

實現高功率密度軸向磁通馬達之先進軟磁複合材料技術

High Power Density Axial Flux Motors Enabled by Advanced Soft Magnetic Composite Technology

齋藤達哉 T. Saito¹、上野友之 T. Ueno²
住友電工燒結合金株式會社 ¹首席工程師、²室長

摘要/Abstract

隨著移動載具、產業設備及工具機之電動化持續發展，搭載於上述設備中的馬達與功率電子產品，對於高性能、高效率及低成本化的需求日益提升。本公司利用粉末冶金技術，已量產具備複雜三維幾何形狀之軟磁複合材料(Soft Magnetic Composite; SMC)超過二十年，並從材料與製程兩方面持續提升其性能與附加價值。藉由此技術，可實現傳統電磁鋼板難以達成之三維磁路設計，進而提供新一代馬達設計的可能性。此外，本公司已成功實用化可提升馬達轉矩之雙凸緣一體成形磁心，以及可同時提升線圈填充率與散熱性能之超薄絕緣塗層磁心。運用上述SMC技術，本公司開發出高功率密度軸向磁通馬達(Axial Flux Motor; AFM)，並已開始量產1 kW以下之小型AFM產品。在車用驅動馬達等級方面，透過75 kW級AFM之電磁設計，實現了最高12.6 kW/kg之功率密度。所開發之AFM特別適用於小型移動載具、AGV/AMR、自主移動機器人、Physical AI機器人，以及AI資料中心冷卻風扇與冷卻幫浦等受安裝空間限制之應用，可有效提升設備之小型化、高輸出化及附加價值。此外，SMC相較於傳統電磁鋼板可大幅降低製造過程中的CO₂排放量，並具備水平回收再利用能力，因此被視為兼顧高性能馬達與永續製造的重要磁性材料。

As electrification advances across mobility, industrial equipment, and machine tools, motors and power electronic products are increasingly required to deliver higher performance, greater energy efficiency, and lower cost. For more than 20 years, we have mass-produced soft magnetic composite (SMC) cores capable of complex three-dimensional geometries and continuously enhanced their performance and added value through material and process innovations. These capabilities enable three-dimensional magnetic circuits and motor designs that are difficult to realize with laminated electrical steel. We have also commercialized one-piece tooth-tip integrated cores for higher torque and ultrathin insulating coatings that improve coil fill factor and heat dissipation. Using these SMC technologies, we developed high-power-density axial flux motors (AFMs) and started mass production of compact models below 1 kW. For traction applications, a 75 kW-class AFM design achieved a calculated electromagnetic power density of 12.6 kW/kg. The developed AFMs can contribute to compact, high-output, and high-value products for compact mobility, AGVs/AMRs, physical AI robots, and cooling pumps and fans for AI data centers. In addition, SMC cores have lower manufacturing CO₂ emissions than electrical steel and support closed-loop recycling, contributing to both high-performance motors and sustainable manufacturing.

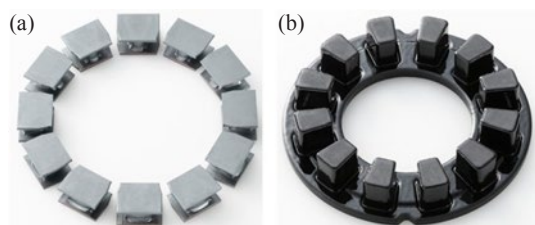
關鍵字/Keywords

軟磁複合材料(Soft Magnetic Composites)、超薄絕緣塗層(Thin-Film Insulating Coating)、軸向磁通馬達(Axial Flux Motor)、薄型高轉矩(Half Height and High Torque)

前言

馬達是一種能夠將電能高效率轉換為機械動力的裝置，其需求持續成長。現今，各類馬達被認為已占全球總用電量的一半以上，並已廣泛應用於汽車、二輪載具等移動設備，以及產業機械、工具機等多元應用領域。因此，針對馬達高效率化、小型化與輕量化之研究開發日益活躍。此外，在功率電子領域中，用於電壓轉換及整流之電抗器(Reactor)亦廣泛應用於油電混合車升壓轉換器以及資料中心等場合。從降低能源消耗的角度來看，其高效率化同樣十分重要。本公司長期致力於開發高性能軟磁複合材料(Soft Magnetic Composite; SMC)及其成形技術與附加價值技術，作為馬達與電抗器鐵心材料。藉由將SMC應用於可充分發揮其特性的軸向磁通馬達(Axial Flux Motor; AFM)，已成功驗證薄型馬達之性能提升效果⁽¹⁾。近年來，雙凸緣(Tooth-Tip) SMC磁心已開始量產應用於空氣清淨機用雙轉子型AFM^(2, 3, 4)；此外，具有約40~50 μm 超薄高耐壓絕緣塗層之SMC磁心亦已量產應用於高附加價值民生產品，顯示相關技術已逐步實現產業化(圖一)。

此外，本公司利用SMC開發出較傳統徑向磁通馬達(Radial Flux Motor; RFM)更薄型且高輸出的AFM，並已開始量產部分1 kW等級



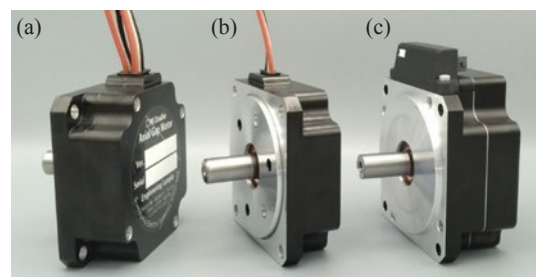
▲圖一 已開始量產之馬達用軟磁複合材料磁心，(a)雙凸緣一體成形磁心；(b)超薄絕緣塗層磁心

產品。同時，為加速AFM於各產業的普及，本公司亦建立AFM評估平台供客戶進行驗證(圖二)。另一方面，在相同規格及相同磁體重量的設計條件下，比較75 kW級驅動用AFM之結果顯示，雙定子結構(Dual Stator Structure; DSSR)較雙轉子結構(YASA型)輕量化17%，其電磁系統功率密度可達12.6 kW/kg。此外，SMC於製造過程中的CO₂排放量約僅為一般電磁鋼板的四分之一，並具備水平循環回收能力。本論文將介紹本公司在上述領域之最新技術成果。

軟磁複合材料之最新開發現況

以下將介紹促成SMC量產導入之本公司核心技術。首先，雙凸緣一體成形磁心的技術特徵，在於能夠利用單次模具壓製成形工藝，實現齒部(Tooth)兩端具有凸緣之複雜幾何結構。此類磁心的優勢在於，透過凸緣結構可增加轉子與定子之有效對向面積，進而提升馬達轉矩。此外，相較於電磁鋼板鐵心，SMC可形成更平滑之繞線槽幾何形狀，有助於縮短線圈平均長度，從而降低銅損及銅線使用成本。

其次，超薄高耐壓絕緣塗層磁心的優勢在於，其絕緣層厚度較傳統的絕緣紙或樹脂



▲圖二 AFM評估平台，(a)額定輸出功率500 W (1.6 N·m/3,000 rpm)；(b)額定輸出功率300 W (1.0 N·m/3,000 rpm)；(c)機電一體參考樣品(額定輸出功率250 W)

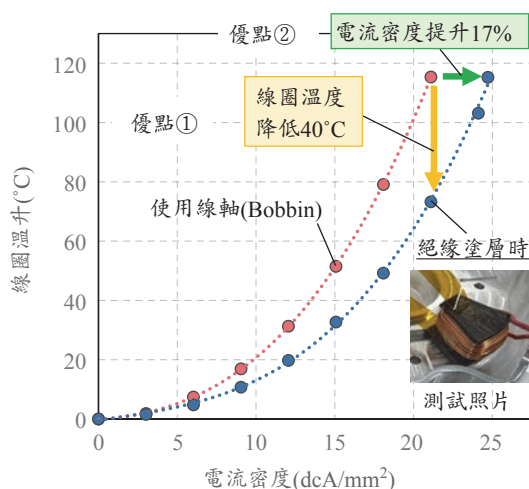
線軸(Bobbin)小一個數量級，因此能有效擴大繞線空間，提高線圈填充率。此外，線圈運轉時產生的熱量亦可透過絕緣塗層高效率傳導至SMC磁心，提高散熱能力。以相同形狀之SMC磁心製作試樣，分別採用絕緣塗層與樹脂Bobbin結構，在相同繞線規格下比較線圈溫升。結果顯示，採用絕緣塗層之磁心可顯著降低線圈溫度(圖三)，因此亦有助於提升線圈之長期可靠性。

根據本公司在馬達設計方面累積之經驗，在部分AFM設計條件下，磁心透磁率對馬達轉矩特性的影響相對有限⁽⁵⁾。因此，本公司著重於兼顧低鐵損與成本效益，目前已建立從標準級HB1到低鐵損級HB6等多種材料等級，可對應不同應用需求。此外，所有材料特性資料均已內建於電磁模擬軟體JMAG[®]，可供馬達設計與電磁分析使用。為進一步推廣AFM技術，本公司亦開始提供自行設計與開發之AFM用模具成形磁心，使馬達開發者能夠快速進行AFM試作與性能驗證(圖四)。

軸向磁通馬達(AFM)之最新開發現況

1. AFM評估平台

AFM評估平台(AFM Evaluation Platform)之所以受到廣泛關注，其中一項重要原因在於其特別適合應用於薄型馬達的高功率密度設計。因此，本公司開發了AFM評估平台，目的是讓使用者能夠將AFM直接整合至其設備中，進而評估AFM所帶來的效益。相較於市售之薄型徑向磁通馬達(Radial Flux Motor; RFM)，本評估平台在相同框架尺寸及相同輸出功率條件下，可實現約一半的軸向厚度。過去多數AFM與RFM之比較，主要聚焦於電磁系統本身；然而，本平台則從馬達整體結



▲圖三 絕緣塗層對線圈溫升之改善效果

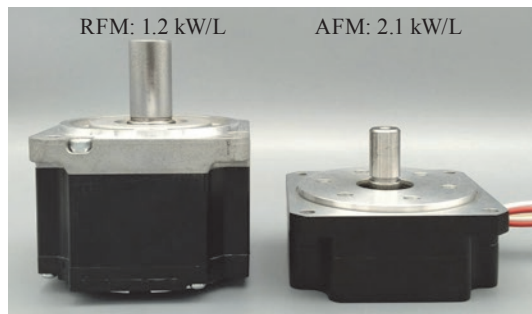
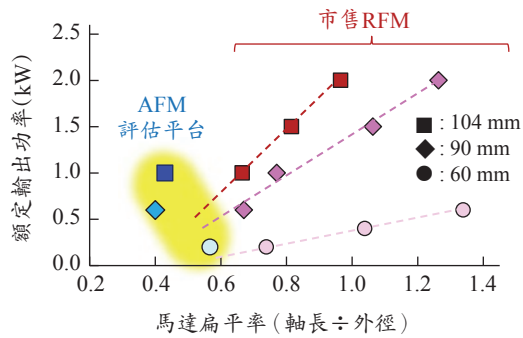
預估額定輸出功率	100 W	200 W	400 W	600 W
磁心形狀				
磁心尺寸(mm)	Φ42-57-9t	Φ49-57-9.9t	Φ71-45-13.6t	Φ75-42-10.5t
最大磁心高度(mm)	15t	16.5t	16.7t	18.7t
繞線後外徑(mm)	Φ49	Φ54	Φ78	Φ85
預估額定輸出功率	1,000 W	1,000 W	1,200 W	
磁心形狀				
磁心尺寸(mm)	Φ82-45-15.6t	Φ98-41-17.8t	Φ98-41-17.8t	
最大磁心高度(mm)	※15.6t	20t	※17.8t	
繞線後外徑(mm)	Φ90	Φ110	Φ110/Φ41	

▲圖四 本公司自主設計之AFM模具成形磁心

構出發，在設計階段同時考量小型化與散熱性能。透過採用本公司開發之薄膜絕緣塗層技術與特殊形狀SMC磁心，成功實現圖五所示之尺寸與輸出性能。上述成果顯示，本公司透過磁心與馬達之整體最佳化設計，可有效提升AFM性能，進而促進各類搭載設備之高附加價值化。

2. 高功率密度驅動馬達之開發

目前AFM中較常採用之結構為雙轉子型(Dual Rotor Structure)，亦即廣泛稱為YASA



▲圖五 相同框架尺寸與相同輸出功率條件下之市售RFM與AFM評估平台比較

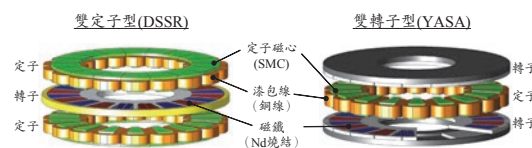
型之架構。由於其磁心形狀相對簡單，即使使用電磁鋼板亦可製造，因此已被廣泛應用於AFM設計。另一方面，從機械結構設計與散熱性能的角度來看，雙定子型(Dual Stator Structure; DSSR)則具有明顯優勢。因此，為了釐清兩種結構在高功率密度化方面之適性，本研究在相同規格條件下進行最佳化設計，並進行比較分析⁽⁶⁾。

表一與圖六顯示比較所採用之設計規格與馬達結構。在相同外形尺寸與輸出功率限制下，分別對YASA型與DSSR型進行最佳化設計，並比較其功率密度。為確保比較公平，兩種馬達所使用之磁鐵重量均設定為相同。

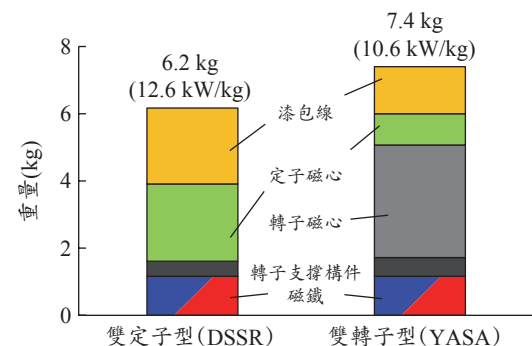
圖七顯示兩種設計馬達之重量比較結果。DSSR型總重量為6.2 kg，而YASA型為7.4 kg，DSSR型比YASA型輕約17%。因此，就電磁系統重量而言，DSSR型之功率密度可

▼表一 高功率密度AFM設計規格

最大輸出功率	75 kW
最大轉矩	143 Nm
最高轉速	10,000 rpm
基底轉速	5,000 rpm
DC母線電壓	550 V
最大逆變器電流	153.2 A rms
外徑	224.8 mm
軸向長度	46.5 mm

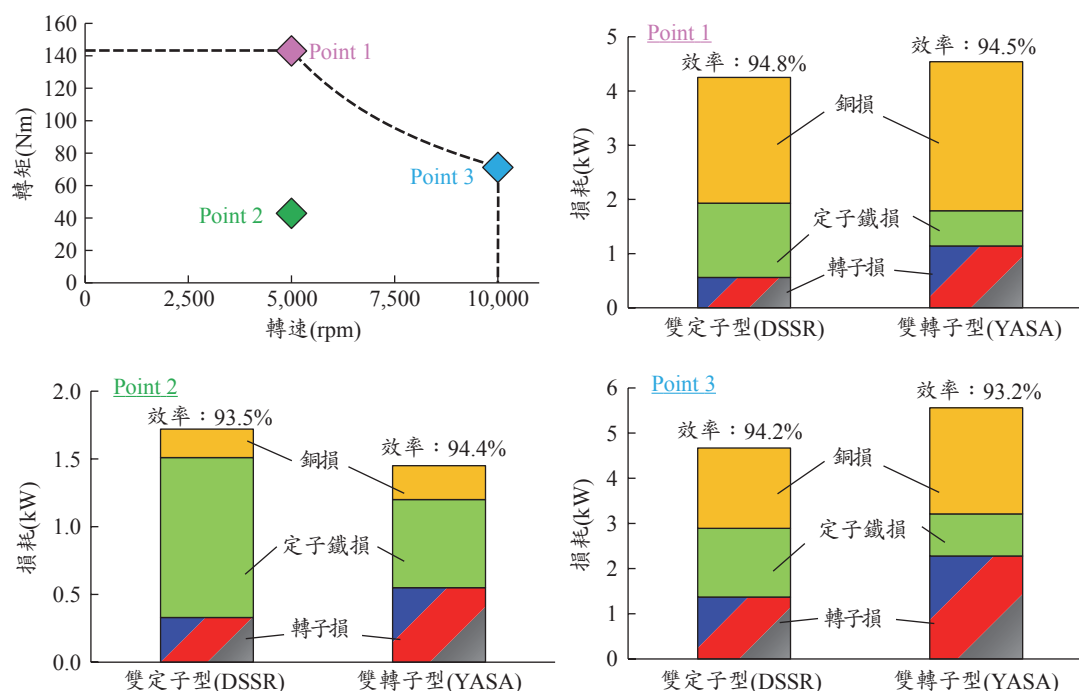


▲圖六 高功率密度AFM結構



▲圖七 高功率密度AFM重量與功率密度比較

達12.6 kW/kg，而YASA型則為10.6 kW/kg。此外，各主要運轉點之損失與效率比較結果如圖八所示。在基底轉速與輕負載區域(Point 1)，YASA型效率略高；然而在最大轉矩運轉點(Point 2)及最高轉速/最大輸出運轉點(Point 3)，則以DSSR型展現較佳效率表現。此現象主要來自於兩種結構之損失分佈差異。YASA型因定子磁心重量較小，因此在鐵損占比較高的輕負載區域具有優勢；而DSSR型則能於高輸出區域有效抑制銅損及轉子損，因此整



▲圖八 高功率密度AFM各運轉點之損失與效率比較

體效率較高。

此外，YASA型由於定子與馬達殼體之接觸面積較小，因此冷卻設計較具挑戰性。相較之下，DSSR型可使兩側定子鐵心與馬達殼體形成較大的接觸面積，因此能更有效地冷卻溫升最顯著之線圈。再者，DSSR型於高輸出區域具有較高效率，因此可擴展連續額定運轉範圍，並有機會簡化冷卻系統設計。因此，若將冷卻系統納入評估範圍，從整體馬達單元的角度來看，DSSR型在功率密度方面的優勢預期將更為明顯。

結 論

本文介紹了利用軟磁複合材料(SMC)特性所開發之雙凸緣一體成形磁心與超薄絕緣塗層磁心，以及其應用於軸向磁通馬達(AFM)的開發成果。雙凸緣一體成形磁心有助於提

升馬達轉矩並降低銅損；而超薄絕緣塗層磁心則可提高線圈填充率與散熱性能。此外，為使客戶更容易進行AFM導入評估，本公司亦建立了AFM用模具成形磁心及AFM評估平台。透過75 kW級驅動用AFM之設計比較結果顯示，在相同規格及相同磁體重量條件下，DSSR型在輕量化與高功率密度方面均優於YASA型。未來，本公司將持續推動SMC技術與AFM設計技術之發展，進一步促進各類設備之小型化、高輸出化，並為永續社會之實現做出貢獻。

參考文獻

1. A. Watanabe et al., "Thin and High-Torque Axial Gap Motor Using Soft Magnetic Powder Cores," SEI TECHNICAL REVIEW No. 86, pp.106-112 (2018)
2. 高山佳典等人、「空氣清淨機用軸向磁通風扇馬達之開發」、馬達驅動/旋轉機械/汽車聯合研究會、RM-24-

- 061、157-162、July 2024.
3. R. Tsunata et al., “Development and evaluation of an axial gap motor using neodymium bonded magnet”: IEEE Trans. Ind. Appl., 54 (1) 254-262 (2017).
 4. R. Tsunata et al., “A Proposal of an Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Employing SMC Core with Tooth-Tips Constructed by One-Pressing Process: Improving Torque and Manufacturability”: IEEE Access, 11, 109435-109447 (2023).
 5. R. Tsunata et al., “SMC Development Guidelines for Axial Flux PM Machines Employing Coreless Rotor Structure for Enhancing Efficiency Based on Experimental Results”: IEEE Trans. Ind. Appl., 58 (3) 3470-3485 (2022).
 6. R. Tsunata et al., “Superior Efficiency Under PWM Harmonic Current in an Axial-Flux PM Machine for HEV/EV Traction: Comparison With a Radial-Flux PM Machine”: IEEE Trans. Ind. Appl., 60 (5) 6736-6751 (2024).

連絡方式

台灣住友電工股份有限公司
台北市敦化南路二段99號30樓
+(886) 2-2325-2588
sales-tw-ml@list.sei.jp