平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「単結晶 SiC による高融点ガラスレンズ成形金型の開発」

研究開発成果等報告書

平成 22 年 3 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 株式会社秋田製作所

目 次		1
第1章 研究	開発の概要	2
1 - 1	研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1 - 2	研究体制	3
1 - 3	技術目標値の達成状況と成果概要	4
1 - 4	当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 金型(こ適した単結晶SiCの開発	6
2 - 1	材料特性評価	6
2 - 1 - 1	ビッカース硬さ(常温)	6
2 - 1 - 2	ビッカース硬さ(高温)	6
2 - 1 - 3	熱膨張係数	8
2 - 1 - 4	熱伝導率	9
2 - 2	顕微鏡観察1	10
2 - 3	KOHエッチング評価1	13
第3章 単結	晶SiCとその他素材との接合1	18
3 - 1	拡散接合1	18
3 - 2	接合断面観察	20
3 - 2	接合面強度検証	25
第4章 直接	加熱による昇降温	28
4 - 1	プレス機の構成及び設計指針、性能 2	28
4 - 2	S i C 金型の昇降温性能 3	32
4 - 3	S i C素材へのメッキについて 3	35
第5章 加工	技術の開発	37
5 - 1	研磨機の構成及び設計指針、性能 3	37
5 - 2	研磨評価	40
5 - 3	S i C素材の加工性検証	43
第6章 全体網	総括(研究の今後の課題及び展開)	46

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(背景)

今日、デジタルカメラ及び携帯電話など爆発的な普及に伴い、携帯電話のカメラ では高画素化が進み、光学ズーム対応や 500 万画素以上の製品がさらに増加し、カ メラ機能や光学機能の搭載、高機能化がトレンドとなっており、更なる高性能化、 小型化が求められている。

ガラスレンズ成形における従来の金型には、一般的に超硬金属が使用されている が、主に高温での耐酸化性や強度の要求される場面では超硬金属製の金型では非常 に困難な部分がある。そこで高温硬度や、耐酸化性に優れる新素材である単結晶 SiC を利用した金型の製作を試みる。

デバイスの世界では単結晶 SiC を使用する場面が増加しつつあるが、単結晶 SiC を金型として使用するという新たな用途を開拓することで、素材の持つ可能性を広 げていきたい。

(目的)

レンズメーカーのガラスレンズ成形において金型の長寿命化、省エネルギー化、 850℃を超える加熱成形方法のニーズは非常に高い。そこで、本研究では新素材で ある単結晶 SiC と低コストである焼結体 SiC との拡散接合により金型の長寿命化・ 高剛性化・高精度化・高効率化・低コスト化をはかる。また、レンズのハイサイク ル成形を可能にし、より高精度・高剛性なものにすることにより、従来金型の寿命 である平均 5000 ショットから、10000 ショット以上可能な金型を開発し、装置及び 成形加工条件などトータルで低コスト化が見込まれる金型を開発する。また、単結 晶 SiC の熱伝導率特性を活かし、直接加熱方式を開発し省エネルギー化をはかると 共に、現状の金型ではできない 850℃を超える加熱成形を可能にし、業界のニーズ に応える。

(技術目標値)

- 金型に適した単結晶 SiC の開発

 a 軸に沿った結晶成長を検討し、KOH エッチングによる評価で、貫通欠陥 0
 の単結晶 SiC を目標にする。
- 単結晶 SiC とその他素材との接合
 単結晶 SiC と焼結体 SiC との拡散接合技術を開発し、その接合面強度は、超
 硬合金並の圧縮強度(4GPa)、引張強度(800MPa)を目指す。

- 直接加熱による昇降温
 850℃を直接通電加熱で得られる事を目標とし、昇温性能としては常温~
 850℃を10秒の目標とする。
- 加工技術の開発 研磨によって得られる球面部の粗さは Ra で 3~10nm を目指す。

1-2 研究体制

- (1) 研究組織及び管理体制
- 研究組織(全体)

 <u>二</u>
 株式会社 秋田製作所
 総括研究代表者(PL)
 所属・役職・氏名 土田卓矢
 외総括研究代表者(SL)
 所属・役職・氏名 北川敏生

 2)管理体制
 ①事業管理者
 [株式会社秋田製作所]



1-3 技術目標値の達成状況と成果概要

①金型に適した単結晶 SiC の開発

c 軸成長の単結晶 SiC 及び a 軸成長の単結晶 SiC を KOH エッチングによりマイクロパイ プ、結晶性の評価を行った。その結果、マイクロパイプは c 軸成長品には存在し、 a 軸 成長品には存在しなかった。この結果より貫通欠陥 0 の単結晶 SiC という目標は達成す ることができた。しかし。 a 軸成長品には積層欠陥と推測される欠陥が存在した。この 欠陥は表面にも存在しており金型用途として考えた場合問題になる可能性があると推測 される。また、焼結体 SiC、 c 軸成長の単結晶 SiC、 a 軸成長の単結晶 SiC の材料特性評 価を行った。その結果、常温硬さでは、 c 軸成長の単結晶 SiC> a 軸成長の単結晶 SiC> 焼結体 SiC となり、高温硬さでも同じような結果が得られた。従って成形部(光学有効 面) は焼結体 SiC で形成するよりも単結晶 SiC で形成することが望ましいといえる。ま た、結晶性やマイクロパイプ、材料特性などを考慮すると、 a 軸成長させた単結晶 SiC を c 面が成形面に露出するように加工して使用するのが最も好ましいと考えられる。

②単結晶 SiC とその他素材との接合

放電プラズマ焼結装置(SPS 装置)にて、炭化珪素の焼結体の形成及び、焼結体 SiC と単結晶 SiC の拡散接合を試みた。その結果、焼結体 SiC と単結晶 SiC の同 時焼結接合条件が得られ、これらの拡散接合体を得ることができた。その一方拡 散接合以外の接合方法による実施、評価ができず、これらの接合方法の比較検討 することができず、目標を達成することができなかった。また、接合面の強度評 価については曲げ試験を行った結果、曲げ強度 360Mpa、引張り強度 597Mpa、圧 縮強度 2397Mpa、という結果が得られたが、接合部分より焼結体 SiC 部が先に破 損した為、接合面強度はこの得られた数値以上であることは推測されるが、明確 な接合面強度を評価することはできなかった。

③直接加熱による昇降温

導電性を高める不純物が添加されている単結晶 SiC と焼結体 SiC とを接合し、所定の形 状に加工した金型の一部に無電解ニッケルメッキを施した金型にて昇温テストを実施し た。その結果、目標温度を 850℃と設定し、目標温度到達までの所要時間は約 30 秒であ った。このとき金型の電極部に供給した初期電流は約 20A (DC20V) であった。(成形部の 単結晶 SiC の直径寸法は 16mm、厚さは約 5mm)本研究では 850℃に直接通電加熱で昇温す る事ができ目標を達成することができたが、目標の昇温性能である常温~850℃を 10 秒 で昇温するという目標は達成することができなかった。しかし、さらに高い初期電圧を かける事で達成できると考えられる。また、導電性を高める不純物の添加量により単結 晶 SiC の抵抗値が決まるが、今回は窒素量と抵抗についての明確な関係を見出すことは できなかったが、今後不純物量と抵抗値との関係を明確にしていく必要がある。 ④加工技術の開発

金型の成形部に Ra=100nm の表面粗さで球面加工した金型にて研磨テストを実施 した。研磨面の評価方法としては研磨前と研磨後の表面観察を行い、目視での判 断をした後に表面効果があった場合に表面粗さを測定することとした。また、研 磨方法は下記に示す 2 通りで研磨テストを実施した。

①研削材にパッド(不織布)貼付+ダイヤモンドスラリー
 ②研削材(純鉄、銅)+ダイヤモンドスラリー

上記のいずれの方法の場合においても研磨前の表面状態より効果が認められな かった為、目標の球面部の粗さ(Ra=3~10nm)を達成することができなかった。 今後は研磨機の構造を見直すと共に、遊離砥粒や研削材の材質など幅広く再検討 が必要である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社秋田製作所 エンジニアリング部門 土田 卓矢 t.tsuchida@act-kyoto.com

〒601-8442 京都府京都市南区西九条御幸田町 30 番地 TEL:075-671-7451 FAX:075-671-7484

第2章 金型に適した単結晶SiCの開発

2-1 材料特性評価

2-1-1 ビッカース硬さ(常温)

(1) ビッカース硬さ試験(JIS R1610)

ビッカース硬さとはビッカース圧子を用い、試験面にくぼみをつけたときの試験荷重と、 くぼみの対角線長さから求めたくぼみの表面積から算出する。

ビッカース硬さの測定で、荷重を概ね 1kgf 以下で測定した際のビッカース硬さとその測定 方法を、微小硬さまたはマイクロビッカースと呼ぶが、ここではビッカース硬さに統一す る。単結晶 SiC の c 軸成長と a 軸成長、焼結体(2 ヶ)の測定を行い、それぞれの比較を行 う。

(2) 試験結果、各材料別ビッカース硬さ

	ビッカース硬さ	
	(Hv)	
炭化珪素(SiC)c 軸成長	3004	※測定値
炭化珪素(SiC)a 軸成長	2585	※測定値
炭化珪素(SiC)焼結体1	2079	※測定値
炭化珪素(SiC)焼結体 2	2153	※測定値
窒化珪素(Si ₃ N ₄)	1600	
アルミナ(A1 ₂ 0 ₃)	1350	
ジルコニア(ZrO ₂)	1300	
超硬合金(WC K10)	1650	

表 2-1-1-1 各材料のビッカース硬さ比較表

(3) 考察

ビッカース硬さ試験の結果、硬度の大小関係は c 軸成長の単結晶 SiC> a 軸成長の単結晶 SiC>焼結体 SiC となった。この結果より、成形部(光学有効面)は焼結体 SiC で形成する よりも単結晶 SiC で形成することが望ましいことが言える。

また c 軸成長の単結晶 SiC と a 軸成長の単結晶 SiC とで大きな差異が認められたが、サン プル数が少ない為断定することは難しいが、成長方法が硬さにも影響を及ぼすことが推測 される。

2-1-2 ビッカース硬さ(高温)

(1) 高温ビッカース硬さ試験(JIS R1623)

常温(20℃)から 200℃、400℃、600℃、800℃(使用試験機の最高使用温度)に不活性 ガス(Ar)雰囲気内で試験片を加熱し、各温度で 3 点のくぼみ(圧痕)を形成し、そのくぼ みの対角線長さを測定する。その数値から算出式によってビッカース硬さを算出する。 (2) 試験結果



図 2-1-2-1 ビッカース硬度比較

(3)考察

常温(20℃)でのビッカース硬さの値が、前項 2-1-1 ビッカース硬さ(常温)で測定した値よりも小さくなった。これは試験装置の精度、測定誤差が影響していると推測される。 図 2-1-2-1 は温度による硬さ推移を表した図である。この図からも確認出来るように、温度上昇と共に硬度が低下する現象が見受けられた。 a 軸成長、c 軸成長共に、800℃の範囲で約 1000(HV)低下している。図 2-1-2-1 よりc 軸成長は温度による硬度の変化が大きい(急勾配部分が多い)ように見受けられる。a 軸成長は 400℃付近まではさほど変化は無いがそこから急激に硬度が低下している。これは結晶成長方向による特性、測定誤差、個体差等が原因として推測されるが、今回のデータのみでは断定することはできない。さらに試行回数を増やし正確な傾向を把握する必要がある。

また、温度上昇と共にくぼみ(圧痕)の形状が崩れない(崩れにくい)という現象が見 受けられた。特に、a軸成長、c軸成長共に400℃以上でのくぼみ(圧痕)の形状はほとん ど崩れていない。常温付近ではくぼみ(圧痕)の隅が欠ける(剥がれる)現象が起り、測 定誤差の原因にもなっている。ただし、4 隅から広がる亀裂の入り方に温度毎の特徴、差は 確認出来なかった。

このような現象の原因を追究する為に引き続き調査が必要である。

2-1-3 熱(線)膨張係数

(1)分析による熱膨張の測定方法 (JIS R1618)

物質の温度を、調整されたプログラムに従って変化させながら、一定の微少荷重(力)下 での物質の寸法変化を温度又は時間の関数として測定する方法。

試験片を1000℃まで加熱し、100℃毎のデータを測定する。

(2) 試験結果



図 2-1-3-1 線膨張係数比較

(3) 考察

図 2-1-3-1 から a 軸成長、 c 軸成長は各温度において、ほぼ同等の数値となった。また 傾きや傾向もほぼ同じような挙動を示した。

一方、焼結体は各温度において単結晶よりも数値が大きい結果となった。また傾きや傾向は単結晶 SiC とほぼ同じような挙動を示した。

この結果より、単結晶と焼結体とで若干ではあるが熱(線)膨張係数に差があることが確認できた。この熱膨張の差が単結晶と焼結体の拡散接合面にどのような影響が表れるのか 注視する必要がある。

2-1-4 熱伝導率

(1) レーザーフラッシュ法による熱拡散率・比熱容量・熱伝導率試験方法(JIS R1611) 熱拡散率の測定法で最も広く普及している方法がレーザーフラッシュ法である。

この測定方は、金属やセラミックなどの熱伝導の良い物質の測定に適している。

レーザーフラッシュ法とは、均質な円板試料(試験片)の片面にパルスレーザーを均一 に照射して瞬間加熱させ、試験片裏面の温度履歴曲線を解析することにより、熱拡散率を 求める方法である。最高温度上昇 Δ Tm(試験片裏面のレーザ照射前の温度と照射後の最 高温度の差)の半分(Δ Tm/2)に達するのに要する時間(t_{1/2})と試験片の厚さから求 めることが出来る。この解析方法をハーフタイム法という。

熱拡散率に比熱と密度を掛けた値が熱伝導率である。

(2) 試験結果、各材料別熱伝導率

	熱伝導率(W/(K・m))			
炭化珪素(SiC)c 軸成長	307	※測定値		
炭化珪素(SiC)a 軸成長	302	※測定値		
炭化珪素(SiC)焼結体	120			
窒化珪素(Si ₃ N ₄)	17			
アルミナ(A1 ₂ 0 ₃)	17			
ジルコニア (ZrO_2)	3. 3			
超硬合金(WC K10)	0.19			

表 2-1-4-1 各材料別熱伝導率(常温)

(3) 考察

計測の結果、a軸成長、c軸成長共に極端な数値のばらつきも無く、a軸成長とc軸成 長共に同様な数値となった。

試験結果より熱伝導率は約300(W/(K・m))という結果が得られた。この値は他の代表的 なセラミックスと比べても飛躍的に大きい数値である。熱伝達が良いという性質が改め て実証され、昇温を必要とする金型に適した材質であるということを確認することがで きた。

ただし、今回は常温(25℃)のみの測定の為、今後高温下での熱伝導率を把握する必要 がある。

2-2 顕微鏡観察(単結晶 SiC[c 面]、単結晶 SiC[a 面]との比較)

(1) 観察試料

- 表面の比較を行うために、下記の金型試料で行った。
 - (1) c 面品、窒素なし
 - (2) c 面品、窒素ドープ品
 - (3) a 面品、窒素ドープ品

※【写真資料】は次頁以降

- (2) 調査・観察方法
 - ・顕微鏡による単結晶 SiC の表面観察(抜き取り、写真による定性評価)
 - ・顕微鏡(設定): 微分干渉モード、x50、x100
- (3)結果・考察
 - (1)と(2)の結果を比較して、窒素を入れることによる仕上表面(鏡面)への影響は無い。
 - ②(1)~(3)とも、鏡面の「加工粗さ」の差は現れていない。
 - ③上記を踏まえて、仕上表面の拡散接合への影響(バラつきなど)は、考慮しなくて も良いと考えられる。

顕微鏡観察の結果、研磨加工時の「面粗さ」について異方性(結晶方位による特徴)は 現れなかった為、c面で拡散接合の条件を構築し、同条件で a 面の接合に応用が可能と考 えられる。

しかし、a面品については同じ方向に走る「線状の欠陥」がある。これは元の結晶品質が悪いために、研磨時に現れてきたものである(加工条件は(1)~(3)同等)。この欠陥の特徴から「積層欠陥」と呼ばれる欠陥だと推測できる。

レンズ金型用途では結晶表面の凹凸に仕上の形状が影響される為、今後 a 面結晶の欠陥 (特に「積層欠陥」)を減らし、品質を良くしていく必要がある。





微分干渉モード ×100



微分干渉モード ×50

(1) c 面品(窒素なし)

【写真資料】



微分干渉モード ×100



(3) a 面品(窒素ドープ)微分干渉モード ×50



微分干渉モード ×100



(2) c面品(窒素ドープ)微分干渉モード ×50









2-3 KOHエッチング評価

KOH (水酸化カリウム) 融液を使用して、<u>マイクロパイプ (MP)</u>の評価を行う。SiC 結晶 にマイクロパイプが存在した場合、KOH 融液により表面をエッチングすることで、表面に六 角形の穴 (エッチピット)が現れる。一般的にこの方法により、マイクロパイプの有無を 評価している。

(1)実験・調査方法

「KOH(水酸化カリウム)融液」を用いて「エッチング」することにより検出する。 KOH は約 400℃程度で融解を始めるが、標準的なエッチング条件は 500~530℃である。 エッチング後、出現した六角形状の「エッチピット」を顕微鏡を用いて観察する。

(2) 実験装置

500℃以上の昇温能力を持つヒーター(マントルヒーター)を使用する。内部にはニッ ケル製(溶融 KOH による腐食の為)ビーカーを設置する。KOH(常温、固形)をニッケル 製ビーカー内部に入れ、ヒーターにより 500℃に温める。ニッケルで保護したK型熱電対 を使用し KOH 融液温度を直接計測し、制御装置によりフィードバック制御を行う。また、 エッチング中熱が逃げないようにフタをしておく。

試料のセッティングはピンセットを用いて行う。



(3) 試料及び観察条件

エッチングを行う単結晶 SiC は、あらかじめ鏡面研磨を施す[1]。 これはエッチング後に観察しやすくする為と、加工ダメージが評価結果に悪影響を及ぼ さないようにする為である。また、単結晶 SiC 試料がヒートショックにより破損するの を防ぐ為、ホットプレートを使用しプレヒートを行った。





図 2-3-2 エッチング前の表面顕微鏡写真

顕微鏡条件

- 200 倍
- ・微分干渉モード、透過モード 併用

試料

- a 面品
- c 面品

(4) 結果・考察

【溶融 KOH エッチング処理後 (a 面品)】



図 2-4-8 微分干渉モード(基板表面にピント)×50

観察した結果、写真では貫通欠陥を確認することはできないが φ18mm 範囲を注意深く観察 した結果、僅かに貫通欠陥が見受けられた。また、結晶の歪み成分と考えられるもの(色 ムラとなって現れている)が見受けられた。



図 2-4-9 微分干渉モード(基板表面にピント)×100

図 2-4-8 と同じエリアを微分干渉モードで撮影すると、結晶の歪みや(マイクロパイプ、 その他<u>貫通欠陥以外</u>の)欠陥が認められた。

a 面品は、貫通欠陥は存在しないが、結晶としての歪みや、その他の欠陥(積層欠陥と推 測される)が、相当数存在する。しかしそれらの欠陥は、エッチングした際の現れ方は違 うが、c 面品にも存在するものである。 【溶融 KOH エッチング処理後 (品質改善後の c 面品)】

品質改善後のエッチング評価を行った。



図 2-4-10 透過モード(基板表面にピント)

六角形状の欠陥が品質改善前と比較して格段に現象している事が確認できた。



図 2-4-11 透過モード(基板表面より奥にピント)

写真の範囲ではマイクロパイプが 4 個存在しているが、その他の範囲では全く存在しない エリアが大半を占める。 (5)課題

c 面品には、マイクロパイプが存在しているのが確認できた。また、理論通り a 面品に は存在しないことも確認ができた。

しかし、前項 【2-2 顕微鏡観察(単結晶 SiC[c 面]、単結晶 SiC[a 面]との比較)】に おいて、現在の a 面品には、積層欠陥と推測される凸(または凹)が表面に存在しており、 金型用途として考えた場合、問題になる可能性があると推測される。

今後の課題として以下の2点が挙げられる。

【a面品を採用する場合】: 表面に露出する欠陥(積層欠陥、歪み)の低減

【c面品を採用する場合】: マイクロパイプ(貫通欠陥)の低減(ゼロ化)

また、今後a軸成長させた単結晶 SiC をc面が形成面の露出するように加工して使用する方法も検討する必要がある。

【参考文献】

[1] 半導体 SiC 技術と応用 / 松波弘之 p.98、99

第3章 単結晶 SiC とその他素材との接合

3-1 拡散接合

共有結合性セラミックスである炭化珪素は難焼結性であるため、通常、焼結時に焼結助 剤が添加される。一般的に助剤としては、Al₂O₃(アルミナ)や Y₂O₃(酸化イットリウム)と いった酸化物が中心に用いられ、これらは焼結温度の低温度下、焼結時間の短縮に有効で あるとされている。そこで今回は放電プラズマ焼結装置、これらの助剤を用い、炭化珪素 の焼結を試みた。

また、拡散接合においても確実に界面での接合を実現させるために放電プラズマ焼結法 を適用する。放電プラズマ焼結法では、接触界面にパルス電流を加えることにより通電衝 撃により熱が界面に発生し、この発熱によりスポット的に溶融点が発生し、これを基点と して熱雰囲気で拡散接合が進行するとされている。

そこで、本研究では、製造コストを考慮し、製造工程を削減するため、焼結体 SiC の形成と単結晶 SiC と焼結体 SiC との接合を同時に行う同時焼結接合を試み、安定した接合が可能である焼結接合条件の把握に取り組んだ。

(1) 放電プラズマ焼結装置

今回使用した放電プラズマ焼結装置の基本仕様を以下の表 3-1-1 に示す。

最大成形圧力	100ton
加圧ストローク	300mm
最高真空度	10-5Torr
電極サイズ	Φ 250mm
寸法	$1350 \text{(W)} \times 1360 \text{(D)} \times 2300 \text{(H)} \text{[mm]}$
質量	6500kg
定格入力	3相、AC400V/440V、50Hz/60Hz
最大出力	10000A
自動温度制御	PID デジタルプログラム温度 指示調整
焼結時間設定	0~99分59秒
寸法	$1100 (W) \times 1700 (D) \times 2300 (H) [mm]$
質量	2500kg
	 最大成形圧力 加圧ストローク 最高真空度 電極サイズ 寸法 質量 定格入力 最大出力 自動温度制御 焼結時間設定 寸法 質量

表 3-1-1 放電プラズマ焼結装置の基本仕様

(2) 焼結体 SiC と単結晶 SiC の同時焼結接合

焼結体 SiC と単結晶 SiC の拡散接合を試みた。焼結体 SiC と単結晶 SiC の固相接合では、 焼結体 SiC の形成と拡散接合の 2 工程が必要であり、生産コスト削減の為、また、固相接 合では、単結晶 SiC に大きなダメージを与えると推測されるため、本研究では、焼結体 SiC と単結晶 SiC の同時焼結接合を試みた。単結晶 SiC の収容方法及び粉末充填方法はパンチ に溝を設け、その中に単結晶 SiC を載置し、その上から焼結粉末を充填した。同時焼結接 合の結果、焼結体 SiC と単結晶 SiC の同時焼結接合条件が得られ、これらの拡散接合体を 得ることが出来た。焼結接合後の外形写真を図 3-1-1、材料加工後の外形写真を図 3-1-2 に 示す。



図 3-1-1 拡散接合後の外形写真



図 3-1-2 上図材料加工後の外形写真

3-2 接合断面観察

焼結体 SiC 部分と単結晶 SiC 接合部分の界面の観察を行う。

【実験・調査方法】



(1) 外観観察

拡散接合後の単結晶 SiC 表面には付着物あるいは他の作用による(エッチング効果等)模様のようなものが見受けられる。エッチング作用である場合単結晶内部に影響を及ぼしている可能性がある為、拡散接合後の単結晶表面を SEM にて観察を行った。その際の顕微鏡

写真を下図の図 3-2-1 に示す。この 観察写真からは、炭素シートの付着 によるものであるか、エッチング作 用により表面に組織変化が生じたの か判断することは困難である。 そのため単結晶 SiC の表面を研磨す ることにより付着物によるものかを 調査した結果、単結晶 SiC 表面から 模様及び付着物がなくなり、拡散接 合時の炭素シートの付着物であるこ とが判明した。



図 3-2-1 拡散接合後の単結晶 SiC 表面写真





図 3-2-2 単結晶 SiC の表面分析(黒部分以外)

図 3-2-3 単結晶 SiC の表面分析(黒部)

拡散接合後の単結晶 SiC 表面の元素分析を行った。図 3-2-1 に示す単結晶 SiC の表面写真 部分の黒く観察された部分以外の元素分析結果を図 3-2-2 に示す。また、表面写真部分の 黒く観察された部分の元素分析結果を図 3-2-3 に示す。両方の場合においても珪素(Si) 及び炭素(C)以外は検出されなかった。よって拡散接合後の単結晶 SiC 表面においては不純 物及び化学反応による組織変化は認められなかった。

(2) スライス後の断面観察

拡散接合後の材料を縦方向に約 1mm 幅にスライスし、図 3-2-4 及び図 3-2-5 に示す a、b、c 部の断面観察を行った。また、b部の拡大写真を図 3-2-6 に示す。焼結体 SiC 部分につい ては a、b、c 部ともに一様に均質であった。緻密化されているのが目視でも確認でき、良 好に仕上がっていた。また、界面に関して a 部では単結晶 SiC と焼結体 SiC の界面に隙間 が無く、良好に接合されていることが確認できた。しかし、b 部、c 部の界面には図 3-2-6 に示すようにギャップが認められた。



図 3-2-4 拡散接合後の材料写真

図 3-2-5 スライス後の断面写真



図 3-2-6 b 部拡大断面写真

(3) 研磨加工後の断面観察

【a 部中央】





図 3-2-7 a 部中央微分干涉×50 倍写真



図 3-2-8 a 部中央透過モード×50 倍写真



図 3-2-9 a 部中央×2000 倍写真

【a 部端部】





図 3-2-10 a 部端微分干涉×50 倍写真



図 3-2-11 a 部端×2000 倍写真

【b部端部】





図 3-2-12 b 部端微分干涉×50 倍写真

図 3-2-7~図 3-2-11 より a 部に関してギャップは認められなかった。また、図 3-2-8 に 示すように「透過モード」(光源を対象物の下部に置き、上部で観察する方法)で撮影した 結果、単結晶 SiC 部分は光を透過するが、焼結体 SiC 部分は光を透過しないことが確認で きた。透過モード撮影写真より、界面は貫通穴等が無く、良好に接合されていることが確 認できた。

しかし、図 3-2-12 に示される通り b 部においては界面にギャップが存在することが確認 できた。

今回、接合面の断面観察をすることによって焼結体 SiC 内部が均一であり、緻密化され ていることが確認することができた。また、今回発見された単結晶 SiC と焼結体 SiC の端 部の界面にギャップが認められたが、これは接合時、圧力が均等にかからなかったことが 原因だと考えられる。しかし、仮に焼結体 SiC と単結晶 SiC との接合が部分的である場合 も相当の強度が期待でき、また今回の金型では圧縮方向の力のみの作用となる為、大きな 問題にはならない可能性が高いと考えられる。

しかし今後、様々な評価を行う上で、今回発見されたギャップが悪影響を及ぼす可能性 が全く無いとは断定できないため、このギャップが原因であると考えられる不具合が起こ った場合「破壊検査」ではあるが、抜き取りでの評価を実施するなどの対応が必要である。

3-3 接合面強度検証

(1) 接合面強度検証方法

接合面の強度の検証方法として引張り試験(JIS R 1630)が一般的であるが、試験片の大きさ、形状の都合により困難であると判断し、本研究では常温曲げ強度試験(JIS R 1601) で検証することとした。

但しこの試験方法についても JIS で定められた試験片の大きさと一致しない為、この試験 方法を参考とし、独自に接合面の強度が検証できる様にアレンジした。 接合面の曲げ強度を数値として表すことはできないが比較することにより、曲げ強度○○

MPa 以上という表現は可能であると考える。

(2) 試験片

拡散接合された金型を、厚さ1mmにスライスし、10x25mmの短冊状に加工。 切断面にあいては研磨加工を施した。



図 3-3-1 試験片形状・寸法

(3) 常温曲げ試験 試験結果

表 3-3-1 は試験結果より算出した曲げ強さを示す。

表 3-3-1 曲げ強さ(MPa)

	試験力(N)	曲げ強さ(M P a)
試験片①	65.02231	195.067
試験片2	120. 5945	361.784
試験片③	119.6647	358.994

※ 試験力とは試験片が破断した時の荷重値

曲げ強さ σ_{h3}=3PL/2wt²・・・式 3-3-1

σ_{b3}:3点曲げ強さ(MPa)

- P:試験片が破断した時の荷重(N)
- L:支点間距離(mm)=20mm
- w:試験片の幅 (mm) =10mm
- t:試験片の厚み(mm)=1mm

(4) 各材料の強度比較表

代表的なセラミックス、超硬合金との強度比較表を表 3-2-2 に示す。

	曲げ強度(MPa)	引張り強度(Mpa)	圧縮強度(Mpa)
炭化珪素(SiC)	360	597.6	2397.6
窒化珪素(Si ₃ N ₄)	800	1328	5328
アルミナ(A1 ₂ 0 ₃)	280	464.8	1864.8
ジルコニア(ZrO ₂)	1300	2158	8658
超硬合金(WC K10)	1500	2490	9990

表 3-3-2 各材料の強度比較表

引張り強度、圧縮強度は曲げ強度からの換算値。

引張り強度=0.6×曲げ強度 圧縮強度=曲げ強度×6.5

(5) 考察

(3)の試験結果より、試験片①は拡散接合面で破断している。しかし、完全に結合面 で破断した訳ではなく途中から焼結体方向に斜めに破断している。

試験片②③は荷重の掛かった中央付近から焼結体部分で破断している。これにより焼結体 部分の曲げ強度としては 360MP a 程度といえる。

試験片①は試験片②③と比べ曲げ強さが劣っているが、これは接合面の接合強度が十分で なく、ここから破断した為と推測できる。事実その後の調査で試験片①の結合面には僅か な亀裂があった事を確認した。

この結果より、金型全体からみると拡散接合面は必ずしも均一に接合しているとは言え ない。

但し、十分に接合された接合面は強固であり、試験片②③の接合面ではなく焼結体部分で 破断したという結果より、接合面の曲げ強さとしては焼結体部分の曲げ強さ約360MPa以 上であると考えられる。

今回は試行回数が少ない為、明確な結論を出す事は困難であるが今後、試行回数を増やす、

又切り出した試験片が金型のどの部分から切り出したものかを把握することにより、より 精度の高いデータを得ることが可能である。

本研究では、技術目標として接合面強度は、超硬合金並の圧縮強度(4GPa)、引張強度 (800MPa)を目標としたが今回、接合部分よりも焼結体部分の強度が劣っているとい う結果より、接合面強度を正確に測定することが出来なかった。

今後、より強度の高い焼結体 SiC の形成を試み、再度試験を実施し接合強度の検証が必要 である。

第4章 直接加熱による昇降温

4-1 プレス機の構成及び設計指針、性能

(1)装置概要

本装置は、今回開発を行った金型を評価する為の精密プレス装置である。 窒素雰囲気内で高温に加熱された金型に下から圧力を加え、ガラスレンズを成形する。 最適なプレス条件を把握する為に現状考え得る機能を盛り込んだ精密プレス装置である。



図 4-1-1 プレス装置外観写真

(2) 装置仕様

【装置供給源】

電源 供給電源:3相 200V

圧縮エア 供給圧縮エア:0.5Mpa以上 ドライエア

充填ガス 供給充填ガス: N²ガス(純度 99.9%以上) 0.3Mpa 以上

装置冷却 供給冷却媒体:市水(サーモチラータンクに供給)

【プレス機構】

サーボモーターによる直接駆動方式を採用した。定格プレス能力は10000N(1t)とし、 高精度位置制御、ロードセルとの連動による高精度押し圧制御を可能とした。

モーター減速機にはバックラッシレスのハーモニックギアを採用し、駆動ボールネジ、

駆動ガイド部品においてもあらゆる隙間による「ガタ」を排除し高精度駆動を実現した。

又、10000Nの高荷重下、約 850℃での高温下でのプレス装置自体の変形量を最小とする ため、部品形状、部品構成を熟慮し、最適化を図っている。

【金型セット部周辺】

金型に直接電気を流し昇温させる為、セット部周辺には、耐熱性、絶縁性が必要となる。 又、空気から窒素雰囲気に置換させるために一旦真空状態を作る必要がある為、気密性も 必要となる。機器の選定や構成する材質の選定を熟慮し、最適化を図る。



図 4-1-2 金型セット部周辺写真

・金型セット部の主な部品の材質

金型セットプレート材質:窒化珪素 電極材質:インコネル 600 熱電対材質:インコネル 600 下プレス軸材質:SUS304(冷却機構有り) 上プレス軸材質:SUS304(冷却機構有り) チャンバー材質:A5052(冷却機構有り) 覗き窓材質:耐熱ガラス(パイレックスガラス) シール材(0リング)材質:バイトンゴム チャンバー内窒素供給配管材質:SUS304



図 4-1-3 金型セット部詳細

本プレス装置は上金型、下金型両方に電気を流す構造とし、金型内温度を正確に把握す る為、上下共に熱電対にて温度管理を行う構造とする。

これらの構造により、ガラスレンズの硝材に均一に熱伝達する事が可能になり、より高 品質なガラスレンズの製造方法を模索することが可能である。

また、金型への電気供給は電極板の弾性を利用したクリップ方式を採用した。 これは、金型付近は非常に高温となる為、複雑な電極押し当て機構を設けることが困難で あり、高温下での熱膨張による押し圧変化がより少なくなると考えたからである。 但し、金型セット時の着脱の方法には問題があり、今後の課題とする。 【プロセス設備】

大気雰囲気内で金型に通電、加熱を行うと非常に高温になる為、金型自体が酸化してし まう恐れがある。この事を防ぐ為に、本プレス装置では真空チャンバーを設置し、一旦真 空状態を作り窒素雰囲気に置き換える工程をとることとした。

真空状態を作る為に、ロータリー真空ポンプを採用した。このポンプは安価で到達真空 圧も 10P程度と性能には問題無いが、密閉用に油を使用している為、使用方法によっては 注意が必要である。その理由は真空ポンプの運転を停止した途端、油が真空状態方向に逆 流(真空状態方向に引っ張られる)する恐れがある。その他に油の蒸発によるチャンバー への影響等も考えられるがこれは今後の課題とする。

真空ライン上に大気開放用のバルブを設け、真空ポンプの運転を停止する前にバルブを開 放することで油の逆流を防止することができる。

又、チャンバー内の真空雰囲気を開閉するバルブには 2 段バルブを採用し、真空ポンプに よる空気の急激な流れによる悪影響を排除した。

窒素供給ラインには圧力調整バルブ、流量調整バルブ、フィルターを設け、クリーンな 窒素ガスを高精度に供給している。

又、チャンバー内の窒素ガス供給口の位置を金型の近辺に設けることで、窒素雰囲気を作 る為だけでなく、プレス工程終了後の金型の冷却ブローとしても使用できる。

金型が約850℃と高温になる為、周辺部品を冷却する必要がある。金型からの熱が直接伝達する可能性がある下プレス軸、上プレス軸、間接的に伝わる可能性のある真空チャンバーにそれぞれ冷却水ラインを設置した。これは熱による部品の膨張からおこる寸法変化を極力抑制し、プレス精度を保つという観点からも非常に重要である。

冷却水の循環にはサーモチラーを採用し、常に一定温度の冷却水を供給することでより 安定した条件でのプレス作業を可能にした。

4-2 SiC 金型の昇降温性能

(1) 試験目的

無電解ニッケルメッキを施した SiC 金型の昇温実験を行い、適切な初期電圧を把握し、温度による単結晶 SiC の抵抗値の変化を把握し、直接加熱が可能であるか判断を行う。

(2) 使用機器

測定機名称	メーカ	型式	外観
Digital Multimeter ※抵抗値測定用	ADVANTEST	ADCE7351E	
電源	KIKUSUI	PAS20-36	
サーモグラフィー ※温度測定用	メジャー-	TH7800N	

(3) 試験ワーク



(4) 試験方法

単結晶 SiC と焼結体 SiC より構成される金型の下フランジ側面に、厚み 5mm の銅板及び厚み 18mm のセラミックスプレートを両側から挟み込み銅板に電力を与えた。

また、金型温度に関しては金型上面をサーモグラフィー(TH7800N)にて測定を行った。



(5) 金型の抵抗値及び試験条件

表 4-2-1 金型の抵抗値及び初期電圧

抵抗值	電圧	
1.26Ω	DC20V	
40.4Ω	DC 2 0 V	

(6) 結果及び考察



抵抗値 1.26 Ω 、電圧 DC20V の条件下での温度特性を図 4-2-2 に示す。試験の結果、約 30 秒で 850℃に到達した。また温度が上昇すると共に金型に流れる電流値が増加し温度上昇に 伴い金型(単結晶 SiC)の抵抗値が低下するという現象が認められた。また本実験では安全 性を考慮し、初期電圧を 20V にて試験を行ったが、さらに電圧値を増加させることで昇温 速度は上昇すると推測される。また、上記昇温試験後に金型の抵抗値を再度測定した結果、 昇温前の抵抗値と差異が生じた。(1.26 Ω →40.4 Ω)抵抗値 40.4 Ω 、電圧 DC20V の条件下で の温度特性を図 4-2-3 に、また 850℃から自然冷却させた時の金型の降温特性を図 4-2-4 に 示す。試験の結果、約 90 秒で 850℃に到達し、前回と同様温度が上昇すると共に金型に流 れる電流値が増加し温度上昇に伴い金型(単結晶 SiC)の抵抗値が低下するという現象が認 められた。また降温に関しては図 4-2-4 より自然冷却にて 850℃から 100℃まで約 3 分で冷 却された。窒素等のブローをすることによりさらに冷却速度が早まると考えられる。また、 数回昇温試験を実施した後、再度抵抗値を測定した結果 40.4 Ω で、抵抗値の変化は認めら れなかった。1 回目の昇温、降温後の抵抗値に変化が生じた原因として次のような現象が推 測される。

①単結晶 SiC の特性が変化した

②めっきが剥離した(密着性が悪化)

③めっきと SiC との間に酸化膜が生じた

昇温前と昇温後に抵抗値が変化するという現象は昇降温を繰り返す金型として利用する場 合には非常に問題視される要素である。今後、酸化による影響を受けない高純度な窒素雰 囲気中又は高真空中で再度試験を実施し、早急にこれらの原因を追究する必要がある。

これらの結果より、金型をヒータとして使用することは可能であることは確認できたが、 今後は単結晶 SiC の温度分布や抵抗値の変化等、本研究では確認できなかった課題を解決 し、金型を直接加熱することで本来の目的であった省エネルギー化や装置の簡略化といっ た目標を達成していきたい。

4-3 SiC素材へのめっきについて

(1) 試験目的

SiC素材に対して無電解ニッケルメッキ試験を実施し、めっき析出性およびめっき密着性の評価を行う。

(2) 試験方法

SiC素材を試験片として使用し、前述の処理工程により無電解ニッケルめっき試験を実施。 また、めっき析出性は目視にて観察し、めっき密着性はテープ剥離(セロテープをめっ き品に貼り付け、垂直方向にて引っ張り)にて評価を行う。

(3) 試験結果および試験考察

試験片,	条件	めっき析出性	めっき密着性	めっき後の外観
 SiC 素材 焼結体 	センシタイザーなし 表面研磨無	未析出部あり	良好	
 ② SiC 素材 焼結体 	センシタイザーあり 表面研磨無	良好	良好	
 ③ SiC 素材 単結晶 	センシタイザーあり 表面研磨有	良好	不良	
 ④ SiC 素材 単結晶 焼結体 	センシタイザーあり 表面研磨無 表面改質有	良好	やや不良	

①及び②の SiC 素材(表面研磨無)に対し、無電解ニッケルめっき試験を実施してめっき 析出性およびめっき密着性を評価した結果、処理工程におけるセンシタイザーを実施する ことにより良好なめっき析出性およびめっき密着性が得られた。また、③の SiC 素材(表 面研磨有)に対してはめっきの密着性が悪くテープ試験にて簡単に剥れ、④の SiC 素材(表 面研磨有、表面改質有)に対してもテープ試験にてめっきが剥れる現象が認められた。こ の結果、表面の粗さがめっきの密着性に大きく影響することが分かった。今後は表面の改 質方法を検討し、SiC 素材へのめっき条件(表面粗さと密着性の関係)を突き詰めていく必 要がある。

第5章 加工技術の開発

5-1 研磨機の構成及び設計指針、性能

(1)装置概要

本装置は、上型、下型の球面くぼみ部分を研磨加工する精密研磨装置である。 より最適な加工条件を見つける為に、現状考え得る動作を盛り込んだ。 被削材側には高精度で位置制御可能なXYテーブルを設置し、研削材側には高精度で位置

制御可能なZ軸ユニットを設置した。

X,Y,Z軸共に高精度位置決めモーターを採用し高精度な位置決めを可能とした。

これら駆動系と高回転、高精度スピンドルユニット、スラリー吹き付けユニットを搭載 する事で球面研磨条件を把握する為の研磨装置である。



図 5-1-1 研磨装置外観写真

(2) 装置仕様

【装置供給源】

電源 供給電源:3相 200V

圧縮エア 供給圧縮エア:0.5Mpa 以上 ドライエア

【駆動部】

• 被削材側

高精度XYステージを採用した。5相ステッピングモーターによる高精度位置決めを可 能としている。駆動案内部には精密クロスローラガイドを使用し、研削ボールネジによる バックラッシの無い(0.5µm以下)高精度駆動を実現している。

主な使用機器とその主な特性

駆動ユニット: XYステージ YA10A-R1(神津精機社製)

- ・案内方式:精密クロスローラガイド
- ・送り方式:研削ネジ リード 0.5mm
- ・分解能 : $0.25 \,\mu$ m/step (Half 時)
- ・最高速度:2.5mm/sec
- ・繰返し位置決め制度:±0.3µm以下
- ・使用モーター:5相ステッピングモーター
- 研削材側

Z軸ユニットにはサーボモーターを採用した。駆動案内部、ボールネジには予圧タイプ を採用し、バックラッシの無い高精度駆動を実現している。

又、スピンドルモーターの取付、XYステージとの位置関係により、オーバーハング量 が大きくなってしまうが十分な強度、剛性の確保をしている。

主な使用機器とその主な特性

駆動モーター:サーボモーター HF-KP23B (200W ブレーキ付) (三菱社製)

- ・速度応答周波数:900Hz
- ・分解能 : 262144 P/r
- 送り方式:精密ボールネジ BNK1402-3RRG0+216LC5Y(THK 社製)
 - ・予圧タイプ(バックラッシレス)
 - ・ネジリード:2mm(軸径 ϕ 14)
- 案内方式:LMガイド SHS15V2SS+280L(THK 社製)
 - ・予圧タイプ(バックラッシレス)
- ・ スピンドルユニット

回転数を正確に制御するためにブラシレスモーター式を採用した。また、最適な加工条件を見つける為に高回転まで回転可能なスピンドルを採用した。

主な使用機器とその主な特性

スピンドルユニット:スピンドルモーター EMS-3060K (ナカニシ社製)

- ・最高回転速度:60000rpm
- ・最大出力 : 350W
- スピンドル精度:1µm以内
- ・スピンドル冷却エアー供給必要(0.25MPa)

研削材

調査及び既存装置のノウハウより、研削材材質は、銅、純鉄、ステンレスで製作した。 又、切削面表面粗さの違いによる被削材研磨面の表面粗さへの影響も調査する為に、それ ぞれの材質に表面粗さの異なるものを準備した。

現状、最適な加工方法、条件を模索中の為、これらの研削材による差異のデータを蓄積することにより最適な条件を把握できると考える。



図 5-1-2 各動作略図

【スラリー吹き付けユニット】

容器に入ったスラリーを一定間隔で一定量を被削材に吹き付ける。エンジンのキャブレ ターや霧吹き等に利用されているベンチュリ効果を利用し、圧縮エアの圧力、タイマー等 で制御する。

又、スラリー内の砥粒の沈殿を防止する為に、マグネチックスターラーを設置した。 これは、容器内に磁石棒を沈ませ、その棒を容器の外から磁力で回転させて容器内の液体 を攪拌する装置である。

スラリーについては調査及び既存装置のノウハウより独自に調合したスラリーを使用する。これも研削材と同じく、最適な加工条件を模索中の為、試行錯誤しながら最適なスラ リーの条件を把握する事を目標とする。

5-2 研磨評価

(1) 評価方法

研磨面の評価方法としては研磨前と研磨後の表面観察を行い、目視(顕微鏡画像) での判断をした後に表面効果があった場合に表面粗さを測定することとした。また、 研磨方法は下記に示す2通りで研磨テストを実施した。



① 研削材にパッド(不織布)貼付+ダイヤモンドスラリー



図 5-2-2 研削材と不織布

② 研削材(純鉄、銅)+ダイヤモンドスラリー



図 5-2-3 純鉄製(左)と銅製(右)



図 5-2-4 研磨後の研磨面

(2) 研磨前の金型研磨面

肉眼では確認出来ないが、拡大すると中心より放射線状に無数の研削痕が見受けられる。 また、研磨前の表面粗さを測定した値を表 5-2-1 に示す。



図 5-2-5 研磨前の金型研磨面

表 5-2-1 研磨前の表面粗さ

最大高さ	Rу	$1.7349\mu\mathrm{m}$	抜取り部分の山頂線と谷底線との間隔を 粗さ曲線の縦倍率の方向に測定し、この値 をμmで表したもの
------	----	-----------------------	--

(3) 研磨結果



図 5-2-6 ①にて研磨後の金型研磨面



図 5-2-7 ②銅製にて研磨後の金型研磨面(中心付近)



図 5-2-8 ②銅製にて研磨後の金型研磨面(端付近)



図 5-2-9 ②銅製にて研磨後の金型研磨面

(4) 考察

①②の方法共に、肉眼でも確認可能な同心円状の研削キズが無数に見受けられた。 また、②の方法を実施する際、スラリーが遠心力により飛ばされて効果を失わない為に、 簡易に水槽を製作し、研磨面をスラリー液中に浸した状態で研磨を行った。 しかし、図 5-2-9 に見られるように、中心付近に同心円状の深いキズが発生した。これは スラリー不足による、「焼付き」が起った可能性がある。

研削材の研磨面にスリットを入れる等、スラリーの浸透性を上げる工夫が必要である。

①②のいずれの方法においても研磨前の表面状態より効果が認められなかった 為、目標の球面部の粗さ(Ra=3~10nm)を達成することができなかった。今後は研 磨機の構造を見直すと共に、遊離砥粒や研削材の材質など幅広く再検討が必要であ る。

5-3 SiC素材の加工性検証

焼結により形成した焼結体 SiC の切削性を検証するため、下記に示す切削テストを行った。

⁽¹⁾ 平面加工及びコンタリング



(2) Φ1穴



(3) 金型外観

スリーブ	上金型	下金型
直角度 0.001mm 以下	研削時の球面部表面粗さ	研削時の球面部表面粗さ
穴径:Φ16+0.01mm	Ra=0.02μm以下	Ra=0.02μm以下

成形前金型全体組立写真	成形後金型全体組立写真

第6章 全体総括(研究の今後の課題及び展開)

今回の研究により、単結晶 SiC を光学有効面に適用した金型を実現するための接合技術や 単結晶 SiC の材料特性を把握することができた。単結晶 SiC 及び焼結体 SiC が高温での耐 酸化性や、耐摩耗性に優れていることから、高温での強度や耐酸化性が要求される成形金 型に適していることが確認できた。特に最近では、デジタルカメラや携帯電話などの普及 によりさらなる高画質化が求められている中、今までにはできなかった 1000℃近い高温で の成形が可能であることから今後幅広く拡販が見込まれる。一方では今回の研究より重要 な課題も見出すことができた。一番の課題として挙げられるのは単結晶 SiC と硝材との離 けい性である。離けい性に関しては今回の研究では確認することができなかったが、ガラ ス成形金型として利用する場合非常に重要な要素である。今後単結晶 SiC と硝材との離け い性については研究する必要があり、従来の金型で使用されているコーティング技術を用 いることなく金型として使用できればコストや耐久性の面でも飛躍的な効果が見込まれる。 また製造コストについても大きな課題の1つである。単結晶 SiC の製造コストが高く、ま た単結晶 SiC と焼結体 SiC の接合(拡散接合)にもコストがかかるため、金型に適した拡 散接合以外の接合方法を見出す必要がある。また単結晶 SiC においても歩留りを最小限に おさえた製造方法を構築する必要がある。さらに、SiC 材料の加工性の向上も1つの課題と して挙げられる。SiC 材料は難切削材料であるため、穴あけ等の加工も非常に困難である。 SiC 材料の加工性を高める工具の開発は今後さらなるコストダウンを計るためには非常に 重要な課題の 1 つである。今後これらの課題を解決することで単結晶 SiC によるガラスレ ンズ成形金型を実用化することを目標とし、高温硬度や耐酸化性に優れているという利点 を生かし、ガラスレンズ以外のプリズムやその他光学素子の成形金型にも幅広く使用され ることを期待したい。また、今回は単結晶 SiC を金型として使用するという新たな用 途を見出すことができたが、単結晶 SiC の利点を生かしたその他の用途も見出し、 この素材の持つ可能性を広げていきたい。