

ファインセラミックスの進歩

Advance in Fine Ceramics

佐藤 裕*, 石飛圭吾**

Yutaka SATO and Keigo ISHITOBI

1 緒言

当社のファインセラミックスの開発は、1978年に当社独自で開発した反応焼結 Si_3N_4 -SiC 複合セラミックス「クロセラム N」に始まり、その後、1985年から新日本製鐵（現日本製鉄）との共同で、事業化に向けた本格的な開発を開始した。この共同開発では、主にジルコニア (ZrO_2)、アルミナ (Al_2O_3)、炭化ケイ素 (SiC)、サイアロン (Sialon) といった代表的な構造用セラミックス材料を対象とし、材料開発と併せて様々な用途への適用検討を進めた。その後、2000年からは半導体製造装置用部材を主力製品とした新日鐵との共同事業を立ち上げ、2010年からは当社単独事業としてファインセラミックス事業を展開してきた。

構造用ファインセラミックスは、従来の材料にはない高硬度、高耐摩耗性、高強度、耐熱・耐食性などの特長を有する材料として大きな期待を集め、1980年代から様々な業種の企業が参入し研究開発が進められてきた。しかしながら、構造用ファインセラミックスは、金属材料などの競合材料に比べ、高コストであることなどから、その特性を活かしつつ、コストメリットがある用途に適用先が絞られてきた。セラミックス参入メーカーも徐々に淘汰され、それぞれ得意とする材料、プロセスに適した柱となる製品を有するメーカーが事業を継続している。

このような状況の中で、当社は、セラミックス固有の特長を活かせる用途として、特に半導体製造装置に着目し、材料開発および商品化を進めてきた。半導体製造装置に最初に採用された構造用セラミックスは、セラミックスの中でも安価な Al_2O_3 であったが、高精度化のニーズに伴い、図1に示すように Al_2O_3 よりも低熱膨張である Sialon や高剛性である SiC なども採用されるようになった。

1. Introduction

The development of fine ceramics in our company has started with the reaction sintered Si_3N_4 -SiC composite ceramics 'KUROCERAM-N' in 1978. Afterwards the joint project of ceramics development aimed for the industrialization with Nippon Steel Corporation was started from 1985. In this joint development, the material of the typical structural ceramics, such as zirconia (ZrO_2), alumina (Al_2O_3), silicon carbide (SiC) and sialon, were developed and tried practical applications. The ceramics business, in which main products were ceramic parts of semiconductor manufacturing equipment, was launched as joint business with Nippon Steel Corporation in 2000 and shifted to independent business of Krosaki Harima Corporation in 2010.

The structural ceramics were expected for various application as the new materials with excellent properties such as high hardness, high wear resistance, high strength, high temperature resistance and high corrosion resistance and so on. So various company were entered the ceramics market, many research and development of fine ceramics were promoted actively. However, the structural ceramics are high cost compared with competitive materials such as metals, the applications of fine ceramics was narrow down to the suitable application for ceramics consequently. The ceramics makers were gradually screened and the makers which have a competitive product and process were survived in ceramics business.

In such situation, our company was especially focused on the semiconductor manufacturing equipment and developed materials and commercialized the fine ceramics. The first product used for semiconductor manufacturing equipment was alumina which is low cost material in ceramics. After that, Sialon with low thermal expansion coefficient and SiC with high stiffness as shown in Fig.1, were used instead of alumina.

* セラミックス事業部 技術統括グループグループ長 Group Manager, Ceramics Div. Technical Administration & Planning Group

** セラミックス事業部 技術統括グループマネージャー Manager, Ceramics Div. Technical Administration & Planning Group

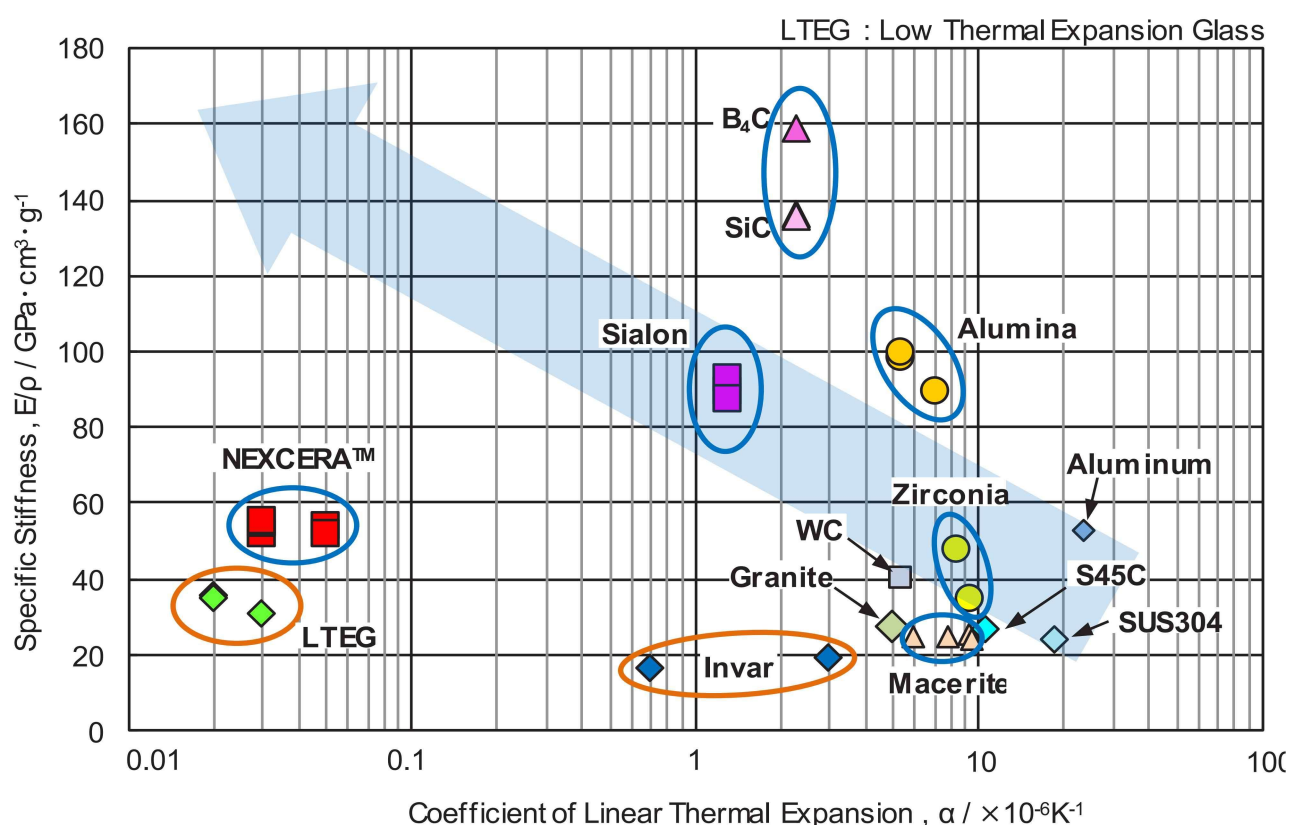


Fig. 1 Specific stiffness and coefficient of thermal expansion of materials.

当社が半導体製造装置に参入した当初に主力となった材料は Sialon である。Sialon は、 Si_3N_4 と Al_2O_3 が固溶したセラミックスであり、 Si_3N_4 セラミックスと同様に高強度、高靱性であるとともに低熱膨張という特長を有する材料である。当社の Sialon 技術は、英 Lucas Cookson Syalon 社から導入した技術をベースに改良を重ね、表 1 に示すように高強度、高靱性の S110、更に S110 をより緻密化、高強度化した S110H、安価グレードの S140 などを開発してきた。

当社材料が半導体製造装置部材に参入し事業化してから、半導体のデザインルールが 2000 年の 180 nm から 2010 年には 32 nm、さらに 2019 年現在 7

When our company entered the market of semiconductor manufacturing equipment, main products were sialon parts. Sialon is solid solution of Si_3N_4 and Al_2O_3 and it has excellent properties such as high strength, high fracture toughness and low thermal expansion coefficient same as Si_3N_4 ceramics. The technology of sialon of our company was introduced from Lucas Cookson Syalon Co., a British company. We developed several grade of sialon in Table 1 based on introduced technology, S110 grade with high strength and high toughness, S110H which is densified and strengthened S110, low cost version S140.

After we entered the field of semiconductor manufacturing equipment, the miniaturization of

Table 1 Characteristics of sialon ceramics

Code	S110	S110H	S120	S140
Bulk Density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.24	3.25	3.22	3.20
Flexural Strength / MPa	880	1180	690	490
Fracture Toughness / $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	6.5	6.5	6.0	4.6
Young's Modulus / GPa	290	300	300	280
Thermal Expansion Coefficient at 23 °C / 10^{-6}K^{-1}	1.3	1.3	1.3	1.3
Thermal Conductivity / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	21	21	21	21

nmと微細化が進むのに合わせて、半導体製造装置も進歩を遂げてきた。このような半導体の微細化の急速な進展に伴い、半導体製造装置にもより高精度が求められるようになり、装置に使用される部材では、金属材料より低比重、低熱膨張、高剛性などの特長を有するセラミックスの採用が進んできた。これらのニーズに代表されるように、精密機械では熱あるいは応力に対して安定な材料を提供することが、装置の精度を維持するためには不可欠である。温度の僅かな変化による部材の寸法変化を最小限に抑えるために、温度による寸法変化が少ない低熱膨張材が求められるようになった。また、応力による材料の変形を小さくするために、より高剛性の材料を用いることで部材の精度を保つことができ、且つ剛性が高い材料を用いて部材を軽量化することで、高速で高精度の制御が可能となる。この場合、材料の剛性を比重（密度）で割った値である比剛性が高い、つまり低比重で高ヤング率の材料がより有用となる。

当社では、このようなニーズに対応するために、SiCより比剛性の高い材料である炭化ホウ素（B₄C）セラミックスや室温近傍で熱膨張率がほぼゼロである低熱膨張セラミックスを開発してきた。以下、これらの開発材料について紹介する。

2 高比剛性 B₄C セラミックス

一般的な構造用セラミックスの中で高比剛性の材料はSiCであるが、SiCよりもヤング率が高いセラミックスとして、NbC、TaC、Mo₂C、WCなどの炭化物、TiB₂、ZrB₂、VB₂などのホウ化物がある。しかしながら、これらの化合物は、いずれもSiCの理論密度の1.4倍以上の高密度であるため、比剛性はSiCより小さい値しか得られない。

これに対して、B₄Cは理論密度がSiCの3.2 g / cm³に対して2.52 g / cm³と78 %の比重で、ほぼ同等のヤング率が得られるため、SiCの比剛性を上回る材料を得ることができる。しかしながら、B₄CはSiCと同様に共有結合性が高い材料であり、融点が2437℃と高融点であるため、単体で焼成しても緻密な焼結体を得ることが困難である。また、B₄Cはダイヤモンド、c-BN（立方晶BN）に次ぐ高硬度材料であるため、加工が困難であるという問題がある。これらの課題を解決するために、緻密かつ加工性を改善したB₄Cの開発に取り組んだ。

semiconductor devices is progressed and design rule of semiconductor was 180 nm in 2000. 32 nm was used in 2010, recently 7 nm was achieved in 2019, so the semiconductor manufacturing equipment were rapidly advanced. According to rapid miniaturization of semiconductor devices, higher accuracy was required for semiconductor manufacturing equipment. To satisfy high accuracy requirement, ceramics, which have special properties such as low specific gravity, low thermal expansion and high stiffness, came to be adopted for the parts of the equipment. As represented by these needs, it is necessary to provide the materials which is stable for temperature change and stress to keep the accuracy of the apparatus. The low thermal expansion materials was required to reduce the dimension change with slight temperature change. On the other hand, high stiffness materials were required to reduce the dimension change by stress. Furthermore the parts could move and control at the high speed by weight reduction which achieved by using high stiffness materials. In this case, materials with low specific stiffness, which is value of stiffness divided by specific weight, is usable.

Corresponding to such needs, we developed boron nitride (B₄C) ceramics, which has high specific stiffness, and extremely low thermal expansion ceramics which has nearly zero thermal expansion coefficient at room temperature. The details of these developed materials are described below.

2 High specific stiffness B₄C ceramics

High specific stiffness materials in conventional structural ceramics is SiC. The materials with higher young's modulus than SiC are carbide such as NbC, TaC, Mo₂C and WC, and boride such as TiB₂, ZrB₂ and VB₂, but these materials has higher theoretical density comparing to SiC 1.4 times or more, so specific stiffness of these materials are lower than SiC.

On the other hand, B₄C has lower theoretical density of 2.52 g / cm³ than 3.2 g / cm³ of SiC and has almost same young's modulus. So higher specific stiffness is available with B₄C material. However, B₄C is high covalent bonded material same as SiC and has high melting point of 2437℃, so it is difficult to densify B₄C without additive. Furthermore, B₄C is hard materials following diamond and cubic BN, so machining of B₄C in very difficult. To solve these problems, we tried to develop the dense B₄C with improved machinability.

2・1 B₄C の焼結性の改善

B₄Cは前述したように共有結合性の高い材料であることから、単体での拡散による固相焼結による緻密化は困難である¹⁻³⁾。そこで焼結助剤としての添加剤を検討し、焼結性の改善を試みた。添加剤として、固相での拡散を促進する添加剤 A および焼成温度で液相を生成し液相焼結により焼結を促進する添加剤 B を添加し、無添加の場合と比較した。

その結果、**図 2**に示すように、無添加の場合、理論密度の 88.3 % までしか密度が上がらないのに対し、添加剤 A では 93.5 % まで密度が向上した。更に、液相焼結を利用した添加剤 B では 97.3 % と緻密な焼結体を得ることができた。添加剤 B を用いた焼結体の微構造を観察すると、**図 3**に示す通り、添加剤の量を増やすとともに B₄C の結晶粒径が増大し、焼結が進んでいることが確認できた。

2・1 Improvement of the sinterability of B₄C

As mentioned above, B₄C is strong covalent bonded materials, so it is difficult to densify by solid phase diffusion¹⁻³⁾. So we investigated additive as sintering aid and tried to improve sinterability of B₄C. As the sintering aids, additive A, which enhance the diffusivity in solid phase, and additive B, which produce liquid phase at sintering temperature and occurrence liquid phase sintering, were used and compared with B₄C without additive.

As shown **Fig.2**, Sintered density was raised up to 93.5 % of theoretical density in the case of additive A, which was higher than 88.3 % of B₄C without additive. Furthermore, the density of 97.3 % was available with additive B by utilizing liquid phase sintering. As shown in **Fig.3**, the grain size of B₄C was increased with increasing of amount of additive B.

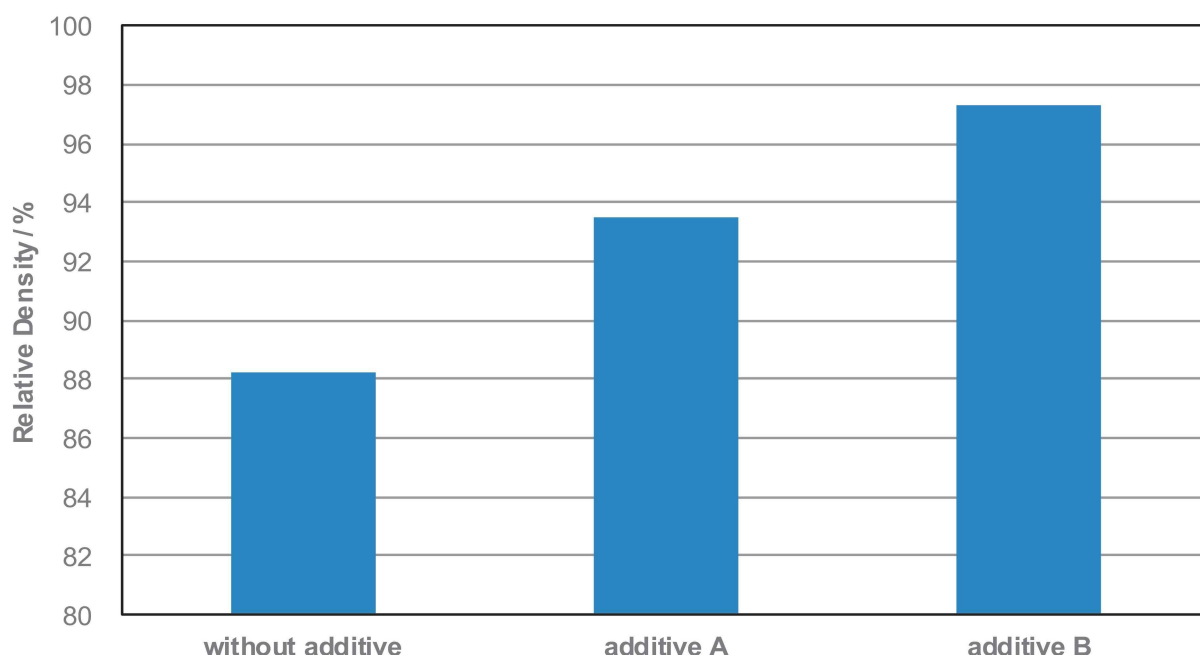
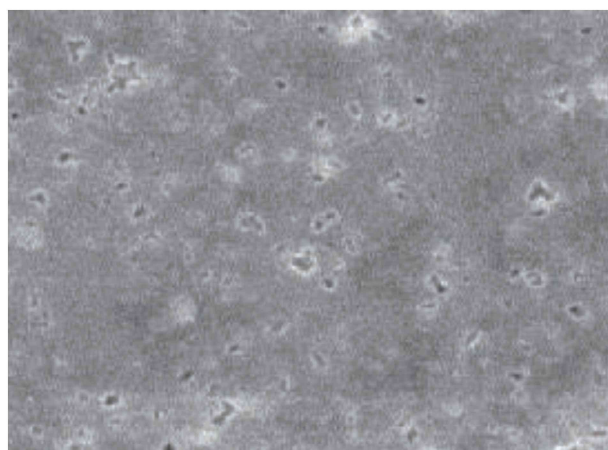
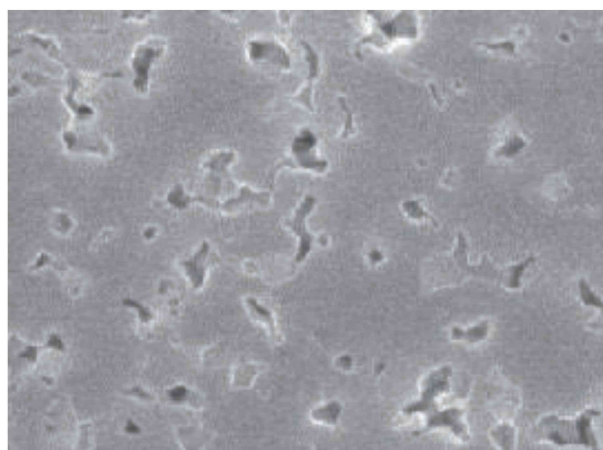


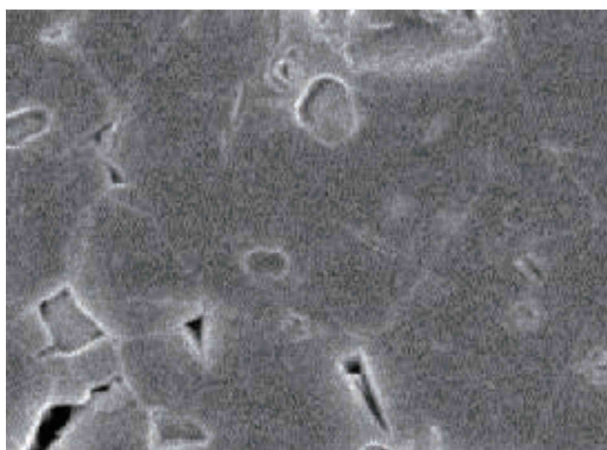
Fig. 2 Relative density of B₄C ceramics with or without additive.



(a) without additive



(b) 0.6 wt% addition



(c) 3 wt% addition

5 μ m

Fig. 3 Effects of additive on microstructural change of B₄C ceramics.

2・2 B₄C の組織制御による強度，加工性の改善

前項で述べた通り，B₄C の緻密化には，液相焼結が有効であることが確認されたが，緻密化に伴い，急速な粒成長が起こり，粗大粒子が生成し，強度を著しく低下させてしまう問題が生じた。また，セラミックスの加工性には，結晶粒の粒径が大きく影響することが知られており⁴⁾，強度と加工性を改善するための組織制御を検討した。

前述の添加剤 B を添加した場合，100 μ m 以上の粗大粒が発達することから，粒成長抑制のために他の添加剤の追加を検討した。粒成長抑制材としては，B₄C と反応せず，焼成時に熔融しない高融点の粒子を添加することで，ピンニング効果により粒成長を抑制することを試みた。その結果，**図 4** に示す通り，結晶粒径を 30 μ m 以下に制御した材料が得ることができた。この材料の加工性を評価した結果，**図 5** に示すように SiC より高硬度であるにも関わらず，B₄C

2・2 Improvement of strength and machinability of B₄C by controlling the microstructure

As mentioned above, it was confirmed that the liquid phase sintering is effective for densification of B₄C. However grain growth occurred rapidly and resulted in the degradation of strength. Also it is known that the machinability of ceramics materials is affected by grain size. For these reasons, it was necessary to control the microstructure to improve strength and machinability⁴⁾.

In the case of additive B, the large grains over 100 μ m was developed, so addition of grain growth inhibitor was investigated. The addition of high melting point material which does not react with boron carbide and does not melt during sintering was tried for inhibition grain growth by the pinning effect. As the result, the grain size of sintered body was controlled less than 30 μ m as shown **Fig.4**. A machining resistance of the boron carbide with grain growth inhibitor was almost same value with silicon carbide as shown in **Fig.5**, the machinability of boron

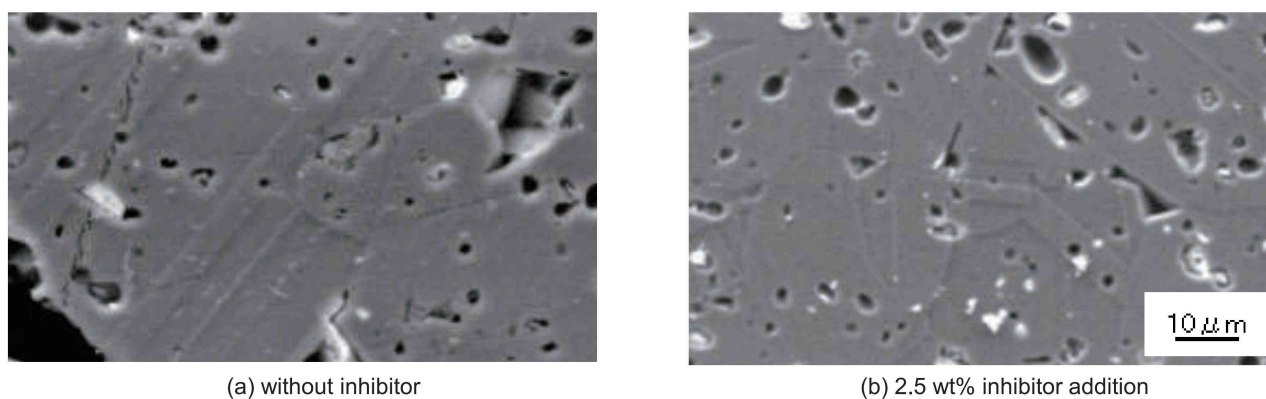


Fig. 4 Effect of Inhibitor on microstructure of B₄C ceramics.

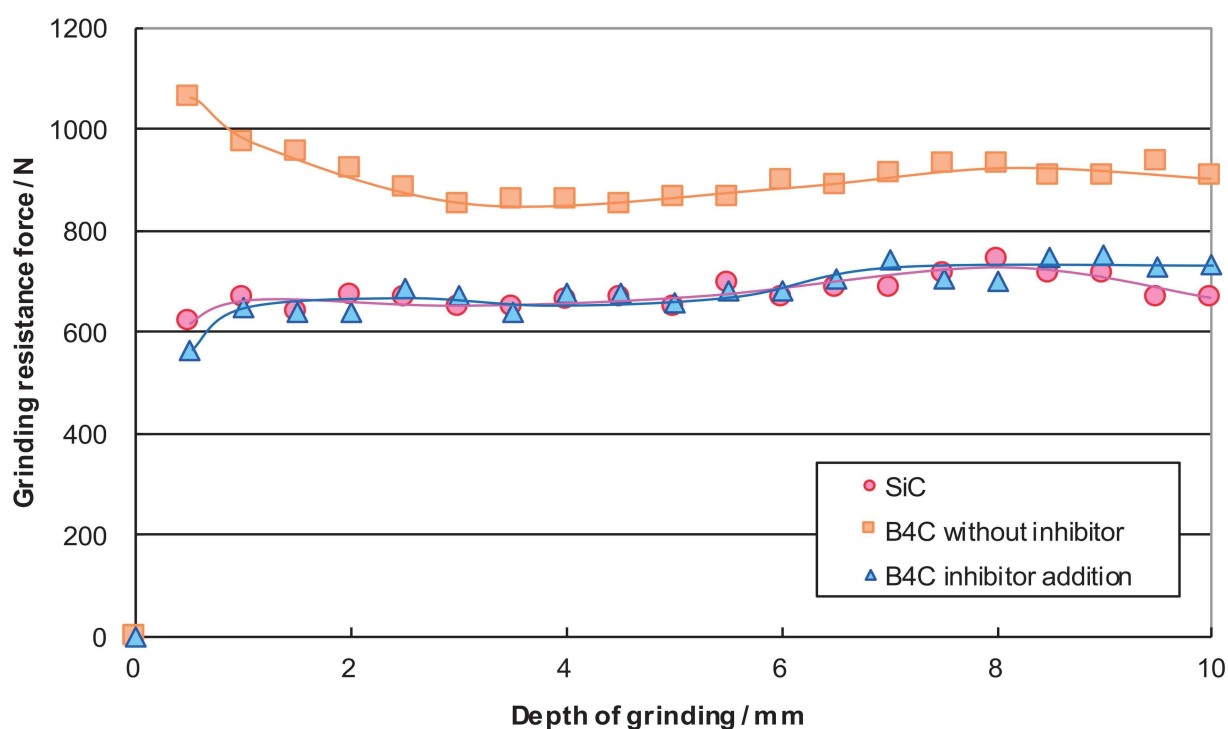


Fig. 5 Grinding resistance force of SiC and B₄C ceramics.

で SiC と同等の研削抵抗で加工できる材料が得ることに成功した。

更に組織制御による特性改善の検討を進めることで、現在、表 2 に示すように SiC より高い比剛性を有する材料としてプロパー化し、図 6 のような複雑形状品の製造も可能となった。

3 低熱膨張セラミックス

3・1 低熱膨張セラミックス (NEXCERA™)

当社の低熱膨張セラミックスは、コーディエライト (2MgO・2Al₂O₃・5SiO₂) をベースとした材料であり、

carbide was successfully improved.

Furthermore, Improvement of properties by microstructure controlling was investigated and boron carbide ceramics with higher specific stiffness than silicon carbide was obtained. The developed boron carbide ceramics is able to fabricate a complex shape parts as shown in Fig.6.

3 Ultra Low thermal expansion ceramics

3・1 Ultra Low thermal expansion ceramics (NEXCERA™)

Our ultra-low thermal expansion ceramics, which is based on cordierite, 2MgO・2Al₂O₃・5SiO₂ was originally

Table 2 Characteristics of SiC and B₄C

	SiC	B ₄ C
Code	C101	BC101
Bulk Density / g·cm ⁻³	3.16	2.42
Flexural Strength / MPa	490	400
Young's Modulus / GPa	430	385
Specific Stiffness / GPa·(g·cm ⁻³) ⁻¹	136	159

新日本製鐵（現日本製鐵）先端技術研究所で開発した材料⁵⁾を量産用に材質改善し、NEXCERAの名称を商標登録して商品化している。

この材料の特徴は、図7に示すように、非常に熱膨張係数が小さく、室温近傍ではほぼゼロ膨張を示すことである。

NEXCERAの代表的な微構造は、図8に示すように、主相はコーディエライトの結晶粒であり、その結晶粒の間隙を埋める少量の粒界相により構成されている。このように材料の大部分が結晶相のコーディエライトで構成されているため、ガラス相から結晶相を析出させて作製される低熱膨張ガラス（Low Thermal Expansion Glass：LTEG）よりも高剛性の材料を得ることが可能である。また、粒界相成分を調整することにより、表3に示すように、多品種の低熱膨張セラミックスを開発してきた。

NEXCERAの低熱膨張は、コーディエライト結晶相が室温近傍でわずかなマイナス膨張を示すため、プラス膨張の粒界相との組み合わせにより、室温領

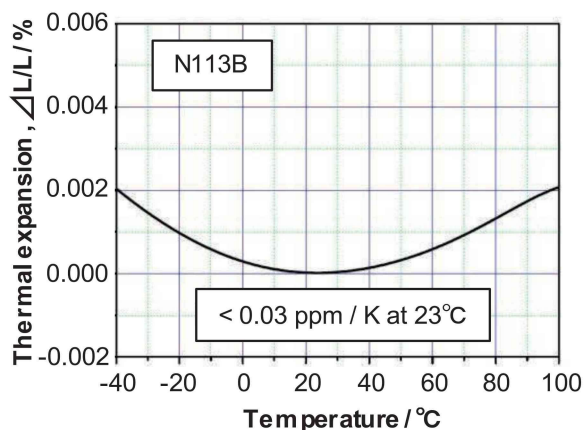


Fig. 7 Thermal expansion behavior of NEXCERA™.

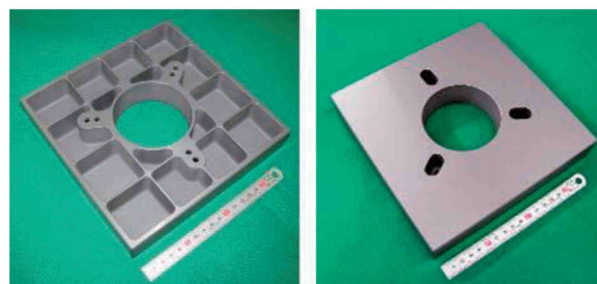


Fig. 6 Prototype of rib-structure model of B₄C ceramics.

developed in Advanced Technological Research of Nippon Steel Corporation⁵⁾. It was modified for the mass production and registered trademark of “NEXCERA”. NEXCERA has extremely low coefficient of thermal expansion and shows nearly zero expansion at room temperature as shown in Fig.7.

The main phase of this materials is cordierite crystal grain and amounts of grain boundary phase is small as shown in Fig.8. Thus, the material is consist of crystalline cordierite, it results in high stiffness comparing with low thermal expansion glass which consist of glassy phase and crystalline phase crystallized from glassy phase. We developed several type of low thermal expansion ceramics as shown in Table 3.

The thermal expansion of NEXCERA is controlled by combination of cordierite grains and grain boundary,

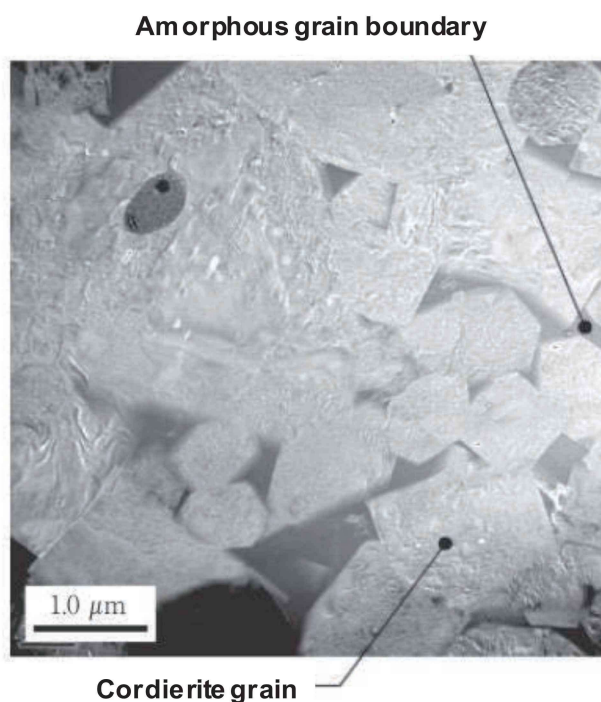


Fig. 8 Microstructure of NEXCERA™.

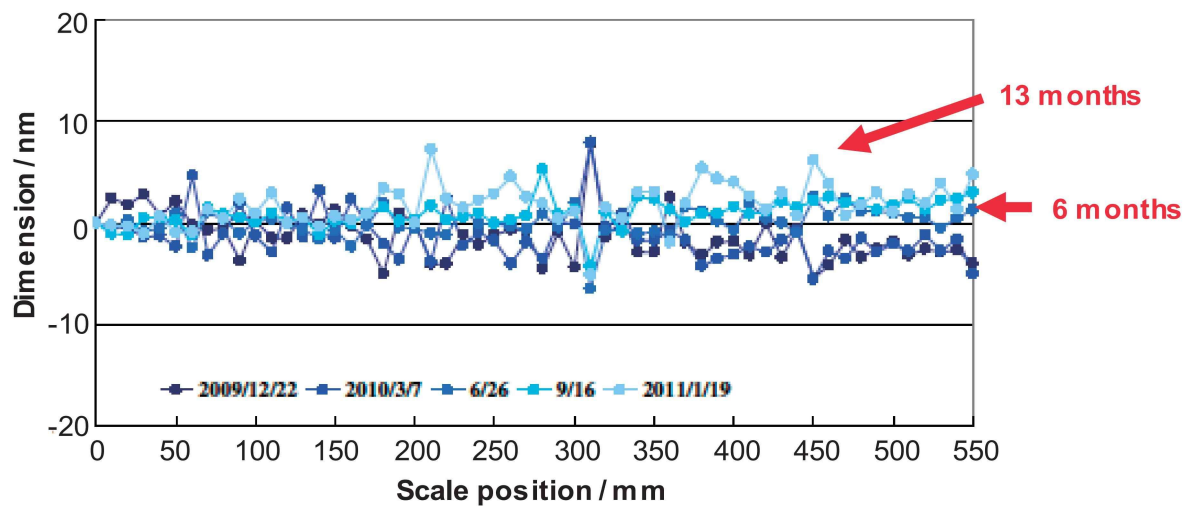
Table 3 Characteristics of NEXCERA™ and LTEG

Code	N113B	N117B	N118C	N119C	CD107	LTEG
Color	black	black	blue-grey	light blue-grey	blue-grey	
Bulk Density / g·cm ⁻³	2.50	2.55	2.58	2.50	2.57	2.50
Young's Modulus / GPa	130	140	140	130	143	60 - 90
Flexural Strength / MPa	210	230	220	166	230	50 -100
Thermal Expansion Coefficient at 23 °C / 10 ⁻⁶ K ⁻¹	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03*	< 0.03
Thermal Conductivity / W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	3.7	4.2	4.5	4.3	4.7	1.46

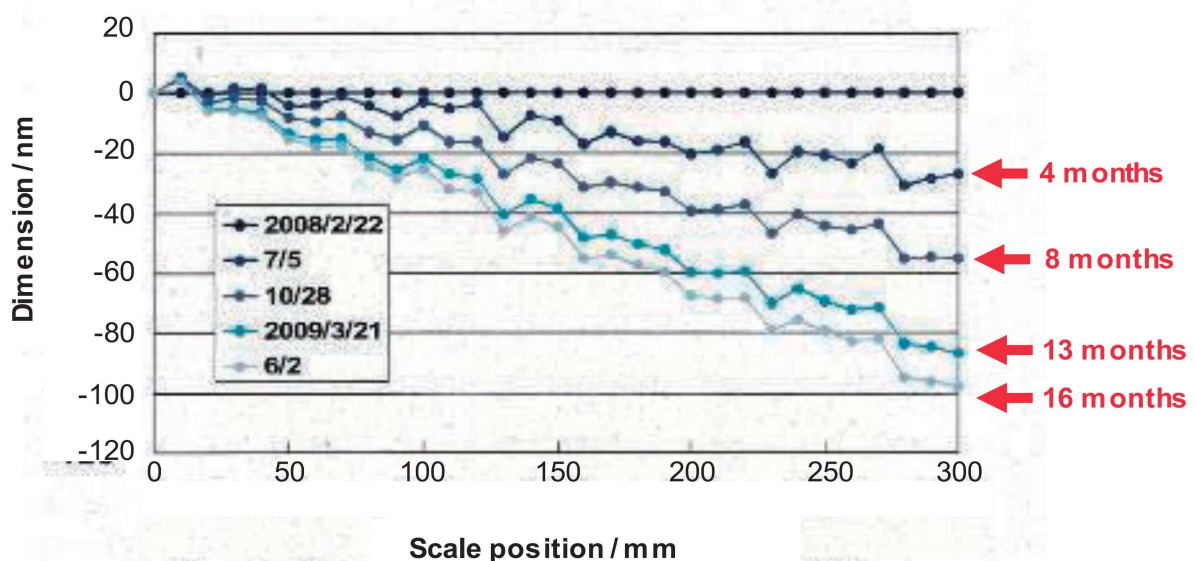
※at 22 °C

域での熱膨張をゼロ膨張に調整する設計をしており、両者の熱膨張差が小さいため焼成後の残留応力が小さく、経時変化や熱サイクルに対して安定な材料である。

that is, cordierite with slightly minus thermal expansion at room temperature and grain boundary with plus expansion are combined to be the thermal expansion adjusted to

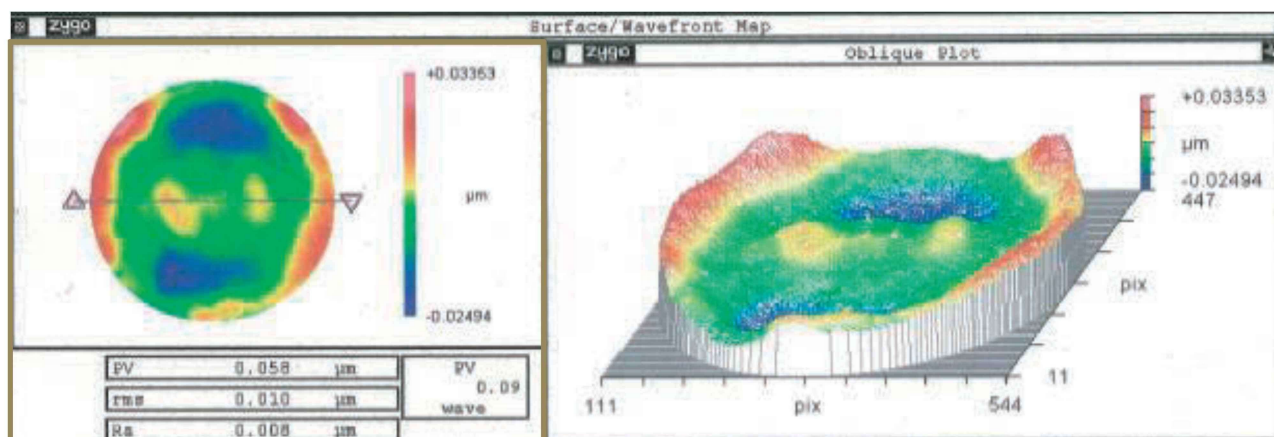


(a) NEXCERA



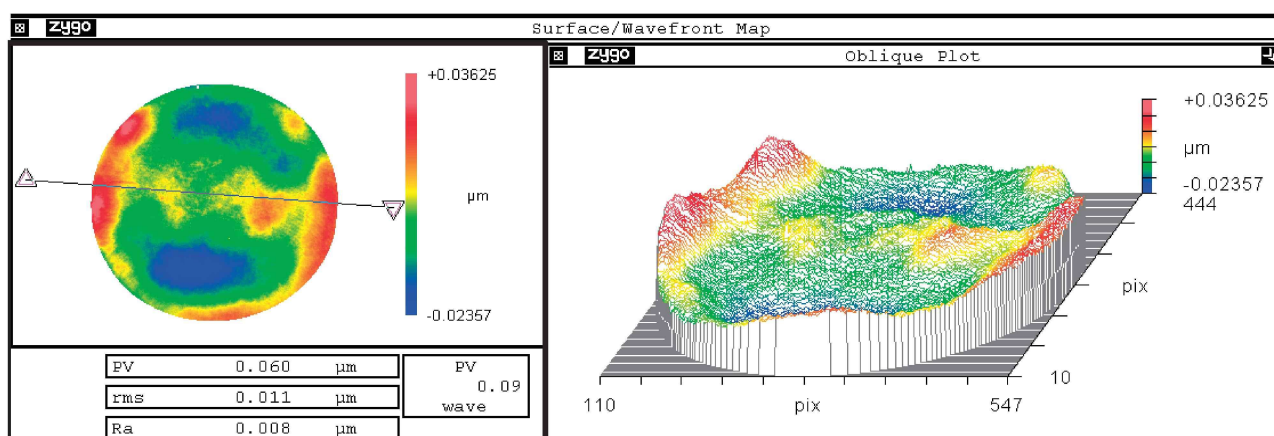
(b) Low thermal expansion glass

Fig. 9 Long-term stability of NEXCERA™ and low thermal expansion glass^(6,7).



Flatness 0.058 μm

(a) Before test



Flatness 0.060 μm

(b) After Test

Fig. 10 Flatness change of NEXCERA™ in thermal cycle test.

ることも LTEG より優れている特長の1つである。

図 9 は NEXCERA と低熱膨張ガラスの寸法の経時変化を評価した結果であるが、NEXCERA が長さ 550 mm での 13 ヶ月後の寸法変化が ± 4.6 nm だったのに対して、低熱膨張ガラスでは長さ 300 mm での寸法変化が 90 nm であり、NEXCERA が優れた経年安定性を有することが確認されている^{6,7)}。

また、NEXCERA で $\phi 340$ mm の鏡面加工サンプルを作製し、R.T. $\rightarrow -20$ $^{\circ}\text{C} \times 11$ h $\rightarrow 60$ $^{\circ}\text{C} \times 11$ h $\rightarrow$ R.T. の熱サイクルを 4 回繰り返す熱サイクル試験を行い、試験前後の形状変化を調査した。その結果、図 10 に示すように熱サイクル前後の平面度は 2 nm の変化しか生じず、熱サイクル安定性にも優れた材料であることを確認することができた。

almost zero at room temperature.

Since the thermal expansion difference of cordierite and grain boundary is small, the residual stress in material is getting low. As the result the obtained material has excellent characteristics such as stability at long-term and thermal cycle.

Fig.9 shows the comparison of long-term dimensional stability of NEXCERA and low thermal expansion glass, the dimension change of NEXCERA with 550 mm length was only ± 4.8 nm after 13 months, the change of low thermal expansion glass with length of 300 mm was 90 nm. Thus it was confirmed that NEXCERA has excellent long-term stability^{6,7)}.

Mirror-finished NEXCERA sample of 340 mm in diameter was tested by thermal cycle test of 4 times cycle of R.T. $\rightarrow -20$ $^{\circ}\text{C} \times 11$ h $\rightarrow 60$ $^{\circ}\text{C} \times 11$ h $\rightarrow$ R.T.. The flatness of

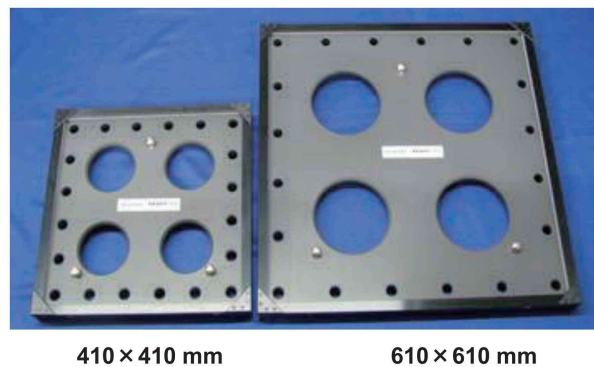


Fig. 11 Hole plate for calibration of CMM.

3・2 低熱膨張セラミックスの応用展開

以上のように NEXCERA は、極めて小さい熱膨張率を有するとともに、高剛性で経年安定性、熱サイクル安定性に優れた材料であることから、各種の精密測定装置の校正用基準器として採用されている⁸⁾。

図 11 は、三次元座標測定機 (CMM) の精度検査等に用いられる NEXCERA 製ホールプレートであり、この他にも CMM 用のステップゲージ、JIS B 7506:2004 準拠のブロックゲージなどで実用化されている。また、新たな用途として、宇宙光学用部材への適用も検討を進めており、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と共同で衛星用ミラーの試作等も進めている^{9,10)}。

4 機能性セラミックスへの展開

上述したような精密装置の部材に用いられる構造用セラミックスの他に、当社では機能性をもったセラミックスの開発も進めてきた。その1つが、静電チャック用誘電体材料である。

静電チャックは、Si ウエハを吸着し固定させるため

sample was changed only 2 nm after thermal cycle test. It was confirmed that NEXCERA has high thermal cycle stability.

3・2 Application of low thermal expansion ceramics

NEXCERA has extremely low thermal expansion, high stiffness and high stability of aging change and thermal cycle, so NEXCERA is used for standards for calibration of precise dimension measuring apparatus⁸⁾.

Fig.11 shows hole plate made by NEXCERA used for precision examination of coordinate measuring machine (CMM). Also NEXCERA is used for step gage for CMM, block gage based on JIS B 7506:2004 and so on. In new application, NEXCERA is investigated to application to space optics. Experimental production of a mirror for space telescope was undertaken in cooperation with Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)^{9,10)}.

4 Development of functional ceramics

Although we developed structural ceramics used in precision equipment as described above, we have also developed functional ceramics. One of them is dielectric ceramic materials for electrostatic chuck (ESC).

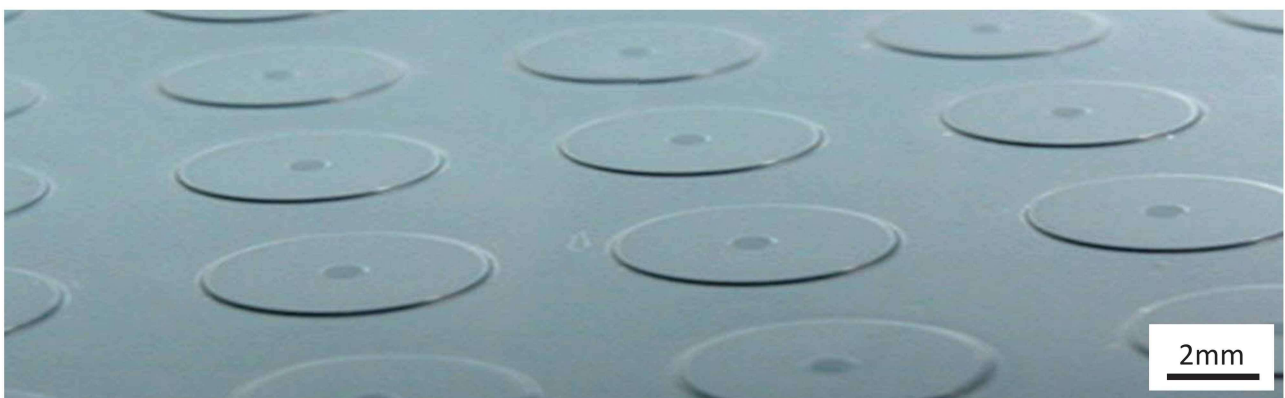


Fig. 12 Pin structure of electro static chuck.

の部品であり、ドライエッチング装置等で用いられている。現在、当社が製品化している静電チャック用材料は、JR（ジョンセン・ラーベック）力型の材料であり、 Al_2O_3 をベースに、電気抵抗を制御することにより、高い吸着力と優れた脱着応答性を実現した材料であり、ポアレスの状態まで緻密化することによりパーティクルの発生を抑制した材料である。また、図12に示すように、高精度のピン形状加工技術により、ウエハとの接触面積が0.75 %と非常に小さい静電チャックの製造も可能である。

5 結言

セラミックス事業部では、以上で述べてきた材料開発だけではなく、半導体製造装置用部材等で要求される複雑形状品の超精密加工技術の高度化を進めることによって、ユーザーのニーズに答えてきた。今後のセラミックスの開発については、業界全般を見ても一般的なモノリシックのセラミックス材料の開発はやり尽くされた感があり、新たな着眼点から発想した材料設計が必要になっていくと考えられる。そのためには、材料設計はもちろんのこと、粉体処理技術、成形技術、焼成技術といったプロセス全般の新規技術の開発、導入も含め、総合的な技術開発が必要である。

更により高度化する部材のニーズに対応するためには、多様な加工技術を導入していく必要がある。将来的にセラミックスの適用を拡大していくためには、IoTやAI等、今後大きく変化していく社会環境の中で、的確にニーズを捉えてタイムリーに材料、技術を提供していくことが必要である。そのためには、今後も材料開発や製造技術開発等のシーズ技術の開発にも力を入れ、長期的な視野に基づいた材料開発・技術開発を推進することがセラミックス事業の発展には不可欠である。

文献

- 1) 菅野善則, 川瀬薫, 中野喜久男:窯業協会誌 **95** [11] 1137-1140 (1987).
- 2) 熊澤猛, 関根圭人, 松岡鮎美:セラミックス **49** [2] 122-125 (2014).
- 3) Hyukjae Lee, Robert F. Speyer : J. Am. Ceram. Soc. **85** [5] 1291-93 (2002).
- 4) Roy W. Rice, Carl Cm. Wu, Fred Boichelt : J. Am. Ceram. Soc. **77** [10] 2539-2553 (1994).
- 5) 野瀬哲郎, 高橋史明, 中林正史, 森田英彦, 小

The ESC is the part to attract and fix the silicon wafer by electrostatic using in equipment such as dry etching apparatus. The materials for electrostatic chuck which we manufacture currently is Johnsen-Rahbek (JR) type. The materials is alumina based ceramics which is controlled electrical resistance to obtain high attraction force and high desorption response. Also the materials is pore-free ceramics, so it is suppressed the generation of particles. It is available to reduce the contact area with silicon wafer to 0.75 % by precision machining of pin shape as shown in Fig.12.

5 Conclusion

We developed not only materials development described above, also we developed the precision machining of complex shape required in semiconductor manufacturing equipment to provide customer needs. Considering about the ceramics development in future, the development of conventional monolithic ceramics seems to be almost done, so it is necessary to design the materials from new viewpoint. To do new development, overall technical development and introduction of new technologies, including powder process, forming process and sintering process, is necessary.

Also it is necessary to introduce various machining technology to answer to advancement of needs. To extend ceramics application for the future, it is necessary to provide materials and technology matching with needs in great change of social environment, such as IoT and AI popularization. For future development of ceramics business, development of seeds technology in materials and manufacturing technology based on long-term vision is very important.

References

- 1) Yoshinori Kanno, Kaoru Kawase, Kikuo Nakano: Yogyo-Kyokai-Shi **95** [11] 1137-1140 (1987).
- 2) Takeshi Kumazawa, Kiyoto Sekine, Ayumi Matsuoka : Ceramics Japan **49** [2] 122-125 (2014).
- 3) Hyukjae Lee, Robert F. Speyer : J. Am. Ceram. Soc. **85** [5] 1291-93 (2002).
- 4) Roy W. Rice, Carl Cm. Wu, Fred Boichelt : J. Am. Ceram. Soc. **77** [10] 2539-2553 (1994).
- 5) Tetsuro Nose, Fumiaki Takahashi, Masashi Nakabayashi, Hidehiko Morita, Nobumasa Kosugi : Shinnittetsu Gihou **374** 6-11 (2001).
- 6) Akira Takahashi : Proceedings of 2009 JSPE Autumn

杉展正：新日鉄技報 **374** 6-11 (2001).

- 6) 高橋顕：精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 715-716 (2009).
- 7) 高橋顕：精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 485-486 (2012).
- 8) 菅原潤, 松浦章彦, 佐藤理, 和合健, 大西徹：精密工学会誌 **81** [2] 117-122 (2015).
- 9) 菅原潤, 三ヶ島文丙, 神谷友裕：精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 75-76 (2017).
- 10) 神谷友裕, 水谷忠均：第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集 2J20 (2018).

Meeting 715-716 (2009).

- 7) Akira Takahashi：Proceedings of 2012 JSPE Spring Meeting 485-486 (2012).
- 8) Jun Sugawara, Akihiko Matsuura, Osamu Sato, Takeshi Wago, Tohru Ohnishi: J. of the Japan Precision Engineering **81** [2] 117-122 (2015).
- 9) Jun Sugawara, Bumpei Mikashima, Tomohiro Kamiya : Proceedings of 2017 JSPE Autumn Meeting 75-76 (2017).
- 10) Tomohiro Kamiya, Tadahito Mizutani: The 62nd Proceedings of the Space Sciences and Technology Conference 2J20 (2018).