

抄錄: 對汽車用的油耗改善要求越來越高，特別是在 power chain 方面，因直噴化和 Hybrid system 而使能源效率大幅提高。未來在改善 power chain 效率至極限上，加上系統改良，摩擦低減這個最終角色就顯得非常重要。在這裡以引擎為例，介紹摩擦低減材料技術的例子，並解說對於汽車油耗改善之最近的材料技術動向。

1. 前言

近年來，對於因 CO₂ 排放而使地球暖化的環境關懷增加，且為了因應石油資源的耗費抑制，汽車用的油耗改善要求也日漸提高。對於汽車油耗改善，雖有改善 power chain 效率、車輛輕量化及行走抵抗低減等對策，但在 power chain 上，出現了因直噴化和 Hybrid system 等方法而讓能源效率大幅提高的系統。這些改善效率的要素，雖是因 pumping 損失低減與 lean burn 燃燒區域擴大，但未來在改善 power chain 效率至極限上，加上系統改良，摩擦低減這個最終角色就顯得非常重要。在材料技術分野上，雖然自古以來都以終極的摩擦損失低減化為目標而陸續開發了各種低摩擦化技術，但這裡將舉出以引擎為例的幾個摩擦低減材料技術，且說明最近的材料技術動向。

2. 引擎的摩擦低減技術

圖一是引擎各滑動部上由 motor ring 法所求出的摩擦低減和附件類工作結果。如圖一所示，在高轉速區的摩擦損失中，活塞環、活塞和連桿的摩擦佔全部的比例很高，而低轉速區，閥系(cam follower)的摩擦佔全部比例也變大。活塞/活塞環部的摩擦隨引擎轉速上升而增加，如果扣除 pumping loss 的話，引擎摩擦損失佔全部的 40~50%。閥系在使用頻率高的低轉速區中，佔全部的 20~30%，且對於引擎時用轉數區內的油耗有很大影響。

在引擎油耗改善上，上述各部份的摩擦低減是必須的。如果要概說其對策的話，(1)摩擦係數低減(2)摩擦部的重量負荷低減(3)滑動部面積低減(4)為低減黏性抵抗的 oil 低黏度化(5)從滑動摩擦到翻轉摩擦的轉換等開始計畫。表一中統整了各滑動部分採用的，也就是檢討的技術。例如，如果將計畫各部份摩擦低減的引擎摩擦減半的話，油耗約可改善 10%左右。近年來，在引擎方面，採用如表一中的數個技術後，在 3L class 的 V6 引擎上，如圖二所示，在使用轉數全區域內，低減了 10~15%的摩擦。

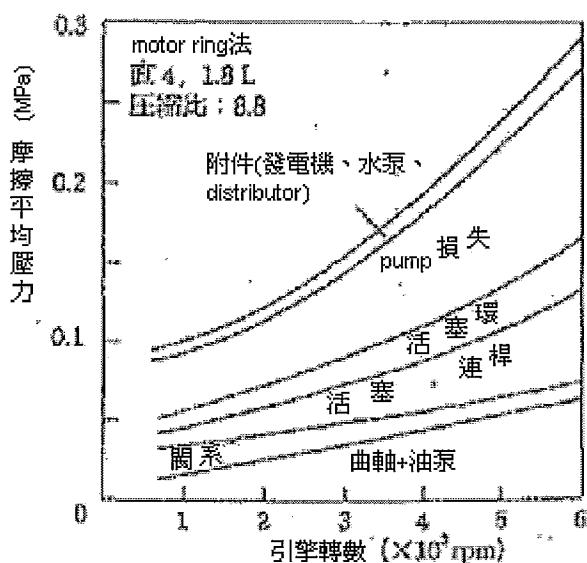


圖-1 汽油引擎各部品的摩擦損失
Fig.1 Contributions of some components to total friction losses in gasoline engine

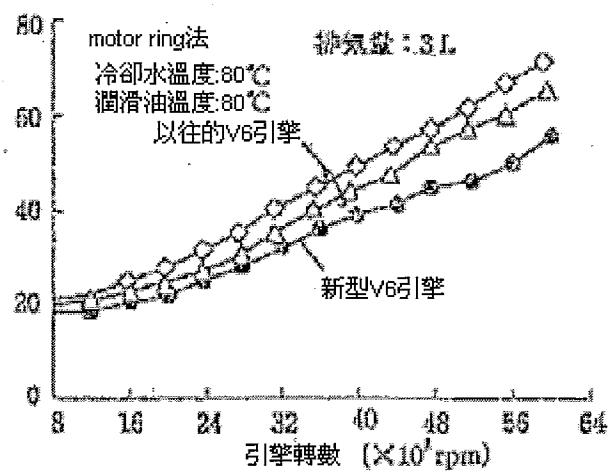


圖-2 V6引擎的摩擦低減效果
Fig.2 Effect of some applications on friction reduction in V6 engine

材料技術主要可分為依油、表面形狀和表面處理等適用於低減摩擦的低摩擦材料，和以適用於部品輕量化而低減賦予滑動部重量為目的的高強度材料和輕合金材料，以及適用於以接觸面積低減為目的的高面壓材料三種。接下來的段落，將解說各部位採用，也就是檢討的材料技術。

2.1 活塞、活塞環和 cylinder bore 間的低摩擦化。

因為燃燒壓力、thrust 力和速度是時時刻刻都在變化且重複滑動的，所以活塞、活塞環和 bore 間的潤滑狀態很複雜。因為油膜狀態，使流體潤滑和境界潤滑的狀況存在，而其比例也經常變化。此外，因冷啟動時等各種運轉條件，維持低摩擦是必要的。以低減摩擦係數為目的，現在將報告在 piston skirt 部上實施 coating 固體潤滑劑的例子。固體潤滑皮膜是將二硫化 Mylybdan、graphite 和 PTFE(polytetrafluoroethylene)等成分用耐熱及耐藥性佳的有機系 binder(polyamide-imide)，覆蓋在 piston skirt 部上。除了固體潤滑效果外，也因為以初期的親和性改善及伴隨因滑動面平滑化所造成的摩擦低減為目標，在引擎 fire ring 試驗上，對於無處理的活塞，可低減約 10%的摩擦。

①閥系②活塞系③曲軸系

目標	部品	選用技術
(1)摩擦係數低減	① Cam shaft	Cam 面的最後加工
	Lift shim	TiN, CrN DLC 的最後加工
	② Piston	Piston skirt 向的二硫化鉬 coat
		Piston skirt 向的 dimple 加工
	③ Crank shaft	曲軸的最後加工
	- Engine oil	添加 MoDTC 添加劑
(2)摩擦部負荷重量低減	① Lifter 輕量化	輕合金 lifter 材料選用
	閥輕量化	Ti 合金製閥
	Spring 輕量化	高強度 spring
	② Piston ring 低張力	低張力 ring, 兩根 ring
		輕量化 piston
	③ 連桿輕量化	高強度連桿
(3)滑動面積低減	① Piston skirt 面積低減	耐高面壓表面處理，表面性質形狀
	② Crank 細軸化 Crank 軸承狹化	耐高面壓軸承材料
(4)黏性抵抗低減	- Engine oil	低黏度化(5W-30→5W-20→0W-20)
(5)從滑動摩擦到翻轉摩擦的轉換	① Locker arm	選用翻轉 follower(needle bearing)

表-1 引擎各部位的摩擦低減化技術

Table 1 Items for reducing engine friction losses

此外，因為將改善此皮膜處理的耐燒性及磨耗性，所以可期望 skirt 部的面積低減。雖然以鋁合金 bore 的摩擦低減和改善耐磨耗性為目標，也有在 piston skirt 部上選用稱為

DLC(Diamond Like Carbon)的有固體潤滑性的硬質碳系蓋膜，並且檢討其事例之大氣中的 pin/disk 摩擦實驗，但這裡將報告與 A390disk 組合且與以往材料的鑄鐵相比之 DLC 膜的摩擦低減效果。因為跟母材的密封性和膜硬度很高，所以維持形成後皮膜的同時，也可發揮摩擦特性。

最近因為 shot peening 加工，在 piston skirt 部加上很多 micro order 的 dimple，可低減 30%以上的 piston 滑動抵抗，並且，在引擎單體部分能夠得到低減摩擦 2%以上的效果。現在將報告這些加附在 piston skirt 條痕加工後的 dimple，且殘存了數 μm 的深度的摩擦低減和改善耐燒性等。在汽車以外的各種零件上試驗，像這樣在表面賦予細微形狀且與表面粗度改善相結合的方式，可考量為未來的一個方向。

2.2 曲軸的低摩擦化

因為一般曲軸和連桿軸承的主體都是流體潤滑，因此接觸面積低減、oil 黏度和滑動速度低減都是有效的。雖然要低減滑動面積及滑動速度可以用曲軸細軸化和軸承範圍狹化來實現，但相反地，恐怕也會發生軸承面壓上升、燒付和疲勞磨耗等問題。因此，加入用來抑制慣性力的連桿和活塞輕量化來開發使用在耐高面壓的軸承材料是必要的。雖然在歐洲也有將 Al-Sn 的 sputter overlay 實用化的例子，但無法實用到成本面。如果能使用耐面壓超過 100Mpa 的便宜軸承材料，就可再更加期待低減曲軸徑和其範圍了。

2.3 閥系的低摩擦化

因為引擎閥系和 cam follower 機構方面，與其他的滑動部位相比，摩擦條件是非常嚴格的，所以漸漸在開發與採用以磨耗性改善為目標的各種材料。閥系大部分的摩擦，都是因凸輪與 follower(shim)間的翻轉/滑動而來。作為摩擦低減的一個對策，spring 重量低減是有效的。Ti 合金製閥、鋁 lifter 和高強度 spring 材料使用而使往復運動零件輕量化，與從前相比，spring 重量可能可以低減 20%以上，且藉由負荷重量低減，可實現與其相應的摩擦力低減。未來，因高強度的輕合金和樹脂零件等適用擴大，應該能夠看見更加輕量化的結果。

另一個對策將敘述關於摩擦係數低減。凸

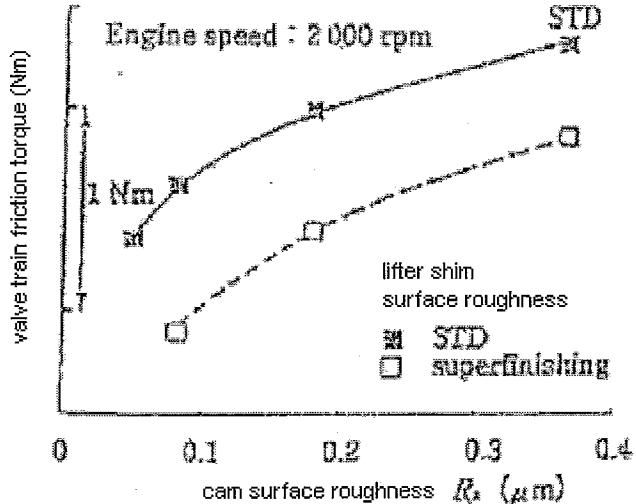


圖 3 表面粗度和道閥系摩擦扭力
Fig.3 Surface roughness vs. friction torque in valve train

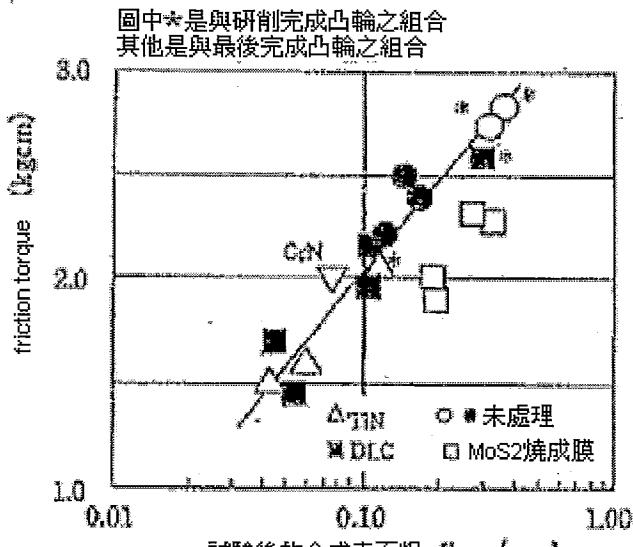


圖 4 試驗後的合成表面粗 R_{rms} (μm)
Fig.4 Effect of surface coatings on friction torque in cam/follower

輪和 follower 間計算上的油膜厚，在低轉速區域內是 $10 \mu\text{m}$ 以下，與表面粗度相比，會變成非常小的值。特別是無法形成計算上油膜的狀況，可得知會產生某回轉角度。因此，凸輪和 follower 間的潤滑狀態變成由境界潤滑來支配，且因抑制此境界潤滑發生，也可低減凸輪和 follower 間的摩擦。在縮小境界潤滑區域比例方面，將凸輪和 follower 的表面粗度縮小，並且將油膜厚度及表面粗度的比，也就是 λ 值放大是有效的。在實際的引擎凸輪軸上實施最後加工，且測量表面粗度與引擎閥系摩擦扭力關係的結果如圖 3 所示。如圖，如果凸輪的表面粗度變為 $R_a 0.15 \mu\text{m}$ 以下，可得知其摩擦扭力比以往與研削加工完成結合後的摩擦扭力大幅減少。此外，也可得知 follower(shim)的表面粗度，同樣地對於摩擦低減也是有效的。近年來，因為此表面粗度改善，使摩擦低減更向前一步，且開始選用 TiN 和 CrN 等採用工具和金屬鑄造的 PVD 表面處理硬質薄膜於 follower 上。圖 4 表示在引擎 oil 中用單體 cam follower 試驗機量測 TiN、CrN、DLC 和二硫化鉬燒成膜在浸碳鋼圓板上 coating 後的 follower 和凸輪間的摩擦結果。關於硬質薄膜 TiN、CrN 和 DLC，表示摩擦扭力與滑動表面粗度的良好相關，且表示與無處理物相比的低摩擦特性。這些薄膜，因為優越的耐磨耗性，可維持也就是改善滑動表面平滑性，並發揮摩擦低減的效果。另一方面，對於固體潤滑劑二硫化鉬 coating，因為表示彼此相關線更低的值，因此可認為膜的耐磨耗性不足，且表示了材料的固體潤滑性。

因此，雖然可認為在有固體潤滑性之 DLC 膜的產生潤滑分離部分也能得到低 friction，但如圖 5 的潤滑油中與 TiN 和 CrN 膜相同，可認為是無法確實將此固體潤滑效果充分利用。在 DLC 膜方面，雖是在充滿氮氣的環境中滑動，但這裡將報告摩擦係數 $\mu = 0.001$ 以下的軸承排列之下的低摩擦碳素膜之開發例子，並可期待實現在中等潤滑油中的低摩擦性能。為了在潤滑油中產生低摩擦性能的效果，嘗試如圖 6 所示，在 DLC 膜中添加金屬及

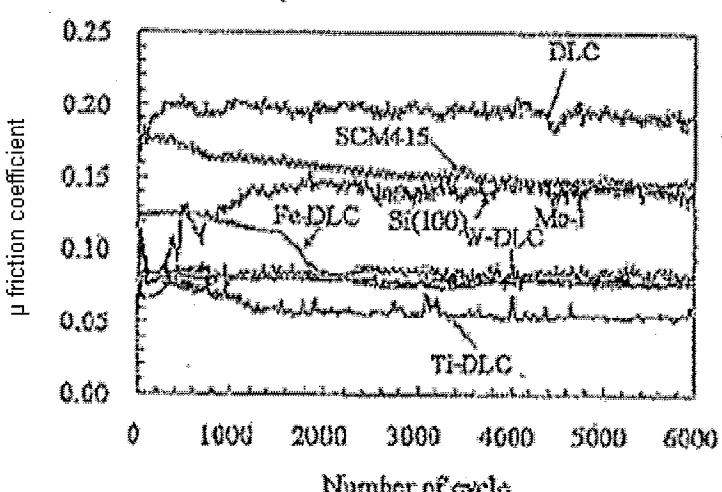


圖 6 在 DLC 膜中金屬添加的摩擦特性所及之影響
Fig.6 Influence of metal addition on friction characteristics of DLC film

元素等改良。作為以後摩擦低減表面處理材料技術的方向之一，雖然在其他產業部品上的選用，是以廣泛及便宜為前提，但大家認為會從 TiN、CrN 等 PVD 硬質薄膜轉移成以 DLC 膜為代表的固體潤滑性超硬質、超低摩擦碳素膜。

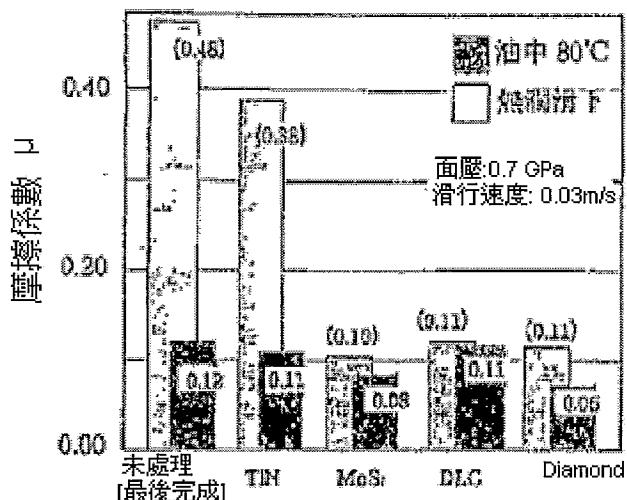


圖 5 各表面處理潤滑油中的摩擦係數

Fig.5 Friction coefficient of some coatings under lubricated condition

比後顯示，FM 劑的 MoDTP 是 Dialkyl thiophosphoric 酸鉬，MoDTC 是 Dialkyl dithiocarbamate 酸鉬。伴隨三種 FM，摩擦扭力大幅低減，引擎轉速越低就越明顯。此結果中，當引擎轉速變低時，會如圖 1 所示，境界潤滑佔了大部分的支配性潤滑，因此可對應 FM 添加劑的顯著效果。從此效果中可得知，添加劑 MoDTC 在滑動面上，因摩擦化學反應而形成固體潤滑劑成份之二硫化鉬。今後將會以新的 FM 劑之良好組合使其成為更低黏度化為開發方向，且計劃改善與其相應的各滑動部位之精度、表面性狀及耐磨耗性等是必要的。

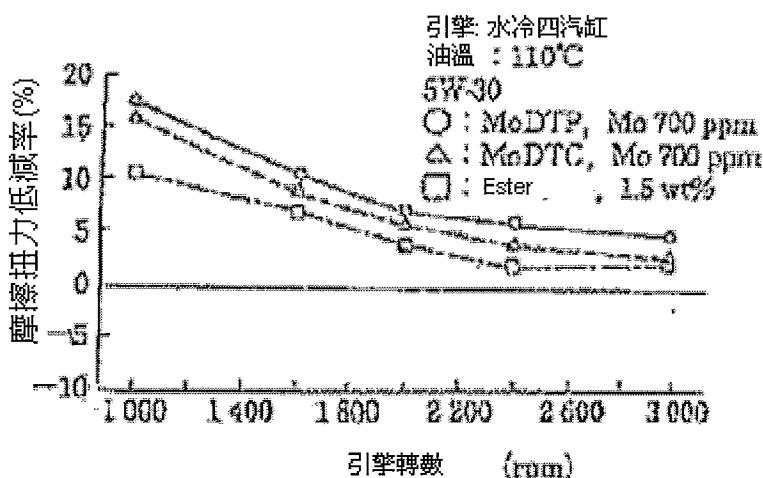


圖 7 OIL FM 添加劑的引擎摩擦低減效果

Fig.7 Effect of oil FM additives on engine friction

3. 總結

如以上說明，支持引擎摩擦低減的材料技術雖是以高強度材料及輕量材料為方法的輕量化技術、耐高面壓化及低摩擦材料技術為主，但特別報告了著眼在耐高面壓化及低摩擦化技術上的表面形狀和表面處理之新例。在精密表面加工技術和表面處理技術方面，大

2.4 省油 oil 的低摩擦化

汽油引擎用省油 oil 的摩擦低減是因 oil 黏度下降(5W-30→5W-20)和黏性抵抗低減，所以在流體潤滑區域摩擦下降的同時，因添加摩擦調整劑 FM，且在滑動表面有摩擦化學反應，而形成固體潤滑既成份的被膜。藉此現象及境界潤滑區域的摩擦下降，兩者能夠相互作用而發揮效果。圖 7 是在 5W-30 oil 中添加 FM 後調查其摩擦低減效果之結果。將摩擦扭力低減率和 FM 劑無添加的 5W-30 oil 相

幅地改善性能及成本兩者皆成立，應為日後受注目的技術動向。此外，也能夠認為，因潤滑油的組合材料而造成的效果很大，且這些材料技術的組合是非常重要的。這些技術並不止於引擎的低摩擦化，也可能應用在其他部品上。日後將持續致力於終極的低摩擦化目標技術開發，且與汽車效率改善相結合。