

PROTERIAL
TECHNICAL REVIEW

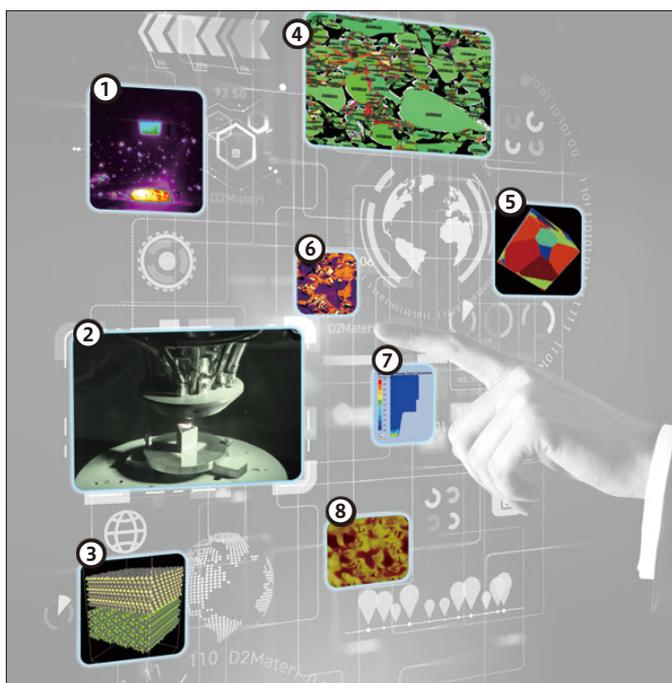
2024 Vol.39

ISSN 2759-016X (Print) ISSN 2759-0186 (Online)

プロテリアル技報



表紙写真説明



- ① 熱間鍛造向け肉盛補修金型のサーモグラフィ
- ② レーザ肉盛造形プロセス
- ③ MD計算用分子モデル (Polycrystal)
- ④ 窒化ケイ素製品の二次電子像へのAI適用例
- ⑤ MD計算用分子モデル (Interface)
- ⑥ 電線被覆材のSPM画像 (2nd resonance frequency image)
- ⑦ 熱間鍛造向け肉盛補修金型の鍛造シミュレーション
- ⑧ 電線被覆材のSPM画像 (Topography)

プロテリアル技報

PROTERIAL TECHNICAL REVIEW

2024

Vol. **39**

本文中に記載のデータ、グラフおよび実験結果の記述は、
特に明示しないかぎり製品の規格値や保証値ではありません。

目次

2023 テクノロジーミーティング

PAGE 6~7

持続可能な社会の実現に向けたお客様との協創の取り組み	6
----------------------------------	---

論文

PAGE 8~47

高性能フェライト磁石のxEV向け主機モーターへの適用検討	8
相牟田 京平・菊地 慶子・鋸持 茂・西内 武司・高畑 良一	
MES導入によるケーブル製造ラインの品質予測と改善手法	16
東谷 雅春・児玉 壮平	
表面被膜付きパーメンジュールの開発	28
矢ヶ部 秀隆・藤原 義行・竹原 隆司・上坂 修治郎・藤井 和也	
特許文書の材料科学技術表現抽出	36
酒井 敏彦・千綿 伸彦・峯 恒憲	

新製品紹介

PAGE 48~59

非接触充電向け磁気シート	48
磁性楔	49
高性能ナノ結晶軟磁性材料	50
高Ni層状正極材製造技術	51
UV-C耐性医療用シリコンケーブル	52
鉄道車両用 1 Gbps伝送用カテゴリ5Eケーブル	53
防鼠対応フレキシブル通信ケーブル	54
高硬度高耐食刃物用鋼	55
SOFC/SOEC用インターコネクタ材	56
フレキシブルディスプレイ用チタン合金箔	57
鉄鋼冷間圧延用鑄造高性能ロール	58
超高温用マスフローコントローラー	59

プロテリアルグループ 主な営業品目	60
-------------------------	----

プロテリアルグループ 2022-2023年 主な技術受賞	62
------------------------------------	----

INDEX

Technology Meeting 2023

PAGE 6~7

Collaborative creation initiatives with customers towards a sustainable society 6

Articles

PAGE 8~47

Study on xEV Traction Motor Using High Performance Ferrite Magnets 8

Kyohei Aimuta · Keiko Kikuchi · Shigeru Kemmochi · Takeshi Nishiuchi · Ryoichi Takahata

Quality Prediction and Improvement for Cable Production Line by Introducing MES 16

Masaharu Toya · Sohei Kodama

Development of Permendur with Surface Coating 28

Hidetaka Yakabe · Yoshiyuki Fujihara · Ryuji Takehara · Shujiroh Uesaka · Kazuya Fujii

Named Entity Recognition from Materials Science Patent Documents 36

Toshihiko Sakai · Nobuhiko Chiwata · Tsunenori Mine

New Products Guide

PAGE 48~59

Magnetic Sheet for Wireless Charging 48

Magnetic Slot Wedge 49

High Performance Nanocrystalline Soft Magnetic Materials 50

Manufacturing Method for High-Ni Layered Cathode Material 51

UV-C Resistant Silicone Sheathed Cable for Medical Applications 52

Category 5E Cable for 1 Gbps Transmission for Rolling Stock 53

Flexible Rodent Resistant Cable 54

Blade Steel with High Hardness and High Corrosion Resistance 55

Alloy for SOFC/SOEC Interconnects 56

Titanium Alloy Foil for Flexible Display 57

High Performance Cast Roll for Cold Rolling of Steel 58

Ultra-High Temperature Mass Flow Controller 59

Products of PROTERRIAL Group 60

Technical Awards 2022 - 2023 62



弊社社長シヨーン・スタックの挨拶
Address from CEO Sean M. Stack

持続可能な社会の実現に向けたお客様との協創の取り組み プロテリアル テクノロジーミーティング 2023

Collaborative creation initiatives with customers towards a sustainable society
Proterial Technology Meeting 2023

当社は、企業理念Mission「質の量産」、Vision「持続可能な社会を支える高機能材料会社」、Values「至誠・夤則彊（和すれば強し）」を起点に、お客様の課題を解決する高機能材料の創造に取り組んでいます。創業から100年超にわたり培ってきた「金属を中心とした組織・組成制御技術」と「広範なお客様との強固な関係性」により、「協創による独創的な製品群」をこれまで数多く生み出してきました。

このようなお客様との協創をより推進するために、2023年11月15日、16日の2日間にわたり、弊社熊谷事業所において、プロテリアル テクノロジーミーティング2023を開催しました。28社からおおよそ140名のお客様にお越しいただき、弊社で開発中の最新技術と、持続可能な社会に貢献するさまざまな素材ソリューションをご覧いただきました。

はじめに、弊社代表取締役 会長執行役員兼社長執行役員CEO Sean M. Stackがお客様にご挨拶するとともに、プロテリアルを支える経営の3本柱「人」「オペレーショナル・エクセレンス」「成長」と、お客様との協創スキームを紹介しました。続いて、執行役員CTO(最高技術責任者)研究開発本部長 兼 グローバル技術革新センター長 村上元が研究開発概要について、執行役員 営業本部長 石川桂が持続可能な社会の実現に向けた素材ソリューションについて、それぞれ説明を行いました。

引き続き行われたポスターセッションでは、モノづくり・プロセス技術、デジタル技術、モーター・インバーター関連材料、水素・電池材料、高機能材料の5分野における最新技術と持続可能な社会に貢献する素材ソリューションに関する39件のポスターを展示しました。サンプルやデモ機も展示され、お客様と弊社の研究者、技術者との間で活発な意見交換が行われました。

ポスターセッションの合間には、弊社のオープンイノベーションの取り組みの一端に触れていただくため、グローバル技術革新センター内に設置された3D造形オープン・ラボの見学ツアーを実施しました。

プロテリアルグループは、多様な材料に関する組織・組成制御技術を軸として、お客様と共に高機能材料を協創してきました。お客様のニーズを研究開発から量産まで反映することで、お客様のイノベーション実現に貢献しています。また、それがプロテリアルの持続的成長の原動力となっています。プロテリアルは特色ある高機能材料を提供し続けることで、社会課題の解決につなげるとともに持続的成長をめざしていきます。



ポスター会場
Poster display



お客様との意見交換 (ポスター会場)
Talking to customers at the poster session

At Proterial, our corporate philosophy is made up of our Mission: “Make the best quality available to everyone”; our Vision: “Leading sustainability by high performance”; and our Values: “Unflinching integrity” and “United by respect”. With this as our starting point, we strive to create high-performance materials to address our customers’ challenges. Thanks to our expertise in structural and compositional control technologies centered on metals, cultivated over the company’s 100-year history, as well as our strong relationships with a wide range of customers, we have produced many innovative products through collaborations over the years.

The Proterial Technology Meeting 2023 was held on 15 and 16 November 2023 at our Kumagaya site in order to further promote such collaborative creation projects with customers. We welcomed around 140 guests from 28 companies to show them the latest technologies that we are developing, and materials solutions contributing to a sustainable society.

Sean M. Stack, Representative Director, Chairman, President and CEO first addressed the guests. He talked about Proterial’s three pillars of management: people, operational excellence, and growth, and introduced the customer collaboration scheme. Hajime Murakami, Executive Officer, CTO, General Manager of R&D Division, and General Manager of Global Research & Innovative Technology Center, gave an overview of research and development. Katsura Ishikawa, Executive Officer and General Manager of Marketing & Sales Division, talked about materials solutions for a sustainable society.

This was followed by poster sessions where we displayed 39 posters highlighting our latest technologies and materials solutions that contribute to a sustainable society in five areas: manufacturing/process technology, digital technology, motor/inverter related materials, hydrogen/battery materials, and high-performance materials. Samples and demonstration devices were also on display, and customers held lively discussions with our researchers and engineers.

Between the poster sessions, guests were taken on a tour of the 3D printing open lab within the Global Research & Innovative Technology Center, giving them a chance to see part of our open innovation initiatives.

Focusing on structural and compositional control technologies for a wide variety of materials, the Proterial Group has created high-performance materials in collaboration with customers. The customer’s requirements are reflected in every step from R&D to mass production, helping to make their innovations a reality. This also provides the driving force for Proterial’s sustained growth. By continuing to provide unique, high-performance materials, Proterial is working to address social issues and secure sustainable growth.



高性能フェライト磁石の xEV向け主機モーターへの適用検討

Study on xEV Traction Motor Using High Performance Ferrite Magnets

相牟田 京平*
Kyohei Aimuta

菊地 慶子*
Keiko Kikuchi

釘持 茂**
Shigeru Kemmochi

西内 武司**
Takeshi Nishiuchi

高畑 良一***
Ryoichi Takahata

*
株式会社プロテリアル 研究開発本部
グローバル技術革新センター
Global Research & Innovative
Technology Center, R&D
Division, Proterial, Ltd.

**
株式会社プロテリアル 磁性材料事業部
Magnetic Materials Business
Unit, Proterial, Ltd.

株式会社日立製作所 研究開発グループ
グリーンインフライノベーションセンター
Research & Development Group,
Green Infrastructure Innovation
Center, Hitachi, Ltd.

今後生産量の急激な拡大が見込まれる電動自動車の主機モーターには、主に希土類磁石が利用されている。今後起こりうる重希土類原料の調達リスクを低減するため、重希土類原料を使用しないフェライト磁石の主機モーターへの適用可能性を検討した。フェライト磁石は希土類磁石対比で磁石特性が低く、モーターは低出力密度となるため、向上策を磁界解析で検討した。まず、高性能フェライト磁石(NMF®-15G)を適用し、マグネットトルクの低下を最小化しつつ、リラクタンストルクを大きくする磁石配置としてモータートルク減少を抑えた。本基本設計を基に、希土類磁石を適用したモーターと比較し、軸長を調整して同等トルクとした同回転数条件、最大回転数を増加させて出力密度を同等レベルにそろえた同体積条件を得た。これらの検討を踏まえ高性能フェライト磁石を適用したモーターを試作評価した結果、出力102 kWを得ることができ、電気自動車の主機モーターへの適用可能性を実証した。

In traction motors for electric vehicles, rare-earth magnets are mainly used. However, in order to reduce the procurement risk associated with heavy rare earths, here we consider the use of a high-performance ferrite magnet for traction motors. Since ferrite magnets have poorer magnetic characteristics than rare-earth magnets, and motors employing ferrite magnets exhibit a lower power density, it is necessary to improve their performance using a magnetic field analysis. In this study, a high-performance ferrite magnet (NMF®-15G) was used to minimize the reduction in magnet torque. The magnet position in the rotor was also optimized to increase the reluctance torque. Finally, the shaft speed and motor volume were optimized to achieve an output power density comparable to that for a motor using a rare-earth magnet. Based on this optimized design, a prototype motor using a ferrite magnet was constructed and evaluated. An output power of 102 kW was achieved, indicating that a traction motor suitable for electric vehicles could be successfully realized.

■ Key Words : 高性能フェライト, 主機モーター, 回転数
■ Production Code : NMF®-15 series

■ R&D Stage : Research

1. 緒言

気候変動の抑制に向けて、日本を含めた各国が温室効果ガス排出量の削減目標を定めるとともに、自動車メーカー各社においても自動車の電動化推進に向けた取組みが加速している。このような背景から、すでに広く普及している HEV (Hybrid Electric Vehicle) に加えて、BEV (Battery Electric Vehicle) や PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) の生産量が急激に拡大しており、今後も大幅に増加することが見込まれている。

一般的に、これら電動自動車(以下、FCV (Fuel Cell Vehicle) なども含め xEV と呼ぶ)には、駆動モーター用の永久磁石として、ネオジム (Nd)-鉄 (Fe)-ボロン (B) 焼結磁石 (当社製品名: NEOMAX[®]) が活用されてきた。しかし、xEV の需要拡大により、Nd-Fe-B 焼結磁石の主原料である軽希土類元素の Nd や、重希土類元素の一種で耐熱性確保のために添加されるジスプロシウム (Dy)・テルビウム (Tb) の調達リスクや価格変動リスクが顕在化する可能性が指摘されており、現に2020年以降、希土類原料の大幅な高騰が起きている。

このような課題に対し、当社プロテリアルは、特に資源的な制約が大きな Tb の使用量を従来の省重希土類磁石よりも大幅に削減しながら高性能化を実現した Nd-Fe-B 焼結磁石 (NMX[®]-G1NH シリーズ) を開発¹⁾するとともに、従来希土類磁石が使用されてきた用途への高性能フェライト磁石の適用を提案している。本稿では、量産されている中で最高レベル (2023年8月現在、当社調べ) の磁気特性を有する当社の高性能フェライト磁石 NMF[®]-15 の xEV 主機モーターへの適用可能性について検討した結果を報告する。

2. フェライト磁石

2.1 フェライト磁石の特徴

現在工業化されているフェライト磁石は、1950年代以降に開発されたバリウム (Ba) フェライト磁石、ストロンチウム (Sr) フェライト磁石に代表される、六方晶のマグネトプランバイト構造を主相 (以下 M 相と呼ぶ) とする材料である。Ba フェライト磁石や Sr フェライト磁石は、化学式 $AFe_{12}O_{19}$ (または $AO \cdot 6Fe_2O_3$, A は Ba や Sr など, O は酸素) で記述される。この材料は、**図1** に示すように、マグネトプランバイト構造中の Fe の磁気モーメントがサイトごとに“上向き”または“下向き”となっており、

それぞれの磁気モーメントの差分が磁化として取り出されるフェリ磁性の材料であり、このような特徴から、この磁石の残留磁束密度 (B_r) は、本質的に希土類磁石よりも低い値になる。一方、この磁石は保磁力 (H_c) とのバランスがよいことや、 H_c の温度係数が正、すなわち、高温側で H_c が向上すること、電装用モーターに適したアーク形状などの製品を大量生産できる粉末冶金プロセスが適用できること、化学的安定性が高く一般的な使用環境下で腐食が進行しないこと、主成分となる酸化鉄が鉄鋼プロセスで発生する副生成物から得られること、といった工業製品として有益な特徴を有しており、現在もコストパフォーマンスに優れた磁石として広く普及している。

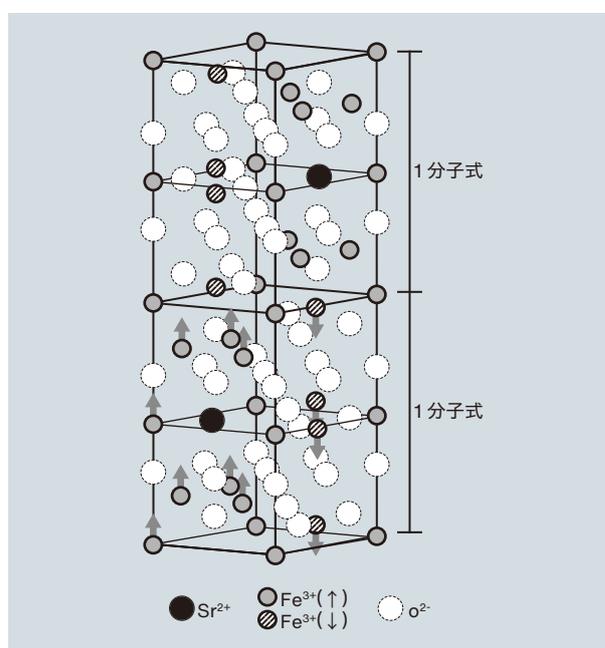


図1 マグネトプランバイト構造の模式図 (Sr フェライトの場合)。図中矢印は磁気モーメントの向きを示す。

Fig.1 Schematic illustration of magnetoplumbite structure for Sr ferrite. Arrows indicate the magnetic field directions

2.2 プロテリアルの高性能フェライト磁石

当社が生産している高性能フェライト磁石 (NMF) の特性域を**図2**に示す。フェライト磁石は特に電装用途への適用を中心に採用が拡大してきた。1990年代中盤までは、Sr フェライト磁石の微粉碎や成形・微量添加元素などのプロセス技術の進展により、磁石特性を向上させてきた。一方、1990年代後半になって、Sr フェライト (主相組成式 $SrFe_{12}O_{19}$) の Fe の一部を Co に、Sr の一部をランタン (La) に置換した、Sr-La-Co フェライト磁石が開発・量産化された²⁾。さらに、2000年代になって、Sr

の代わりにCaを活用したうえで組成を適正化したCa-La-Coフェライト磁石でさらに高い性能が得られることが見出され³⁾、これをもとに組成改良やプロセス適正化が進められて製品化に至っている。中でも、NMF-15シリーズは、量産フェライト磁石の中で最高クラスの磁気特性を発現する(2023年8月現在, 当社調べ)。

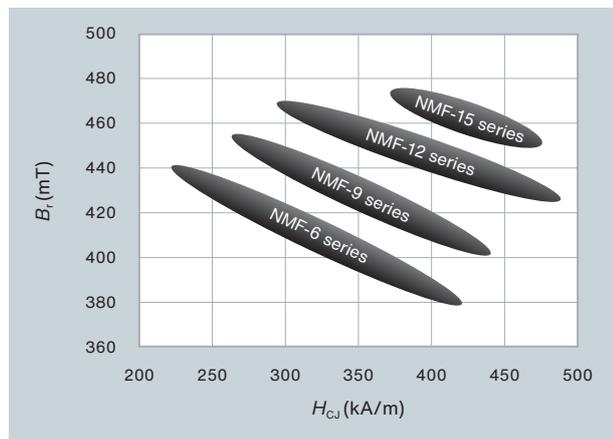


図2 高性能フェライト磁石 NMF® の磁気特性 (2023年8月現在)

Fig.2 Magnetic properties of high-performance NMF™ ferrite magnets

3. フェライト磁石を用いた主機モーターの設計

3.1 解析による検証

フェライト磁石をxEV主機モーターに適用検討するために、まずは市場に流通しているEVモーターを調査し、基準とした。図3に基準としたモーターの1/8断面図を示す。出力110 kWモーター、8極48スロットの分布巻IPM(Interior Permanent Magnet)モーターで、ローターは平板形の1枚とV字形の2枚を合わせた、▽形の磁石配置である。以後、本モーターをリファレンスモーターと称する。ステーター構造を同一として、フェライト磁石を用いたローター構造の最適化を検討した。具体的には以下の2点を検討した。その際、減磁耐力、機械強度も考慮した設計としている。

1. フェライト磁石の低磁力化に伴う、モータートルク低下を最小限に抑えながら、不足分は積厚増加によって補い、同回転数条件で同等出力を得る(検討①: 同回転数条件)
2. 駆動条件(最大回転数)を変更し、同等体積で同等出力を得る(検討②: 同体積条件)

図4にリファレンスモーターの回転速度を変化させたときのトルクと、各回転数における最大出力の関係を

示す。また、モーターの出力とモータートルク、回転数の関係を以下の式(1)で示す。

$$P_{out} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{N}{60} \cdot T \quad (1)$$

ここで、 P_{out} :モーター出力(W)、 T :モータートルク(N・m)、 N :回転数(rpm)である。回転数が増加するにつれて、出力は増加し、リファレンスモーターの場合3,283 rpm, 320 Nm(450 Arms)印加時に最大出力の110 kWに到達する。その後(1)式の関係から、回転数が増加する分だけモータートルクを下げながら(印加電流を下げながら)同等の出力を得る。最大回転数である10,000 rpm時のトルクおよび電流は105 Nm, 150 Armsである。一般的に最大出力駆動時において、最大トルク条件のときに、最も損失が発生する。また、最高回転条件のときに最もローター部に応力が発生し強度的な懸念が発生する。よって、本検討では、最大トルク条件と最大回転数条件の解析を行い、モーターとしての性能を評価した。磁界解析には、日立製作所が開発した電磁界シミュレータ内製ソフトを使用し、正弦波電流を入力して各種トルク、効率を算出した。

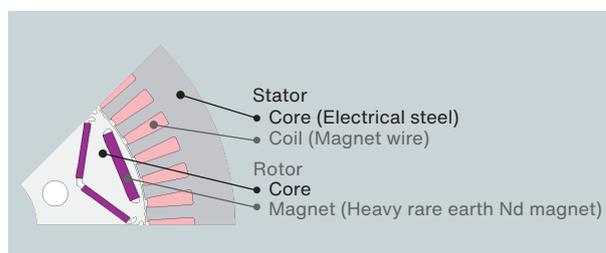


図3 リファレンスモーターの断面図(1/8 model)

Fig.3 Cross-sectional view of reference motor (1/8 model)

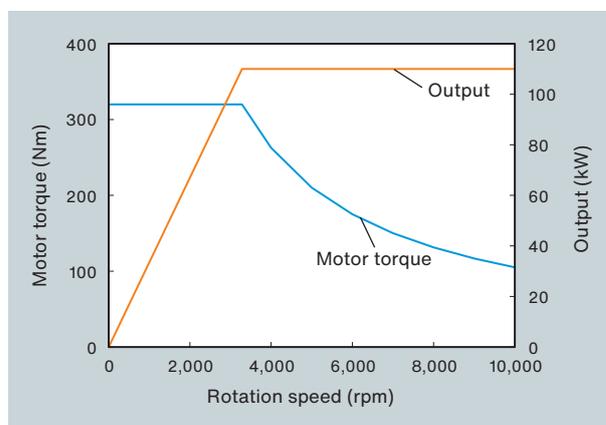


図4 リファレンスモーターのモータートルクと出力の回転速度依存性⁴⁾

Fig.4 Rotation speed dependence of motor torque and output

検討①②に共通した、フェライトモーターの設計のコンセプトは、モータートルク低下を最小限にするために、リラクタンストルクを積極活用する点である。今回の解析対象であるIPMモーターのモータートルクは、以下の式(2)で表される。

$$T = p_n \phi_{pm} I_a \cos \beta + \frac{1}{2} p_n (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \quad (2)$$

ここで、 p_n :極対数、 ϕ_{pm} :電機子鎖交磁束、 I_a :電機子電流、 β :電流位相角、 L_d :直軸インダクタンス、 L_q :横軸インダクタンスである。右辺第1項はマグネットトルク、右辺第2項はリラクタンストルクと呼ばれる。マグネットトルクは、磁石の性能に依存するトルクであるため、フェライト磁石の場合、希土類磁石対比低下する。一方、リラクタンストルクは、ローターの突極性による磁気エネルギーの変化によって発生するトルクであり、ローター内の磁石とフラックスバリアと呼ばれる空隙部の形状によって決定し、磁石材料に依存しない。よって、右辺第2項のリラクタンストルクが最大化するローター構造を検討する必要がある。

検討②に関しては、図5のモーターの回転数-トルク特性を用いて、高速化に伴う出力向上原理を示す⁵⁾。A点の出力を P_{out} としたとき、同一回転数でモータートルクが半分になると、B点に移動し、出力も $P_{out}/2$ になる。この時、B点のモータートルクのまま、回転数を2倍にすると、C点に移動し、この時の出力はA点と等しく P_{out} に

なる。このように、モータートルクと回転数の関係を調整することで、出力を変化させることができるが、回転数は自動車の車速に直結するため、回転数を変更する際は減速機の減速比とセットの検討となる。よって、回転数を2倍にしたC点を得た場合は、最大回転数もおおよそ2倍とする必要があり、D点となる。

本設計コンセプトをもとに、検討①でリファレンスモーターと同等のモータートルクが得られる積厚を算出し、両者から導かれた積厚比を目安に検討②の最大回転数とした。

図6に設計したローター構造を反映させたフェライト磁石モーターの1/8断面図を示す。比較のため、リファレンスモーターも示した。検討①②に共通する構造上の

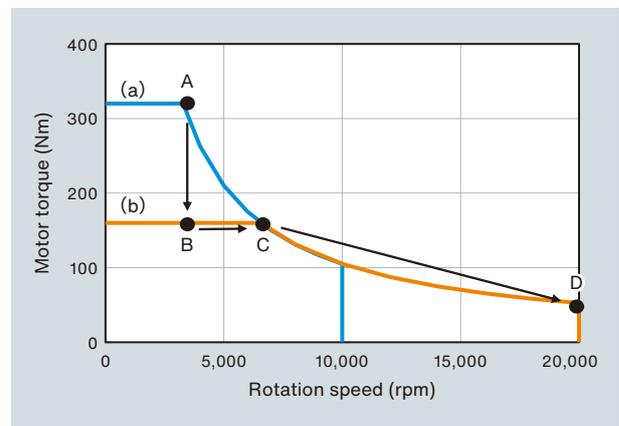


図5 回転数の調整による出力の維持方法 (a) リファレンスモーター、(b) 最大モータートルクが半分の場合
Fig.5 Maintaining output by changing rotation speed (a) reference motor, (b) 1/2 maximum motor torque

	Reference Motor	Proposal 1 (Equal output)	Proposal 2 (Equal size)
Appearance			
Magnet	HRE diffused Nd-Fe-B magnet	High-performance ferrite NMF®-15G	High-performance ferrite NMF®-15G
Rotor size	Φ200 - 140 mm	Φ200 - 200 mm	Φ200 - 140 mm
Max. rotation speed	10,000 rpm	10,000 rpm	15,000 rpm
Magnet / Motor weight	1.9 / 36 kg	3.2 / 48 kg	2.3 / 36 kg

HRE: Heavy Rare Earth

図6 リファレンスモーターと設計したモーターの比較

Fig.6 Motor design comparison (reference motor, proposal 1 and proposal 2)

主な特徴は、フェライト磁石形状をローターの内径側へとより深く配置したV字形として磁石表面積を拡大した点と、d軸(界磁磁束の向き)およびq軸(d軸と電気角で直交方向)の極間部へのフラックスバリアを構築した点である。このフラックスバリアのブリッジ部は最大回転数が高くなる検討②のほうが厚くなっている。これらにより、ローター強度を確保しつつ、フェライト磁石の漏れ磁束を低減するとともに、リラクタンストルクを大きくできるローター構造となっている。磁石は、当社フェライト磁石で最も B_r の高いNMF-15Gを使用し、その他材質はリファレンスマーターと同等とした。磁界解析の結果、検討①の軸長は200 mmとし、不足分のトルクを補った。これは、リファレンスマーター対比1.43倍である。本結果をもとに、検討②の最大回転数は1.5倍の15,000 rpm、最大トルク条件となる回転数は4,800 rpmとした。

図7に各モーターの最大トルク条件となる450 Arms印加時のモータートルク-電流位相角特性を示す。リファレンスマーターにおいて $\beta=45 \text{ deg.}$ で出力が最大の320 Nmを示した。それに対し検討①は、 $\beta=50 \text{ deg.}$ で最大トルクが得られた。これは設計コンセプト通り、低下したマグネットトルク ($\beta=0 \text{ deg.}$) をリラクタンストルクで補うことができていることを意味する。いずれも回転数3,283 rpmにおいて得られる出力は110 kWであった。一方、検討②に関しては、検討①と同様の傾向を見せたが、最大トルクは210 Nm程度であった。これを4,800 rpmにおける出力に換算すると105 kWとなり、検討①対比わずかに低下した。これは、ローターの

機械強度を確保するために、フラックスバリアのブリッジ部分を厚くしたため、磁石からの磁束がステーターを回らず磁石に戻る、短絡磁束が検討①対比多くなっているためである。以上から、検討①、②いずれの条件においてもリファレンスマーター対比ほぼ同等の出力が得られることが分かった。

各モーターにおける、最大出力かつ最大電流条件と、最大出力かつ最大回転数条件における出力と損失の分析結果を図8に示す。損失は銅損、ステーター鉄損、ローター鉄損と磁石渦電流損に分解し、銅損はリファレンスマーターの直流抵抗を実測にて求め、積厚増加分も考慮した。残りの損失は電磁界解析から算出した。検討①では、積厚増加分の直流抵抗の上昇の影響を受け、最も電流を印加する3,283 rpm時に効率 η が1.8%

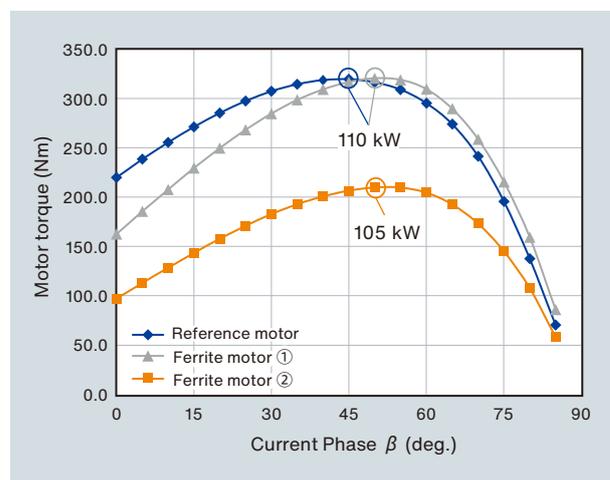


図7 450 Arms 印加時の電流位相 - モータートルク特性
Fig.7 Current phase dependence of motor torque at 450 Arms

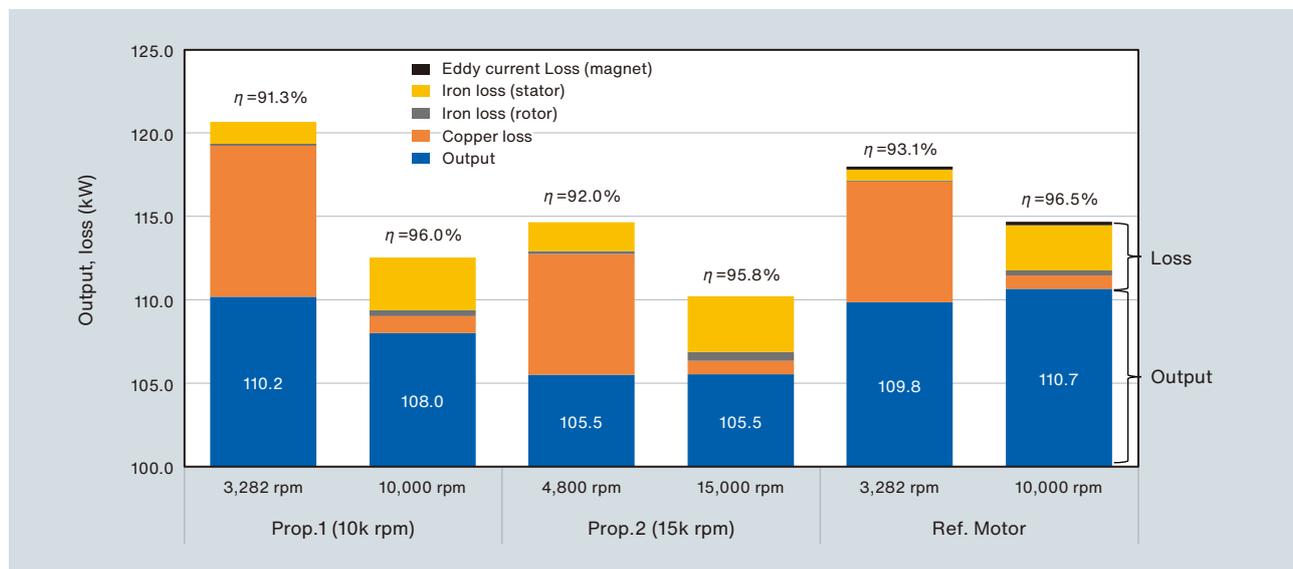


図8 出力と損失の解析結果
Fig.8 Simulation results for output and loss

低下した。一方で、10,000 rpm時は0.5%程度の差にとどまった。この理由としては、高速回転に伴い、印加する電流値が減少し、銅損の比率が下がった点と、磁石渦電流損が顕在化した点があげられる。本検討では基本設計として理想的な正弦波電流波形を用いて解析した。EV用途のモーターはインバータで駆動され、この場合のキャリア周波数がkHzオーダーとなることから、正弦波電流波形を用いた場合より、磁石渦電流損が大幅に増加し、効率差が縮まる可能性がある。

検討②では軸長がリファレンスモーターと同様のため、銅損は同じだが、回転数増加に伴う鉄損の増加起因で効率が0.7~1.1%低下した。以上から、ステーターの設計を固定した状態で、ローター磁石をフェライト磁石に変更すると、わずかに効率が低下するが、100 kWを超えるモーターを設計可能であることが分かった。

3.2 実測実験

3.1の解析結果をもとに、フェライトモーターを試作した。試作対象は検討②の同等体積同等出力条件とし、リファレンスモーターのローター部分以外は同じものを使用し、ローター部分のみを作製した。図9に試作したローターの外観写真を示す。図中黒色部が磁石挿入部であり、エポキシ樹脂によって接着されている。なお、解析上は空隙となっていたフラックスバリアもエポキシ樹脂で埋められている。これにシャフトを挿入し、最大回転数の15,000 rpmまで異常な振動なく回転するよう、バランス調整を施した。最後にこのローターをステーターに組み付け、試作品を完成させた。

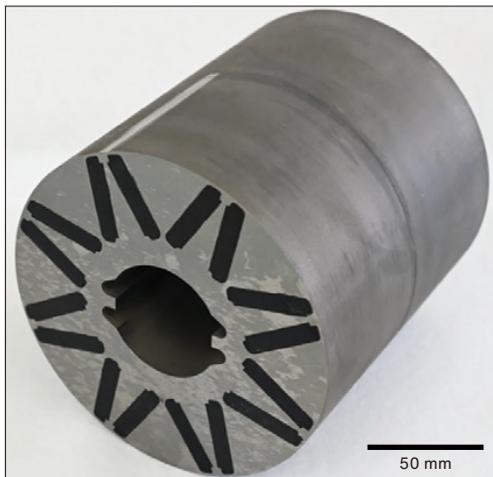


図9 試作したフェライトモーターのローター部
Fig.9 Prototyped ferrite motor (rotor part)

図10に評価システムの構成を示す。主にダイナモとトルクメーターで構成される試験ベンチにカップリングを介して供試モーターを接続する。ダイナモは明電舎製で、最大出力150 kW、最大回転数15,000 rpmである。供試モーターを駆動するインバータエミュレーターはマイウェイプラス製であり、最大電流450 Arms、最大出力150 kWである。よって今回のフェライトモーターの駆動領域をカバーできている。

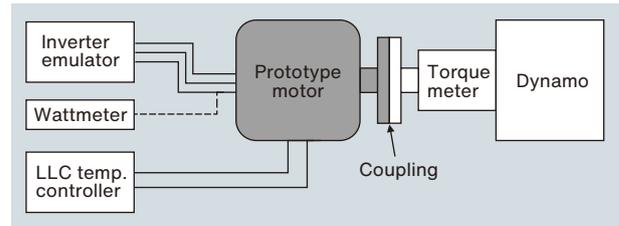


図10 評価システムの構成
Fig.10 Measurement system for ferrite motor

図11に試作したフェライトモーターの2,500 rpm、450 Arms時のモータートルク-電流位相特性を示す。結果モータートルクは50 deg.で最大値を取り、解析と良く一致した。一方、最大トルク自体は5%低下の約200 Nmであった。これは、マグネットトルクがおおよそ2割解析対比低下していることに起因しており、磁石や電磁鋼板の特性劣化が推察される。実験に使用した磁石の特性(B_r)を調査したところ、解析対比おおよそ3%低い程度であり、電磁鋼板の特性劣化を加味しても2割は考えにくい。よって、解析精度にも起因すると考えられる。

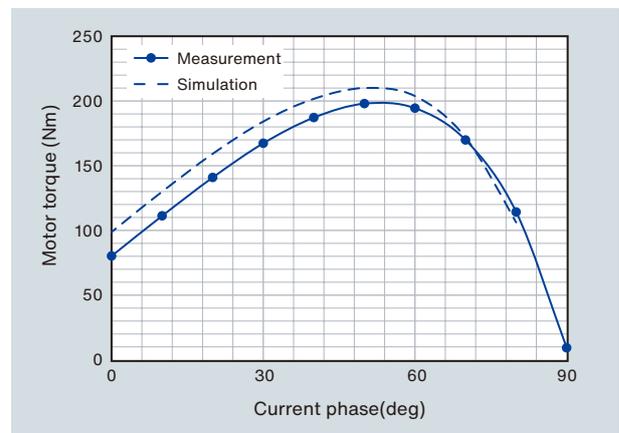


図11 試作したモーターの電流位相角 - モータートルク特性
Fig.11 Dependence of motor torque on current phase

図12に、4,800 rpm, 450 Armsで駆動させたときの出力と損失の分析結果を示す。なお、実測の鉄損には、分離しきれなかった機械損と漂遊負荷損が含まれている。また、解析結果のHigh Rdcは、図8中の検討②の解析結果である。Low Rdcに関しては後述する。その結果、出力は解析の105.5 kWに対して、101.7 kWとなり、解析対比96.4%の結果が得られた。効率に関しては、解析のHigh Rdc対比1.4%向上した。これは、銅損が大きく低下したためだと考えられる。銅損低下の理由として、解析に使用したリファレンスマーターと試作に使用したリファレンスマーターとで直流抵抗が異なっていた点、解析温度(75°C)と実測温度のずれが考えられる。検証のため、直流抵抗を試作時の値に変更して解析を行ったところ(図12のLow Rdc)、効率は93.6%であった。実測結果には、機械損と漂遊負荷損を含んでおり、解析結果よりも効率は低下する傾向がある。よって、解析(Low Rdc)と実測の効率はおよそ一致しているといえる。

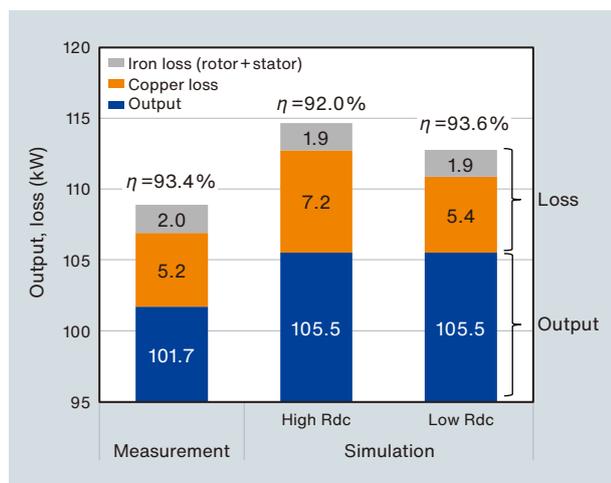


図12 試作したモーターの出力と損失

Fig.12 Output and loss for prototype motor

4. 結言

高性能フェライト磁石NMF-15のxEV主機モーターへの適用可能性について、市場に流通する110 kW出力のEVモーターをリファレンスとして、①同回転数条件、②同体積条件のモーターを設計した。①において、希土類磁石対比で低下するマグネットトルクを、リラクタンストルクの最大化によって補い、体積増加を1.43倍に留めつつ、同等出力の110 kWが得られる条件を得た。②において最大回転数を1.5倍の15,000 rpmとし、同回転数に耐えられる強度設計をすることで、体積の増加なくほぼ同等の105 kWの出力が得られる条件を得た。②のモーターを実際に試作、評価し、設計通りリラクタンストルクの向上を確認し、解析とほぼ同等である、102 kWの出力を確認した。以上より、100 kWを超える主機モーターにおいて、高性能フェライト磁石が適用可能であることを示した。今後、高性能フェライト磁石を希土類磁石が用いられているxEV用モーター以外の用途にも提案することで、資源リスク軽減と脱炭素化実現の両立をめざしたい。

※NMX, NMFおよびNEOMAXは株式会社プロテリアルの登録商標または商標です。

引用文献

- 1) プロテリアル技報, vol.38(2023), p.49.
- 2) 緒方,他:粉体および粉末冶金, vol.50(2003), No.8, p.636.
- 3) 小林,他:粉体および粉末冶金, vol.55(2008), No.7, p.541.
- 4) 大木俊治:日産のEV戦略とモーター開発の歩み ~ モーター開発を支えるJMAGへの期待 ~, JMAGユーザ会議(2017), p.2-1.
- 5) 榎本,他:電気学会論文誌D, vol.140(2020), No.5, p.410.



相牟田 京平
Kyohei Aimuta
株式会社プロテリアル
研究開発本部
グローバル技術革新センター



菊地 慶子
Keiko Kikuchi
株式会社プロテリアル
研究開発本部
グローバル技術革新センター
博士(工学)



釘持 茂
Shigeru Kemmochi
株式会社プロテリアル
磁性材料事業部



西内 武司
Takeshi Nishiuchi
株式会社プロテリアル
磁性材料事業部
博士(工学)



高畑 良一
Ryoichi Takahata
株式会社日立製作所
研究開発グループ
グリーンインフライノベーションセンタ
博士(工学)

MES導入によるケーブル製造ラインの品質予測と改善手法

Quality Prediction and Improvement for Cable Production Line by Introducing MES

東谷 雅春*
Masaharu Toya

児玉 壮平*
Sohei Kodama

製造業において、製造実行システム(MES: Manufacturing Execution System)は、さまざまな課題を解決する上で欠かせないものになりつつある。当社はこれまで、絶縁ケーブルの製造条件導出にCAE(Computer Aided Engineering)を活用し、品質の安定を図ってきたが、気温や湿度の変化、設備の経年劣化までは考慮できず、被覆材の引張試験特性(引張強さ、伸び)が安定しないという課題があった。本報告では、絶縁ケーブルの製造設備へのMES導入をきっかけに、当該製品で実施した品質改善結果について報告する。MESによるデータ収集とCAEによる解析を組み合わせる手法を構築したことで、従来比で引張強さを14%、伸びを10%向上させることができた。さらに、同様なデータ分析、解析手法を逐次実行することで、ケーブル全長の引張試験特性を予測する技術を開発、実用化することができた。

In the manufacturing industry, a MES (Manufacturing Execution System) is becoming indispensable for solving various problems. In the manufacturing process for insulated cables, the optimal conditions for obtaining consistent quality have generally been determined using a CAE (Computer Aided Engineering) approach. However, this does not take into account changes in temperature and humidity over time, or equipment deterioration, all of which affect characteristics such as the tensile strength and elongation of the coating material. The present study investigated the incorporation of a MES into the manufacturing process, and the improvement in quality that was achieved. By combining data collection by the MES and CAE analysis, improvements in tensile strength and elongation of 14% and 10%, respectively, were realized. Furthermore, by sequentially performing similar data analysis, we were able to develop and commercialize a technique for predicting the tensile characteristics of the entire length of a cable.

*
株式会社プロテリアル
電線事業部
Electric Wire & Cable Business
unit, Proterial. Ltd.

■ Key Words : MES, プラットフォーム, 全長品質予測

■ R&D Stage : Proto type

1. 緒言

製造業におけるDX(Digital Transformation)は、IoT(Internet of Things)やAI(Artificial Intelligence)の進歩とともに急速に広がっている。当社プロテリアルにおいても、絶縁ケーブル製品の品質改善を進めるにあたり、MESを導入し、プロジェクト体制で製造設備のデータを収集、解析に取り組んできた。被覆材の引張試験特性(引張強さ、伸び)で工程能力に課題があった製品を対象製品に選定し、モデル設備として被覆材ゴム混練機・押出機・架橋用電子線照射機・引張試験機を選定、検討を行ってきた。モデル設備において、センサーデータの保存、引張試験結果のデジタル化、収集データの可視化、上位システムとの連携等の必要性から、当社茨城工場データセンターにデータ分析基盤となるMESプラットフォームを構築した。プラットフォームの構築により、収集したデータはAIによる多変量解析等ができるようになった。

一方、センサー等で収集可能なデータとは別に、製造装置内部における樹脂の「流速」「せん断速度」「ひずみ」といった実測困難なデータも存在する。これらは、これまでCAE技術を活用して可視化¹⁾してきたが、理想的な特定条件下での計算値であり、気温や湿度、製造装置の経年劣化などの日々変化する外的因子が考慮されていないといった問題があった。また、ケーブルの引張強さや伸びといったデータは、ケーブル両端の測定結果で

検査・管理されており、ケーブル両端の間の変動が考慮されていない、という問題もあった。

本報告では、新しく構築したMESプラットフォームを紹介するとともに、被覆材の引張試験特性(引張強さ、伸び)を例に、このプラットフォームで生成したデータを利用して、品質向上を図る検討について報告する。また、MESプラットフォームで生成したデータにAI解析を実施して、ケーブル全長における品質(引張強さ、伸び)を予測する検討についても報告する。

2. MESを活用した品質課題改善のしくみとIoTネットワーク、MESプラットフォーム

ここではMESを活用した品質課題改善のしくみとIoTネットワークおよびMESに構築したプラットフォームについて説明する。

2.1 MESを活用した品質課題改善のしくみ

MESは一般的に11の機能(生産資源の配分と監視・文書管理・スケジュールリング・製造指示・作業管理・工程管理・データ収集・製品の追跡・実績分析・品質管理・保守管理)から構成される²⁾。本プロジェクトでは工程管理・データ収集・製品の追跡・実績分析・品質管理・保守管理の6機能を重点的に進めてきた。これら6機能のしくみから得たデータを中心に品質課題解決に向けたMES活用のしくみ(図1)を考案した。このし

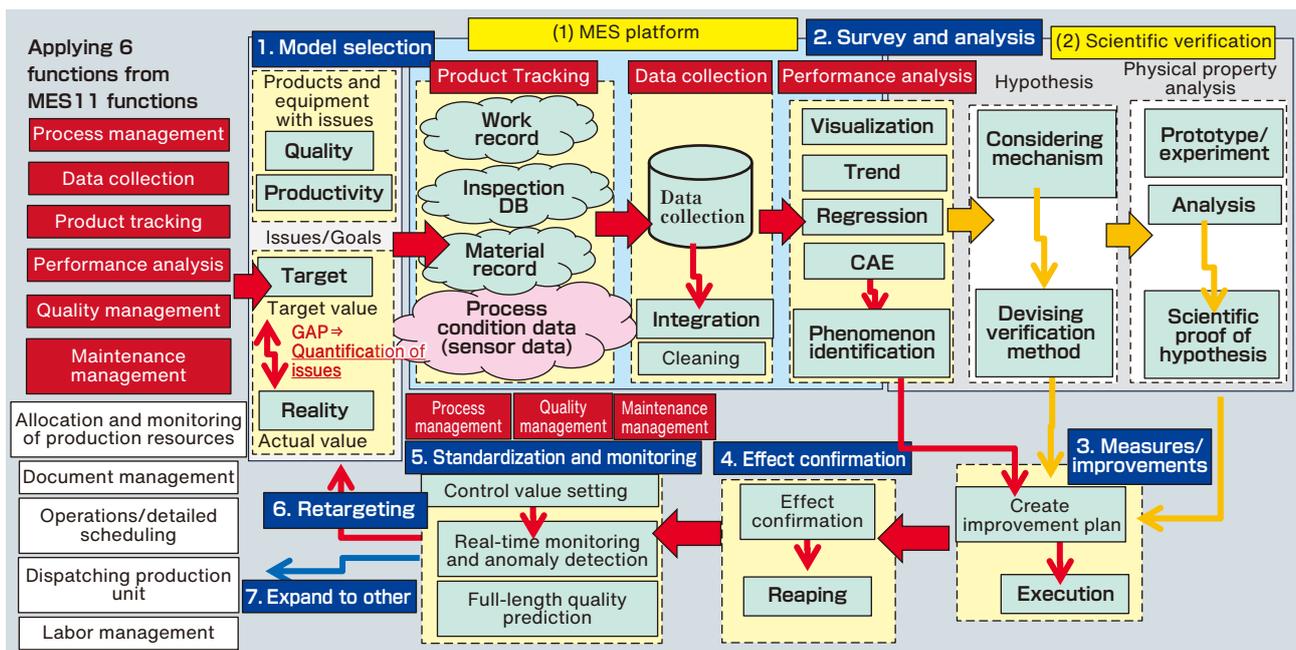


図1 MESを活用した品質課題解決のしくみ

Fig.1 Method for addressing quality issues using MES

くみはQC改善ストーリーをベースとして「モデルの選定」(Model selection),「現状把握・分析」(Survey and Analysis),「対策・改善」(Measurements/improvements),「効果検証」(Effect confirmation),「標準化とモニタリング」(Standardization and monitoring),「目標再設定」(Retargeting),「別のモデルへの展開」(Expand to other)から構成され,本報告事例でもこのストーリーに基づき活動を展開した。

2.2 IoTネットワーク

MES活用のしくみ構築にあたり「製品の追跡」「デー

タ収集」のベースとなるIoTネットワークについて説明する。当社のネットワークセグメントは大きく「OA系」「FA系」「FOA系」の3つに分類される。それぞれの定義と対象となるIT機器は表1の通りとなる。

当社工場のデータ通信は,有線LAN(Local Area Network)を使用したイーサネット通信が中心である。製造設備のセンサーデータは,主にデータロガーやPLC(Programmable Logic Controller)を利用して収集している。当初は,図2(a)で示すようにこれらデータ収集用デバイスから,USBメモリなどのメディアを使って人手でデータ回収をしていた。また,材料の入出庫・

表1 当社のネットワークセグメントの定義

Table 1 Our network policy

Segment	Policy	Examples of equipment
OA	Business systems	General PCs and printers, file server, business server, etc.
FA	IT equipment that handles data directly related to manufacturing	Manufacturing equipment such as sensors and PLCs Install server equipment to collect data
FOA	Control equipment for manufacturing equipment, etc.	Installation of PCs, servers, etc. for data linkage with the host system

Security is improved by partitioning the LAN and controlling communication with business systems using F/W.

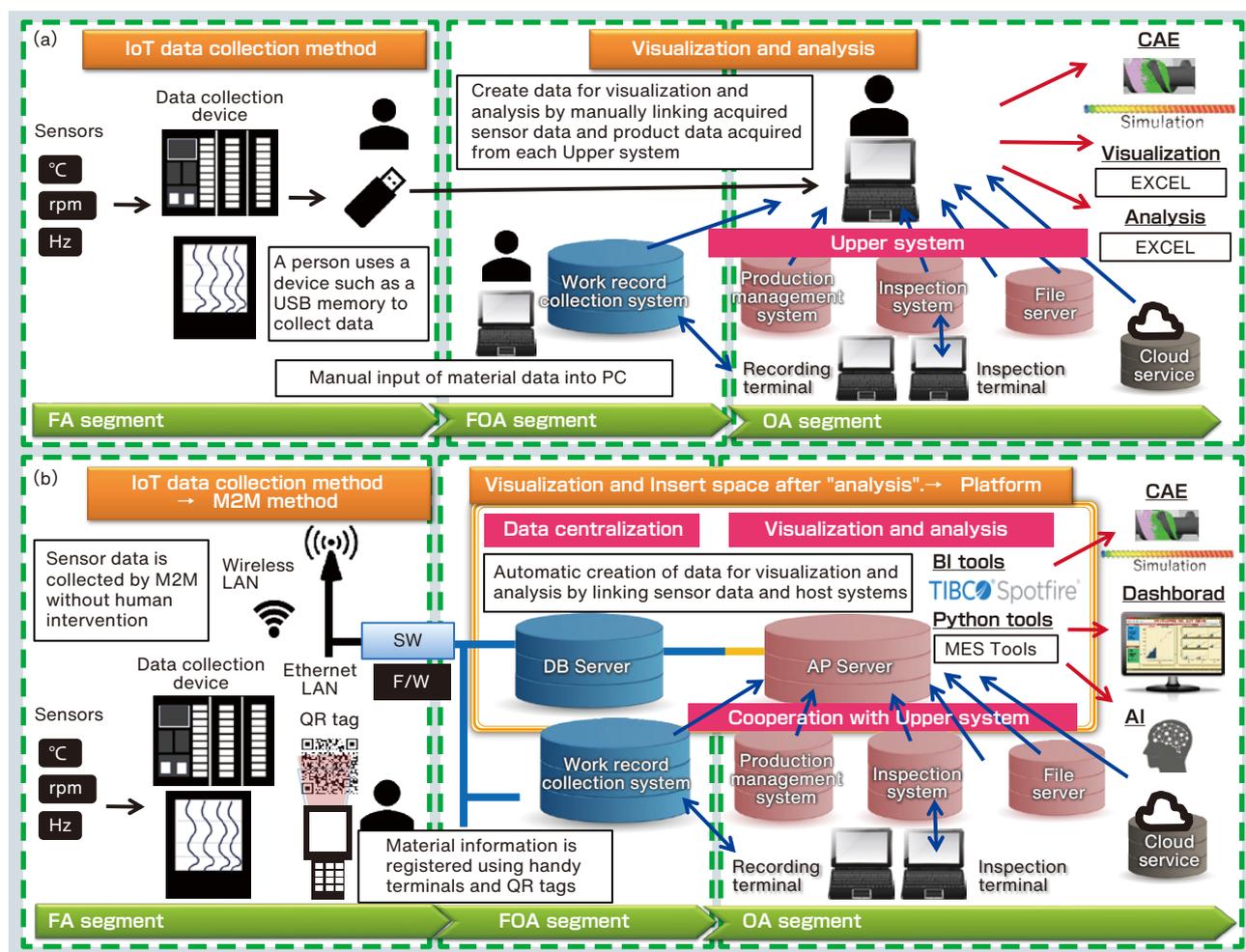


図2 ネットワーク構成 (a) MESプラットフォーム適用前 (b) MESプラットフォーム適用後

Fig.2 Network system overview (a) before applying MES platform, (b) after applying MES platform

使用記録もPC端末への手入力で行っていた。2017年以降、MES活用のしくみ構築に合わせて、国際通信規格IEEE802.11に準拠した2.4 GHz帯および5 GHz帯の無線LANアクセスポイントを工場建屋全体に配置した。図2(b)で示すように、データ収集用デバイスやハンディターミナルが無線接続されることで、各種データは人手を介さずM2M(Machine to Machine)通信で、常時回収・入力される環境を構築した。

2.3 MESプラットフォーム

ここではMES活用のしくみ構築にあたり「実績分析」のベースとなるMESプラットフォームについて説明する。

MESプラットフォームは、図2(b)の「上位システム」「DBサーバー」「APサーバー(アプリケーションサーバー)」の3つから構成される。「上位システム」は、当社で利用している生産計画・実績収集、および検査システムやクラウドサービスに該当する。「DBサーバー」は、①M2Mデータ通信でFA系機器から収集したデータと、②解析に使用するデータの両者のストレージとして使用する。「DBサーバー」は、FA系とOA系双方と接続する必要があるため、FOA系のネットワークセグメントで構築している。「APサーバー」は、データ作成・可視化・解析用サービスを提供しており、データ作成ツールである「MESツール」と、可視化・解析ツールである、「BI(Business Intelligence)ツール」の2つから構成される。

「MESツール」は、センサーログデータの取得・実績収集システムデータ等、上位システムとの連携・データクレンジング・統計的データへの加工・DBテーブルへの保存を同時に行うことができるツールであり、Python®*1でコーディングされたプログラムである。ケーブル製品は少量多品種で段取切替も多く、製造条件も複雑であるため、センサーログを品種・製造ロット単位で紐づけることが困難であり、解析精度が低くなる要因となっていた。「MESツール」によって、品種や製造ロット単位での紐づけが可能となり解析精度を高めることができた。

「BIツール」は、データを分析・可視化し、ビジネスにおける意思決定に活用するツールである。Cloud Software Group社の「TIBCO Spotfire®」*2を利用し、可視化・解析機能に加え、WEBサービスを利用した

ダッシュボードでのデータ共有を可能にした。現在、工場内で生産量実績と製造リードタイム実績を大型モニターに映し、生産進捗の常時把握に活用している。特に製造リードタイムに関しては、傾向の可視化だけでなく、異常値やボトルネックの抽出等要因の深掘り解析が容易になり、より早い改善アクションが可能となった。また、後述のケーブル全長品質の予測ツールとしても活用している。



図3 生産量・製造リードタイム 実績管理用ダッシュボード
Fig.3 Production "volume /" lead time performance management dashboard

3. ケーブル製造におけるCAE技術とIoT/AI技術の融合

3.1 ケーブル製造におけるCAE解析技術

MESプラットフォームの構築によって、ケーブル製造におけるセンサーログのデータ収集、DBサーバーへの自動入力を可能にした。本章では実際のセンサーログデータの活用方法についてCAE解析という視点から説明する。

一般に、ケーブルを製造する過程には、ケーブル被覆材料の混練工程、押出工程、架橋工程といった複数の工程が存在する。ケーブル製造の各工程では、材料の温度や樹脂圧力、押出スクリュウの回転数といった値は実測することが可能であり、これまでも製造時の値の変動を常時ロギングして確認している。しかし、混練や押出といった工程で重要なパラメータである、装置内での樹脂の「流速」「せん断速度」「ひずみ」といった値は実測が困難であり、また測定可能な温度や樹脂圧力においても測定箇所付近での値でしかなく、押出機内の「平均材料温度」や「最大樹脂圧力」といった値は不明である。そのため、状況を「可視化」するには数値シミュレーション技術(CAE)が必須となる。これまで当社では各工程に

*1 Pythonは、Python Software Foundationの登録商標です。
*2 Cloud Software Group社製セルフサービス型データ分析・可視化BIツール。データの前処理・解析・可視化・共有化が可能。導入・運用・保守サービスは株式会社日立ハイテク。TIBCO Spotfireは、Cloud Software Group, Inc.の登録商標または商標です。

においてさまざまなCAEを駆使することで、製造条件の適正化、新製品の開発を図ってきた¹⁾。図4は当社電線製造部におけるCAE技術の主な解析範囲である。

ここでは押出工程におけるCAEの活用技術について述べる。押出工程では単軸スクリー推し機を使用して、樹脂やゴムを芯線周囲に被覆している。図5は押出工程の概略図を示している。ホッパーより投入されたペレット状のケーブル被覆材料は、スクリー回転によって搬送、脱泡、熔融されて樹脂流れとなり、クロスヘッド内部で周方向に均等配分された後に走行している芯線周囲に被覆される。押出工程で制御するパラメータは、

主として押出スクリー回転数やシリンダ、クロスヘッドの温度、ケーブルのラインスピードがある。これらパラメータを制御することで規定外径のケーブルを製造する。

シリンダでは加熱によって材料を熔融させるが、ゴム材料など、熔融時に高粘度な流体となる材料は、せん断応力によって材料自体が自己発熱する。この発熱によって局部的に過剰な加硫反応が進行してゴム表面が荒れる、いわゆるゴム焼けと呼ばれる不良が発生する。そのため、シリンダの冷却効率を向上するとともに押出温度の適正化を図る必要がある。

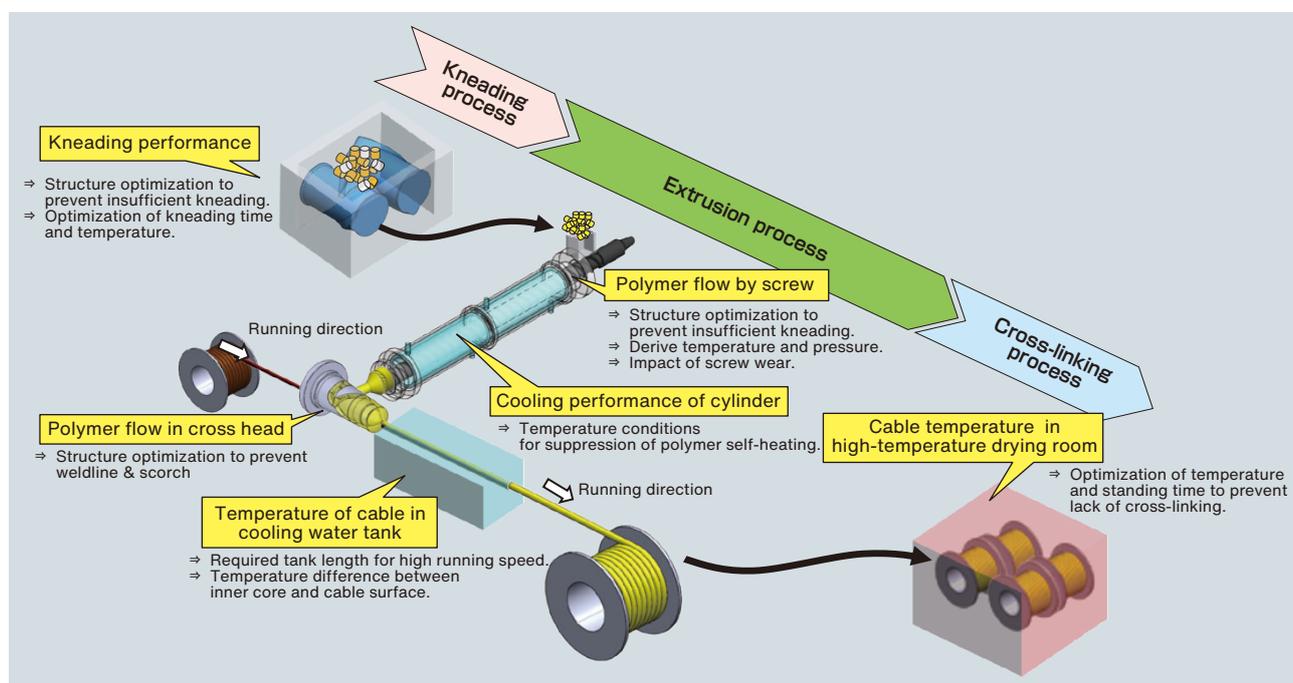


図4 電線製造部で取り扱っている CAE 技術の例

Fig.4 Example of CAE technologies in electric wire and cable production department

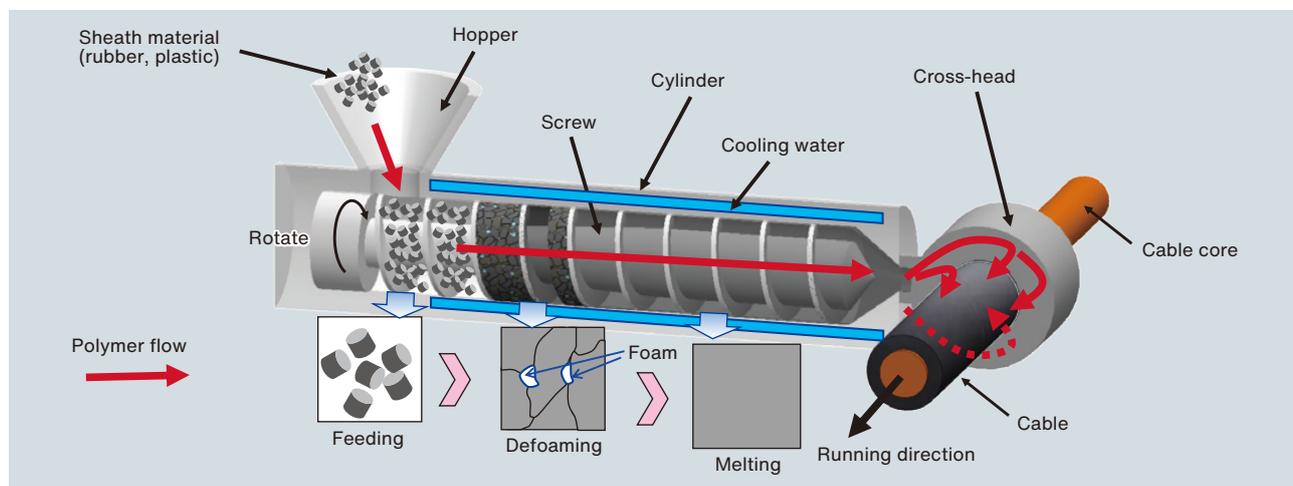


図5 ケーブル押出工程の概略

Fig.5 Schematic diagram of cable extrusion process

図6はCAEによるシリンダの冷却効率および押出機内材料温度を検討した例である。シリンダ内を流れる冷却水の熱流体シミュレーションを行い、実測困難である熱伝達係数を算出して冷却効率の向上を図った。また、押出機内樹脂流動解析を行うことで、温度測定箇所付近だけではなく押出機内全体の樹脂温度や最大樹脂温度を算出し、過剰発熱がないか確認した。その結果、シリンダ冷却構造や設定温度を適正化することでゴム焼けを抑制し、良好なケーブルを作製可能にした。

3.2 IoT(製造センサーログデータ)とCAE活用技術

従来の樹脂押出CAE技術は主として押出スクリーやクロスヘッドの構造適正化、あるいはスクリー回転数やシリンダ温度の条件適正化のために使われてきた。技術者がいくつかの製造条件でシミュレーションを行い、所望の結果が得られる条件については、実際に試作、確認を行い、製品の製造条件としてきた(図7)。

しかし、CAEにより導出した製造条件は、設定した解析条件下における限定的な最適化となってしまふ。そのため、設備の経年劣化や押出材料のロット間バラつき、気温や湿度の日々の変化といった外的要因を考慮すると、常に最適な条件であるとは言い難い。一例として絶縁ケーブルでは出荷時にケーブル末端の引張試験特性検査(引張強さ、伸び)をしているが、当初は導出した製造条件で良好な特性を満足していたにもかかわらず、経年とともに規格値割れを起こすことが度々みられるようになった。

そこで、従来のCAE技術の利用に加えて、新たに構築したMESプラットフォームを利用した製造条件の導出方法について検討した。MESとしてのIoT技術とCAE技術を組み合わせた方法を以下①～⑤と図8で示す。

- ① 「MESプラットフォーム」を利用して、センサーのロギングデータを収集する。
- ② 「MESツール」で、センサーのロギングデータと製

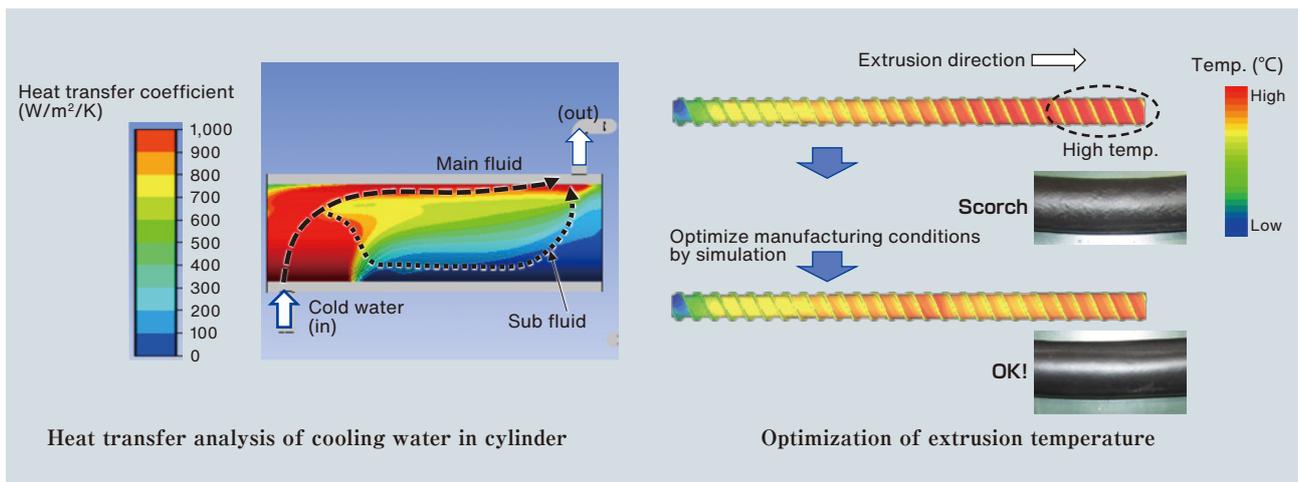


図6 押出工程での CAE 解析技術例

Fig.6 Example of CAE technologies in cable extrusion process.

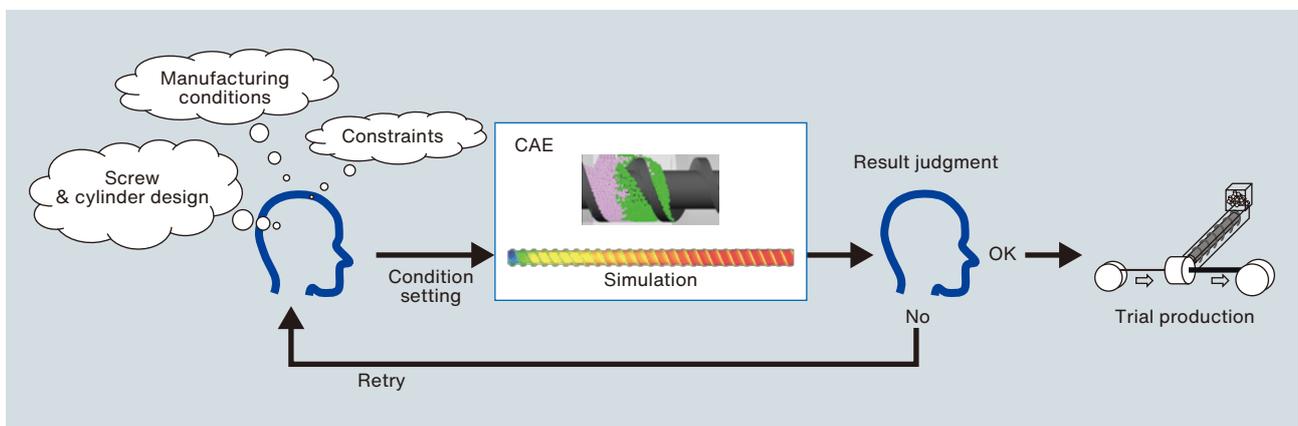


図7 従来の押出 CAE 技術の考え方

Fig.7 Conventional way of thinking about CAE technology

品ロットNoを紐づけする。紐づけした製品ロットNoごとに各パラメータの平均値を求めて特徴量とする。求めた特徴量は「DBサーバー」の解析データに格納する。[センサーログデータ: スクリュー回転数, シリンダ温度, ヘッド温度, ラインスピード, スクリュー先端樹脂圧力, 等]

- ③ 求めた平均値をシミュレーションソフトに入力, 導出されたシミュレーション結果を追加特徴量として, 「DBサーバー」の解析データに格納する。(シミュレーションデータ: 材料せん断応力, 押出機内滞留時間, 押出機内材料平均温度, 最大樹脂圧力, トルク, 等)
- ④ 各製品ロットNo.の引張試験特性(引張強さ, 伸び)を解析データにマージする。
- ⑤ 各パラメータ平均値である特徴量とシミュレーションで導出した追加特徴量を説明変数, 引張試験特性を目的変数として多変量解析を実施, 引張強さや伸びと相関のある特徴量を特定する。

実際に, 絶縁ケーブルの引張試験特性検査に適用した例を図9~11に示す。引張強さと引張伸びのトレンドを図9(1)に示す。同図中のAに示すように過去CAEで導出した旧条件では明らかに伸びの特性が劣化していることが分かる。

そこで, 過去の製造ロギングデータすべてにおいて①~⑤を実施し, 「材料せん断応力」「押出機内滞留時間」などの追加特徴量を導出し, 多変量解析を行った。引張伸びと相関のある特徴量を検討した結果, 押出機内の滞留時間と引張伸びの相関が見られた(図10)。また, 滞留時間はスクリュー回転数と相関があった(図11)。これらの結果からスクリュー回転数を増加させて押出機内滞留時間を短くすれば伸びを増加させることが示唆された。

スクリュー回転数を増加させた条件で押し出した結果が図9(2)である。引張伸びの平均を従来よりも10%向上し, 品質改善を実現した。

また, 滞留時間が増加した原因としてスクリューの経年劣化が考えられる。スクリューの径が大きい場所(フライト山部)が摩耗すると, 搬送力が弱まって滞留時間の増加やせん断応力の低下(図12)による材料の練り不足につながるためである。そこでスクリューを更新し, 押出条件を適正化したところ, 図9(3)の通り引張強さの平均も従来よりも14%改善することができた。

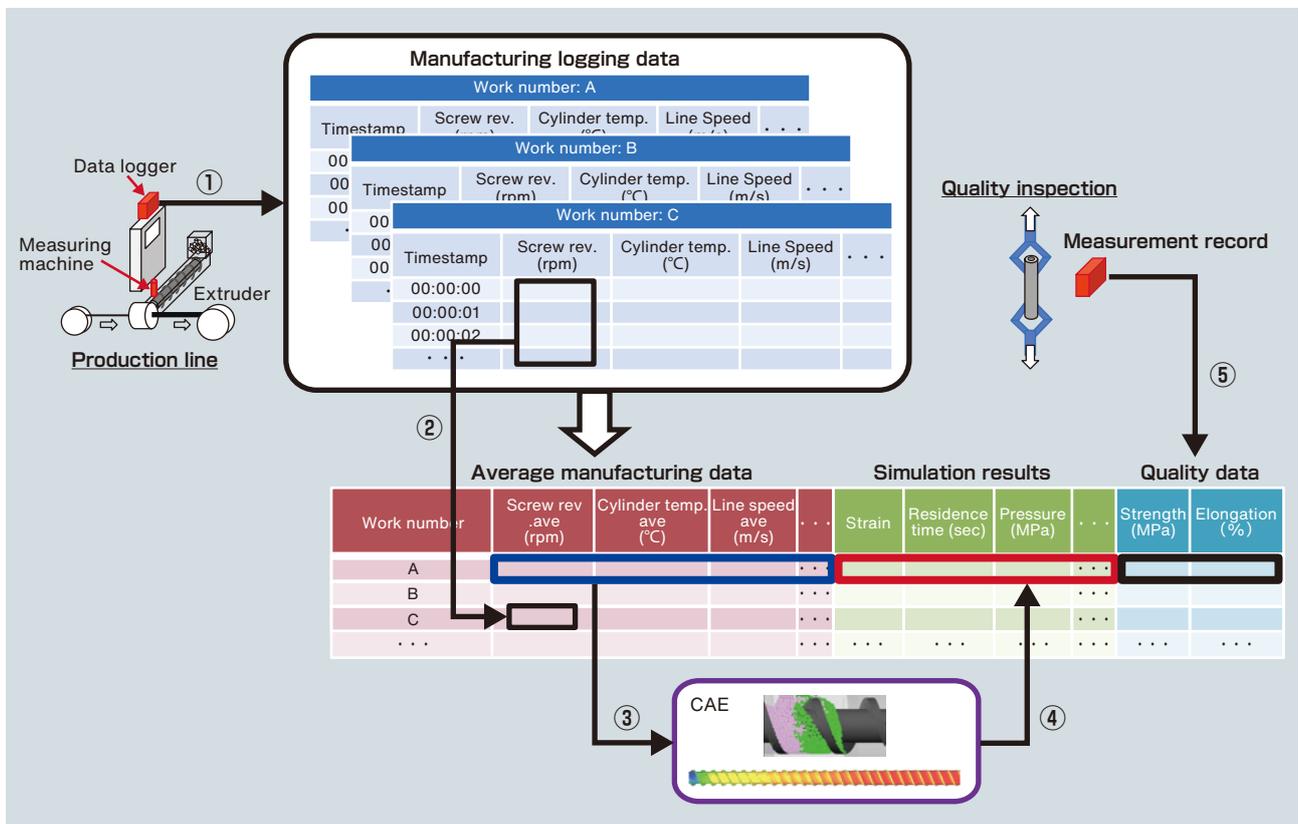


図8 IoT 技術と CAE 技術の組み合わせ

Fig.8 Fusion of IoT technology and CAE technology

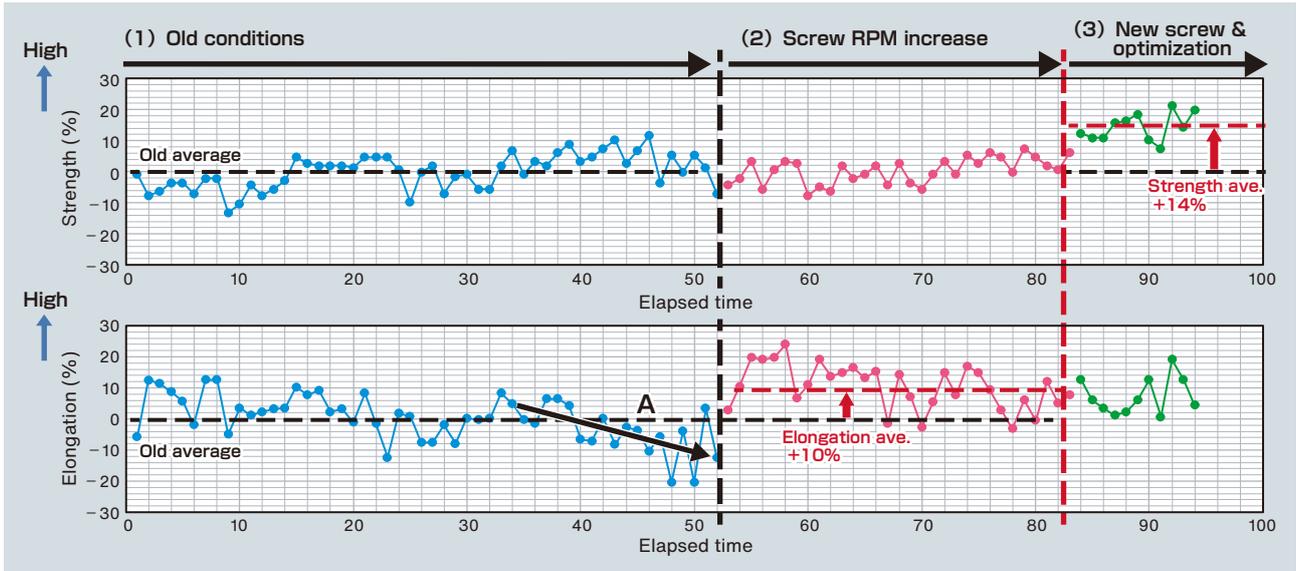


図9 引張強さ、伸びのトレンド
Fig.9 Strength and elongation trends

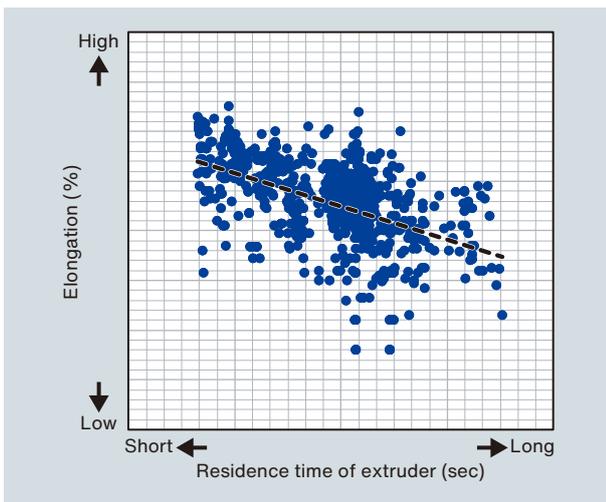


図10 押出機内滞留時間と伸びの相関
Fig.10 Residential time in extruder vs elongation

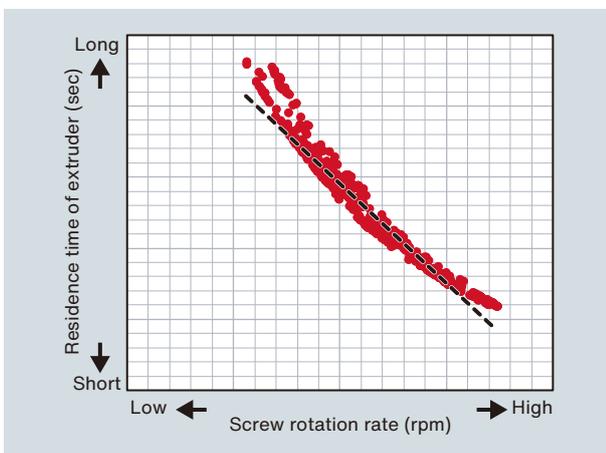


図11 スクリュー回転数と押出機内滞留時間
Fig.11 Screw rotation rate vs. residence time in extruder

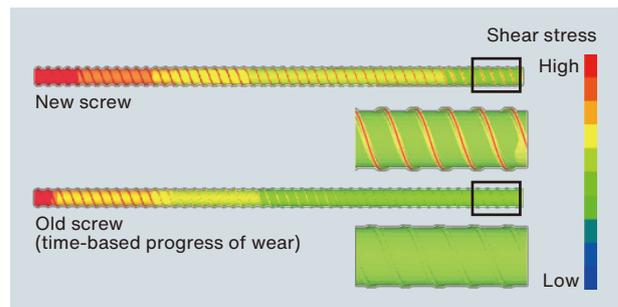


図12 スクリュー摩耗によるせん断応力低下
Fig.12 Decrease in shear stress by screw wear.

4. AI活用によるケーブル全長品質予測技術

4.1 ケーブル全長品質予測の考え方

3章では製造トレンドデータの各条件とIoT技術、CAE技術を融合させることで品質向上を図った。一方、測定した品質は端末に限ったものであり、ケーブル全長において同様の品質を保証しているものではない。一般にケーブルのような長尺品では外径や静電容量といった製造中の全時刻で実測できる特徴量でしか全長を保証できない。

そこでAI機械学習を用いて、これまでは端末でしか保証できなかった引張強さや伸びのケーブル全長における品質を予測し保証するための技術を検討した(図13)。

4.2 ケーブル全長品質予測技術

3章で実施したCAE解析結果を追加特徴量としてみなす手法を応用し、センサーログデータから一定間隔ごとに抽出した値を解析条件としてシミュレーションを行い、連続的な説明変数として扱うことを考案した。さらにセンサーログデータとシミュレーションデータ、AI機械学習を用いて全長予測技術を実現する。全長品質予測に向けた具体的なステップを図14に示す。

ステップ1: 実測可能なセンサーログデータ(スクリュー回転数, 樹脂圧力, シリンダ温度, 等)から一定時間を抽出し連続解析を実施する。

ステップ2: シミュレーションにより算出したデータ(押出機内の材料せん断応力, 滞留時間, 平均材料温度, 等)とセンサーログデータを用いて品質に寄与する特徴量をAIで抽出する。

ステップ3: 品質と相関のあるモデルを作成し, 実測値と予測値を比較する。

ステップ4: モデルが妥当である場合, 全製造時間で品質を予測する。全製造時間で品質の規格を満足していれば, 全長品質予測が可能である。

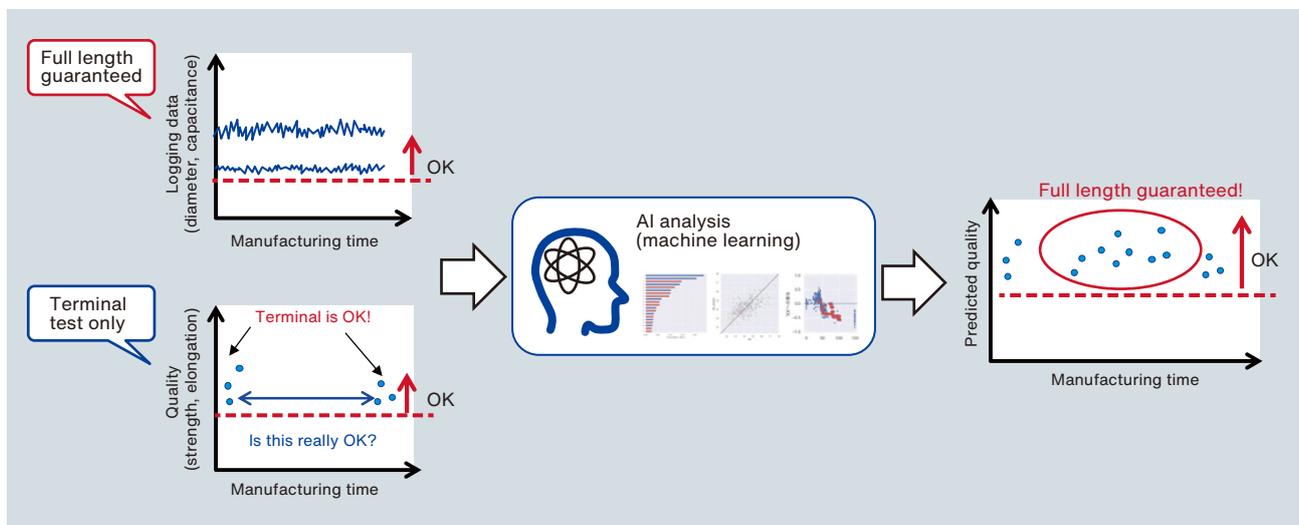


図13 全長品質予測の考え方

Fig.13 Concept of full-length quality prediction

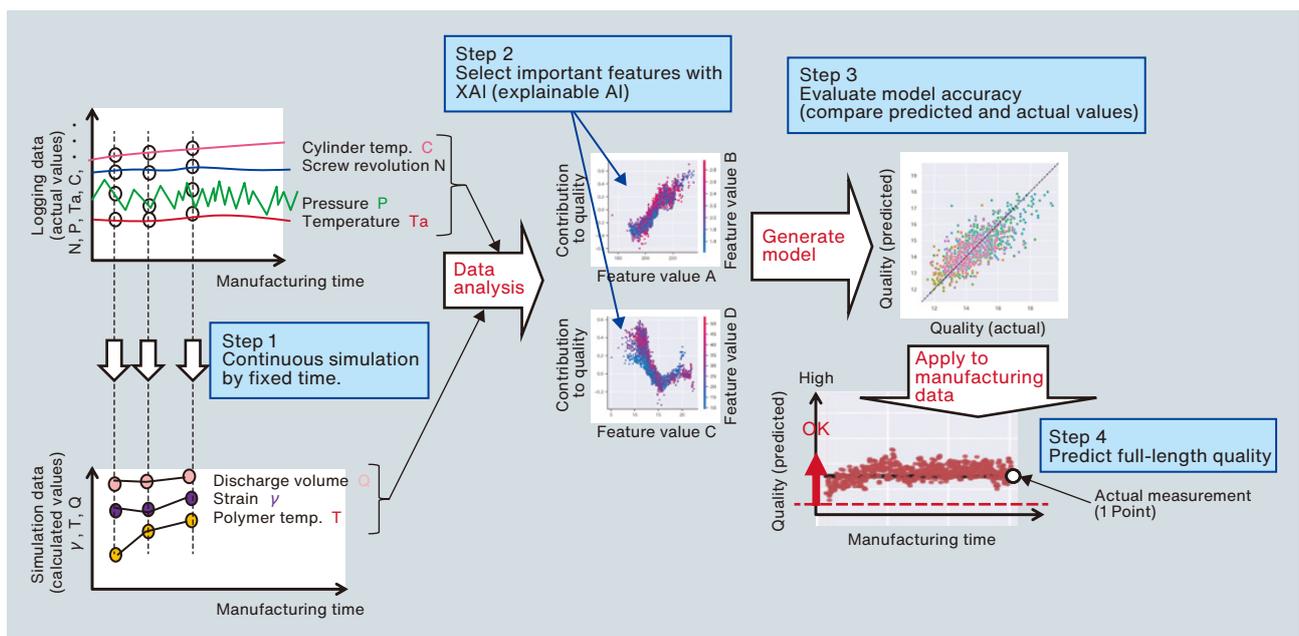


図14 全長品質予測の流れ

Fig.14 Process flow for full-length quality prediction

図15は実際にステップ1を行った結果である。実際の製品採取時前の段取り時間から計算を行っているが、解析結果は製品採取時の変化をしっかりと表現できており妥当といえる。

図16は日立製作所の解析支援により開発したAI分析ツール(SHAP AI)を用いて、引張強さ、伸びそれぞれ

に影響を与える要因を抽出したステップ2の例である。横軸が各特微量の値、縦軸が寄与度を示している。

3.2項で説明した通り、伸びはスクリー回転数が大きい(=滞留時間が短い)ほど高くなる傾向があることが分かる。また樹脂圧力やモーター駆動力といった単独で寄与が高い特微量もあれば、回転数をトルクで割った

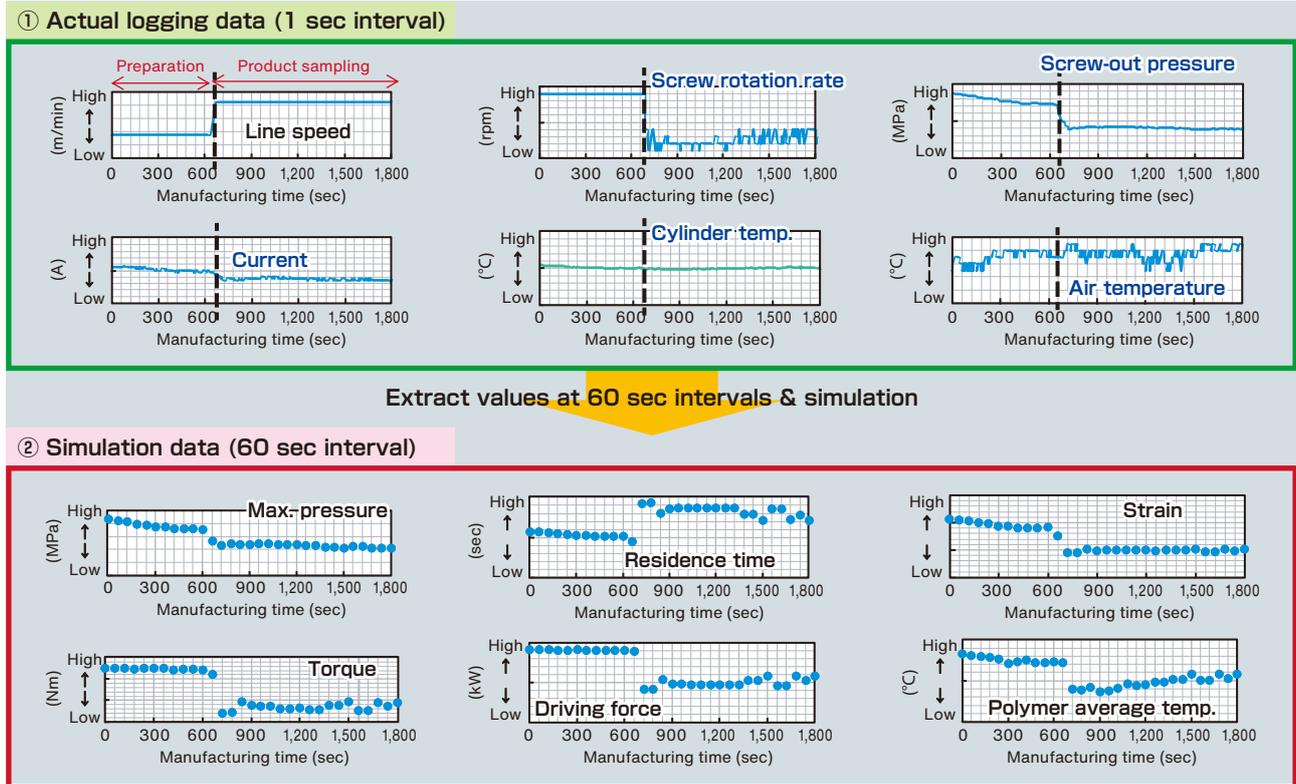


図15 連続解析によるシミュレーション値導出
Fig.15 Derivation of CAE data by continuous analysis

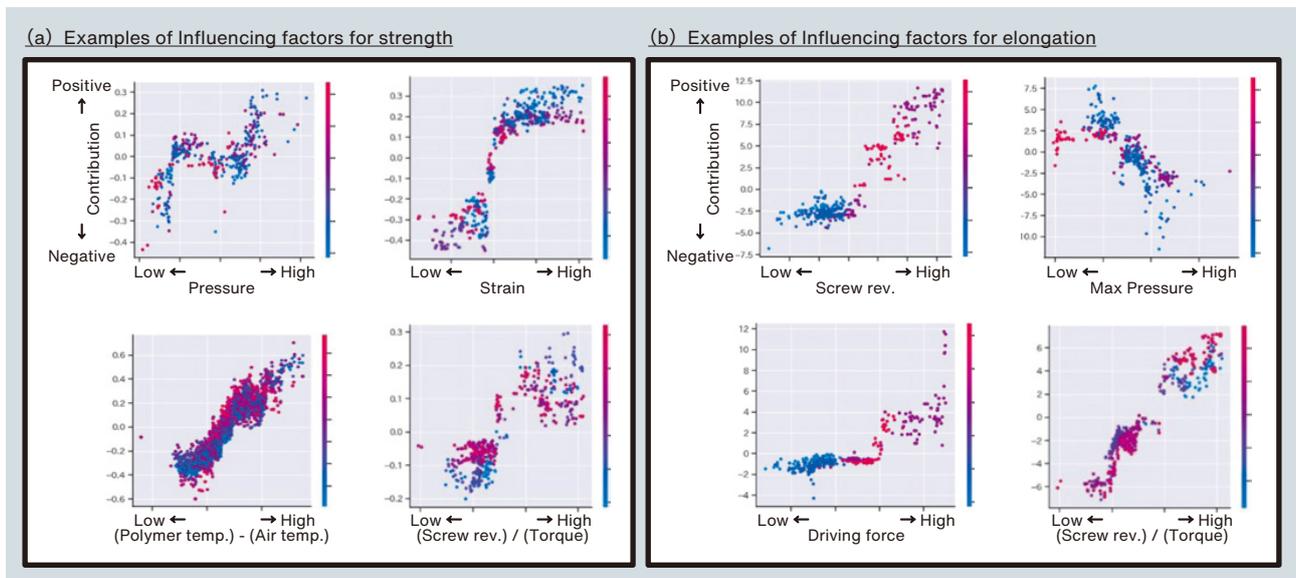


図16 引張強さ伸びに寄与する特微量導出 (a) 引張強さ (b) 伸び
Fig.16 Important factors contributing to (a) strength, (b) elongation

値、樹脂温度と気温の差といった複数の特徴量の四則演算で寄与が高くなる特徴量があることも分かる。

図17は同AI分析ツールを用いて学習モデルを作成し、引張強さと伸びの予測値と実測値を比較した結果である。引張強さ、伸びの予測値と実測値のずれ(決定係数 R^2)は0.79, 0.88程度となった。概ね学習したデータで引張り強度と伸びの値を予測することが可能といえる。

図17で作成したモデルをとある製造ケーブルの全長に適用した結果が図18である。同図に示す通り、従来は端末でしか測定できなかった品質が全長にわたって予想できるようになった。

最後に今回作成した全長品質予測ツールをBIツール(Spotfire)に組み込み、現場モニターで表示させた結果を図19に示す。同図左にはこれまでに作製した全ケーブルの引張強さ(横軸)と伸び(縦軸)を散布図で表

示しており、作製したケーブルの製品ロットNoをクリックして選択するとそのケーブルの全長の引張強さと伸びの予測値が表示され、現場作業者が異常の有無を確認

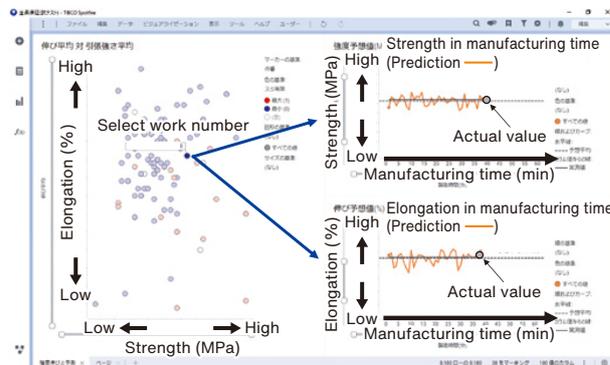


図19 ツールによる引張強さと伸びの予測値表示

Fig.19 BI Tool presenting prediction results for strength and elongation

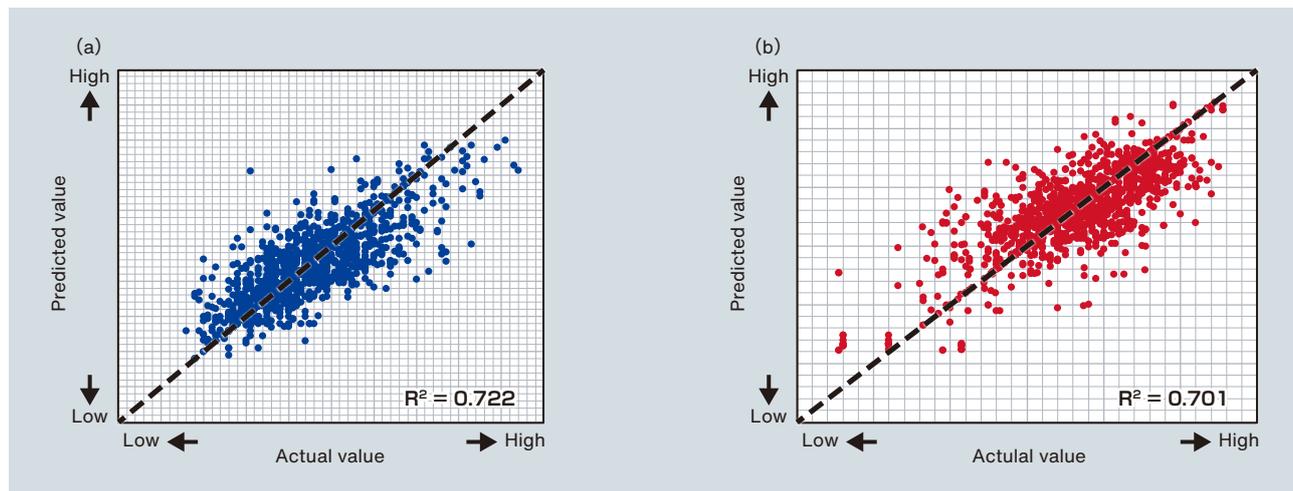


図17 実測値と予測値の比較 (a) 引張強さ (b) 伸び

Fig.17 Comparison of predicted and actual values (a) strength, (b) elongation

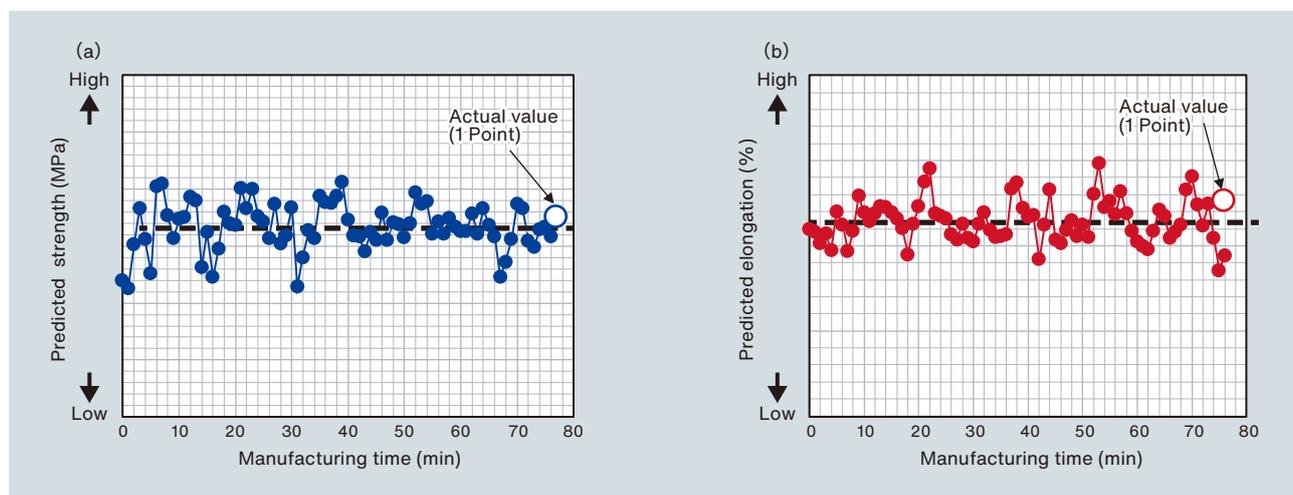


図18 製造全時刻における引張強さと伸びの変化予想 (a) 引張強さ, (b) 伸び

Fig.18 Prediction results for all periods (full-length) in manufacturing time: (a) strength, (b) elongation

認できるようにした。今後は本ツールを他の押出設備にも展開していき、従来は端末検査でしか確認できなかった品質を全長で確認できるようにしていきたい。

5. 結言

新しくMESプラットフォームを構築し、ケーブル被覆材の品質(引張強さ、伸び)を例に、プラットフォームで生成したデータとCAEによる解析結果を利用して、品質向上を図る検討をおこなった。その結果、品質が改善し、工程能力向上に寄与することができた。また、MESプラットフォームで生成したデータにAI解析を実施して、ケーブル全長における品質(引張強さ、伸び)を予測する検討をおこなった。その結果、全長の品質の予測と異常検知が可能となった。

現在、MESプラットフォームは当社ケーブル製造部門での共通化を進めており、モデルの絶縁ケーブルだけでなく他部門での利用も開始している。将来的には工場全体をカバーするような拡張を進める予定である。IoT、AI、CAEの融合によるケーブル全長の品質予測技術は、リアル空間(IoT)の情報を利用して、サイバー空間(CAE、AI)に仮想的なケーブルを再現する「デジタルツイン」技術とも言える。ケーブルのような長尺製品では、引張試験のような破壊検査は製品の端末でしか実施できないため、製品全長での品質予測だけでなく、生産ラインの異常検知にも有効である。当社では、ケーブル以外にも長尺製品が多くラインナップされているため、このデジタルツイン技術を応用し、他製品への展開も計っていきたい。

6. 謝辞

本検討においては、MESプロジェクト開始当初から、株式会社日立製作所殿にMESプラットフォーム開発、解析支援に多大な協力をいただいた。その中でも解析用データを作成しデータベース化する「MESツール」、AI分析ツールである「SHAP AI」は、本検討の課題解決に大きく貢献した。株式会社日立製作所殿の協力に感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 日立金属技報 vol.36(2020), pp.42-47.
- 2) MES生産実行システム基礎講座 株式会社ヒュージョンテック(2018)pp.25-40.
(参考サイト2023/9時点)

<https://www.quest9.sakura.ne.jp/quest/lib/execute.php?media=%E7%94%9F%E7%94%A3%E7%AE%A1%E7%90%86%E3%83%86%E3%82%AD%E3%82%B9%E3%83%88.pdf>



東谷 雅春
Masaharu Toya
株式会社プロテリアル
電線事業部



児玉 壮平
Sohei Kodama
株式会社プロテリアル
電線事業部

表面被膜付きパーメンジュールの開発

Development of Permendur with Surface Coating

矢ヶ部 秀隆*
Hidetaka Yakabe

藤原 義行*
Yoshiyuki Fujihara

竹原 隆司*
Ryuji Takehara

上坂 修治郎*
Shujiroh Uesaka

藤井 和也*
Kazuya Fujii

モーターコアに使用するMgO膜付きパーメンジュール帯材を製造するための塗工液、被膜形成条件を検討するとともに、被膜形成材の電氣的絶縁性、磁性焼鈍時の耐固着性および、軟磁気特性を評価した。塗工液にはMg(OH)₂粉末を分散したスラリーを使用でき、450°Cの熱分解反応によりMgO膜を形成できる。また、被膜形成材は高い表面抵抗率と耐固着性を有する。さらに、Roll to Rollプロセスで試作した被膜形成材(幅245 mm, 板厚0.1 mmコイル材)は、パーメンジュールの優れた軟磁気特性が維持されることを確認した。

The effects of the coating fluid and conditions used to form a MgO film on Permendur alloy on the electrical insulation, adhesion resistance following magnetic annealing, and the soft magnetic properties of the coated specimen were investigated. The coating fluid was a slurry containing Mg(OH)₂ powder, and MgO films were produced by heating and dehydrating at 450 °C. The coated films were found to exhibit high surface resistivity and adhesion resistance. Using a roll-to-roll process, a Permendur plate with a width of 245 mm and a thickness of 0.1 mm was coated with a MgO film, and it was confirmed that the soft magnetic properties of the original alloy did not deteriorate.

*
株式会社プロテリアル
特殊鋼事業部
Specialty Steel Business Unit,
Proterial, Ltd.

■ Key Words : MgO, 電氣的絶縁性, 耐固着性
■ Production Code : YEP[®]-2V

■ R&D Stage : Prototype

1. 緒言

1.1 背景

2015年の気候変動枠組条約締約国会議(COP21)では気候変動抑制に関する多国間の国際的な協定として、人為的な温室効果ガスの排出と吸収源による除去の均衡を達成するネットゼロ(カーボンニュートラル)が採択され、2030年に温室効果ガス排出量を半減、2050年にネットゼロを目標としている¹⁾。カーボンニュートラルのための技術開発分野のひとつが電動化であり、例えば、電気を動力源にしたバッテリー電気自動車(BEV: Battery Electric Vehicle)や電動垂直離着陸機(eVTOL: Electric Vertical Take-off and Landing)がある²⁾。BEVやeVTOLの電動モーターには小型化や高出力化が要求されるため、広く普及している電磁鋼板よりも高い飽和磁束密度(B_s)を有する軟磁性材料が注目されている。その材料が組成式Fe-49Co-2V mass%のパーメンジュールであり、当社はYEP[®]-2Vの製品名で磨き帯鋼を製造、販売している。

1.2 開発の目的

図1は電動モーターとモーターコアの概略図である。パーメンジュールはモーターコアに用いられ、帯材を積層した積層コアが主流である。しかし、モーターコアに適用する場合、大きく二つの課題がある。一つ目は、磁性焼鈍による帯材の固着である。パーメンジュールは、冷間圧延により導入される歪みの除去や再結晶化することで軟磁気特性が向上するため、磁性焼鈍を施す必要がある。この際、多数枚の帯材を重ねた状態で

磁性焼鈍されるが、重ねた帯材同士が固着するため固着防止(耐固着性)の対策を行う必要がある。二つ目は、積層コアの鉄損増加である。鉄損はヒステリシス損失と渦電流損失に分離され、渦電流損失は板厚の二乗に比例する。そのため、積層した帯材が導通すると渦電流損失が増加するため、積層した帯材間の電氣的絶縁性を確保し、渦電流損失を抑制する必要がある。これら二つの課題に対する対策として、酸化マグネシウム(MgO)膜を表面に形成したパーメンジュールが提案されている³⁾。軟磁性材料に被膜を形成する方法としては、例えばパーマロイにMgO、MgCO₃、Mg(OH)₂粉末を含有するスラリーを塗布・乾燥し、熱処理によりMgO膜を形成する報告がある⁴⁾。しかし、パーメンジュールにMgO膜を形成する塗工液や熱処理に関する報告は知られていないのが実情である。

表面被膜付きパーメンジュールとして必要な特性は上述の通り、電氣的絶縁性、磁性焼鈍時の耐固着性に加えて、被膜形成してもパーメンジュールの優れた軟磁気特性が維持されることである。当社プロテリアルは、これらの要求を満足できるMgO膜付きパーメンジュールを開発中であり、本稿ではMgO膜を形成するための塗工液、被膜形成条件の検討結果および、試作したMgO膜付きパーメンジュールの電氣的絶縁性、耐固着性および、軟磁気特性について報告する。

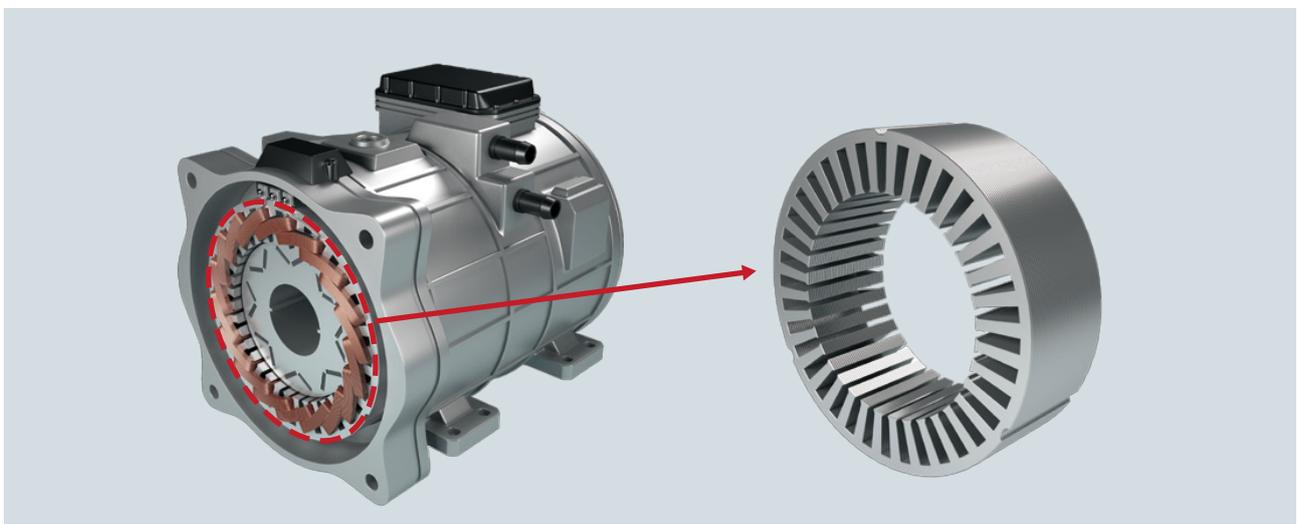


図1 電動モーターとモーターコアの概略図

Fig.1 Schematic diagram of electric motor and motor core

2. 実験方法

被膜形成方法は、ドライプロセスとウェットプロセスに大別される。前者は塗工対象物(基材)に真空中で膜付けする方法であり、大型化や連続生産性に制限がある場合が多い。後者は、大気圧環境下で塗工、乾燥することで膜付けが可能のため、設備の大型化や基材の供給を連続的に行うRoll to Rollプロセスが可能で量産性に優れる⁵⁾。本検討では、最終的にRoll to Rollプロセスを想定しているためウェットコーティングを選定することとした。検討の流れは、まず実験室スケールの枚葉コーティングにより塗工液や被膜特性の基礎検討を行った後、Roll to Rollプロセスで被膜付きコイルを試作し軟磁気特性を評価した。

2.1 被膜形成

塗工液の検討は、固形分であるMgO粉末および、MgO膜の前駆体となるMgCO₃、Mg(OH)₂粉末の粒径を測定した。次に固形分を水溶媒に分散したスラリーを作製した後、目視により固形分の分散状態を観察し塗工液への適用可否を判定した。MgO膜の形成は基材準備、塗工、乾燥、焼付けの順に行った。ここで、焼付けとは前駆体からMgOを生成するための熱処理を指す。まず、板厚0.1 mmのYEP-2Vを脱脂洗浄し塗工用基材とした。次に、Dipコーティングにより塗工液を基材両面に塗布・乾燥した後、窒素雰囲気中で焼付け処理を行うことでMgO膜を形成した。なお、膜厚の調整は、塗工液に浸漬した基材を引き上げる際の引上げ速度の調整により行った。焼付け温度は、塗工液に用いる固形分粉末の示差熱-熱重量同時測定(TG-DSC; Thermogravimetry-Differential

Scanning Calorimetry)の測定結果から決定した。被膜の定性分析は、X線源にCo-K α を用いたXRD(X-Ray Diffraction)の2 θ 法により行い、膜厚は走査型透過型電子顕微鏡(STEM; Scanning Transmission Electron Microscope)を用いた断面観察から求めた。

2.2 電氣的絶縁性

抵抗率計を用いて四探針法で表面抵抗率を測定した。プローブはJIS K 7194対応品を用いた。

2.3 耐固着性

耐固着性は図2に示す手順で行った。①50 mm×50 mmと40 mm×50 mmのサイズが異なる被膜有り、被膜無しの帯材を1セットずつ準備する。②アルミナプレート上にそれぞれを重ねてセットし、その上に重りとしてアルミナプレートを配置する。③磁性焼鈍(水素雰囲気中で850°C、3時間保持、炉冷)を施す。④取り出した試験片の片方をクリップで挟んで持ち上げ、もう片方が落下する場合を固着無し、落下しない場合を固着すると判定した。なお、③で重りを設置する目的は、量産工程を想定すると、多数枚の帯材を重ねて磁性焼鈍するため、帯材には自重による荷重が負荷されることを模擬するためである。また、本試験では炉体サイズの制約上、使用できる重りの枚数が制限されるため、負荷可能な最大面圧の1,000 Paで評価した。

2.4 磁気特性評価

2.4.1 評価材の作製

評価材は、Roll to Rollプロセスで作製したコイル材から採取した。コイル試作は、基材に板厚0.1 mm、幅245 mmの冷間圧延コイルを用いた。塗工および乾燥

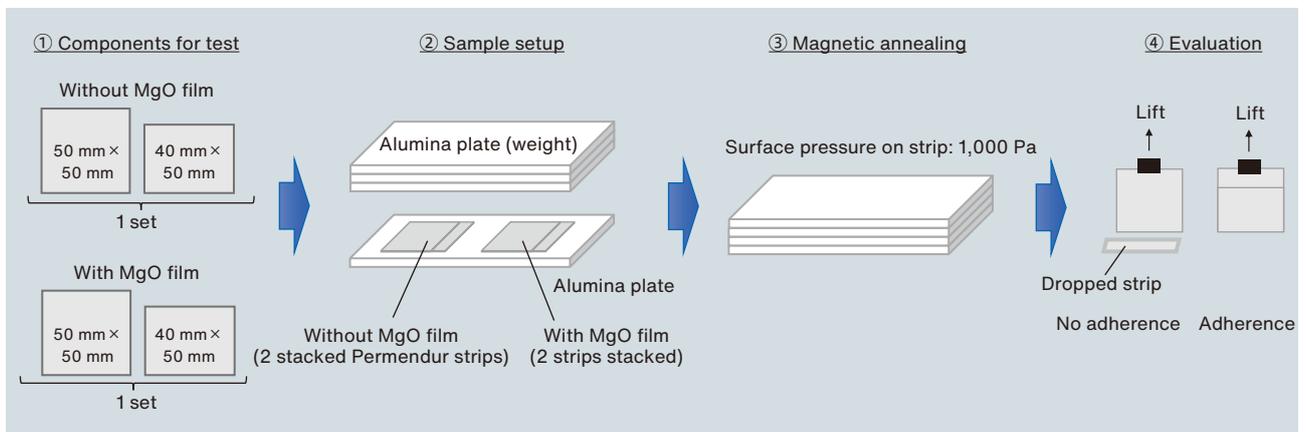


図2 耐固着性の評価手順

Fig.2 Procedure for evaluating adhesion resistance

はグラビア方式を用い、基材の両面に片面ずつ塗工、乾燥した。続いて、焼付け処理を行うことでMgO膜を形成した。形成したMgO膜の膜厚は0.75 μmである。

2.4.2 直流磁気測定

飽和磁束密度 B_s の測定は、単板試料を用いたヨーク法で行った。保磁力 H_c および最大比透磁率 μ_m の測定は、MgO膜による反磁界の影響を排除するためトロイダルコアを作製し評価に供した。単板試料は、得られたコイル材から幅25 mm、長さ110 mmの試験片を採取し、磁性焼鈍（水素雰囲気中で850°C、3時間保持、炉冷）を施した後、最大外部磁場10,000 A/mを印加し飽和磁束密度 B_s を測定した。トロイダルコアは45 mm、内径33 mmのリング試験片を10枚採取し、上記と同じ条件で磁性焼鈍を施した。その後、試験片をプラスチックケースに重ねて収め、1次50回と2次100回の巻き線を施し、800 A/mの最大外部磁場を印加した。なお、磁気特性評価の比較材は被膜無し材としており、重ねたリング試験片には層間絶縁紙を挟んでいる（被膜有り材の場合は、層間絶縁紙を使用していない）。

2.4.3 交流磁気測定

上記のトロイダルコアを用いて鉄損 W を評価した。条件は、磁束正弦波にて励磁周波数 f が50~1,000 Hz、動作磁束密度 B_m は2.0 Tで測定した。

3. 結果

3.1 被膜形成

積層コアでは占積率が高いことが望まれるためMgO膜を薄くする必要がある。一方、薄すぎると塗工の難易度が上がるため本検討では膜厚下限の目標を0.1 μmとし、これを達成可能な塗工液を検討した。表1に固形分粉末としてMgO、MgCO₃、Mg(OH)₂を用いた塗工液の試作結果を示す。固形分にMgO粉末を用いた場合、粉末が水和しゲル状になるため塗工液への適用は

不可と判断した。また、MgCO₃粉末の場合は、MgCO₃の結晶性の高さから粒径が約0.5 μmの粗大粒しか得られず、そのような固形分からは0.1 μmの薄膜は形成できないため塗工液への適用は不可と判断した。一方、Mg(OH)₂を用いた場合は、粒径0.1 μm以下で水溶媒に安定分散した塗工液が得られたことから、被膜形成の検討に用いることとした。

図3はMg(OH)₂粉末のTG-DSC測定結果である。432°Cに吸熱ピークと重量減少が確認され、これらはMg(OH)₂→MgO+H₂Oの熱分解反応の吸熱および、副生成物であるH₂Oの放出によるものである⁶⁾。この結果から、焼付け温度を450°CとすることでMgO膜を形成可能である。続いて、実際に帯材にスラリーを塗工し、MgO膜の形成に必要な焼付け時間を調べた。図4はXRDスペクトルであり、図中の●、◆、■はそれぞれ基材(bcc FeCo)、固形分のMg(OH)₂、MgOに起因する回折ピークである。測定には被膜厚さが0.75 μmのサンプルを用いており、被膜が薄いため基材のピークも観測されている。焼付け時間が0分（焼付け無し）および1分では六方晶系のMg(OH)₂に特徴的な回折パターンを示し、熱分解反応が不十分で未反応のMg(OH)₂が残っている。一方、焼付け時間5、10、20分で

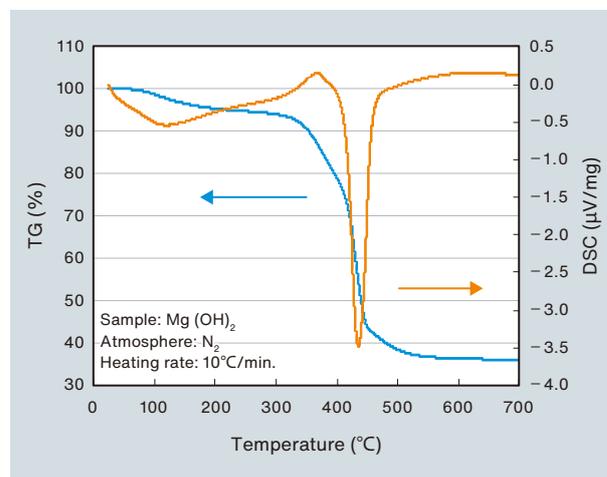


図3 Mg(OH)₂粉末のTG-DSC測定結果

Fig.3 TG-DSC measurement results for Mg(OH)₂ powder

表1 塗工液の試作結果

Table 1 Preliminary results for powder used in coating fluid

Solid powder	Results for coating fluid
MgO	Since MgO powder becomes hydrated and gelled, it cannot be used in a coating fluid
MgCO ₃	Since the MgCO ₃ particle size is coarse (about 0.5 μm), it cannot be used to form a MgO film with a thickness of 0.1 μm.
Mg(OH) ₂	Produces a stable dispersion of fine particles with a size of 0.1 μm or less in water.

はMg(OH)₂のピークが消失しMgOのピークが現れている。以上から、焼付け時間を5分以上とすることでMgO膜を形成可能であることが分かる。本結果から5分でMgOが生成するが、十分な熱分解反応の時間を確保するため、以後の実験は焼付け時間10分で検討を進めることとした。

3.2 電気的絶縁性

図5はMgOの膜厚と表面抵抗率の関係である。膜厚が0.08 μmの場合は、基材自体の表面抵抗率(図中、MgO膜の膜厚0.0 μmのプロット)に対してわずかな増加に留まるが、0.43 μm以上の膜厚では測定装置の測定限界(>9×10⁶ Ω)の表面抵抗率が得られる。次に、得られたMgO膜の断面観察を行った。図6は代表例と

して表面抵抗率が低い膜厚0.08 μmおよび、表面抵抗率が高い0.75 μmの断面STEM像と元素マッピングを示す。膜厚0.08 μmにおいては、基材とMgO膜の界面は比較的明瞭であり、表面抵抗率の低下に関するような拡散層は観察されていない。一方、MgO膜の内部には矢印で示すようなMgとOが存在しない領域、つまり空隙が多数存在している。また、空隙部分においては実質的な膜厚が非常に薄くなっていることから、空隙部分で絶縁破壊していると考えられる。これに対し、膜厚0.75 μmの場合も同様な空隙が見られるものの、MgO膜が厚いため絶縁性を確保できると考えられる。

モーターコアで必要とされる電気的絶縁性は、積層した帯材間の絶縁性、つまり層間絶縁性であるが、本評

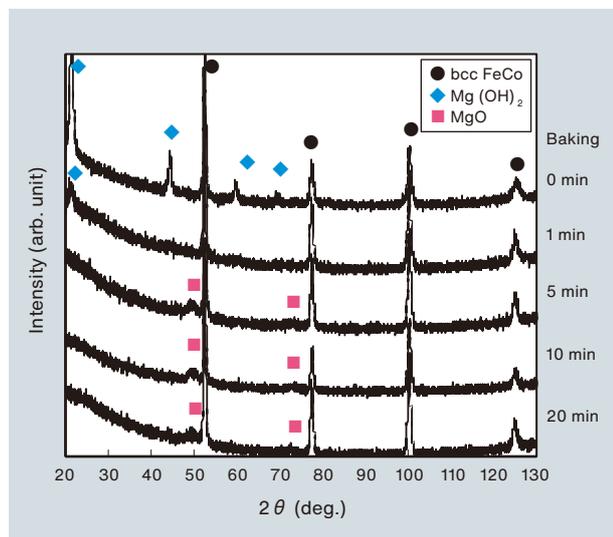


図4 被膜のXRDスペクトル(膜厚0.75 μm)

Fig.4 XRD spectrum of coating film (thickness 0.75 μm) on Permendur

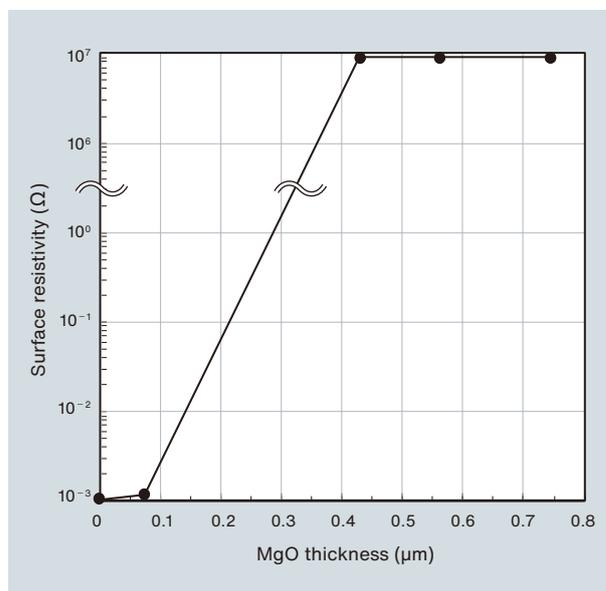


図5 MgO膜の膜厚と表面抵抗率の関係

Fig.5 Relationship between surface resistivity and film thickness (up to 0.75 μm)

Thickness (μm)	STEM Image	O	Mg	Fe	Co	V
0.08						
0.75						

図6 MgO膜の断面STEM像

Fig.6 Cross-sectional STEM images of MgO films with different thicknesses

価では表面抵抗率の測定により簡易的に評価したものである。この評価方法は、JIS 2550-4で規定される層間絶縁性の評価方法とは異なるが、本評価から膜厚を0.43 μm以上とすることで高い電気的絶縁性を有することができると思われ。

3.3 耐固着性

図7はMgO膜有り、無しの基材について、磁性焼鈍後の固着有無を確認した外観写真である。なお、MgOの膜厚は0.75 μmである。MgO膜有りの場合は、片方の基材を持ち上げると、他方の基材は落下することから、磁性焼鈍によって固着しないと判断できる。一方で、MgO膜無しの場合は、片方の基材を持ち上げても他方の基材は脱落しないことから固着している。これより、MgO膜の膜厚を0.75 μmとすることで、電気的絶縁性と耐固着性を満足することが分かる。ここで、MgO膜によって固着を防止できる理由を考察する。固着は、基材を重ね置きすることで自重による圧力が加わった状態で加熱されるため熱間接合と考えることができる。熱間接合のしやすさには、接合材の構成原子の拡散が影響する。そこで、アレニウス式(式(1))と拡散距離(式(2))を用い、磁性焼鈍条件(保持時間, 温度)における原子の拡散距離を比較する。

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

$$d = \sqrt{2Dt} \quad (2)$$

ここで、 D : 拡散係数、 D_0 : 拡散振動因子、 Q : 活性化エネルギー、 R : 気体定数(8.314 J/mol)であり、 T : 温度、 t : 時間である。また、パーメンジュールの場合はbcc Fe中のCo, MgO膜の場合はMgO中のMgの拡

散距離を比較し、計算にはbcc Fe中のCoが $D_0 = 2.80 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $Q = 251 \times 10^3 \text{ J/mol}$, MgO中のMgが $D_0 = 2.49 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $Q = 331 \times 10^3 \text{ J/mol}$ ^{(7), (8)}, T および t は磁性焼鈍条件の $T = 1,123 \text{ K}$, $t = 10,800 \text{ sec}$ とした。計算の結果、 $d_{\text{Co}} = 3.6 \times 10^3 \text{ nm}$ に対し $d_{\text{Mg}} = 15 \text{ nm}$ で、MgO中のMgは極めて拡散し難いと考えられる。このことから、磁性焼鈍時にFeCo同士が接すると拡散により固着するが、MgO同士が接していれば拡散が生じ難いため固着を抑制できると考えられる。

3.4 軟磁気特性

図8はMgO膜有り、無しにおけるパーメンジュールの $B-H$ 曲線である。MgO膜有り、無しのいずれも、小さい外部磁場 H で急峻に磁束密度 B が増加することが分かる。表2は図8から得られた保磁力 H_c , 最大比透磁率 μ_m であり、合わせて単板の $B-H$ 曲線(図示しない)から

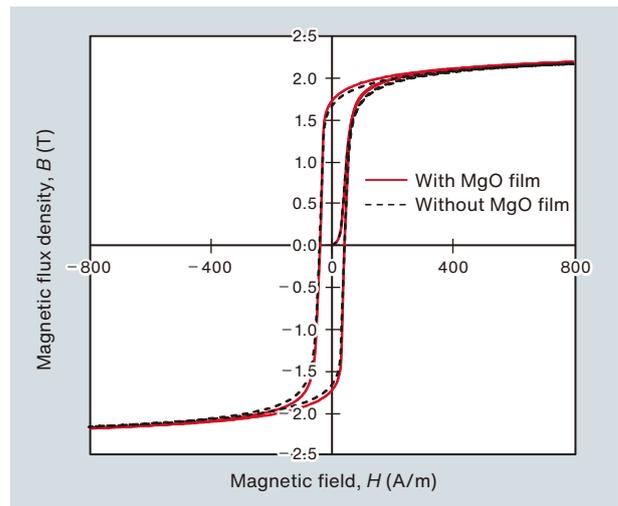


図8 MgO 膜有り, MgO 膜無しパーメンジュールの $B-H$ 曲線
Fig.8 $B-H$ curve for Permendur with and without MgO film (film thickness 0.75 μm)

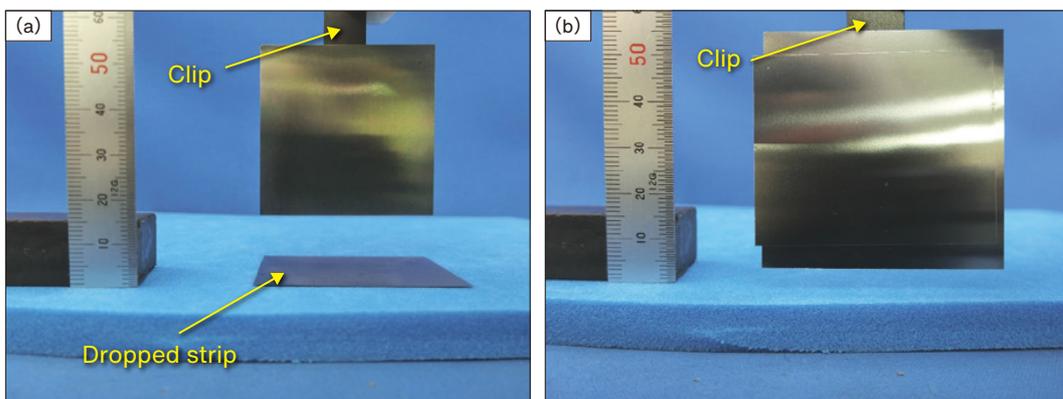


図7 耐固着性試験の外観写真 (a) MgO 膜有り (膜厚 0.75 μm), (b) MgO 膜無し

Fig.7 Photograph of adherence resistance test (a) with MgO film (thickness 0.75 μm), (b) without MgO film

得られた飽和磁束密度 B_s も示す。MgO膜有り、無しで比較すると H_c , μ_m , B_s とも差はわずかであり、MgO膜の形成により軟磁気特性は劣化しないと言える。

表3は動作磁束密度 $B_m = 2.0$ Tにおける周波数 f と鉄損 W である。 $W_{20/1000}$ の表記は $B_m = 2.0$ T, $f = 1,000$ Hzの鉄損を意味する。ここで、比較材であるMgO膜無しのトロイダルコアは、10枚のリング試料に対し層間絶縁紙を介して重ねており、層間絶縁性が確保されている。従って、本評価は積層体の鉄損 W を評価しているのではなく、リング単体の W であることに注意されたい。結果はMgO膜有り、無しで大きな差は見られておらず、MgO膜の被覆により W が劣化しないことを確認した。むしろ、MgO膜有りでは W が小さい傾向にある。これは、ヒステリシス損失や渦電流損失の減少に起因し、基材の結晶粒径の粗大化や歪みの減少、基材の電気伝導率の減少が有り得るが詳細は定かではない。

最後に、試作コイルを巻き出した際の外観写真を図9に示す。膜厚 $0.75 \mu\text{m}$ のMgO被覆により表面は茶褐色を呈している。また、コイル材でも表面抵抗率 $> 9 \times 10^6 \Omega$ の電氣的絶縁性、耐固着性を有することを確認済みである。以上から、電氣的絶縁性、耐固着性を有し、軟磁気特性に優れたパーメンジュールのコイル材を作製可能なことを実証できた。

表2 MgO膜有り、MgO膜無しパーメンジュールの直流磁気特性

Table 2 DC magnetic properties for permendur with and without MgO film

	H_c (A/m)	μ_m	B_s (T)
With MgO film	40.2	19,000	2.28
Without MgO film	41.3	18,000	2.27

表3 MgO膜有り、MgO膜無しパーメンジュールの鉄損 W の代表値

Table 3 Representative iron loss for Permendur with and without MgO film (film thickness $0.75 \mu\text{m}$)

	$W_{20/50}$ (W/kg)	$W_{20/400}$ (W/kg)	$W_{20/1000}$ (W/kg)
With MgO film	2.3	23.1	74.0
Without MgO film	2.4	24.6	79.4

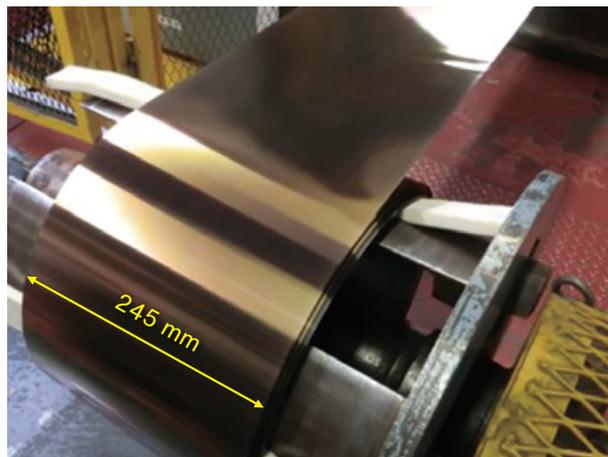


図9 試作コイルの外観写真

Fig.9 Photograph of prototype coil (film thickness $0.75 \mu\text{m}$)

4. 結言

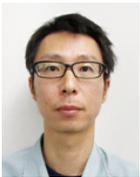
モーターコアに使用するMgO膜付きパーメンジュールを製造するための塗工液、被膜形成条件を検討するとともに電氣的絶縁性、磁性焼鈍時の耐固着性および、軟磁気特性を評価し、以下の結論を得た。

- (1) 塗工液には $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 粉末を水溶媒に分散したスラリーを使用でき、 450°C の熱分解反応によりMgO膜を形成できる。
- (2) MgO膜の膜厚を $0.75 \mu\text{m}$ 以上とすることで高い表面抵抗率、耐固着性を付与できる。
- (3) 電氣的絶縁性と耐固着性を有し、軟磁気特性に優れたパーメンジュールのコイル材を製造できる目途を得た。

※YEPは株式会社プロテリアル登録商標または商標です。

引用文献

- 1) 阿由葉: グリーン社会の実現に向けた競争政策研究会資料, 資料6-2, 2022年7月, p.7-19.
- 2) 経済産業省, 「次世代航空機に向けた研究開発・社会実装の方向性」, 資料6, 2021年5月, p.19.
- 3) VACUUMSCHMELZE社, 軟磁性材料コバルト鉄合金カタログ, 2016年11月, p.17.
- 4) Sato: J. Japan Inst. Metals, Vol.53 (1989), p.232-236.
- 5) Omori: J. Surf. Finish. Soc. Jpn., Vol.60, No.7, (2009), p.17-22.
- 6) K. Hamano: J. Chem. Assoc. Japan 74, 5, (1996), p.144-152.
- 7) 井口他: 金属データブック, 日本金属学会編, 改訂4版, 丸善株式会社, (2004), p.21.
- 8) サムソフ他: 最新酸化物便覧, モスクワ冶金研究所, (1978), p.135.



矢ヶ部 秀隆
Hidetaka Yakabe
株式会社プロテリアル
特殊鋼事業部
安来工場 冶金研究所



藤原 義行
Yoshiyuki Fujihara
株式会社プロテリアル
特殊鋼事業部
安来工場 冶金研究所



竹原 隆司
Ryuji Takehara
株式会社プロテリアル
特殊鋼事業部
安来工場



上坂 修治郎
Shujiroh Uesaka
株式会社プロテリアル
特殊鋼事業部
安来工場



藤井 和也
Kazuya Fujii
株式会社プロテリアル
特殊鋼事業部
安来工場

特許文書の材料科学技術表現抽出

Named Entity Recognition from Materials Science Patent Documents

酒井 敏彦*

Toshihiko Sakai

千綿 伸彦**

Nobuhiko Chiwata

峯 恒憲***

Tsunenori Mine

*

九州大学大学院システム情報科学府
Graduate School and Faculty
of Information Science and
Electrical Engineering, Kyushu
University

**

株式会社プロテリアル
研究開発本部グローバル技術革新センター
兼 知的財産部IPソリューショングループ
Digital Technology Development
Dept., Global Research & Innovative
Technology Center, IP Solution
Group, Intellectual Property Dept.,
R&D Division, Proterial, Ltd.

九州大学大学院システム情報科学
研究院
Faculty of Information Science
and Electrical Engineering,
Kyushu University

材料科学分野では、マテリアルズ・インフォマティクスと呼ばれるデータ駆動型の材料設計が盛んに検討されている。文書から抽出した技術データの活用は、その一環として重要視されている。特に、材料科学分野の研究者視点で整理された材料組成等の情報、その中でも、材料を構成するための基本的情報である元素比率を技術文書から機械的に抽出し、構造的に把握する方法が求められている。文書中の特定情報(固有表現)を抽出する方法として、抽出対象の手掛かりとなる「手掛かり表現」を利用する方法が提案されている。しかし、この方法は新たな手掛かり語を獲得するためのコストが問題であった。そこで、本研究では、特許明細書を対象として、材料に関する情報を固有表現として特定するための新たな手法に、手掛かり語タグを用いた固有表現抽出手法を提案する。手掛かり語タグは、抽出対象の固有表現と手掛かり語とを同時に抽出することを可能とするだけでなく、抽出対象の固有表現との意味的まとまりを持つ構造の獲得に有効である。この手掛かり語タグを導入することで、固有表現の抽出精度が向上し、全体の抽出性能は劣化しないこと、さらに、新たな手掛かり語の獲得も可能であることを実験により確認した。

In the field of materials science, data-driven materials design, called materials informatics, has been considered. The use of technical data extracted from documents is an important part of this process. In particular, there is a need for a method to automatically extract from technical documents information such as material compositions organized from the point of view of materials science researchers, especially element ratios, which provide fundamental information on the composition and structure of materials. As an approach to extracting specific information (named entities) from documents, methods using “clue expressions”, which are clues to the target named entities for extraction, have been proposed. However, the cost of acquiring new clue words is a problem in these methods. In this study, we propose a new method for extracting named entities in materials science from patent specifications using clue word tags; the proposed method identifies information about materials as named entities. The clue word tag not only makes it possible to extract the target named entities and the clue word simultaneously, but is also effective in obtaining a structure that has semantic cohesion with the named entities to be extracted. Experiments confirmed that the introduction of clue word tags improves the accuracy of named entity extraction without degrading the overall extraction performance, and also enables the acquisition of new clue words.

■ Key Words : 固有表現抽出, 材料科学, 特許文書

■ R&D Stage : Research

1. 諸言

材料科学分野では、データ科学の知識と技術を用いて効果的に材料開発を行う「マテリアルズ・インフォマティクス(MI)」^{1), 2)}による新材料開発手法の活用が進んでいる。MIは、プロセス科学基盤の拡充を目的とした「プロセス・インフォマティクス」³⁾と組み合わせることが期待されている。そのためには、実際に材料を生成して得られた実験の値や論文情報だけでなく、特許の情報も活用していく必要がある^{4) - 6)}。

テキストから、地名や日付、人名などの固有表現を抽出する技術として、固有表現抽出^{7) - 12)}がある。固有表現抽出を用いることで、例えば、テキストにおける文脈に応じて、さまざまな形で用いられている「Fe」や「鉄」という文字列のうち、元素記号として用いられている「Fe」や「鉄」を特定することができる。このように、固有表現抽出により、文字列に対して、文字種や品詞ではなく、情報の性質ごとに関連付けることができる。したがって、固有表現抽出を用いれば、非構造データから関連付けられた情報の性質ごとに文字列を抽出し、情報の性質を考慮して得られた文字列を使ってデータベースを構築することができる。一旦、データベースを構築してしまえば、検索や要約、質問応答などへの情報活用が容易となる。しかしながら、一般的な地名や人名といった固有表現ではなく、特定の技術分野における固有表現抽出の

応用は、当該技術特有の情報を扱う専門性を考慮する必要がある。本研究で着目したのは、材料科学分野における、材料を構成する構成物や比率である。材料技術文書には、「ニッケルが0.1%~1.5%、クロムが0.01%~1.0%」のように構成物と量の比率が記載されており、新たな材料開発を行う際の貴重な参考情報となる。一般に材料技術文書には、比率だけでなく物質の特性値やプロセス制御範囲といった数値範囲との関連付けが求められている情報が存在し、本技術の展開が可能である。

本研究では、材料科学技術文書として特許明細書を対象とする。特許調査においても、構成物と量の比率は、調査の重要な対象であるとともに、貴重な技術情報でもある。専門性を反映した特許データベースが構築できれば、特許調査の効率化に繋げることができるのみならず、大量に存在する特許明細書に含まれる技術情報をマテリアルズ・インフォマティクスへ応用できる。**図1**に特許明細書からデータ可視化までの一連のデータ活用の概要を示す。特許文書から自動で構成物の量や比率の抽出を行い、データベースを構築することで、図示化による比較が容易に可能となる。この時、情報を抽出するためには、専門的な知識が必要である。例えば、「ニッケルが0.1%~1.5%」というテキストには、「ニッケル」という構成物が「0.1%~1.5%」含まれる情報を有しているが、類似したテキストである「変形量が5%~

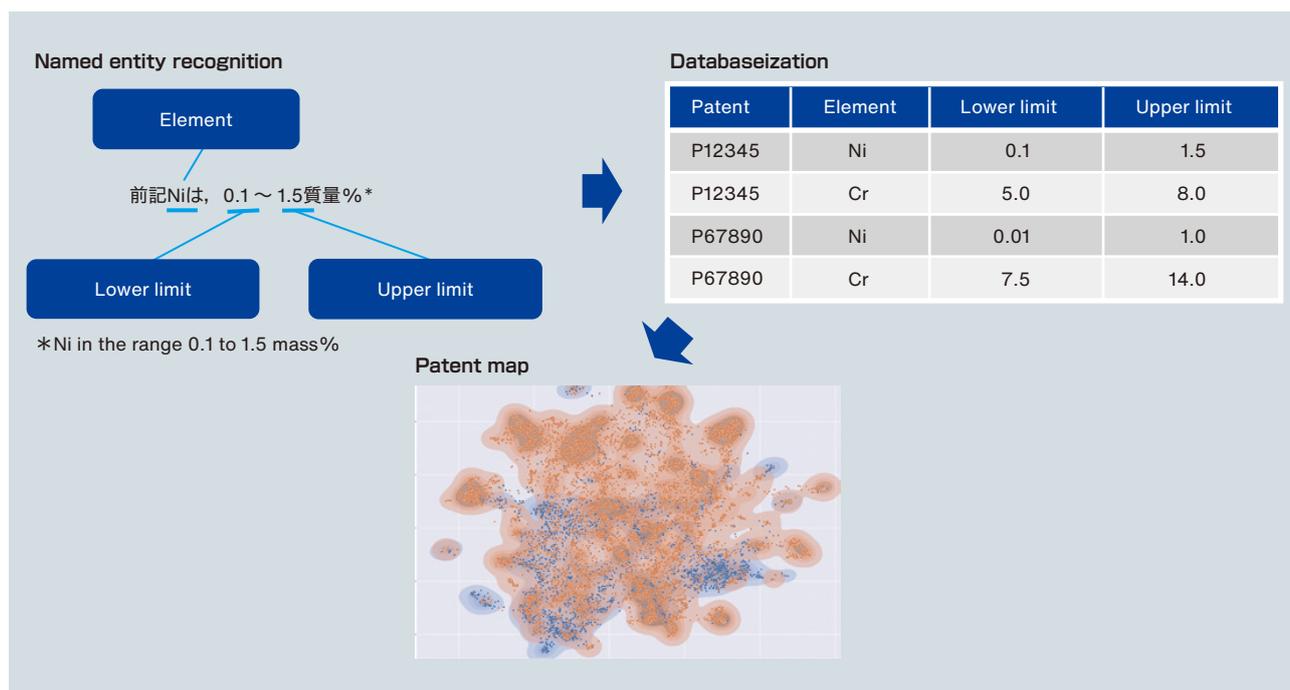


図1 技術文書からの情報抽出

Fig.1 Conceptual diagram of information extraction from technical documents

10%」は、構成物ではなく、状態の変化量を示している。さらに、関連する情報を構造化するためには、「ニッケル」と下限を表す数値「0.1%」、上限を表す数値「1.5%」とを関連付けた意味的なグループとして関連付けて抽出する必要がある。実際の抽出においては、専門家でなければ判別ができない記述も多く、得られた情報の関連付けには専門家の多大な工数が必要になる。そこで、本研究では、後述する手掛かり語タグを導入することにより、意味的関連性を含めた技術情報抽出を可能とした。さらに、手掛かり語タグ自体を新たな固有表現として設計し、新たな手掛かり語を獲得しながら情報抽出を行う可能性を見出した。

なお、本報告は、株式会社プロテリアルにおけるマテリアルズ・インフォマティクス技術「D2Materi™」の一環として実施したものである。

2. 関連研究

2.1 材料科学技術文書からの情報抽出

材料科学分野においても、データ駆動型のマイニング手法が求められており¹³⁾、材料開発や材料設計のための情報抽出に、機械学習を用いるアプローチが盛んに研究されている⁵⁾、¹⁴⁾。材料科学技術文書から情報抽出を行う研究として、論文から材料名等を固有表現抽出により抽出する研究¹⁵⁾、¹⁶⁾や材料の特性値を予測する研究¹⁷⁾、¹⁸⁾、教師なしで単語の埋め込み表現を獲得し、材料科学分野の潜在的な知識を得る研究がある¹⁹⁾。また、材料科学技術文書からキーワードとその間の関係性を抽出する研究がある²⁰⁾。特許から情報抽出を行う研究として、中国語の医学特許において、ルールベースに基づく手法により固有表現抽出を行う研究がある²¹⁾。しかしながら、従来の研究では、構成物とその比率を関連付けた状態で抽出するアプローチは取られていない。

2.2 手掛かり語に関する研究

抽出する対象と共起する語を手掛かり語として定義することで、情報抽出を行う研究が取り組まれてきた。この手法では、抽出する対象と共起する語群を手掛かり語として、事前に定義する必要がある。しかし、最初に定義した手掛かり語のみでは、目的とする情報を抽出するための手掛かりとして不十分である可能性がある。そのため、定義された手掛かり語と共起する表現パターンから新たな手掛かり語を自動的に獲得するブートストラップ型の手法²¹⁾・²⁵⁾が提案されている。しかしなが

ら、ブートストラップ型の手法では、手掛かり語を元に共起する表現パターンの獲得、獲得した表現パターンから新たな手掛かり語の獲得、という2つの手順を繰り返す必要があるため、計算コストがかかる。また、情報抽出と新たな手掛かり語を同時並行的に獲得することができない。

2.3 大規模言語モデルを用いた研究

従来は、Transformer²⁶⁾のエンコーダを用いたBERT²⁷⁾による教師有り学習が主流であったが、2023年に入り、OpenAIが発表した生成AIであるChatGPT²⁸⁾に代表される大規模言語モデル(LLM: Large Language Model)の導入が、さまざまな分野で進んでいる。材料科学分野などの専門文書での情報抽出においても、LLMを用いた研究が行われている。Huら²⁹⁾は、医学文書から症状や診断、医学的問題などの固有表現を固有表現抽出する際にChatGPTやGPT-3.5を用いた手法に取り組んでいる。しかし、BERTを医学文書に特化させたBioClinicalBERT³⁰⁾をベースとした既存の教師有り学習の手法が性能が高かったと報告している。また、ChatGPTでは、医療的知識が不足していたこと、および、予測する単語を勝手に言い換えてしまうことが要因となり抽出精度が低下した、と報告している。Polakら³¹⁾は、材料科学技術文書から材料名や材料の特性値を抽出するために、GPTを用いた手法に取り組んでいる。抽出目的の文書から、最初にGPT-3.5を用いて、学習を行わず関係する文の分類を行い、教師データでファインチューニングしたBARTやDeBERTaを用いた文分類を実施した後、人手で材料の特性値を抽出していた。また、Polakら³²⁾は、プロンプトを繰り返し試すフローチャート方式を提案した。このようにLLMを用いることで材料科学分野の情報を抽出できる可能性はあるが、現時点では、既存の教師有り学習の手法を利用した専用モデルによる抽出性能が高いこと、さらには、本研究のように固有表現抽出対象の設計から行う際には、大規模な計算機資源を必要とせず、抽出性能の上でも最先端モデルと遜色のない高速で軽量の教師有り学習モデルが使いやすい。

3. 提案手法

3.1 固有表現抽出

本節では、本研究で扱う固有表現抽出について説明する。固有表現抽出とは、文書内の固有表現を識別し、抽出することである。このとき、文のいくつかの要素が連なったものを系列、系列内のそれぞれの要素にラベルを付与することを系列ラベリングと呼ぶと、 n 単語からなる入力 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ に対して、出力 $\mathbf{y}=(y_1, y_2, \dots, y_m) \in Y$ を返す系列ラベリング問題として定式化できる。ここで、 Y は m 個のラベルの集合である。本研究では、固有表現抽出を解くため、 $m = n$ と固定し、 Y を固有表現の集合とする。入力 \mathbf{x} に対する出力 \mathbf{y} を条件付き確率 $p(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ でモデル化し、

$$\mathbf{y}^* = \underset{\mathbf{y}}{\arg \max} p(\mathbf{y}|\mathbf{x})$$

となる出力 \mathbf{y}^* を探索する。

3.2 固有表現と手掛かり語タグの設計

本節では、本研究で扱う固有表現について説明する。情報抽出や文の構造化を協働で行う場として、日本では主に、IREX^{*1}や森羅プロジェクト^{*2}で固有表現抽出タスクが取り組まれている。IREXで定義された固有表現の種類として、人名や組織名、地名などがある。本研究では、材料科学分野の構成物の量や比率を抽出するため、材料を構成する構成物や比率の情報を表す独自の固有表現を設計した。なお、実験に用いた固有表現表法

*1 <https://nlp.cs.nyu.edu/irex/index-j.html>

*2 <http://shinra-project.info/>

には、IOB2(Inside, Outside, Beginning)方式³³⁾を採用した。

固有表現抽出は、ある意味を表すラベル(タグ)を、そのタグと対応する語句に付与する(ラベリングする)ことで実施する。加えて、本研究では、固有表現抽出と同時に、意味的なまとまりを持つグループ化の手掛かりを与える。具体的には、抽出対象である語句へのラベリングを行うタグと、意味的なグループ化のための手掛かり語となる手掛かり語タグの2つを定義した。主な固有表現の定義を表1に示す。抽出対象と手掛かり語タグの固有表現を設計している。また、表に記載したタグ以外に計15種類の固有表現を設計した。表1では、本研究の目的である構成物と量の比率に議論を絞るため、構成物の量や比率に関与しない手掛かり語タグと抽出対象以外の固有表現の記載は省略する。抽出対象のタグとしては、構成物である元素(element)や化合物(compound)を示す固有表現として「atom」を用意した。比率を表す下限(lower limit)・上限(upper limit)の数値を示す固有表現には、下限値「fig_LL」、上限値「fig_UL」の2つのタグを用いた。さらに、数値の関係性および意味を付与する「手掛かり」に相当する手掛かり語タグとして「limitation」のタグを用いる。手掛かり語タグが付与される語句自体は、意味ある情報とはならないが、抽出された他の固有表現との位置関係から、文字通り、意味的なグループ化のための手掛かり語となる。

3.2.1 手掛かり語タグによる意味的関連性の抽出

手掛かり語タグを導入することで、抽出対象の固有表現との意味的関連性を抽出することが可能となる。元素と元素の含有量の下限・上限の例文を表2に示

表1 本研究で扱う固有表現の定義

Table 1 Definition of named entities used in this study

Named entity	Description	Tag species
atom	Elements or compositional components of a substance 物質の元素や組成成分を表す語句	Target tag
fig_LL	Lower limit of elemental content 元素の含有量の下限	Target tag
fig_UL	Upper limit of elemental content 元素の含有量の上限	Target tag
limitation	Limits and ranges 以上, 以下, 未満など制限・範囲を表現	Clue word tag
selection	Expressions of selectivity, such as the number of types of elements 元素の種類数など選択性を表す表現	Clue word tag

す。この例では、元素の含有量の下限・上限の条件部分「～」が元素の含有量の下限・上限を抽出するための手掛かりとなる。「～」より前が下限であり、後が上限であると推定され、「fig_LL」、「limitation」、「fig_UL」の順にタグが付与され、手掛かり語タグの位置により、数量を表す「fig_LL」、「fig_UL」が関連した情報であることが明確となる。同様の手掛かり語としては、「以下」や「以上」などもあるが、必ずしも下限・上限の順で出現しない。手掛かり語タグを考慮しない場合は、構成物の含有量の下限・上限の数値のみを抽出していたが、含有量が複数回続いた場合、単なる数値の大小による判別だけでは、数値の順序を正しく識別できない。一方で、手掛かり語タグを導入することで、手掛かり語タグの出現位置と抽出対象の位置関係から数値の順序を正しく識別することができる。さらに、得られた比率範囲の関係性から構成物との関係性を推定し、意味的なグループを抽出する。図2に本節で議論した手掛かり語タグと抽出対象の関係性の概念図を示す。

構成物の含有量比率だけでなく、複数の構成物からなる、という意味を持つ情報も存在する。そこで、手掛かり語タグ「selection」を設計した。例えば、「(構成物である)元素が少なくとも一種類含有される」、もしくは「二種類以上含有される」という情報は、構成物と共起する文脈で用いられる。例文を表3に示す。元素「Mg, TI, Al, Mg」のいずれかから、「1種又は2種以上を含有」という複数の構成物の含有を表す手掛かり語タグ「selection」を示した例である。

以上のことから、意味的なグルーピングを実施するために、抽出対象以外のタグである手掛かり語タグを導入した。しかしながら、新たな概念の導入による抽出対象そのものの抽出精度や設計したタグ全体へのタグ付与精度の評価が必要である。本研究では、手掛かり語タグ導入による精度への影響を議論する。

表2 limitationのタグ付与例

Table 2 Example of limitation tag

Word	Sn	:	1	.	5	～	2
Tag	atom	O	fig_LL	fig_LL	fig_LL	limitation	fig_UL

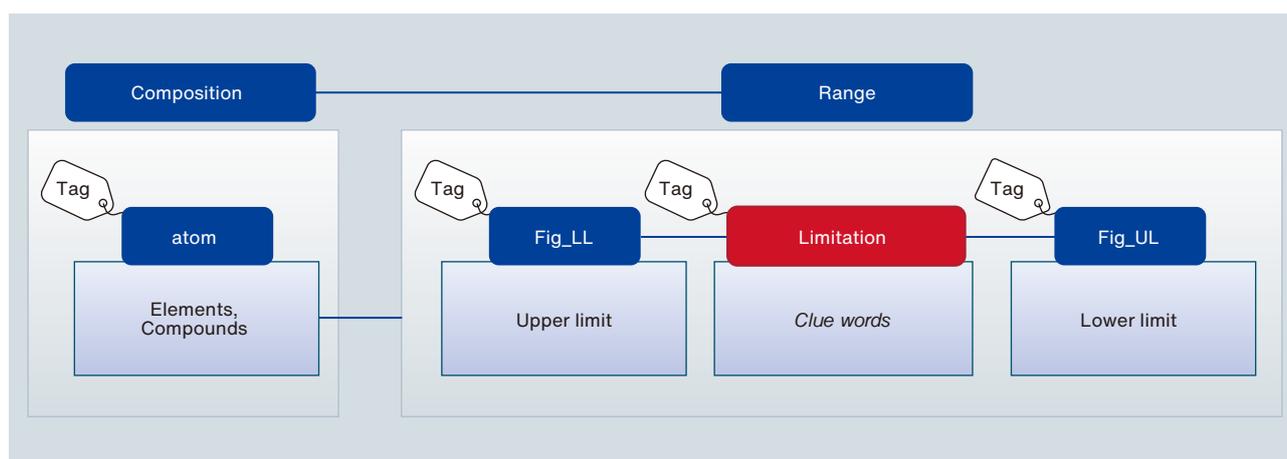


図2 手掛かり語タグと抽出対象の関係性の概念図

Fig.2 Schematic diagram of relationship between clue words tag and extracted words

表3 selectionのタグ付与例

Table 3 Example of selection tag

Word	Mg	…	の	1	種	又は	2	種	以上	を	含有
Tag	atom	…	O	selection							

3.2.2 手掛かり語タグによる新たな手掛かり語の獲得

従来手法では、手掛かり語を抽出規則として予め定義することで、手掛かり語と共起する表現を新たな手掛かり語として獲得していた。本手法では、手掛かり語自体を抽出するため手掛かり語タグを固有表現として定義する。これにより、予め定義された語句以外も手掛かり語として、抽出対象と同時に得ることができる。したがって、情報抽出と新たな手掛かり語の獲得とを同時に実施可能である。本研究では、新たな手掛かり語の獲得の可能性についても議論を行う。

3.2.3 手掛かり語タグ導入によるリサーチクエスチョンの設定

手掛かり語タグを導入することにより、比率範囲の関係性から構成物との関係性を推定し、意味的なグループを抽出できる。また、固有表現抽出過程で手掛かり語タグとして付与された単語は、新たな手掛かり語の獲得と捉えることができる。しかしながら、手掛かり語タグの導入は、新たな固有表現を追加することとなるため、全体性能や個別タグの精度低下が懸念される。そこで、本研究では、以下の三点のリサーチクエスチョン(RQ)を設定し、条件付き確率場³⁴⁾(CRF: Conditional Random Fields)の手法を用いた実験により検証を行うこととした。

- RQ1) 手掛かり語タグにより抽出対象タグの抽出精度は向上するか
- RQ2) 手掛かり語タグの追加は全体性能に影響するか
- RQ3) 手掛かり語タグにより有益な手掛かり語が獲得できるか

4. 実験

4.1 固有表現抽出モデル

本節では、固有表現抽出モデルについて述べる。前節で提案した手掛かり語タグが抽出対象とするタグの精度向上および精度向上の際に寄与する素性を検証するため、CRFを用いた固有表現抽出モデルを構築する。CRFは、タグ間の遷移を用いる手法であり、軽量なモデルでもある。そこで、今回の設計の有効性を議論するのに適していると考えた。

CRFでは、入力系列 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ に対して、出力 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ を求める。

$$P(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \frac{1}{Z_{\mathbf{x}, \mathbf{w}}} \exp(\mathbf{w} \cdot \phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}))$$

このとき、 \mathbf{w} は学習するパラメータ、 $Z_{\mathbf{x}, \mathbf{w}}$ は、 $\sum_{\mathbf{y}} P(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = 1$ を保証する係数で、 $Z_{\mathbf{x}, \mathbf{w}} = \sum_{\mathbf{y}} \exp(\mathbf{w} \cdot \phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}))$ と定義する。 $\phi(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ は素性関数である。CRFを用いて事例 \mathbf{x} を分類する場合は、以下の最大化問題を解く。

$$\mathbf{y}^* = \arg \max_{\mathbf{y}} \frac{1}{Z_{\mathbf{x}, \mathbf{w}}} \exp(\mathbf{w} \cdot \phi(\mathbf{x}, \mathbf{y})) = \arg \max_{\mathbf{y}} \mathbf{w} \cdot \phi(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

しかし、上記の場合、計算に時間がかかるため、CRFでは、以下のような仮定を置き、最大化問題を解く。このとき、 t は拡張可能であり、 $\sum_t \phi_k(\mathbf{x}, y_t, y_{t-1}, y_{t-2})$ などの仮定を置くこともできる。

$$\phi_k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_t \phi_k(\mathbf{x}, y_t, y_{t-1})$$

したがって、次の最大化問題を解くこととなる³⁵⁾。

$$\mathbf{y}^* = \arg \max_{\mathbf{y}} \sum_t \mathbf{w} \cdot \phi(\mathbf{x}, y_t, y_{t-1})$$

4.2 データセット

特許明細書にはさまざまな項目の記述があるが、本研究では「特許請求の範囲」の項目を対象とした。「特許請求の範囲」には、発明を特定するための要件が記載されているため、これにより保護すべき発明の範囲が明示される。したがって、特許明細書にとって非常に重要な項目である。また、出願される特許には、さまざまな技術分野の特許明細書が含まれる。そこで、本研究では、今回取り扱う検討技術分野に近い「合金」に関する国際特許分類カテゴリ(IPC)を利用することで、構成物の量や比率の記述をより多く含む母集団を設定した。具体的には、日本特許庁に出願されたIPC分類C22C(合金)に属する登録特許のうち、2000年1月から2021年8月までの期間に公開された特許明細書の「請求の範囲」の項目に記載された文章中に「組成」を含む15,053件を抽出した。専門家の助言の下、文章中に「組成」を含む文章には「元素や化合物の含有量の下限・上限の数値を示す」表記が含まれると判断したためである。得られたデータから、「請求の範囲」に含まれる99,585文から978文を無作為に取り出し、専門家によるアノテーションを実施し、教師データとした。教師データのうち、一部で手掛かり語タグを含まない文が含まれていた。そこで、今回作成した教師データすべてを含むデータセット(All)と、手掛かり語タグを文中に含むデータセット(OnlyClueTag)の2種類のデータセットを作成した。

すなわち、

- ・データセット (All) :すべてのタグを含む978文
- ・データセット (OnlyClueTag) :手掛かり語タグを含む922文

の2種類である。表4に各データセットのタグ数を示す。

表4 データセットのタグ数

Table 4 The number of tags in dataset

	Dataset (All)	Dataset (OnlyClueTag)
atom	6,096	6,056
fig_LL	2,939	2,938
fig_UL	4,162	4,162
limitation	4,935	4,935
selection	1,022	1,022
balance	382	382
fig	20	12
unit	4,693	4,677
formula	341	314
sum	88	88
use	990	937
variable	589	567

4.3 実験条件

CRFのフレームワークにはcrfsuite^{*3}を用いた。CRFでは、入力される単語の持つ属性により素性関数を学習する。本研究では、前後の1単語と2単語、単語の品詞細分類の情報、単語の文字種および正解のタグを素性として利用し、その組み合わせごとにF1-scoreにより、評価した。なお、入力した文は、MeCab^{*4}を用いて、IPA辞書に従って形態素解析を実施し、品詞細分類を求めた。また、文字種は、空白、アラビア文字、英字小文字、英字大文字、ひらがな、カタカナ、その他を用いた。本研究で用いた素性の組み合わせを表5に示す。本条件において、学習データに対し、グリッドサーチにより、最適なハイパーパラメータを求め、5分割交差検証による評価を行った^{*5}。

*3 <https://github.com/scrapinghub/python-crfsuite>

*4 <https://taku910.github.io/mecab/>

*5 最大イテレーション数を100とし、アルゴリズムはL-BGFS法を用いた勾配降下法のlbfgsを用いた。L1正則化およびL2正則化のパラメータはそれぞれ、L1: (0.1, 0.5, 1.0), L2: (0.05, 0.1, 1.0)の中から探索を行った。また、all possible transitionsはTrueとした。その他は、デフォルトのパラメータを用いた。

表5 CRF で用いた素性の組み合わせ

Table 5 Combination of features used in CRF

	Word count before and after	PoS type	Type of character
Pattern A	2	○	○
Pattern B	2	-	○
Pattern C	2	○	-
Pattern D	2	-	-
Pattern E	1	○	○
Pattern F	1	-	○
Pattern G	1	○	-
Pattern H	1	-	-

4.4 評価方法

データセットをテストデータと学習データに分割する比率を決定する。まず、テストデータを10%と固定し、学習データの比率は、90%, 80%, ...10%とした。このとき、学習比率が増加するほど、F1-scoreが高い結果が得られたため、学習・テストの比率を90%, 10%とした。データセット (OnlyClueTag) から、手掛かり語タグ (limitation, selection) を含むデータセットと含まないデータセットを作成した。手掛かり語タグを含むデータセットをCW: ClueWords, 含まない場合をNCW: NotClueWordsとし、以後、このように表記する。この2つのデータセットによる評価結果を比較することで、手掛かり語タグの有効性を評価する。なお、手掛かり語タグ自体は、抽出対象タグを抽出することが目的であるため、「CW: ClueWords」では、手掛かり語タグ自体の評価値は除いて、評価を実施した。

4.4.1 RQ1), RQ2)の検定方法

性能評価結果において、統計的検定を行うため、ウィルコクソンの順位和検定を用いた。有意水準は $p < 0.05$ とし、両側検定を実施した。CW: ClueWordsとNCW: NotClueWords各群の抽出性能はMicro-F1-scoreを用い、個別のタグの抽出性能は、各タグのF1-scoreを用いて、検定を行う。

- ・検定 (素性群) : 学習比率を固定した場合における、パターンA~パターンH(8種類)のF1-scoreで比較

- ・検定 (学習比率群) : 素性を固定した場合における、学習比率90%~10%(9種類)のF1-scoreで比較

以降は、各検定について、検定 (素性群), 検定 (学習比率群) と記載する。

4.4.2 RQ3)の手掛かり語獲得評価

RQ3)の手掛かり語獲得の評価では、学習比率90%から10%の9通り、CRFで用いるパターンAからパターンHの8通り、2種類のデータセットであるCW: ClueWordsとNCW: NotClueWordsの組み合わせ合計144通りの予測結果中の手掛かり語タグlimitationおよびselectionが付与された語句を個別に評価した。

5. 実験結果と考察

5.1 RQ1:手掛かり語タグにより抽出対象タグの抽出精度は向上するか

5.1.1 抽出対象タグの結果

結果を表6に示す。値はF1-scoreを表す。個別の素性集合において、CW: ClueWordsとNCW: NotClueWordsを比較し、性能が高い項目に下線を付す。また、各固有表現およびMicro-F1-scoreでの最良値を太字とした。パターンCにおいて、Micro-F1-scoreが一番高い性能を得た。パターンCにおけるatom, fig_LL, fig_ULはいずれもCW: ClueWordsがNCW: NotClueWordsを上回る結果を得た。

F1-scoreにおいて検定(素性群)を行った結果、atomおよびfig_ULは有意差がみられなかった。一方、fig_LLはp値が0.0027となり、有意差が確認できた。続いて、F1-scoreの値を比較すると、fig_LLとfig_ULでは、いずれの素性においても、CW: ClueWordsはNCW: NotClueWordsと比較し、同等以上の結果となっている。したがって、手掛かり語タグlimitationの導入の影響は、性能を低下させず、むしろ上昇させる結果となった。本結果を、手掛かり語タグlimitationと意味的関連性を持つfig_LLとfig_ULとの文中の隣接割合と比較する。タグの隣接割合を表7に示す。この表は、データセット(All)における手掛かり語タグと抽出対象のタグが隣接する割合を調査したものである。手掛かり語タグ「limitation」の前後に抽出対象「fig_LL」、「fig_UL」のいずれかが含まれる割合および手掛かり語タグ「selection」の前後に抽出対象「atom」が含まれる割合を示す。limitationおよびfig_LLとfig_ULと隣接する割合が61.96%と高い。すなわち、CRFはタグの遷移を利用するため、手掛かり語タグlimitationが抽出対象のfig_LLおよびfig_ULの精度向上に直接的に寄与している結果が得られたと考えられる。

表6 抽出対象タグの結果

Table 6 Results for target tags

Feature of pattern	Dataset	atom	fig_LL	fig_UL	Micro-F1-score
A	CW	<u>0.9658</u>	0.9865	0.9935	<u>0.9727</u>
	NCW	0.9630	0.9712	0.9909	0.9690
B	CW	0.9658	<u>0.9846</u>	<u>0.9922</u>	0.9719
	NCW	0.9688	0.9729	0.9909	<u>0.9730</u>
C	CW	<u>0.9668</u>	0.9865	0.9935	0.9741
	NCW	0.9610	0.9730	0.9922	0.9705
D	CW	0.9608	<u>0.9807</u>	0.9922	0.9700
	NCW	<u>0.9620</u>	0.9767	0.9922	<u>0.9706</u>
E	CW	<u>0.9530</u>	<u>0.9733</u>	<u>0.9870</u>	<u>0.9664</u>
	NCW	0.9522	0.9572	0.9832	0.9635
F	CW	0.9539	<u>0.9733</u>	<u>0.9870</u>	<u>0.9683</u>
	NCW	<u>0.9558</u>	0.9572	0.9858	0.9659
G	CW	0.9546	<u>0.9771</u>	<u>0.9896</u>	<u>0.9677</u>
	NCW	<u>0.9568</u>	0.9592	0.9858	0.9653
H	CW	0.9556	<u>0.9731</u>	<u>0.9844</u>	<u>0.9671</u>
	NCW	<u>0.9595</u>	0.9613	0.9819	0.9647

表7 手掛かり語タグと抽出対象の隣接割合

Table 7 Percentage of adjacencies between clue word tags and extracted targets

Clue word tag	Number of tags	Number of target tag neighbors	Ratio
limitation	4,935	3,058	61.96%
selection	1,022	22	2.15%

5.1.2 抽出対象タグ以外の結果

前節で用いたMicro-F1-scoreが一番高かったパターンCの組み合わせについて抽出対象タグ以外のF1-scoreを比較した(表8)。前節で述べたように、手掛かり語タグを導入することで、抽出対象のatom, fig_LL, fig_ULの抽出性能は向上し、特にfig_LLは有意差があったが、formulaタグとsumタグは、大きくF1-scoreを落とす結果となった。手掛かり語タグを導入することで、手掛かり語タグの抽出対象でない他のタグの抽出精度に影響を及ぼすことがわかる。Formulaタグは、構成物を含んだ複合語であり、sumタグは、抽出対象の語と距離のある手掛かり語タグである。一方、手掛かり語タグを含めたデータセットにおいて抽出精度が上がったのは、variableとbalanceである。variableは、構成物を変数として表記したもので、atomと混同しやすい。また、balanceは、構成物の比率のうち、明記された比率以外の構成物であるという事象を示すタグである。いずれも、構成物と構成比率の記述近傍における表記であり、意味的関連性も多少有している。構成物と比率を得るという当初の目的の範囲では、手掛かり語タグが高い性能を確保できた。しかしながら、直接的に手掛かり語タグに関与しないタグでは、性能が低くなるタグがあることを確認できた。

手掛かり語タグに関与しないタグの抽出性能低下は、本研究におけるCRFでは、前後1つもしくは2つの語句により、関係性のみを記述していること、また、複合語については、形態素解析の影響も考慮する必要がある。また、他のタグとの関連性が低いタグの抽出については、近傍の素性の影響だけではなく、より文脈に近い特徴量を採用できるBERT-CRFのような手法の方が有利である可能性も考えられる。

表8 パターンCの結果

Table 8 Results for pattern C

	NCW: NotClueWords	CW: ClueWords
atom	0.9610	<u>0.9668</u>
balance	0.8539	<u>0.8764</u>
fig_LL	0.9730	<u>0.9865</u>
fig_UL	0.9922	<u>0.9935</u>
formula	<u>0.9411</u>	0.8235
sum	<u>0.8750</u>	0.7500
unit	0.9904	0.9904
use	0.9890	0.9890
variable	0.7346	<u>0.8076</u>

5.2 RQ2:手掛かり語タグの追加は全体性能に影響するか

結果を表6に示す。全体性能では、パターンCのCW: ClueWordsが、Micro-F1-scoreが一番高かった。一方で、検定(素性群)および検定(学習比率群)では、有意差は見られなかった。以上の結果から、全体性能では、手掛かり語タグを加えたとしても、大きな性能劣化はなく、検定による結果からも有意差はみられなかった。したがって、手掛かり語タグを新たに固有表現として加えたとしても、特に大きな性能劣化を起こす可能性は低いと考えられる。

5.3 RQ3:手掛かり語タグにより有益な手掛かり語が獲得できるか

5.3.1 手掛かり語タグlimitationの手掛かり語獲得の結果

データセット(OnlyClueTag)では、有益な手掛かり語は獲得できなかったが、データセット(All)では、有益な手掛かり語が獲得できた。新たに手掛かり語として認識された表現は「並びに」と「002」であった。単語「002」は誤抽出であったため、結果として有益な手掛かり語として認識された表現は1種類であった。素性Dの学習比

率が90%から40%において、「並びに」がlimitationの手掛かり語として獲得できた。

予測結果から、「並びに」は「12質量%のCr」と「35質量%以下のAl, Si, Y」の間にあり、元素の含有量と単位を含む表現の間にlimitationとして、付与されていた。この結果は、当初想定していた、元素の含有量以外にも、元素の含有量と単位を含む表現も手掛かり語タグlimitationにより、抽出可能なことを示唆している。

5.3.2 手掛かり語タグselectionの手掛かり語獲得の結果

表9では、二つのデータセット(OnlyClueTag, All)で使われる学習データの中で「selection」のタグが付与されておらず、テストデータで「selection」のタグが付与された単語の一覧を示す。新たに手掛かり語として認識された表現の数は18種類であった。そのうち、selectionの定義を踏まえ、有益であると思われる単語は太字とした。したがって、有益な手掛かり語として、selectionでは、16種類の手掛かり語を新たに獲得することができた。

続いて、データセット(OnlyClueTag)において、新たに獲得した「下記」、「示す」の獲得事例を述べる。予測結果から、「下記に示す群から選択される1種以上の元素を含有」がselectionとして付与された。これまで、予測は請求項の一文単位で実施していた。一方で、予測結果では、selectionが付与された文章の直後の文章に記載されている元素名を関連付けていた。この結果、次の文章に記載された抽出対象に対する関係性もselectionにより識別可能であり、グループとして抽出可能なことを確認した。文章間における抽出対象を関連づけることが可能となれば、特許調査の更なる効率化が期待できる。文書を跨ぐ関連付けは、今後の評価課題としたい。

6. 結言

本研究では、材料科学技術に関する特許文書からの固有表現抽出を行った。具体的には、材料組成に関する情報抽出に着目した。材料組成を示す、材料を構成する元素とその比率範囲を示す数字を抽出するためには、元素名や数字を単独で抽出するのではなく、特定の元素に対する比率範囲を一つのグループとして抽出する必要がある。そこで、本研究では、元素やその比率範囲を表す数字の他に、手掛かり語タグを導入し、元素とその比率範囲を一つのグループとして、まとめて抽出する手法を提案した。しかしながら、抽出精度向上のためには、手掛かり語タグの導入が抽出対象以外の抽出精度を低下させる影響を抑制する必要がある。そこで、リサーチクエスチョン(RQ)を設定し、その影響評価を実施した。その結果、手掛かり語タグが抽出対象の精度向上に寄与(RQ1)し、特に、比率下限を示す数値であるfig_LLの抽出精度が有意に向上することを確認した。また、手掛かり語タグとして、固有表現のクラスを新たに追加したとしても、大きな性能劣化は示さなかった(RQ2)。さらに、予め設定した手掛かり語タグが付与された手掛かり語だけでなく、新たな有益な手掛かり語が獲得(RQ3)できた。

以上の結果から、本研究では、手掛かり語タグの導入により、効率的に元素とその比率範囲を抽出することが可能であることがわかった。さらに、手掛かり語タグにより、新たな手掛かり語が獲得可能であることを示した。今後は、獲得した手掛かり語の自動精査方法についても検討を行う予定である。本研究により、材料科学技術における特許文書からの固有表現抽出の精度と効率性が向上し、より正確な情報抽出となると考えられる。また、元素とその比率範囲だけでなく、各種特性とその数値範囲といった技術情報の抽出に広く応用可能であり、蓄積された技術文書の活用への貢献が期待できる。

※D2Materiは株式会社プロテリアル®の商標です。

表9 新たにselectionが付与された単語

Table 9 Newly assigned word selection

示す (indicates)	満たさ (fulfillment)	若しくは (or)	任意 (any)
組み合わせ (combination)	必ず (always)	置換 (substitution)	下記 (below)
場合 (case)	単独 (independence)	一つ (one)	成る (consist of)
含ま (include)	それぞれ (respectively)	含み (tone)	もしくは (or)
並びに (as well as)	過剰 (excess)		

引用文献

- 1) 特許庁:令和元年度特許出願技術動向調査結果概要マテリアルズ・インフォマティクス, 特許庁(オンライン), 入手先<<https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/201907.pdf>>(参照 2023-05-24).
- 2) 黒川,他:マテリアルズインフォマティクス技術を活用した材料開発:環境経営に寄与するChemicals Informatics, 日立評論, Vol.104(2022), No.2, p.249-254.
- 3) 研究開発戦略センター(CRDS):材料創製技術を革新するプロセス科学基盤 ~プロセス・インフォマティクス~, 研究開発戦略センター(CRDS)(オンライン), 入手先<<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-SP-01.html>>(参照 2023-05-25).
- 4) Kononova, et al.: Opportunities and challenges of text mining in materials research, iScience, Vol.24 (2021), No.3, p.102155.
- 5) Wei, et al.: Machine learning in materials science, InfoMat, Vol.1 (2019), No.3, p.338-358.
- 6) Olivetti, et al.: Data-driven materials research enabled by natural language processing and information extraction, Applied Physics Reviews, Vol.7 (2020), No.4, p.41317.
- 7) Li, et al.: A Survey on Deep Learning for Named Entity Recognition, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol.34 (2022), No.1, p.50-70.
- 8) Yadav, et al.: A Survey on Recent Advances in Named Entity Recognition from Deep Learning models, Proceedings of the 27th International Conference on Computational Linguistics, (2018), p.2145-2158.
- 9) Ratnov, et al.: Design Challenges and Misconceptions in Named Entity Recognition, Proceedings of the Thirteenth Conference on Computational Natural Language Learning (CoNLL-2009), (2009), p.147-155.
- 10) Sekine, et al.: Extended Named Entity Hierarchy, Proceedings of the Third International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'02), (2002), p.1818-1824.
- 11) Seon, et al.: Named Entity Recognition using Machine Learning Methods and Pattern Selection Rules., Proceedings of the NLP RS, (2001), p. 229-236.
- 12) Jie, et al.: Efficient Dependency-Guided Named Entity Recognition, Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence, (2017), p.3457-3465.
- 13) Draxl, et al.: NOMAD: The FAIR concept for big data-driven materials science, MRS Bulletin, Vol.43 (2018), No.9, p.676-682.
- 14) Chen, et al.: A Critical Review of Machine Learning of Energy Materials, Advanced Energy Materials, Vol.10 (2020), No.8, p.1903242.
- 15) Weston, et al.: Named Entity Recognition and Normalization Applied to Large-Scale Information Extraction from the Materials Science Literature, Journal of Chemical Information and Modeling, Vol.59 (2019), No.9, p.3692-3702.
- 16) Kuniyoshi, et al.: Analyzing research trends in inorganic materials literature using nlp, Proceedings of the Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases, (2021), p.319-334.
- 17) Jensen, et al.: A machine learning approach to zeolite synthesis enabled by automatic literature data extraction, ACS Central Science, (2019), p.892-899.
- 18) Court, et al.: Magnetic and superconducting phase diagrams and transition temperatures predicted using text mining and machine learning, npj Computational Materials, Vol.6 (2020), No.1, p.18.
- 19) Tshitoyan, et al.: Unsupervised word embeddings capture latent knowledge from materials science literature, Nature, Vol.571 (2019), p.95-98.
- 20) Augenstein, et al.: SemEval 2017 Task 10: ScienceIE - Extracting Keyphrases and Relations from Scientific Publications, Proceedings of the 11th International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval-2017), (2017), p.546-555.
- 21) Chen, et al.: Application of NER and Association Rules to Traditional Chinese Medicine Patent Mining, 2020 International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics), (2020), p.767-772.
- 22) Pantel, et al.: Espresso: Leveraging Generic Patterns for Automatically Harvesting Semantic Relations, Proceedings of the 21st International Conference on Computational Linguistics and 44th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, (2006), p.113-120.
- 23) Sumida, et al.: Concept-Instance Relation Extraction from Simple Noun Sequences Using a FullText Search Engine, Proceedings of the ISWC 2006 workshop on Web Content Mining with Human Language Technologies (WebConMine), (2006), p.442-447.
- 24) Etzioni, et al.: Unsupervised named-entity extraction from the Web: An experimental study, Artificial Intelligence, Vol.165 (2005), No.1, p.91-134.
- 25) 坂地, 他: Cross-Bootstrapping:特許文書からの課題・効果表現対の自動抽出手法, 情報爆発論文, Vol.93 (2010), No.6, p.742-755.
- 26) Vaswani, et al.: Attention is all you need, Advances in neural information processing systems, Vol.30 (2017).
- 27) Devlin, et al.: BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding, Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers), (2019), p.4171-4186.
- 28) OpenAI: GPT-4 Technical Report, arXiv preprint

- arXiv: 2303.08774, (2023).
- 29) Hu, et al.: Zero-shot clinical entity recognition using chatgpt, arXiv preprint arXiv: 2303. 16416, (2023).
 - 30) Alsentzer, et al.: Publicly Available Clinical BERT Embeddings, Proceedings of the 2nd Clinical Natural Language Processing Workshop, (2019), p.72-78.
 - 31) Polak, et al.: Flexible, Model-Agnostic Method for Materials Data Extraction from Text Using General Purpose Language Models, arXiv preprint arXiv: 2302. 04914, (2023).
 - 32) Polak, et al.: Extracting Accurate Materials Data from Research Papers with Conversational Language Models and Prompt Engineering-Example of ChatGPT, arXiv preprint arXiv: 2303. 05352, (2023).
 - 33) Tjong, et al.: Representing Text Chunks, Proceedings of the Ninth Conference on European Chapter of the Association for Computational Linguistics, (1999), p.173-179.
 - 34) Lafferty, et al.: Conditional Random Fields: Probabilistic Models for Segmenting and Labeling Sequence Data, Proceedings of the Eighteenth International Conference on Machine Learning, ICML '01, (2001), p.282-289.
 - 35) 奥村, 他: 言語処理のための機械学習入門, コロナ社, (2010).



酒井 敏彦
Toshihiko Sakai
九州大学大学院システム情報科学府



千綿 伸彦
Nobuhiko Chiwata
株式会社プロテリアル
研究開発本部グローバル技術革新センター
兼 知的財産部 IP ソリューショングループ
博士(工学)



峯 恒憲
Tsunenori Mine
九州大学大学院システム情報科学研究院
博士(工学)

非接触充電向け磁気シート

Magnetic Sheet for Wireless Charging

▶▶▶ FINEMET® MS-HiQ Series ◀◀◀

非接触充電はコード不要で充電できる利点を活かし、ペースメーカーなどの医療機器で使用が始まった。続いて、防水性が求められる電動歯ブラシなど徐々に採用製品を増やしていき、携帯電話に機能が搭載されたことで急激に普及した。さらに、2020年には車載用の非接触充電の規格SAE J2954が発行され、実用化に向けた検討が本格化している。

図1に非接触充電システムの構成を示す。有線に比べて効率が低く、効率向上がさらなる普及への課題である。そのためには損失係数の逆数となる品質係数 Q (Q が高いほど損失が小さく、高効率となる)が高いコイル構成とする必要があり、シールドおよびバックヨークと

しての機能を持つ磁気シートをコイル背面に配置することが有効である。携帯電話では薄肉かつ高 Q を示すナノ結晶材を用いた磁気シートが多く採用され、当社のナノ結晶軟磁性材料ファインメット®も大きなシェアを保有している。

一方、携帯電話向けの容量が20W以内であるのに対し、電気自動車向けは3~11 kWと大きく、磁気シートのサイズ、厚みも増加するため、フェライトを使用した開発が主流となっている。

そこで当社では、車載向けにおいてもファインメットの特徴を活かせると考え、「MS-HiQシリーズ」(図2)を開発した。MS-HiQシリーズはリボンに割を入れ分割して損失を低減する従来技術に

加えてリボンに異方性を付与したうえで、リボン長手方向を高 Q 化したシートを磁束の流れる方向と揃うようにパネルを分割して放射状に構成し、パネルとしての高 Q 化を図った。図3に、例として3つのパネル構成を示し、図4にそのときのシート厚と Q の相関を示す。フェライトに対して放射状に4分割したパネルで約1/2の厚さ、8分割では約1/3の厚さでほぼ同等の Q を得られ、大幅な薄肉軽量化が実現できる。

このMS-HiQシリーズは今後普及が期待される車載向けの非接触充電機器の高効率・小型軽量化に貢献することが期待される。

(パワーエレクトロニクス事業部)

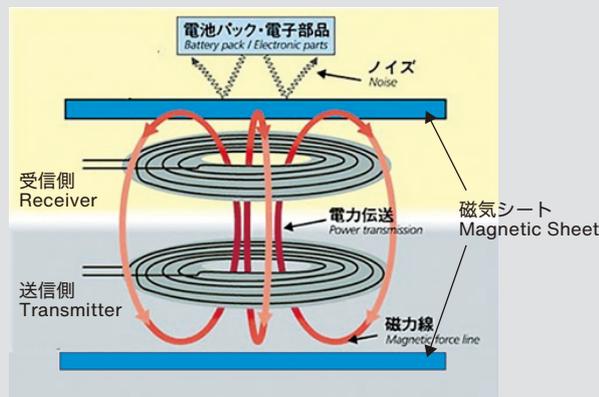


図1 非接触充電システムの概略構成

Fig.1 Configuration of wireless charging system

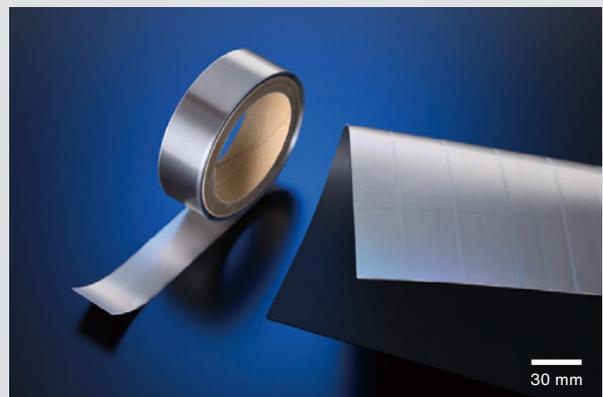


図2 FINEMET® 磁気シート

Fig.2 FINEMET® Magnetic sheet

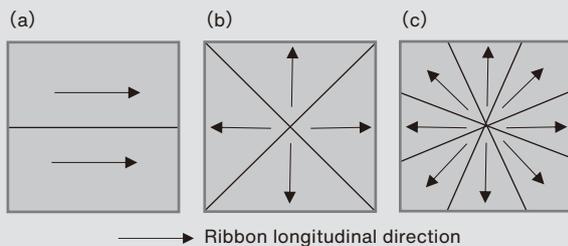


図3 パネル構成例 (a) 並行 2 片 (b) 放射状 4 片 (c) 放射状 8 片

Fig.3 Panel configuration example (a) parallel 2 pieces, (b) radial 4 pieces, (c) radial 8 pieces

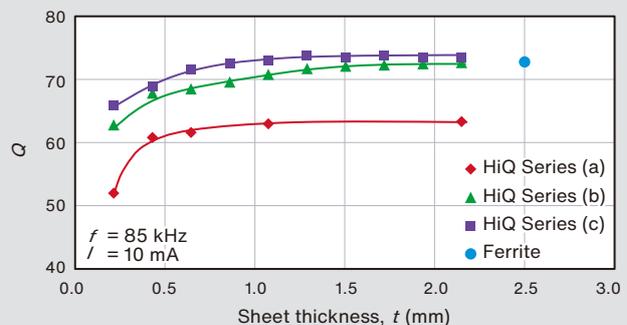


図4 シート厚と Q の相関

Fig.4 Relationship between sheet thickness and Q factor

※ ファインメットおよびFINEMETは、株式会社プロテリアル®の登録商標または商標です。

磁性楔

Magnetic Slot Wedge

モーターは世界の総電力の半分近くを消費しているため、モーターの高効率化はCO₂排出量削減における最重要課題のひとつである。その取り組みのひとつとして、モーターの構造やサイズを変えることなく、スロット開口部に取り付けるだけで高効率化を実現する「磁性楔(くさび)」が注目されている。樹脂中に鉄粉を分散させた構造を持つ従来の磁性楔*1は透磁率が低く、モーター効率の向上効果が十分に得られない課題があった。また耐熱性も低く、適用範囲が限られていた。

当社は、樹脂を使用せずに磁性粒子を結着する新技術を用いて新しいタイ

プの磁性楔を開発した(図1)。この新技術により磁性粒子の密度を高めることが可能となり、従来比約2倍の高透磁率を実現した(図2)。さらに樹脂レスの当社材は高強度で、かつ高温でも強度が低下しない優れた耐熱性を示す(図3)。

定格出力7.5 kWの誘導モーターに磁性楔を使用した場合のモーター効率について、コンピューターシミュレーションを行った。その結果、当社の磁性楔を使用することで磁性楔を使用しない場合に比べてモーター効率が最大1pt*2向上した。また、高透磁率を有する当社材は、従来材よりも約1.5倍のモーター効率の向上効果を示すことが

確認された(図4)。

このように当社の磁性楔は高透磁率・高強度・高耐熱性という特長があり、これまで磁性楔が使用されなかった用途・サイズのモーターへも適用でき、その効率を向上させることが可能となる。今後、プロテリアルはこの磁性楔の量産化を通じて低炭素社会の実現に貢献していく。

*1 従来の磁性楔の特性値などは当社の調査結果および測定結果に基づく。

*2 モーター効率を表す単位。当社実験において1%のモーター効率向上を1ptと表した。

(パワーエレクトロニクス事業部、株式会社プロテリアルフェライト電子)



図1 磁性楔の外観写真

Fig.1 Appearance of magnetic slot wedges

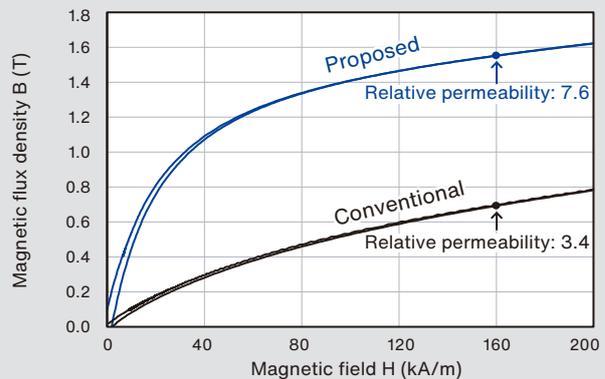


図2 直流磁化曲線

Fig.2 DC magnetization curves

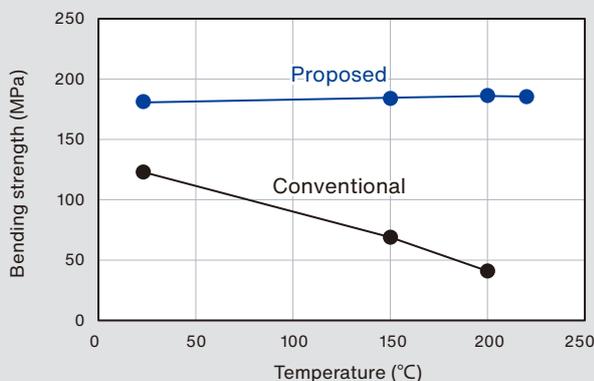


図3 曲げ強度の温度依存性

Fig.3 Temperature dependence of bending strength

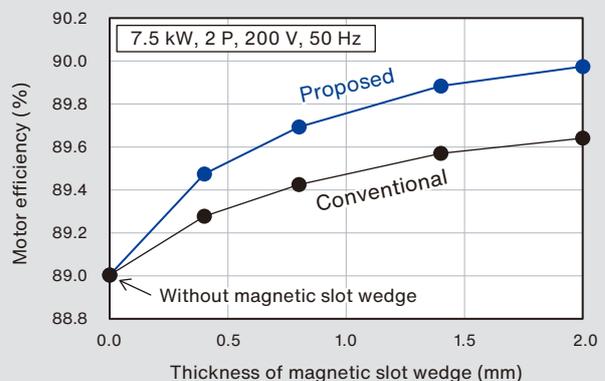


図4 磁性楔によるモーター効率向上(電磁界解析)

Fig.4 Improvement of motor efficiency by magnetic slot wedge (simulation)

高性能ナノ結晶軟磁性材料

High Performance Nanocrystalline Soft Magnetic Materials

▶▶▶ FINEMET® FT-3K10Q ◀◀◀

自動車の電動化が進展するとともに、搭載される電子機器の高効率化と高信頼性への要求が高まっており、高密度に搭載される各電子部品は、さらなる小型軽量化および広い温度範囲での性能や信頼性の向上が求められている。

当社は自動車用電装部品をはじめとするさまざまな電子回路に搭載される軟質磁性材料のひとつとして、ナノ結晶軟磁性材料ファインメット®を製造・販売しており、磁心(コア)材料として安定した品質を高く評価いただき、多くのお客様に採用されてきた。

このたび、このファインメットを使用

し、コモンモードチョークコイル・コア「FT-3K10Q」シリーズを新たに開発した(図1)。この製品は当社独自の技術により、kHz~MHzの幅広い周波数領域において、高いインピーダンスを実現し、コモンモードノイズを効果的に抑制することが期待できる。具体的には表1および図2に示すように従来材FT-3K50Tと比較して、インピーダンスが周波数100 kHzで約30%、1 MHzで約10%改善した。また図3に示すとおり-40°Cから150°Cの間でのインピーダンスの変化率が12%と小さいため、広い温度環境下で、車載電装品の性能安定

化を図ることが可能である。本製品の使用により、車載充電器や駆動用インバータなどの車載部品に使用されるノイズフィルターの高信頼性化、小型軽量化が可能となる。

ナノ結晶軟磁性材料ファインメットの「FT-3K10Q」シリーズを新たな製品ラインナップに加え、当社は市場のニーズにこれまで以上に幅広く応え、今後も新規材料開発に注力するとともに、電子部品のさらなる高効率化、信頼性向上、小型軽量化に貢献する。

(パワーエレクトロニクス事業部)



図1 コモンモードチョークコイル・コア FT-3K10Q シリーズ

Fig.1 Common mode choke coil and core FT-3K10Q series

表1 従来材料との比較

Table1 Comparison with conventional material

	Impedance (Ω)		
	10 kHz	100 kHz	1 MHz
FT-3K10Q	2.32	9.57	21.05
FT-3K50T	1.02	7.31	18.72
Mn-Zn Ferrite (MP70D by Proterial)	0.19	2.05	6.73

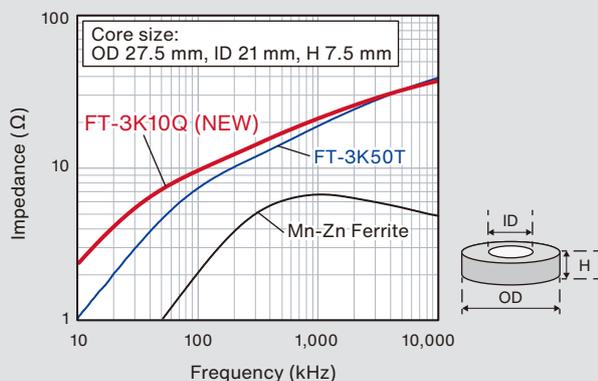


図2 インピーダンス周波数特性

Fig.2 Frequency characteristics of impedance

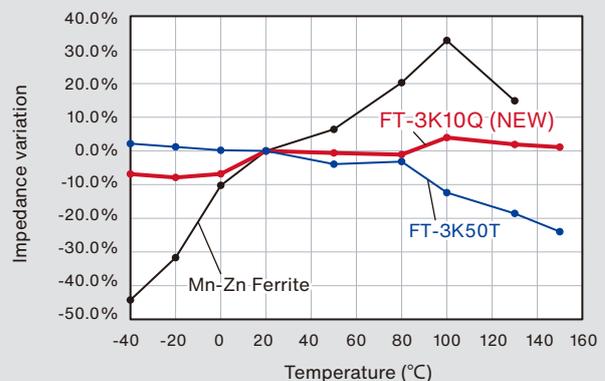


図3 インピーダンスの温度依存性

Fig.3 Temperature dependence of impedance

※ ファインメットおよびFINEMETは、株式会社プロテリアルの登録商標または商標です。

高Ni層状正極材製造技術

Manufacturing Method for High-Ni Layered Cathode Material

カーボンニュートラル社会の実現に向け、CO₂排出量の削減が可能な電気自動車(EV)の普及が進み、これに伴いEVの動力源であるリチウムイオン二次電池(LIB)の需要が急速に拡大されることが予測される。また、EV車両の製造、走行、廃棄に至るライフサイクル全体における環境規制が計画されている。EV車両を製造するうえでは、LIB製造、とりわけ正極材の出発原料の製造に由来するCO₂排出量が最も大きな割合を占めており、削減が求められている。

そこで、CO₂排出量が少ない出発原

料を使用できる正極材製造技術の開発に取り組んだ。その結果、金属ニッケル(Ni)を水溶性の硫酸Niにし、さらに水酸化Ni化する、これまで必須であった工程を経ずに、金属Niから高Ni層状正極材を直接製造する技術を開発した(図1、図2)。この技術を用いて製造した正極材と、従来の当社製法で製造した正極材との電気化学特性が同等であることを確認した(表1)。また、開発した技術をNiのみを構成元素とするLiNiO₂正極材に適用した場合の出発原料由来のCO₂排出量を試算した

(図3)。従来の当社製法と比べて、開発した技術により出発原料由来のCO₂排出量を約30%削減することが見込める。これは、出発原料製造を含む正極材製造プロセス全体におけるCO₂排出量を20%以上削減することに相当する。

今後は、開発技術を製品ライフサイクルにわたる脱炭素ソリューションとして電池業界に提供することで、環境価値向上に貢献する。

(グローバル技術革新センター)

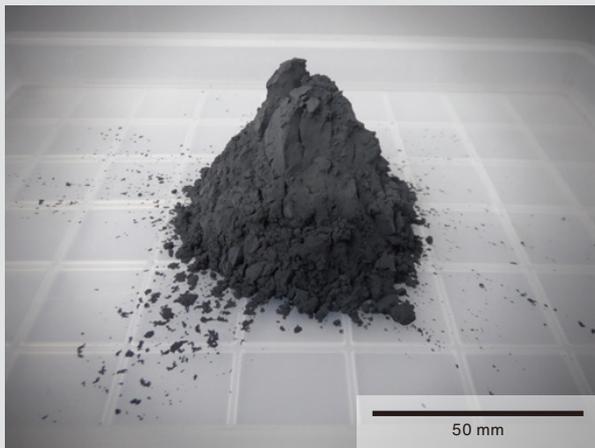


図1 高Ni層状正極材

Fig.1 High-Ni layered cathode material

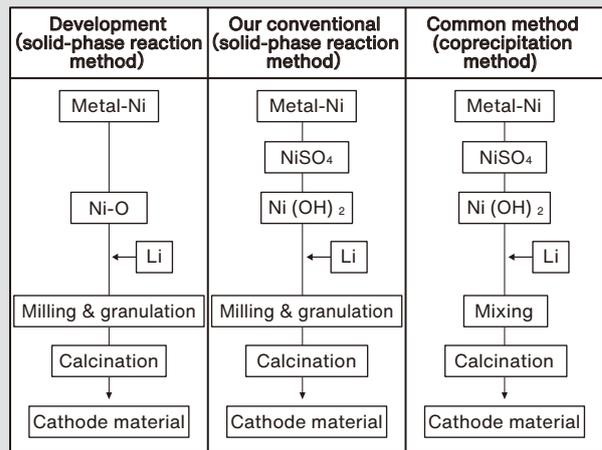


図2 正極材の製造方法

Fig.2 Manufacturing method for cathode material

表1 電気化学特性

Table1 Comparison of electrochemical properties

	New	Conventional
Discharge capacity (Ah/kg)	192	190
Capacity retention (%)	90	88

Composition: LiNi_{0.85}Co_{0.03}(Mn_(0.12-x)X_a)O₂
 Discharge capacity measurement conditions: 4.3-2.5 V, 0.2 C (25°C), Anode: Li metal
 Cycle conditions: 4.3-2.5 V, 1 C (25°C), Anode: Li metal

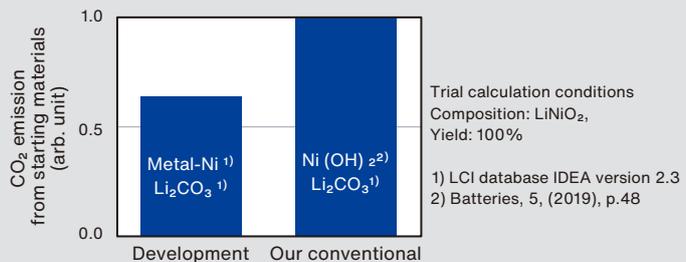
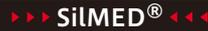


図3 出発原料由来のCO₂排出量

Fig.3 CO₂ emissions from starting materials

UV-C耐性医療用シリコンケーブル

UV-C Resistant Silicone Sheathed Cable for Medical Applications



シリコンゴムをシース(保護外層)に適用したケーブルは、優れた耐薬品性、耐滅菌性能、生体適合性といった特徴から医療機器に用いられている。当社はシリコンシースの課題である表面の粘着性を独自の表面処理技術により改善した高い滑り性のシリコンケーブル「SILMED®」(図1)を2020年に上市した。この製品は、国内外のさまざまな医療機器に用いられている。

また、感染症対策の観点から、効果的かつ簡便で高頻度を実施できる深紫外線(UV-C)を用いた滅菌・消毒方法が採用されてきており、このたび高い滑り性とUV-C耐性を兼ね備えたSILMEDを新た

に開発した。

図2に従来品および本開発品のUV-C照射量に対する引張破断伸びの関係を示す。従来品においては、UV-Cに対しての耐性が弱く、照射量に伴いシリコンゴムの劣化が生じ、破断伸びが低下する。この場合、実使用時にシースにクラックが発生するなどして本来のシースの機能を果たさなくなる懸念がある。本開発品は、シリコンゴムと表面処理層中にUV-Cを吸収する添加剤を含有させることにより、UV-C照射に対しての破断伸び値の低下を大幅に緩和した。その結果、想定の実使用環境相当のUV-Cを照射した場合でも、破断伸び値が150%以上とし、シースの機

能を損なわない範囲に留めることに成功した。

また、本開発品は表1に示す通り、従来SILMEDが有する優れた滑り性、繰返し拭取り耐久性、耐薬品性といった特長的な機能も本開発品が有していることを確認済である。

本開発品は上市済みであり、超音波診断装置といった医療機器にすでに採用されている。2023年8月現在、新型コロナウイルス感染症対策が必要な状況は続いており、UV-Cを用いた滅菌・殺菌方法に対応した本開発品は、今後も幅広い医療機器への適用が期待される。

(電線事業部)

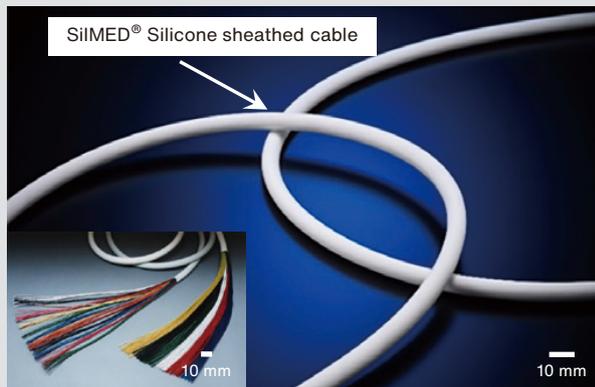


図1 SILMED® および超音波診断装置用ケーブル

Fig.1 SILMED® and cable for ultrasound diagnostic equipment

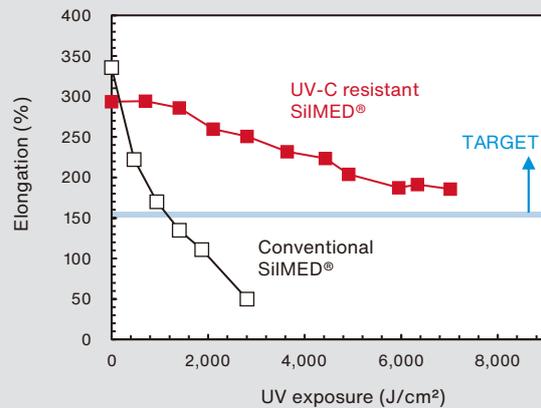


図2 UV-C 照射量に対する引張破断伸び

Fig.2 Tensile elongation vs. UV-C irradiation dose

表1 開発品の特性

Table1 Properties of developed product

Item	UV-C resistant SILMED®	Conventional SILMED®
Sliding properties	Coefficient of static friction: Less than 0.20 * 4	Coefficient of static friction: Less than 0.20 * 4
Wipe durability * 1 (nonwoven fabric impregnated with chemical solution * 2)	Coefficient of static friction: less than 0.22 (after performing wipe testing) * 4	Coefficient of static friction: less than 0.22 (after performing wipe testing) * 4
Chemical resistance * 3	Almost no discoloration (color difference ΔE * ab < 2.5 * 4)	Almost no discoloration (color difference ΔE * ab < 2.5 * 4)

* 1 Wipe durability: Durability after 10,000 wipes using a nonwoven fabric impregnated with a chemical solution. Depending on the type of nonwoven fabric, the chemical solution and the wiping method, the sliding properties may deteriorate.

* 2 Nonwoven fabric impregnated with a chemical solution: Nonwoven fabric impregnated with ethanol for disinfection, Sani-Cloth® HB, Soflight™. Sani-Cloth is a registered trademark or a trademark of PDI, Inc. Soflight is a registered trademark or a trademark of Asahi Kasei Advance Corporation.

* 3 Chemical resistance: Ethanol for disinfection and many different disinfectants for medical devices

* 4 This represents a test result, and not a guaranteed performance standard.

※ SILMEDは、株式会社プロテリアル®の登録商標または商標です。

鉄道車両用 1 Gbps伝送用カテゴリ5Eケーブル

Category 5E Cable for 1 Gbps Transmission for Rolling Stock

▶▶▶ RailNS® (NH) -C5E 24AWG×4P ◀◀◀

基幹伝送のイーサネット*1化, 車内案内表示やデジタルサイネージ, 乗客へのインターネットアクセスサービスなど鉄道車両上で取り扱う情報はますます増加している。加えて車載カメラを利用した省人化や業務効率化に関する取り組みや, 相次ぐ事件を受けて車内防犯カメラを設置するといった取り組みなども進んでおり, 鉄道車両用通信ケーブルには細径化, 軽量化, 高速伝送化が求められている。こうしたことを背景に当社プロテリアルでは既存のカテゴリ5 (CAT.5) ケーブルを改良し, 1 Gbps 伝送に対応したカテゴリ5E (CAT.5E) ケーブルを開発した(図1)。

鉄道車両用のケーブルは, 日本市場

においては車材燃試の「難燃性」であることが必須となる。一方で海外市場では欧州火災安全性規格 (EN45545-2*2) で規定される燃焼試験に合格することが必須とされるケースが増えており, より厳しい火災安全性が求められる。開発品は独自開発した高難燃のハロゲンフリーシース材料を採用することで車材燃試, 欧州火災安全性規格の両特性を満足し, 日本市場でも海外市場でも対応可能な製品とした(表1)。またシース材料に高難燃性を付与することで絶縁体材料へ難燃剤の添加は不要となり, 電気特性の良好なポリエチレンで構成することができるため火災安全性と電気特性を両立することができた(図2, 図3)。

さらにシース材料に関しては開発段階で耐外傷性もすぐれた材料を選定することで, 従来のカテゴリ5 (CAT.5) ケーブルよりもシース厚さを薄くしつつ耐外傷性は向上させることができた(表2)。本製品の開発により, カメラなどの画像伝送が可能になり省人化, 安全性の確保また軽量化により輸送効率の向上にも寄与すると期待される。

*1 「イーサネット」は富士フィルムビジネスイノベーション株式会社の登録商標です。

*2 EN: European Norm 欧州規格

(電線事業部)

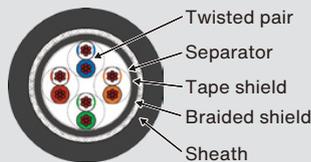


図1 CAT.5E ケーブルの断面

Fig.1 Cross of CAT.5E cable

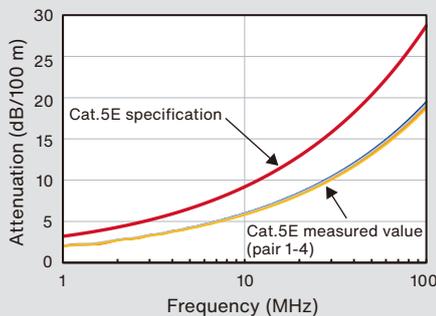


図2 減衰量特性

Fig.2 Attenuation performance

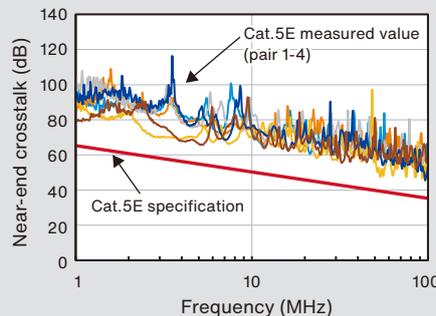


図3 近端漏話特性

Fig.3 Near-end crosstalk performance

表1 火災安全性の結果

Table1 Results for reaction to fire

Item	Requirement	Result
Flame retardance (sheath)	"Flame-retardant"	Passed ("Flame-retardant")
Flame retardance (single)	Unburned part > 0.05 m Burned part ≤ 0.54 m	Passed (0.28 m) Passed (0.48 m)
Flame retardance (bundled)	Burned part ≤ 2.5 m	Passed (0.67 m)
Smoke density	Light transmission ≥ 70%	Passed (97.7%)
Toxicity (insulation)	Toxicity index (ITC) ≤ 6	Passed (3)
Toxicity (sheath)	Toxicity index (ITC) ≤ 6	Passed (3)

表2 CAT.5 ケーブルと CAT.5E ケーブルの比較

Table2 Comparison of CAT.5 Cable and CAT.5E Cable

Item	CAT.5 cable (conventional cable)	CAT.5E cable (developed cable)
Sheath thickness	1.4 mm	1.0 mm
Cable diameter	8.6 mm (max. 9.1 mm)	7.5 ± 0.5 mm
Approx. mass	98 kg/km	80 kg/km
Dynamic cut-through	445 N	678 N

※ RailNSは, 株式会社プロテリアルの登録商標または商標です。

防鼠対応フレキシブル通信ケーブル

Flexible Rodent Resistant Cable

監視カメラなどの情報端末の増加に伴い、通信ケーブルが多く使われるようになってきた。それにつれて、データセンターのような環境の整った場所だけでなく既存事務所の一角を機器室として活用するようなケースも発生してきた。そのような場所では、屋外と繋がっている床下からげっ歯類の小動物が侵入し、通信ケーブルを断線させるような被害が想定される。特にケーブル端末を収容している小空間の配線箱内で起こりやすい事象となっている。

こうした咬害被害に対して、通信ケーブルには外部シースの内側にステンステープを巻き付けて対策を図ってきた。ところが、この対策によりケーブルが硬く曲げにくく、かつ太くなるため、狭い機

器室内では使いづらく、屋外用途として使用されることが一般的であった。その結果、機器室内では配線しやすさが優先され、フレキシブル性を備える反面、咬害対策が取られていないケーブルが採用されることとなり、配線箱内で被害が起こりやすかった。

そこで当社では、編組の製造技術に着目し、咬害対策の検討を行った。一般的に編組に使用する材料は、銅等の柔らかい線材を使うことが多いが、げっ歯類の小動物からの咬害被害を防ぐためステンレス製の硬い線材を使うこととした。また、編組条件については、編組密度を高くすると硬く曲げにくくなる一方で密度を低くすると咬害被害に対して不利になってくるという相反する要求に対し

て、編組密度とフレキシブル性に対する独自指標を用い、両立できる条件出しを行った(表1)。咬害に対しては、実際のネズミによる咬害試験と当社独自のフレキシブル性試験の指標で評価を行った。

これらの評価をもとに、ステンレス編組を採用したケーブル構造にすることで、防鼠対策を施しながら柔らかくて曲げやすい光ケーブル(図1)およびLANケーブル(図2)の提供を開始したところ、鉄道事業者を中心に採用されるケースが増えてきた。屋内用途だけでなく、屋外用途にも使用できる仕様の要望もあり新たなラインアップとして2023年度より提供を開始した(図3)。

(電線事業部)

表1 編組条件と咬害特性

Table1 Braid condition and rodent resistance

Items		Sample A	Sample B	Sample C	Corrugated cable
Braid conditions	Density	88%	88%	70%	-
	Flexibility *	21	72	100 (flexible)	0 (hard)
Rodent resistant		○	○	×	○

* フレキシブル性に対する製造条件を比較できるように数値化した当社独自指標
Our original parameter so that manufacturing conditions for flexibility can be compared.



図1 ステンレス編組型フレキシブル光ケーブル

Fig.1 Stainless steel braided flexible optical cable



図2 ステンレス編組型フレキシブルLANケーブル(Cat5e, STP)

Fig.2 Stainless steel braided flexible LAN cable (Cat5e, STP)



図3 ステンレス編組型屋外用細径光ケーブル

Fig.3 Small stainless steel braided outdoor optical cable

高硬度高耐食刃物用鋼

Blade Steel with High Hardness and High Corrosion Resistance

▶▶ YBS™1, YBS™2 ◀◀

切れ味に優れ、度重なる使用でも切れ味が落ちず、かつ錆びにくいといったメンテナンス性に優れた刃物へのニーズは時代を問わず不変のものである。刃物の切れ味は、主に硬さ、刃角度、表面粗さなどで決まるとされており、錆びにくさ、すなわち耐食性は主にCrなどの合金元素量に依存する。一般的な刃物用鋼は、SK材や当社青紙®2号に代表される高炭素鋼とSUS420J2や当社GIN®3に代表されるマルテンサイト系ステンレス鋼に大別される。前者は焼入・焼戻しにより、800HVを超える高い硬さを示すが、耐食性は著しく低い。一方、後者は

前者に比べて高い耐食性を示すが、硬さは低い。このように従来の刃物用鋼では硬さと耐食性の両立は困難であった。そこで当社プロテリアルでは、これらの特性を兼備する高硬度高耐食刃物用鋼「YBS™1」「YBS™2」を開発した。

従来のステンレス刃物鋼とYBS1、YBS2の150℃における焼戻し硬さを図1に示す。YBS1、YBS2ともにサブゼロ処理(焼入れを行ったあと0℃以下で急冷する処理)を実施しない場合は焼入れ温度1,000℃で従来鋼より高い710、760HVが得られた。サブゼロ処理を実施した場合は焼入れ温度1,050℃で青

紙2号に匹敵する798、831HVという非常に高い硬さが得られた。図2に耐食性を評価した塩水噴霧試験の概念図を示し、図3に焼入れ後に150℃で焼戻した試料の12時間噴霧後の外観写真を示す。YBS1はSUS420J2に相当する高い耐食性を示し、YBS2は当社従来品であるGIN3同等の耐食性を示した。

このように、高い硬度と耐食性を兼備するYBS1、YBS2は、切れ味と錆びにくさが同時に要求される医療用メスやカミソリ用替刃、調理用刃物、アウトドアナイフ等への幅広い応用が期待できる。

(特殊鋼事業部)

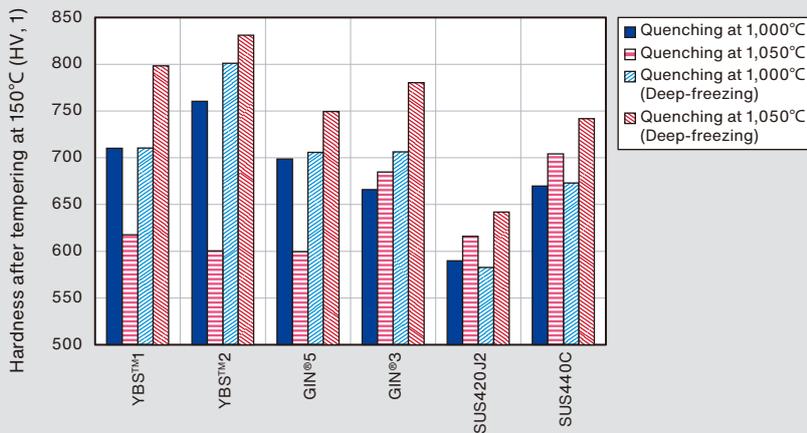


図1 従来材とYBS™1、YBS™2の150℃焼戻し硬さ比較

Fig.1 Comparison of hardness after tempering at 150°C for conventional, YBS™1 and YBS™2

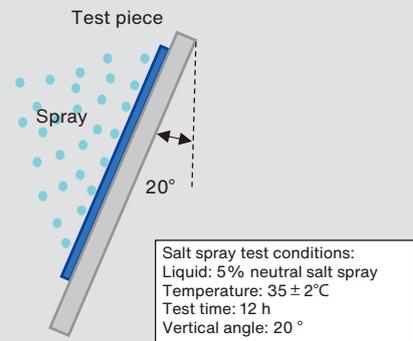
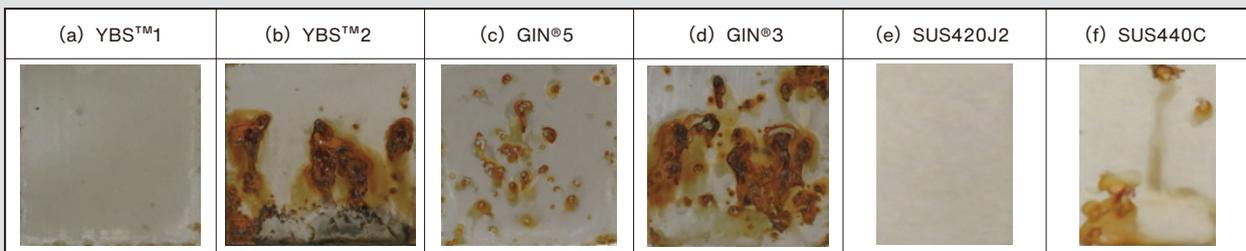


図2 塩水噴霧試験の概念図

Fig.2 Schematic diagram of salt spray test



10 mm

図3 塩水噴霧試験後の試験片の外観写真 (a) YBS™1 (b) YBS™2 (c) GIN®5 (d) GIN®3 (e) SUS420J2 (f) SUS440C

Fig.3 Photographs of test pieces after salt spray test (a) YBS™1, (b) YBS™2, (c) GIN®5, (d) GIN®3, (e) SUS420J2, (f) SUS440C

※ 青紙, GIN, YBSは、株式会社プロテリアルの登録商標または商標です。

SOFC/SOEC用インターコネクタ材

Alloy for SOFC/SOEC Interconnects

▶▶▶ ZMG®232G10 ◀◀◀

固体酸化物形燃料電池(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell)は水素を燃料とした場合に副生成物が水となるクリーンな発電機であり、発電効率は規模に依存しないことから家庭用分散電源から火力発電との複合発電まで、幅広い活用が期待されている。また、固体酸化物形電解セル(SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell)は高温の水蒸気から高効率に水素を製造する機器であり、出力が不安定な再生可能エネルギーを水素に変えて貯蔵する技術として注目されている。SOFCおよびSOECは共にセラミックスのセルを構成単位とし、インターコネクタはセルを電気的に接続する部材である(図1)。

600~850°Cで作動するセルのイン

ターコネクタには作動温度、雰囲気での耐酸化性、導電性を有し、熱膨張係数がセルを構成するセラミックスに近く、加工が容易で比較的低コストとなるFe-Cr系合金が使用される。このFe-Cr系合金のインターコネクタ材についてもSOFCおよびSOECの寿命向上のために長時間の耐久性向上が求められていた。

そこで当社は、作動温度でFe-22~24Crフェライト系ステンレス鋼の表面に形成される酸化膜の構造、組成に影響する合金組成の改良を重ね、ZMG®232G10を開発した(図2)。図3に示すように、本合金は一般ステンレス鋼のSUS443J1と比べて酸化増量が少なく、またSUS445J1に見られるような

酸化膜の剥離がない。Fe-Cr系合金ではCr酸化被膜の保護性が失われると、Fe酸化物が形成して急激に酸化増量が増加する異常酸化現象が知られているが、図4に示すように厚さ3 mmの板材でZMG232G10は総計40,000時間の加熱においても異常酸化を示さず、放物線則に従う安定した酸化挙動を示す。また、一般にインターコネクタ材にはCr蒸発抑制や耐酸化性の向上の観点から保護コーティングが実施されるが、ZMG232G10においても保護コーティングは有効である。例えばMn, Co系酸化物コーティングやCo系めっき等によりCr蒸発をさらに抑制することができる。

(特殊鋼事業部)

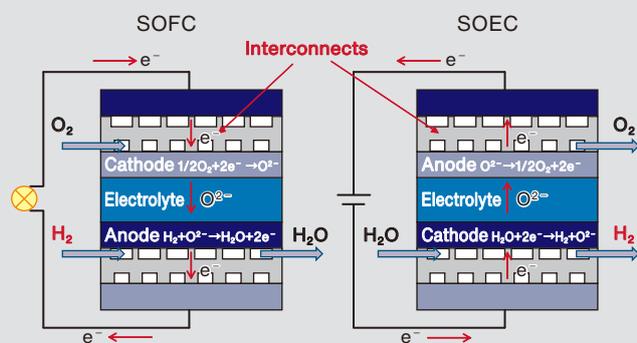


図1 SOFC および SOEC セルの構造模式図

Fig.1 Schematic illustration of SOFC and SOEC cell

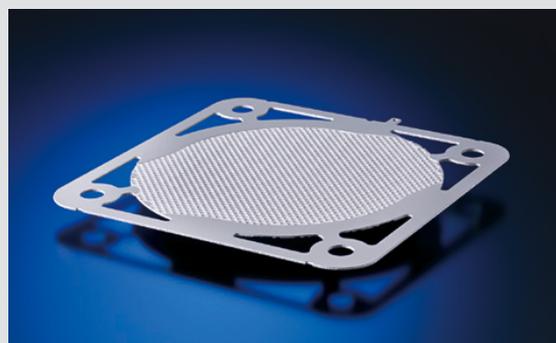


図2 SOFC/SOEC用インターコネクタ材 ZMG®232G10

Fig.2 Alloy for SOFC/SOEC interconnects ZMG™ 232G10

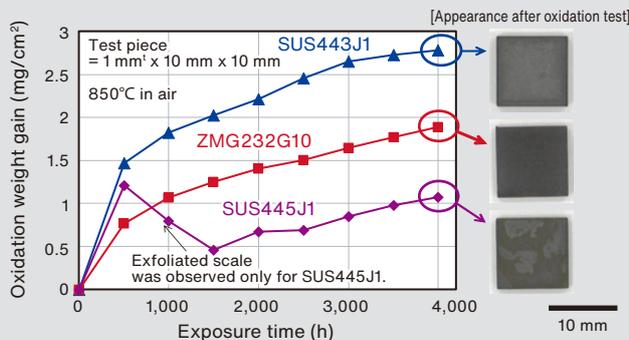


図3 ZMG®232G10と一般ステンレス鋼の耐酸化性

Fig.3 Oxidation resistance of ZMG™232G10 and commercial alloys

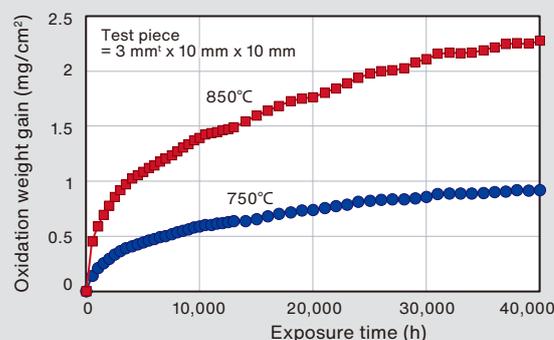


図4 ZMG®232G10 長時間耐酸化性

Fig.4 Long-term oxidation resistance of ZMG™232G10

※ ZMGは、株式会社プロテリアル登録商標または商標です。

フレキシブルディスプレイ用チタン合金箔

Titanium Alloy Foil for Flexible Display

▶▶▶ Ti-15-3-3-3 ◀◀◀

フォルダブルスマートフォンは折りたたむことでコンパクトになり、展開すると大画面のディスプレイが利用できる。屈曲可能且つ柔軟なディスプレイが特徴で、この技術の進化が開発において重要な要素である。デザイン性向上や薄型化のため、折り曲げ部の曲げ半径を小さくする必要があり、より耐久性のある材料や、折り曲げ時の可動部の構造改善が研究されている(図1)。中でもディスプレイの背面に配置される金属板は、ディスプレイと共に折り曲げられるため、繰り返し曲げに対する耐久性が要求される。

金属板は主にステンレスの板や箔が採用される。曲げ応力に対する耐久性

を担保するため、冷間加工により材料強度を向上させたり、曲げ部にメッシュ状の加工を実施したりしている。しかし、前者は冷間加工に伴う加工誘起マルテンサイト変態により磁性を帯び、タッチペン等の使用に支障が生じ、後者ではディスプレイにメッシュの凹凸が転写し、外観上の不具合が生じる問題があった。

これら課題克服のため、当社はチタン合金(Ti-15-3-3-3)のヤング率、ビッカース硬さを調整し、耐久性を向上させたフレキシブルディスプレイ用チタン合金箔を開発した。

ディスプレイ折り曲げ時の曲げ応力は、板の厚さ、ヤング率、曲げ半径により

決定される(図2)。繰り返し曲げに対する耐久性はビッカース硬さだけでは比較できず、相対的にはビッカース硬さをヤング率で除した値で比較ができ、材質として相対的に値の高いチタン合金はステンレスよりも繰り返し曲げに対する耐久性が良く、曲げ半径を2/3程度まで小さくできる(表1, 図3)。

チタン合金は冷間加工後も非磁性で密度も小さいため、磁性の影響が解消でき、軽量化も可能となる。現在各社にサンプル提供を行っており、そのうち数社からは高評価を頂いている。

(株式会社プロテリアル金属)



図1 フレキシブルディスプレイの概略図

Fig.1 Schematic diagram of flexible display

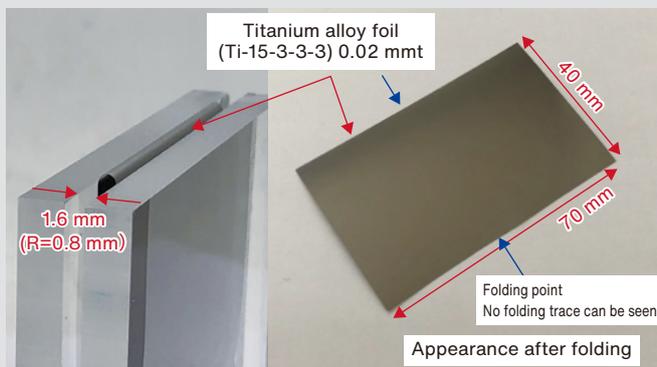


図3 折り曲げられたチタン合金箔 (0.02 mmt)

Fig.3 Folded titanium alloy foil (0.02 mmt)

$$\sigma = \frac{t \times E}{2R}$$

σ : Bending stress (MPa)
t : Thickness (mm)
E : Young's modulus (MPa)
R : Bending radius (mm)

図2 曲げ応力の計算式

Fig.2 Bending stress formula

表1 チタン合金とステンレスの各特性

Table1 Characteristics of titanium alloy and stainless steel

Material	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Permeability μ _r	Young's modulus (GPa)	Vickers hardness (HV)	Vickers hardness ÷ Young's modulus (HV/GPa)	Minimum bending radius R* (mm)
Titanium alloy Ti-15-3-3-3	0.03	4,760	1.0005	72	316	4.4	1.2
	0.02			69	326	4.7	0.8
Stainless steel SUS301	0.03	7,930	1.60	183	600	3.3	1.7
	0.02			182	557	3.1	1.3

* Minimum bending radius that can withstand 200,000 times repeated bending

本資料に記載の数値は参考値であり、保証値ではございません。

Please note that the composition and properties cited in this document are typical data only, and are not guaranteed.

鉄鋼冷間圧延用鑄造高性能ロール

High Performance Cast Roll for Cold Rolling of Steel

▶▶▶ CR² ◀◀◀

カーボンニュートラルの観点から、自動車用鋼板では車重軽量化のニーズが高まり、高張力鋼（ハイテン材）の使用比率が拡大している。また、xEV（電動車）の比率増加に伴い、駆動モーターに使用される電磁鋼板も生産量が急増している。これらの鋼板はいずれも強度が高い、硬く伸びにくい、圧延が難しいという共通した特徴があり、その生産に使用される圧延用ロールは、耐摩耗性や耐クラック性等の高い性能が要求される。

当社はこれまで熱間圧延用ロールを製造・納入してきたが、国内の粗鋼生産量の縮小もあり、新しいマーケットとして冷間圧延用ロールへの参入を検討し

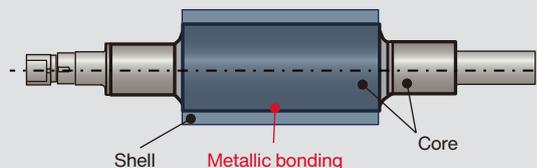
てきた。中でも鑄造製の特徴が生かせる付加価値の高い鋼板を圧延する分野へのニーズを捉えるため、本ロールの開発に取り組んだ。当社の長年にわたる鑄造ロールで培ったノウハウと、鑄造欠陥を防止する鑄造技術、ロール表面を高精度に仕上げる製造技術などを結集し、当社としては新しい試みとなる冷間圧延用鑄造ロールの開発に取り組み、「CR²」を製品化した。

CR²ロールの概要は図1に示すとおり、遠心鑄造複合ロール材「NCW10」と連続鑄掛肉盛複合ロール材「NCW20」の2材質があり、ロールの使用条件にあわせて選択することができる。CR²は、

現在使用されている鍛鋼ロールと比べ、耐摩耗性は3～5倍（図2）、破壊じん性は2倍、耐クラック性は5倍（図3）の性能を有している。本ロールは、一部のお客様への提供を開始しているが、好評に使用されている。

CR²と5%Cr鍛鋼材と比較した結果を表1に示す。CR²は耐摩耗性（粗度維持性）、耐事故性（圧延事故遭遇時のロールダメージの程度）が優れるだけでなく冷間圧延ロールとして必要な特性を満たし、お客様の生産性向上に貢献することができる。

（株式会社プロテリアル若松）



CR² Rolls (Cast Roll for Cold Rolling)

- NCW10 ... Centrifugal composite cast rolls
Wear resistant shell material + Strong ductile iron core
- NCW20 ... Composite cast rolls by continuous-casting-for-cladding process
Shell material with even greater wear resistance + Even stronger forged steel core

図1 CR² ロールの概要

Fig.1 Overview of CR² rolls

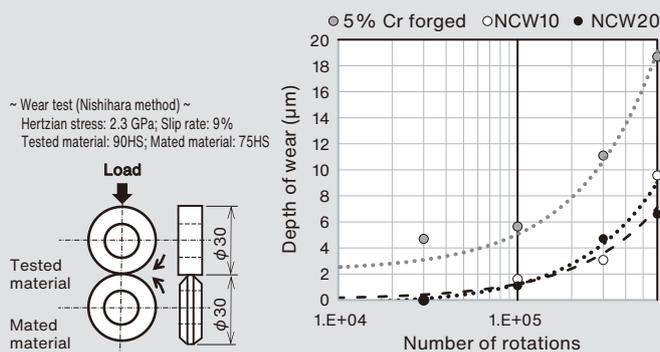


図2 摩耗試験における回転数と摩耗深さ

Fig.2 Number of rotations and depth of wear in wear test

~ Friction thermal shock test ~

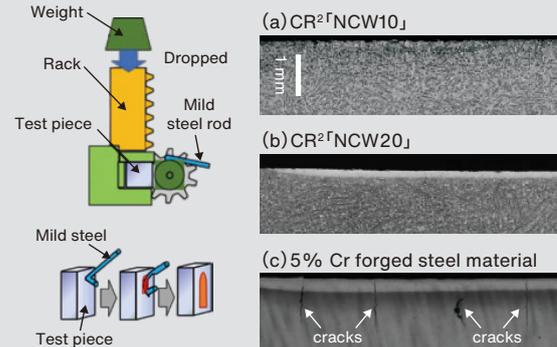


図3 CR²の摩擦熱衝撃試験方法及び試験片断面組織写真 (a) NCW10 (b) NCW20 (c) 5%Cr鍛造品

Fig.3 Friction thermal shock test method and cross-sectional images of specimen microstructure for (a) NCW10, (b) NCW20, (c) 5%Cr forged steel material

表1 CR² ロールの性能評価表

Table1 Performance evaluation of CR² rolls

Material	Wear resistance	Crack resistance	Sticking resistance	Dent resistance	Grindability	Overall performance
Conventional forged steel material (5Cr)	△	△	×	◎	◎	△
NCW10	○	◎	◎	○	○	○
NCW20	◎	◎	○	◎	△	◎

× : Inferior, △ : Fair, ○ : Good, ◎ : Excellent

超高温用マスフローコントローラー

Ultra-High Temperature Mass Flow Controller

▶▶▶ SFC1772FX Series ◀◀◀

高集積が進む最先端の半導体製造プロセスでは、高昇華点物質を材料ガスとして使用するニーズが生まれている。このニーズを実現するには、高温環境下で材料ガスを凝華させることなく流量を制御するマスフローコントローラー(MFC: Mass Flow Controller)が必要である。このたび当社が開発した200°Cで動作が可能な超高温用MFC(図1)の特長を以下に述べる。

(1) 断熱構造適用による流路温度200°Cの実現

MFCの流路温度を200°Cに保持した場合、弁体駆動に使用するピエゾアクチュエーター(以下、ピエゾ)は高温に耐えられない。本開発品は、ピエゾと流路

を断熱するために流路周囲を断熱材で囲い、断熱部品を介してピエゾの駆動を弁体に伝達し、空気でピエゾを冷却する構造とした(図2)。ピエゾの目標温度を120°C以下として温度試験を実施した結果、流路は200°C、ピエゾは90°Cを保持し、条件をクリアした。

(2) 耐久性を向上させた新型センサーの開発

MFCに搭載する流量センサーは、センサーパイプ外周に巻き付けられ、ワニスで絶縁されたコイル状ワイヤーの抵抗値から流量を測定する仕組みである。従来センサーは、高温では酸化による絶縁被膜の破壊が促進されるため、常温よりも早く劣化する。劣化を抑え

るため、測定部を電極の特殊処理およびレーザー溶接により密封し、内部に不活性ガスを封入する構造の新型センサー(図3)を開発した。

(3) 弁体変位量拡大機構の採用による低圧損化

材料ガスの特性上、供給圧を高くできない場合があるため、MFCの低圧損化を進めた。方針としてオリフィス(弁体と弁座の隙間)を広げることとし、弁体の変位量を拡大するために、弁体変位量拡大機構を採用した。これは変位量を約3.2倍に拡大する機構である。現行品との比較で、圧損は約60%低減した(図4)。(株式会社プロテリアルファインテック)

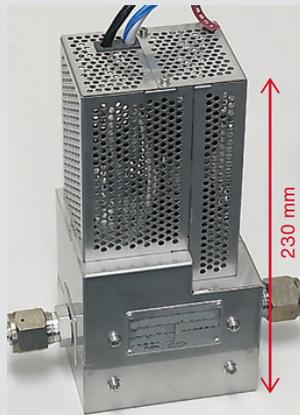


図1 SFC1772FX Series 外観

Fig.1 Appearance of SFC1772FX series

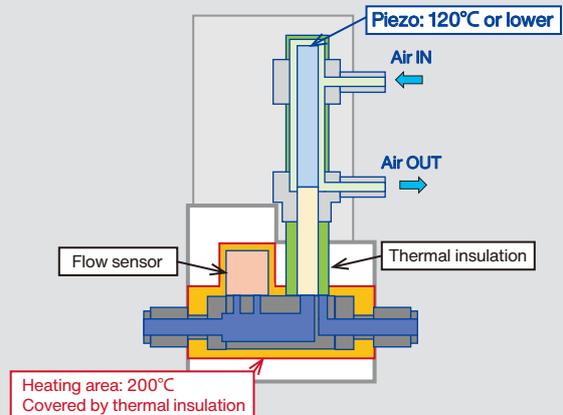


図2 断熱構造

Fig.2 Thermal insulation structure

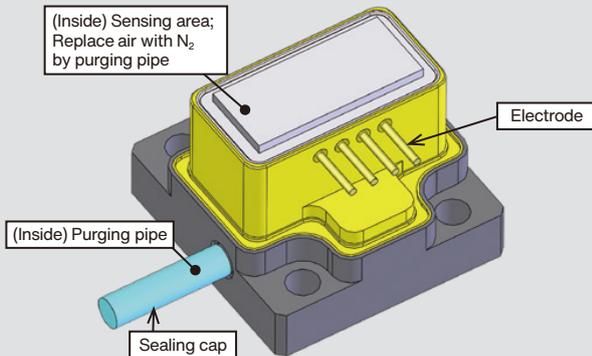


図3 新型流量センサー

Fig.3 New flow sensor

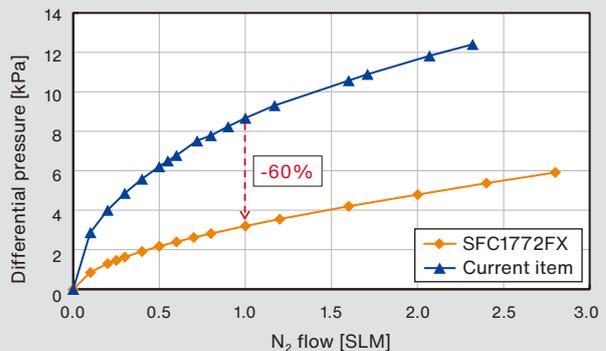


図4 N₂ 流量および差圧

Fig.4 N₂ flow and differential pressure

特殊鋼製品

- 特殊鋼
- ロール



ダイカスト金型用鋼 DAC-i®
ダイカスト金型の寿命と生産性を向上させることで、アルミ化が進む自動車業界・金型業界のトータルコスト低減に貢献しています。



航空・エネルギー用材料
航空機のジェットエンジンや発電所のタービン材料として、プロテリアルの耐熱、耐食合金がお役に立っています。

素形材製品

- 自動車鋳物
- 配管機器



高靱性ダクタイル鋳鉄 HNM® シリーズ
高い低温靱性と寸法精度に優れた鋳鉄部品です。CAEによるシミュレーション技術を駆使したニアネットシェイプで自動車の足回りの薄肉・軽量化に貢献しています。



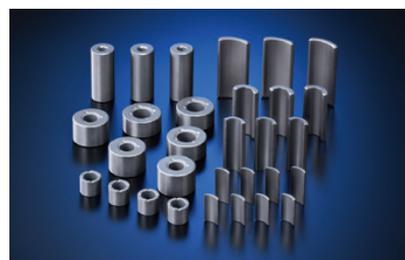
耐熱鋳造部品ハーキュナイト® シリーズ
エキゾーストマニホールドやタービンハウジングなど、耐熱性・耐酸化性が求められる自動車の排気系部品に使用され、自動車の環境性能向上に貢献しています。

磁性材料・ パワーエレクトロニクス

- 磁性材料
- パワーエレクトロニクス



ネオジム磁石 NEOMAX® シリーズ
高い性能と耐熱性を低重希土類組成で実現した製品をラインナップし、自動車、産業機械、家電などの小型・軽量化、高出力化、高効率化に貢献しています。



フェライト磁石 NMF® シリーズ
酸化鉄を主成分としたコストパフォーマンスに優れた磁石です。高性能材 NMF-15 シリーズまでラインナップを揃え、自動車電装用モーターなど、機器の小型・軽量化に貢献しています。

電線材料

- 電線
- 自動車部品



鉄道車両用電線・ケーブル
新幹線をはじめ、国内外の数多くの鉄道車両の運転室内や床下、車体間の配線材などとして電気や信号を伝達し、鉄道インフラを支えています。



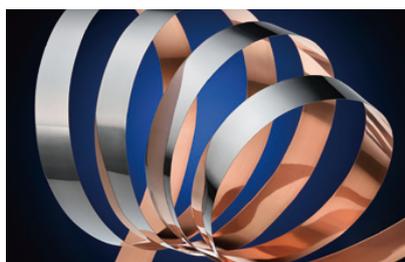
医療用極細ケーブル・加工品
屈曲性・可とう性・電気特性に優れた極細ケーブル・加工品を超音波診断装置・内視鏡等に供給し、取り扱い易さ・画像高精細化を実現することで、医療機器発展に貢献しています。

PRODUCTS OF PROTERIAL GROUP



CVTベルト材

溶解・冷間圧延技術により、破損の原因となる非金属介在物を制御し、疲労強度に優れたCVTベルト材を提供しています。



クラッド材

クラッド材は、異種金属を貼り合わせた複合金属材料です。多彩な金属を組み合わせることで、単一金属では得られない、優れた特性を発現します。



鉄鋼圧延用ロール

ラインナップは板用、形鋼用、鋼管用、線材用などを網羅しています。高耐摩耗性をはじめ優れた材料特性により圧延効率の向上、省エネルギー化に貢献しています。



マスフローコントローラ (Aera®・SAM®)

蒸気圧の低い新材料用に高温用のマスフローコントローラもラインナップし、半導体製造の新規プロセスの実現に貢献します。



ガス用ポリエチレン配管システム

ガス用埋設ポリエチレン配管システムを開発・販売し、災害に強いガスインフラを支えています。



∪®管継手

1912年に商標登録した“∪(ひょうたん)”, その管継手は時代を超え、今も国内外で使用されています。



リニアモータ

NEOMAX®を使用した有鉄心リニアACモータです。可動部の軽量化を追究し、可動磁石式を採用。コアレスリニアモータに匹敵する加速性と有鉄心ならではの高推力を兼ね備えています。



窒化ケイ素 (Si₃N₄) 基板

EVや鉄道車両、産業機器に搭載されるパワーモジュール用の高熱伝導の放熱基板です。冷却機構の小型化、低コスト化に貢献します。



ナノ結晶軟磁性材料 ファインメット®

世界初のナノ結晶軟磁性材料です。損失が小さく、各種機器の省エネ化、小型・軽量化、高機能化、低ノイズ化に貢献しています。



ロボット用電線・ケーブル

プロテリアル独自の薄肉成型技術を活かして、優れた耐屈曲・捻回特性を有する細径の制御・信号・給電用ケーブルを提供しています。ロボットやケーブルベアの機内を省スペース化し、軽量化を実現します。



高効率モータ用マグネットワイヤ

ハイブリッド自動車の駆動モーターや産業用のサーボモーター等に採用されており、環境負荷低減や省エネルギーに貢献しています。



電動パーキングブレーキ用ハーネス

耐屈曲性や耐久性に優れ、パーキングブレーキの電動化を実現。車体内の省スペース化や自動車の安全性、利便性の向上に寄与します。

※ DAC-i, HNM, NEOMAX, NMF, Aera, SAM, ∪印, ファインメットは株式会社プロテリアルの登録商標または商標です。

公益社団法人 発明協会

令和5年度 全国発明表彰「朝日新聞社賞」 2023.6

- 受賞案件：加熱炉を使わない鋼材の焼鈍方法（特許第 5088633 号）
- 受賞者：片岡 仁，江口 弘孝
- 概要：加熱炉を使用することなく，熱間加工後の熱間金型用鋼などの半製品鋼材に適切なタイミングで箱状の保温槽を被せ，鋼材の復熱と変態潜熱を組み合わせることで焼鈍を可能にしたものです。加熱炉を使用しないため，燃料，CO₂を削減することができ，安全でかつ省エネルギー化にも貢献できるとして受賞となりました。



表彰式



保温槽を用いた焼鈍作業

公益社団法人 発明協会

令和4年度中国地方発明表彰「島根県知事賞」 2022.10

- 受賞案件：航空機エンジン用ニッケル基金合金大型鍛造部材の製造方法（特許第 6902204 号）
- 受賞者：大豊 大吾，松本 英樹



モノづくり日本会議／日刊工業新聞社

2022年“超”モノづくり部品大賞「機械・ロボット部品賞」 2022.12

- 受賞案件：高靱性・高切削性 新冷間ダイス鋼「SLD®-f」
- 受賞者：日立金属株式会社（受賞当時）

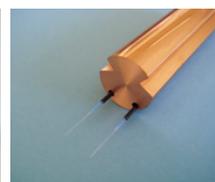


SLD®-f加工例

日刊工業新聞社

第65回十大新製品賞「増田賞」 2023.1

- 受賞案件：光ファイバー式警報トリ線システム
- 受賞者：株式会社プロテリアル ※ JR 東海旅客鉄道株式会社との共同受賞



トリ線

一般社団法人 型技術協会

型技術協会賞「奨励賞」 2023.6

- 受賞案件：被削性に優れた冷間工具鋼「SLD®-f」の加工事例
- 受賞者：(株式会社プロテリアル) 植木 道男，阿部 行雄
(株式会社プロテリアル特殊鋼) 桐山 学



公益社団法人 発明協会

令和5年度 中国地方発明表彰「島根県発明協会会長賞」 2023.10

- 受賞案件：新プラスチック成形用金型材料（特許第 5648947 号）
- 受賞者：關山 孝明，細田 康弘，片岡 仁，菅野 隆一郎（退職者）

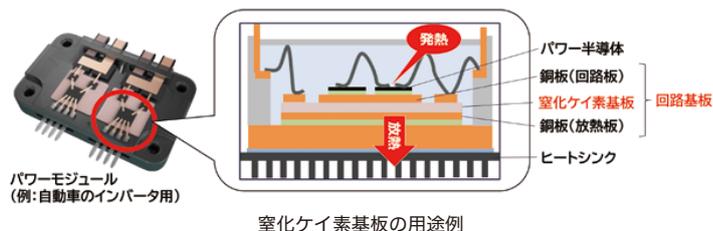


公益社団法人 発明協会

令和5年度中国地方発明表彰「鳥取県知事賞」 2023.10

■ 受賞案件：回路基板および窒化ケイ素焼結基板の製造方法（特許第 6399252 号）

■ 受賞者：（株式会社プロテリアル）今村 寿之，濱吉 繁幸
（株式会社プロテリアルフェライト電子）藤田 卓，加賀 洋一郎，手島 博幸



公益社団法人 発明協会

令和5年度 近畿地方発明表彰「発明奨励賞」 2023.11

■ 受賞案件：放熱用クラッド部品およびその製造方法（特許第 5410646 号）

■ 受賞者：（株式会社プロテリアル金属）織田 喜光，渡辺 啓太，石尾 雅昭（退職者）



公益社団法人 発明協会

令和5年度 関東地方発明表彰「文部科学大臣賞」 2023.11

■ 受賞案件：高滑性シリコンシースとその応用製品（特許第 6699782 号）

■ 受賞者：櫻村 誠一，岸 雅通，渡部 考信，工藤 紀美香，荒井 才志



高滑性シリコンシースの応用製品
(医療用シリコンケーブル「SiMED®」)

モノづくり日本会議／日刊工業新聞社

2023年“超”モノづくり部品大賞「奨励賞」 2023.12

■ 受賞案件：新高性能ダイカスト金型用鋼「DAC-X®」

■ 受賞者：株式会社プロテリアル



DAC-X®加工例

プロテリアル技報 Vol.39

発行日：2024年3月

発行元：株式会社プロテリアル

〒135-0061 東京都江東区豊洲5-6-36 豊洲プライムスクエア

Tel: 0120-603-303 (フリーコール)

発行人：村上 元

編集：株式会社プロテリアル 研究開発本部 グローバル技術革新センター GRIT 株式会社 東京映画社

禁無断転載

本誌の内容は、ホームページにも掲載されております。

https://www.proterial.com/rad/rad01_2024.html



株式会社プロテリアル

<https://www.proterial.com>