

(解説)



機械製品を高精度・高効率に操り省エネに貢献する 電気・磁気制御技術

寺尾泰昭*¹・河合宏明*¹(博士(工学))・森田晋也*¹・林 俊平*¹



Electric and Magnetic Control Technology for Manipulating Machinery Products with High Precision and Efficiency, Contributing to Energy Savings

Yasuaki TERAOKA・Dr. Hiroaki KAWAI・Shinya MORITA・Shumpei HAYASHI

要旨

当社グループの電気制御技術ならびに磁気制御技術は、半導体や磁性材、超電導といった先端の電子・磁性材料の開発とともに、それらを活用した機械製品の競争力強化や新製品開発を推進する中で育まれてきた。カーボンニュートラルを背景に輸送機を中心に電動化が急速に加速する中、需要変化に対応するためにも電気・磁気制御技術はさらに重要性を増す。本稿では、当社グループの電気制御技術および磁気制御技術の概要とともにおのこの技術トピックスを紹介する。

Abstract

KOBELCO Group's electrical control technology and magnetic control technology have been nurtured alongside the development of cutting-edge electronics and magnetic materials, such as semiconductors, magnetic materials, and superconductors. These technologies have been instrumental in enhancing competitiveness and promoting the development of new machinery products utilizing these materials. With the backdrop of carbon neutrality, electrification, mainly in the transportation sector, is rapidly accelerating. In response to changing demand, electric and magnetic control technology has become even more crucial. This paper provides an overview of the KOBELCO group's electrical control technology and magnetic control technology, along with introducing various technical topics associated with each area.

検索用キーワード

電気制御, 磁気制御, ハイブリッドシヨベル, 溶接電源, 3次元磁極構造, 超電導, 純鉄系軟磁性材

まえがき = 2000年代に入り、自動車を中心に環境へ配慮した低燃費化技術が注目を集めている。グリーン社会への貢献の観点から、当社グループでも油圧シヨベルのハイブリッド化といった電動化関連の取り組みを行ってきた。同時期に、1990年代頃まで取り組んできた半導体や情報通信分野の電子回路技術、FAロボットやシヨベルなどの産業機械を対象としたメカトロ制御の技術を活用し、電動機を駆動させるための制御や回路技術といったパワーエレクトロニクス分野の技術開発を本格的に開始した。併せて、当社グループで製造販売している純鉄系軟磁性材の性能を活かしたモータなどの電機部品の設計、評価技術の開発も進めてきた。

近年、カーボンニュートラルを背景に自動車などの輸送機分野を中心に電動化がいっそう加速する中、当社グループとしても需要変化に対応すべく磁性材料などの既存メニューの市場拡大や、高度な制御による機械製品の競争力強化を進めている。さらに当社独自の新規メニュー創出に加え、磁性材や電動機に関する技術でお客様の困りごとを解決するために、電動化ソリューション提供の強化にも取り組んでおり、電気・磁気制御技術は欠かすことのできないコア技術となっている。本稿では、こ

うした当社における電気・磁気制御技術の機械製品への応用、プロセス技術への応用、そして材料ソリューションへの応用を紹介する。

1. 電気制御技術

当社グループにおける機械製品を高速・高効率で電源駆動するための技術として、デジタル制御技術とパワーエレクトロニクス技術を電気制御技術群に位置付けている。

当社は古くから製鉄プロセスや大型プラントなどのプロセス制御の開発に取り組んできた。1980年以降、マイクロプロセッサ内蔵の高性能コントローラの登場により、システムの電気制御系の高応答化や高精度化のためにデジタル制御の製鉄現場への適用が活発化した。さらに機械事業部門における圧縮機などの回転機やFAロボット、建設機械などの産業機械の開発を通してデジタル制御の応用技術を高度化させてきた経緯がある。

1990年代には、当時の半導体事業を支える特定用途向け集積回路ASIC (Application Specific IC) の製品化技術やDSP (digital Signal Processor) を使った信号処理技術の活用展開に取り組んだ。その結果、情報通信分

*¹ 技術開発本部 応用物理研究所

野では当時世界最小サイズの電池のみで駆動する高音質半導体オーディオ機器「SolidAudio Player」の上市といった先進的な取り組みにもつながった。2000年代に入り、そうした技術は建設機械用の新型コントローラ開発¹⁾などにも展開され、量産製品における電子回路の最適化やコストダウン、品質安定化にも役立ててきた。さらに、2010年代にはそうした技術をハイブリッドショベル用インバータの開発や溶接プロセス制御用の電源プラットフォームにも応用展開し、パワーエレクトロニクス分野における高度な電流・電圧制御技術の獲得とともに、当社製品におけるパワーエレクトロニクス回路技術、制御技術のコア技術として確立するに至った。

近年、カーボンニュートラルによる電動化の進展に加え、当社機械製品の使いやすさや従来できなかった機能／コスト／価値をお客様に提供するためには電気制御技術は必須技術となってきている。素材事業、機械事業の両事業を有する当社において、電気制御技術は、機械を制御するためのパワーエレクトロニクスとしての活用だけではなく、溶接電源のようにものづくりのプロセスを直接制御する手段でもある。ここでは電気制御技術を活用した当社グループの機械製品の一例を紹介する。

1.1 油圧ショベルにおける電気制御

当社グループ会社のコベルコ建機（株）では、2000年代前半、排ガス3次規制に対応する新型ショベルを開発した。そこでは、前述の新型コントローラの開発と同時にその高い演算性能を駆使して、エンジン&油圧ポンプシステムとしての高効率運転制御技術と電磁弁制御による油圧回路の損失低減制御技術を開発し、従来の油圧ショベルより省エネ性能を20%向上させた新型油圧ショベルを上市した²⁾。

また、コベルコ建機の省エネショベル上市を皮切りに建機各社も省エネ建機を開発する中、コベルコ建機は建機各社に先駆け、世界初となるハイブリッド建機の開発に成功し、2009年にSK80H、2012年にはSK200H-9といったハイブリッド油圧ショベルを販売してきた³⁾。2016年には高出力で大容量のリチウムイオンバッテリーを初めて採用したSK200H-10（図1）を開発している⁴⁾。SK200H-10の開発では、省エネ性能の追究や作業能力の最大化を図る目的で、発電電動機、旋回電動機、および

リチウムイオンバッテリーユニットを内製化した。小型高出力化を達成するために、すべての機器は水冷システムを採用した。発電電動機では、三相交流同期形永久磁石方式の軸方向寸法約140mmの扁平（へんぺい）形状を採用し、エンジンと油圧ポンプ間へのビルトインを実現した。旋回電動機も旋回油圧モータ搭載場所に設置できるように小型高出力化を図った。インバータユニットにおいても、機体搭載性を確保するため、旋回電動機インバータと発電電動機インバータの一体構成を図った小型インバータユニットを新規で開発した。SK200H-10は従来の油圧ショベルに対して燃料消費量が17%低下しており、SK200H-9に対しても燃料消費量が12%低い結果が得られている。

1.2 溶接電源プラットフォームの開発

当社の溶接事業部門では、溶接材料とロボットシステムの双方を事業の柱として持つ強みを活かし、溶接プロセス全体でお客様へ価値を提供する溶接ソリューションとしての提案力を強化してきた。ソリューション提案を実現するために、材料とシステムの架け橋として必要となるのが溶接電源であり、パワーエレクトロニクス回路設計技術を駆使して実験開発環境としての溶接電源である、「溶接電源開発プラットフォーム」を開発した（図2）。本電源プラットフォームでは、DSPによる信号処理技術とFPGA（Field Programmable Gate Array）といった高速処理デバイスを活用したデジタル制御を実現し、開発者の溶接プロセスの制御アイデアを具現化するツールとして、新たな溶接プロセス開発の基盤となっ



図1 SK200H-10の外観
Fig.1 Overview of SK200H-10

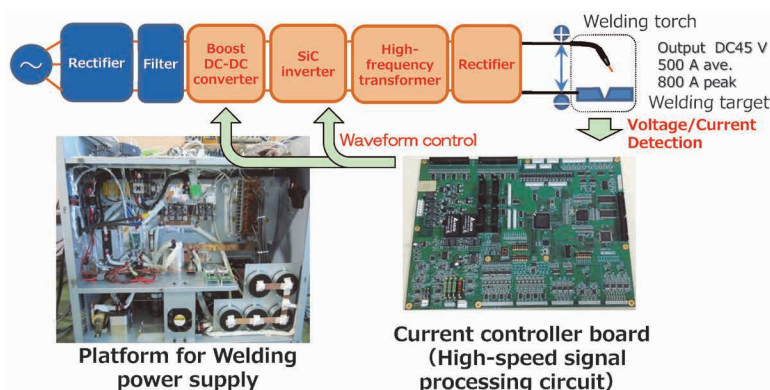


図2 溶接電源プラットフォーム
Fig.2 Platform for Welding power supply

た。これらの取り組みを通じて400 A超の大電流でも緻密な出力制御が可能な新溶接電源“SENSARC™ RA500”や、溶接ワイヤの周期的な前進後退動作と電源出力を同期させ、溶滴の移行に慣性を利用した世界初のワイヤ送給制御プロセス“AXELARC™”を開発した(本号「溶接コア技術の開発と社会実装」p.99~100参照)。加えて、昨今ではパワー半導体素子の進化や制御CPU処理能力が増大する中、これらの技術を導入した小型化ならびに高速応答が可能な電源装置の開発も行っている⁵⁾。

2. 磁気制御技術

磁気制御技術は当社グループの磁性材料の特徴を最大限に引き出すために、材料開発や分析解析技術に加え、高度な電磁場設計技術と掛け合わせて特徴ある電機部品の製品開発やソリューション提案に取り組むものである。

当社グループでは線材条鋼、鉄粉といった純鉄系軟磁性材から超電導まで、様々な分野にわたる磁性材料の製造販売を行っている。線材条鋼分野では、1985年頃から優れた磁気特性と冷間鍛造性を有する純鉄系軟磁性線材ELCH2 (Extra Low carbon Cold Heading wire) の開発を進めてきた。高い磁束密度や加工性の良さから、ソレノイドバルブや電磁クラッチなどの直流駆動部品に広く採用されている^{6),7)}。また、鉄粉事業においては1990年代頃からは表面に絶縁皮膜を有する鉄粉を圧縮成形した圧粉磁心の開発を進めてきた。磁性鉄粉は等方的な磁気特性を活かした高い形状自由度が強みであり、リアクトルでの実用化が進んでおり、モータへの適用拡大も目指している⁸⁾。自動車の電動化や電気機器の省エネ化が拡大する中、これら軟磁性材の成分設計・組織制御を最適化することで高磁束密度化と強度の両立する技術開発や、交流用途拡大に向けた鉄損低減技術として高耐熱の被膜開発を進めてきた。加えて、これら軟磁性材を適用したモータやソレノイド部品などの電磁部品を、高度な磁場解析技術を用いて設計、解析することで、お客様のニーズに合わせた最適な構造や加工プロセスの提案を行っている。また、当社の機械製品の競争力強化や新規メニュー創出の観点で、磁性材の特徴を生かした新たな電動機の開発にも取り組んでいる。

超電導分野の開発においては、1964年に超電導線材の基礎研究に着手して以来、2002年に超電導線材とマグネットを一貫して製造販売するグループ会社のジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)(以下、JASTECという)を設立し、NMR (Nuclear Magnetic Resonance)、MRI (Magnetic Resonance Imaging)、研究用途を中心とした超電導マグネットと線材の事業を展開している。超電導線材では、フランスに建設中の国際熱核融合実験炉 (ITER) プロジェクト向けに組織制御や交流損失低減技術を適用した高特性のNb₃Sn線材を開発し、プロジェクト全体の約20%を供給した実績を持っている。超電導マグネットでは、磁石配置を最適化することにより、高磁場・高均一度設計技術を構築してNMRやMRIの製品化を進めるとともに、高超電導線材を適用した超高磁場コンパクトマグネットの開発にも取り組んでいる。ここでは、当社グループの磁性材のソリューション技術ならびに、磁性材を適用し新たに生み出された技術の一例を紹介する。

2.1 純鉄系軟磁性材のソリューション技術

磁性材料の磁気特性は、加工により生じるひずみや残留応力により変化するため、加工の影響を考慮した部品性能予測および最適な部品加工プロセスのソリューション検討を行っている。

カーボンニュートラルの観点から熱処理工程省略などによるエネルギー低減が求められている。このことを受け、磁気焼鈍を省略し冷間鍛造加工した状態のELCH2をソレノイド鉄心に適用することが可能か検討した。冷間鍛造ひずみが部品特性に及ぼす影響を解析するために、ひずみ分布をFORGE (鍛造解析ソフトウェア) で解析し、出力されたひずみ分布データをJMAG (電磁界解析ソフトウェア) に受け渡し磁場解析を実施した(図3)。その結果は、磁気焼鈍を省略しても従来品と同等の性能であることを示した⁹⁾。

今後、市場の拡大が予測される電動機分野においては、小型化や軽量化のニーズが高まっており、現在の主流であるラジアルギャップ型モータ(以下、RGMという)とは異なるアキシアルギャップ型モータ(以下、AGMという)の開発が盛んに行われている。磁性鉄粉では形状自由度などの強みを活かしたAGMへの適用検

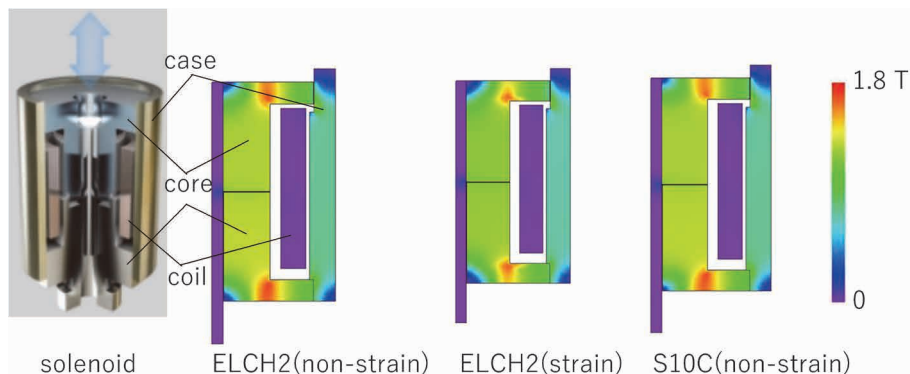


図3 磁束密度コンター図
Fig.3 Contour diagram of magnetic flux density

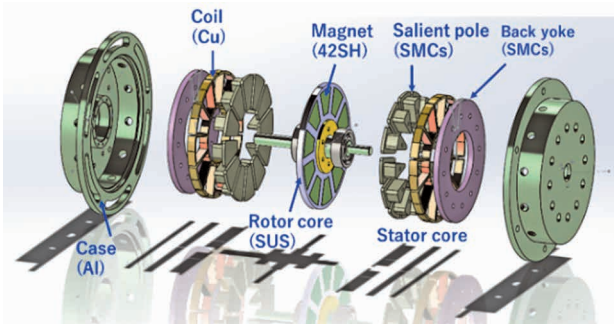


図4 アキシアルギャップモータの構成 (SMCsは圧粉コアの略)
 Fig.4 Axial-gap-motor configuration (SMCs is an abbreviation for soft magnetic powder composites.)

討を進めており (図4), JMAGを用いたモータの最適設計を行うとともに, 量産工程を想定した圧粉コア材の加工プロセスのモータ性能への影響を評価した¹⁰⁾。いっぽうで, ELCH2は前述したように優れた磁気特性を有する反面, 電気抵抗率が低く, モータの様な交流用途では磁性体中に生じる鉄損の増大を招く。磁気特性を維持し鉄損低減を狙ったELCH2細線を新たに開発し, これを適用した新たなAGMモータでは従来のRGMよりも小型軽量化できる可能性を示した¹¹⁾。

これらの材料のさらなる性能向上およびモータへの活用提案によりカーボンニュートラルへの貢献を目指している。

2.2 三次元磁極構造を適用したモータ開発

電磁力による駆動方式の電動モータは油圧モータと比較して, 制御性の良さ, ロスの少なさ, 電源や補器を含めた装置全体のコンパクトさの点で重宝されるが, 油圧モータと比べると非力である代わりに, 高速域に優れた特性を持つことを生かした形でこれまで実用されてきた。いっぽう, 当社の建設機械や大型の圧縮機などの機械製品の駆動源には, 低速大トルク特性が要求されるものが多く, 高速域に優れた特性を持つモータに油空圧や高い減速比のギアといった機械的要素を組み合わせることにより, その性能が実現されている。しかし, 前記の組み合わせでは, ヒステリシス, がた, 摩擦などの非線形性が生じ, 制御性・動作精度や効率面で悪影響を及ぼす。そこで, これら機械的な非線形要因を極力排除することが可能な低速大トルク化の構造を検討した。

高速域での使用を前提とする電動機の制約を排し, かつ等方的な磁気特性を有する当社磁性鉄粉や純鉄材の特性を活かす発想を行い, 図5に示すような三次元的に磁束が通過する構成により, 電流への感应性を向上させた三次元磁極構造¹²⁾を考案した。この技術を用いた電動機は, 速度に起因する損失が大きくなるため, 高速域では不利になるいっぽう, 低速域においては従来に比べ少ない永久磁石量で大きな磁束変化を生じさせることで, 「小型軽量化」と「少ない電力で電磁力を向上する効果」の両立を実現した。

現在, 当社産業機械への適用を目指してギアなどを介さず直接駆動であって100 kNの電磁推進力を発生可能

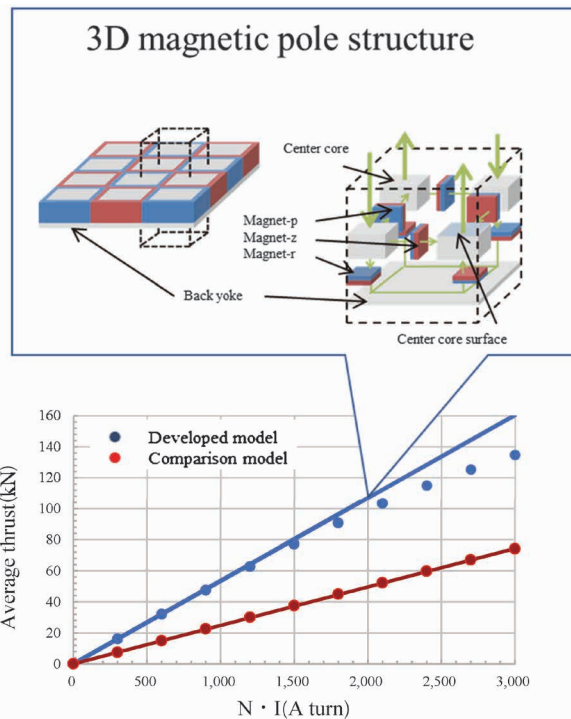


図5 三次元磁極構造とその適用モータ
 Fig.5 3D Magnetic pole structure and linear synchronous motor drives

な直動電動機の開発を進めている。

本技術は電動化や自動化, 省人化を背景に今後拡大が見込まれる電動機市場に対する独自の特徴あるシーズ技術である。瞬発動作の向上に向けて, ダイレクトドライブ化が望まれる用途向けを中心に技術開発を推進するとともに, 新たな事業機会を見出していく。

2.3 超コンパクト1 GHz NMR マグネットの開発

当社は2015年に (国研) 物質・材料研究機構, (国研) 理化学研究所, 日本電子 (株) とともに当時としては世界初となる超1 GHz (1.02 GHz) のNMRマグネットを開発した。マグネットが発する磁束密度が最も高くなる最内層部にビスマス系の高温超電導を適用することで実現した。2022年度には当社のグループ会社であるJASTECが理化学研究所, 日本電子, 東京工業大学らとともに, 前述の技術をさらに高度化することで, 従来機と比べて約10分の1の重量に抑えた世界最軽量・コンパクトな超1 GHzのNMR装置の開発に成功した (図6)¹³⁾。最内層に用いるビスマス系の高温超電導コイルの電流密度を従来機に比べ1.5倍とすることでマグネット全体における高温超電導コイルの磁場分担を50%以上に増やし, マグネット全体をコンパクト化した。いっぽう, 本構造では高温超電導コイルの中心部には100トン超と非常に大きな電磁力が印加される。コイルが破壊されないように, 高強度金属で補強された高温超電導線材を緻密に整列させて巻く技術を開発することで高電流密度を実現し, 大幅なコンパクト化に成功した。

今後も超電導線, マグネット双方での特性向上を進め超電導分野における最先端の技術開発に貢献していく。

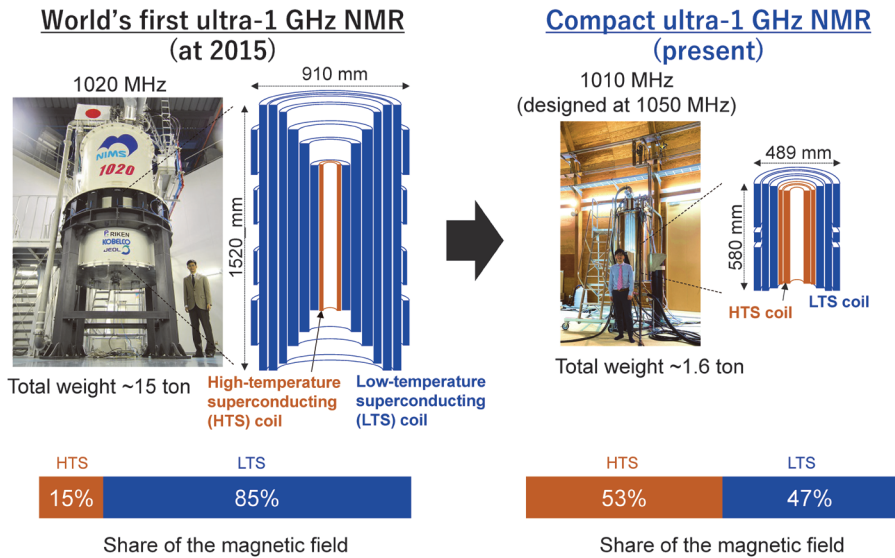


図6 超1 GHzのNMRマグネットの外観と超電導コイル断面
 Fig.6 Overview and cross-section of ultra-1 GHz NMR

むすび = 当社グループにおける21のコア技術の電気制御技術ならびに磁気制御技術に関して、おのこの技術トピックスとともに紹介した。これらの技術をより一層深化させ、当社グループの製品の競争力強化を図るとともに、最先端技術への貢献、カーボンニュートラルの実現などの社会課題の解決に貢献していきたい。

参 考 文 献

- 1) 山下俊郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.1, p.68-72.
- 2) 大谷和弘ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.1, p.52-57.
- 3) 鹿見島昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.1, p.66-69.
- 4) 山崎洋一郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.1, p.43-47.
- 5) 橋本裕志ほか. 電気学会論文誌D. 2021, Vol.141, No.8, p.613-620.
- 6) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.66-69.
- 7) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.2, p.18-21.
- 8) 三谷宏幸. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.12-15.
- 9) 笠井信吾ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.3-6.
- 10) 加藤弘樹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.12-17.
- 11) 森田晋也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.7-11.
- 12) 林 俊平ほか. 電気学会論文誌D. 2019, Vol.139, No.7, p.645-651.
- 13) Y. Yanagisawa et al. "Present status of the development of a 1.3 GHz (30.5 T) LTS/HTS NMR magnet operated in the persistent-mode". Applied Superconductivity Conference 2022.