

自動車ブレーキ用ハイブリッドセラミックスの開発

後藤 健*

青沼伸一朗****

郭 樹 啓**

中川 成人*****

森田 一樹***

香川 豊*****

1. 開発背景

自動車や鉄道車両などの輸送機器では、高速性能ばかりではなく省エネルギーや低CO₂エミッションのために様々な軽量化のための技術開発が進められている。現状では輸送機器に欠かせないブレーキディスクの多くには密度が7.3 g/cm³程度の鋳鉄が使用されている。航空機のブレーキディスクとして使用されている炭素繊維強化炭素複合材料(C/C)は軽量(密度1.8 g/cm³程度)かつ耐熱性を持つことから過去に検討された。しかし、低温域で制動距離が大きく寿命が短いことから、市販自動車や鉄道車両では採用には至らなかった⁽¹⁾。その後、ドイツでは自動車用ブレーキディスク材料として炭素短繊維をSiCとSiからなるマトリックス中に分散させた複合材料が実用化されている⁽²⁾。しかし、この材料では製造後に構成素材の熱膨張係数の差に由来するクラックが発生したり、耐摩耗性を得るために表面部分に耐摩耗性を有する層を設ける対策が必要である。そのために製造工程がより複雑になることや、表面層を最適化する必要があるなどの問題を抱えている。

そこで本開発では、異なる機能を分散させた相を一体化するハイブリッドセラミックスを開発し、耐損傷性と耐摩耗性をあわせ持つ軽量ブレーキディスク材料を実現した。また、

ニアネットシェイプ成形を可能とするプロセス技術を確立し、開発材料の安全性を保証する評価試験を行い、自動車用ブレーキディスクとして応用することに成功した。

2. コアとなるプロセス技術

低コストで実用上十分な特性を持つハイブリッドセラミックスの製造方法として、図1に示す高速・省エネ・ネットシェイププロセスを開発した。このプロセスは、(1)基本構造プリフォーム用CFRP成形体の製造、(2)ナノ構造を持つ含浸用予備成形体の製造、(3)熔融Si(Si合金)の含浸によるハイブリッド組織材料の製造の3段階の工程よりなる。

CFRP成形体は、フェノール樹脂、粒径約100 nmのSiCナノ粒子、および3~6 mmに切断したピッチ系炭素短繊維を混合しホットプレス成形により作製した。含浸用予備成形体は不活性雰囲気中でCFRP成形体を炭化して作製した。予備成形体は樹脂の炭化による炭素の付着により炭素繊維表面を保護するとともに、ナノサイズのSiC粒子と炭素が混合された相にナノサイズの空孔が均質に分散した組織を有している。予備成形体は切削加工が容易であり、冷却用孔などのブレーキディスクに必要な複雑形状を低コストで導入することができる。最終工程ではSiまたはSi-X合金(X:添加元

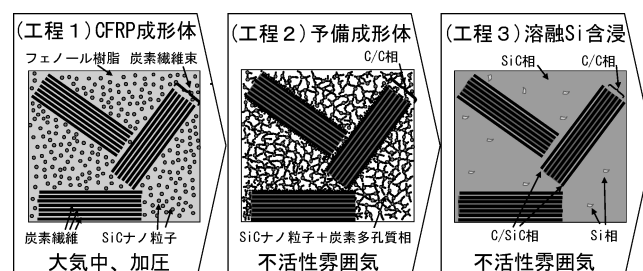


図1 高速・省エネ・ネットシェイププロセスの概要図。本プロセスはSiCナノ粒子と炭素短繊維をフェノール樹脂で成形したCFRP成形体から出発し、CFRP成形体を炭化したナノ構造予備成形体に熔融Siを含浸することでハイブリッドセラミックスを作製する。

* (国)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所; 准教授

** (国)物質・材料研究機構; 主席研究員

*** 東京大学工学系研究科; 教授

**** クアーズテック(株)秦野事業所 R&D エンジニアⅣ

***** (株)超高温材料研究センター; 代表取締役社長

***** 東京大学工学系研究科; 教授(現東京大学名誉教授, 東京工科大学教授)

Development of Hybrid Ceramics for Automotive Brake Disks; Ken Goto*, Shuqi Guo**, Kazuki Morita***, Shinichiro Aonuma****, Narihito Nakagawa***** and Yutaka Kagawa*****(*JAXA/ISAS, **NIMS, ***The University of Tokyo, ****CoorsTek, *****JUTEM, *****The University of Tokyo, present affiliation Tokyo University of Technology)

2020年11月2日受理[doi:10.2320/materia.60.116]

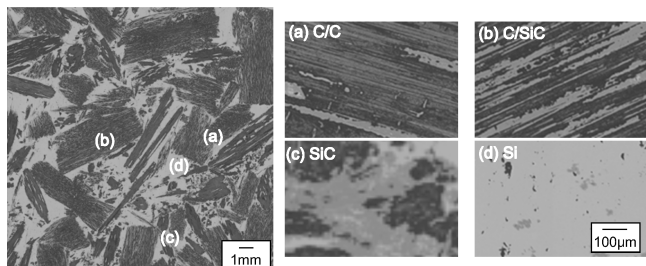


図2 ハイブリッドセラミックスの典型的な組織。(a)C/C相、(b)C/SiC相、(c)SiC相、(d)Si相の4種類の相からなる。

素)を予備成形体に含浸することにより、SiC および Si-X 金属間化合物を内部にもつハイブリッドセラミックスが完成する。予備成形体製造にナノ粒子を用いたことによる組織の均質化と反応面積の増加により、 $\text{Si}(l) + \text{C}(s) \rightarrow \text{SiC}(s)$ の反応が速やかに行えるようになった。また、ブレーキパッドとの相性によっては Cu などを含むことが求められる場合があるが、Si-Cu 合金への Fe などの添加による炭素繊維と Si 合金の反応性の変化を定量的に予想するための熱力学的検討を実施することで、要求する組織を実現した⁽³⁾。開発したハイブリッドセラミックスの典型的な組織を図2に示す。材料の組織はC/C相、C/SiC相、SiC相、Si相の4種類の組織からなる。これらの4つの組織の比率を製造条件により変化させることができ、目的とする摩擦・摩耗特性を制御することができる。

3. 開発したハイブリッドセラミックスとその特性

ハイブリッドセラミックスの室温での力学特性および熱特性を鋳鉄とともに表1に示す。密度は 2.6 g/cm^3 と軽量であり、弾性率は110から176 GPa、ディスク曲げ試験により取得した曲げ強度は150から200 MPa、熱伝導率は35から $73 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、熱膨張係数は2.5から $4.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ である。鋳鉄より軽量で小さい熱膨張係数をもっている。

さらに特筆すべき事項として、ハイブリッドセラミックスは構成する材料は全て室温で脆性的な破壊をする材料からなるが、図3のように釘を打つことも可能な材料である。図4の繰り返し圧縮負荷—除荷試験時の応力—ひずみ関係に示すように、本材料は負荷応力の増加とともに損傷が発生し永久変形が生じるが、全体では荷重負担能力は低下しない⁽⁴⁾。図4には圧縮応力が負荷されている際のハイブリッドセラミックス中のクラックの発生状態も示している。SiC相やSi相中にランダムに発生したクラックは、C/C相で偏向・停止しており、C/C相が損傷許容性の発現に重要な役割を担っている。

このように、ハイブリッドセラミックスはクラックを安定して内部に累積することができるために、実使用条件での損傷許容性が発現し、損傷に強い材料になる。同様の機構により、 1000°C から繰り返し熱衝撃を加えても曲げ強度が変化しない等、優れた疲労特性を有する。ハイブリッドセラミックスの損傷許容性の発現機構の解明に関する研究では、セラ

表1 ハイブリッドセラミックスの室温での熱・力学特性。

項目	開発材	鋳鉄
密度 (g/cm^3)	2.6	7.3
材料組成	炭素繊維、SiC、C、Si	Fe、C、Si
弾性率 (GPa)	110~176	100~150
部材強度 (MPa)	150~200 *	200~400
摩擦係数	0.3~0.5	0.3~0.4
熱膨張係数 (K^{-1})	$2.5 \sim 4.3 \times 10^{-6}$	$10 \sim 12 \times 10^{-6}$
熱伝導率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	35~73	40~60

* ディスク曲げ試験

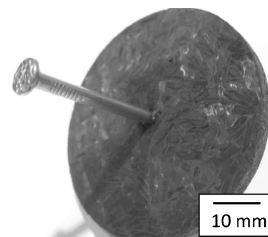


図3 ハイブリッドセラミックスに釘を打ち込んだ様子。全体が破壊することなく釘が貫通しており、セラミックス単体にはない損傷許容性を持っていることがわかる。

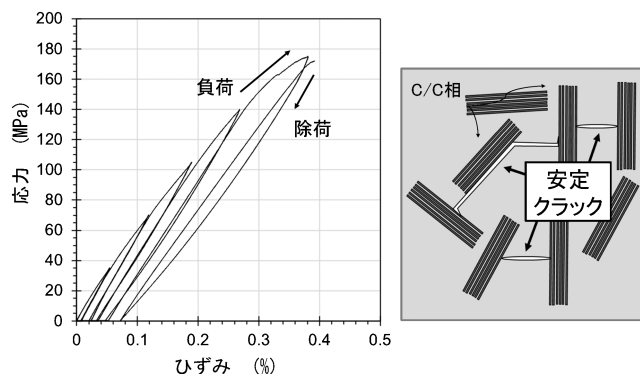


図4 開発したハイブリッドセラミックスの繰り返し圧縮負荷—除荷試験による応力—ひずみ関係とC/C相で偏向・停止した安定クラックの模式図。

ミックス複合材料の国際会議でポスター賞を受賞している⁽⁵⁾。

4. ブレーキディスクとしての展開

損傷許容性を有する高強度・高剛性なハイブリッドセラミックスの摩擦特性について示したのが図5である。図5は繰り返しブレーキ試験の際の最高温度と計測された摩擦係数の変化を示したものである。最高到達温度は 350°C 程度であり、摩擦係数は表1にも示すように0.3から0.5程度で室温から高温まで安定しており、高い制動力を安定して発揮することが期待できる。また、損傷許容性を持つことからボルトやナットによる機械的な締結が可能である。図6は有限要素法解析による締結部の応力分布の解析例であるが、ハイブリッドセラミックスは引張応力の発生に留意して、構造を工夫することで、金属部品とのボルト・ナット締結が可能である。

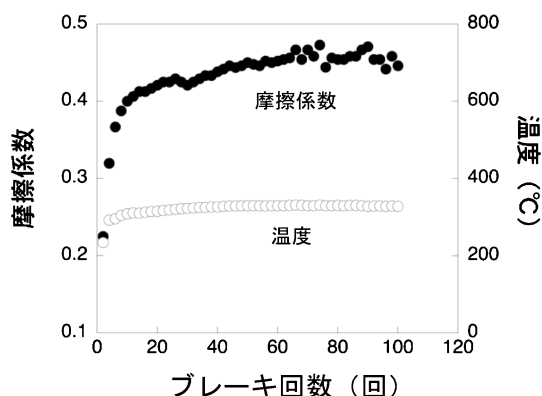


図5 ハイブリッドセラミックスの摩擦特性．試験実施時の最高温度は350℃程度，摩擦係数は0.3から0.5である．摩擦係数はブレーキ試験50回以降では10％以内の変動である．

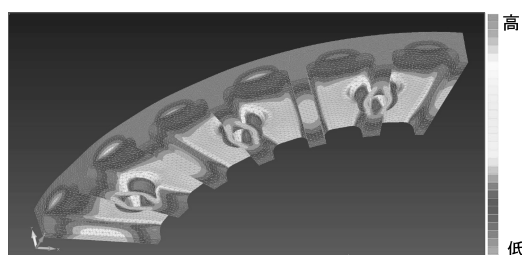


図6 金属構造とのボルト・ナット締結部の応力分布の有限要素法による数値解析例．ボルト穴の周りに大きな引張応力が発生している．

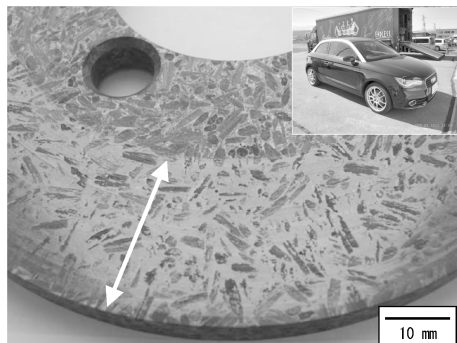


図7 走行試験後のブレーキディスクの表面の様子と実装した自家用車．矢印はパッドとの接触部を示している．走行試験後に切り出して各種試験が実施できるように，冷却用孔のないブレーキディスクで走行試験を実施した．

開発したハイブリッドセラミックスが自動車のブレーキディスクとして安心して使用可能か調べるために，公道を走行可能な自動車に実装した走行試験を行った．走行試験は市販の自家用車を用いて行い，5000 km 走行前後での材料の変化を調査した．図7は実装した自家用車と走行後のブレーキディスクの表面の様子である．ブレーキパッドと接触した部分には光沢が見られる部分があるが，ディスクには損傷は見られなかった．その後，図8(a)に示すような販売できる状

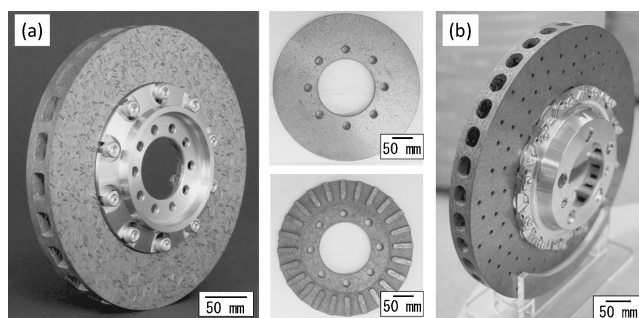


図8 (a)完成したブレーキディスク．(b)市販したブレーキディスク．ディスクには冷却用の複雑な形状の穴が存在する．

態のブレーキディスクを製作し，実際に車両に装着したブレーキ試験を販売予定先企業で繰り返し実施した．その結果，高い耐久性と信頼性があることが確認できた．最終的に図8(b)に示すように，軽量ブレーキディスクとして2017年より(株)エンドレスアドバンスより市販され⁽⁶⁾，ハイブリッドセラミックスを用いたブレーキディスクの商品化を完了した．

5. ま と め

この開発は，産学官の研究グループがゼロから開発をスタートして9年間で実用化にまでこぎ着けた．開発したブレーキディスクは，特徴のある複雑な組織を持ち，性能・価格ともに国内外で競合できるものであり，日本発のハイブリッドセラミックスの今後の展開に期待している．

関連する特許としては，特許番号5769519をはじめとして16件出願しているほか，3件の国外出願(US-A1-2018-0313419など)を行なっている．また，関連する技術での国際会議や国内会議での招待講演や学術講演も多く行い，当該技術分野の発展に役立ててきた．

本研究開発は，(国)新エネルギー・産業技術総合開発機構の「ナノテク・先端部材実用化研究開発(研究代表：香川)」制度により開始し，その後各機関での協力により実用化が行われたものである．

文 献

- (1) G. Savage: Carbon/Carbon composites, Chapman & Hall, (1993).
- (2) W. Krenkel, B. Heidenreich and R. Renz: Advanced Engineering Materials, 4(2002), 427-436.
- (3) Y. Kato, T. Yoshikawa, Y. Kagawa and K. Morita: ISIJ International, 53(2013), 1320-1324.
- (4) Y. Tobata, S. Takeuchi and K. Goto: Journal of the European Ceramic Society, published online (2020).
- (5) M. Ikegami and Y. Kagawa: 7th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites (HT-CMC7) (2010).
- (6) (株)エンドレスアドバンス web ページ <https://www.endless-sport.co.jp>.