

自動車の電動化を支える 窒化ケイ素セラミックス製品

Silicon Nitride Ceramic Products Supporting Development of Electrified Vehicles

那波 隆之 NABA Takayuki 寶槻 直十 HOTSUKI Naoto 長谷川 浩司 HASEGAWA Koji

カーボンニュートラルに関し、非電力部門が取り組んでいる代表例として、近年、自動車の電動化が加速している。電動車(xEV^(注1))では、駆動用モーターとそれを制御するインバーターを含むパワーコントロールユニット(PCU)が対となっており、それらの更なる小型化・高出力化及び高信頼性・軽量化が求められている。

東芝マテリアル(株)は、このようなxEV市場のニーズに応えるため、窒化ケイ素(Si₃N₄)セラミックス製品を開発している。急速に進むそれらの採用を見据えて、製造工程での環境負荷低減にも配慮しながら、モーター用ベアリングとして高強度で高信頼性のSi₃N₄ベアリングボール及びPCU向けとして高放熱性のパワー半導体用Si₃N₄絶縁基板の更なる開発に取り組んでいる。

As part of the efforts being made toward achieving carbon neutrality in non-electric power sectors, the replacement of internal combustion engine (ICE) vehicles with electrified vehicles (xEVs), including electric vehicles (EVs), hybrid electric vehicles (HEVs), and fuel cell vehicles (FCVs), has recently been accelerating. There is consequently demand in the xEV market for the traction motor and inverter-equipped power control unit (PCU), which are commonly paired in such vehicles, to have higher output and reliability and to be more compact and lightweight.

Toshiba Materials Co., Ltd. is developing silicon nitride (Si₃N₄) ceramic products in response to these needs of the xEV market. In order to meet the increasing demand for the application of Si₃N₄ ceramic products, we are making efforts to develop Si₃N₄ bearing balls for traction motors offering high strength and high reliability, as well as Si₃N₄ insulated substrates capable of efficiently dissipating the heat of power semiconductors that are being widely adopted in PCUs. In parallel with this development work, we are also taking into consideration reduction of the environmental burden in the manufacturing processes for these products.

1. まえがき

深刻化する地球温暖化に対して、世界的にカーボンニュートラルに向けた取り組みが加速している。自動車分野においても、欧州を筆頭に、2025年以降のエンジン車の販売禁止や電気自動車(EV)を含む排出ガスゼロ車販売義務制度導入などの動きが活発化し、自動車の電動化シフトが近年際立ってきている。

東芝マテリアル(株)は、東芝グループ内でセラミックスをはじめとした機能材料、部品の開発、製造を行っており、中でもSi₃N₄セラミックス製品は、xEV向けに年々事業規模の拡大が続いている。ここでは、xEVのパワーエレクトロニクスシステム部品として注目されているSi₃N₄製ベアリングボール(以下、SiNボールと略記)及びパワー半導体用絶縁基板(以下、SiN基板と略記)について、製造工程の環境負荷低減に向けた取り組みを交えながら、これまでの開発経緯、製品の特長、及び応用展開について述べる。

(注1) 電気自動車(EV)、プラグインハイブリッド自動車(PHEV)、ハイブリッド自動車(HEV)、燃料電池自動車(FCEV)の総称。

2. Si₃N₄材料開発と応用展開

2.1 Si₃N₄材料開発

Si₃N₄は、優れた機械的特性を持ったセラミックスとして知られていたが、量産性や製造コストなどに課題があった。当社は、これらの課題を克服し、1984年には光洋精工(株)(現(株)ジェイテクト)との共同開発により、高剛性で高信頼性を持つベアリングとして世界で初めて⁽¹⁾SiNボールを製品化し、その後1986年に、“TSN-03”として本格的な量産を開始した^{(1), (2)}。

一方、xEV向けなどパワー半導体での高信頼性及び高放熱化要求に応えるため、当社はSiNボールで示されたSi₃N₄の優れた機械的特性に、いち早く着目した。原料粉末や、焼結助剤、焼結条件などの最適化により、1996年に、高強度を維持しながら、従来、アルミナ並みの17～32 W/(m・K)程度だった熱伝導率を、70 W/(m・K)に向上させたパワー半導体モジュール用高熱伝導SiN基板の量産化に、世界で初めて⁽³⁾成功した。その後1999年には、“TSN-90”として、熱伝導率を90 W/(m・K)まで向上させている⁽²⁾。

SiNボールと、SiN基板単体及びそれを用いた活性金属貼⁽³⁾による銅(Cu)貼り回路基板(以下、SiN-AMC(Active Metal Brazed Copper)基板と略記)の両基板の外観を図1に、Si₃N₄を含むセラミックスの主要な特性を表1⁽²⁾に示す。

2.2 Si₃N₄の応用展開

Si₃N₄は、カーボンニュートラルの実現に向けた、風力発電などの各パワーエレクトロニクスシステムのモーターや、発電機、インバーターなどへも展開されてきた。近年では、自動車のxEV化、特にEV化の加速により、EV駆動用モーター向けSiNボール、及びパワー半導体が搭載される同モーター制御用PCU向けSiN基板の採用が急増しており、現在ではEV分野において両製品は欠かせないキープーツとなっている(図2)。当社の両Si₃N₄製品を合わせた事業規模は、切削工具などを含むSi₃N₄全製品の中でトップシェア⁽⁴⁾となっている。

2.2.1 SiNボールの動向

SiNボールは特に疲労特性と耐摩耗性に優れ、2001年に制定されたベアリング用Si₃N₄規格のASTM F 2094(ASTM国際規格 F 2094)や、2009年に制定され

たISO 26602(国際標準化機構規格 26602)は、当社の材料がベースになっている。TSN-03は、これらの規格の最高レベルであるクラスIに相当し、競争優位性を築くことで、高シェア維持の要因となっている。

通常の高炭素クロム軸受鋼(SUJ)製スチールボールと比較したSiNボールの特長を表2⁽²⁾に示す。スチールボールと比較して、SiNボールは軽量でベアリングの高速回転に適しているとともに、高硬度・高耐摩耗性による長寿命化や、絶縁体であることによるベアリングの電食防止などに寄与できる。

EVでは、充電時間短縮のための高電圧化に加え、小型化及び航続距離伸長を目的として、PCU向けの炭化ケイ素(SiC)パワーデバイスが採用され始めているが、一方でそれがモーター内のベアリングの電食リスクを高めている。低損失であるSiCパワーデバイスは、高速スイッチング及び高周波化が可能であることも特長だが、それによりdv/dt(スイッチング時の電圧変化率)が大きくなり、その結果としてコモンモード電流が増加するためである^{(5), (6)}。SiNボールの

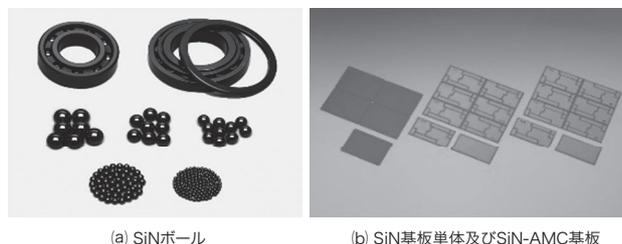


図1. Si₃N₄製品外観

SiNボールはEV駆動用モーターに、SiN基板はxEVのパワー半導体モジュールに実装される。

Si₃N₄ bearing balls and substrates with high thermal conductivity

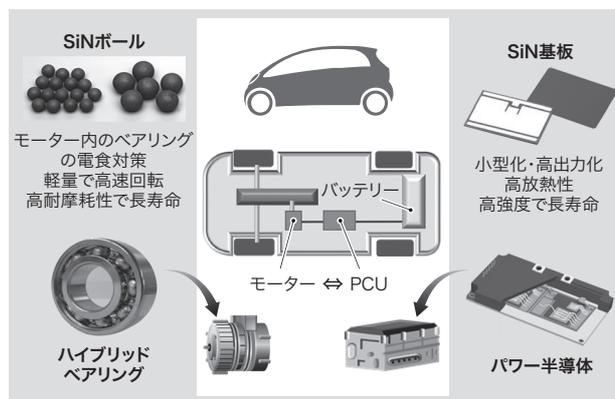


図2. Si₃N₄製品のEVへの応用

Si₃N₄製品は、EV駆動用モーター及びPCUにおいて、欠かせないキープーツとなっている。

Application of Si₃N₄ products to EVs

表1. Si₃N₄を含むセラミックスの主要特性

Main characteristics of various ceramics including Si₃N₄

材 質	Si ₃ N ₄ (SiN)		AlN	Al ₂ O ₃	ZTA	評価方法
	ボール用 (TSN-03)	基板用 (TSN-90)	窒化 アルミニウム	アルミナ	ジルコニア強化 アルミナ	
熱伝導率 (W/(m・K))	20	90	170~230	17~32	17~30	JIS R 1611, レーザーフラッシュ法
曲げ強度 (MPa)	1,000	680	>300	350~470	550~800	JIS C 2141, 3点曲げ試験
破壊靱性(じんせい)値 (MPa・m ^{1/2})	6~8	6.5	2.5~3.5	3~4	5~6	JIS R 1607, IF法
線膨張係数 (×10 ⁻⁶ /K)	3.0	3.4	4.5~4.6	6.7~7.2	7~8	JIS C 2141, TMA法
絶縁耐力 (kV/mm)	>14	25	15	>15	>10	JIS C2110-1
比誘電率	7~9	8	8~9	9~10	10~12	JIS C 2141

ZTA: Zirconia Toughened Alumina JIS: 日本産業規格 IF: Indentation Fracture TMA: Thermomechanical Analysis(熱機械分析)

*表の値は参考値。()内は当社製品名。アルミナ・ジルコニア強化アルミナは他社セラミックス基板メーカー Webサイトによる(当社調べ)

表2. SiNボールの特長

Features of Si₃N₄ bearing ball

項目	Si ₃ N ₄	SUJ	セラミックベアリングの特長
耐熱性 (°C)	800	180	高温下で高負荷能力を維持
密度 (Mg/m ³)	3.24	7.8	転動体(玉又はころ)の遠心力を低減 →寿命向上, 昇温防止
線膨張係数 (x10 ⁻⁶ /K)	3.0	12.5	昇温による内部すきまの変化が小 →振動防止, 予圧量の変化が小
硬度 (HV (20 kgf))	1,500	750	
ヤング率 (GPa)	308	208	転がり接触部の変形が小→高剛性
ポアソン比	0.29	0.3	
耐食性	良	不良	酸・アルカリ溶液中など特殊環境下での使用が可能
磁性	非磁性体	強磁性体	強磁場内での磁化により生じる回転変動が小
導電性	絶縁体	導電体	電食を防止(発電機, モーター用など)
素材の結合状態	共有結合	金属結合	油膜切れによる接触部の凝着が小

HV: ピッカース硬さ
*表の値は参考値

採用は、電食リスク解消の最善策とされており⁽⁶⁾、EV化の加速を支えている。

2.2.2 SiN基板の動向

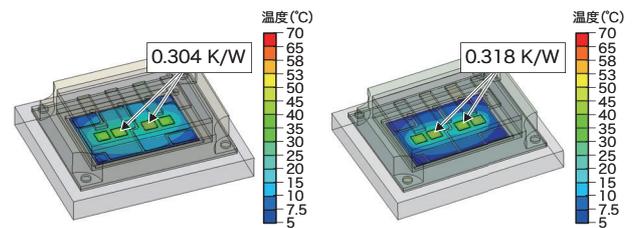
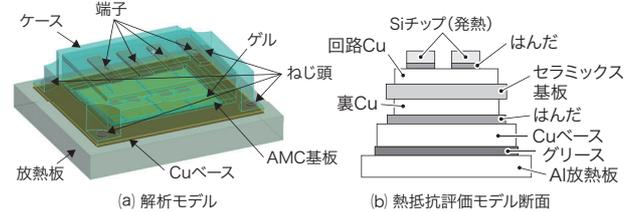
パワー半導体用絶縁基板として主力だったアルミナ基板及び窒化アルミニウム(AIN)基板と比べて高い曲げ強度と破壊靱性(じんせい)値を持つSiN基板を適用して、1996年に、産業用パワー半導体の絶縁基板としてSiN-AMC基板が開発された⁽³⁾。基板の熱伝導率を90 W/(m・K)まで向上させたのと同時に、Si₃N₄は高強度で薄型化が可能であることから、その基板厚を、従来の0.635 mmから0.32 mmまで薄くして放熱性を高めた。特に、小型化、高出力化、及び高信頼性が要求されるPCU向けの需要が高まっている現在、PCUに搭載されるパワー半導体では、従来のアルミナ基板やAIN基板からSiN-AMC基板への置換や、SiN基板単体での採用が進展している^{(3), (5), (7)}。

またPCUの更なる小型化や半導体素子の発熱密度の増加に対する放熱性向上を主目的として、AMC基板の回路を形成するCu(以下、回路Cuと略記)をより厚くする要求が高まっている。一般に、回路Cuが厚くなるとセラミックス及び接合界面の応力がより大きくなるため、冷熱サイクルで早期にCu剥離が起こりやすくなり信頼性が低下するが、当社では、顧客仕様を満足する冷熱サイクル性能を持ったSiN-AMC基板を開発した。

SiN基板を薄くして回路Cuを厚くしたAMC基板構造に対するPCUの放熱性について、シミュレーションで検証した結果を図3に示す。AIN基板より熱伝導率の低いSiN基板でも、従来型のAIN基板よりもPCUの熱抵抗が約4%低減しており、その高放熱化効果が確認できた。

AMC基板・回路厚さ構成

材種	回路Cu厚	セラミックス厚	裏Cu厚
AIN (mm)	0.3	0.635	0.25
SiN (mm)	0.8	0.32	0.7



SiN基板厚0.32 mm, 回路Cu厚0.8 mm AIN基板厚0.635 mm, 回路Cu厚0.3 mm

(c) シミュレーション結果

Si:シリコン Al:アルミニウム

図3. 熱抵抗シミュレーション結果

厚さが0.32 mmで回路Cu厚さが0.8 mmのSiN基板の熱抵抗は、熱伝導率の大きいAIN基板で厚さが0.635 mm, 回路Cu厚さが0.3 mmの場合より約4%小さくなる。

Results of simulations of thermal resistance

3. 製造工程の環境負荷低減に向けた取り組み

SiNボール及びSiN基板は、図4に示すように、原料からの成形、脱脂、焼結工程などを経て製造される。脱脂、焼結の熱処理工程には、両製品ともバッチ式電気炉が使われており、1工程で数〜数十時間の長い稼働時間を要するため多くの電力を必要とする。熱処理工程の時間短縮は、炉の利用効率化による生産性向上だけでなく、消費電力削減による環境負荷低減効果も大きい。しかし、これら熱処理工程は品質・作業安全面を踏まえた長年のノウハウによって処理条件が設定されており、各炉に固有の設計があるため処理時間短縮は容易ではない。そこで当社は、東芝生産技術センターとのコラボレーションにより、マスターシタリングカーブ理論⁽⁸⁾に基づいた熱処理条件の最適化技術(マスターカーブ技術)を開発している⁽⁹⁾。ここでは、SiNボールの脱脂工程に対するマスターカーブ技術について述べる。

セラミックス原料の製品形状成形では、原料に有機化合物を主体とするバインダーを調合したものを利用する。セラミックス成形体を粒成長・緻密化させる焼結工程の前に、成形体に含まれる有機成分を取り除く必要がある。これが

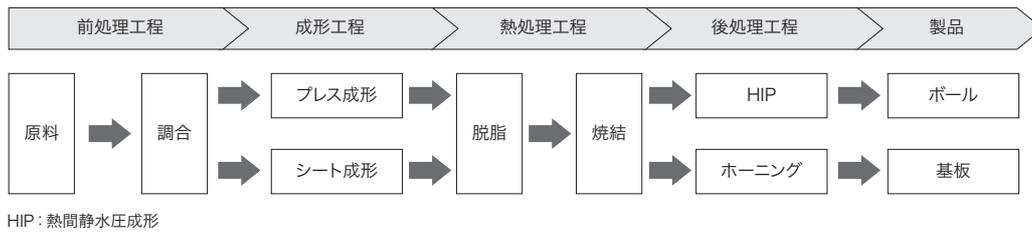


図4. Si₃N₄製品の製造工程

SiNボール及びSiN基板製品は、原料からの成形、脱脂、焼結工程などを経て製造される。

Manufacturing processes of Si₃N₄ products developed by Toshiba Materials Co., Ltd.

脱脂である。この工程では、セラミックス成形体に含まれる有機成分を熱分解し、可燃性ガスとして炉外に放出し、バーナーで燃焼分解させる。バインダーの熱分解速度（脱脂速度）は、セラミックス品質に大きく影響するため、最適な脱脂速度に制御する必要がある。更に、炉内の多数の成形体から放出される可燃性ガスは、炉の燃焼処理能力を超えないよう作業安全性を十分考慮する必要がある。脱脂でのマスターカーブ技術は、セラミックス成形用粉のTG-DTA（熱重量示差熱分析）などの熱分析データを用いてセラミックスの最適な脱脂速度を求め、炉固有の設計に応じた適切なヒーター温度と熱処理時間を得るための手法である。

図5は、SiNボール向け脱脂炉のヒーター温度プロファイル例である。従来条件では安全品質マージンを大きくとっていたが、マスターカーブ技術によりこのマージンを必要最小限に最適化した。ヒーターの昇温速度を従来条件より最大1.5倍程度に増加させることで、脱脂時間を32%削減できた。これにより、電気炉の消費電力も従来条件よりも25%削減できた。マスターカーブ技術と経験者のノウハウとを組み合わせることで、熱処理条件最適化と量産工程への適用

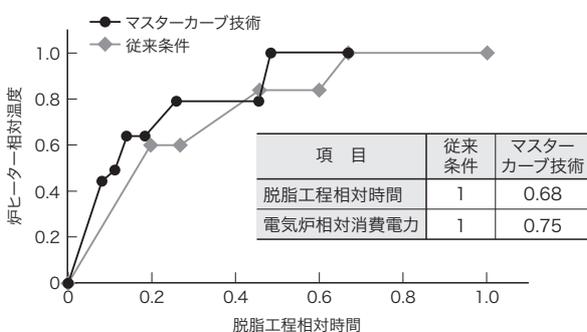


図5. SiNボールの脱脂炉プロファイルの最適化

マスターカーブ技術により、脱脂時間を32%、消費電力を25%削減できた。

Temperature-profile optimization of Si₃N₄ bearing ball dewaxing process

が短期間で可能となった。

熱処理工程は、炉外からの内部観察が容易ではない上に、高温処理であることから実験分析も難しくブラックボックスである。一方、炉シミュレーションは、炉内のガス流れや、温度分布、バインダー放出状況などを定量的に分析することが可能で、経験者のノウハウによる工程設計の根拠を理解できる。図6は、マスターシタリングカーブ理論を用いた熱流体シミュレーションによる、SiNボールのバインダー量の時間変化を示している。従来の脱脂（図5参照）の場合、ボール位置によってバインダー減少時間が異なっており、各ボールの脱脂終了時間差は脱脂全体に対して最大12%と算出された。この炉では、奥側に置かれたボール4が最も早く脱脂され、扉側下段に置かれたボール1が最も遅く脱脂完了した。これは、扉側の熱が外部に放出されやすく、ボール1の温度がヒーター設定温度に対して遅延して応答するためと考えられる。脱脂時間は、同じ扉側でも上段（ボール2）と下段（ボール1）で異なること、中央（ボール3）は扉側と奥側の中間にあることから、ボールから発生する可

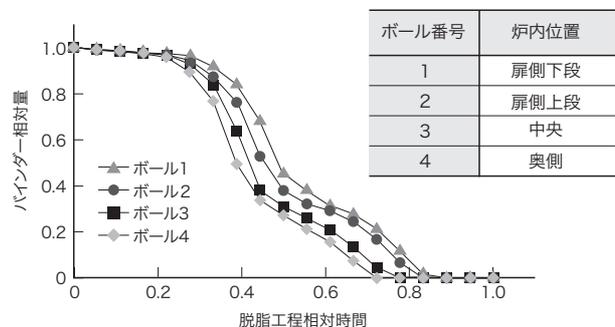


図6. 脱脂工程におけるSiNボールのバインダー量の時間変化シミュレーション結果

バインダー熱分解反応は、バインダー固有のしきい値温度を超えると増加するため、その温度に達する時間以降からバインダー量は急激な減少を示す。

Results of simulations of changes in binder emissions over time in Si₃N₄ bearing ball dewaxing process

燃性ガス量は時間により場所ごとで大きく変わっていた。これは、一度に大量の可燃性ガスが炉外へ放出されないことを示しており、各ボールのガス放出量に時間差を付けることを意図した炉の安全設計と理解できる。また、最大脱脂速度が各ボール位置でほぼ同等と算出されることから、ボールの脱脂品質はどの位置でも変わらないことが裏付けられ、その品質向上にシミュレーションが有効であることが確認できた。

このようなマスターカーブ技術による熱処理条件最適化と炉シミュレーションによる分析は、東芝グループが進めるCPS（サイバーフィジカルシステム）テクノロジーの一つである。当社のSiNボール及び基板に対して、これらの技術を脱脂だけでなく焼結工程へも適用し、生産効率向上と環境負荷低減を両立した取り組みを進めていく。

4. おわりに

自動車の電動化を支えるSi₃N₄製品の特長、応用事例、及び製造工程の環境負荷低減に向けた取り組みについて述べた。近年は、顧客の製品採用判断基準にも製品製造時のCO₂（二酸化炭素）排出量を取り入れられる傾向にあり、当社でも2030年にCO₂排出量実質ゼロ化を目指している。Si₃N₄製品において、長年培われてきた技術をベースに、カーボンニュートラルへの取り組みを強化しながら、今後の高まる需要に応えるための増産投資による製品安定供給体制構築、及び更なる製品特性と信頼性の向上に努めていく。

文 献

- (1) 小松通泰, セラミックベアリングの開発, セラミックス, 2004, **39**, 8, p.633-638.
- (2) 東芝マテリアル, ファインセラミックス, 2022, 11p. <https://www.toshiba-tmat.co.jp/pdf/product/FC_B71-J-202207.pdf>, (参照2022-09-30).

- (3) 那波隆之, ほか, クルマ社会の発展に貢献する材料・部品技術, 東芝レビュー, 2011, **66**, 2, p.42-45.
- (4) 新産業総研, 注目されるSi₃N₄市場の現状と展望, 2022, 98p.
- (5) 田中政一, ほか, デンソーにおける車両の電動化技術, デンソーテクニカルレビュー, 2017, **22**, p.9-20.
- (6) 磯村宣典, 空調用ファンモータのベアリング電食に関する研究, 鹿児島大学, 2014, 105p, 博士論文.
- (7) 斎藤涼夫, 江原 実, パワーエレクトロニクスの技術動向と今後の展望, 東芝レビュー, 2002, **57**, 8, p.2-7.
- (8) DiAntonio, C. B. et al. Extension of Master Sintering Curve Theory to Organic Decomposition. J. Am. Ceram. Soc. 2005, **88**, 10, p.2722-2728.
- (9) 平塚大祐, ほか, “マスターカーブに基づくAgナノ粒子の加圧焼結挙動の解析”, 第28回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム(Mate 2022) 論文集, オンライン, 2022-02, スマートプロセス学会 エレクトロニクス生産科学部会, 2022, p.32-37.



那波 隆之 NABA Takayuki
東芝マテリアル（株）営業企画担当
日本機械学会・日本金属学会会員
Toshiba Materials Co., LTD.



寶槻 直十 HOTSUKI Naoto
東芝マテリアル（株）開発・技術部
Toshiba Materials Co., LTD.



長谷川 浩司 HASEGAWA Koji, Ph.D.
東芝マテリアル（株）開発・技術部
博士（学術）
Toshiba Materials Co., LTD.