

# 材料強度設計No.9

知能機械システム工学科

坂本東男

Sakamoto.haruo@kochi-tech.ac.jp

教員室A429、TEL:0887-57-2317

研究室A213、TEL:57-2243

# 講義内容 ;セラミックスと高分子

## テキストp187 - 216

- 1.セラミックス材料：
  - セラミックスの分類と機能 1)
  - セラミックスの構造 2)
  - セラミックス材料の特性 3)
  
- 2.高分子材料：
  - 1)プラスチックの種類 2)
  - 熱可塑性プラスチック 3)
  - 工業用熱可塑性プラスチック (エンブラ) 4)
  - 熱硬化性プラスチック 5)
  - ゴム 6)
  - ポリマーアロイ

# セラミックス材料

- 1 .伝統的セラミックス(Traditional Ceramics):陶磁器、ガラスの食器、花瓶、バスタブなどの日用品やタイル、れんが、セメント
- 2 .ニューセラミックス(New Ceramics)、ファインセラミックス(Fine Ceramics)
- 3 .エンジニアリングセラミックス(Engineering Ceramics) :機械材料

# セラミックス材料の分類

表 10.1 セラミック材料の化学組成による分類

酸化物セラミックス	非酸化物セラミックス
<p>2元系酸化物：  シリカ<math>\text{SiO}_2</math>、アルミナ<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>、  チタニア<math>\text{TiO}_2</math>、ジルコニア<math>\text{ZrO}_2</math>、  トリア<math>\text{ThO}_2</math>、ウラニア<math>\text{UO}_2</math>、  ベリリア<math>\text{BeO}</math>、マグネシア<math>\text{MgO}</math></p> <p>多元系酸化物：  チタン酸バリウム<math>\text{BaTiO}_3</math>  ニッケル・フェライト<math>\text{NiFeO}_4</math>、  スピネル<math>\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3</math>  フォルステライト<math>\text{Mg}_2\text{SiO}_4</math></p>	<p>炭化物：  炭化ケイ素<math>\text{SiC}</math>、  炭化チタニウム<math>\text{TiC}</math>、  炭化タンタル<math>\text{TaC}</math>、  炭化タングステン<math>\text{WC}</math>  炭化ボロン<math>\text{B}_4\text{C}</math>、炭化ニオブ<math>\text{NbC}</math></p> <p>チッ化物：  チッ化ボロン<math>\text{BN}</math>、  チッ化ケイ素<math>\text{Si}_3\text{N}_4</math>、  チッ化アルミニウム<math>\text{AlN}</math></p> <p>ホウ化物：  <math>\text{TiB}_2</math>、<math>\text{ZrB}_2</math></p> <p>フッ化物：  <math>\text{CaF}_2</math>、<math>\text{BaF}_2</math>、<math>\text{ZrF}_4</math>-<math>\text{ThF}_4</math>-<math>\text{BaF}_2</math></p> <p>硫化物：  <math>\text{ZnS}</math>、<math>\text{TiS}_2</math></p>

# セラミックス材料の機能(1)

表 10.2 ニューセラミックスの機能と用途および材料の例

機 能		応 用	物 質 と 状 態
電 磁 気 的 機 能	絶 縁 性	集積回路基板 放熱性集積回路基板	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (高純度ち密焼結体, 薄板状単結晶) $\text{BeO}$ (高純度ち密焼結体)
	半 導 性	PTCヒータ 抵抗発熱体 バリスタ, 非線形素子 ガスセンサ	$\text{BaTiO}_3$ (半導性組織制御焼結体) $\text{LaCrO}_3, \text{SiC}, \text{MoSi}_2$ (組織制御焼結体) $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3$ (組織制御焼結体) $\text{SnO}_2$ (多孔質焼結体)
	イオン導電性	固体電池, 酸素センサ Na-S電池	$\text{C-ZrO}_2$ (ち密焼結体) $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ (ち密焼結体)
	誘 電 性	コンデンサ	$\text{BaTiO}_3$ (高純度組織制御焼結体)
	圧 電 性	着火素子, セラミックフィルタ 水晶発振子, 表面波フィルタ	$\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (分極処理ち密焼結体) $\text{SiO}_2$ (単結晶薄板), $\text{LiTaO}_3, \text{LiNbO}_3$ , (単結晶薄板)
	焦 電 性	赤外線検出素子	$\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (分極処理ち密焼結体)
	電子放射性	電子銃用熱陰極	$\text{LaB}_6$ (単結晶)
	軟 磁 性	トランスコアー, 記憶素子 磁気テープ	$\text{Zn}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (粒界制御ち密焼結体) $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (微粉末)
	硬 磁 性	永久磁石 可とう性磁石	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (配向性ち密焼結体) $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ (粉体分散ゴム)

# セラミックス材料の機能(2)

光学的機能	透光性	耐熱耐食材料(ナトリウムランプ管) 透明電極 レーザ窓	$Al_2O_3$ (透光性ち密焼結体) $SnO_2$ (半導性透明皮膜) $ZnSe$ (単結晶)
	導光性	光通信ファイバ	$SiO_2$ (高純度繊維)
	反射性	太陽熱集光器 赤外線反射膜, 選択吸収膜	$TiN$ (光沢表面) $SnO_2$ (塗布膜)
	蛍光性	電子励起蛍光体(カラーテレビ用) X線励起蛍光体 レーザ 発光ダイオード 電場発光 シンチレータ	$Y_2O_3:S:Eu$ (粉体) $CaWO_4$ (粉体) $Y_3Al_5O_{12}:Nd$ (単結晶) $GaAs$ (単結晶) $ZnS:Cu$ (粉体) $NaI:Tl$ (単結晶)
	偏光性	電気光学偏光素子	PLZT(透明ち密焼結体)
熱的機能	耐熱性	耐熱材料	$ZrO_2, ThO_2, C$ (焼結体)
	断熱性	スペースシャトル断熱材 不燃性壁材	$SiO_2$ (繊維タイル) $CaO \cdot nSiO_2$ (多孔体)
	伝熱性	集積回路基板	$BeO, SiC$ (高純度ち密焼結体), $C$ (単結晶)
	耐熱衝撃性	高温熱交換器	$2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ (焼結体)
機械的機能	高温高強度性	ガスタービン, セラミックエンジン	$Si_3N_4, SiC$ (ち密焼結体)
	剛性	旋盤ベットの	$Al_2O_3, SiC, Si_3N_4$ (焼結体)
	耐摩耗性	軸受, ダイス	$SiC, Si_3N_4, Al_2O_3, WC-Co$ (焼結体)
	高硬度性	切削工具 砥石, 研摩材	$TiN, Al_2O_3, WC-Co, TiC, C$ (ち密焼結体) $Al_2O_3, SiC, C-BN, C$ (多孔質焼結体, 粉粒体)
その他	担持性	触媒担体, 固定化酵素担体	$Al_2O_3$ (多孔体), セオライト, $SiO_2$ (孔径制御多孔体)
	触媒能	触媒, 耐熱触媒	$K_2O_nAl_2O_3$ , フェライト(多孔質焼結体)
	生体適合性	人工歯, 人工骨	$Al_2O_3$ , アパタイト(焼結体, 単結晶), 結晶化ガラス
	耐食性	化学反応容器	$Al_2O_3, SiO_2, h-BN, Si_3N_4, SiC, C$ (焼結体)
	耐放射能	原子炉材, 核融合炉材	$UO_2, UC, SiC, C, BeO, B_4C$ (焼結体)

# イオン結合と共有結合の割合

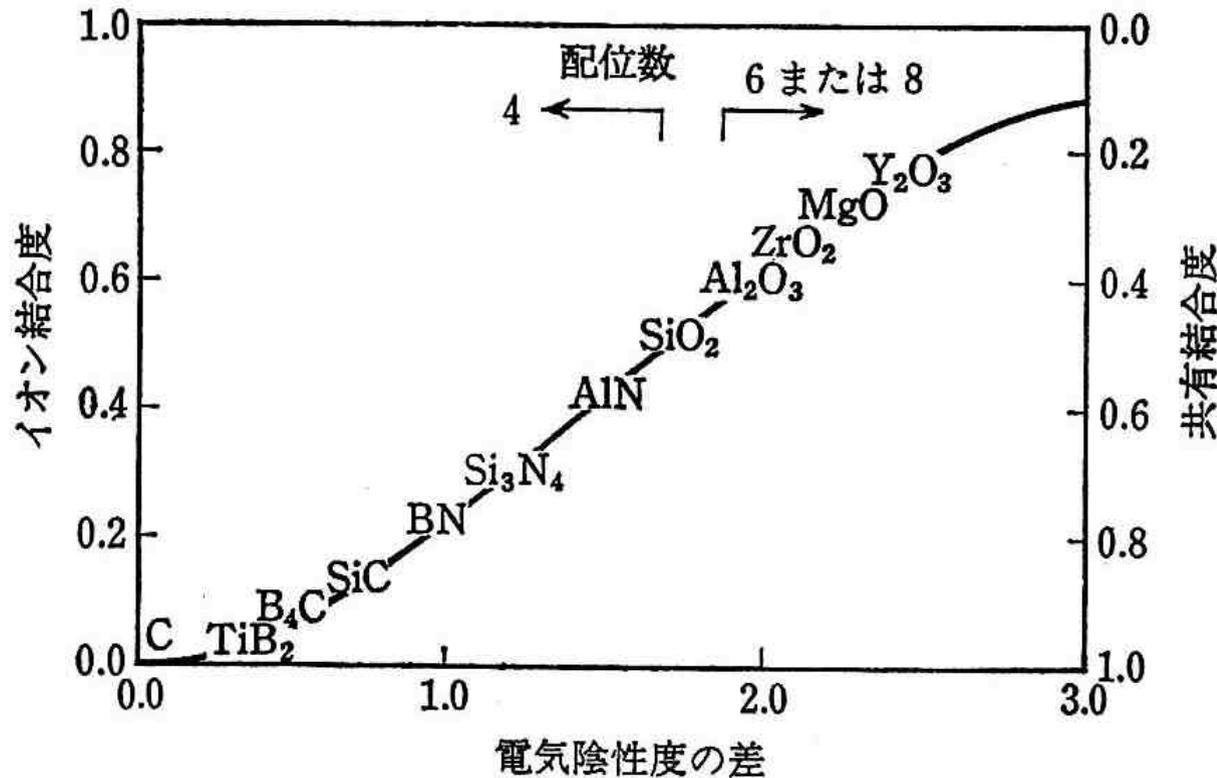


図 10.1 種々のセラミック材料における電気陰性度差とイオン結合度または共有結合度の関係(日本材料学会編：先端材料シリーズ 破壊と材料, 裳華房 1989)

# ケイ酸塩の構造

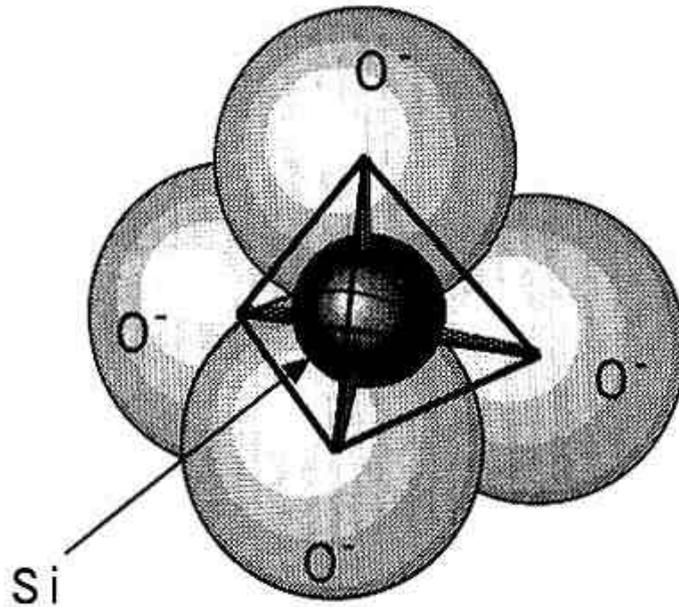


図 10.2  $\text{SiO}_4^{4-}$  四面体構造

4 個の酸素原子が 1 個のケイ素原子を中心に取り囲む構造になっている。各酸素原子は他の原子と結合できる 1 個の電子をもっている。

# ケイ酸塩の構造(2)

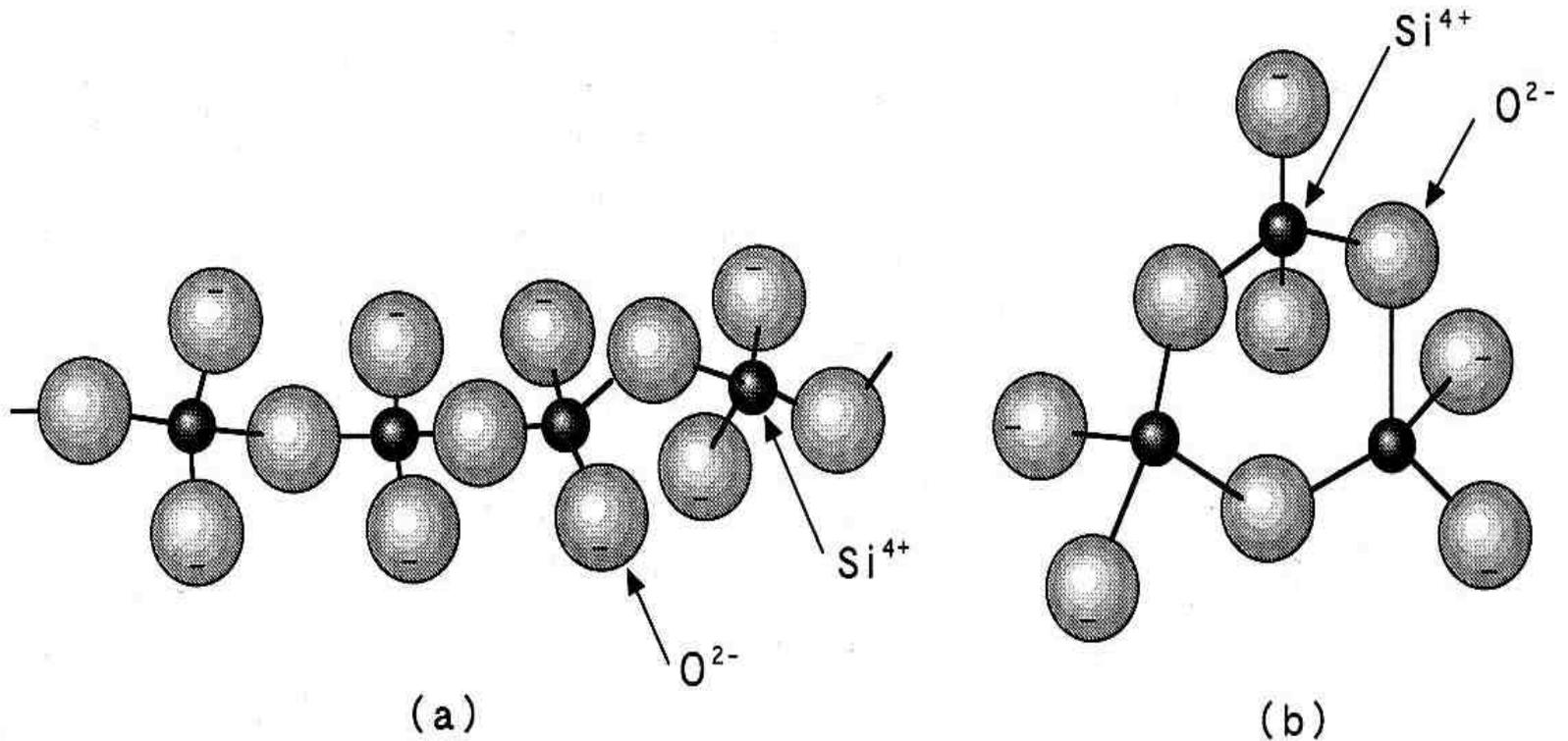
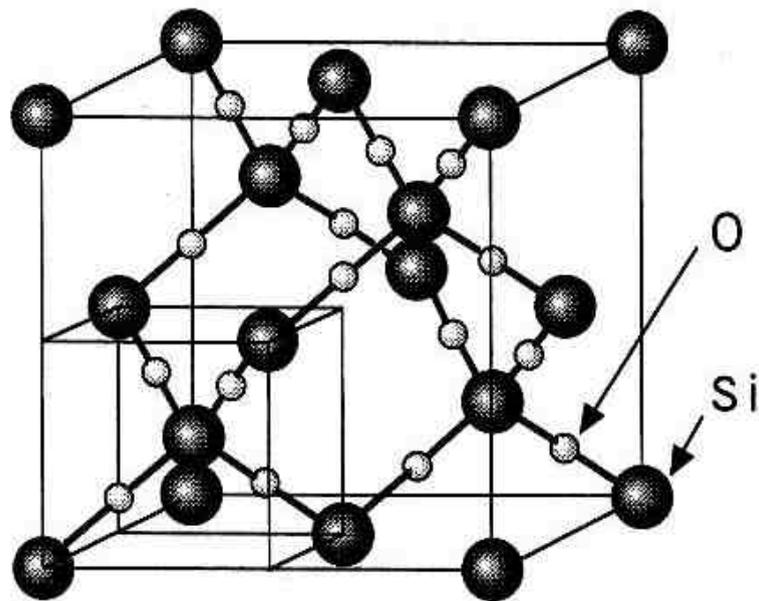
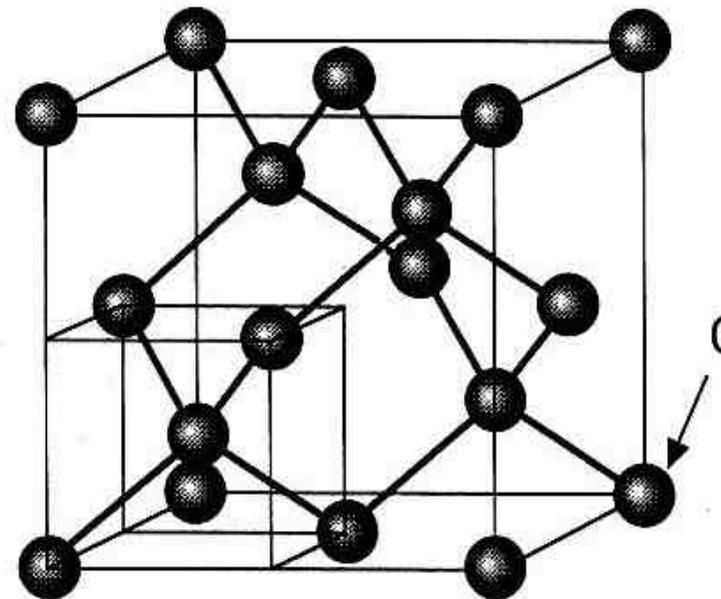


図 10.3 SiO<sub>4</sub><sup>-</sup> 正四面体の鎖状構造 (a) と環状構造 (b)

# ダイヤモンド構造



(a)



(b)

図 10.4 立方晶シリカ (a) とダイヤモンド (b) の結晶構造の比較

# ガラスの構造

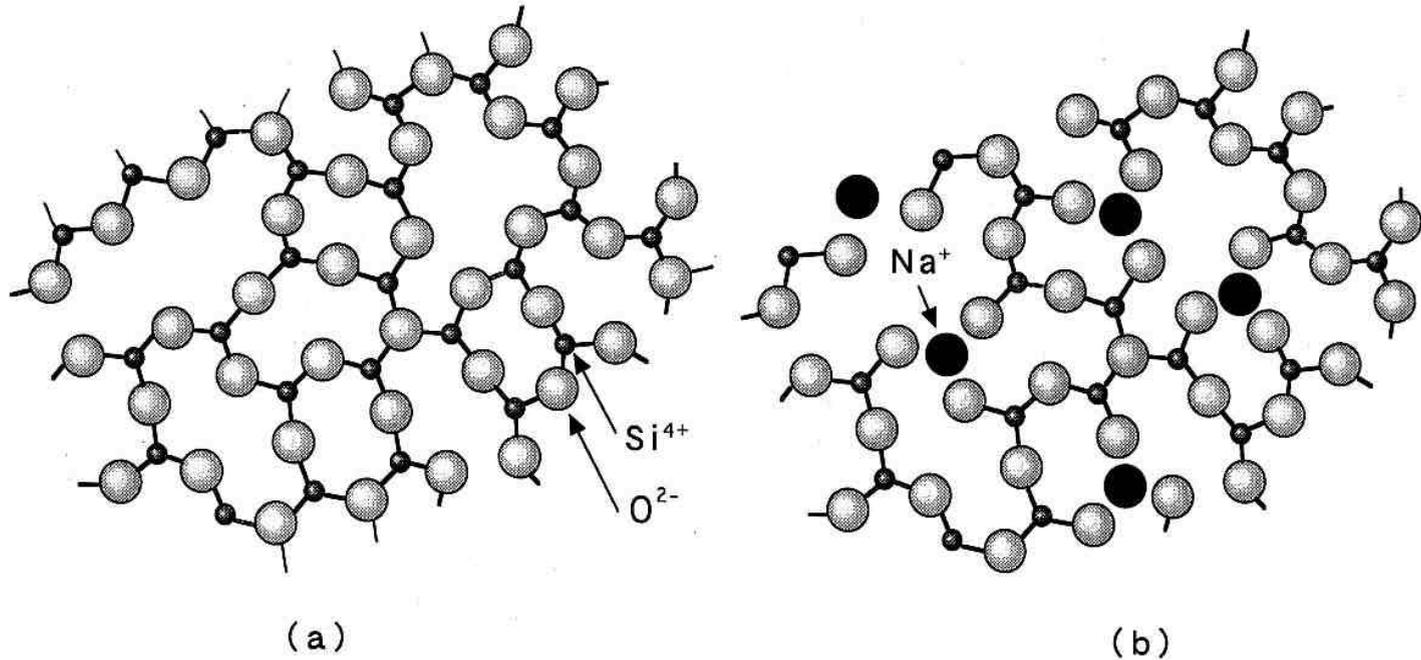


図 10.5 シリカガラスの網目構造

- (a) 純粋なシリカガラスの構造：ランダムな（非晶質）構造
- (b) ソーダ・シリカガラスの構造： $\text{Na}^+$  イオンがガラスの網目構造の空間に入り込み結合力を低下させる。

# マグネシアMgO

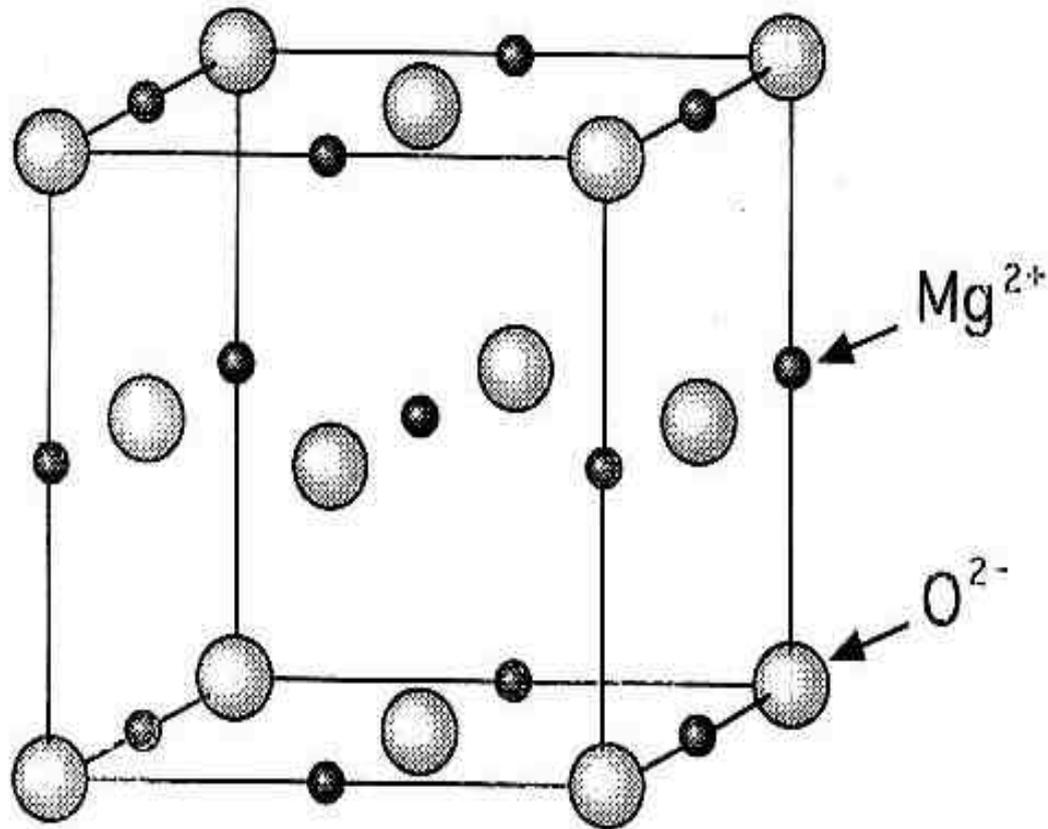


図 10.6 マグネシア  $MgO$  の結晶構造

# アルミナ $\text{Al}_2\text{O}_3$

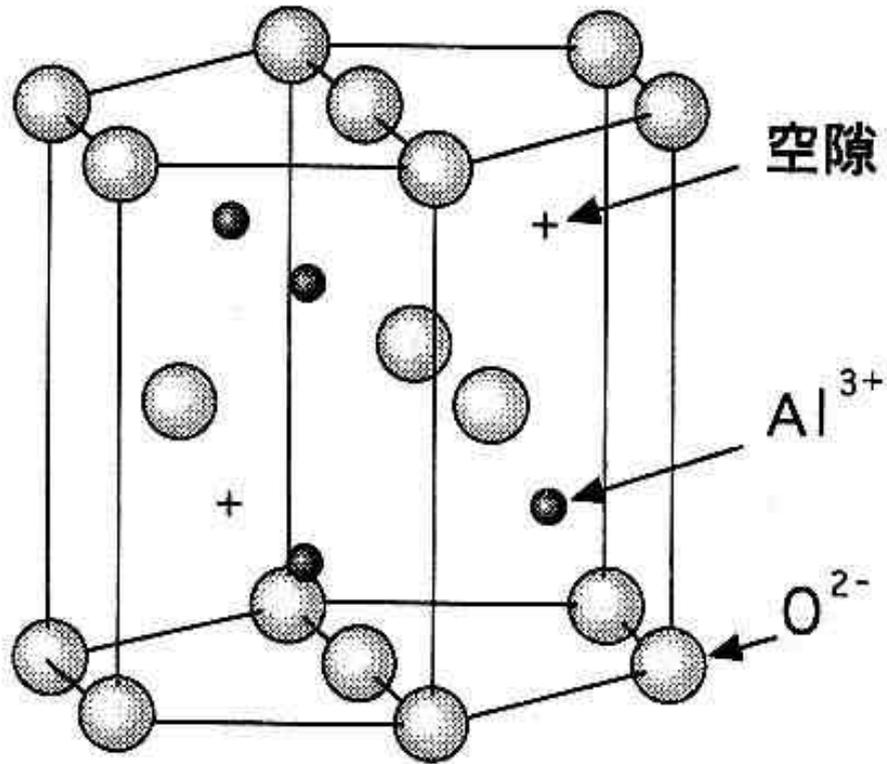


図 10.7 アルミナ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の結晶構造

# 炭化ケイ素(SiC)-ダイヤモンド構造

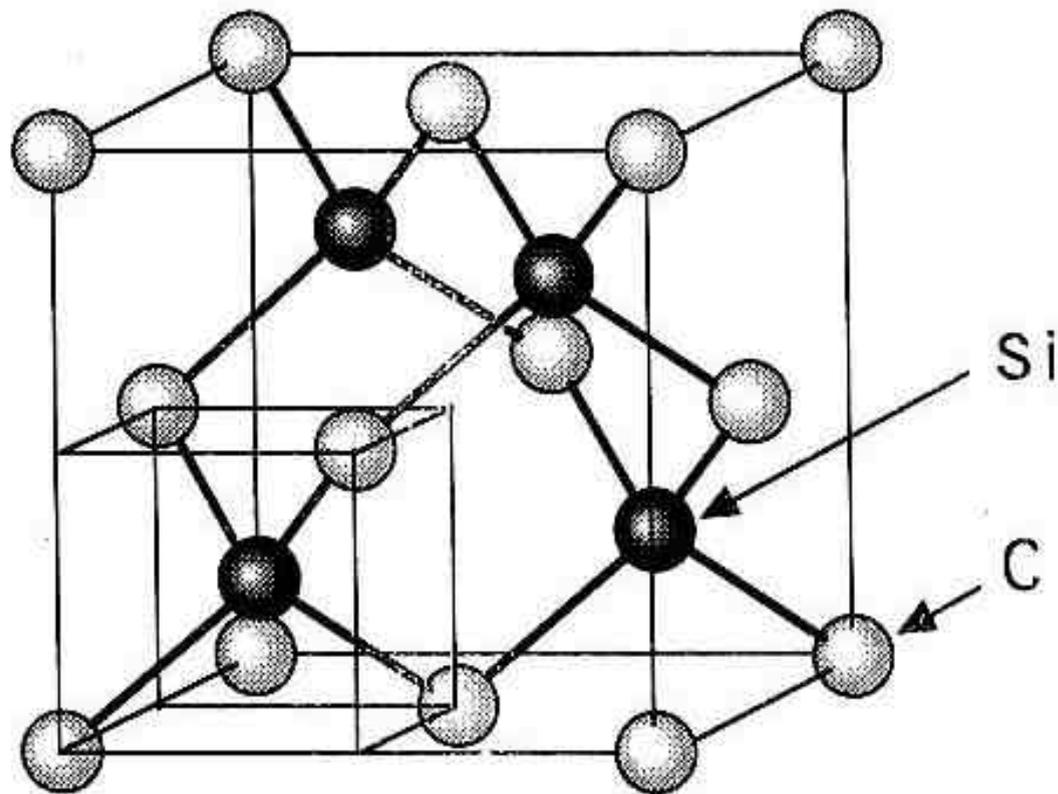


図 10.8 炭化ケイ素 SiC の結晶構造

# 多結晶セラミックスの微細構造

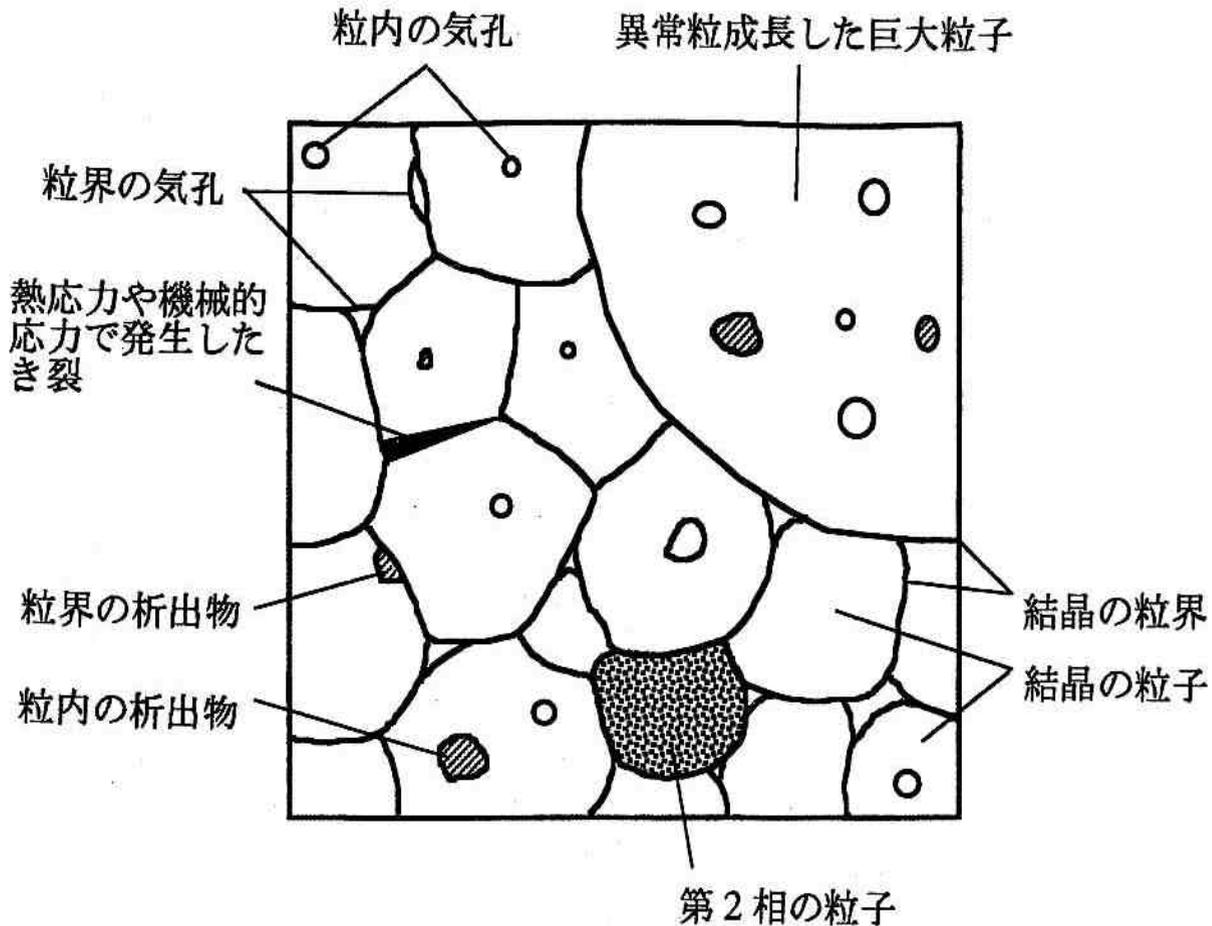


図 10.9 多結晶セラミックスの微細構造

# 金属材料とセラミックス

表 10.3 金属材料とセラミック材料の相対的な比較

金属材料	セラミック材料
金属結合	イオン/共有結合
多くの自由電子	獲得電子
大きい電気伝導性	小さい電気伝導性
大きい熱伝導性	小さい熱伝導性
不透明	透明 (薄い場合)
高い引張強さ	低い引張強さ
低いせん断強さ	高いせん断強さ
低い高温強度	高い高温強度
延性	低じん性 (ぜい性)
塑性変形	塑性変形はほとんどなし
衝撃荷重に強い	衝撃荷重に弱い
高い熱衝撃抵抗	低い熱衝撃抵抗
比較的重い	比較的軽い
中間的硬さ	極端に硬い
無孔質	多孔質
高密度	低密度

# セラミックスの特性

表 10.4 セラミック材料と他材料の特性（代表値）の比較

特 性	セラミック材料			他材料		
	アルミナ	炭化ケイ素	ジルコニア	炭素鋼 (焼きならし)	アルミニウム	ナイロン
比重	3.8	3.2	6.0	7.8	2.7	1.1
機械的性質：						
硬さ（モース） （ビッカース） kgf/mm <sup>2</sup>	9 1400～1900	9 2400	8 1200～1300	5 200	3	2
縦弾性係数 GPa	～400	～600	～250	206	69	3.3
引張強さ（室温） GPa				0.7	0.1	0.07
曲げ強さ（室温） GPa	0.3～0.5	0.45～0.8	1～1.5			
圧縮強さ（室温） GPa	2.5～3.5	0.6～4.2				0.07
破壊じん性値 MPa√m	3～4	2～6	6～15	80～100	30	
熱的性質：						
融点（概数） °C	2050	2220	2500	1400	660	215
熱伝導率（室温） cal/cm sec °C	0.09	0.2	0.007	0.12	0.55	
線膨張係数（室温） ×10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	8	4	7	11	24	90
電気的性質：						
体積固有抵抗 Ωcm	10 <sup>14</sup> ～10 <sup>16</sup>	100～10 <sup>5</sup>	>10 <sup>10</sup>			10 <sup>12</sup> ～10 <sup>14</sup>
絶縁耐圧 kV/mm	>20					15～20
最高使用温度 °C	～2200	～2500	～2600			422

# セラミックスの破壊強度例

〔例題 10.1〕 き裂をもつセラミック材料の破壊靱性  $K_{Ic}$  が次式で与えられるとする。

$$K_{Ic} = \sigma_B \sqrt{\pi a} \quad (10.1)$$

ここで、 $2a$ ：き裂の長さ、 $\sigma_B$ ：引張強さである。

破壊靱性値  $K_{Ic} = 2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  のセラミック材料が  $200 \text{ MPa}$  の引張強さを達成するために許容される最大のき裂寸法を求めよ。

〔解〕  $2a = 2(K_{Ic}/\sigma_B)^2/\pi = 2[2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/200 \text{ MPa}]^2/\pi = 64 \times 10^{-6} \text{ m} = 64 \mu\text{m}$

# 高温材料用セラミックス

表 10.5 高温用セラミック材料の性質

材 料	性 質	密 度 g/cm <sup>3</sup>	曲げ強さ(室温) MPa	曲げ強さ(1200℃) MPa	縦弾性係数 GPa	熱伝導率 W/(m・K)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	反応焼結	2.70	290	290	240	
	常圧焼結	3.20	830	700	270	14
	ホットプレス	3.27	980	880	310	29
SiC	Si 注 入	3.15	450	430	400	21
	常圧焼結	3.15	340	370	400	92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	常圧焼結	3.98	340		390	
ZrO <sub>2</sub>	常圧焼結PSZ	6.05	1170		200	1.9

日本機械学会編：機械工学便覧応用編 B4 材料学・工業材料，日本機械学会，1990

# 高分子材料(High Polymer Material)

- 1. 熱可塑性プラスチック：  
Thermo -Plastic
- 2. 熱硬化性：  
Thermo-Setting Plastics
- 3. 弾性高分子：  
エラストマー(Elastomer)など
- 4 .ポリマーアロイ：

# 熱可塑性プラスチックの構造

-エチレン (左の共有結合を活性化すると右の結合)

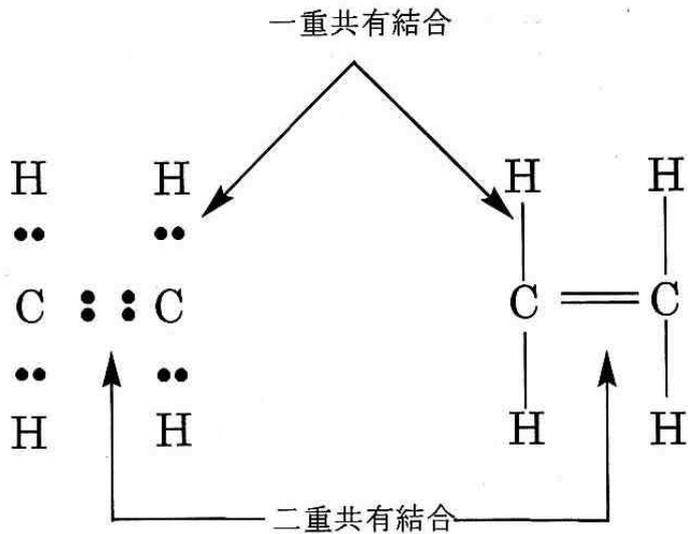


図 11.1 エチレンの共有結合

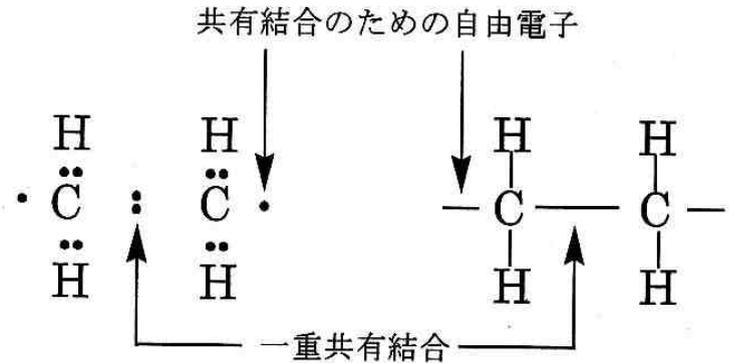
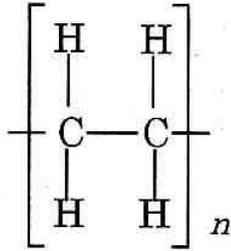


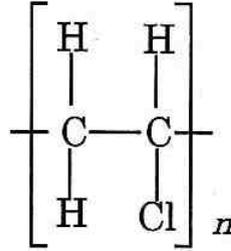
図 11.2 活性化されたエチレンの共有結合の構造



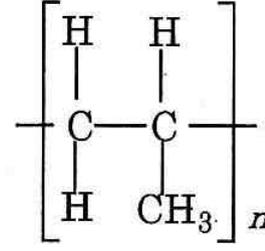
# ビニルポリマーの構成式



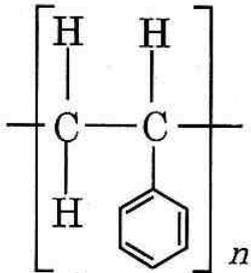
ポリエチレン  
融点：110-137°C



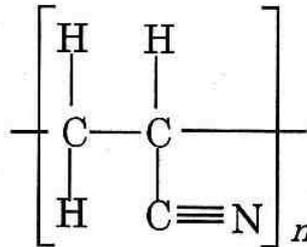
ポリ塩化ビニル  
融点：~204°C



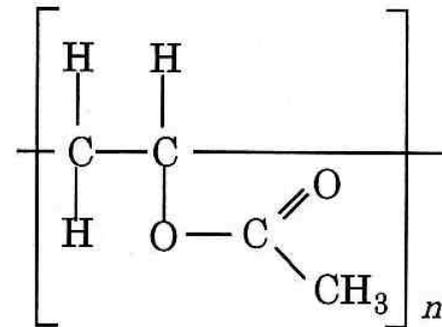
ポリプロピレン  
融点：165-177°C



ポリスチレン  
融点：150-243°C



ポリアクリロニトリル



ポリビニルアセテート  
融点：177°C

図 11.4 ビニルポリマーの構造式

# 熱可塑性プラスチックの機械的性質

表 11.1 一般用熱可塑性プラスチックの機械的性質

プラスチック	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強さ (MPa)	衝撃値 (ア インゾット) (J/m)	絶縁強度 (V/mm)	使用可能温 度(°C)
ポリエチレ ン (高密度)	0.125-0.126	20-37	21-747	18900	80-120
塩化ビニル (PVC)	1.49-1.58	52-16	53-2100		110
ポリプロピ レン (PP)	0.90-0.91	33-38	21-120	25600	107-150
スチレン・ アクリロニ トリル (SAN)	1.08	69-83	21-27	70000	60-104
アクロニト リル・ブタ ジエン・ス チレン (ABS)	1.05-1.07	41	320	15200	71-93
アクリル (Acrylic)	1.11-1.19	76	123	17730- 19700	54-110
テフロン (PTFE)	2.1-2.3	7-28	134-215	15760- 19700	288

# 工業用熱可塑性プラスチックの 機械的性質

表 11.2 工業用プラスチックの機械的性質

材料	密度(g/cm <sup>3</sup> )	引張強さ (MPa)	衝撃強さ (J/mm)	絶縁強度 (V/mm)	最高使用温 度(°C)
ナイロン 6,6	1.13-1.15	62-83	107	15170	82-150
ポリアセタ ール	1.42	69	75	12600	90
ポリカーボ ネイト	1.2	62	640-854	15000	120
ポリエステ ル PET PBT	1.37 1.31	72 55-57	43 64-70	23200- 27500	80 120
ポリフェニ レン・オキ サイド	1.06-1.10	54-66	64-610	15800- 19700	80-105
ポリスルホ ン	1.24	70	64	16700	150
ポリフェニ レン・サル ファイド	1.34	69	16	23400	260

# 熱硬化性プラスチックの性質

表 11.3 熱硬化性プラスチックの性質

熱硬化性プラスチック	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	引張強さ (MPa)	衝撃値(ア イゾット) (J/m)	絶縁強度 (V/mm)	最高使用 温度 (°C)
フェノール樹脂					
木粉補強	1.34-1.45	34-62	10-32	10200-15700	150-177
マイカ補強	1.65-1.92	38-48	16-21	13800-15800	120-150
ガラス補強	1.69-1.13	34-124	16-96	5500-15760	177-288
ポリエステル					
ガラス補強 SMC	1.7-2.1	55-138	425-1170	12600-15760	150-177
ガラス補強 BMC	1.7-2.3	27-70	800-850	11800-16550	150-177
メラミン					
セルロース補強	1.45-1.52	35-62	11-21	13790-15760	120
羊毛補強	1.50-1.55	48-62	21-27	11820-13002	120
ガラス補強	1.8-2.0	35-69	32-960	11820-15760	150-200
ウレア樹脂 (セルロース補強)	1.47-1.52	38-812	11-21	11820-15760	77
アルキッド					
ガラス補強	2.12-2.15	28-66	32-530	13790-17730	230
ミネラル補強	1.60-2.30	20-62	16-27	13790-17730	150-230
エポキシ樹脂					
無補強	1.06-1.40	27-813	10-535	15760-25610	120-260
ミネラル補強	1.6-2.0	40-103	16.0-21.4	11820-15760	150-260
ガラス補強	1.7-2.0	69-207	—	11820-15760	150-260

# ゴムの機械的性質

表 11.4 ゴムの機械的性質

エラストマー	引張強さ (MPa)	伸び (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	使用温度 (°C)
天然ゴム (cis-ポリイソ プレン)	17.2-24.1	750-850	0.93	-50-82
合成ゴム (ブタジエン- スチレン)	1.4-24.1	400-600	0.94	-50-82
ニトリル (ブタジエン- アクリロニトリ ル)	0.5-0.9	450-700	1.0	-50-120
ネオプレン (ポリクロロプ レン)	20.7-27.6	800-900	1.25	-40-115
シリコン (ポリシロキサ ン)	4.1-9.0	100-500	1.1-1.6	-115-315

# ポリマーアロイ (種々のプラスチックをブレンド)

- 1. ABS (スチレンアクリロニトリル+ブタジエン)ポリカーボネイト
- 2 .ABS/塩化ビニル樹脂
- 3 .ポリカーボネイト/ポリエチレン
- 4 .PBT (ポリブチレンテレフタレート)/PET (ポリエチレンテレフタレート)

耐熱衝撃性、耐熱性、耐薬品性の向上

# 自動車用プラスチックと 従来材料の比較

表 11.5

部 品	材 料	長 所	短 所
ドアのハンドル	ビニル樹脂	成形性, 軽量	低温の衝撃性
	鋼 (クロムメッキ)	耐衝撃性 耐摩耗性	コスト
キャブレータ 部 品	アセタール樹脂	成形性, 軽量 高靱性	耐摩耗性
	アルミニウム ダイ キャスト	強度 耐摩耗性	コスト
バンパー	ポリカーボネイト	高靱性, 軽量 耐食性	コスト
	鋼 (クロムメッキ)	強度 補修しやすさ	耐食性