

平成29年度採択  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「潤滑性、耐久性に優れたメカニカルシール用部材の開発」

研究開発成果等報告書

令和2年3月

担当局 中部経済産業局

補助事業者 公益財団法人 中部科学技術センター

## 目 次

### 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
- 1-2 研究体制  
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

### 第2章 本論

- 2-1 高摺動特性材料開発
- 2-2 表面加工技術開発
- 3-3 複雑実形状技術開発
- 3-4 実機相当評価

### 第3章 全体総括

- 3-1 開発成果
- 3-2 今後の課題と事業化に向けた取り組み

## 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

#### (1) 研究開発の背景

メカニカルシールは、ポンプ、コンプレッサーなどの回転機械の軸封装置として比較的密封性が高く、メンテナンスフリーである特徴を有することから、広範囲の回転設備に使用されている。従来、メカニカルシール用部材の潤滑性、耐久性向上のため、部材表面のコーティングや表面テクスチャリング処理が行われている。しかし、これらの部材は、一度、高性能化された表面が剥がれてしまうと大幅に特性低下が起こることから、ユーザーから、材料自体の高性能化が強く望まれている。美濃窯業株式会社(以下、一部美濃窯業)、研究開発法人産業技術総合研究所(以下、一部、産業技術総合研究所または産総研)及び、国立大学法人名古屋大学(以下、一部、名古屋大学または名大)に於けるこれまでの研究において、炭化ホウ素(B<sub>4</sub>C)-炭化ケイ素(SiC)複合材料が、長期間使用してもその潤滑性が維持される可能性を見出した。そこで、本事業にて炭化ホウ素-炭化ケイ素複合材料のメカニカルシール用部材への実用化に向けた開発を行う。

これまで、コーティングや表面テクスチャリングが施されている過酷な条件で使用されているポンプとして、ボイラ給水用ポンプ、自動車ウォーターポンプなどが挙げられ、これらのポンプのメカニカルシール部材へ展開し、更に汎用ポンプへの拡大を目指す。本事業のアドバイザー西島製作所にて使用実績を作り、それを元にクボタ、イーグル工業などの国内主要メーカーへ営業展開を図っていく。また、これらのメカニカルシール装置メーカーは、国内のみならず、新興国をはじめとして今後需要が伸びる海外へ生産販売しており、合わせて海外市場への展開を図ることで、本部材の売上を伸ばしていく。

## (2) 研究目標

摺動面が摩耗しても潤滑性が維持される特性を有するメカニカルシール用摺動材料として、新材料である炭化ホウ素-炭化ケイ素複合材料を開発し、これまでコーティングや表面テクスチャリング処理が施されていたボイラ給水用ポンプ向け、自動車ウォーターポンプ向けメカニカルシール部材に替わる部材として、実用化を図る。これまでに得られたユーザーサイドにおける実用化の製品基準目標値を元にして、本事業における技術的目標値を以下のとおりとした。

### 【1. 高摺動特性材料開発】

従来材料である炭化ケイ素セラミックスと同等以上の機械的特性を有し、かつ優れた摺動特性を有する高性能摺動材料の開発を目標とする。目標値とする機械的特性として、主にアブレッシブ摩耗、凝着摩耗などを想定し、摩擦係数、比摩耗量と密接な関係があるビッカース硬度と抗折強度を選定した。

表 1 開発品の目標値

	目標値	従来材料
ビッカース硬度 (Hv)	2300 以上	2000
抗折強度 (MPa)	450 以上	400

### 【2. 表面加工技術開発】

表面コーティングもしくは表面テクスチャリングを施した従来材料の摺動特性と同等であり、表面処理しない従来材料に対して、摩擦係数(水潤滑下、無潤滑下)2/3 以下、比摩耗量1/2 以下を目標とする。『ファインセラミックスのボールオンディスク法による試験方法 (JIS R1613)』に基づいて実験を行う。

表 2 開発品研磨後の摺動特性の目標値

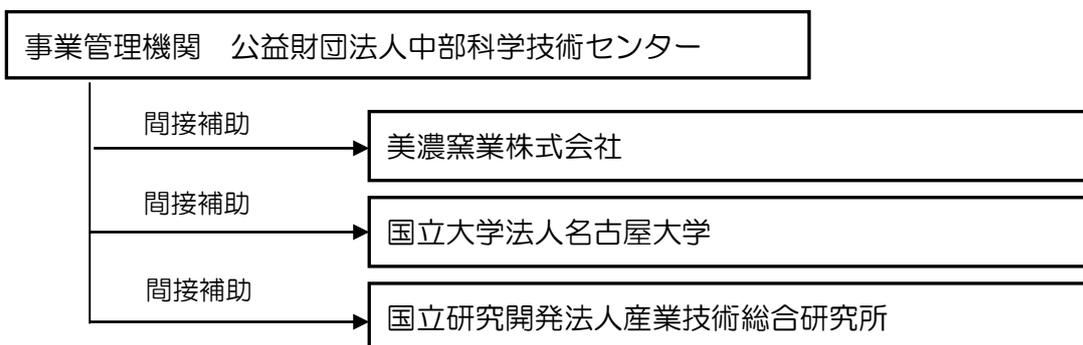
	目標値	従来材料		
		表面コーティング 表面テクスチャリ ング有り	表面コーティング 表面テクスチャリ ング無し	
摩擦係数	水潤滑下	0.2 以下	0.2	0.3
	無潤滑下	0.4 以下	0.4	0.6
比摩耗量	無潤滑下 mm <sup>3</sup> /(N・m)	7×10 <sup>-6</sup> 以下	7×10 <sup>-6</sup>	15×10 <sup>-6</sup>

### 【3. 複雑実形状技術開発】

開発材でユーザー指定図面による固定リング、回転リング実形状の作製を可能にするため、ニアネットシェイプ成形・焼成技術及び高効率加工技術を開発し実部材相当メカニカルシール部材を試作し、ユーザー評価に供する。

## 1-2 研究体制

### (1) 体制図



### (2) 監理員及び研究員

#### 【事業管理機関】 公益財団法人中部科学技術センター

##### 管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
平本 邦夫	研究開発推進部長	【5】
高須 容功	研究開発推進部 主任	【5】
木本 恵子	研究開発推進部 主任	【5】
土谷 由貴子	研究開発推進部	【5】
松下 純恵	総務部	【5】

#### 【間接補助事業者】

##### 美濃窯業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
関根 圭人	技術研究所 マネージャー	【1】【2】【3】【4】
太田 宏章	技術研究所	【1】【2】【3】【4】
坂本 康直	技術研究所	【1】【2】【3】【4】
中根 僚宏	技術研究所	【1】【2】【3】【4】

##### 国立大学法人名古屋大学

氏名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
北 英紀	大学院工学研究科 教授	【1】【2】
山下 誠司	大学院工学研究科 助教	【1】【2】
张 巍	大学院工学研究科 博士後期課程	【1】【2】

国立研究開発法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
日向 秀樹	構造材料研究部門 研究グループ長	【1】
吉澤 友一	構造材料研究部門 研究部門長	【1】
周 游	構造材料研究部門 主任研究員	【1】

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人中部科学技術センター

(経理担当者) 総務部 主幹 服部利成

(業務管理者) 研究開発推進部長 平本邦夫

(間接補助事業者)

美濃窯業株式会社

(経理担当者) 経理部 経理課 マネージャー 宮澤哲雄

(業務管理者) 技術研究所 所長 尾関文仁

国立大学法人名古屋大学

(経理担当者) 工学部・工学研究科経理課 経理課長 和田裕司

(業務管理者) 大学院工学研究科長 水谷法美

国立研究開発法人産業技術総合研究所

(経理担当者) 中部センター研究業務推進部会計グループ グループ長 西田幸治

(業務管理者) 構造材料研究部門 研究部門長 吉澤友一

## 1-3 成果概要

### 【1. 高摺動特性材料開発】

- B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の製造プロセスの最適化を進め、材料の機械的特性において、ピッカース硬度 2700Hv、強度 611MPa となり、最終目標値を達成した。
- B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の摺動特性において、B<sub>4</sub>C60wt%-SiC40wt%の組成で摺動特性が優れていることを把握した。
- 開発した B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の摺動特性は、無潤滑下摩擦係数 0.29、無潤滑下比摩耗量  $4.5 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/N・m、水潤滑下摩擦係数 0.15 と最終目標値を達成した。
- B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の相手材として SiC-C 複合材料を選定し、製造プロセスの最適化を進めることで、従来材料と比較して比摩耗量で優位な結果が得られる組み合わせを見出した。
- 安価な B<sub>4</sub>C 原料を用いた低コスト化を検討した。安価原料を用いた場合、緻密化が課題であったが、粉碎条件や焼結助剤添加量などの調整技術の検討を進めることで、現行原料と同程度の相対密度 97%まで緻密化することが可能となった。

### 【2. 表面加工技術開発】

- ナノクレーターが形成される表面加工条件を把握した。
- モデル形状でもピースレベルと同様の表面形態を形成することを確認した。
- B<sub>4</sub>C-SiC 複合材のナノクレーター構造形成には摺動中に発生する研磨粉の組成が大きく影響しており、とくに B<sub>4</sub>C 配合比が 0.5~0.6 においてナノクレーター構造に有効な組成であることが分かった。

### 【3. 複雑実形状技術開発】

- φ140mm 程度のボイラ給水向けモデル形状のニアネットシェイプ成形技術を検討し、製品図面の寸法を満たす実形状が得られた。
- φ40mm 程度の片吸込みポンプ向けのモデル形状のニアネットシェイプ成形技術を検討し製品図面の寸法を満たす実形状が得られた。

### 【4. 実機相当評価】

- 従来材料と開発材を比較評価した結果、従来材料に比べ摩耗痕の表面状態と摩耗量で優

位な結果（従来材料と比較し摩耗量 60%減）が得られた。また、従来材料は運転中の漏れの痕跡があったのに対し、開発材は漏れがなく、無冷却で使用できる可能性が示唆された。

【今後の課題】

- 製造技術確立：顆粒調整条件や成形条件などシール部材の製造プロセスの最適化、量産化に向けた製造技術の確立。
- 低コスト化：安価原料を用いた試料でのシール部材の摺動評価、長時間耐久性実証。
- サンプル出荷：上記を踏まえ、早期の製品化に向けて、より長時間の耐久性を実証することで、サンプル出荷を行う予定とした。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属・氏名：技術研究所 所長 尾関 文仁

E-mail：ozeki@mino-ceramic.co.jp

電話番号：0569 - 28 - 2019

## 第2章 本論

### 2-1. 高摺動特性材料開発

メカニカルシールは固定リングと回転リングを組み合わせて使用されるものである。従来材料の代表的な組み合わせは、「①硬質材料のSiCと軟質材料のカーボンの組合せ」及び「②硬質材料のSiCと硬質材料のSiCの組合せ」である。①ではカーボンは潤滑性に優れるが軟らかく耐摩耗性に劣る。②は硬質材同士の組合せで耐摩耗性に優れるが、潤滑性に劣るため比較的low PV（P：周速、V：圧力）でしか使用できない。また、いずれの組み合わせも高温環境下ではシール部の冷却が不可欠である。

ボイラ給水ポンプや片吸込みポンプ向けのメカニカルシールは中～高PVかつ高温条件下（100～200℃程度）で使用されており、現状はシール部を冷却して使用している。ユーザーへのヒアリングによって設備の簡素化、補助設備を含めたシステム全体の省資源化を実現するために、シール部の無冷却化が求められていることが分かった。

そこで、当社での予備的検討において、硬質材料の組み合わせでありながら、摩擦係数が優れたB<sub>4</sub>C-SiC複合材料をベースとして、高温かつ比較的高いPVで使用可能な無冷却メカニカルシール部材の開発を行った。

本研究項目では、当社での予備的検討により摩擦係数が優れるB<sub>4</sub>C-SiC複合材料をベースとして無冷却メカニカルシールの材料開発を行った。

#### 2-1-1. B<sub>4</sub>C-SiC複合材料の焼結プロセスの確立と最適な組織・組成の検討

まず、B<sub>4</sub>C-SiC複合材料の材料組成と焼結性（最適焼成条件）、材料特性の関係及び焼結助剤であるカーボンの最適な含有量及びカーボン源の種類など製造プロセスの最適化を行った。

最適化したプロセス条件で作製したB<sub>4</sub>C-SiC複合材料の組成と相対密度の関係を図2-1-1に示す。いずれの組成でも相対密度97%以上の緻密な焼結体を得ることができた。

次に、機械的特性としてビッカース硬度と抗折強度の調査を行った。図2-1-2にB<sub>4</sub>C-SiC複合材料の組成と抗折強度の関係を示す。材料組成と抗折強度の関係は、B<sub>4</sub>C含有量にかかわらず400MPa以上と比較的高強度の焼結体を得られることを確認した。図2-1-3にB<sub>4</sub>C-SiC複合材料の組成とビッカース硬度の関係を示す。ビッカース硬度はB<sub>4</sub>C含有量が0～60%までは増加傾向にあり、それ以上はB<sub>4</sub>C含有量にかかわらず2600～2700HVでほぼ一定であることが明らかになった。

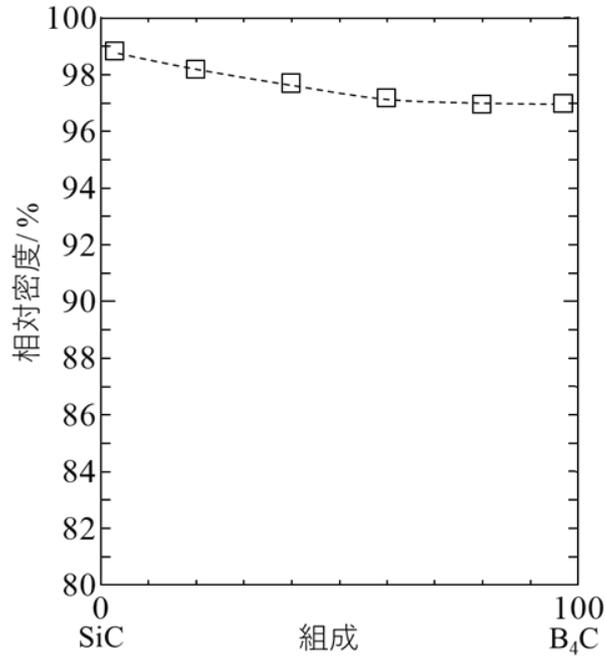


図 2-1-1 B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の組成と相対密度の関係

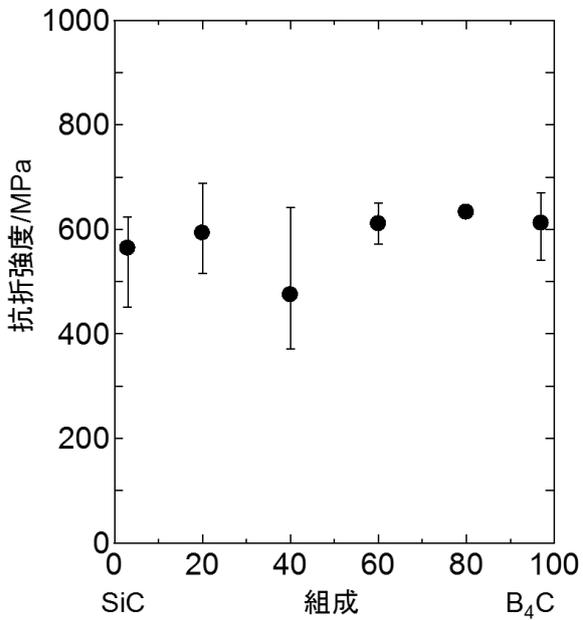


図 2-1-2 B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の組成と抗折強度の関係

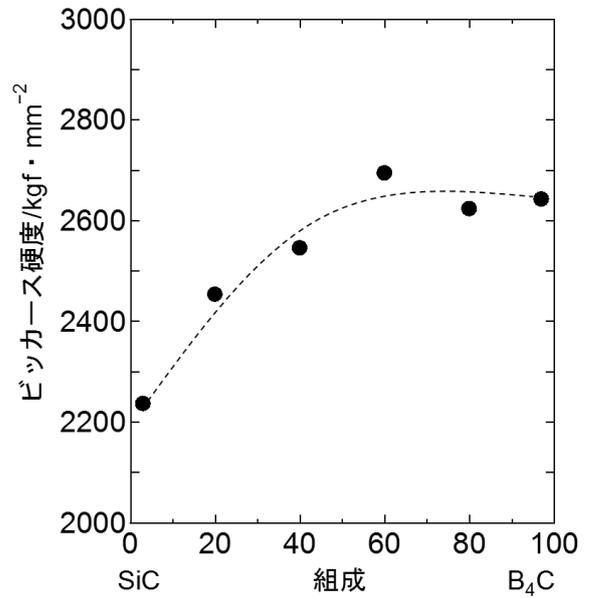


図 2-1-3 B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の組成とビッカース硬度の関係

図 2-1-4 に無潤滑下における組成と摩擦係数の関係を示す。摺動評価条件はボールオンディスク法により摺動半径 10mm、摺動距離 100m、荷重 5N、相手材 SiC として実施した。組成と摩擦係数の関係は、B<sub>4</sub>C 含有量が 60 と 80% で摩擦係数が極小をとることが明らかとなった。B<sub>4</sub>C 原料は高価な原料であるため、コストの観点から B<sub>4</sub>C 含有量は 60% が最適であると判断した。

図 2-1-5 に水潤滑下における B<sub>4</sub>C60wt%-SiC40wt% 複合材料（以下 B60S40 と表記）の摺動評価時の摩擦係数のプロファイルを示す。摺動半径等の評価条件は無潤滑下の場合と同様とした。全体の平均摩擦係数は 0.15 であることを確認した。

図 2-1-6 に無潤滑下での摺動後摩耗痕の表面プロファイルを示す。摩耗痕の断面積より比摩耗量を算出したところ、比摩耗量は  $4.5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  であることを確認した。

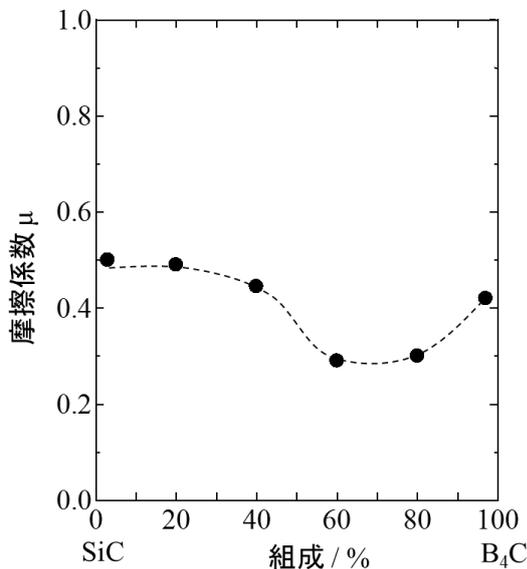


図 2-1-4 無潤滑下における組成と摩擦係数の関係

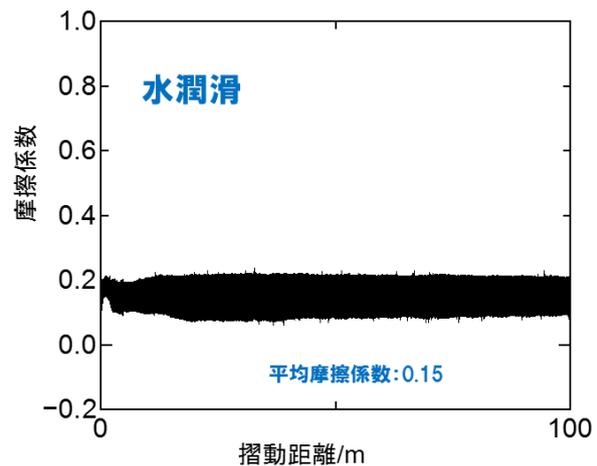


図 2-1-5 水潤滑下における B60S40 の摺動評価時の摩擦係数のプロファイル

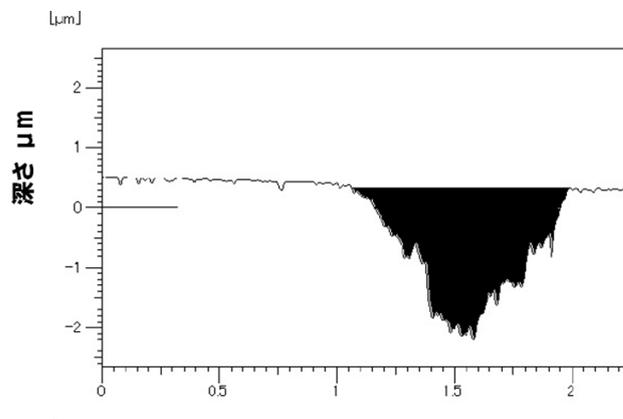


図 2-1-6 無潤滑下における摩耗痕の表面プロファイル

上記のとおり、B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の最適化を行い、B6OS40 の最適組成において各目標値の特性評価を行った結果、ビッカース硬度 2700Hv、抗折強度 611MPa、無潤滑下摩擦係数 0.29、無潤滑下比摩耗量  $4.5 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/N・m、水潤滑下摩擦係数 0.15 の特性が得られ、最終目標値を達成した。

次にメカニカルシールの組み合わせの最適化を目的に、B6OS40 の相手材（回転リング）として SiC にカーボンを含有させた SiC-C 複合材料を選定し、評価を行った。

SiC-C 複合材料は表 2-1-1 に示す組成のカーボン量 5、15、30% の 3 種類とし、それぞれ S95C05、S85C15、S70C30 と表記した。表 2-1-2 に各 SiC-C 複合材料の相対密度を示す。

これらの材料は【2】【3】へ展開し、得られた実形状を【4】での実装評価に展開した。

表 2-1-1 各 SiC-C 系材料の組成 (wt%)

	SiC	C	B <sub>4</sub> C (助剤)
S95C05	95	5	2
S85C15	85	15	2
S70C30	70	30	2

表 2-1-2 各 SiC-C 系材料の相対密度

	相対密度 (%)
S95C05	97
S85C15	95
S70C30	87

2-1-2. B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の製造コスト低減(第三成分添加による硬度等の物性制御等)

B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料に対して、製造コスト低減を目的に B<sub>4</sub>C 原料の低コスト化について検討した。表 2-1-3 に現行 B<sub>4</sub>C および安価 B<sub>4</sub>C 原料の粒度と化学成分を、図 2-1-7 に粒度分布を示す。安価 B<sub>4</sub>C は、現行 B<sub>4</sub>C と比較して粒度が粗いことがわかった。化学組成については不純物である Fe などが多く、また主成分である B が多く C は少ない組成であった。粒度分布を比較すると、現行 B<sub>4</sub>C 粉末はサブミクロンの粒径を有する粒子が多く存在するのに対して、安価 B<sub>4</sub>C 粉末は数ミクロンの粒径が多いという特徴を有していた。これらの原料を成形後焼成した焼結体の相対密度を表 2-1-4 に示す。現行 B<sub>4</sub>C の 96%と比較して安価 B<sub>4</sub>C は 86%とかなり焼結性が悪い結果であった。焼結性の良い現行 B<sub>4</sub>C 原料と同等の粒度分布にするため、粉碎を行った。図 2-1-8 に粉碎後の安価 B<sub>4</sub>C 原料の粒度分布を示す。72h の粉碎では、現行 B<sub>4</sub>C 粉末と近い粒度分布が得られることがわかった。

表 2-1-3 現行 B<sub>4</sub>C と安価 B<sub>4</sub>C 原料の粒度、化学成分

項目	D10	D50	D90	モード 径	B	C	O	Si	Cr	Fe	B/C 比
単位	μm				mass%						
現行 B <sub>4</sub> C	0.7	1.8	3.1	2.1	75.5	24.0	0.3	0.0	0.0	0.0	3.5
安価 B <sub>4</sub> C	1.3	2.1	3.3	2.1	79.0	19.2	0.2	0.9	0.1	0.4	4.6

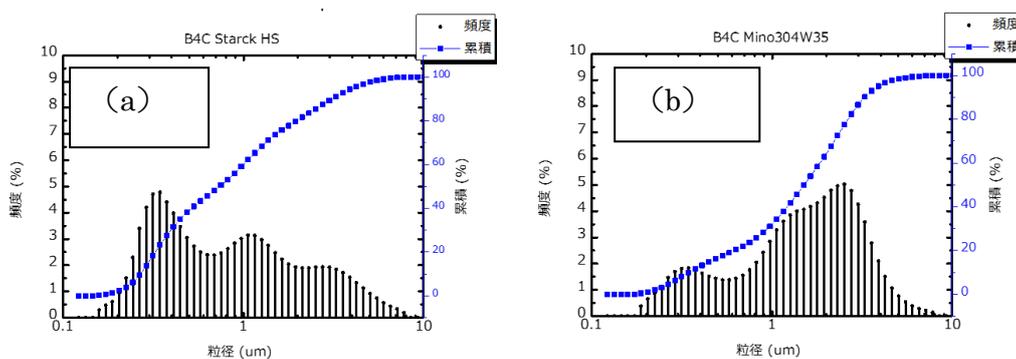


図 2-1-7 B<sub>4</sub>C 原料粉末の粒度分布 (a) 現行 B<sub>4</sub>C (b) 安価 B<sub>4</sub>C

表 2-1-4 現行 B<sub>4</sub>C と安価 B<sub>4</sub>C を焼成後の相対密度

原料種類	相対密度 (%)
現行 B <sub>4</sub> C	96
安価 B <sub>4</sub> C	86

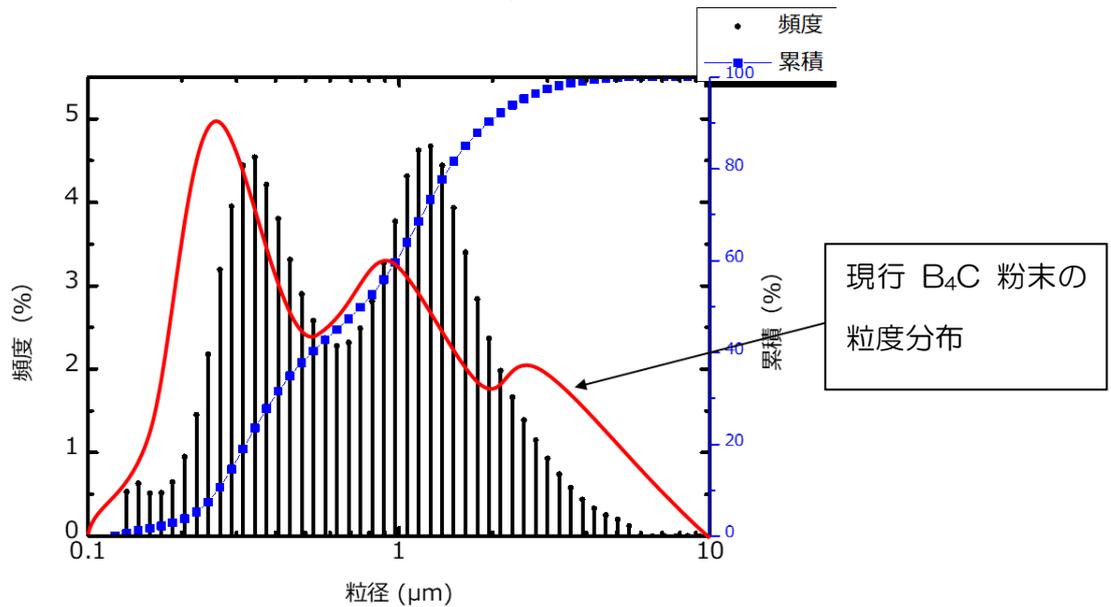


図 2-1-8 72 時間粉碎後の安価 B<sub>4</sub>C 原料の粒度分布

表 2-1-5 に現行 B<sub>4</sub>C 粉末及び組成調整を加えた安価 B<sub>4</sub>C 粉碎粉末を用い、B<sub>4</sub>C 部の割合を変えた場合の B60S40 組成の焼結体密度を示す。いずれの試料も 96% を超える高い相対密度を示し、緻密化が進んでいた。また、開気孔率も安価 B<sub>4</sub>C 粉末だけでも、1% 以下の開気孔率の緻密な焼結体を得られた。

図 2-1-9 に現行 B<sub>4</sub>C 粉末の割合と B60S40 焼結体強度の関係を示す。現行 B<sub>4</sub>C の割合に大きく依存することは無く、400MPa に近い強度が得られることが確認された。なお、安価 B<sub>4</sub>C 粉碎粉末のみを用いても 350MPa という強度が得られた。以上の結果から、安価な B<sub>4</sub>C 粉末を使いこなすためには、粉末を適度な粒度分布になるまで粉碎し、組成調整を行うことで、現行 B<sub>4</sub>C 粉末で作製した焼結体に相当する焼結体を得られることが確認された。

表 2-1-5 B<sub>4</sub>C 粉末の割合を変えた場合の成形体、焼結体の密度及び焼結体の開気孔率

	成形体密度 (g/cm <sup>3</sup> )	焼結体密度 (g/cm <sup>3</sup> )	相対密度 (%)	開気孔率 (%)
現行 B <sub>4</sub> C 0% (安価 B <sub>4</sub> C のみ)	1.66	2.69	97.5	0.67
現行 B <sub>4</sub> C 25%	1.68	2.66	96.4	1.17
安価 B <sub>4</sub> C 50%	1.67	2.67	96.7	0.44

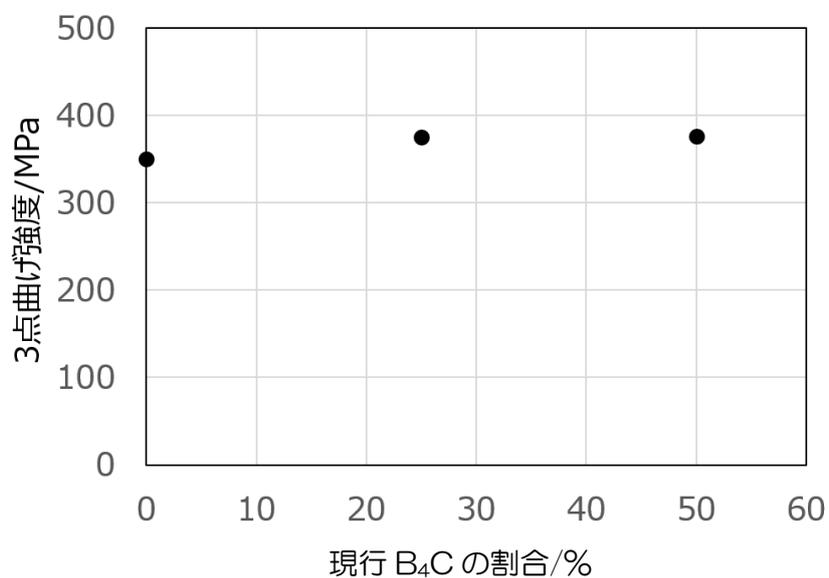


図 2-1-9 B<sub>4</sub>C 粉末の割合を変えた場合の焼結体の強度

### 2-1-3. 摺動特性評価

#### (1) ボールオンディスクによる各種材料組合せの摺動特性評価

アドバイザーからの助言をもとに実際の使用条件下で想定される環境を踏まえ、無潤滑下（dry）・水潤滑下（wet）・異物存在下（アブレシブ）のそれぞれの雰囲気での摺動評価を行い、各雰囲気での材料の基本特性を把握した。

2-1-1 項で作製プロセスの最適化を行った各種 SiC-C 複合材料と B60S40 との組合せ、および従来材料の組合せ（SiC とカーボン）でボールオンディスクによる特性評価を行った。表 2-1-6 に各組合せを、図 2-1-10～2-1-12 に各雰囲気での摩擦係数、比摩耗量の結果を示す。なおアブレシブ条件は水道水に含まれる成分から析出される CaCO<sub>3</sub> を蒸留水に添加した条件とした。

図 2-1-10 より、wet 条件では組合せ①③で摩耗量と摩擦係数で従来材料と比較して優位であった。

図2-1-11より、dry条件では、カーボンを使用している現行材質が優位であった。

図2-1-12より、アブレシブ雰囲気では、すべての材質についてボールの比摩耗量、摩擦係数で現行材質に対し比較優位性を確認した。

表 2-1-6 各組合せの一覧

	ボール	ディスク
従来材料 組合せ	カーボン	S i C
組合せ①	S 95 C 05	B 60 S 40
組合せ②	S 85 C 15	B 60 S 40
組合せ③	S 70 C 30	B 60 S 40

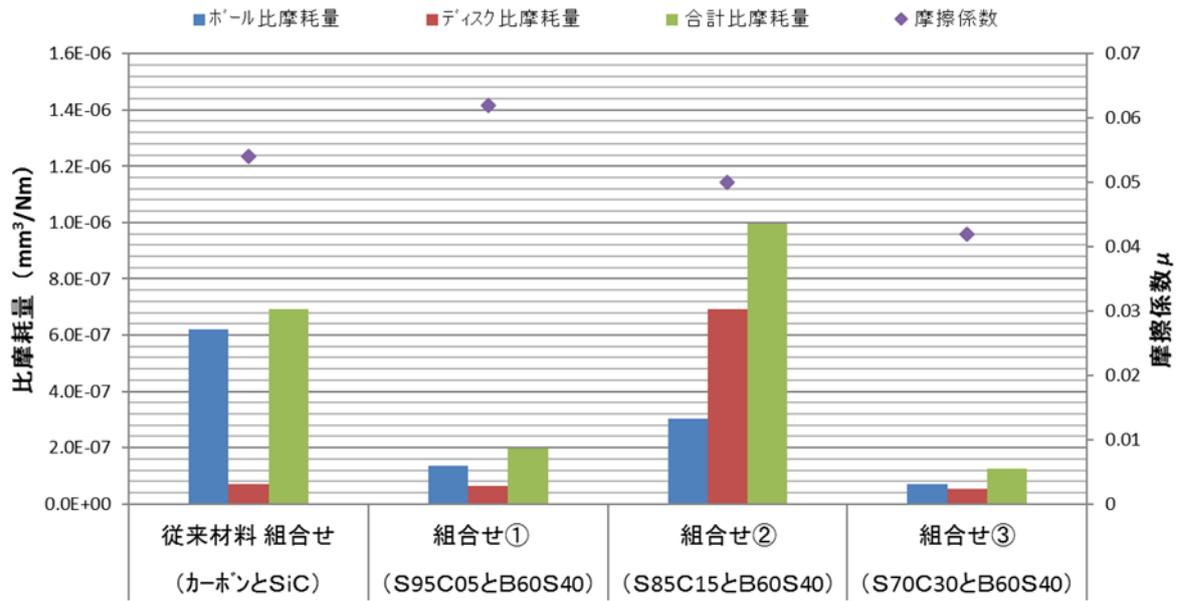


図 2-1-10 wet 雰囲気下での各試料の摺動特性

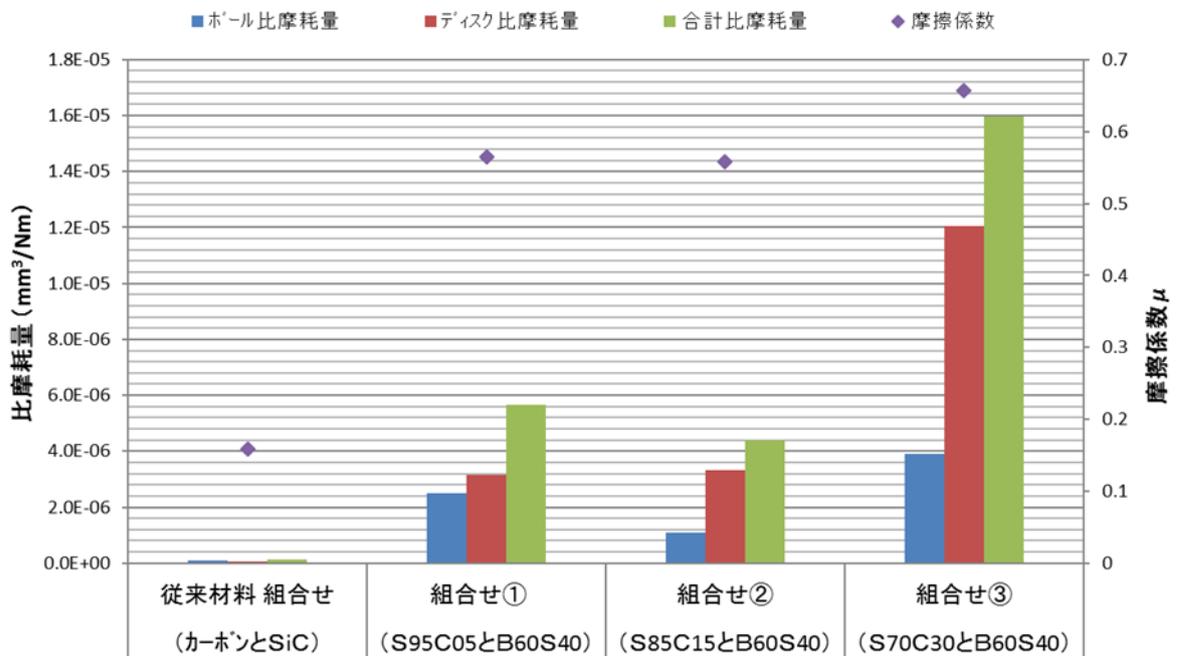


図 2-1-11 dry 雰囲気下での各試料の摺動特性

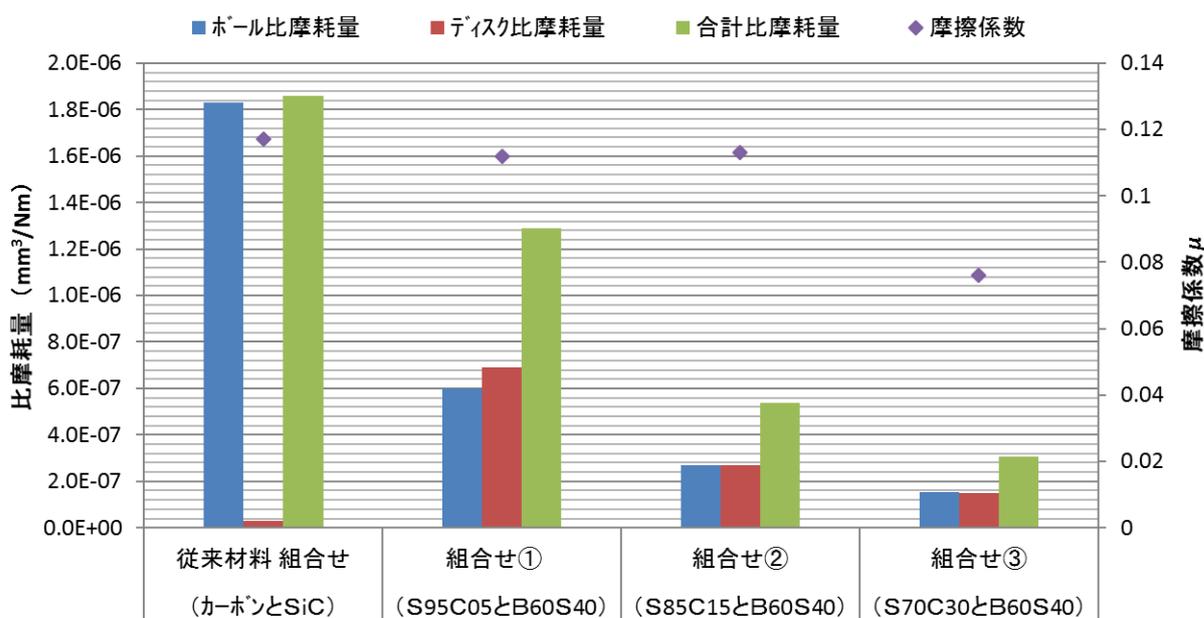


図 2-1-12 アブレイブ霧雰囲気下での各試料の摺動特性

(2) ストライバック曲線測定による開発材料の潤滑モードとその可能性（水潤滑における B<sub>4</sub>C-SiC 複合材のストライバックカーブの作成について）

目的：

B<sub>4</sub>C-SiC 複合材の潤滑下の摺動特性を評価するために水潤滑におけるストライバックカーブを作成し、表面粗さとの関係から潤滑摺動時の膜厚を統計学的に予測した。本研究では、メカニカルシールの従来材である SiC のストライバックカーブと比較することで、B<sub>4</sub>C-SiC 複合材の優位性の検証を行った。

実験：

摺動試料としてB60S40試料(25×25×5 mm)及びSiC試料(25×25×5 mm)を用い、ピン材としてSiCボール(φ10 mm)、潤滑液としては蒸留水及び非イオン性界面活性剤（エマノーン 3299RV、花王株式会社製）を用い潤滑条件下でのピンオンディスク方式による摺動試験をトライボメーター（T50型マイクロトライボメーター、NANOVIA社製）及び加速試験用補助装置（液体用カップ、NANOVIA社製）を用いて行った。ストライバックファクタ(粘度 $\eta$ ×摺動速度 $v$ /荷重 $P$ )を $10^5$ ~ $10^{13}$ の範囲で変化させて摩擦係数を測定し、作製したストライバックカーブの形状から変曲点の存在する領域を推定した。

結果と考察：

得られたストライバックカーブを図 2-1-13 に示す。

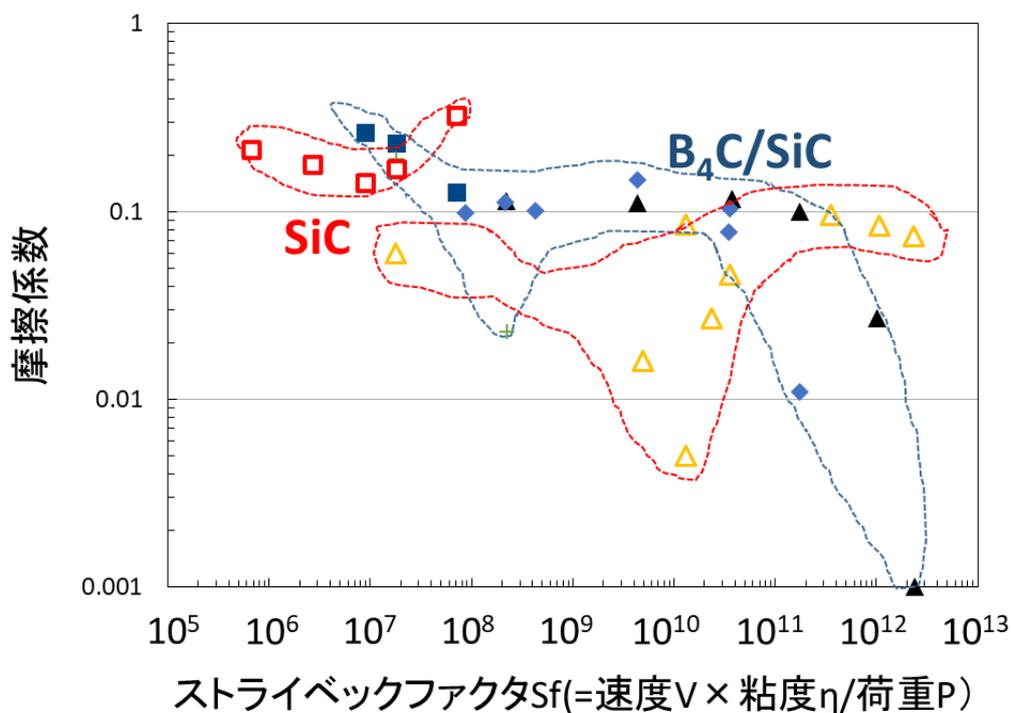


図 2-1-13 B<sub>4</sub>C-SiC 複合材及び SiC 試料のストライバックカーブ

図 2-1-13 より、B<sub>4</sub>C-SiC 複合材の場合には  $Sf=10^{10}\sim 10^{11}$  付近で境界潤滑領域から混合潤滑領域への遷移が確認された。SiC 試料においては、今回測定した  $Sf$  範囲では明確に境界潤滑から混合潤滑への遷移域が確認できなかったため、 $>10^{13}$  の領域に混合及び流体潤滑領域が存在すると思われる。

以上の事から、B<sub>4</sub>C-SiC 複合材は従来品である SiC を比較して低  $Sf$  領域で混合潤滑領域に推移することが確認でき、これは開発品が従来品と比較して、低速での摺動もしくは高負荷の摺動条件でも低摩擦を維持できることを示すことが示唆される。

### (3) 加熱環境下での摺動特性評価

目的：

水を作動媒体として加熱環境での摩擦係数や比摩耗量への影響を検討する。

実験：

摺動試料として B60S40 試料 (25×25×5 mm) を用い、ピン材として SiC ボール (φ10 mm)、潤滑液としては蒸留水を用い、ピンオンディスク方式による摺動試験をトライボメーター (T50 型マイクロトライボメーター, NANOVI A 社製) 及び加速試験用補助装置 (液体用カップ, NANOVI A 社製)、加熱ヒータ (MODEL EPC-1000, NANOVI A 社製) を用いて行った。摺動条件として、摺動距離 1000 m、摺動速度 0.1 m/s として、荷重を 5, 10, 30 N、水温を 25, 40, 60, 80℃として摺動試験を行い、摩擦係数及びディスク材・ピン材の比摩耗量  $K_{\text{disk}}$ 、 $K_{\text{pin}}$  を測定し、アレニウスプロットを作成することで、荷重及び加熱温度の影響を定量的に評価した。

結果と考察：

図 2-1-14、図 2-1-15 に各条件における摩擦係数及びディスク材とピン材の比摩耗量  $K_{\text{disk}}$ 、 $K_{\text{pin}}$  をそれぞれ示す。

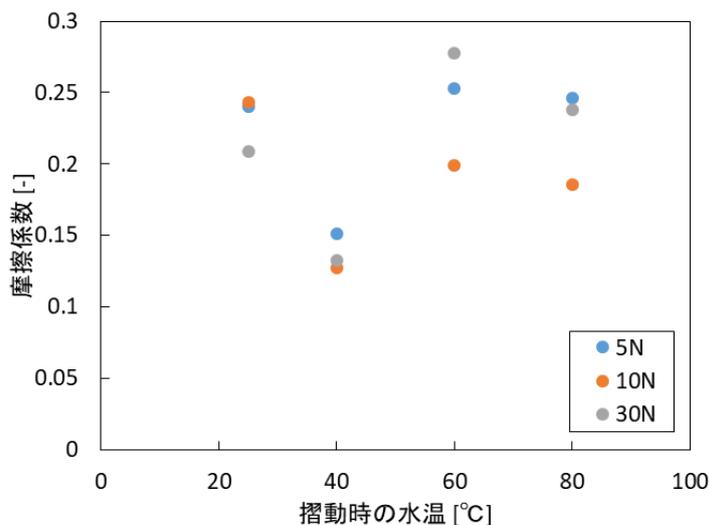


図 2-1-14 各摺動温度における摩擦係数

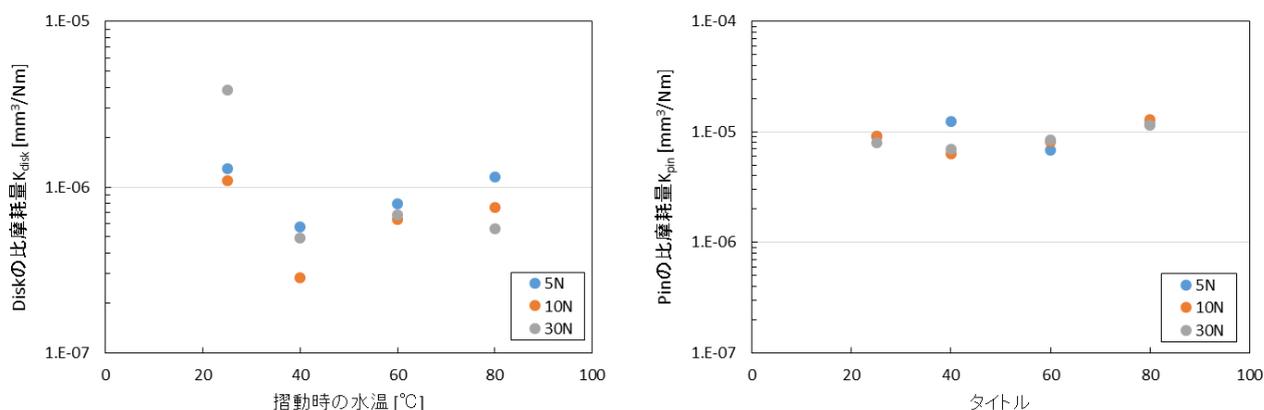


図 2-1-15 各摺動温度におけるディスク材及びピン材の比摩耗量  $K_{disk}$ ,  $K_{pin}$

図 2-1-14 より、摩擦係数はいずれの温度においても 0.1~0.3 の間にあり、40~80°Cの温度範囲においては、温度上昇に伴い摩擦係数が増加する傾向が見られた。また、図 2-1-15 から、ディスク材の比摩耗量  $K_{disk}$  に関しては摩擦係数と同様に 40~80°Cの範囲では温度上昇に伴い比摩耗量が増加する傾向が見られたが、ピン材に関しては温度による影響はほぼ見られず一定であることがわかった。また 25°Cの測定値を除いたデータに関して、荷重及び水温を因子にとり分散分析を行った結果を表 2-1-7 に示す。表 2-1-7 から、摩擦係数における温度因子の影響のみが有意水準 5%で、有意であると確認された。 $K_{disk}$  に関しては、有意水準 5%では棄却できなかったものの荷重よりは低い P 値をとっており、摩擦係数と同様の傾向が確認された。

次に、 $K_{disk}$  の結果に対して、 $1/T$  を横軸に  $\ln K_{disk}$  をプロットしたアレニウスプロットを図 2-1-16 に示す。図 2-1-16 からいずれの荷重においても  $1/T$  に対する線形性が得られており、ディスク材の摩耗に対して荷重の影響よりも温度による影響が大きいことが確認された。また、低荷重(5N)においては、近似直線の  $R^2=0.99$  と非常に高くさらに高温でのディスク材の比摩耗量を予測可能であることが示唆された。

表 2-1-7 摩擦係数及び  $K_{\text{disk}}$ 、 $K_{\text{pin}}$  を従属変数とした際の各々の分散分析表

変動要因	変動	自由度	分散	分散比	P-値	F 境界値
A:荷重	1.5E-13	2	7.4E-14	3.27603	0.1437	6.94427
B:温度	2.1E-13	2	1.1E-13	4.70746	0.08891	6.94427
誤差	9E-14	4	2.3E-14			
合計	4.5E-13	8				

変動要因	変動	自由度	分散	分散比	P-値	F 境界値
A:荷重	3.3E-12	2	1.6E-12	0.29568	0.75899	6.94427
B:温度	3.1E-11	2	1.6E-11	2.80663	0.17313	6.94427
誤差	2.2E-11	4	5.5E-12			
合計	5.6E-11	8				

変動要因	変動	自由度	分散	分散比	P-値	F 境界値
A:荷重	0.00135	2	0.00067	0.71498	0.54266	6.94427
B:温度	0.03394	2	0.01697	17.9796	0.01002	6.94427
誤差	0.00378	4	0.00094			
合計	0.03906	8				

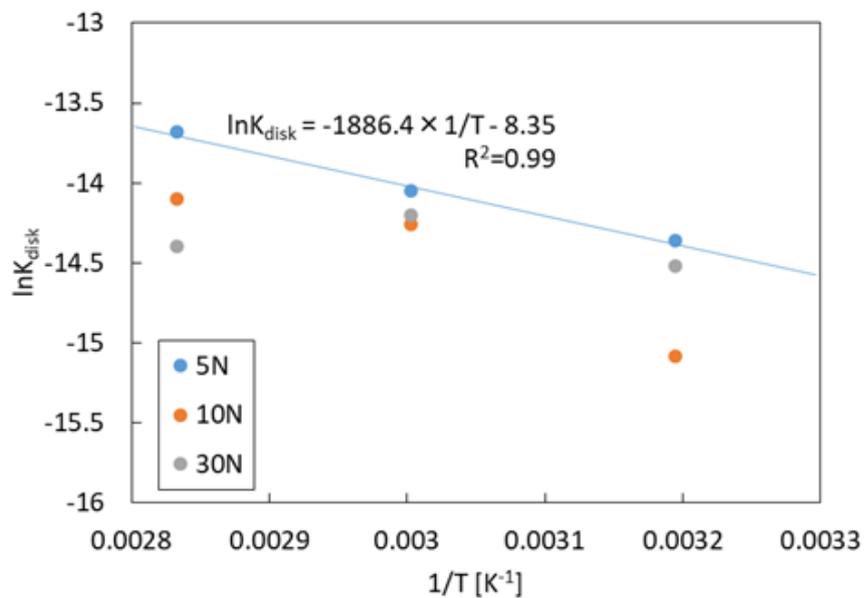


図 2-1-16 アブレシブ雰囲気下での各試料の摺動特性

## 2-2. 表面加工技術開発

一般にメカニカルシール部材への負荷は、ポンプの定常運転時に比べ、始動時と停止時において大きくなる。定常運転時は、潤滑剤(通常は密封流体)が摺動面全体を覆っている、いわゆる流体潤滑状態となり比較的摩擦係数が低くなることから損傷が小さくなる。一方、始動時や停止時には、潤滑剤が摺動面全体を覆いきらず、摺動部材同士(回転リングと固定リング)が一部接触する、いわゆる境界潤滑状態となり、摩擦係数が高くなることから損傷が大きくなる。とくにポンプ始動時においては、潤滑剤となる流体が到達するまでの間は無潤滑、いわゆるドライの状態となる設備方式もあり、出荷時のメカニカルシール部材の表面状態がポンプ性能に大きな影響をおよぼす。

本研究開発項目では、本技術の特徴の 1 つであるナノクレーター構造を有する表面を形成するための最適な鏡面研磨条件について研究し、鏡面研磨条件(ダイヤモンド砥粒等)、表面粗さの影響について検討した。

### 2-2-1. ピース形状表面加工技術開発

素材に単純形状であるピース形状の B6OS40 焼結体を用いて、各種加工条件で研磨加工をおこなった際の表面状態の変化を測定・評価し、摺動材料に必要な各種研磨条件の確立を図った。表面形状形成装置での実験条件は、砥粒に 1  $\mu\text{m}$  のダイヤモンドスラリーを使用して鏡面に仕上げた後、表面の凹凸状態の測定を行った。

図 2-2-1 に、研磨時間 10、30、60 分間の試料について、原子間力顕微鏡 (AFM) 画像と画像上の任意の線分において表面凹凸状態を測定した結果を示す。なお、AFM 画像上でコントラストの明るい部分が周囲に比べ高い(凸となっている)箇所を表す。この AFM 画像上で位置によるコントラストの差が認められ、コントラスト差を含む線分上での高さ測定において、ナノクレーターの形成を示す数 nm の凹凸の形成が認められた。

次に、B6OS40 の特徴の 1 つとして、摩耗しても表面のナノクレーター構造が維持され、優れた摺動特性が維持されることを実証するため、ナノクレーターが形成されている研磨面を削り落とした後、再度表面の観察を行い、ナノクレーターが維持されるかどうかを検討した。1  $\mu\text{m}$  ダイヤ砥粒スラリーにて研磨加工仕上げした後、3  $\mu\text{m}$  ダイヤ砥粒スラリーを用いて 60 分研磨し、表面から 20~30  $\mu\text{m}$  を削り落とし、再度 1  $\mu\text{m}$  ダイヤ砥粒スラリーにて研磨した。通常研磨での研磨面、及び表面から 20~30  $\mu\text{m}$  削り落とした後再度研磨した面の AFM による表面凹凸状態を図 2-2-2 に示す。AFM 観察の結果、通常研磨

面では約 20nm の表面凹凸が、20~30 $\mu\text{m}$  削り落とした面でも約 14nm の凹凸が観察された。

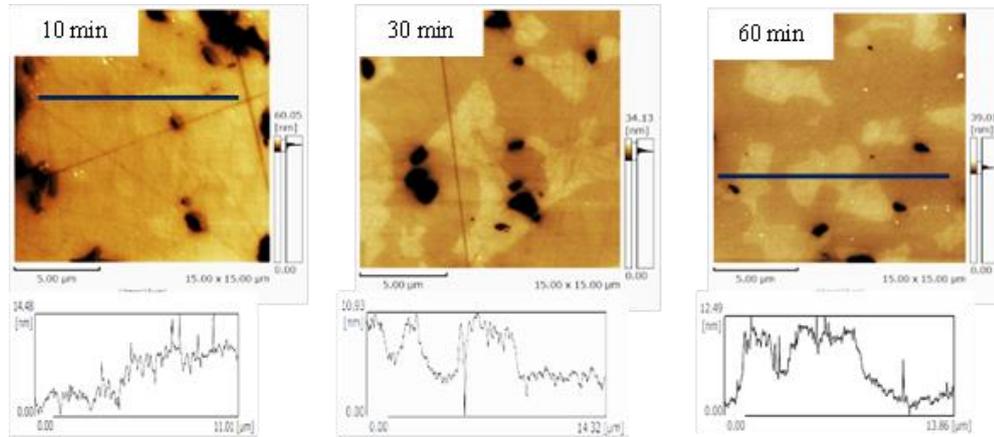


図 2-2-1 B6OS40 の AFM による微細構造観察結果

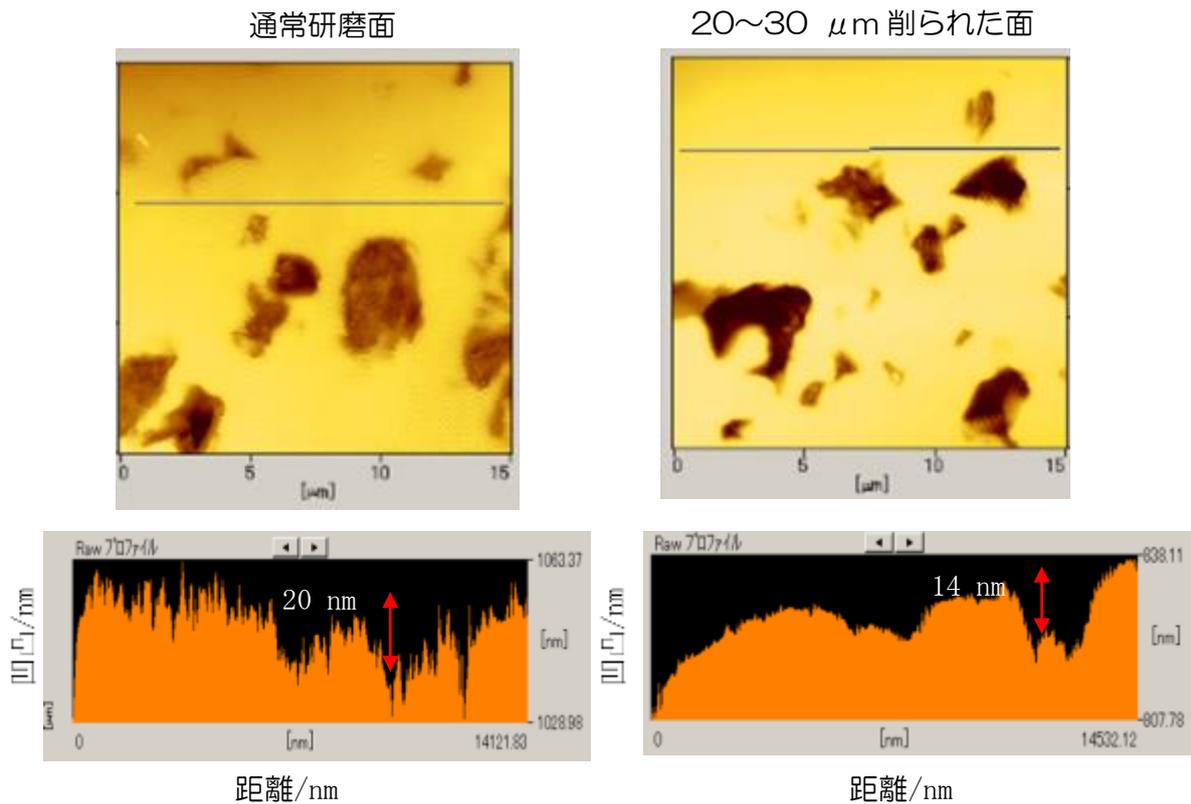


図 2-2-2 通常研磨面と 20~30 $\mu\text{m}$  削り落とした面の  
原子間力顕微鏡による表面凹凸観察結果

以上のことから開発材である B6OS40 を鏡面研磨仕上げした際に、ナノクレーターが形成されることが確認され、またナノクレーターを形成した面を一度削り落とし、再度鏡面研磨仕上げした際に、再びナノクレーターの形成が確認されたことから、B6OS40 は摩耗しても継続的にナノクレーター構造が形成され続けることが示された。

## 2-2-2. 製品形状表面加工技術開発

表面形状形成装置を用い、2-2-1 項で既述したピース形状品における表面ナノクレーター形成が、メカニカルシールモデル形状のリング形状試料においても形成可能かを検討した。

図 2-2-3 に示すように、B6OS40 組成の $\phi 90$  のリング形状試料と、 $\phi 40$  ペレット形状試料を、同様に  $1\ \mu\text{m}$  ダイヤ砥粒スラリー条件で鏡面加工仕上げを施した。

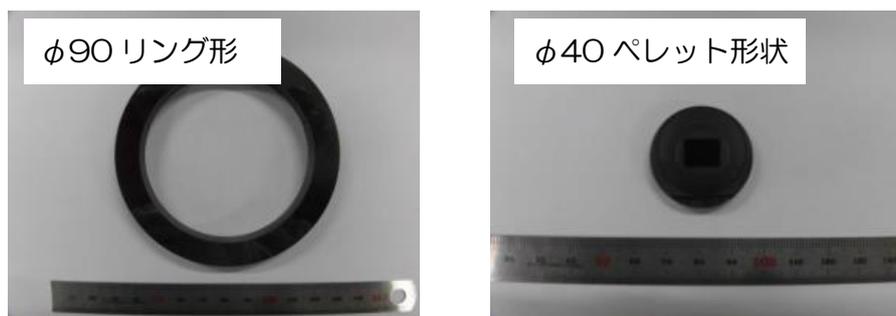


図 2-2-3  $\phi 90$  リング形状及び $\phi 40$  ペレット形状研磨面外観

リング形状試料及びペレット形状試料の AFM による表面凹凸観察結果を図 2-2-4 に示す。AFM による表面の凹凸はリング形状試料で約  $5\ \text{nm}$ 、ペレット形状試料で約  $4\ \text{nm}$  であったことから、ペレット形状試料の表面状態がモデル形状であるリング形状試料でも同じようにナノクレーター構造が形成可能であることがわかった。

以上の実験から決まった研磨条件は次章の「2-3. 複雑実形状技術開発」にて作製したモデル形状の研磨に適用し、それを「2-4. 実機相当評価」モデル形状実装評価装置に供した。

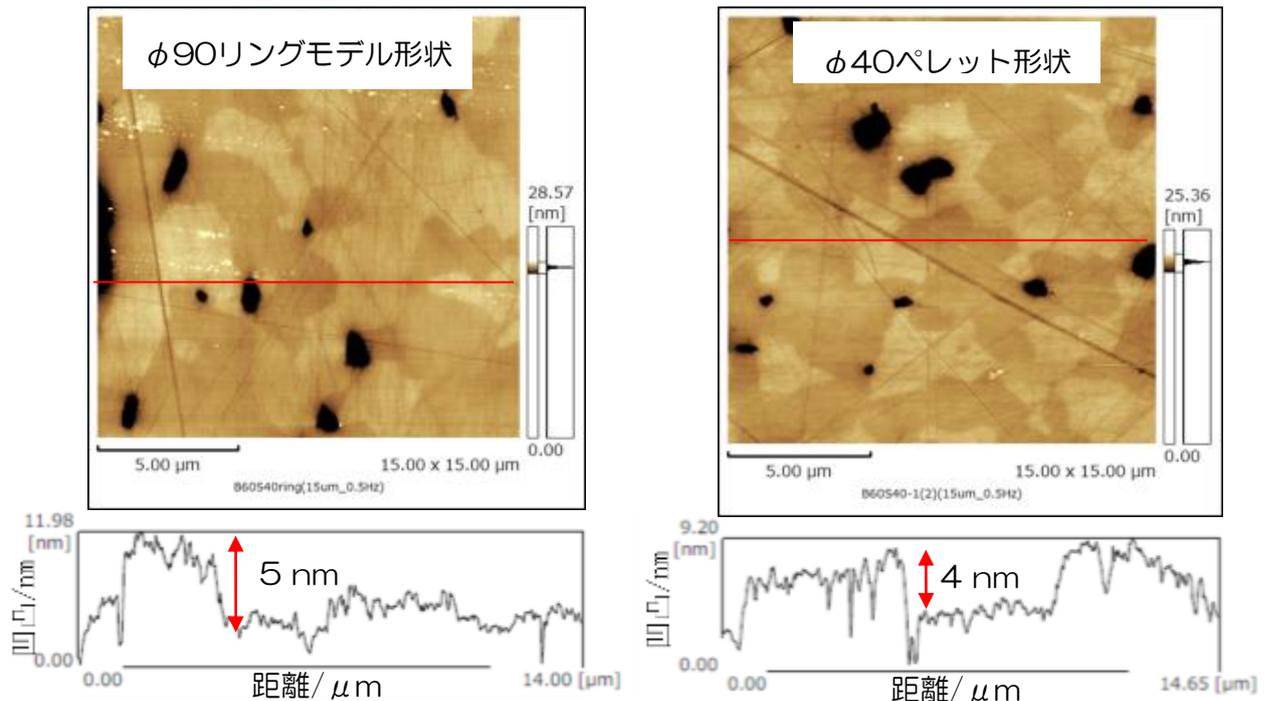


図2-2-4 原子間力顕微鏡(AFM) 研磨加工面の凹凸

### 2-3. 複雑実形状技術開発

メカニカルシール実形状を試作する工程は、①粉末原料の混合、②混合粉末の造粒、③成形、④脱脂、⑤焼成、⑥鏡面加工に分かれており、その中で、低コストでメカニカルシール実形状にするためには③成形段階で、脱脂・焼成時の収縮を考慮しながら、造粒原料をニアネットシェイプに成形する技術確立が必要がある。

実際のメカニカルシールはポンプ形状に応じて軸径がφ20～200 と多岐にわたる。また、固定リングと回転リングは、それぞれで形状が異なる。これらの形状に対応できるニアネットシェイプ成形技術(CIP 成形、プレス成形等)について研究し、亀裂や割れが発生しないメカニカルシール形状成形技術の確立を目指した。本項目は「2-3-1. 冷間静水圧プレス(CIP)成形技術開発」と「2-3-2. プレス成形技術開発」に分け、開発を進めた。

#### 2-3-1. 冷間静水圧プレス(CIP)成形技術開発

ゴム型容器の中に造粒粉末を充填し、冷間静水圧プレス（以下 CIP とする）成形を試みた。試作する上で、固定リング及び回転リングに相当するモデル形状を設定した。図 2-3-1 に CIP で試作する固定リングと回転リングのモデル形状の図面を示す。成形の際、通常は直方体を成形し、マシニングセンタでリング形状に削り出すが、原料廃棄量を減らすため、CIP

型の中空部には金属芯を入れることで直接リング形状を CIP 成形できるよう工夫した。

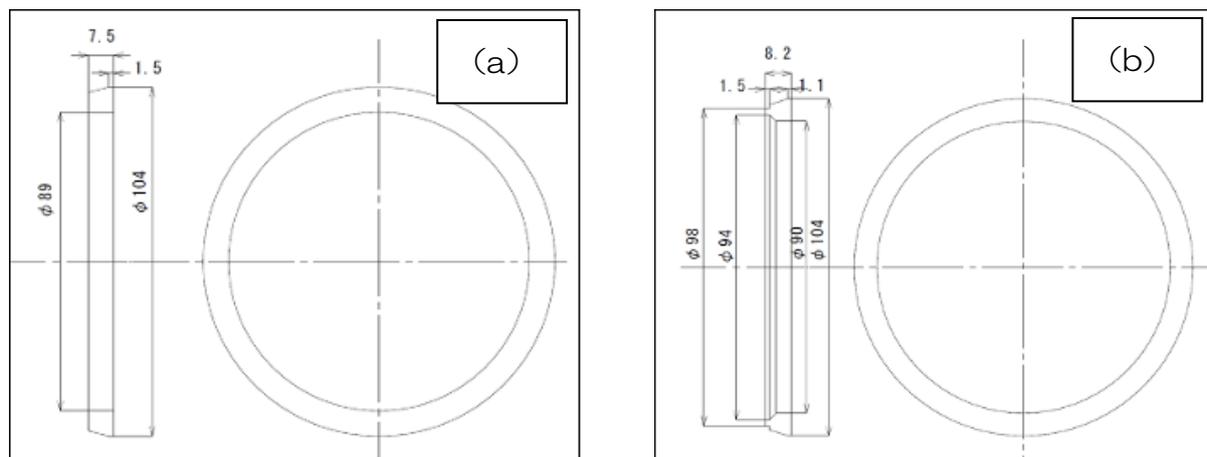


図 2-3-1 モデル形状図面 (a) 固定リング (b) 回転リング

原料をゴム型に充填し、ゴムの開封部に同材質のゴム製のフタをビニルテープで密封した。原料が充填されたゴム型を長方形に近い形状に保つため、直方体状のパンチングメタル状の金物に入れて圧力  $1.5 \text{ ton/cm}^2$  で 1 分間 CIP 成形を実施した。ゴム型から成形体を取り出し、成形体をマシニングセンタにセットして、所定のリング状に加工後、焼成した。これらの工程における試料の外観は図 2-3-2 に示す。このようにしてゴム型と金属の中芯を用いることによる、原料ロスを少なく抑えた方法で、大型のリング形状焼結体が得られた。

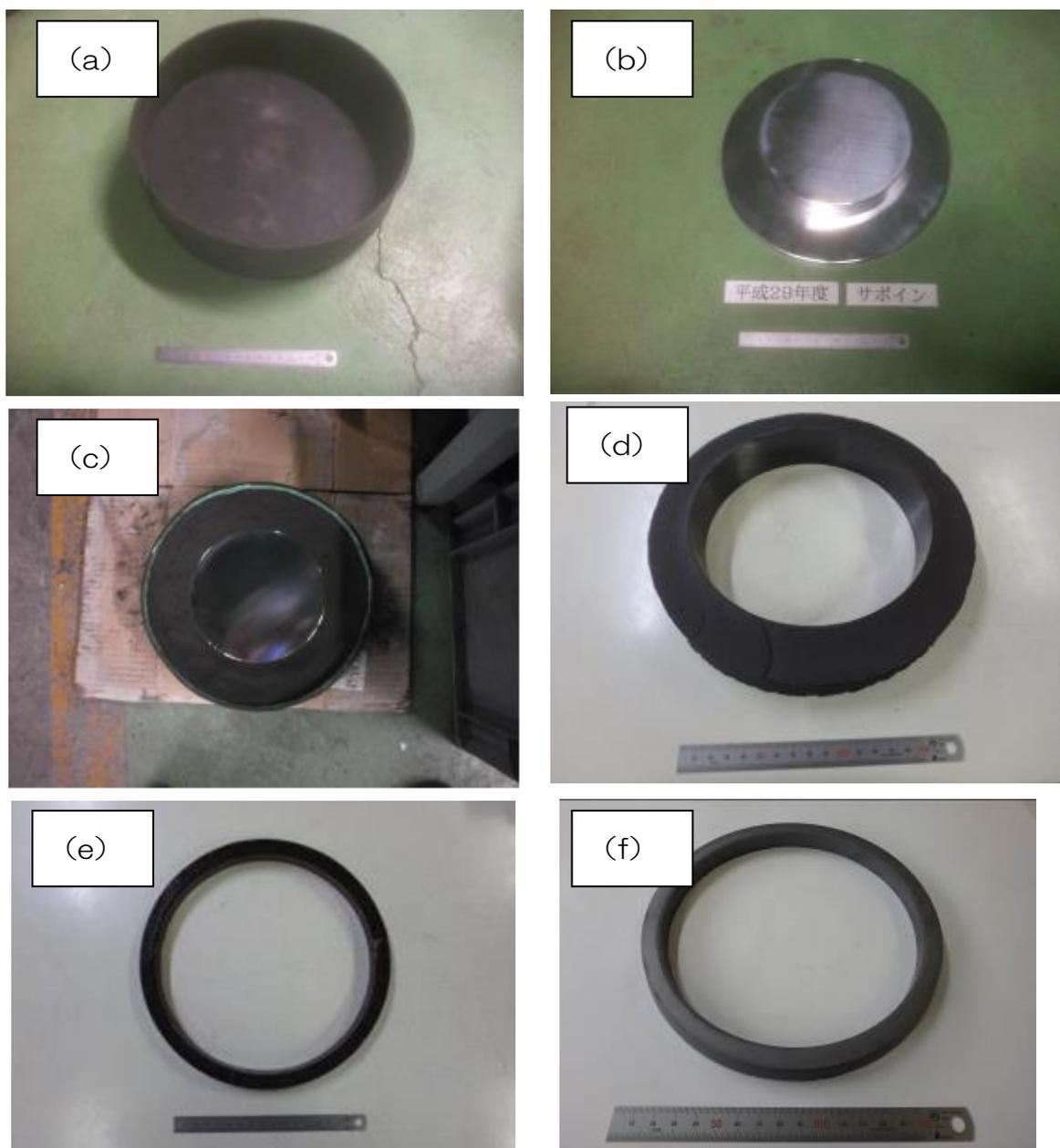


図. 2-3-2 (a)中空リング成形体を製造するためのCIPゴム型と(b)金型(c)原料を充てんした図 (d) 成形体 (e) 加工体 (f) 焼結体

### 2-3-2. プレス成形技術開発

メカニカルプレスや油圧プレスを用いたプレス成形が可能になると、より低コストでの生産の可能性が広がる。冷間静水圧プレス(CIP)成形技術開発では、CIP型への原料の充てん及び型への水混入抑制対策に多くの時間を要する。一方、油圧プレスにより予備成形を行うことで時間短縮が期待できる。さらにCIP成形を行わず、メカニカルプレスのみで成形できれば、更に生産性の向上が期待できる。このため、メカニカルプレスや油圧プレスによる二

アネットシェイプ成形するための条件(成形圧、金型の可動タイミング等)の把握を目指した。

まずは油圧プレスによる検討結果について述べる。図 2-3-3 に設定したモデル形状の図面を示す。この図面をもとに油圧プレス成形用の成形体寸法と、実際に導入した金型の外観を図 2-3-4 に示す。

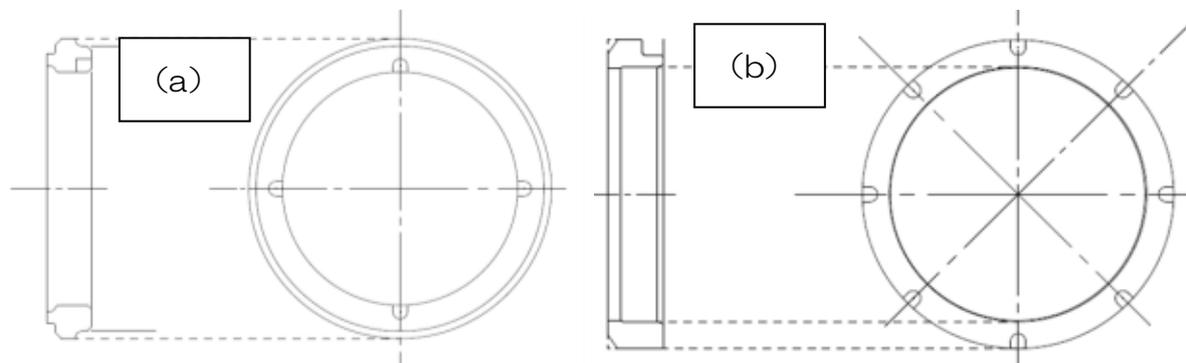


図 2-3-3 モデル形状図面 (a) 固定リング (b) 回転リング

収縮率  
直径方向 0.771  
厚み方向 0.815  
加工代 各1.5mm

アドバイザー提示  
外径 144mm  
内径 112mm

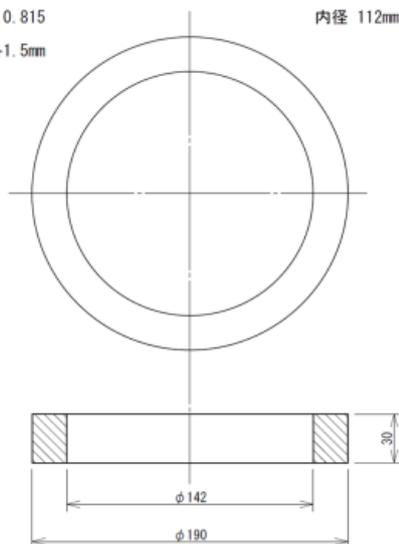


図 2-3-4 一軸プレス成形体寸法とモデル形状成形用金型外観

プレス成形用金型に原料を充填し、約  $100 \text{ kg/cm}^2$  で加圧成形後、 $2 \text{ ton/cm}^2$  の圧力で CIP 成形を行い、得られた成形体をマシニングセンタによりニアネットシェイプに加工した後、脱脂・焼成を行った。成形体加工前、加工後、及び焼成後のモデル形状試作品の外観写真を図 2-3-5、及び図 2-3-6 に示す。図より明らかなように、固定リング形状及び回転リング形状のいずれにおいても亀裂や欠け等なく、試作体を作製することができた。



図2-3-5 固定リング試作品外観 (a) 成形体加工前 (b) 成形体加工後 (c) 焼成体



図2-3-6 回転リング試作品外観 (a) 成形体加工前 (b) 成形体加工後 (c) 焼成体

表 2-3-1 にモデル形状品試作における各成形方法の原料ロスをまとめて示す。中芯無しからの削り出しと比較して、プレス成形と CIP 成形を組み合わせることにより、モデル形状作製に要する原料の約 50%を削減できることを明らかにした。

表 2-3-1 試料重量と原料ロス重量

成形方法	試料重量(g)	原料ロス重量(g)	試料比率(%)	ロス比率(%)
CIP (中芯無し)	71	1283	5.2	94.8
CIP (中芯有り)	300	800	27.3	72.7
油圧プレス	368	296	55.4	44.6

これらの結果から、プレス成形と CIP 成形を組み合わせた成形により、加工量の少ないニアネット成形体を得られることが分かった。しかし一般に油圧プレスの成形効率性は低い。したがって、より低コスト化を図るため、より成形効率の高いメカニカルプレスによるモデル形状の成形方法の確立を目指した。

モデル形状メカニカルプレス金型を導入するにあたり、金型寸法の検討から実施した。なお、本章のモデル形状とは、「2-4. 実機相当評価」のモデル形状実装評価装置に供することを想定した形状であるため、モデル形状実装評価装置に組み込む片吸い込みポンプ用メカニカルシール部材図面を参考にすることで、固定リングと可動リングの 2 形状の作製を試みた。これら 2 形状のリングを一つの金型から作製するために、今回導入するモデル形状メ

カニカルプレス金型は固定リングと可動リングどちらも削り出しが可能な大きさの単純リング形状とした。検討の結果、単純リング形状は焼成後の寸法で、最大外径 46.9mm 以上、最小内径 32mm 以下が必要であることがわかった。この際、異なる種類の原料が焼成収縮しても固定リング、回転リング双方に対応可能な単純リング形状寸法について、表 2-3-2 を用いて整理した。

表 2-3-2 モデル形状メカニカルプレス金型 寸法値と最大成形圧

	外径	内径
目的寸法(mm)	46.90	32.00
収縮率(mm)	16.60	13.28
収縮前寸法(mm)	56.24	36.90
	収縮・加工代 3mm+α	
金型寸法(mm)	59.50	33.50
金型面積(cm <sup>2</sup> )	18.99	
最大成形圧(ton/cm <sup>2</sup> )	1.05	

導入したモデル形状メカニカルプレス金型の外観と図面の一部を図 2-3-7 に示す。

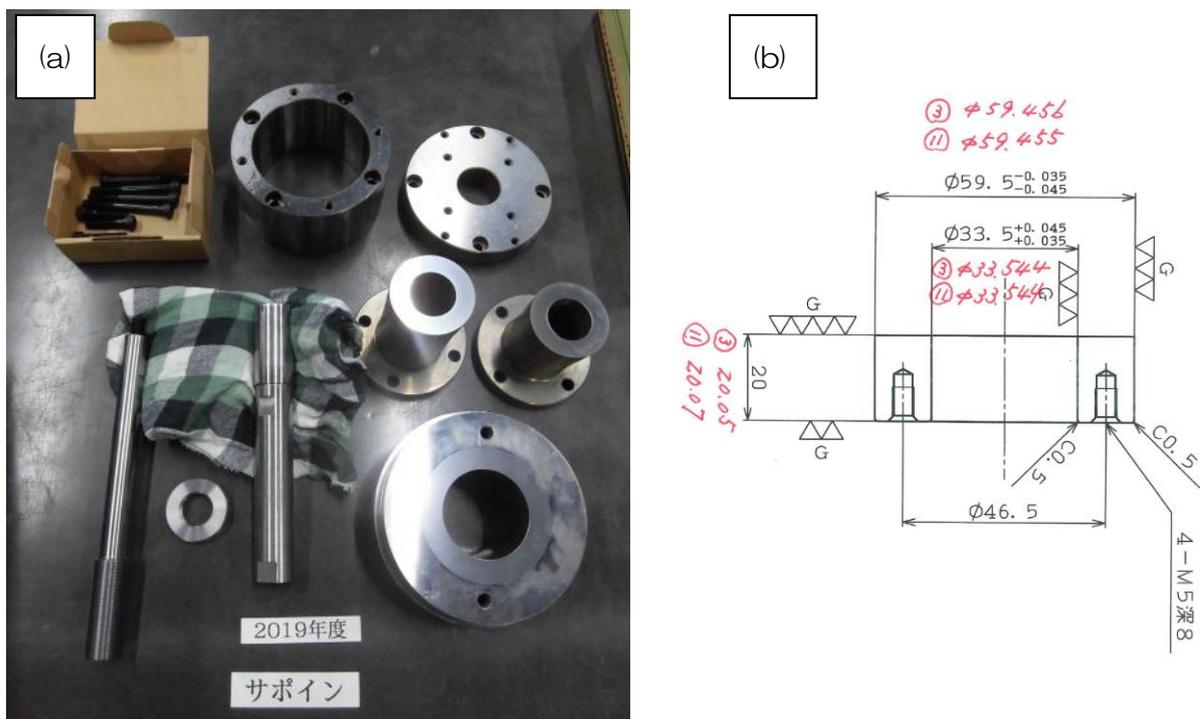


図 2-3-7 モデル形状メカニカルプレス金型(a)外観写真(b)図面

導入した金型を使用して実際に 4 種類の原料で成形体を作製し、加工、焼成をした。得られた焼結体の密度物性と外観をそれぞれ表 2-3-3、図 2-3-8 に示す。

表 2-3-3 焼結体の物性値

	かさ密度(g/cm <sup>3</sup> )	相対密度(%)
B60S40	2.71	97.6
S95C05	3.07	97.3
S85C15	2.94	96.2
S70C30	2.54	87.5

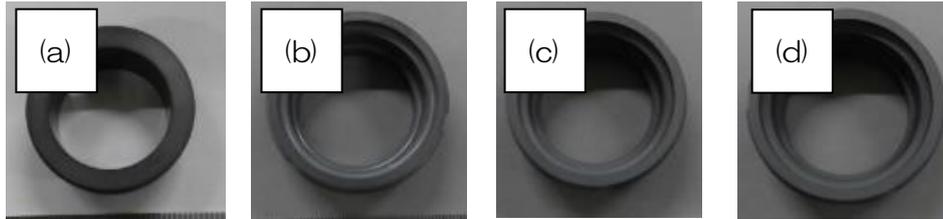


図 2-3-8 モデル形状焼結体 (a) 固定リング (B60S40), (b) 回転リング (S95C05), (c) 回転リング (S85C15), (d) 回転リング (S70C30)

これらのモデル形状焼結体を仕上げ加工し、「2-4. 実機相当評価」のモデル形状実装評価装置に組み込み、実装評価に供した。

## 2-4. 実機相当評価

2-1～2-3項までに開発された技術を合わせて試作された実際のメカニカルシールの開発品の評価を実施した。

### 2-4-1. 実装評価方法の検討

摺動評価は点接触によるボールオンディスク法で行っていたが、実際に使用されるメカニカルシール形状では面と面での接触となり、摺動面同士の表面状態がなじみや寿命等への影響が関係してくることが予想される。そこで、簡易モデル形状実装評価装置を導入し、モデル形状の寿命評価や摺動特性の評価方法の可能性について検討を行った。簡易モデル形状実装評価装置の結果をモデル形状実装評価装置の設計へ反映させ、実機での製品形状でのより詳細な寿命評価や摺動特性評価へ展開した。

実際のポンプに使用されているカートリッジ式メカニカルシールを採用した簡易モデル形状実装評価装置の設計・導入を行った。購入したメカニカルシールの固定リングは SiC 材質、回転リングはカーボン材質であった。固定・回転リングを簡易モデル形状実装評価装置に組み込み運転させることで、比摩耗量、水漏れの有無の評価が可能であることが分かった。また、

モデル形状実装評価装置ではより実際の環境に近い温度、圧力を制御可能な構造であり、かつより詳細な評価としてトルクの測定が可能な装置の設計を行った。

#### 2-4-2. 実装評価

高温高圧下（140℃、0.63MPa）で運転可能で運転中のトルク推移、漏れの有無及び運転後の比摩耗量の評価が可能なモデル形状実装評価装置を設計した。図 2-4-1 に装置のイメージ図を示す。装置はボイラ給水ポンプと同様に高温環境下での無冷却化のニーズがある市販の片吸込みポンプをベースに改造した。

表 2-4-1 に実施した材料の固定リングと回転リングの組み合わせを示す。表記は【1】で示したのと同様に、SiC-C 系材料は C 量が 5、15、30%のそれぞれの組成を S95C05、S85C15、S70C30 とし、B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料は B<sub>4</sub>C 含有量が 60%の組成の B60S40 とした。各試料を装置に組み込み 140℃、0.6MPa、6m/s、無冷却下で 100 時間運転を行った。運転中の摩擦係数の推移を図 2-4-2 に示す。なお、摩擦係数はばねの面圧 1MPa と仮定して計算した。図 2-4-2 より、いずれの試料でも摩擦係数 0.05 以下で推移しながら瞬間的に高摩擦を示す傾向がみられた。瞬間的な高摩擦化は固体接触が起きているためと考えられる。つまり、境界潤滑領域または混合潤滑領域での摺動であることを示していると判断できる。図 2-4-3 に運転中の平均摩擦係数を示す。従来材料の組み合わせが最も低い値であったが、硬質材料同士である S95C05vsB60S40 の組み合わせも従来材料と同程度であることが分かった。S85C15vsB60S40 及び S70C30vsB60S40 ではカーボン量が増えるに従い、摩擦係数が増加していく傾向を示した。

運転中の漏れは、S70C30vsB60S40 の組み合わせで 38 時間後に目視で確認できる蒸気の漏れが発生した。漏れ発生後には圧力が 0.4MPa 程度まで低下し 1 時間程度経過しても圧力の回復が確認されなかったため、運転を停止した。また、従来材料及び S85C15vsB60S40 の組み合わせで図 2-4-4 に示すようにシール部付近のシャフトに水道水から析出したスケールによるものと思われる痕が残っていたことから、蒸気での漏れが発生したと考えられる。S95C05vsB60S40 の組み合わせではシャフトにスケールの痕跡は確認されず、漏れは確認されなかった。

運転後の摺動痕の表面状態について観察した。図 2-4-5～8 に 3D スキャナーで測定した各試料の表面プロファイルを示す。従来材料では表面が荒れているのに対し、組合せ①では表面状態は比較的平坦であり良好であった。

運転後の摩耗量について、回転リングは厚みの測定結果から、固定リングは摩耗痕の断面積の測定結果から摩耗体積を算出した。図 2-4-9 に各試料の運転後摩耗量（摩耗体積）を示す。従来材料に比べて開発材①で固定・回転リングともに摩耗量が小さい結果であり、摩耗量の合計で 60%削減していることが確認された。開発材②③においては、従来材料よりも摩耗量が多い結果となった。

上記より、S95C05vsB60S40 の組合せで従来材料と比較して優位な結果が得られ、無冷却で使用できる可能性が示唆された。

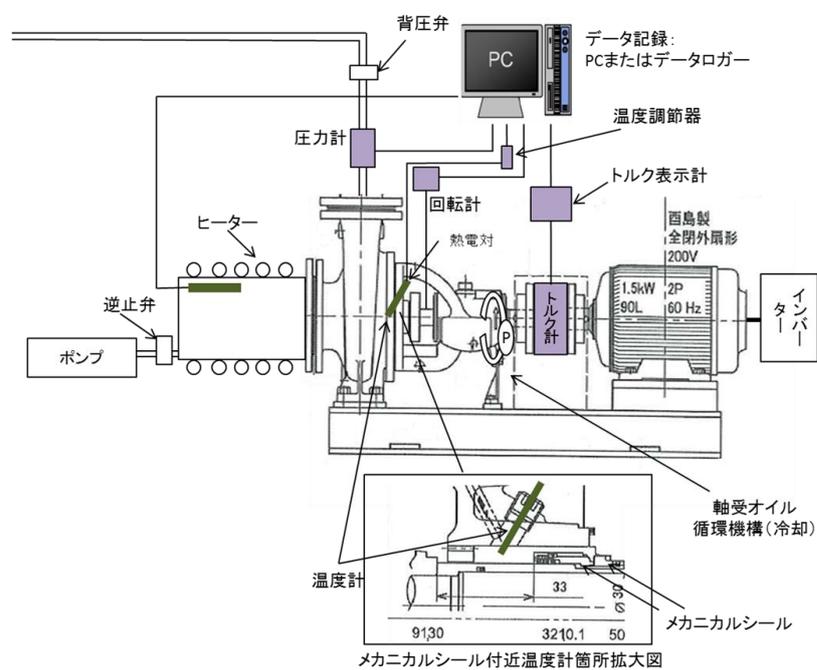
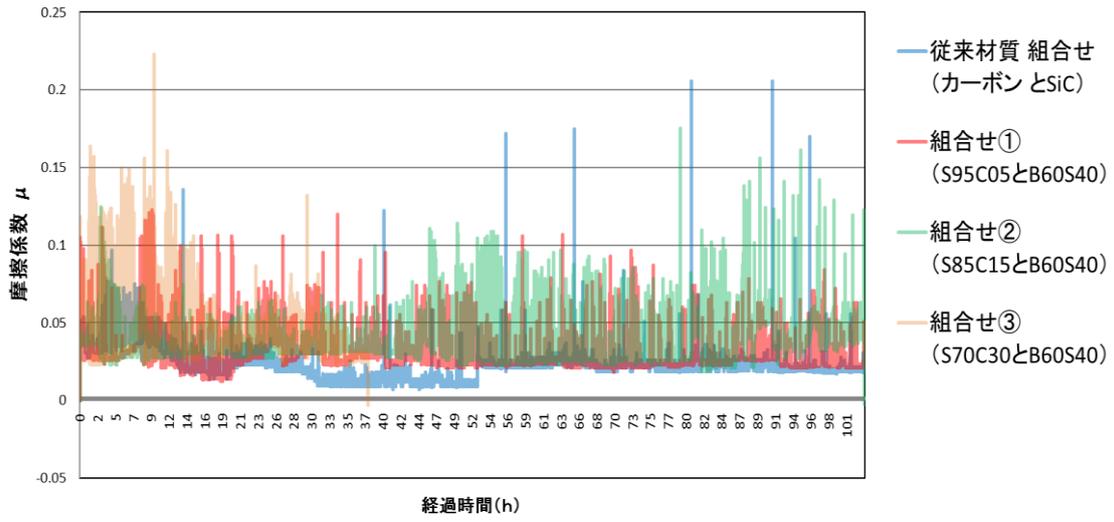


図 2-4-1 モデル形状実装評価装置のイメージ図

表 2-4-1 回転・固定リングの各組合せ

	回転リング	固定リング
従来材料 組合わせ	カーボン	S i C
組合せ①	S 95 C 05	B 60 S 40
組合せ②	S 85 C 05	B 60 S 40
組合せ③	S 70 C 30	B 60 S 40



### 運転時平均摩擦係数

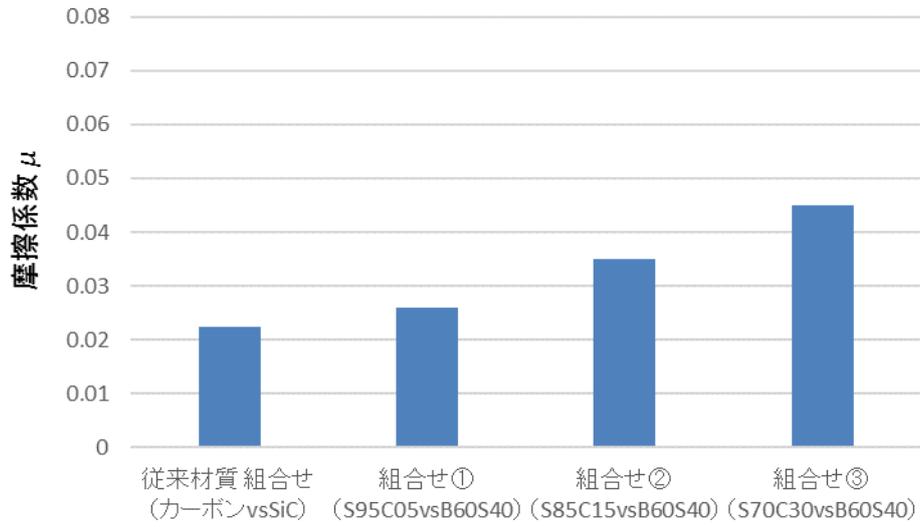


図 2-4-3 運転の平均摩擦係数

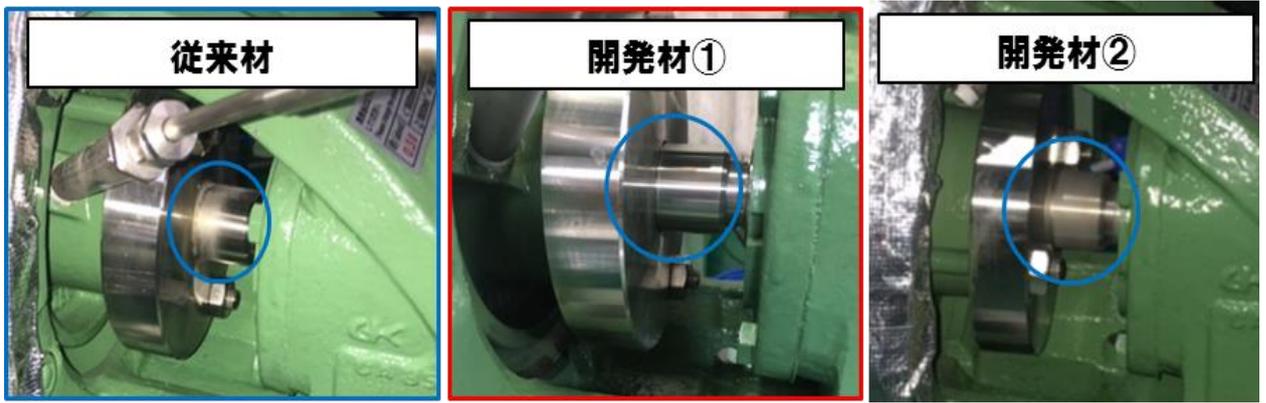
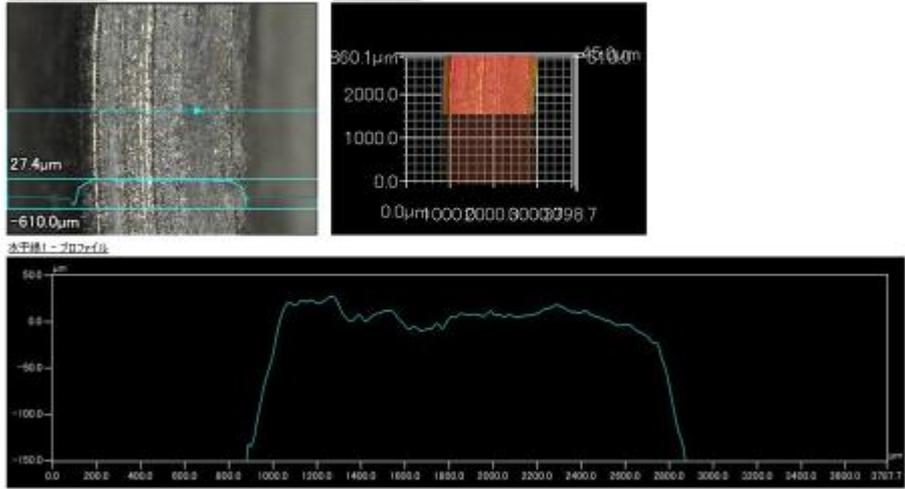


図 2-4-4 運転時のシール部付近の外観写真（漏れ痕跡の写真）

測定条件	内容	測定機器
項目		KEYENCE VR-3000 シリーズ
測定日時	2020/02/01 0:55:28	
カメラ	高倍	
倍率	80x	
水平線1 - スキャン線		



厚み0.04mm摩耗

測定条件	内容	測定機器
項目		KEYENCE VR-3000 シリーズ
測定日時	2020/02/01 0:56:53	
カメラ	高倍	
倍率	80x	
水平線1 - スキャン線		

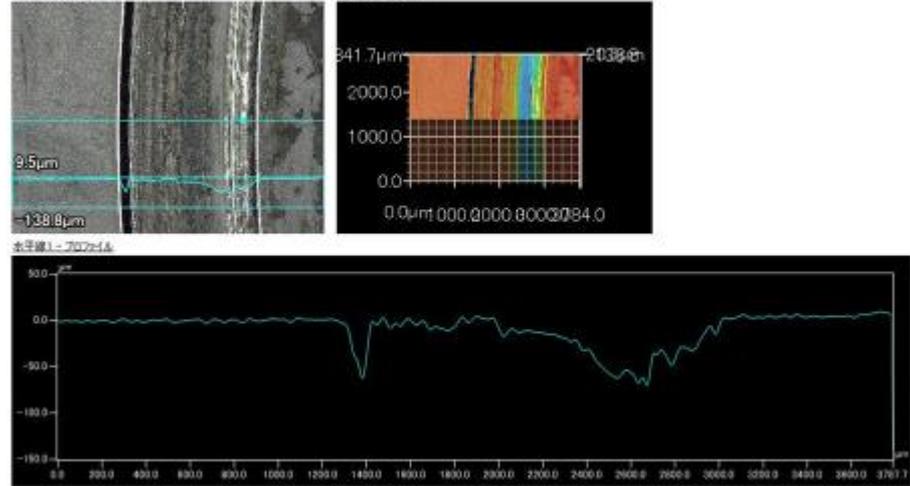
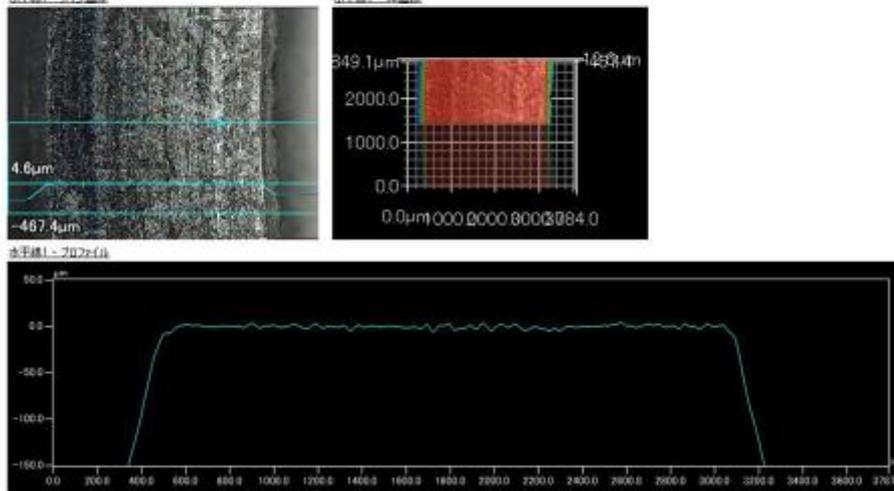


図 2-4-5 従来材料の運転後摩耗痕表面プロファイル (上) 回転リング、  
(下) 固定リング

測定条件	内容	測定機器
項目		KEYENCE VR-3000 シリーズ
測定日時	2020/02/13 8:25:31	
カメラ	高倍	
倍率	88x	



厚み0.02mm摩耗

測定条件	内容	測定機器
項目		KEYENCE VR-3000 シリーズ
測定日時	2020/02/13 9:22:11	
カメラ	高倍	
倍率	88x	

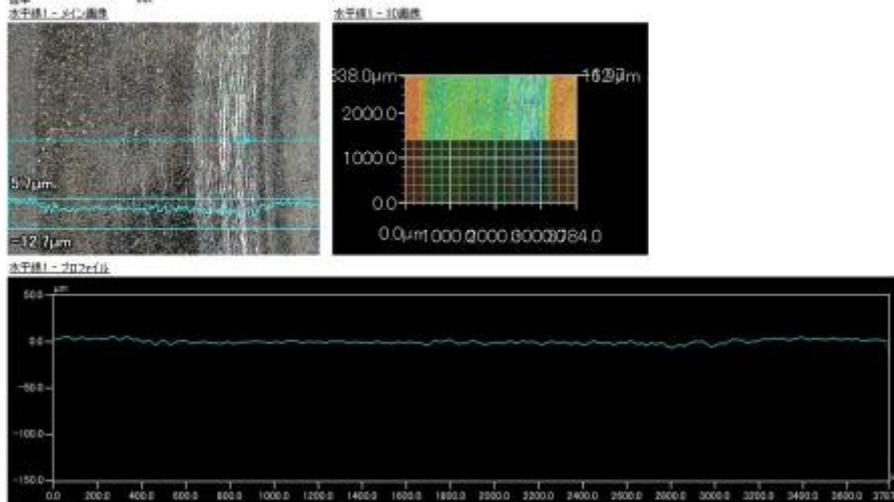


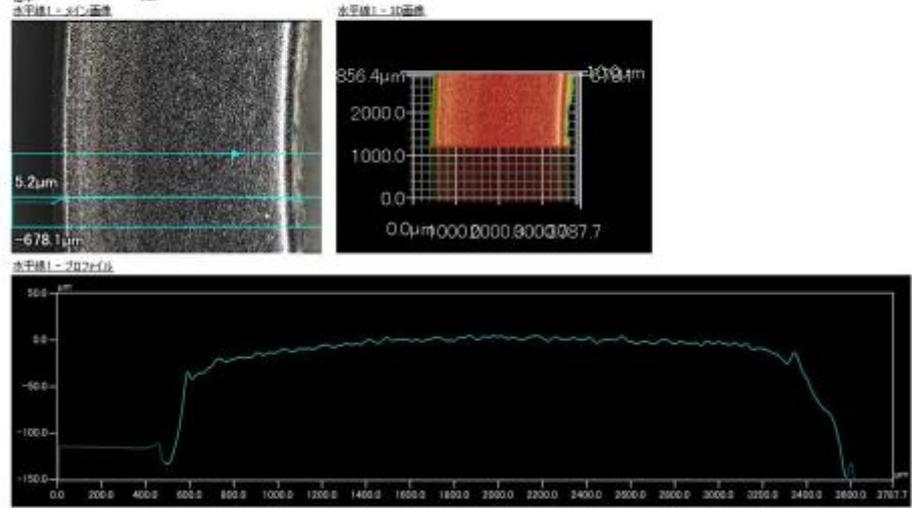
図 2-4-6 開発材①の運転後摩耗痕表面プロファイル (上) 回転リング、  
(下) 固定リング

S85C15 x80

プロファイル計測

測定条件	内容
項目	内容
測定日時	2020/02/18 08:08:08
カメラ	高倍
倍率	88x

測定機器: KEYENCE VR-3000 シリーズ



厚み0.02mm摩耗

B60S40 x80

プロファイル計測

測定条件	内容
項目	内容
測定日時	2020/02/18 08:10:01
カメラ	高倍
倍率	88x

測定機器: KEYENCE VR-3000 シリーズ

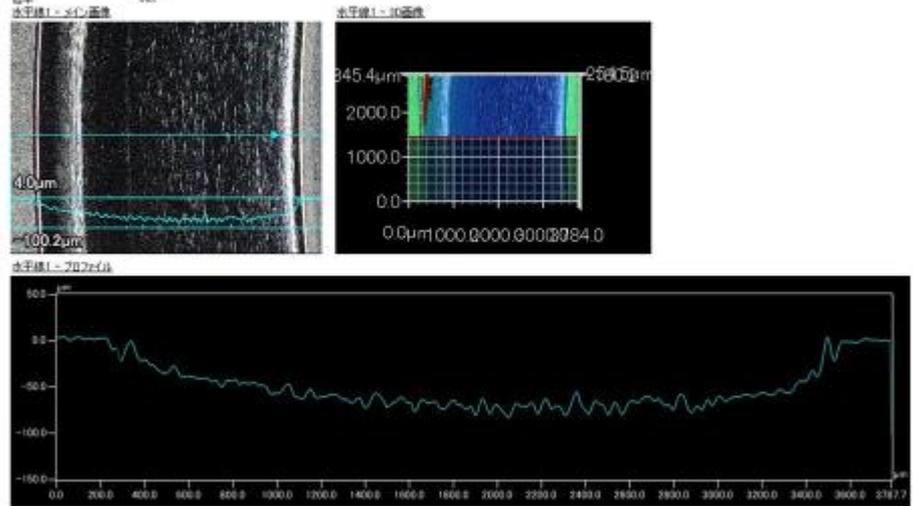
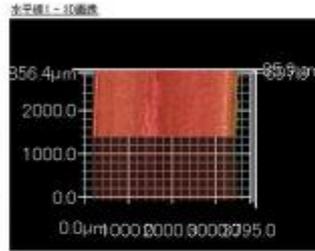
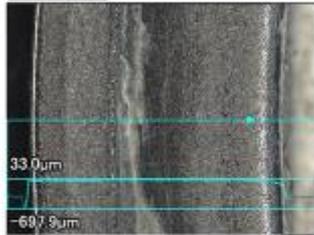


図 2-4-7 開発材②の運転後摩耗痕表面プロファイル (上) 回転リング、  
(下) 固定リング

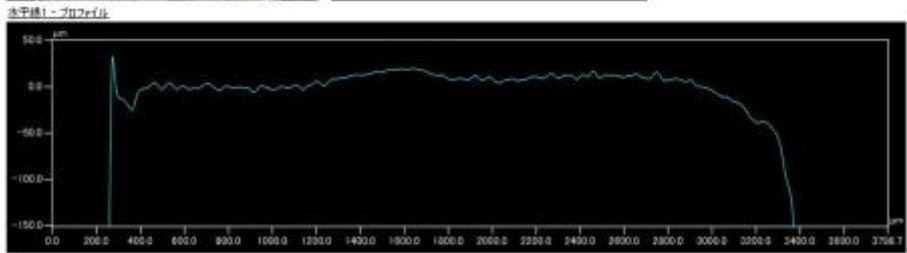
S70C30回転リング(φφ80)x80

プロファイル計測

測定条件	内容	測定機器
項目	内容	KEYENCE VR-3000 シリーズ
測定日時	2020/02/17 16:44:05	
カメラ	高倍	
倍率	88x	
水平線1 - スキャン線		



30h程で漏れ  
運転停止

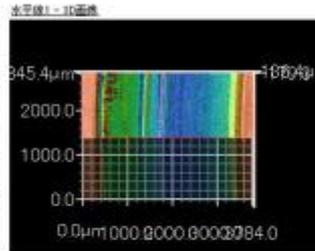
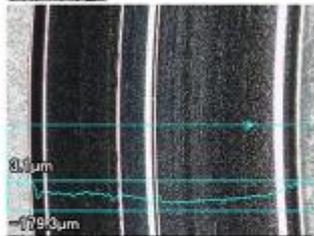


厚み0.09mm摩耗

S70C30回転リング x80

プロファイル計測

測定条件	内容	測定機器
項目	内容	KEYENCE VR-3000 シリーズ
測定日時	2020/02/17 16:18:41	
カメラ	高倍	
倍率	88x	
水平線1 - スキャン線		



30h程で漏れ  
運転停止

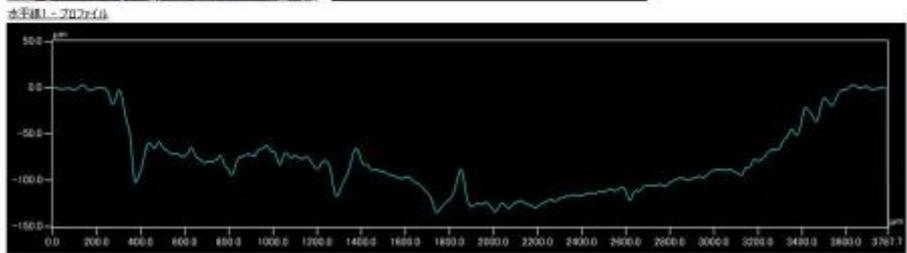


図 2-4-8 開発材③の運転後摩耗痕表面プロファイル (上) 回転リング、  
(下) 固定リング

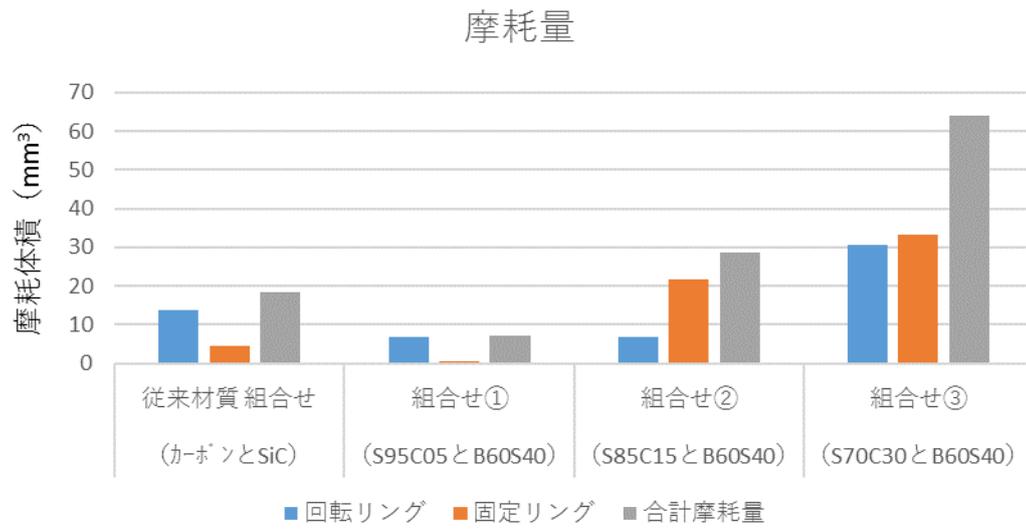


図 2-4-9 各組み合わせでの 100 時間運転後の摩耗量

## 第3章 全体総括

### 3-1 開発成果

#### 【1. 高摺動特性材料開発】

- B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の製造プロセスの最適化を進め、材料の機械的特性において、ビッカース硬度 2700Hv、強度 611MPa となり、最終目標値を達成した。
- B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の摺動特性において、B<sub>4</sub>C60wt%-SiC40wt%の組成で摺動特性が優れていることを把握した。
- 無潤滑下摩擦係数 0.29、無潤滑下比摩耗量  $4.5 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/N・m、水潤滑下摩擦係数 0.15 と最終目標値を達成した。
- B<sub>4</sub>C-SiC 複合材料の相手材として SiC-C 複合材料を選定し、製造プロセスの最適化を進めることで、従来材料と比較して比摩耗量で優位な結果が得られる組み合わせを見出した。
- 安価な B<sub>4</sub>C 原料を用いての材料調整を検討した。安価原料を用いた場合、緻密化が課題であったが、粉碎条件や焼結助剤添加量などの調整技術の検討を進めることで、現行原料と同程度の相対密度 97%まで緻密化することが可能となった。

#### 【2. 表面加工技術開発】

- ナノクレーターが形成される表面加工条件を把握した。
- モデル形状でもピースレベルと同様の表面形態を形成することを確認した。
- B<sub>4</sub>C-SiC 複合材のナノクレーター構造形成には摺動中に発生する研磨粉の組成が大きく影響しており、特に B<sub>4</sub>C 配合比が 0.5~0.6 においてナノクレーター構造に有効な組成であることが分かった。

#### 【3. 複雑実形状技術開発】

- φ140mm 程度のボイラ給水向けモデル形状のニアネットシェイプ成形技術を検討し、図面の寸法を満たす形状の実形状が得られた。
- φ40mm 程度の片吸込みポンプ向けのモデル形状のニアネットシェイプ成形技術を検討し図面の寸法を満たす形状の実形状が得られた。

#### 【4. 実機相当評価】

- 従来材料と開発材を比較評価した結果、従来材料に比べ摩耗痕の表面状態と摩耗量（従来材料と比較し60%減）で優位な結果が得られた。また、従来材料は運転中の漏れの痕跡があったのに対し、開発材は漏れがなく、無冷却で使用できる可能性が示唆された。

#### 3-2 今後の課題と事業化展開

これまでに示したように無冷却で使用可能なメカニカルシールの開発を進めたが、顆粒調整条件や成形条件などの量産化に向けた製造技術の確立や、より長時間での耐久性の実証、サンプル提供は今後の課題である。来年度以降にこれらの課題に取り組み、サンプル提供の実績があるメーカー（A社）への令和3年度の採用を目指す予定である。A社での採用・実績後に他社（国内主要メーカー：5社）への展開を図る計画である。