

トライボマテリアル

トライボマテリアルの求められる性質

硬さ

表面性状

非凝着性と固体潤滑性

化学的特性

硬さ(の有効性)

- ・ 真実接触面積は塑性流動圧力が高いほど小さい
(凝着摩擦と凝着摩耗はともに低減)
- ・ アブレシブ摩耗を受ける表面では、硬さが高いほど耐摩耗性は向上する。
- ・ 転がり摩擦では、硬さと関係する弾性率の向上は、弾性ヒステリシス損失を減らす上で有効に働く。

トライボロジーで問題になるのは、バルクよりも表面の硬さ



物質自体は硬くても靱性などが低いセラミックスは
薄膜として利用される

鉄系材料: 焼き入れでは、**Hv700**程度

表面(しゅう動面)のみの硬さを向上させる手段
としては、

- ・高周波焼入れ(浸炭窒化など)
- ・湿式めっき(硬質クロム膜など)
- ・CVD・PVD(TiN、CrN、DLCなど)
- ・溶射法(サーメット、セラミック等)

表面の硬さを上げることが、トライボシステムの
摩擦・摩耗特性向上に単純に結び付く訳ではない。

表面性状(の効果)

- ・油膜パラメータ λ の増大(分母が小さくなる)
(潤滑状態を流体潤滑側へ移行させる働き)
- ・プラトー形状では、油溜まり効果(?)
- ・特異な表面形状による潤滑特性の向上



表面テクスチャリング (表面改質の一種)

ただし、平滑すぎると密着しやすくなり、大きな摩擦力となる

非凝着性と固体潤滑性

すべり摩擦において、昔から「**ともがね**」は**極力避けるべし**、という言い伝え

ともがね(友金?)とは・・・同じ金属材料のこと



凝着部(真実接触部)では、面圧が高いため、
一体になりやすい

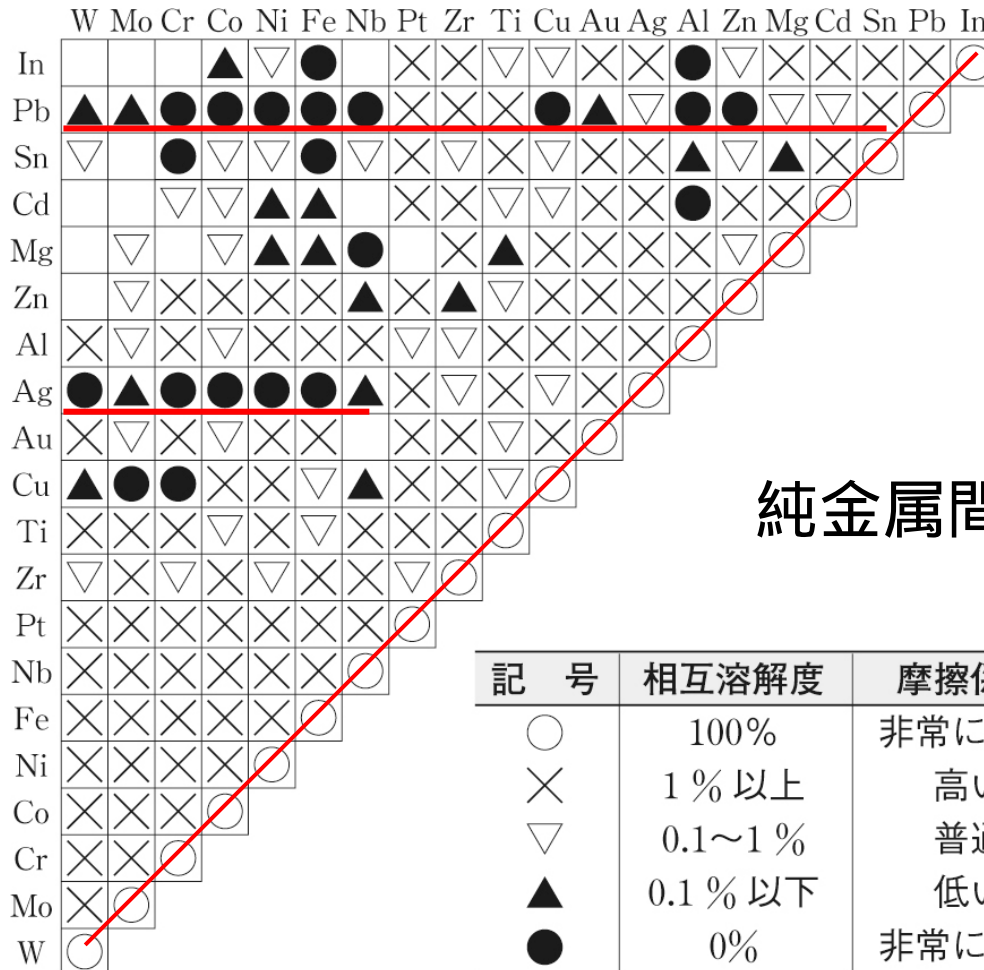


同じ金属が最も一体になりやすい



摩擦が大きく、焼付きやすい

合金を作りやすい金属の組合せが、悪い トライボロジー特性を示す



純金属間の相互溶解度

記号	相互溶解度	摩擦係数	摩耗
○	100%	非常に高い	極めて多い
×	1%以上	高い	多い
▽	0.1~1%	普通	普通
▲	0.1%以下	低い	少ない
●	0%	非常に低い	極めて少ない

化学的特性

摩擦面は新生面が生じるので、非常に活性が高い
(= 反応しやすい)



さらに摩擦によって、**高圧**、**高温**になると
トライボケミカル反応という特異的な
化学反応が進行する

- ・高温では、**潤滑剤の炭化(コーキング)**も発生する
- ・境界潤滑では、**極圧添加剤が表面と化学反応**



表面の化学的性質と添加剤の相性が悪い場合には
トライボロジー特性を向上させることができない

トライボマテリアル

金属:安価で一般的

(1) すべり軸受材料



基本的には、機械設計でも説明したが、**限界PV値が高い**ほど焼付き難いので、望ましい材料と言える

区分	合金名	規格	特徴と用途	
すべり軸受	ホワイトメタル	Sn 基	T2	しゅう動面の順応性に優れるが、耐疲労性、耐高温性が低い、静荷重軸受や船舶用大型軸受に使用。
		Pb 基	—	
	銅系合金	銅鉛合金	S1, S2	(*) 銅鉛合金は高い耐疲労性を有し、エンジン用軸受ではめっき付きで使用。鉛青銅は耐摩耗性に優れ、プッシュ等に広く使用。
		鉛青銅	S3, S4, S5, S6	
	アルミニウム合金	Al-Sn 合金	R1, R2	機械的強度や熱伝導性が高く、エンジン用軸受からプッシュまで広く使用。高面圧軸受にも使用できる。
		Al-Sn-Si 合金	R3	
Al-Zn 合金		R4		
オーバーレイ	Sn-Pb 合金	—	順応性や耐食性の改善上を目的に、上記の合金表面上に 20 μm 程度の膜厚でめっきして使用。	
転がり軸受	高炭素合金鋼	高炭素クロム鋼	JIS SUJ2 (ANSI 52100) (DIN 100Cr6)	炭素を約 1%, Cr を 1% 程度含み、耐摩耗性に優れている。SUJ2 は、転がり軸受材料として一般的で、ANSI 52100 や DIN 100Cr6 と同等。SUJ3 は Mn を、SUJ5 は SUJ3 に Mo を添加して焼入れ性を向上したものの。
	はだ焼鋼 (浸炭鋼)	Cr 鋼 Cr-Mo 鋼 Ni-Cr-Mo 鋼	JIS SCr420 JIS SCM420 JIS SNCM420	硬さとじん性を兼ね備えており、耐衝撃性に優れるため、円すいころ軸受に使用。小中型軸受には Cr 鋼、Cr-Mo 鋼、大型軸受には Ni-Cr-Mo 鋼が浸炭処理して使用される。
	耐食軸受鋼	マルテンサイト系ステンレス鋼	JIS SUS440C	焼入れ、焼戻し性がよく、高強度、高硬度で耐食性にも優れる。
	高速度鋼	W 系 Mo 系	JIS SKH4 AMS M50	JIS SKH4 は、Cr を約 4%, W を約 18%, Co を約 10% を含み、AMS M50 は、Cr を約 4%, Mo を約 4%, V を約 1% 含む。ともに高強度で耐熱性が高い。

(2) 転がり軸受材料

基本的には、内外輪、転動体は、**高炭素クロム軸受鋼**



しかし、先ほど“**「ともがね」**は避けるべし”との説明

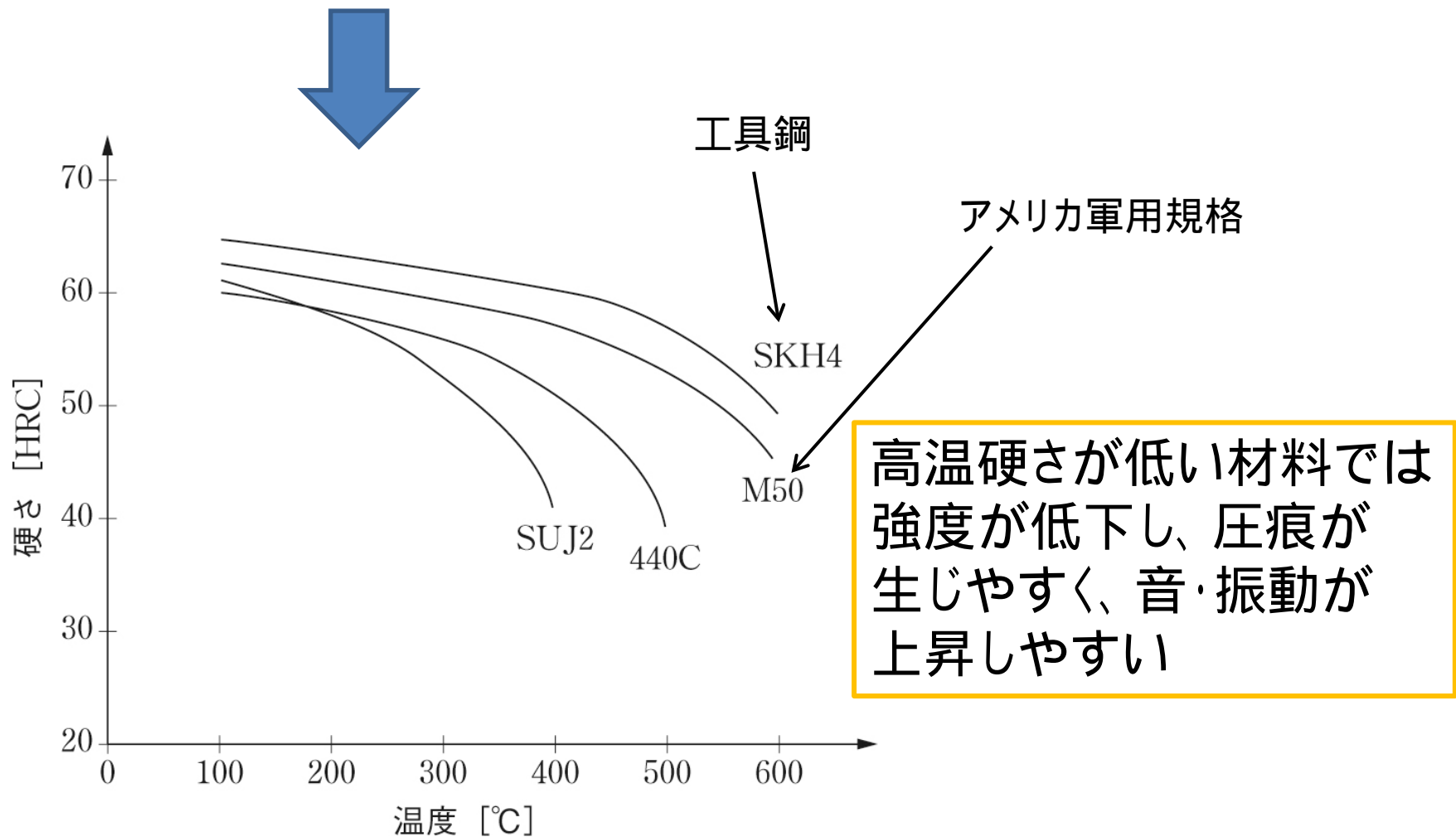


転がり軸受では、

- ・潤滑油、グリースなどの**潤滑剤の使用が原則**
(直接接触は極力しない、させない)
- ・**転がり疲れ、剛性、硬さ、価格などを考慮**すると
この材料が最適であること

から、「ともがね」ではあるが、高炭素クロム軸受鋼
を使用している(初期には、鋳鉄であった…)

- ・耐食性用途では、マルテンサイト系ステンレス
さらには、チタン合金 (+ 非磁性材料)
- ・高温用途では、硬さを維持できる鉄鋼材料



(3) 被覆材料

表面に肉盛りや溶射して、トライボロジー特性向上を図る



例：鉄道車両用軸受では、外輪にセラミックを溶射して絶縁性を高めている

主電動機用絶縁軸受
「メガオーム」

一般的な肉盛材料の化学成分

材料		化学成分 [mass %]									HV
		Co	Cr	W	C	Ni	Fe	Mo	B	Si	
Co 基合金	ステライト No. 6	Bal.	28.0	4.5	1.0	≤3.0	≤3.0	—	—	1.0	412
	ステライト No. 12	Bal.	29.0	8.5	1.4	≤3.0	≤3.0	—	—	1.0	458
	ステライト No. 21	Bal.	27.0	—	0.25	≤3.0	≤3.0	5.5	—	1.5	302
	トリバロイ T-900	Bal.	18	—	≤0.8	16	≤3.0	23	—	2.7	544
	トリバロイ T-800	Bal.	18	—	≤0.08	≤1.5	≤1.5	28	—	3.4	613
	トリバロイ T-400	Bal.	8.5	—	≤0.08	≤1.5	≤1.5	29	—	2.6	595
Ni 基合金	コルモノイ No. 4	—	10	—	0.3	Bal.	3	0.6	2	3.5	392
	コルモノイ No. 5	—	12	—	0.5	Bal.	3	0.6	2.3	4	513
	コルモノイ No. 6	—	15	—	0.7	Bal.	3	0.6	3	4.5	697

Bal.：その他の残りを意味する。

セラミックス材料 { 焼結製バルク材 コーティング膜



基本的な特性

- ・低密度
- ・高硬度
- ・低熱伝導
- ・電気絶縁
- ・高耐食性
- ・低熱膨張



金属と比較して
高性能ではある
が、“脆性材料”
である

項目 \ 材料	アルミナ Al ₂ O ₃	ジルコニア ZrO ₂	炭化ケイ素 SiC	窒化ケイ素 Si ₃ N ₄
密度 [g/cm ³]	3.8	6.0	3.1	3.2
線膨張係数 [1/°C]	7.1 × 10 ⁻⁶	10.5 × 10 ⁻⁶	3.9 × 10 ⁻⁶	3.2 × 10 ⁻⁶
ビッカース硬さ [HV]	1600	1200	2200	1500
ヤング率 [GPa]	350	220	380	320
ポアソン比	0.25	0.31	0.16	0.29
3点曲げ強さ [MPa]	300	1400	500	1100
破壊じん性値 [MPa・m ^{1/2}]	3.5	5	4	6

アルミナ (Al_2O_3)

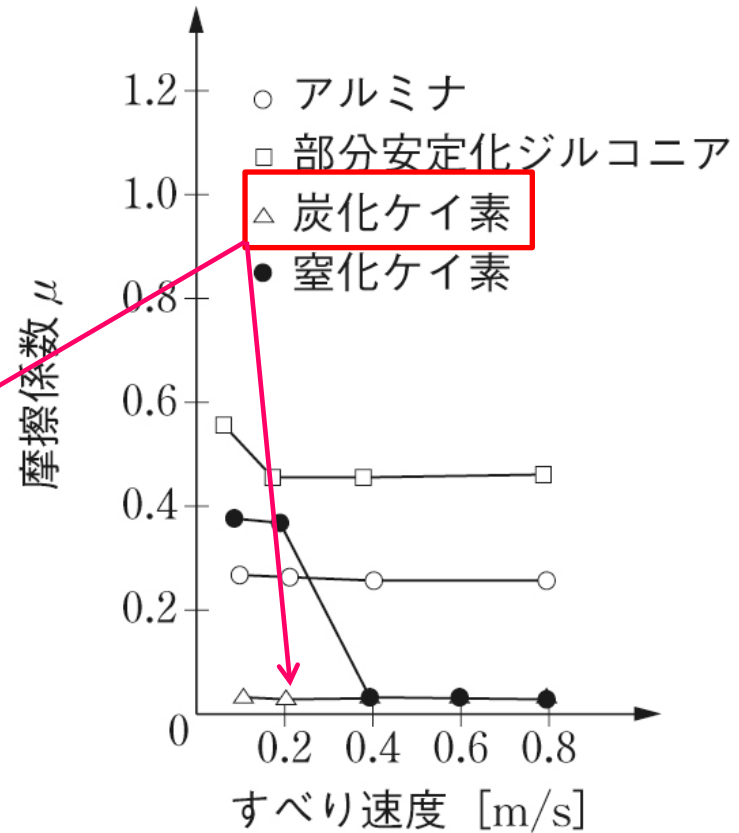
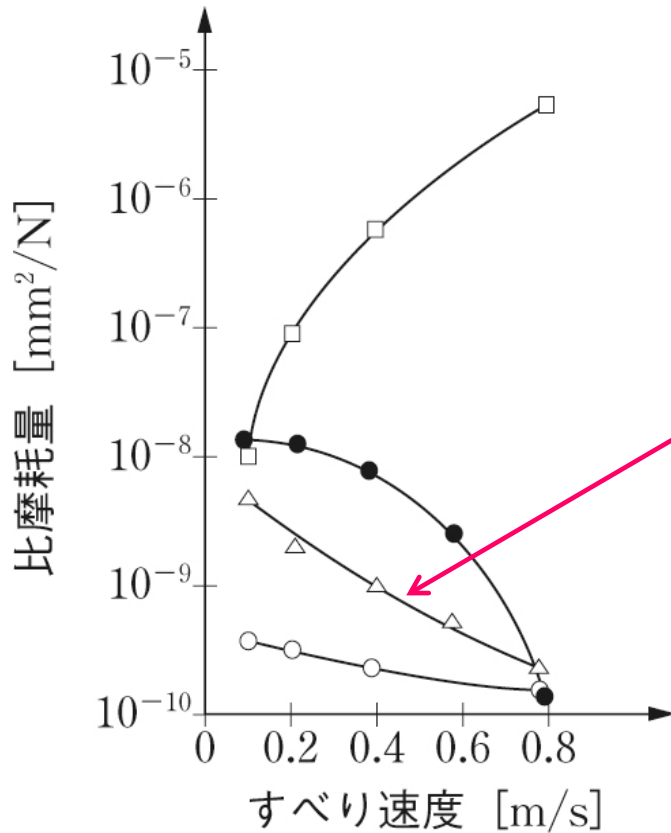
耐食性が高く焼結性も良い。そのため、大型の焼結体が**構造部材**や**摺動案内面材**として用いられている。ただし、機械的強度は他のセラミックスに劣るため、転がり軸受にはあまり使用されていない。切削工具には**硬質薄膜**として使用されている。また、3元アブレシブ摩耗対策として、**溶射膜**として使用されることも多い。

ジルコニア (Zr_2O)

多くはイットリア (Y_2O_3) を添加して破壊じん性を高めた**部分安定化ジルコニア (PSZ)**として用いられる。PSZは機械的強度が高く、緻密な構造と**機械加工性の良さ**から**平滑な表面が得やすい**などの利点がある一方で、熱伝導率が低いため、摩擦面温度が高くなり易いという欠点がある。部分安定化ジルコニアの相変態に起因する強度強化機構は、**高温では機能しない**だけでなく、水などの**極性分子の吸着**によって**応力腐食割れ**を引き起こす原因ともなる。そのため、ジルコニアの優れた摺動特性を生かすには、使用環境に十分な配慮が必要である。

炭化けい素 (SiC)

硬度が高く、高い熱伝導率と高温強度を持ち、耐食性に非常に優れることから、メカニカルシールやポンプ部品に多く使用されている。特に水潤滑下においては、非常に低い摩擦係数を示す。



水潤滑におけるトライボ特性

窒化けい素 (Si₃N₄)

高温における強度とじん性, および耐熱衝撃性に最も優れており, 耐食性や絶縁性も高い. 極低温のロケットエンジンから高温, 高速, 高真空などの極限環境で使用されるセラミック軸受には, 不可欠な材料となっている. 最近では, 風力発電用軸受などの電食対策として応用が広がっている.



オールセラミック
玉軸受

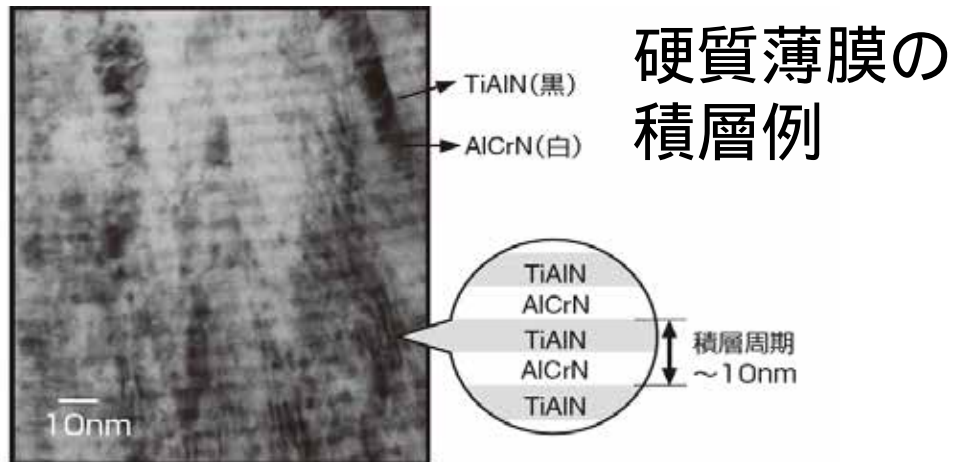
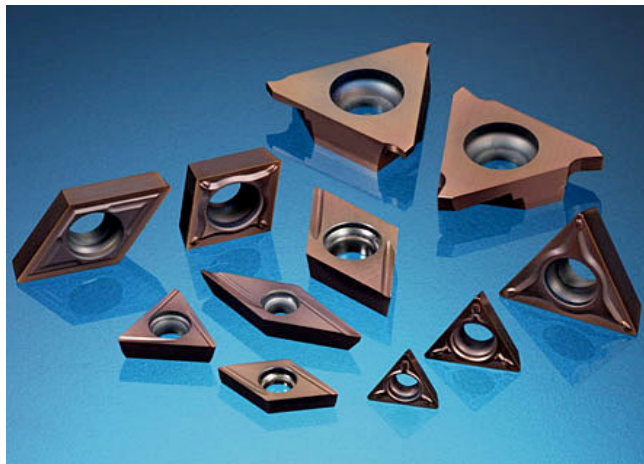


転動体だけが
セラミックの玉軸受
(このタイプが一般的)



サーメット (Cermets)

Ceramics (セラミックス) と **Met**al (金属) からの造語で、炭化物や窒化物などの**硬質セラミックス粒子**を**金属バインダー**で焼結した複合材料で、工具や金型などに広く使用されている。**タングステンカーバイド (WC)** をコバルト合金で焼結したものは特に**超硬合金**と呼ばれ、サーメットと区別されることもある。硬質粒子に、**炭化チタン (TiC)**、**炭窒化チタン (TiCN)**、炭化ニオブ (NbC)、炭化タンタル (TaC)、炭化モリブデン (MoC_2) など、金属バインダーにコバルト (Co) やニッケル (Ni) 合金を用いたものが使用されている。また、ダイヤモンドに次ぐ硬さを持つ**CBN (立方晶ホウ化窒素)** 焼結体は、切削工具として使用されている。



断面TEM観察による積層膜の構造

炭素系材料

ダイヤモンド

天然鉱物の中で**最も硬い材料**であり、人工合成ダイヤも含め工具や特殊な精密軸受材料として用いられている。ラップ加工においては、**砥粒として配合**されたダイヤモンドペーストがよく使用されている。

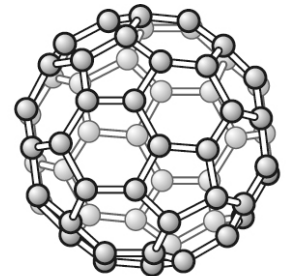
グラファイト

層状の結晶構造を有する固体潤滑剤を代表する材料である。導電性があることから、電気接点としてモータブラシやパンタグラフなどに利用されている。ただし、**325 以上**では酸化して炭酸ガスとなるため、**大気中高温下での使用には限界**がある。グラファイトの固体潤滑性は、雰囲気の水分子の影響を強く受ける。また、真空中では固体潤滑性が失われる。

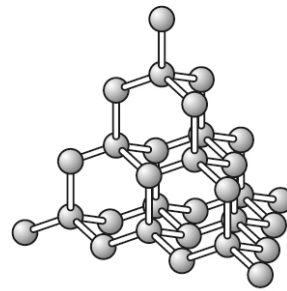
炭素同素体としてのフラーレン類

C_{60} 発見にはじまり、**ナノチューブ**や**グラフェン**などの新規物質の発見・合成へと研究が展開した。グラフェンは、**層状構造のグラファイトの1枚の層**からなる**2次元物質**で、特異的な電磁気特性など示すことで注目を集めている。**ナノチューブ**は、**このグラフェンシートが筒状になった構造**をしており、単層と多層のものをそれぞれSWNT(シングルウォールナノチューブ)、MWNT(マルチウォールナノチューブ)と呼んでいる。

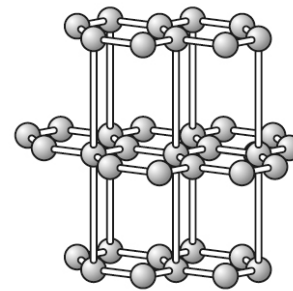
C_{60} は**直径7 nm**の**球状**をした分子であることから、発見当初より**究極のベアリング球**として潤滑剤への応用が注目されている。



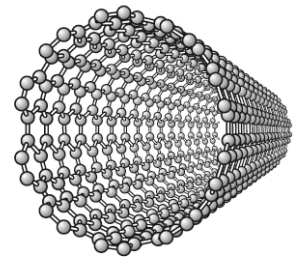
フラーレン (C_{60})



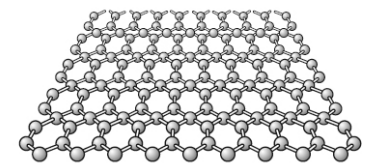
ダイヤモンド
(sp^3 混成軌道)



グラファイト
(sp^2 混成軌道)



ナノチューブ (SWNT)



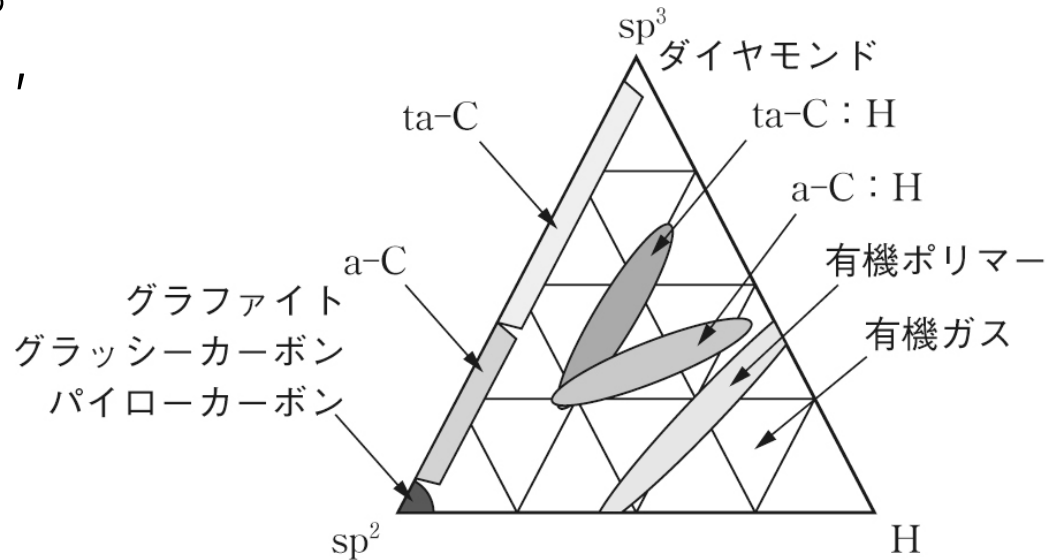
グラフェン

炭素同位体とその構造

DLC(ダイヤモンドライクカーボン)膜

DLC膜の優位性は、**硬さと平滑性**、そして**化学安定性**という、低摩擦かつ耐摩耗性を発揮し易い素質を有している点にある。DLC膜はダイヤモンド構造のSP3結合とグラファイトのSP2結合が混在した構造をしている大気中における低摩擦の原因は、**摩擦によって表面層がグラファイト化**し、これが固体潤滑効果を発現するためと考えられている。

また、水素雰囲気中では、最表面の炭素が水素終端されることにより、**超潤滑状態**が得られると言われている。



- ta-C テトラヘドラルアモルファスカーボン
- a-C アモルファスカーボン
- ta-C : H 水素化 ta-C
- a-C : H 水素化アモルファスカーボン

DLCの分類

C/Cコンポジット

炭素繊維とカーボンマトリックスから構成されている。

軽くて高温強度が高く耐摩耗性にも優れることから、航空機やスポーツカーのブレーキディスクや電車のパンタグラフすり板などに使用されている。



高分子材料

高分子材料のトライボマテリアルとしての特徴は、その**変形が粘弾性的**に起こることにある。そのため、**摩擦・摩耗特性には荷重ならびに速度依存性**があり、特に非晶質のゴムの場合には、**粘弾性の影響**が顕著に現れる。

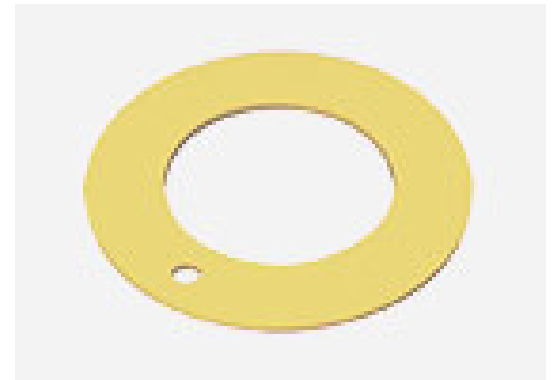
代表的な高分子材料



分類		材料
プラスチック	汎用プラスチック	熱可塑性 ポリプロピレン (PP) ポリエチレン (PE)
		熱硬化性 フェノール樹脂 (PF) ジアリルフタレート (DAP)
	エンジニアリングプラスチック	熱可塑性 ポリアセタール (POM) ポリアミド (PA) ポリエチレンテレフタレート (PET) ポリブチレンテレフタレート (PBT) ポリフェニレンエーテル (PPE) ポリカーボネート (PC) 超高分子量ポリエチレン (UHMWPE)
		熱硬化性 エポキシ樹脂 (EP)
	スーパーエンジニアリングプラスチック	熱可塑性 熱硬化性 ポリフェニレンサルファイド (PPS) ポリイミド (PI) ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) ポリエーテルサルフォン (PES) ポリアミドイミド (PAI) ポリアリレート (PAR) 四フッ化エチレン (PTFE) ポリフッカビニリデン (PVDF) 液晶ポリエステル (LCP) ポリベンゾイミダゾール (PBI)
	ゴム	天然 (NR) クロロプレン (CR) ニトリル (NBR) エチレンプロピレン (EPDM) ブチル (IIR) ウレタン (U) フッ素 (FKM) シリコーン (VMQ)
繊維	POM UHMWPE PPS PAR PEEK アラミド	

プラスチック

熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂に分類され、耐熱温度が100以上で引っ張り強度49MPa未満、曲げ弾性率2.5GPa未満のものをエンジニアリングプラスチック(エンプラ)、さらに耐熱温度が150以上のものをスーパーエンジニアリングプラスチック(スーパーエンプラ)と呼んでいる。



熱可塑性樹脂

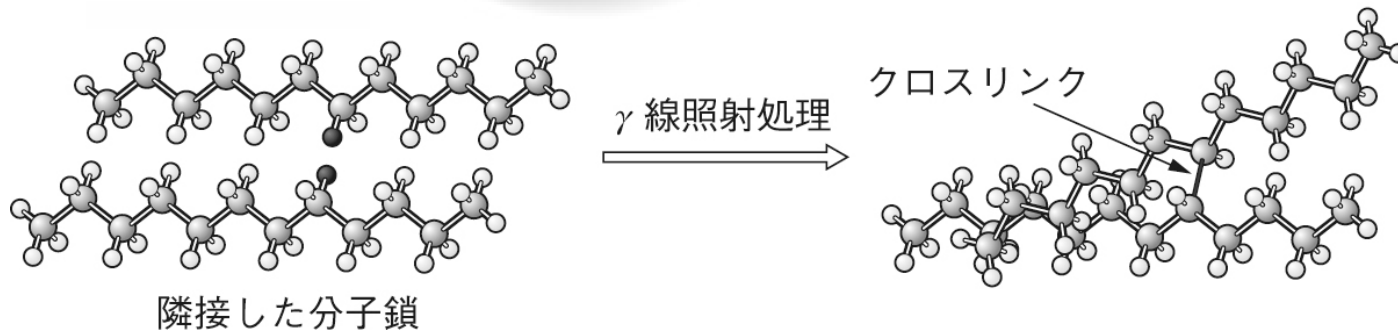
成形性が良く、代表的なものとしては**ポリアセタール(POM)**、**ポリアミド(PA)**、**ポリブチレンテレフタレート(BBT)**などが広く使用されている。POMは、成形性、機械的強度、寸法安定性、耐摩耗性などに優れるため単独で用いられることもあるが、強度や潤滑性を向上するために、ウレタンとのポリマーアロイ化や含油化して用いる場合も多い。**ナイロン**という名称で知られるPAは、強度や耐摩耗性に優れるが、**吸湿性と熱膨張率に難がある**ので、使用に際しては注意が必要である。

テフロン

四フッ化エチレン(PTFE)は、**自己潤滑性と耐薬品性**に優れるとともに、 $-250 \sim 280$ までの広い温度範囲で使用することができる。**耐クリープ性に劣る**ため、強化材と複合化したものがシールや軸受に使用されるほか、固体潤滑剤として他のプラスチックなどに分散して用いられる場合もある。

ポリエチレン(PE)類

結晶性と密度の高い**高密度ポリエチレン(HDPE)**の中でも、摩擦特性と耐摩耗性に優れる分子量が数百万の**超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)**が、食品機械や**人工関節**などに使用されている。尚、人工股関節用ソケットには、耐摩耗性をさらに改善するため、 γ 線照射処理により架橋レベルを向上させた**クロスリンク(網目構造)・ポリエチレン**が使用されている。



高温, 高荷重, 高速などの厳しい摺動条件下での用途には, スーパーエンブラの**ポリフェニレンサルファイド (PPS)** や **ポリエーテルテールケトン (PEEK)**, **ポリエーテルサルフォン (PES)**, **ポリアミドイミド (PAI)**, **ポリイミド (PI)** などが使用されている. 耐熱性の点では, PAIとPEEKが約250, PIが約300 までの高温環境下で連続使用が可能である. さらに高温での使用には, 荷重たわみ温度435, ガラス転移温度が427 という優れた耐熱性を有する**ポリベンゾイミダゾール (PBI)** が用いられる.

熱硬化性樹脂

フェノール樹脂 (PF) がブレーキや摩擦材として広く使用されている. フェノール樹脂は, 水中での摺動特性に優れることから, **水中軸受** などにも多く使用されている. 耐熱性が要求される場合には, **ジアリルフタレート樹脂 (DAP)** などが用いられる. 固体潤滑剤のマトリックス材として, **エポキシ樹脂** が使用されることもある.