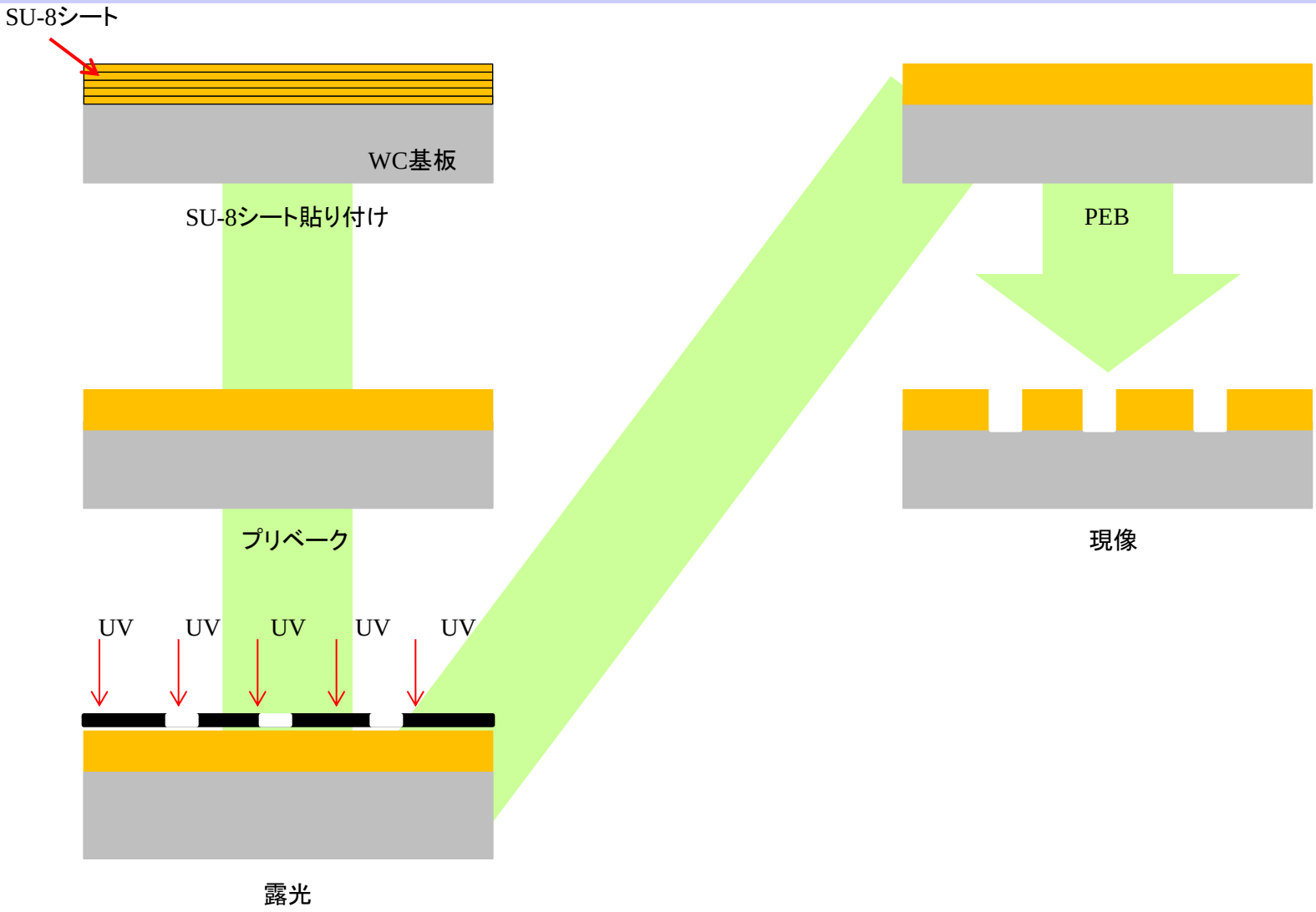
μ泥しょう鋳込み成型法を用いた SiC-Ceramics MEMS の開発

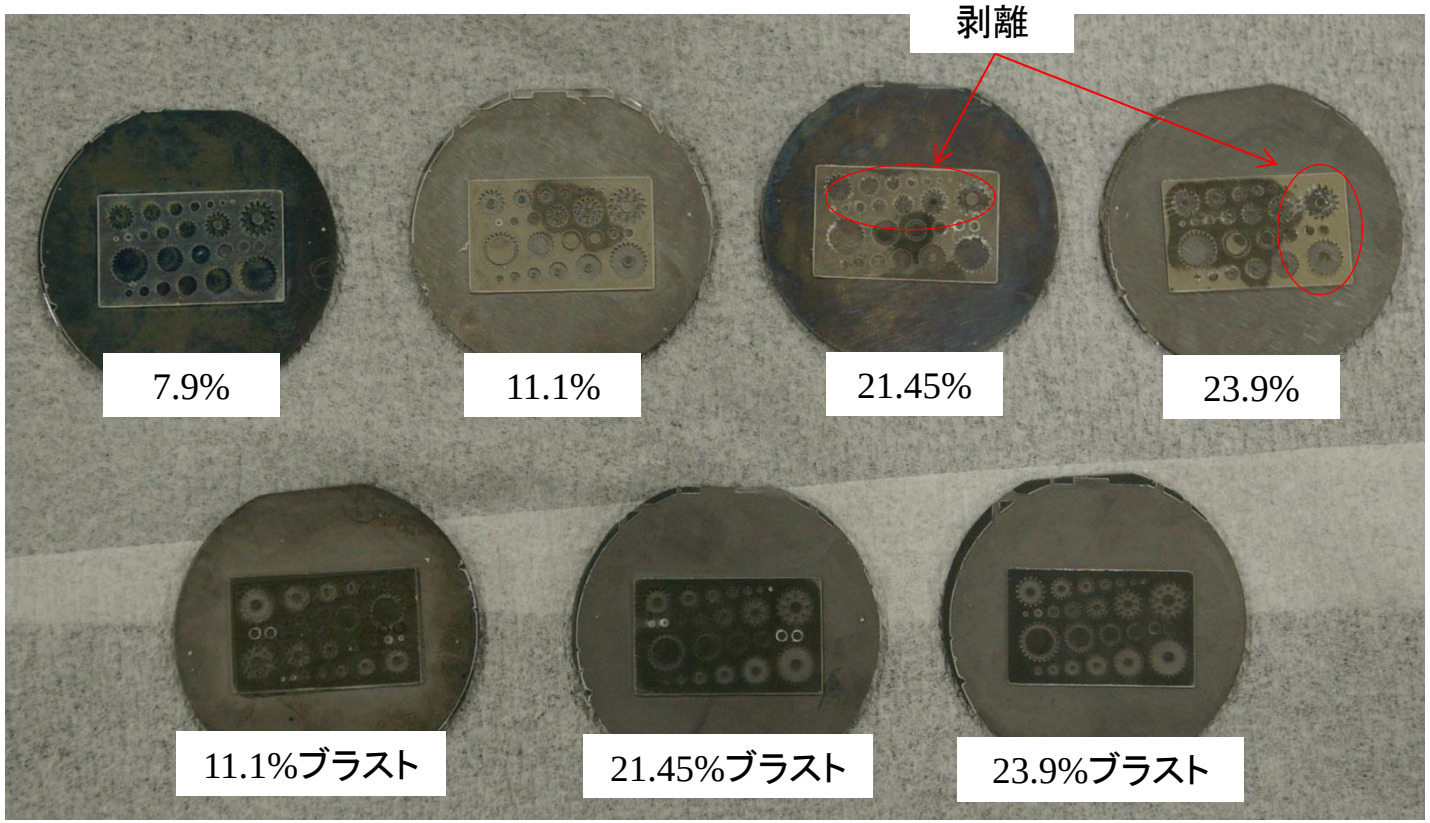
鋳型基板がSiCパーツ形状に及ぼす影響

SU-8マイクロモールド作製プロセス

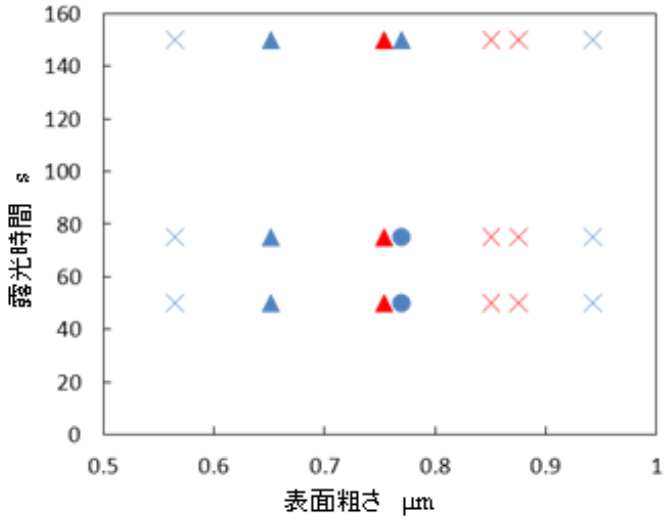


SU-8マイクロモールド作製例

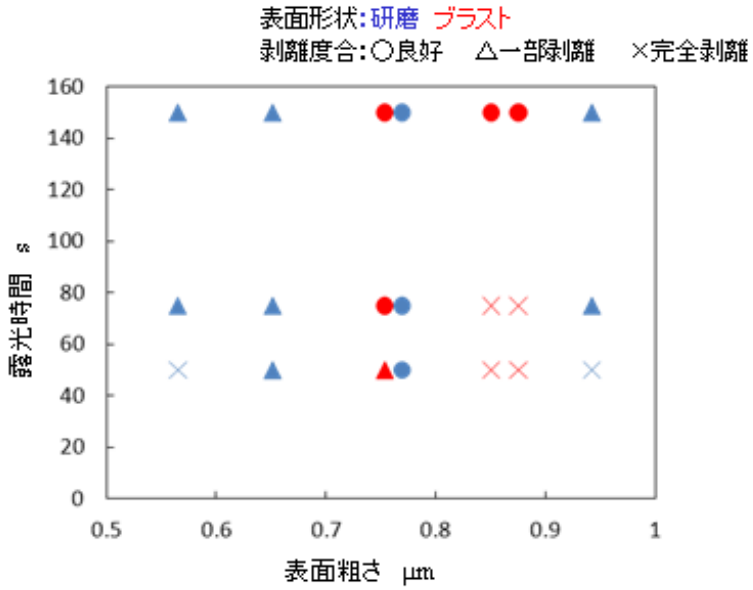
作製条件：ラミネート温度65℃
露光時間150s



SU-8剥離度合



ラミネート温度 55℃



ラミネート温度 65℃

露光時間と表面粗さによる剥離度合

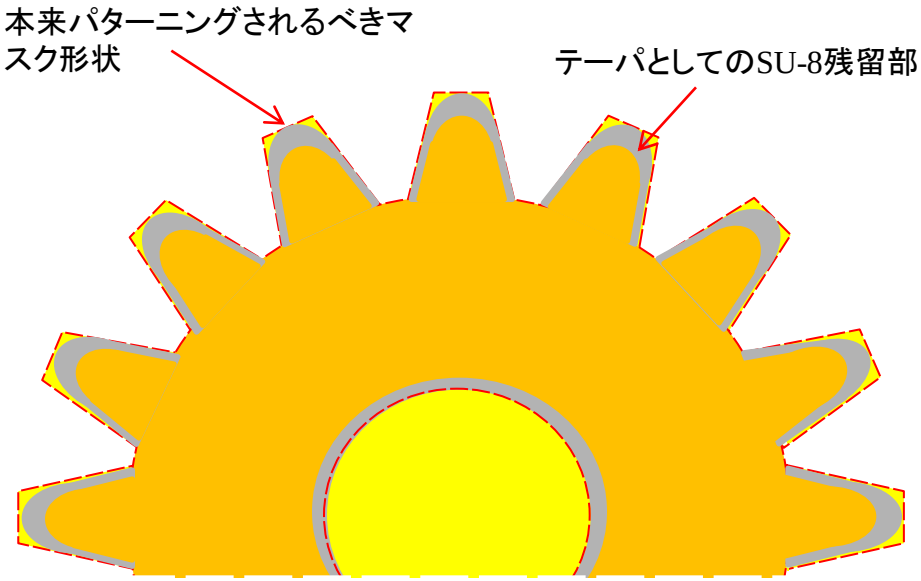
ラミネート温度 高 → 粘度 低

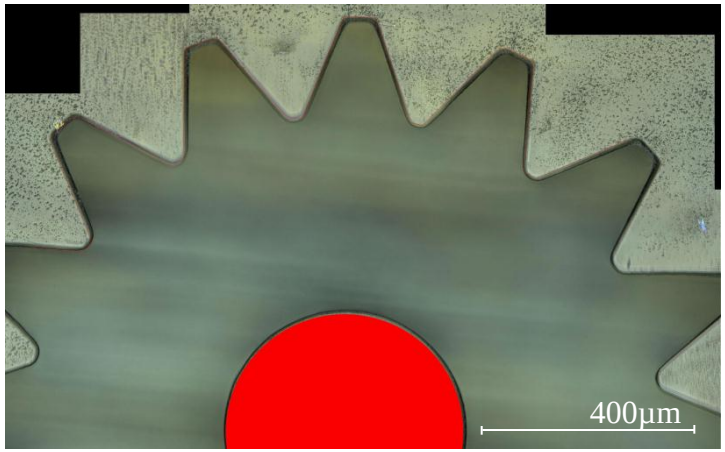
↓

基板表面の凹凸により深く浸透

→ **密着力増加**

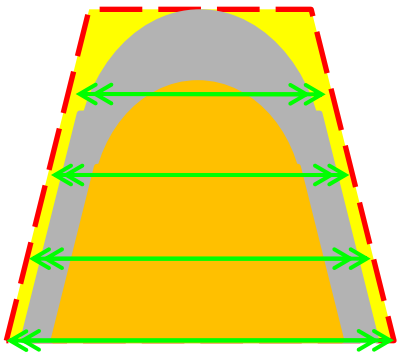
測定箇所





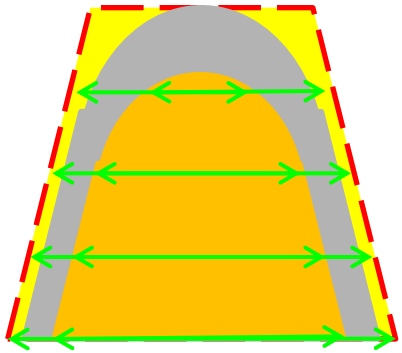
歯車径1.6㎜　×300

①



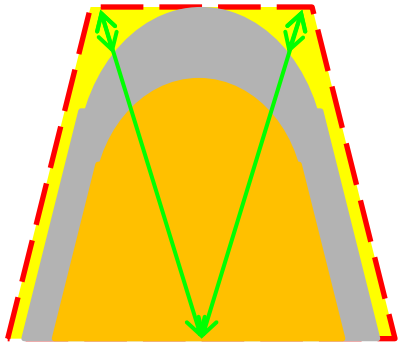
マスク-パターン

②



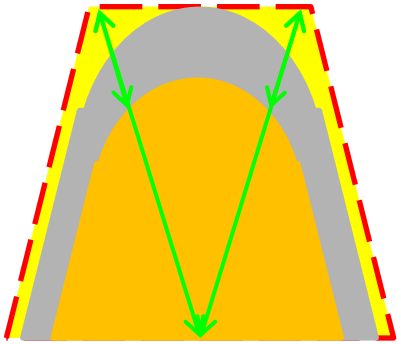
マスク-テーパ

③



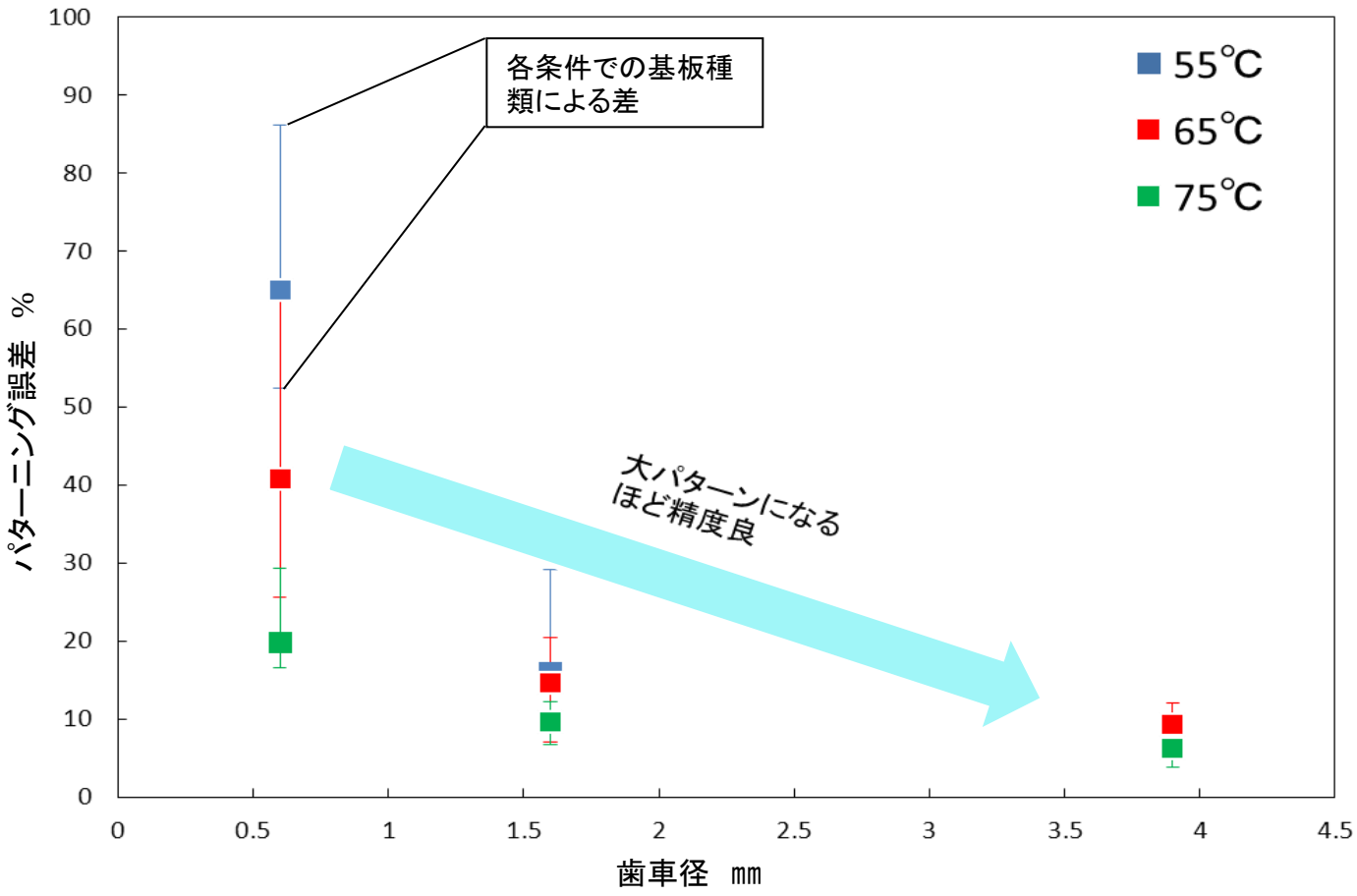
マスク-パターン　角

④



マスク-テーパ　角

SU-8マイクロモールドパターン転写精度



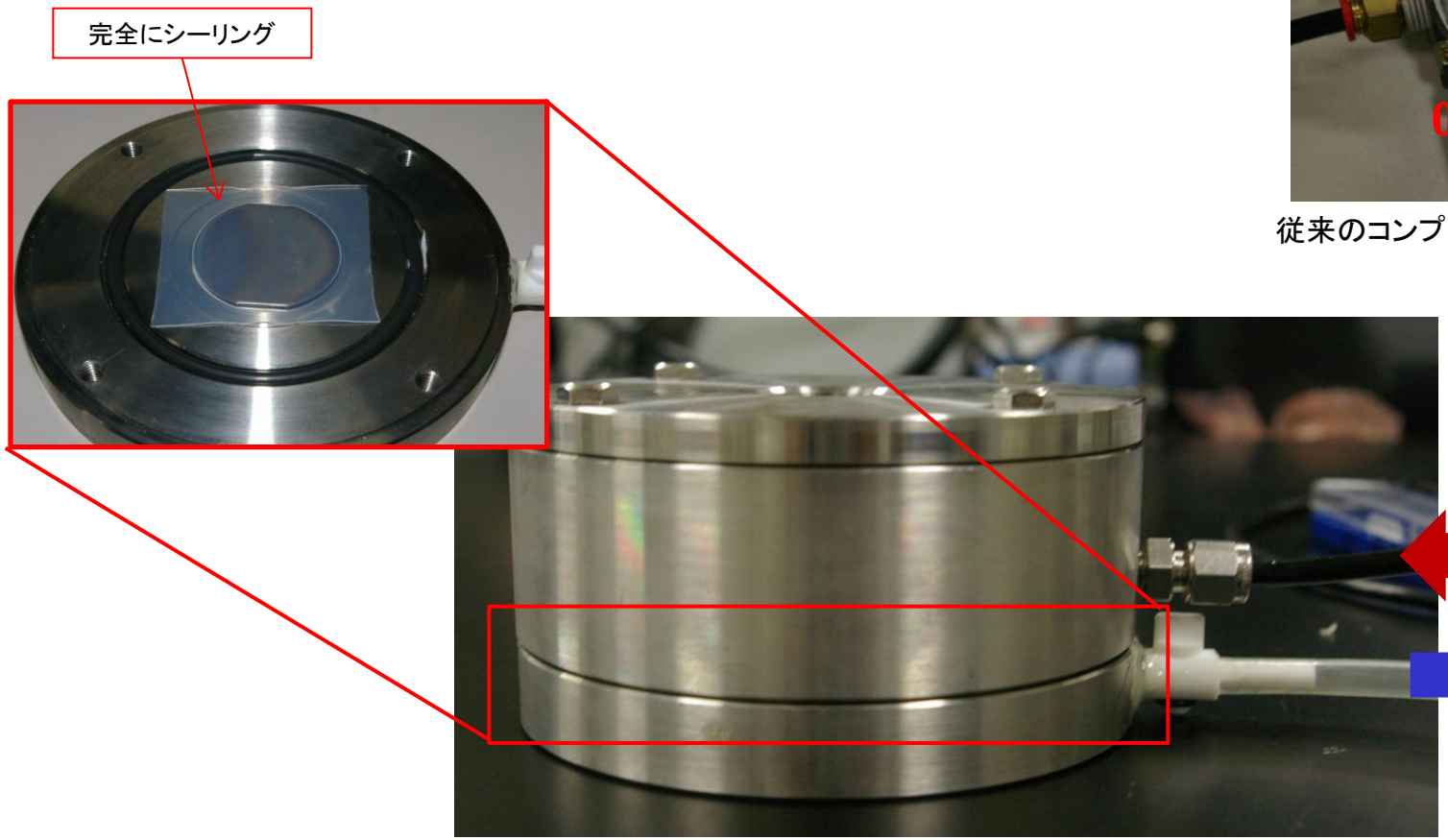
各ラミネート温度における露光時間75s、PEB温度、時間55℃、6hのパターニング精度

WC基板破壊実験

鋳込み時加圧圧力

現状　0.39MPa → 0.39MPa以上での加圧

従来のコンプレッサーによる加圧圧力



加圧（コンプレッサー）

減圧（簡易真空ポンプ）

WC基板破壊実験結果

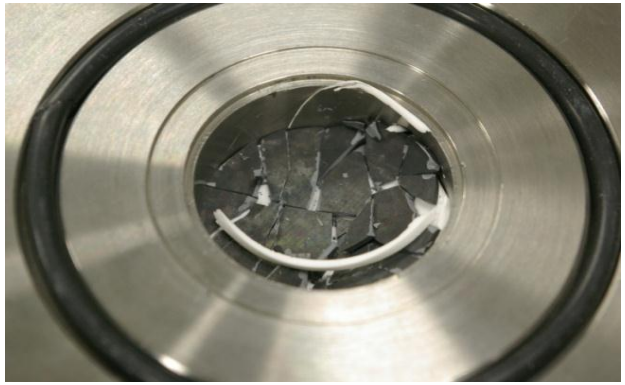
基板①

基板②

基板③

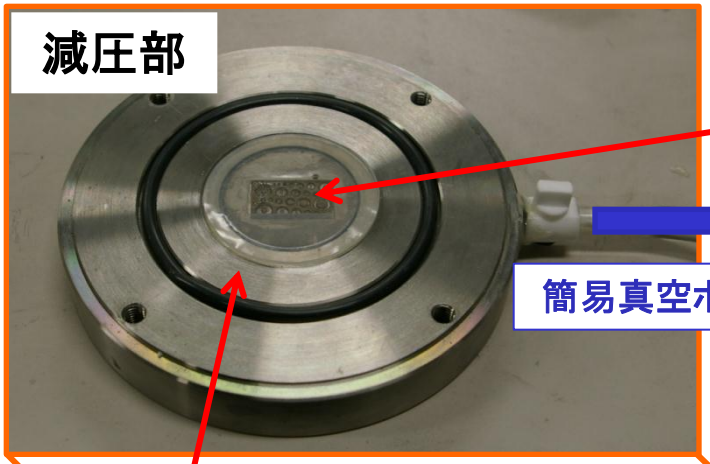
加圧

加圧



破壊されたWC基板

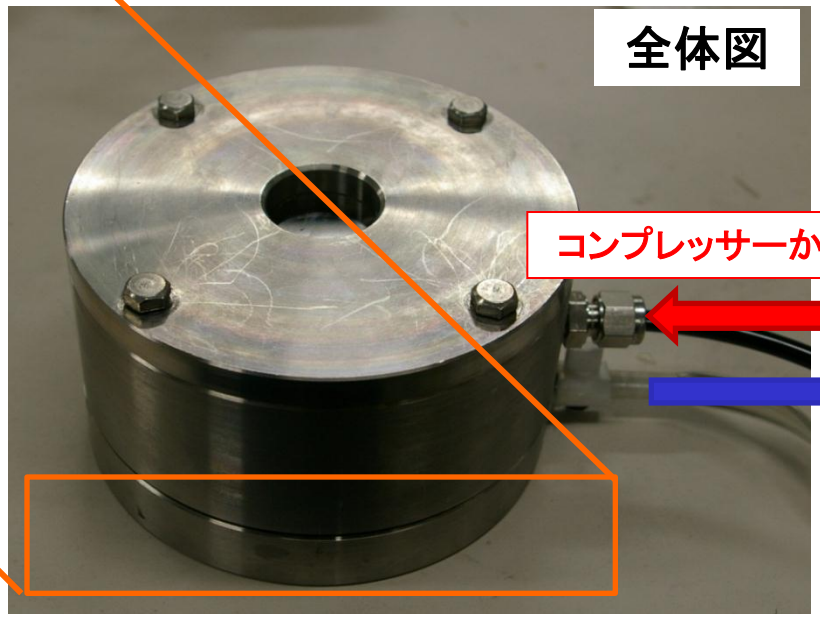
鋳込み装置概要



SU-8マイクロモールド
マイクロピペットを用いてスラリー注入

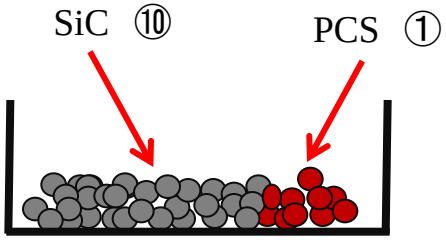
簡易真空ポンプによる減圧

シリコーンゴムを用いてシーリング

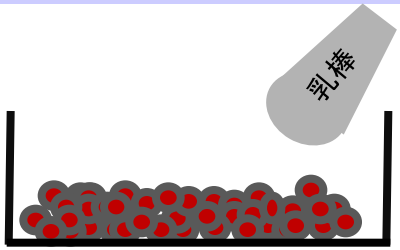


コンプレッサーからの加圧

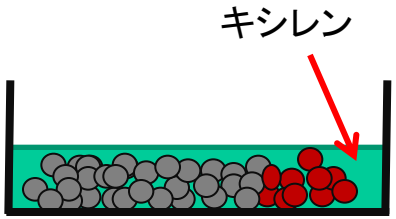
スラリー作製工程



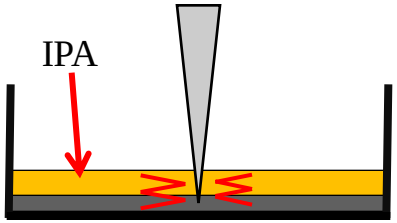
SiCナノパウダーと
PCSを混合



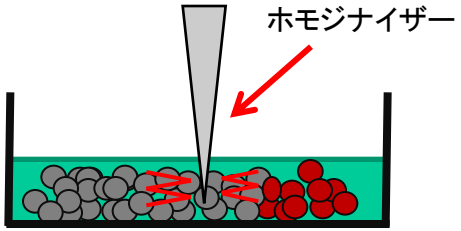
乾燥させ粉砕



キシレンを加える



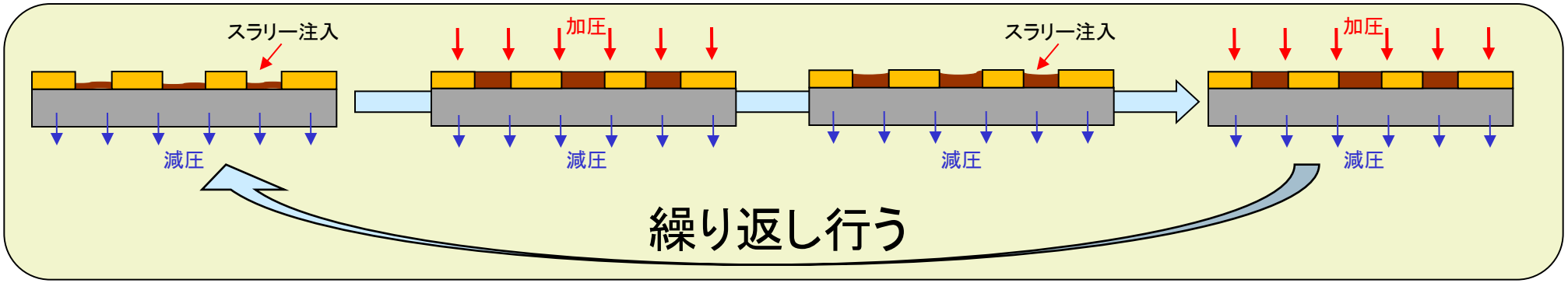
IPAを加え撹拌



撹拌

完成

泥しょう鋳込み加圧工程について

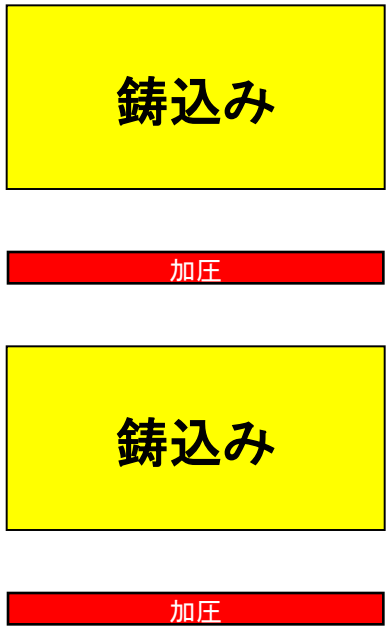


鋳込み時操作工程

鋳込み合計回数　12回
合計鋳込み量　　600μl

加圧回数多
↓
緻密化

鋳込み回数/加圧回数　6



加圧回数　2回

鋳込み回数/加圧回数　4

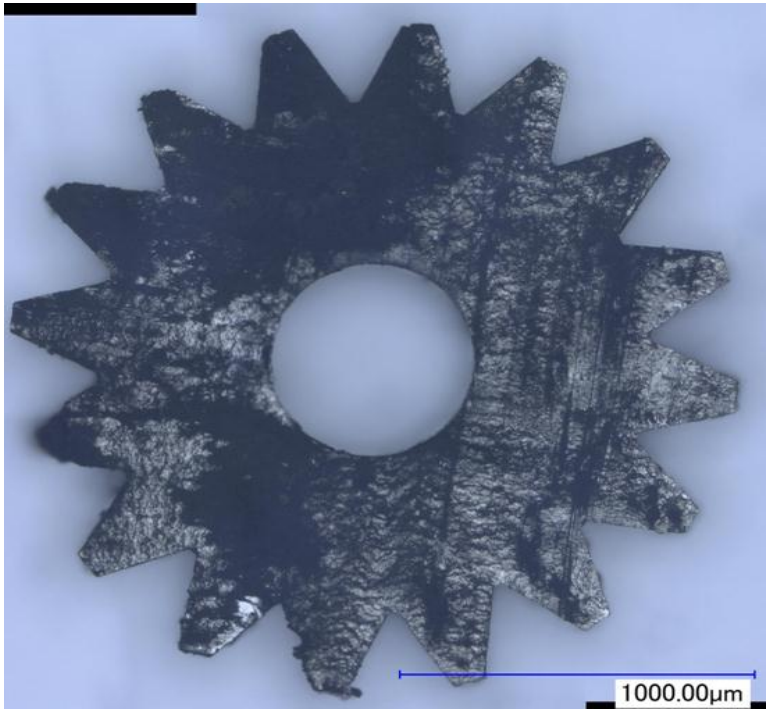
加圧回数　3回

鋳込み回数/加圧回数　2

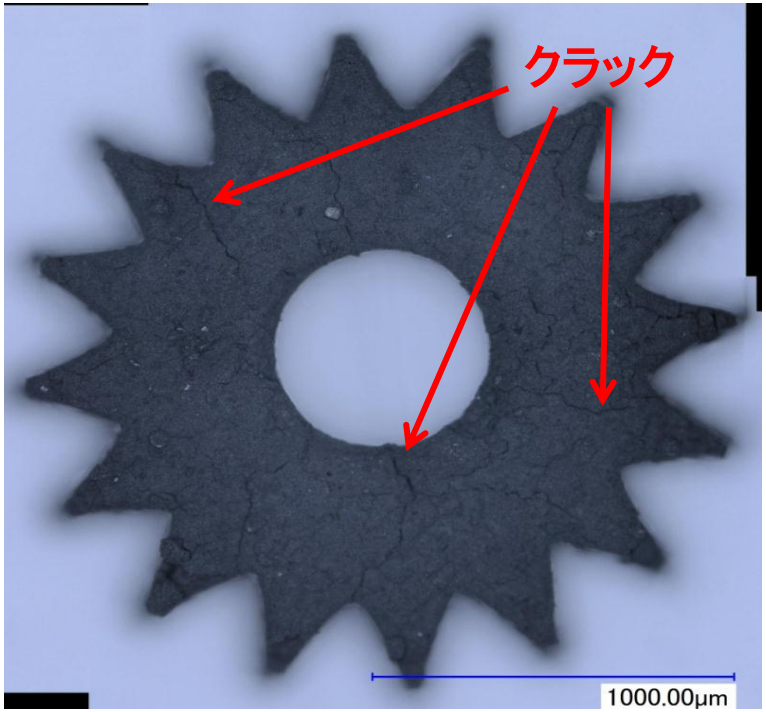
加圧回数　6回

SiCマイクロパーツ作製結果

作製条件　加圧圧力;0.5MPa(固定)　加圧回数;6回　使用基板;気孔率7.9%



表面

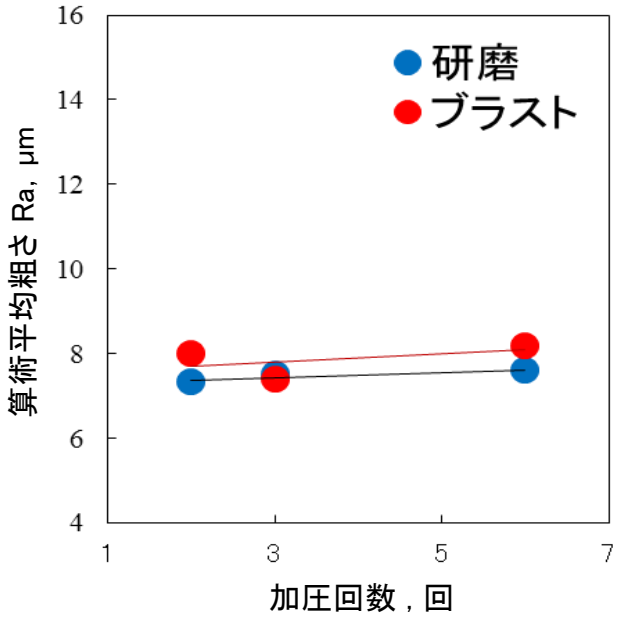


裏面

作製したSiCマイクロ歯車

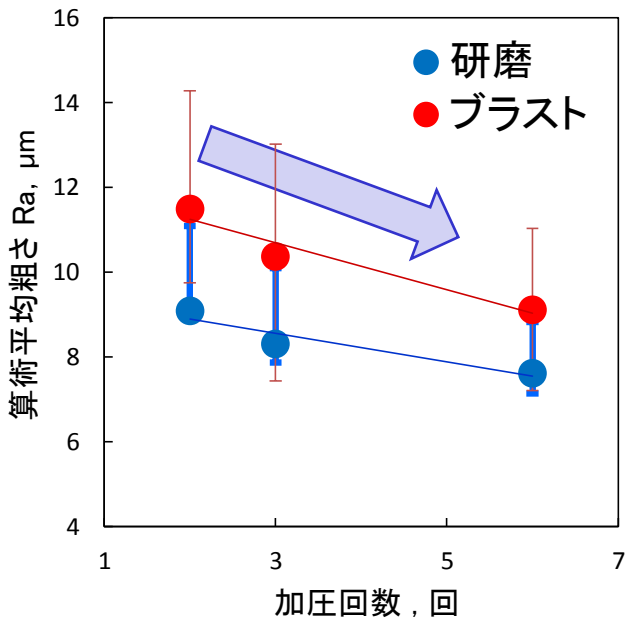
SiCマイクロ歯車表面粗さ評価

SiCマイクロ歯車表面

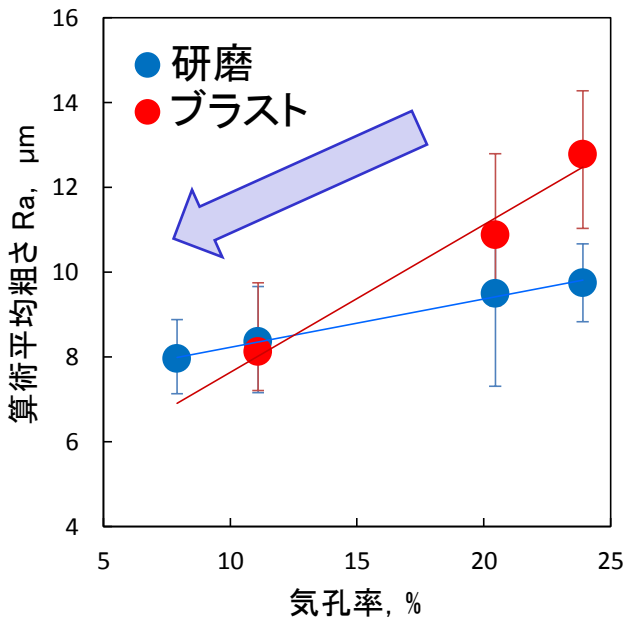


表面粗さRaと加圧回数の関係

SiCマイクロ歯車裏面



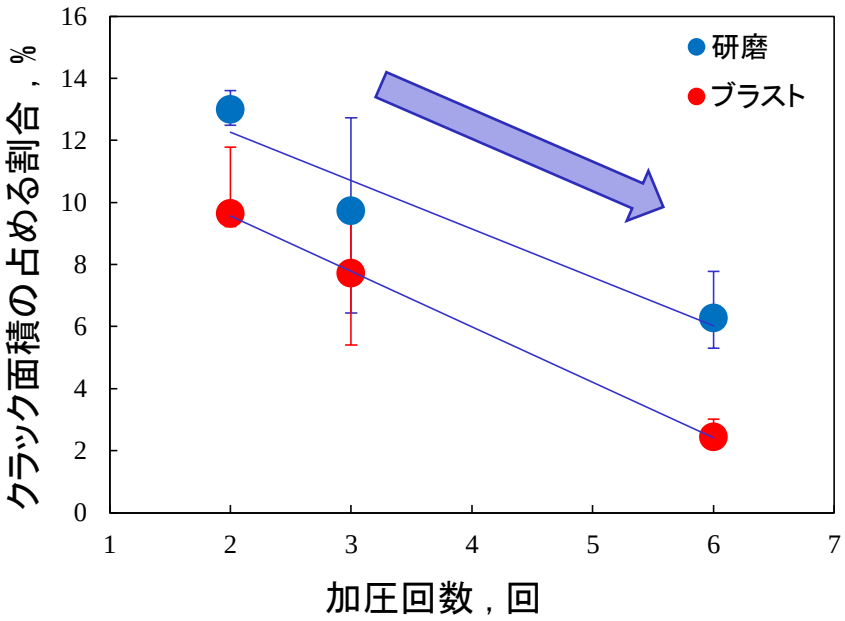
表面粗さRaと加圧回数の関係



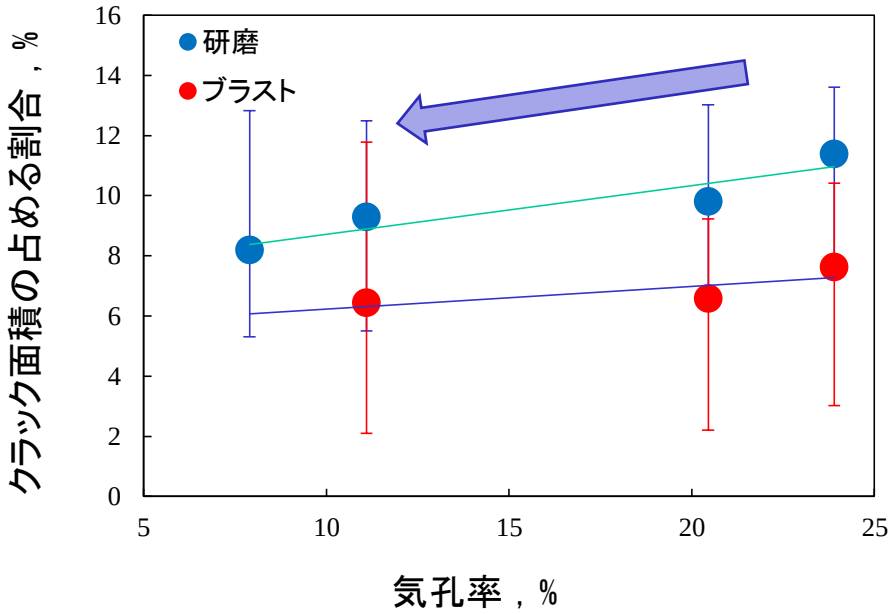
表面粗さRaと気孔率の関係

加圧回数	増	→	Ra　減少
気孔率	低		

SiCマイクロ歯車裏面のクラック評価



クラックの占める割合と加圧回数の関係

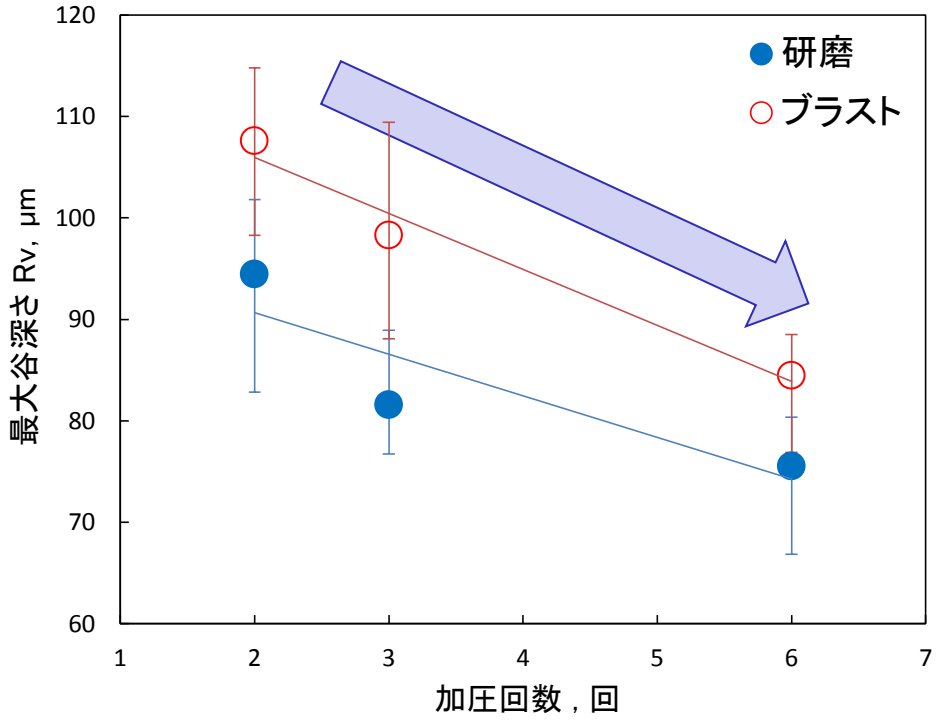


クラックの占める割合と気孔率の関係

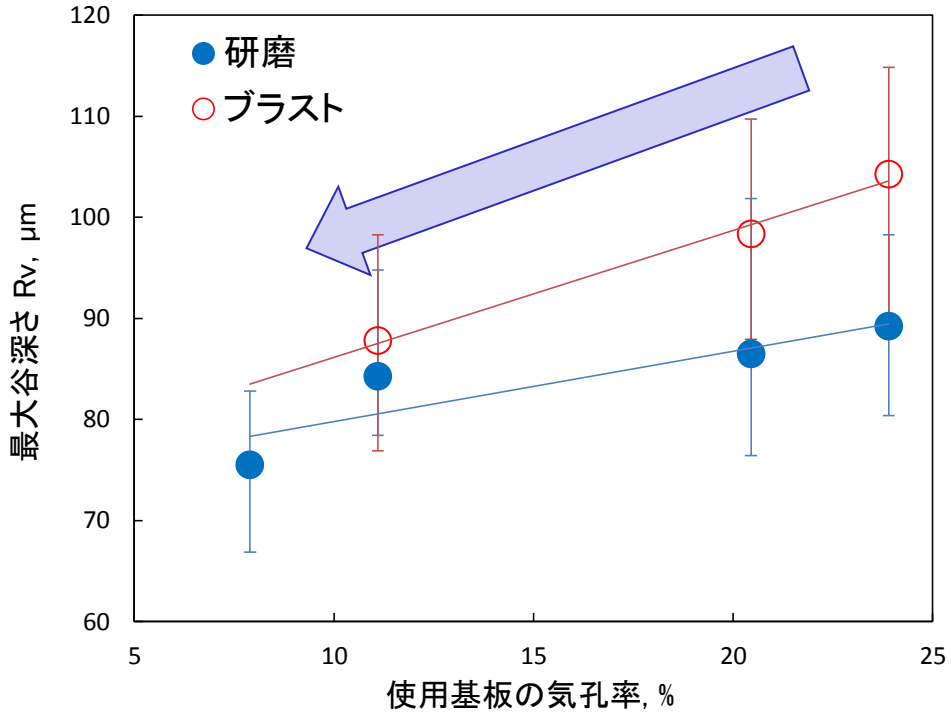
加圧回数	増
気孔率	低
研磨処理	なし

→ クラック面積の減少

SiCマイクロ歯車裏面のクラック深さ評価



最大谷深さ Rvと加圧回数の関係



最大谷深さ Rvと気孔率の関係

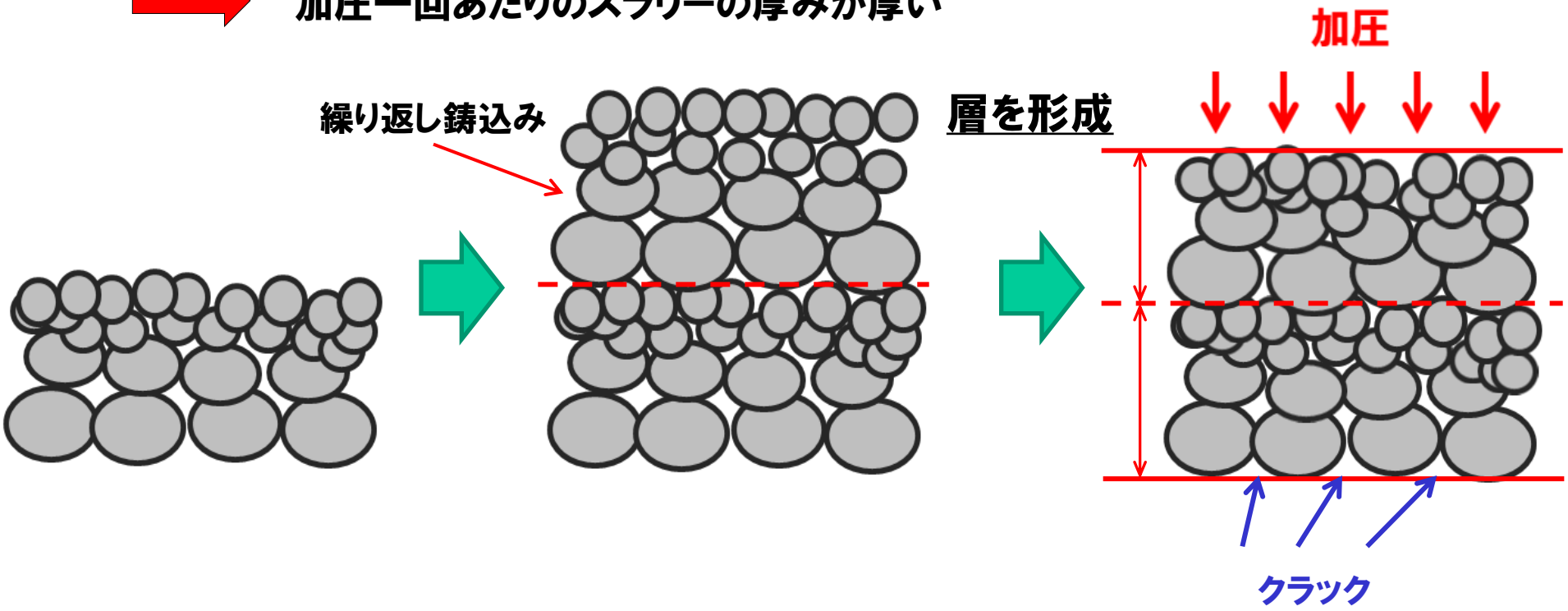
クラック深さ

研磨基板 ＜ ブラスト基板

加圧回数の違いによるクラック量減少の模式図　1

加圧回数　少

加圧一回あたりのスラリーの厚みが厚い

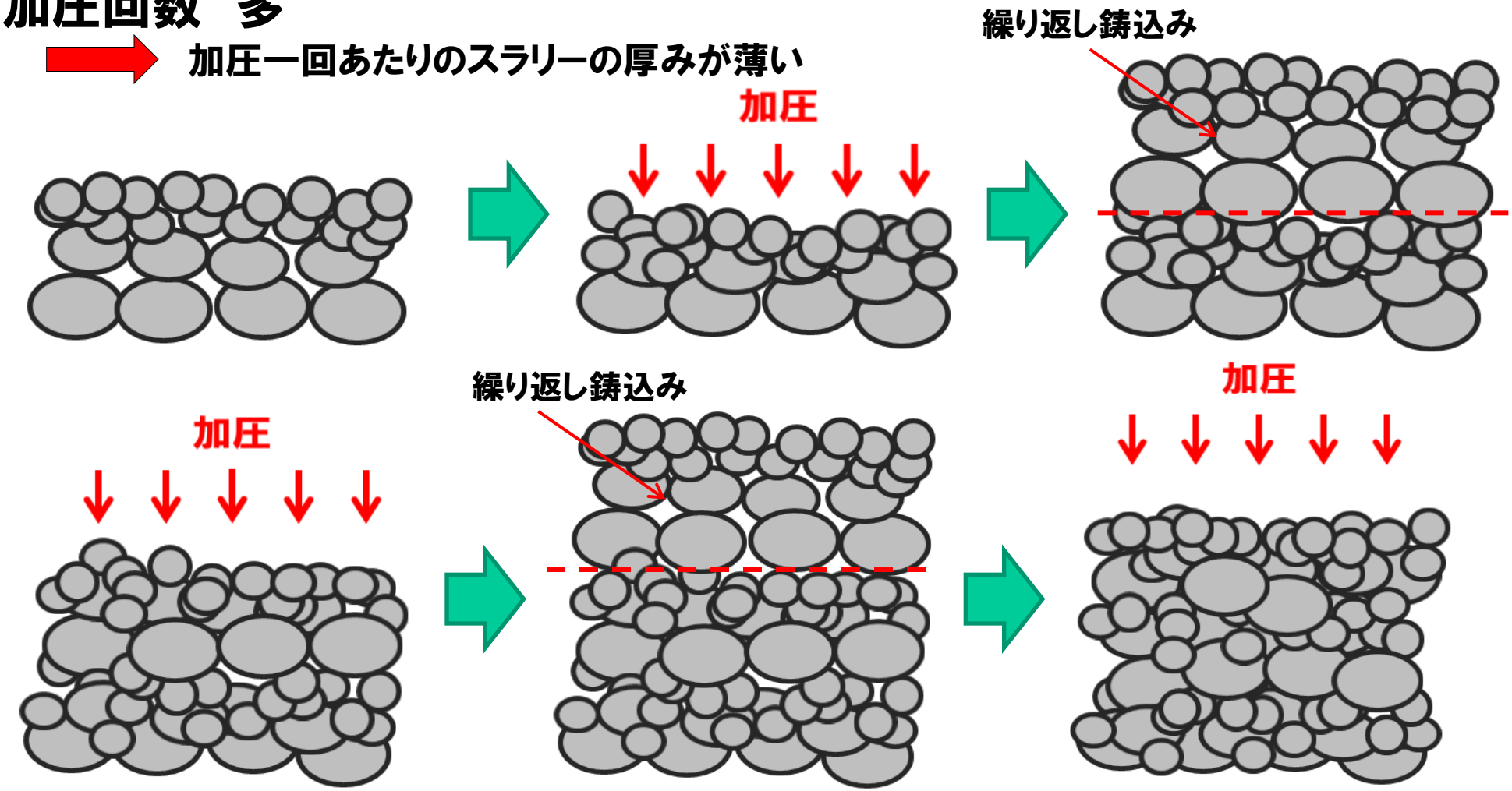


大小の粒子が層を形成し、うまく混合されない

加圧回数の違いによるクラック量減少の模式図　2

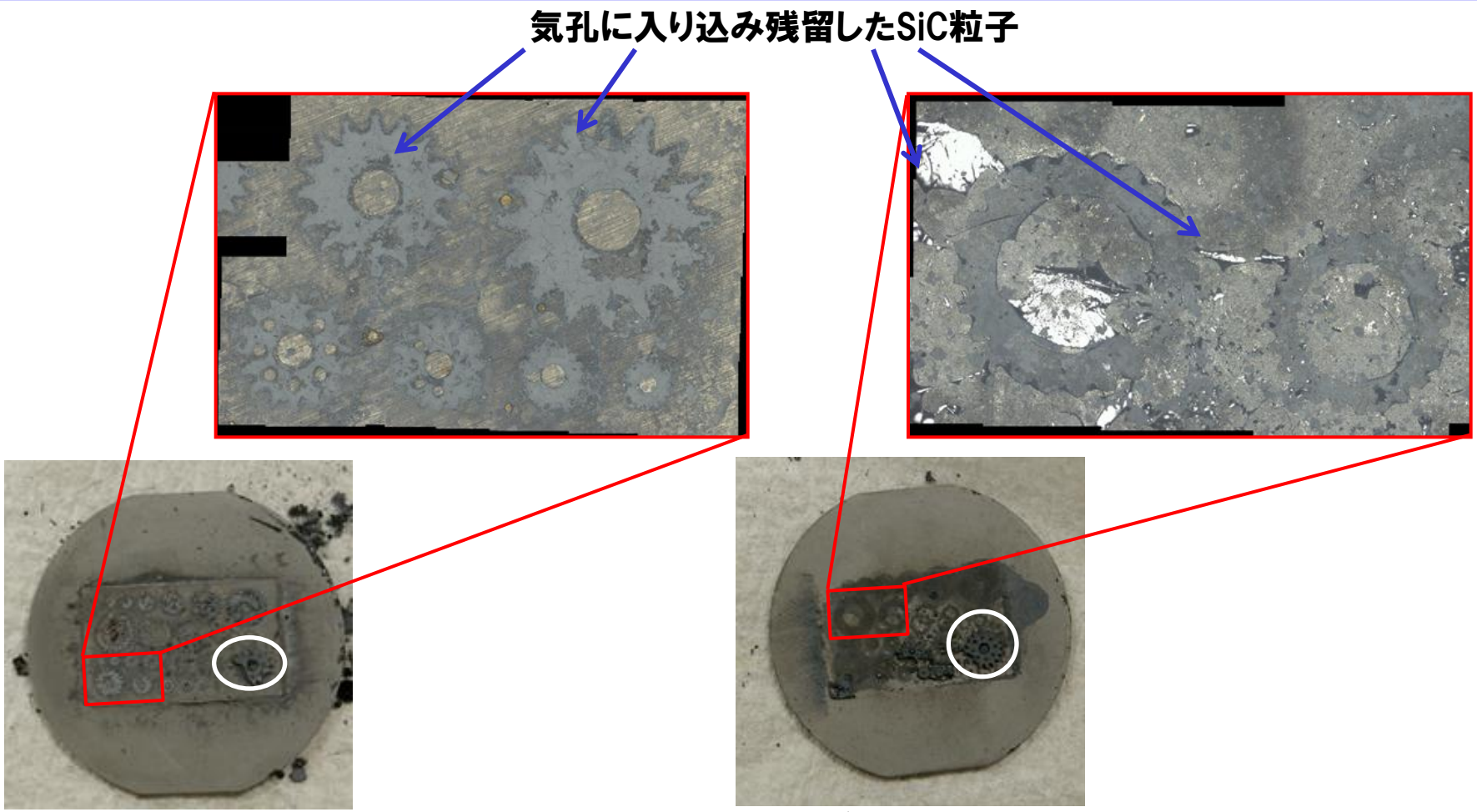
加圧回数　多

加圧一回あたりのスラリーの厚みが薄い



小粒子が大粒子の隙間を埋めるためクラック減少

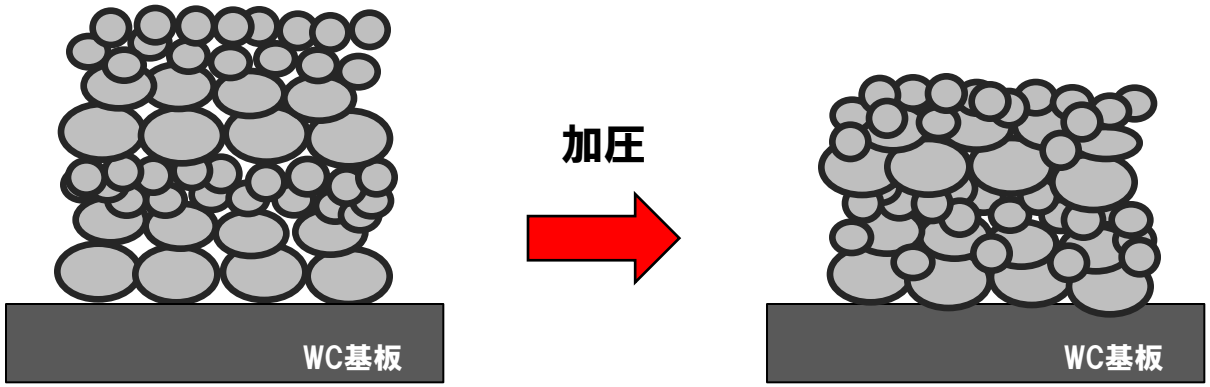
基板に残留したSiC歯車



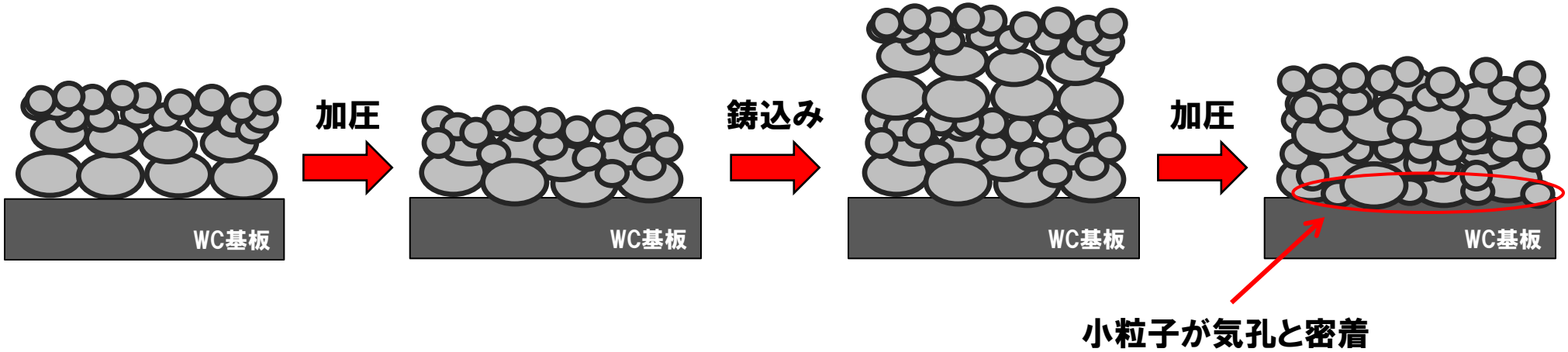
離型されず残留したSiC歯車

成形体底部密着イメージ

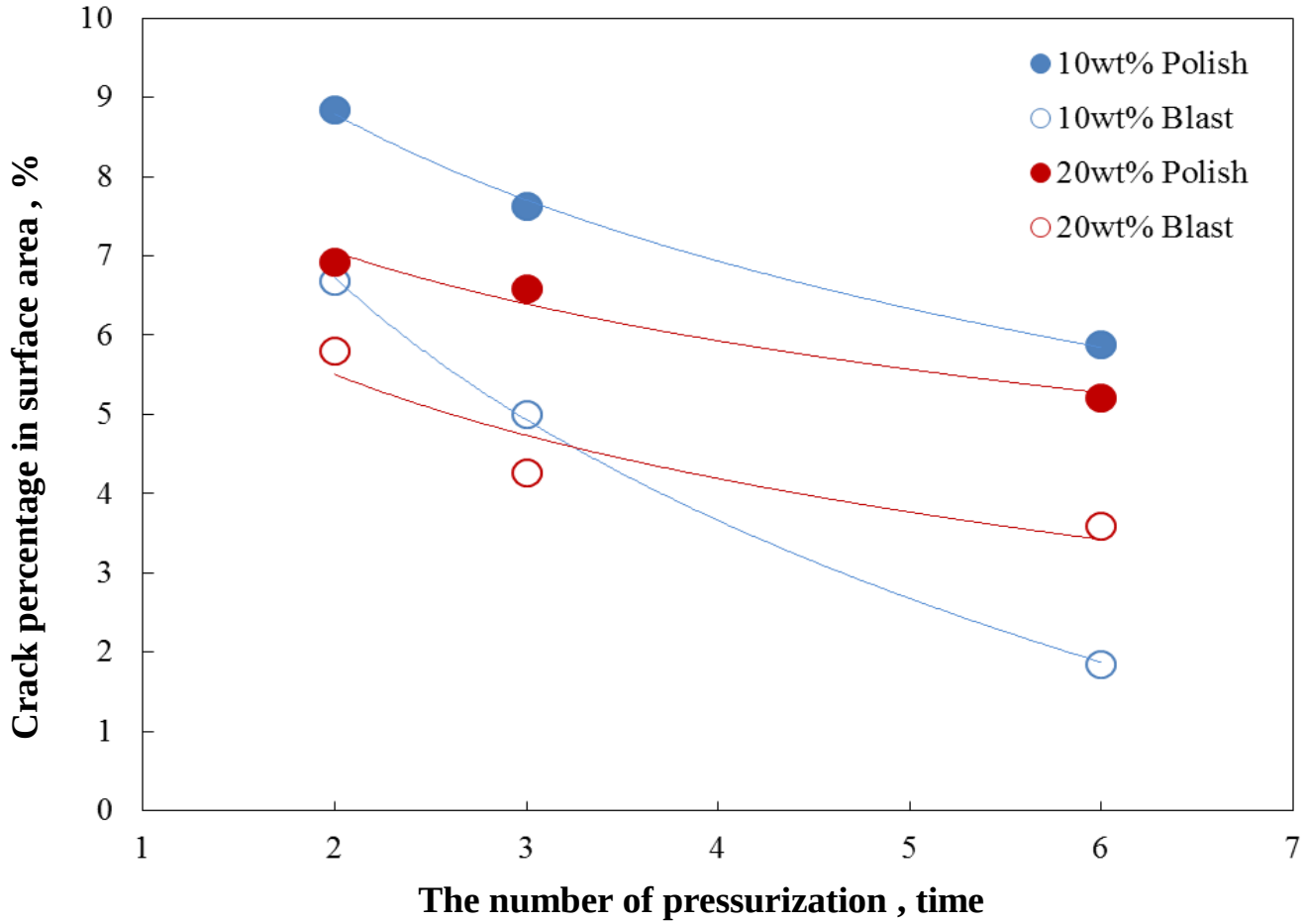
加圧回数6回⇒鋳込み2回につき加圧1回



加圧回数12回⇒鋳込み1回につき加圧1回

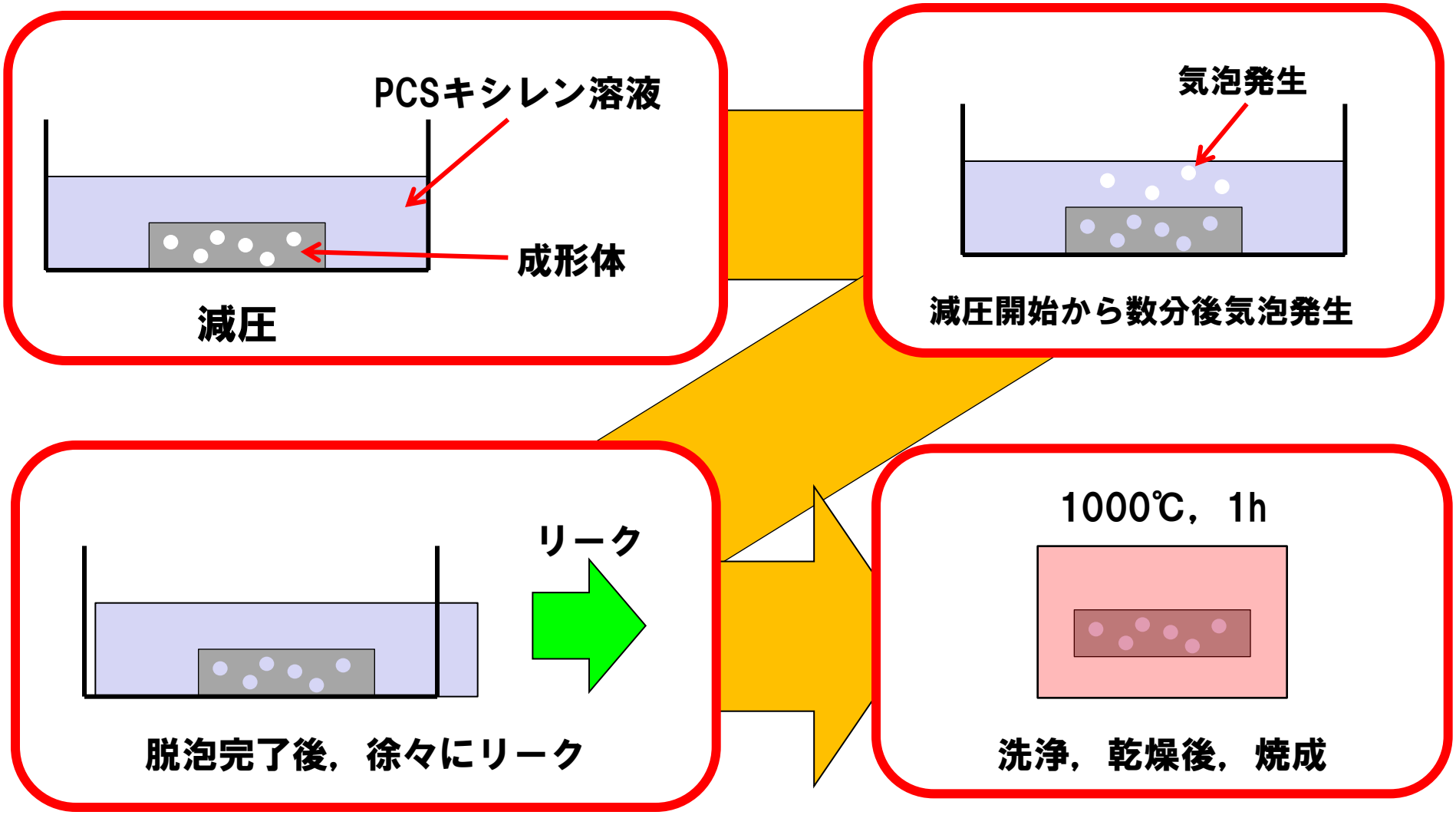


PCS含有率が成形体裏面のクラック生成量に及ぼす影響



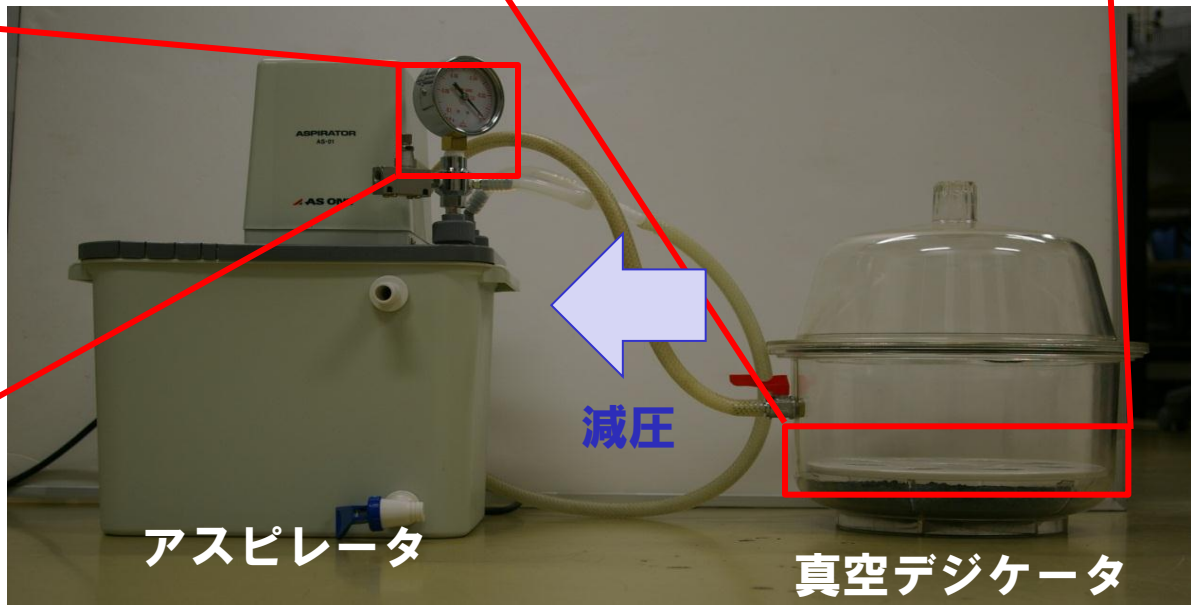
クラック面積の占める割合と加圧回数の関係

PIPプロセス


PCSキシレン溶液
成形体
減圧
気泡発生
減圧開始から数分後気泡発生
リーク
脱泡完了後，徐々にリーク
1000℃，1h
洗浄，乾燥後，焼成

装置概要

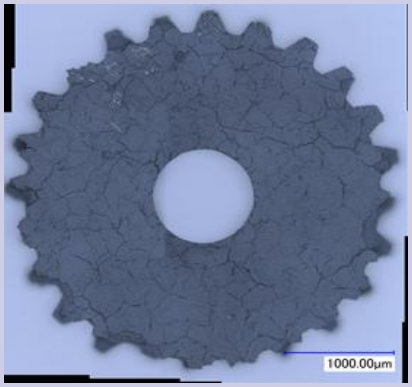
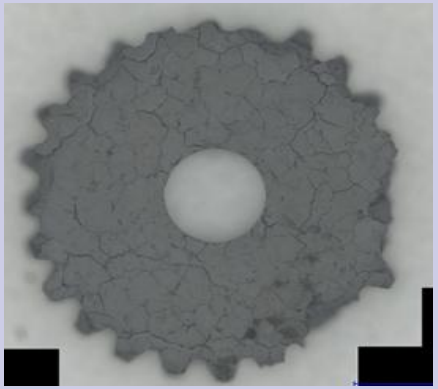
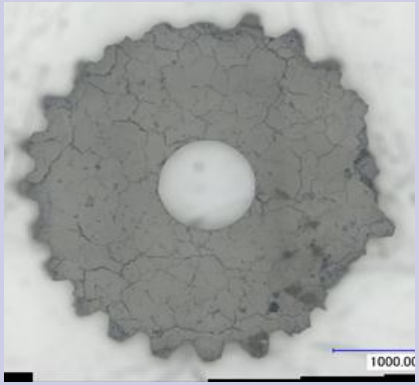
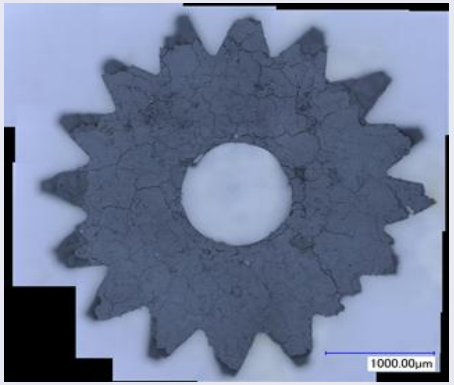
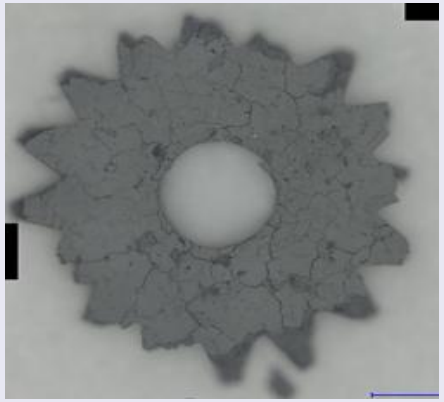
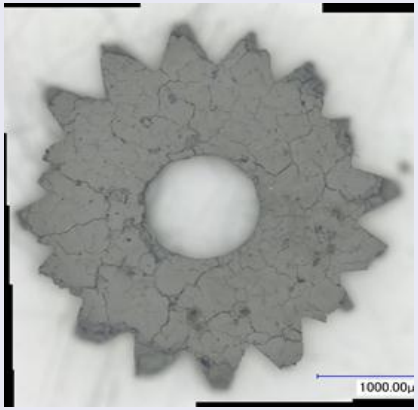
PCS+キシレン溶液



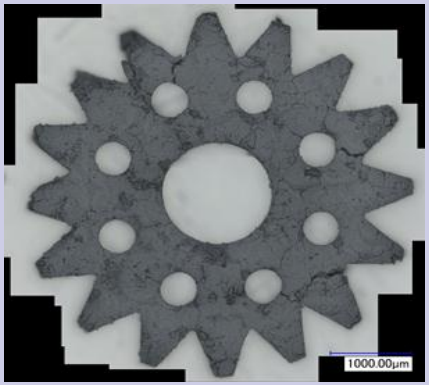
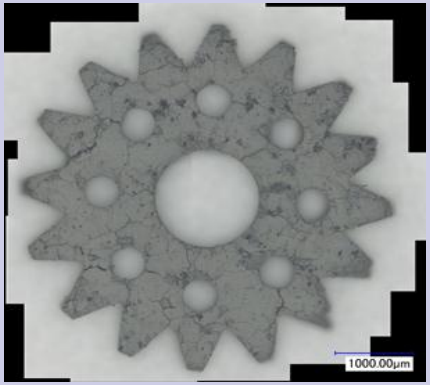
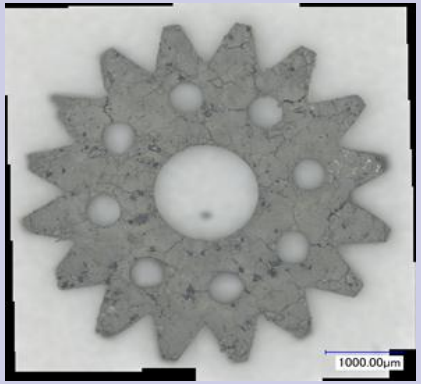
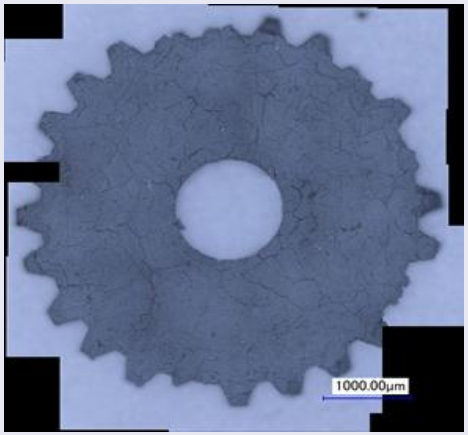
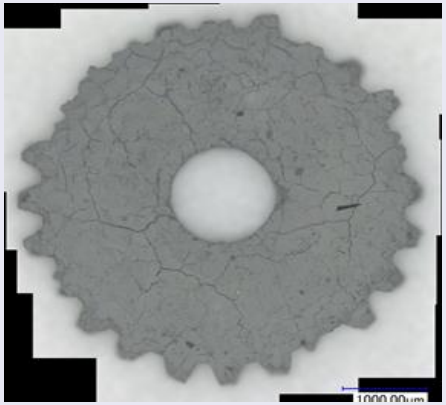
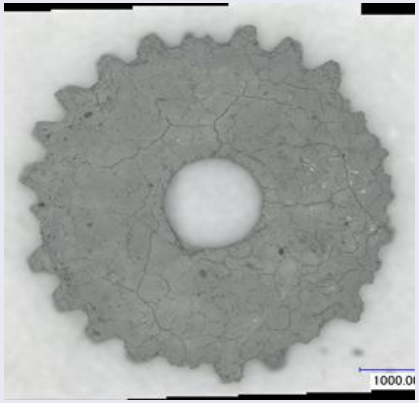
-0.095MPa=6.33kPa

大気圧基準　　絶対基準

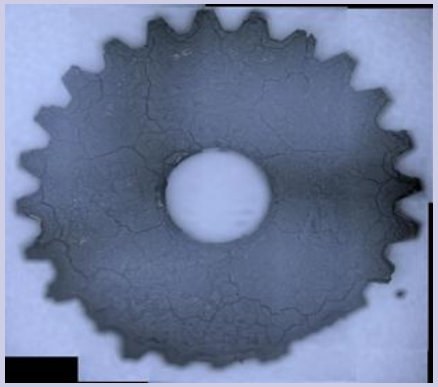
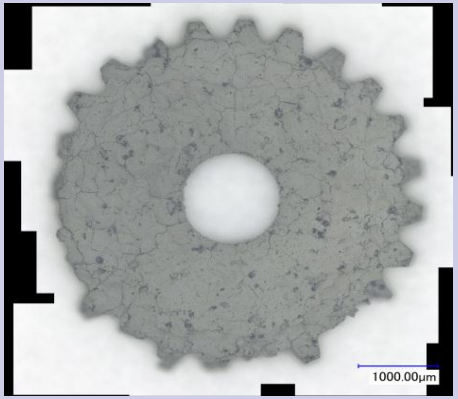
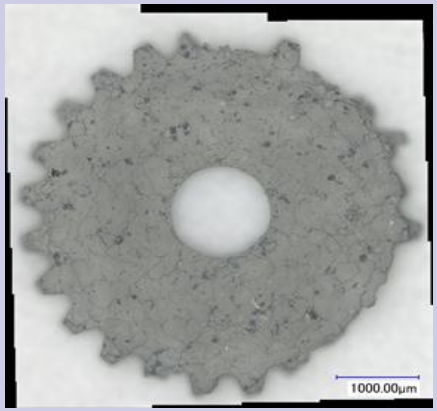
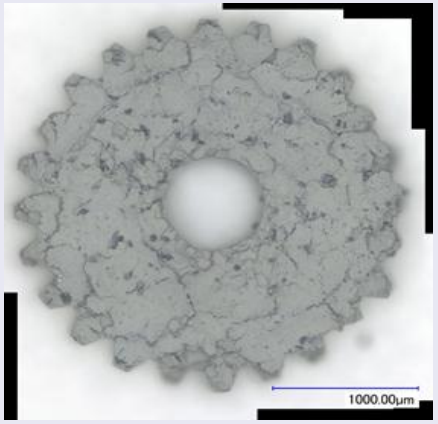
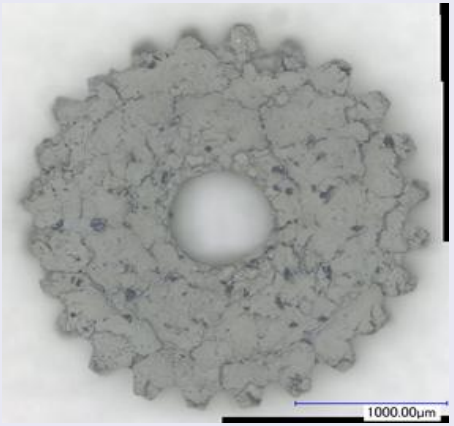
10wt%　研磨

0回	1回	2回
		
		

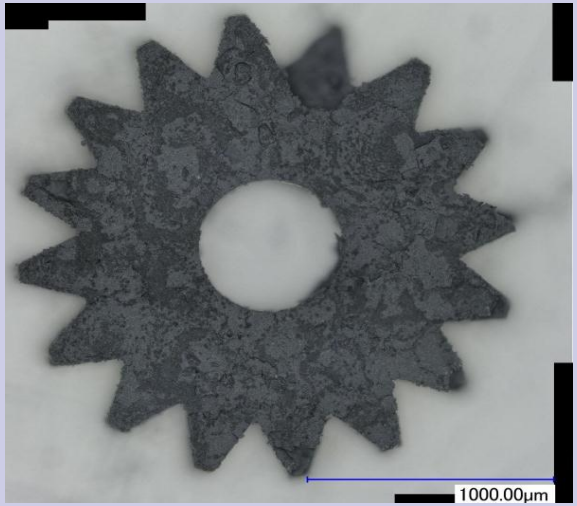
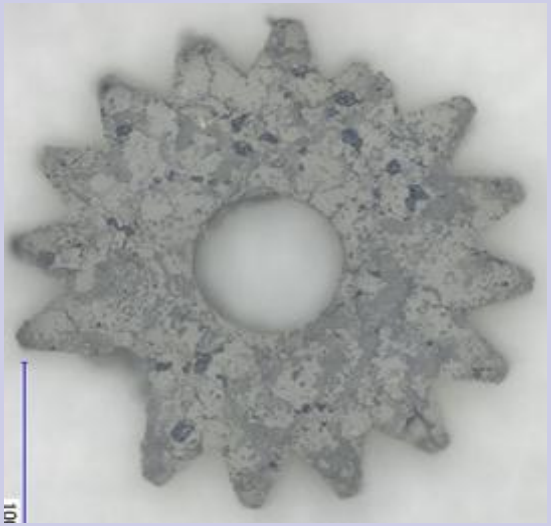
10wt%　ブラスト

0回	1回	2回
		
		

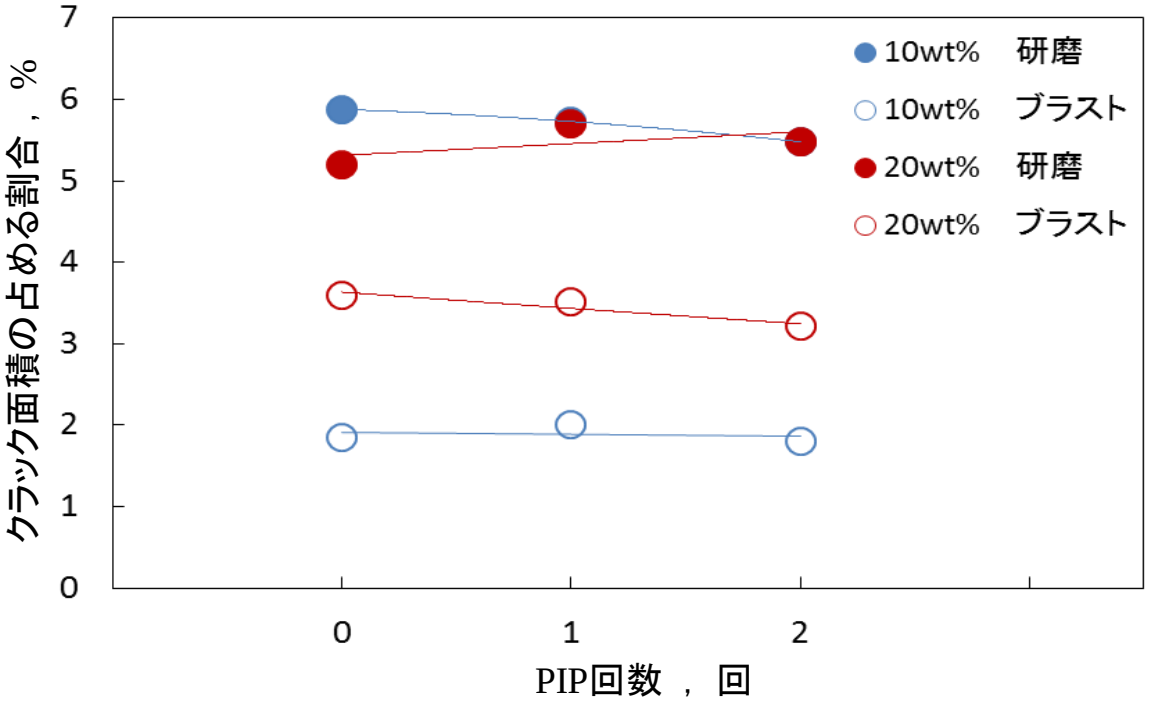
20wt%　研磨

0回	1回	2回
		
		

20wt%　ブラスト

0回	1回	2回
		

クラック評価

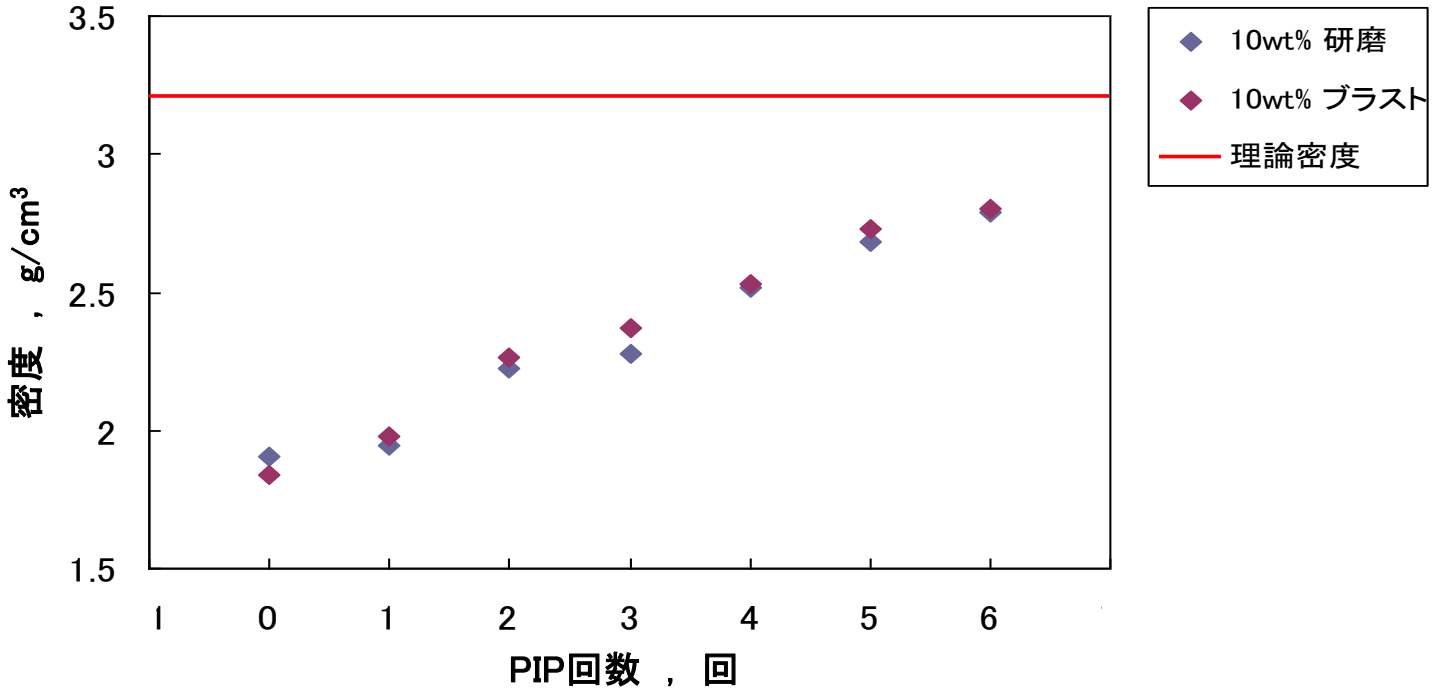


クラックの割合とPIP回数の関係

PIP回数	0回	1回	2回
10wt% 研磨	5.88	5.73	5.48
10wt% ブラスト	1.85	2.01	1.81
20wt% 研磨	5.2	5.7	5.5
20wt% ブラスト	3.6	3.51	3.21

表中単位は% (小数点以下第3位を四捨五入)

PIPによる緻密化



密度とPIP回数の関係

	鋳込み成形後		PIP3回		PIP6回
研磨基板	1.91g/cm^3	→	2.28g/cm^3	→	2.79g/cm^3
ブラスト基板	1.84g/cm^3		2.37g/cm^3		2.81g/cm^3

今後の展望

① 1000℃での作製+PIP

作製工程

最適作製条件の決定

SU-8モールド作製条件
使用基板の決定
加圧回数の決定

→

評価

クラック評価
表面粗さ
Ra・Rv

緻密化工程

PIP法

クラック深さの測定
密度算出
断面形状の観察
硬さ試験
曲げ試験

比較

② 1500℃での作製+PIP

1000℃で決定した作製条件を用いて作製

↓

1500℃で焼成

PIP法

クラック深さの測定
密度算出
断面形状の観察
硬さ試験
曲げ試験

③ WC鋳込み

最適作製条件の決定

スラリー濃度・粘度調整
使用基板・加圧回数は①で決定

→

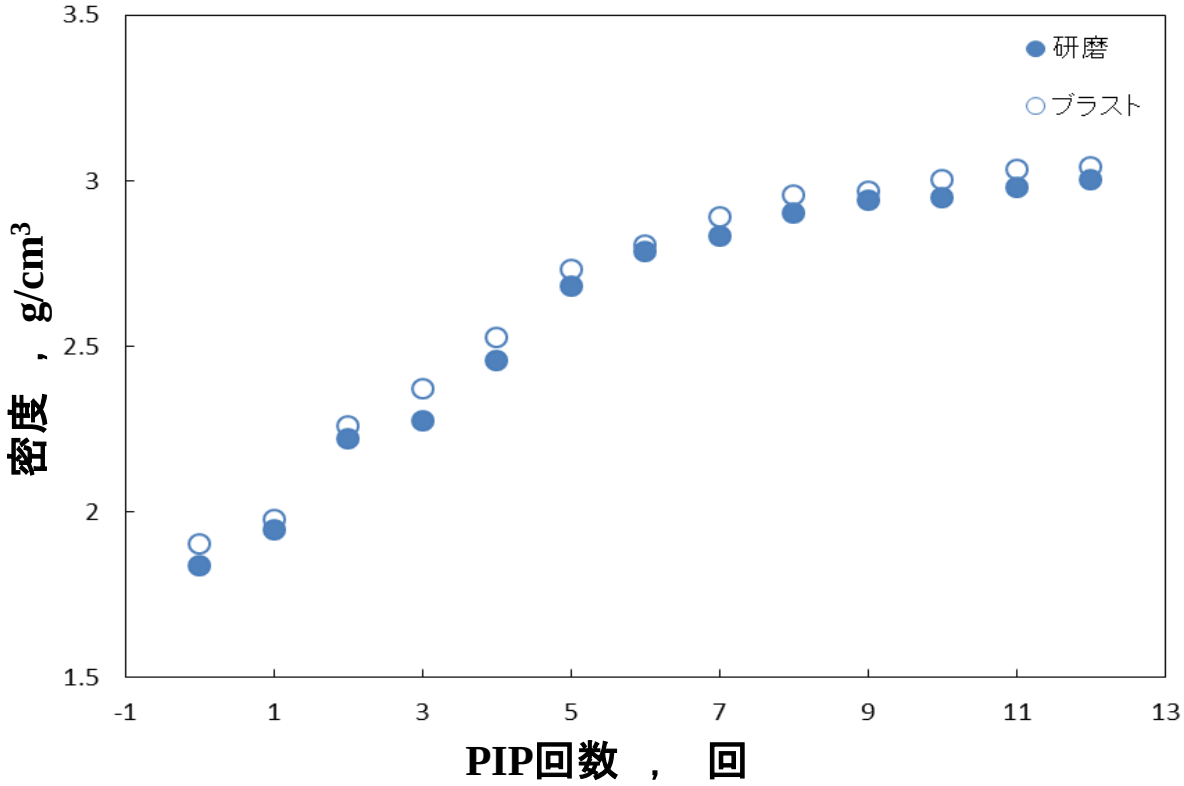
モールド除去

モールド除去
温度の最適化

→

シルバーロイ様へ焼成依頼

PIPによる緻密化の結果

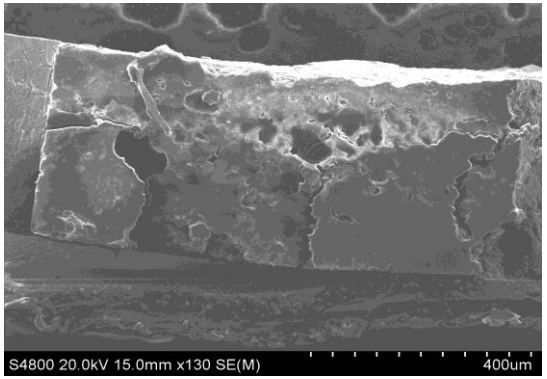
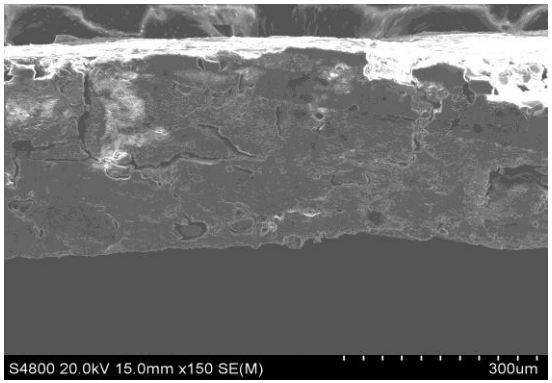
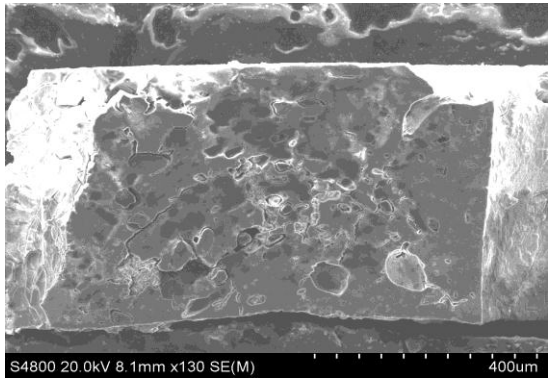
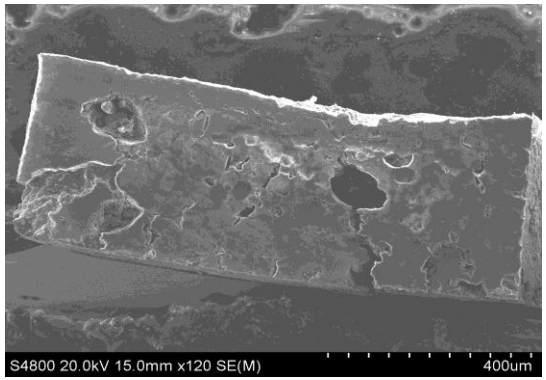
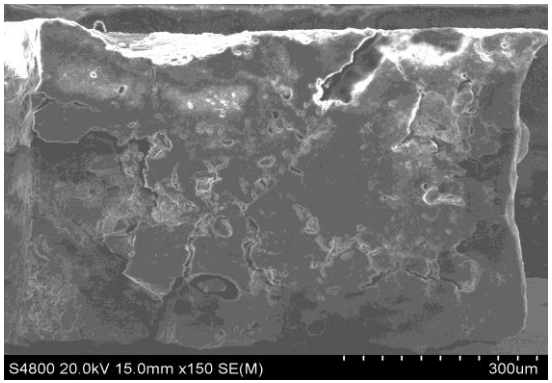
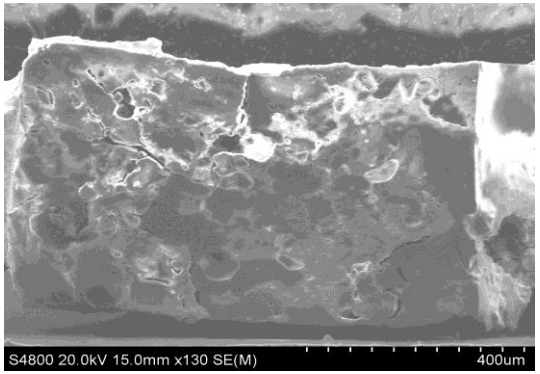


成形体の密度とPIP回数の関係

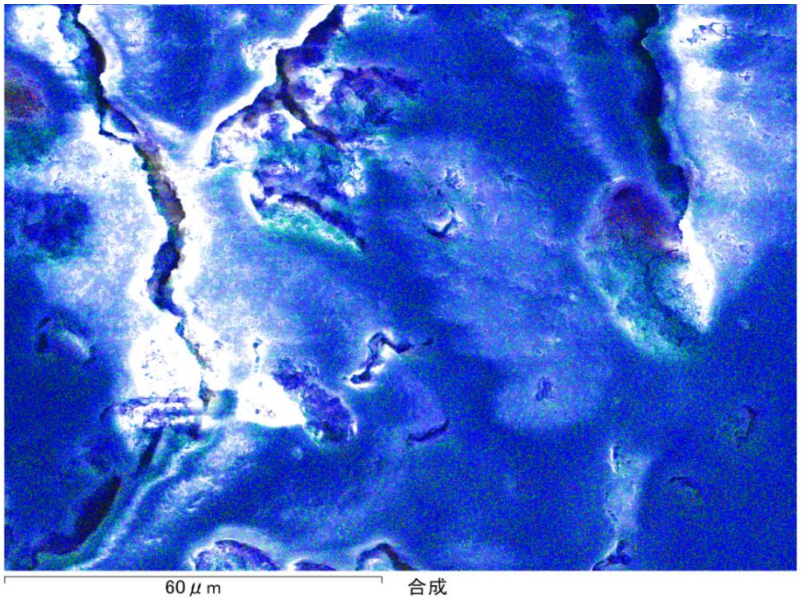
各プロットの値

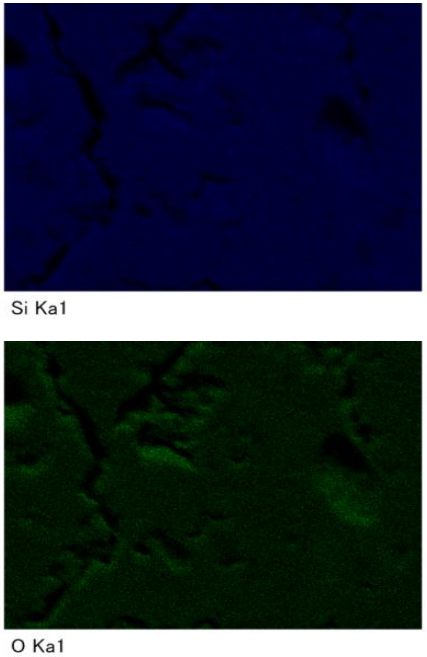
PIP回数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
研磨	1.837	1.945	2.222	2.277	2.457	2.681	2.786	2.832	2.901	2.941	2.951	2.981	3.005
ブラスト	1.905	1.977	2.261	2.373	2.529	2.732	2.806	2.891	2.955	2.968	3.002	3.035	3.041

歯車断面SEM画像

PIP　6回	PIP　9回	PIP　12回
研磨		
		
ブラスト		
		

EDXによる歯車断面の組成分析

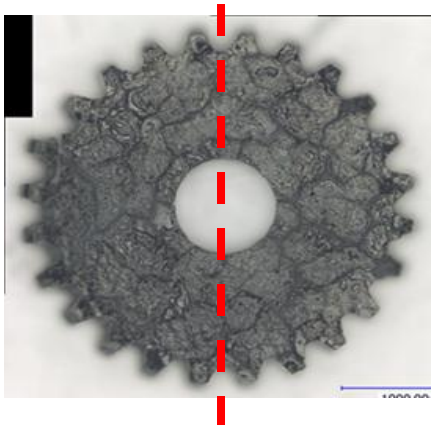




成形体断面の組成分析例

PIP回数(回)	使用基板	原子数濃度(at%)		
		Si	C	O
6	研磨	30.78	26.66	42.56
	ブラスト	30.91	43.19	25.9
9	研磨	24.65	53.39	21.96
	ブラスト	23.01	24.72	52.27
12	研磨	22.97	44.67	32.37
	ブラスト	26.01	25.77	48.22

ナノインデンテーション用試験片の作製



SiC歯車

ダイシング
カット

測定個所

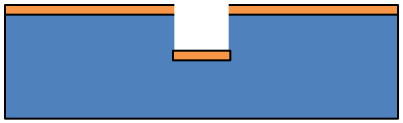
作製工程

①

②

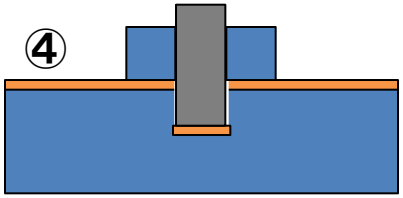
TMAHでエッチング

③

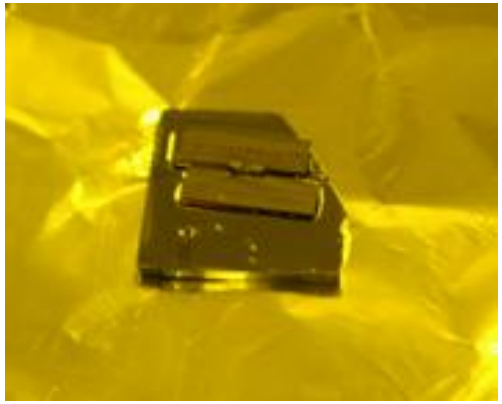


SU8層を50μm形成

④



SiC歯車を設置し、両側をSi試験片で挟む



作製した試験片

ナノインデンテーションによる硬さ試験

試験条件

荷重：500mN,100mN

保持時間：1sec

分割数：500

測定個所：25（5×5（/20μm））

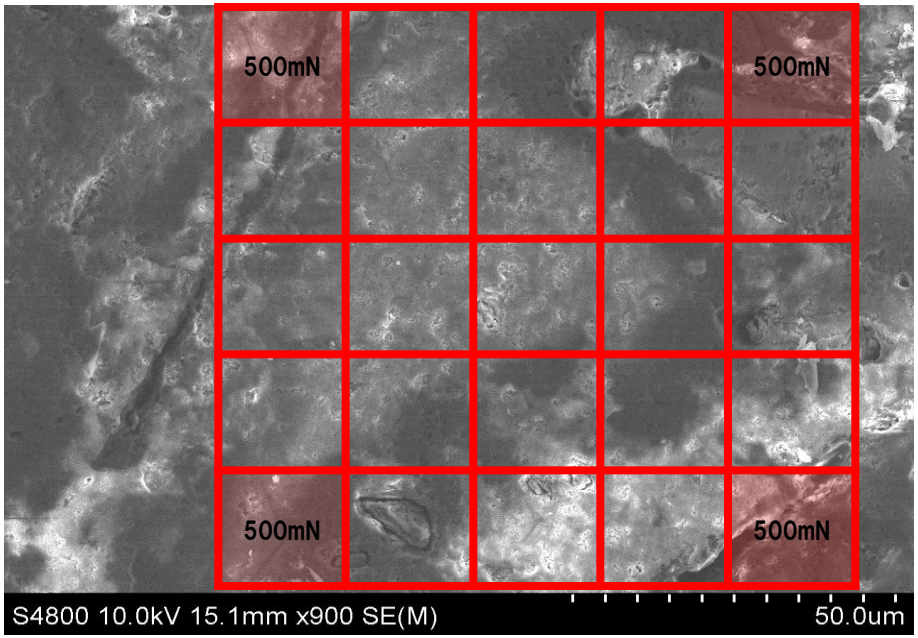
ステップインターバル:20msec

SiC歯車作製条件

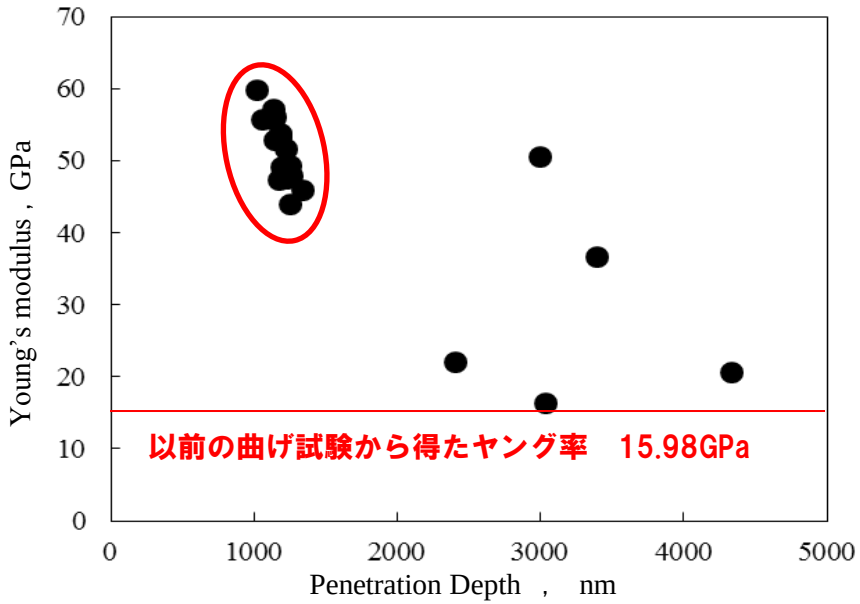
使用基板　気孔率11.1%/ブラスト

加圧回数　6回

PIP回数　12回



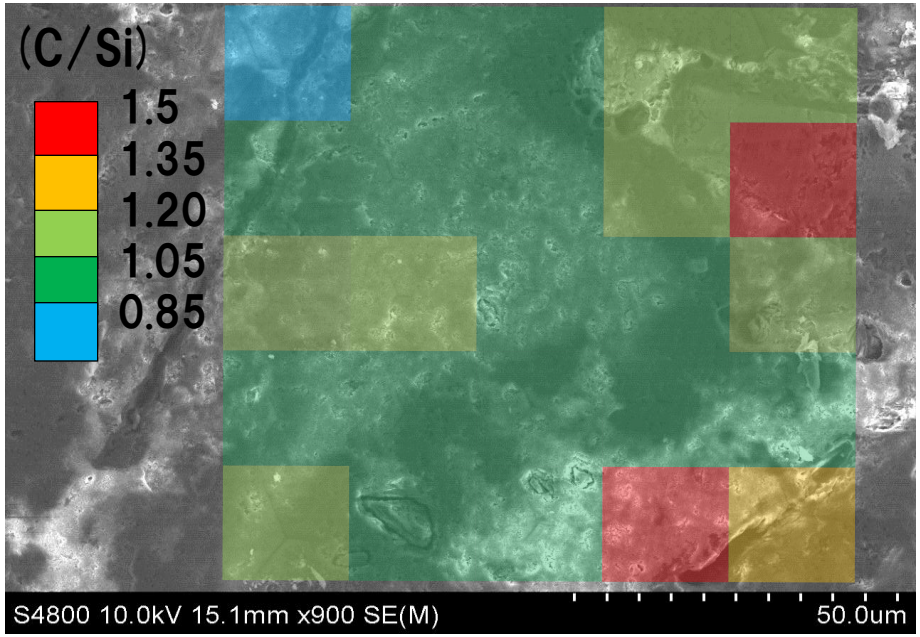
測定個所



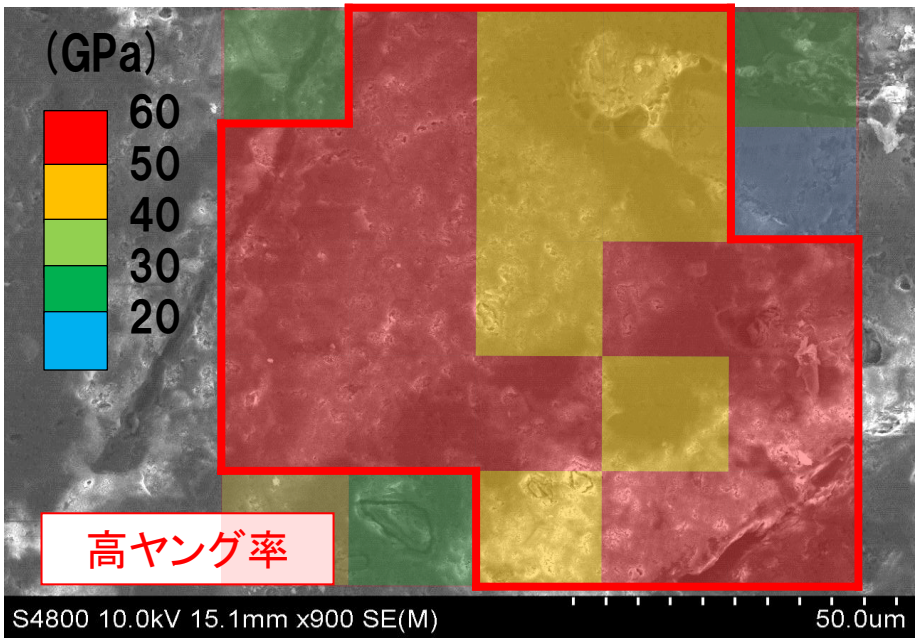
ヤング率の分布

EDXによる組成分析のマッピング 1

組成の違いが成形体の特性に与える影響の調査



SiとCの組成比(C/Si)によるマッピング

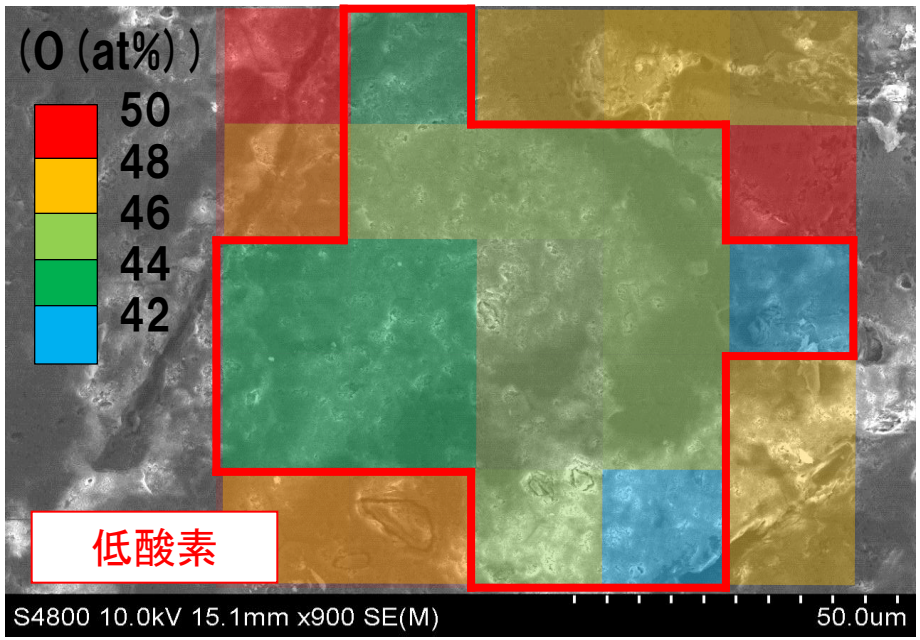


ヤング率のマッピング

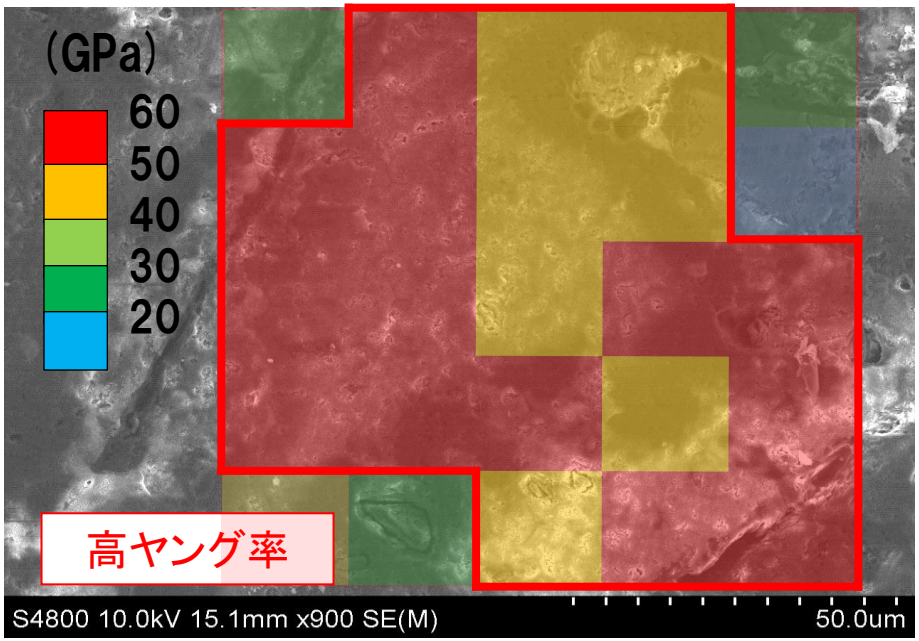
高ヤング率，低ヤング率域関わらず目立った傾向無し

EDXによる組成分析のマッピング 2

組成の違いが成形体の特性に与える影響の調査



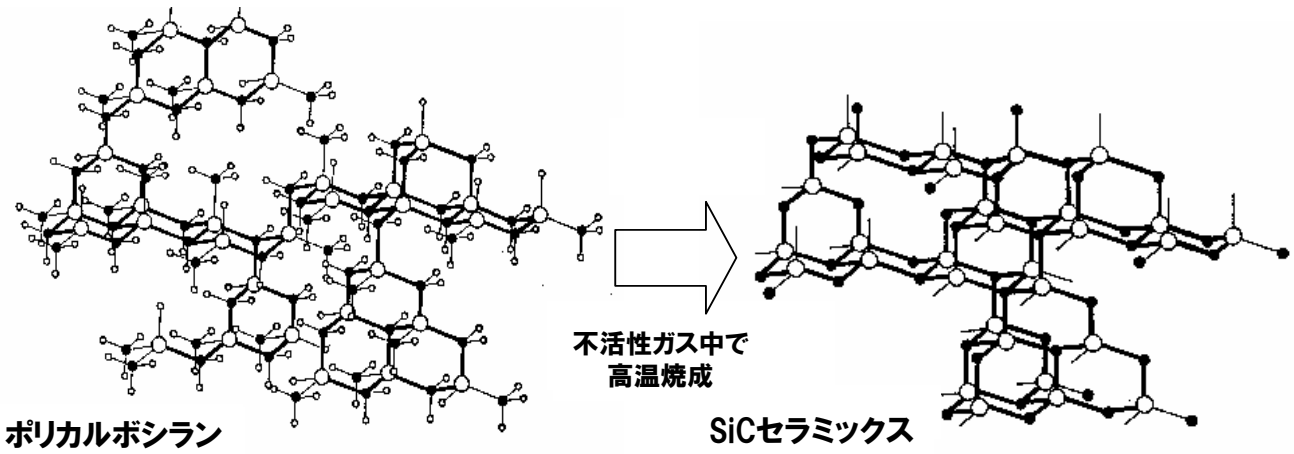
酸素含有率によるマッピング



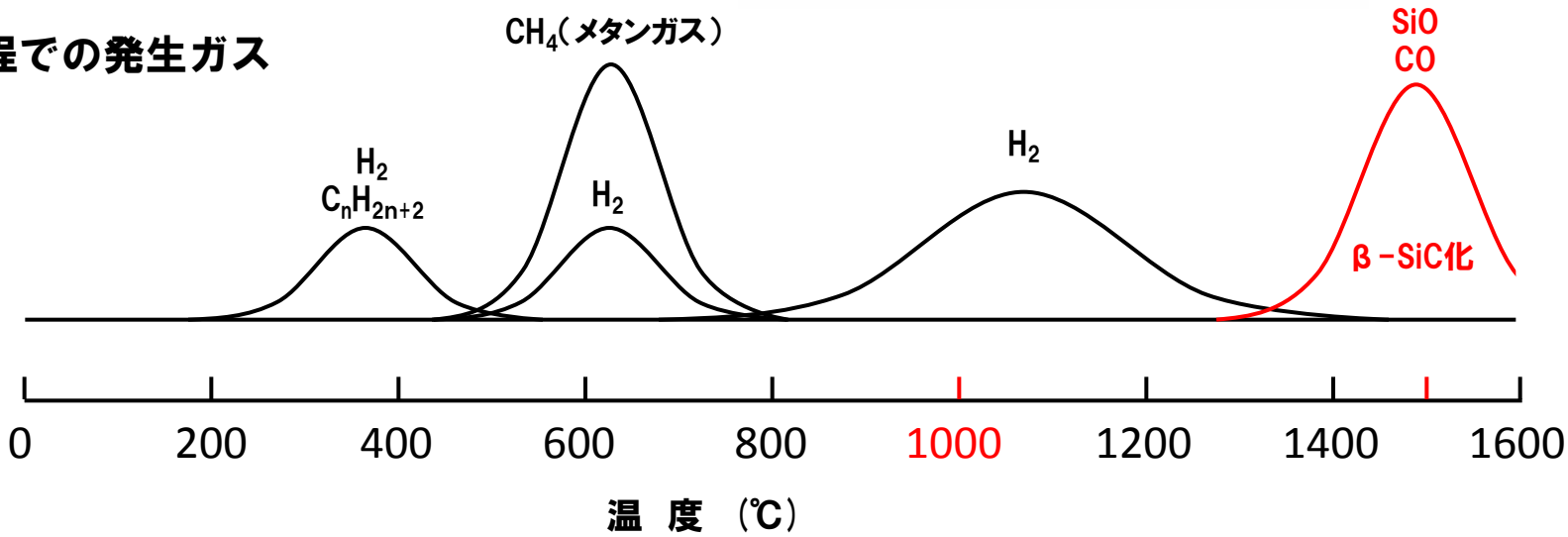
ヤング率のマッピング

高ヤング率域，低酸素域が類似

PCSの熱分解過程



熱分解過程での発生ガス



硬さ試験

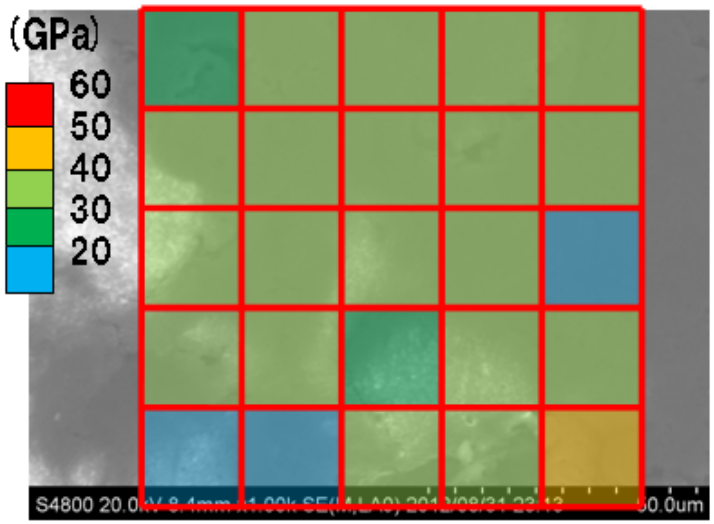
試験条件

荷重：500mN,100mN　　保持時間：1sec
分割数：500　　測定個所：25 (5×5 (/20μm))
ステップインターバル:20msec

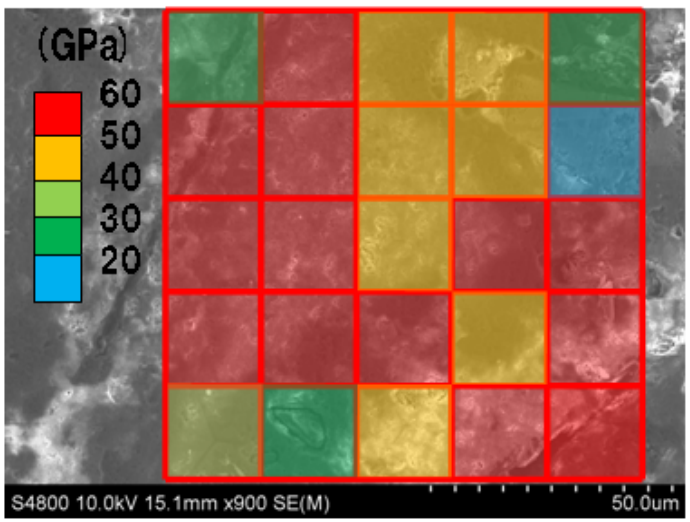
SiC歯車作製条件

使用基板　気孔率11.1%/ブラスト
加圧回数　6回
PIP回数　6,12回

PIP 6回



PIP 12回



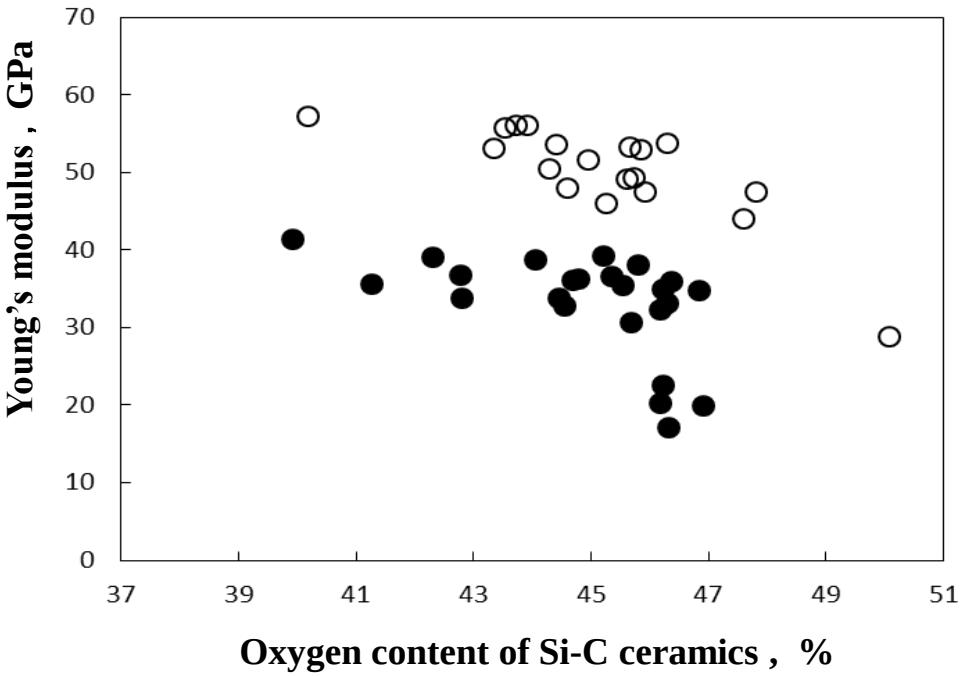
測定個所とヤング率の分布

ヤング率の比較

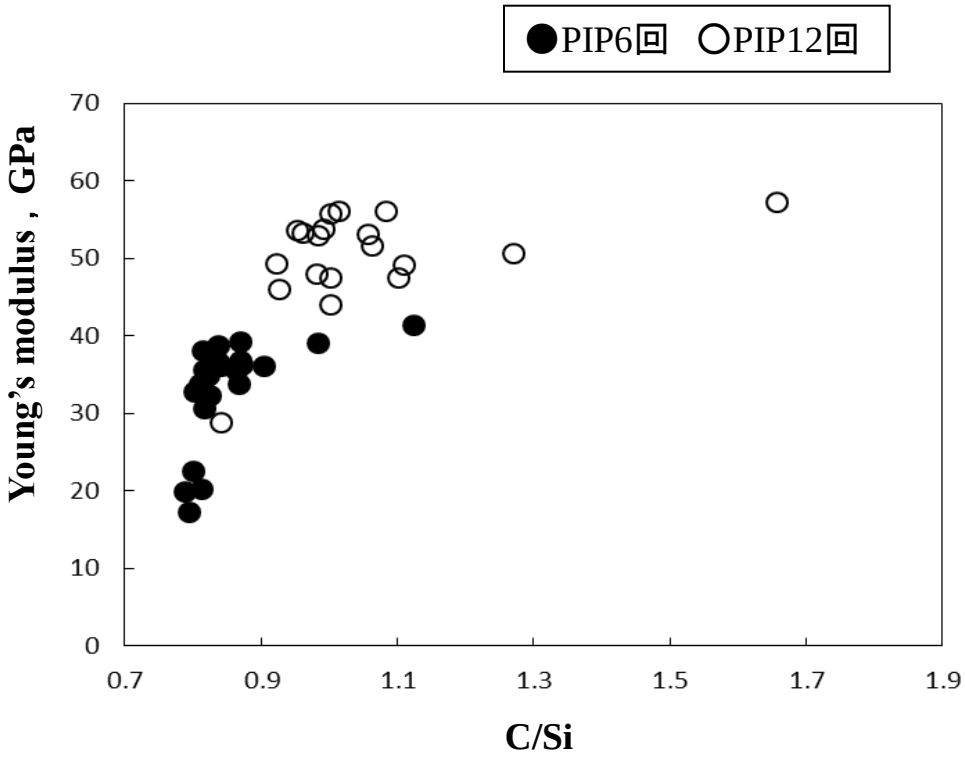
PIP6回　平均値 32.2GPa
最大値 41.35GPa　最小値 10.3GPa

PIP12回　平均値 49.0GPa
最大値 59.9GPa　最小値 16.3GPa

EDXによる組成分析



ヤング率と酸素含有率の関係



ヤング率とC/Siの関係

酸素含有量が低いほど高ヤング率

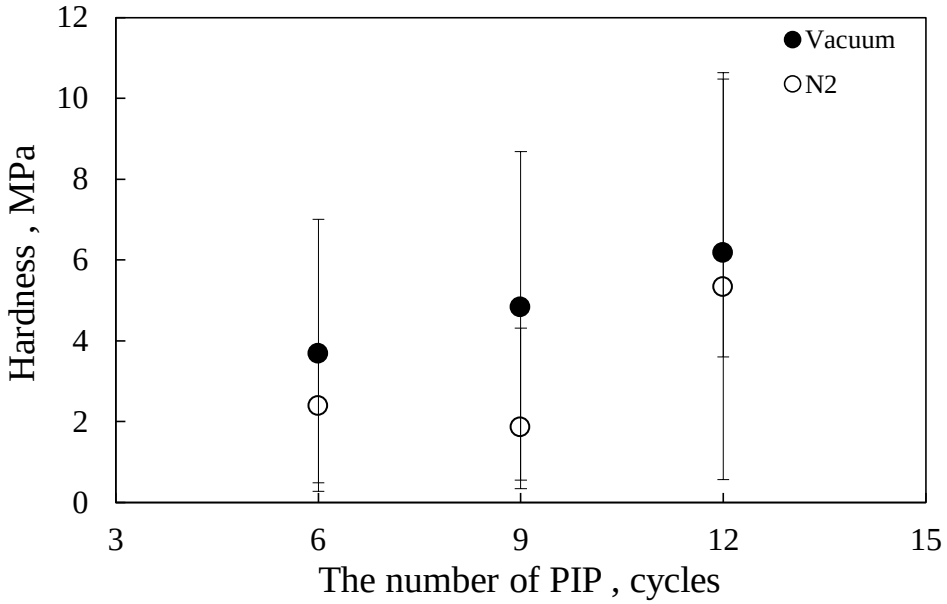
硬さ試験結果

試験条件

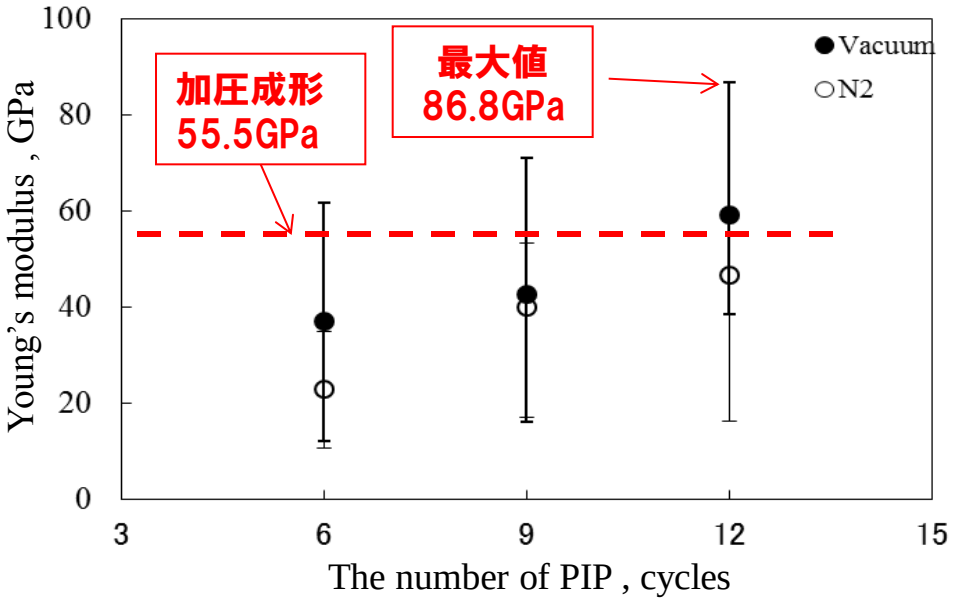
荷重：500mN,100mN
分割数：500
ステップインターバル:20msec
保持時間：1sec
測定個所：25（5×5（/20μm））

SiC歯車作製条件

使用基板　気孔率11.1%/ブラスト
加圧回数　6回
PIP回数　6,9,12回
焼成雰囲気　真空（1.2Pa），窒素フロー



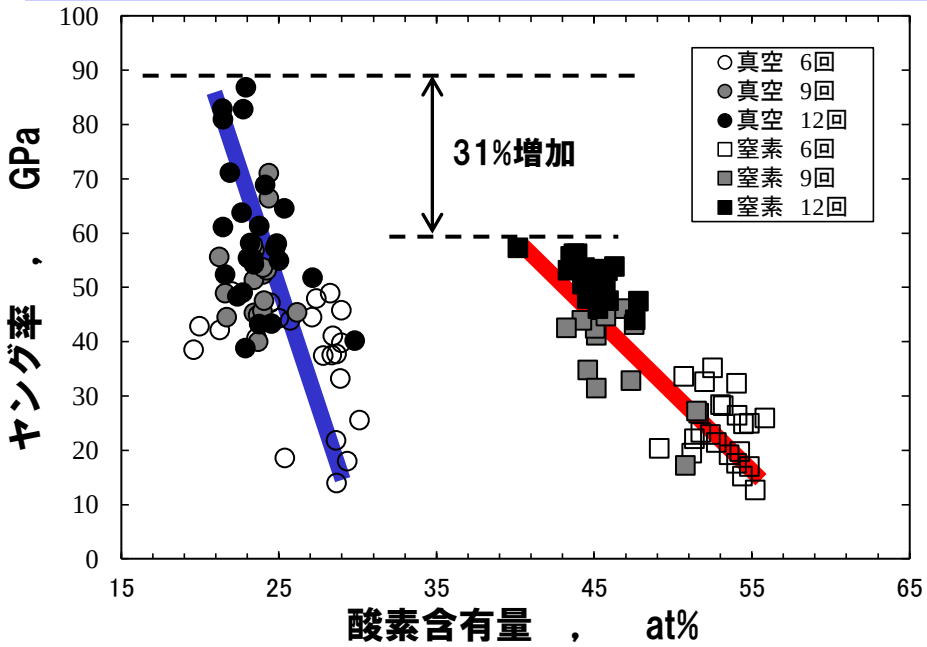
硬さとPIP回数の関係



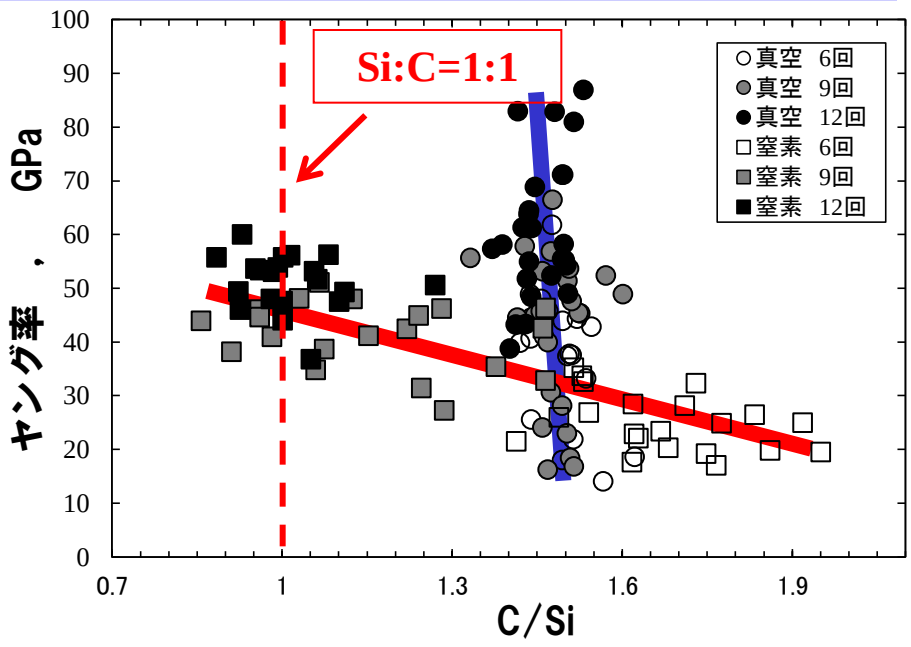
ヤング率とPIP回数の関係

PIP回数が増加するにつれ硬さ，ヤング率が上昇

硬さ試験結果，組成分析結果



ヤング率と酸素含有量の関係



ヤング率とC/Siの関係

焼成中の発生ガス