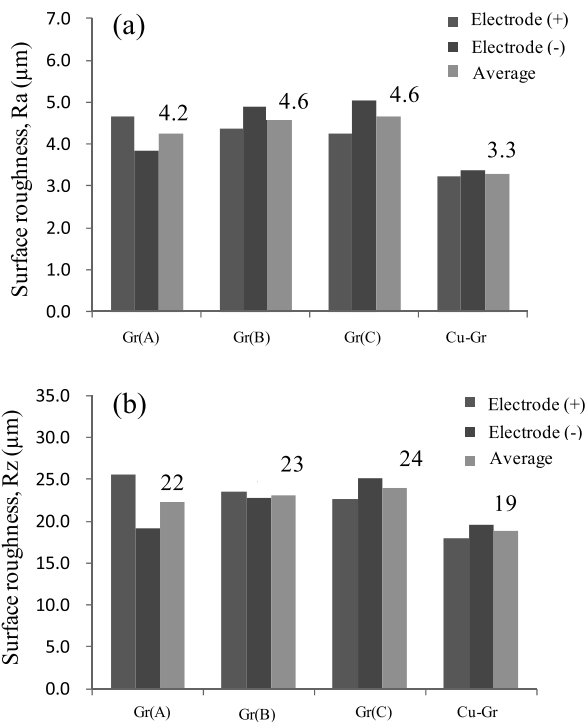


Fig.11 Effect of electrode material on surface roughness for EDM; (a) Ra, (b) Rz

次に、加工後の表面粗度評価として算術平均粗さ (Ra)、十点平均粗さ (Rz) の結果を Fig.11 に示す。いずれの結果においても Gr の粒度に対する粗度への影響は小さく、Cu-Gr が最も小さい結果が得られた。電極の極性については Ra と Rz とともに差は見られなかった。荒加工では表面粗度を Ra 3.3μm まで小さくできることが確認できた。

加工面のプロファイルを示す Fig.12 に示す。いずれの電極においても、大きく凹凸のある所は見られず、全体的に平坦な形状を示していた。ただし細かく見れば、粗度値のとおり Cu-Gr が最も凹凸が小さいことがわかる。これらの結果により、Gr よりも Cu-Gr の方が優れた性能を現したことから、荒加工の材質は Cu-Gr を選定した。

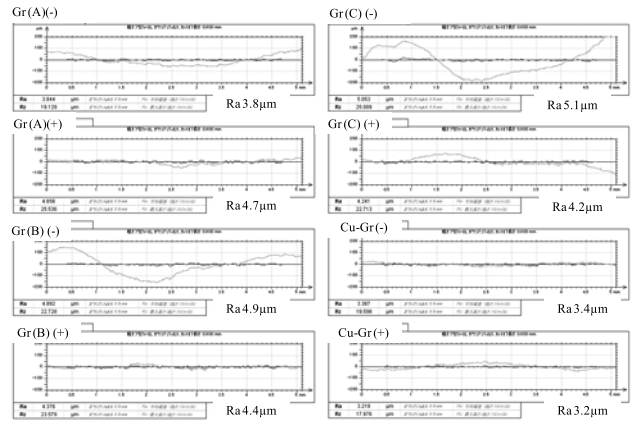


Fig.12 Graph showing surface roughness after EDM with different electrode materials

3. 研究の成果

2 節に示したように新しい接合および加工技術が確立できた。これらの技術を駆使することによって、今まで適用できなかった製品を製作することが可能になってきた。その中で、今回は加工用チップ、ガイドローラー、エルボーパイプの例を中心に紹介する。事例を踏まえて、製作検証を行うことで今後の実用化が期待できる。

3.1 SiC 製加工用チップの製作

Fig.13 に開発した SiC 製加工用チップの外観写真を示す。今回新しく開発した 2 段応焼結法では、1 次焼結後に研削加工による形状の変更が可能である。

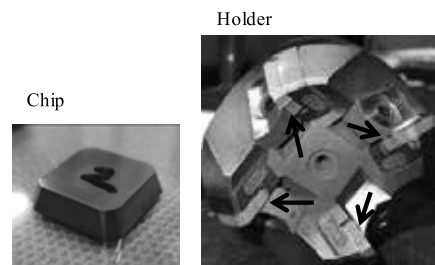


Fig.13 Developed SiC ceramics chips for machining

しかし、従来の超硬製加工用チップを用いた場合は、1 次焼結体に対する損耗が激しく、数 μm オーダーの面粗度への加工は、技術的に困難となっていた。しかも一度の加工で本来の研削能力が大きく低下するため、目標の粗度に仕上げるには多くのチップが必要となり、コストが掛かる状況であった。こ

の原因は、被加工物である 1 次焼結体の中には超硬よりも硬い SiC 粒子が多く混在しているため、刃である超硬の方が摩耗したと言える。

そこで、新しいタイプの SiC 製チップの製作を検討した。まず素材として SiC セラミックスは新 2 段反応焼結法で製造した 50×50×2mm の板材を用いた。SiC 製チップの形状は超硬製と同様にし、概略外寸 10×10×2mm とした。そのチップの形状通りにワイヤー放電加工機によりワイヤーカット法で 4 枚切り抜いた。Fig.13 に示すように、フライス加工用ホルダーに 4 枚のチップを取り付けた。

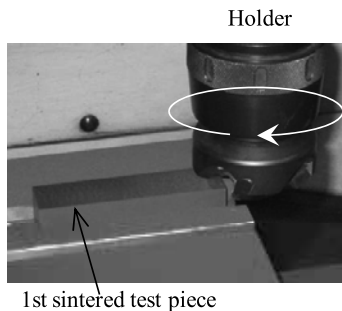


Fig.14 Grinding test of 1st sintered piece using SiC chip

Fig.14 に示すように、30×30×100mm の 1 次焼結後のブロックをバイスに固定した状態で加工テストを行った。加工条件として、主軸回転数 500min⁻¹、送り速度 200mm/min、切込み 0.3mm、距離 3000mm とした。加工テスト後は粗度計を用いて表面の粗度とその形状を確認した。

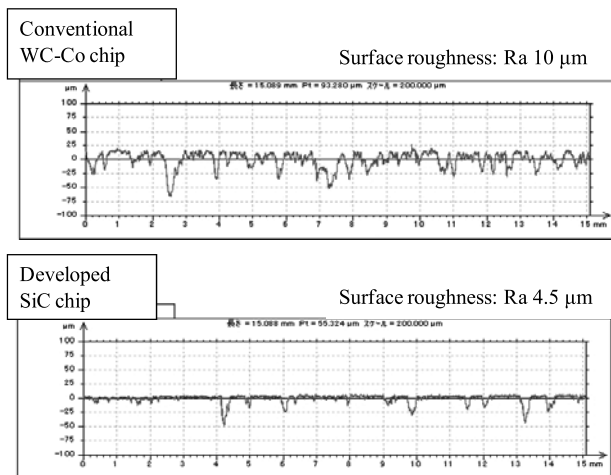


Fig.15 Machined surface profile using WC-Co and SiC chip

相対評価のため、今回新しく開発した SiC 製と超硬製の 2 種類で比較テストを行った。加工後の表面形状のプロファイルを図 15 に示す。プロファイルを見てわかるように、SiC 製の方は超硬製チップの時よりも形状に凹凸が少なく全体的に平滑な面となった。超硬製の平均粗度 Ra は 10μm に対して、SiC 製

チップは Ra が 4.5μm となり、1/2 倍以下に減少させることができた。

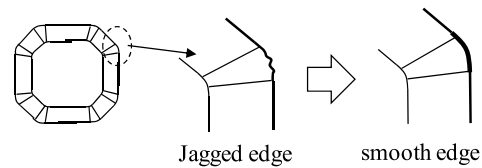


Fig.16 Schematic image showing improvement of chip edge

ただし、SiC 製チップで加工した表面のプロファイルをよく見ると、いくつか深い溝ができていたのがわかった。Fig.16 にチップのエッジにおけるイメージ図を示す。SiC 板から作製するチップはワイヤー放電カットによって切り出しているが、その後の仕上げを行わないまま、加工テストに使用していた。そのため、エッジ部の先端はワイヤーが通った際に生じた凹凸の多い状態であった。その結果、ワークに接触する箇所が局所的であり、4 枚あるチップにおいてそれぞれのエッジの接触角や接触長さが一致しないため、加工中の乱れが生じたと考えられる。ワイヤーカットはワイヤーを電極として、放電による加工である。ワイヤーには引張が掛かっているが、微視的に見るとワイヤーの振れが発生し、粗度が高くなりやすい。解決手段としては、なるべく小径のワイヤーを使うことやカット角を大きくすることで、ある程度は改善できるが、加工原理上カット後の凹凸を完全に解消することは不可能である。

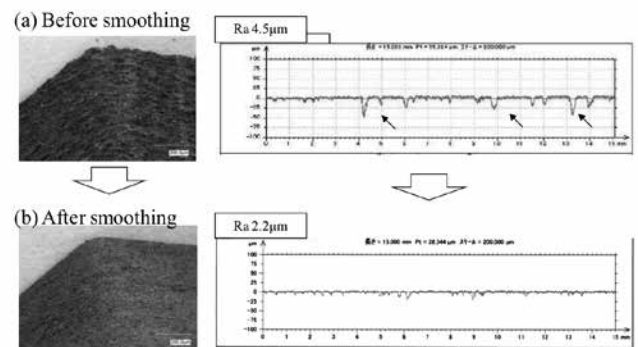


Fig.17 Machined surface roughness using developed SiC chip

エッジ部の弧が滑らかな曲線であるほど、チップとワークの接触状態が一定になることは明白である。そこで、Fig.16 のように滑らかなエッジを得るために、ワイヤーカット後に仕上げ加工として形彫放電加工を行った結果、エッジ部の凹凸を抑えることができた。Fig.17 にエッジ部を平滑に改善したチップとそのチップによる加工後の表面プロファイルを示す。

ワイヤーカット後の Fig.17(a)の状態から、形彫放電加工による仕上げ加工後の Fig.17(b)の状態を比較すると、凹凸のあったエッジ部は非常に滑らかな状態となった。その結果、加工後の表面プロファイル

見ると、深い溝の部分はほとんど見られなくなった。最終的に、改善前の加工面粗度 Ra 4.5 μ m に比べて改善後の面粗度は Ra 2.2 μ m となり、1/2 倍以下に低減する効果が確認でき、当初の目標を達成できた。

3.2 SiC 製ガイドローラーの製作

Fig.18 に示すガイドローラーは、圧延棒鋼材が圧延スタンドに入る際に、所定のロール溝に挿入させるために圧延材を正しい位置に導くガイドの役目として用いられる。ローラーの形状は圧延スタンド、つまり通過する圧延材のサイズにより変わる。今回、試作品として製作したガイドローラーは約 ϕ 60 の大きさで、圧延材との接触面はフラット形状である。加工精度として 1/1000mm レベルの要求公差のある製品であったが、精密加工技術を用いてその公差をクリアし、実機における使用試験が実現できた。

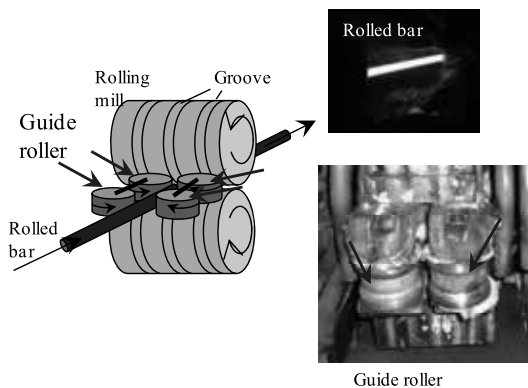


Fig.18 Operating condition of guide roller

Fig.19 に実証試験のために製作した試作品の使用状況を示す。ガイドローラーの設置方法は横並びに2個取り付けられ、これらが対になるよう設置される。圧延材はこれらローラーの間を通過して圧延スタンドへ送り込まれる。

異形棒鋼の製造ラインで SiC 製のガイドローラーの評価を行った結果、当初の目標である圧延材の通過量 10,000ton の連続使用が達成できた。総通過量が 10,160ton となった時点で、一旦設備から取り外し、外観の調査を行った。当初、超硬製と比べて耐衝撃性で懸念があったが、今回は破損することなく使用ができた。ガイドローラーの使用環境では他の圧延設備に比べて圧延材からの衝突は比較的小さいと想定されているが、それでも圧延材が突入する際の衝撃は大きい。その中で SiC 製ローラーが、役割を全うできたことは大きな前進である。SiC は Fig.20 に実証試験後のローラー外観を示す。き裂や大きな欠けは存在していなかった。小さなクレータ状の窪みが見られる箇所とまったく摩耗していない箇所が存在していた。ローラー使用面の平均摩耗量が 40 μ m であった。引き続き、実証試験を行い、

再現性の確認や通過量を増やすことで従来材との優位性を明らかにする予定である。

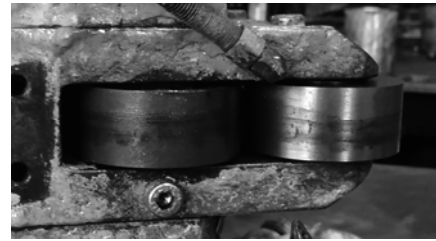


Fig.19 Photo showing on-line estimation situation in rolling mill for steel bar



Fig.20 Photo showing roller surface appearance after rolling of 10,160ton

このガイドローラーは使用場所によって、工具鋼材 (SK, SKD) や超硬材 (WC-Co) を使用しているメーカーが多い。特に、超硬材は摩耗量が小さく長寿命材として、初期投資が大きく掛かるものの、幅広くさまざまな部材に使用されている。ただし、耐酸化性や耐熱性の面で課題があり、常に水冷が必要で定期的に微細なクラックの除去が欠かせない。当社が提案している SiC は耐酸化性や耐熱性は超硬よりも優れているが、セラミックス特有の低靱性材料である。つまり物理的な衝撃には超硬よりも劣る。今回、実証試験を行っているガイドローラーに必要な仕様を明確にしなければならない。ガイドローラーには約 1000 $^{\circ}$ C の圧延材が接触する。水冷がなされているとはいえ、数十 m の圧延材が通過し接触するので、ローラーへ熱が伝わる。このため、ローラーは圧延材による加熱と水による冷却が繰り返し行われ、ローラーが受ける熱の衝撃は大きいと考えられる。また、圧延材が接触する角度は設備上ローラー外周の接線方向となっているが、まれに圧延材の先端が曲がった状態が通過し、角度がかなり大きな衝撃が掛かる場合がある。しかし、このように使用される環境はある程度想定されるが、設備の構造上、実際の稼働状態は目視では確認できないため、詳細は把握できない。

ここで、開発した SiC 材と現行の一般ローラー材である超硬材の物性値の比較結果を Table 2 に示す。超硬材の曲げ強度は 1.7GPa であり、SiC の曲げ強度である 0.29GPa の約 6 倍である。耐衝撃性の一つの指標としてみれば、SiC 材に比べて超硬材は非常に優れている。

一方で耐熱衝撃性に対する評価を行うと、温度差使用温度 727K、熱伝達係数 5,000W/m²・K と仮定して、今回のガイドローラーサイズに発生する熱応力は、超

硬材は 494MPa で、SiC 材では 69MPa と算出された。したがって、発生応力は SiC の方が約 1/7 倍に低くなるため、高い熱衝撃が生じる環境下では超硬材よりも SiC 材の方が有利であると考えられる。

Table 2 Comparison of physical properties for WC-Co and SiC

	WC-Co	SiC
Bending strength (GPa)	1.7	0.3
Density (g/cm ³)	15.7	3.1
Hardness (HV)	1,000	2,850
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ /K)	5.4	4.5
Thermal conductivity (W/m·K)	70	294

また、SiC の比重は超硬の 1/4 倍以下であり、ベアリングへの負荷が軽減されるため、使用寿命は約 68 倍に延ばすことができると算出できた⁹⁾。さらに高比重の超硬材は、圧延材の通過の際に追従しにくく回転が安定するまで時間が掛かるため、ローラーの表面の亀裂が圧延材に引っ掻き傷を与えやすい。一方、低比重の SiC は圧延材の動きに追従しやすく、そのため傷も入りやすく、グリスアップ量も減らせる利点があると言える。SiC セラミックスの適用により、設備の改善が図られる部材は製鉄所内に多くあると考えられる。

3.3 SiC 製エルボーパイプの製作

プラント設備の処理物や使用箇所によって環境は様々であり、ダクトの内部では気体、液体、固体、またはそれらの混合体、さらには高温状態で腐食性ガスが内部を通っている。使用されているダクト材料は鉄基材、FRP 材、セラミックス材などがある。特に、耐摩耗性を必要とする箇所ではセラミックス材が使用され、主にアルミナ材料が用いられている。また耐腐食性が必要とされる場合は FRP 材が用いられている。

開発中の SiC 製パイプは既存材であるアルミナ製パイプより、1.8 倍の耐摩耗性を持つことを確認している²⁾。エルボーパイプは焼却場や化学プラントなど配管の向きを変えるために用いられる部品である。SiC 製との置き換えで耐久性の向上を目指している。また、FRP 材の耐食性は優れているが耐摩耗性が低いため、腐食と摩耗を伴う環境においては、さらなる耐久性の向上のために SiC 材の適用が期待される。

Fig.21 にエルボーパイプの製作手順を示す。最終仕上げはまた途中であるが、プレス成形では難しい形状でも分割部品化と接合技術確立により課題を解決できた。ガイドローラーの場合と同様に製作条件の確立することができた。早々に試作品を完成させ、実証評価を行う予定である。これまで形状の制約で適用が困難であった箇所においても、本研究の成果を応用することで、新しいニーズに対応できると考えられる。

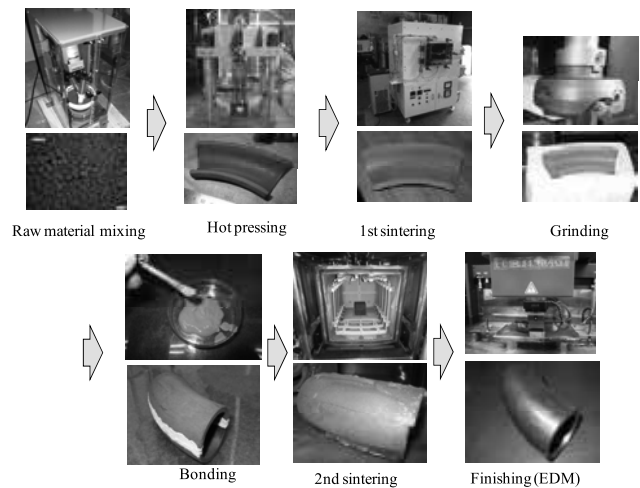


Fig.21 Production procedure of SiC elbow pipe

4. 結論

これまでに得られた研究結果を要約すると、次の通りである。

- 1) 接合面の粗度、補助剤の組成、2次焼結の事前処理の最適化を行うことで、気孔サイズを 5μm 以下に抑えることができた。これにより全面の接合が可能になった。
- 2) 電極の材質と形状等の選定及び放電加工条件により、製品形状における寸法精度を 10μm 以下に達成した。また、電極に銅グラファイトを採用することで、グラファイトに比べて 1/2 以下の加工時間の短縮が確認できた。
- 3) 確立した新しい 2 段反応焼結法により、炭化ケイ素製の加工用チップおよびガイドローラーを製作することができた。ガイドローラーにおいては実証評価への投入が実現し、その結果、圧延材通過量 10,000 ton 以上を達成した。今後も継続して通過量を増やす予定である。

参考文献

- 1) 花田 喜嗣, 吉永 宏, 藤田 和憲: フジコー技報, 17 (2009), 43-48
- 2) 肖 陽, 花田 喜嗣, 永吉 英昭: フジコー技報, 21 (2013), 26-32
- 3) 日本学術振興会 高温セラミックス材料第124委員会: SiC系セラミックスの新材料 (2001), 3-20
- 4) 特許6132586号: SiC成形体の製造方法
- 5) 三菱電機(株): 図解 放電加工のしくみと100%活用方法 (1979), 14-18
- 6) JIS B1518:2013: 転がり軸受-動定格荷重及び定格寿命