

TODAY

「実学主義」のもとで進める研究活動



大同大学 理事・副学長

徳納 一成

2年前(2017年)のJRCM NEWS 7月号巻頭言のご依頼を受けた際、本学の沿革や教育方針などについてご紹介させていただきました。1964年4月、機械工学科と電気工学科を有した「大同工業大学」として誕生し、その後、情報学部を新設して2009年には校名を「大同大学」と改名した本学は、学生総数3,500名程度の中規模の大学ではありますが、産業と社会に貢献する人材を育成することを旨とし、その理念は、「実学主義」であります。このような歴史から、大同大学は、研究面におきましても「実学主義」を色濃く反映したものと、広く各種企業との研究を共同で実施しております。今回、この紙面をお借りして、いくつかその活動をご紹介させていただきます。

まず、工学部機械工学科の前田安郭教授は、鋳造CAEの開発及び技術調査を中心に研究を行っています。鋳造プロセスは、熔融金属を鋳型内へ流し込み凝固させる方法で、鋳型内の現象を把握することが良質な鋳物製造につながります。そこで直接可視化技術を駆使して流動現象を観察するとともに、新しいCAE技法を提案しています。その一つが共同研究で開発した酸化膜モデルです。熔融金属の流動は、流体力学的には水と相似しますが、実際は表面張力でも凝固層生成でもなく、酸化膜の影響で異なった挙動となることを実験検証するとともに、ラグランジュ系の数値解法SPH粒子法を用い、表面粒子のみを高粘性流体とすることで実現現象のシミュレートが可能にしました。その他にも、鋳造CAEの形状近似精度を向上するPM法、空気巻き込み挙動を推定するためのMARS法、さらには砂充填挙動の圧密化現象を離散要素法DEMで再現するなど、先進的かつ独創的な技術開発を行っています。

次に、工学部電気電子工学科の加納善明准教授は、先端磁石材料を応用してモータの性能向上を実現する電磁構造と設計に関する研究を行っています。モータは、自動車や航空機、産業設備、家電等のシステムの重要な一要素として、改めてそのエネルギー密度が問いた

だされる時代に入り、「超大トルク」「超小型軽量」に加え、「超高効率」「超低騒音」の特性も求められています。加納准教授は、この「超」の世界に適した永久磁石モータの開発を、共同研究先と連携して取り組んでいます。その成果のひとつとして、磁石の形と磁化配向に自由度を持たせた場合に、それを有効利用するモータ構造の創出ならびに電磁設計を行い、実機評価試験を通じて、市販自動車駆動用永久磁石モータに対して、最大トルク10%のアップ、最大出力20%のアップ、高効率範囲の拡大を達成しております。さらに、モータに関するさらなる技術開発とこれらの技術開発に関わる東海地区の人材育成を目的として、2018年10月、大同特殊鋼株式会社寄付による「モータ研究センター」を学内に開設し、より実践的な研究活動を行っています。

最後に、工学部建築学科かおりデザイン専攻の光田恵教授は、生活環境において身近な、「におい・かおり」の評価と制御に取り組んでいます。2000年に学内に、臭気評価・制御研究ラボラトリー(2009年からにおい・かおり研究センター)を開設し、さらに2001年度から、におい研究交流会を毎年開催し、その年に取り組んだ研究の成果を社会に発信するとともに参加者との交流を積極的に行っています。においは人間の感覚事象であることから、においの評価には人間の感覚が最も重要とされています。人間の感覚に基づく評価に重点を置き、人間の感覚と対応のある臭気成分分析方法やセンサーを用いた測定方法を検討し、生活環境の悪臭から香りまで様々なにおい特性の解明と、悪臭対策から香りの活用方法の提案まで幅広く手がけています。例えば、超高齢社会の中で、介護環境の質的向上を目指したにおい環境の創造に取り組み、介護臭である排泄物臭や体臭の対策だけでなく、介護者、要介護者ともに快適に過ごせる香りの活用も研究対象としています。また、建物だけでなく自動車内のおい環境についても取り組んでいます。

このように、中規模大学ではありますが、本学の研究活動はたいへん多彩であります。これも、元気なもののづくり地域である中京地区に位置する恩恵であると感謝しつつ、培った果実をもとに学生を教育し、社会に送り出しております。さらに広く且つ深い活動を心がけておりますので、いつでもお声掛けいただければ幸甚であります。

電動機とシステムに関する国際会議 ICEMS2019 @ハルビンに参加して

一般財団法人金属系材料研究開発センター 磁性材料研究部長 豊田 俊介
 高効率モーター用磁性材料技術研究組合 主席研究員 谷川 茂穂

1. はじめに

高効率モーター用磁性材料技術研究組合 MagHEM の技術調査活動の一環として、8月11日～14日に中国ハルビンで開催された電動機（電気機器）とシステムに関する国際会議 ICEMS2019 (International Conference on Electrical Machines and Systems) に参加するとともに、関連する企業・機関を訪問し、磁石モーター・磁石材料の技術動向、磁石市場動向・希土類資源動向を調査したので概要を報告する。

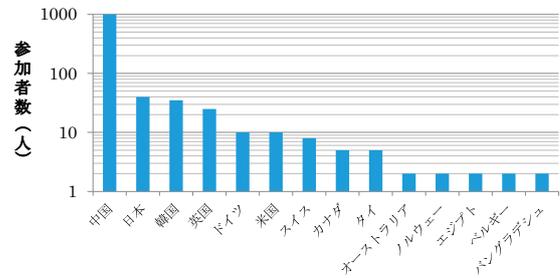


図1 国別参加者数

2. 大会の概要

ICEMS は 1987 年以来、中国電気学会 (CES)、韓国の大韓電気学会 (KIEE)、日本の電気学会産業応用部門 (IEEJ-IAS)、国際電気学会産業応用部門 (IEEE-IAS) の共催で、2003 年以降はアジア（・オセアニア）地域で毎年開催されており、今回で第 22 回目となる。プログラムは、初日に若手研究者向けのチュートリアルセッションがあり、テクニカルプログラムは、基調講演と一般講演が 3 日間行われた。今回、採択された論文は 20 数か国から約 1100 件であり、うちオーラル講演が 373 件、ポスター講演が 735 件であった。大会参加者数は約 1200 人、うち中国からの参加者が約 1000 人で 8 割を占めた。論文数、参加者数ともに前回 (ICEMS2018 @韓国 済州島) に比べて倍増している。図 1 に ICEMS2019 の国別参加者数を示す。日本からの参加は約 40 名であった。

一般講演は 33 セッションに分かれ、うち 9 セッションが企画セッションとなっている (表 1、表 2)。一般講演では、

表 1 一般講演セッションテーマと講演件数 (企画セッションを除く)

	セッションテーマ	オーラル	ポスター	合計	比率
1	永久磁石モーターおよびドライブ	82	169	251	26%
2	パワーコンバータ	46	65	111	12%
3	誘導モーターおよびドライブ	12	20	32	3%
4	交流/直流モーターおよびドライブ	6	18	24	2%
5	同期モーターおよびドライブ	6	21	27	3%
6	リラクタンسモーターおよびドライブ	17	22	39	4%
7	リニアモーターおよび磁気浮上	16	19	35	4%
8	特殊構造およびアクチュエータ	11	20	31	3%
9	トランス	12	23	35	4%
10	磁気および磁界解析	12	15	27	3%
11	永久磁石発電機システム	11	15	26	3%
12	モーションコントロールおよびサーボシステム	12	18	30	3%
13	センサレス制御	12	18	30	3%
14	モーターシステムのモデリング	5	11	16	2%
15	再生可能エネルギーシステム	23	64	87	9%
16	エネルギー効率システム	5	4	9	1%
17	信頼性および診断 (故障予測)	12	27	39	4%
18	騒音および振動、EMI、EMC	11	12	23	2%
19	冷却技術	5	9	14	1%
20	輸送およびその他	5	9	14	1%
21	絶縁材料	-	5	5	1%
22	製造技術、試験、標準	-	6	6	1%
23	電気工学の教育	-	4	4	-
24	その他	-	48	48	5%
	小計	321	642	963	100%

表 2 企画セッションテーマと講演件数

	セッションテーマ	オーラル	ポスター	合計
S1	ダイレクトドライブおよび磁気浮上技術	5	13	18
S2	デュアルポートモーターおよびシステム	5	10	15
S3	新しい電気機器およびドライブ	5	6	11
S4	新しい磁束変調マルチポートシステム	5	5	10
S5	電気自動車用の高速永久磁石モーター	5	7	12
S6	リニアモーターおよびドライブ	5	14	19
S7	交流モータードライブのセンサレス制御	5	10	15
S8	ワイドキャップ半導体パワーデバイス	5	5	10
S9	ワイヤレスパワー伝送	12	23	35
	小計	52	93	145

永久磁石モータおよびドライブ(251件)、パワーコンバータ(111件)、再生可能エネルギー(87件)などの講演が、企画セッションではワイヤレスパワー伝送に関する講演が多数であった。



学会会場
(黒龍江太陽島ガーデンホテル)



松花川より
ハルビン市街を望む



基調講演



ポスターセッション

3. 基調講演

オープニングセレモニーの後、パワーエレクトロニクス用半導体デバイスに関する4件の基調講演があった。

• **Magnetics Integration & EMI Mitigation via WBG** Prof. Fred C Lee 氏 (バージニア工科大、米) プラグインハイブリッドのオンボードチャージャーなど、最先端の大容量急速充電システムの開発動向と、それらに応用される GaN や SiC 等のワイドギャップ半導体デバイスの先端開発状況についての講演。スイッチングの高周波化、高効率化、小型化、高破壊電圧化、低電磁障害 (EMI) 比化、製造性の向上などが、回路のトポロジー設計技術などともに進められているとのこと。

• **Impact of SiC and RC-IGBT on Electric Railway and EV Drives** Dr. Tatsuhiko Fujihira 氏 (富士電機、日本) 次世代新幹線などの鉄道車両や、燃料電池車を含む電動自動車などの、モータドライブ用半導体デバイスの技術開発に関する講演。SiC スーパージャンクション MOSFET や SiC IGBT などにより、高温大容量動作が可能となり損失は低減される。コストがなお高い点が課題とのこと。

• **History and Future of Power Electronics Technologies for Railway Vehicle Traction**

Prof. Keiichiro Kondo 氏 (早稲田大、日本) 鉄道用半導体デバイスの技術進化をレビューし、ACドライブの技術トレンドを解説。N700S系新幹線など、SiC デバイスを適用することにより小型化が図られ、インバータ効率は 99% まで向上しうること。

• **Recent Advancement in Power Drive and Module Technology** Dr. Gourab Maumdar 氏 (三菱電機、日本) HEV/EV のインバータのようなパワーデバイスでは、電力密度の向上が求められており、半導体材料としては現在 Si、GaAs、4H-SiC、GaN が使い分けされている。この 25 年間に高性能化と低コスト化という観点から、パワー MOSFET と IGBT が主力デバイスの座を獲得した。さらなる高電力密度と高信頼性のために Si デバイスはシリコンウエハの極薄化を目指しており、IGBT は Full-SiC、Hybrid-SiC を目指している。HEV/EV の駆動用への適用は、SiC デバイス開発のマイルストーンとなる。多軸ロボットなどの産業用、再生エネルギー用にも開発が進められている。

最終日午後以下4件の基調講演があった。

• **Charging Options for Electric Vehicles** Prof. Emil Levi 氏 (リヴァプール・ジョン・ムーア大、英) 最先端の急速充電システムの開発動向を紹介。

• **Application of High Speed Linear Motor in Space Launch** Prof. Weiming Ma 氏 (海軍工科大、中国) 宇宙空間でロケットを発射させる高速リニアアクチュエータなど、高速のリニアモーター技術の応用について講演。

• **Magnetically Levitated Technology and Suspended Planar Stages for High-precision Industry** Prof. Elena Lomonova 氏 (アイントホーフェン工科大、蘭) 半導体製造装置などに使用される、高精度リニアステージの最先端技術について、プレーナモータ、ハルバツハ磁気配列、コイルレイアウトなどの基本概念を交えて紹介。

• **Magnetic Levitation Technologies of KIMM** Dr. Doh Young Park 氏 (韓国機械研究院) 仁川空港のリニアモーターカーなど、韓国におけるリニア輸送技術の進展を紹介。

4. 一般講演

4-1. 永久磁石モータおよびドライブに関する講演

・ Paper ID 1570537990 Performance Analysis of a Hybrid-Magnetic-Pole Variable-Flux Machine (ハルビン工業大) V字型に永久磁石を埋め込んだ構造のロータにおいて、高保磁力磁石と低保磁力磁石を交互に組み合わせたハイブリッド磁極型可変磁束モータ。ステータ巻き線により低保磁力磁石の磁化状態を変化させ、可変磁束機能を付与。動作原理、電磁気性能、エアギャップ磁束密度、逆起電力、トルクの角度依存性などをFEMで解析。広い運転速度領域で高効率が得られるとしている。

・ 1570538276 DC-link Voltage Control Method for High Speed Motors powered by Z-source Inverter (湖南大) モータの弱め界磁領域を拡大するため、Z-sourceインバータによる高速モータドライブへのDCリンク電圧制御方式を提案。出力電圧に合わせてDCリンク電圧を変化させ、非定常状態においても最適条件を維持しモータを動作させる。

・ 1570540233 Loss Analysis of the Permanent Magnet Motor with an Amorphous Stator Core by Considering the Influences of Manufacturing Processes (瀋陽工科大) 厚さ $25 \mu\text{m}$ の低鉄損アモルファス材料と厚さ $350 \mu\text{m}$ の電磁鋼板をコアに採用した試作モータの性能を比較評価。モータ全体の損失および効率を測定した結果、アモルファスコアの優位性を確認。ただし製造時に加わる荷重負荷が増加するとアモルファス材の優位性は低下する。

・ 1570545940 Electromagnetic Performance Comparison of Doubly Salient PM Machines with Different Stator Iron Core Segments (浙江大) ステータのバックヨーク部に永久磁石を埋め込んだ高パワー密度のスイッチトリラクタンスモータ。

・ 1570542981 Reduction of Cogging Torque by Notching Groove on Magnets in SMPMSM (合肥工業大) 表面磁石型同期モータのロータ表面にノッチを設けることによるコギングトルク低減効果をシュミュレーションにより検証。

・ 1570545440 Optimal Design of Double

Stator Permanent Magnet Motors Used in Electric Vehicle (南京航空航天大学) ダブルステータ型の電気自動車用インホイールモータの最適構造設計に関する研究。アウトーステータ、インナーステータとカップ型ロータで構成される。冷却は水冷方式。ロータの機械強度を考慮。シュミュレーション結果を実際の試験性能データと比較。

・ 1570546849 Concept and Electromagnetic Design of a New Axial Flux Hybrid Excitation Motor for In-wheel Motor Driven Electric Vehicle (南京理工大) アキシヤルギャップ構造の電気自動車用インホイールモータの構造設計に関する研究。効率、トルク密度、トルク制御性などを既存の永久磁石モータと比較検討。

・ 1570541859 A Novel Variable-Flux PMSM with Parallel Hybrid Magnets Capable of Operating in a Wide Speed Range (ハルビン工業大) アルニコ磁石を可変磁束用磁石に応用した、可変磁束メモリーモータ。ネオジウム磁石とアルニコ磁石を平行に配置。トルクリプルを抑制するため、6極/45スロット構造を採用、アルニコ磁石をV字型に配置し、隣接するネオジウム磁石の漏れ磁束による減磁を抑制。高トルクが得られるとともに、高速域での弱め界磁制御を不要化することで高速域での効率が顕著に改善される。エアギャップの磁束密度を含む電磁特性、トルク性能などをFEMで解析。

・ 1570540194 Analysis and Reduction of Electromagnetic Noise Induced by Dead Time Effect for an Axial-Flux Permanent Magnet Motor (同済大) EV主機用を念頭としたアキシヤルフラックスPMモータ。ノイズと振動の低減を意図した設計。高効率、所望のトルク密度、コンパクトな軸方向長さが特長。

・ 1570541996 Performance Analysis of Frameless Motors for Robots (瀋陽工科大) ロボットアーム用のPMSMモータ。ロボットアーム用のモータには、限られた体積中でのトルクと 180°C での耐久信頼性が求められる。サイズは $\phi 60 \times 22.7\text{mm}$ 、回転数は 4300rpm 、効率は 97% 、トルクリプルは $1.1 \sim 2.6\%$ 。

・ 1570545622 Electromagnetic Analysis of Compound Excitation High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor (重慶大) マイクロガスタービンの遠心圧縮機や、フライホイールによるエネルギー貯蔵を念頭とした高速度PMモータ。内側は高温特性に優れたサマコバ磁石SmCo₂₈、外側はフェライト磁石Y30BH。8万rpm。

・ 1570540250 IPMSM with Rotor Using Two Different Cores (明治大、日本) NdFeB焼結磁石に加え軟磁性材料パーマロイを配し、弱め界磁制御を不要とした。ロボットアーム用を念頭。

4-2. リラクタンスモータおよびドライブに関する講演

・ 1570547165 Study of High-speed SRM with Amorphous Steel Sheet for EV (芝浦工大、日本) アモルファス軟磁性材料を応用した、高速スイッチトリラクタンスモータに関する研究。高速運転時の鉄損抑制の一手段として、絶縁層を設けた軸方向の分割ロータ方式を採用。最適な分割数を解析により検討。

4-3. モータシステムのモデリングに関する講演

・ 1570544005 Accurate Modeling and Performance Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Amorphous Alloy Properties (ハルビン工業大) アモルファス軟磁性材料の特性を考慮した、リラクタンス同期モータの解析評価。

4-4. 再生可能エネルギーシステムに関する講演

・ 1570540864 Analysis of Power Loss and Reliability on Hybrid Modular Multilevel Converter with Redundancy Configuration for Offshore Wind Turbines (重慶大) 風力発電機の電力と電圧は洋上化の進展とともに年々高くなってきている(2000年~2MW⇒2020年>10MW)。PM発電機などのシステムには20年間の信頼性が求められる。風速が上がると損失が大きくなる点が課題。

・ 1570538852 Fault Diagnosis for Blade Mass Imbalance of Wind Turbines in View of Wind Speed Spatiotemporal Distribution(華北電力大) 風速が過度に上がった状態で風力発電機の羽重量の不均衡があると、疲労や振動の影響が増大し、ステータに異常な電流が流れ、短絡や溶解が起り風車の破壊につながる。

5. 磁石材料の技術動向・磁石市場動向・希土類資源動向

5-1. 訪問企業・機関の概要

中国国内の企業・機関を訪問し、磁石材料の技術動向、磁石市場動向、希土類資源動向等ヒアリングした。

厦門タングステン株式会社¹⁾²⁾はタングステン、希土類、電池材料、応用部品等の製造販売会社で、中国6大希土類企業集団の一つとして、希土類事業の一大企業グループを形成している。長汀金龍希土有限公司は厦門タングステンの100%子会社で希土類採掘から希土類磁石の製造販売までを行っている。磁石材料の川下工程となる希土類永久磁石電動機産業団地建設への投資も報じられている³⁾。今回、希土磁性材料研究所を訪問。

寧波永久磁業有限公司⁴⁾は1997年設立の焼結NdFeB磁石の専門メーカーで、生産能力は5000トン/年規模。粒界拡散磁石、低Dy磁石、Dyフリー磁石などの中高級磁石を製造している。輸出比率は70%以上で特に欧州向けが多い。用途は車載32%、サーボモータ16%、リニアモータ15%、家電13%、風力発電12%、医療5%など。

上海メタルズマーケットSMM⁵⁾は中国の独立系金属資源情報の調査会社で、マーケット情報やコンサルティング等のサービスを提供している。

昨年⁶⁾に引き続き、独立行政法人日本貿易振興機構(JETRO)、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)の北京事務所を訪問した。

5-2. 磁石材料の技術動向

中国では売上げの3%以上を研究開発費に充てている企業は、国からハイテク企業として認定され、税制上の優遇等を受けられる(厦門タングステン、寧波永久磁業いずれも該当)。磁石製品に合わせた製造設備は、うち多くのものを自社で開発・製作する。研究開発において、大学等の研究機関、ユーザー企業と連携している。

希土類焼結磁石の製造プロセス工程の構成や性能設計の考え方はメーカーによって基本的に相違はないが、個別工程の方式や設備能力・条件によって、特性やその均一性に差異が生じる。例えば、粒界拡散法は、塗布拡散法、スパッタ

拡散法、蒸気拡散法などがあり⁷⁾、さらにそれぞれについて種々の拡散源種が存在する。

5-3. 磁石市場動向・環境規制

中国の自動車販売台数は2018年以降減少傾向が続いているが、新エネ車(NEV)の販売台数は増加を続けてきた(2018年は前年比60%増)。環境意識は高まっており、バス等の公共車、近距離移動のための2台目家用車などとしても広まってきている。一方EVはコスト、販売価格が高く、2019年6月など、段階的にすすめられている補助金減額の影響の見極めが必要。

中国では2015年より強化された大気汚染防止等、環境対策対応が引き続きすすめられている。例えば、河北省、北京市では工場の煤煙と自動車の排ガスがPM2.5の主因となっており、特にセントラルヒーティング用に石炭ボイラーが使用される冬は、現在もなお厳しい状況にある。中国ではより厳しいNOx、PMの排出量を定めた排ガス規制「国6」が2019年7月より広州等で開始された。HVはこうした厳しい排ガス基準もクリアする低燃費車として優遇する政策が検討されており、その販売台数を伸ばしている。2016年より設定されたFCVに対する補助金は減額されず優遇が継続される。中国の各地域は、水素ステーションの設置など、水素産業に関する発展計画を発表している⁸⁾。水素の形に変換・貯蔵された余剰再生エネルギーなどが中長期的に水素エネルギー源として期待されている。

エアコンのNd焼結磁石モータ採用率⁹⁾は4~5年前は30%程度であったが、現在は70%程度と増大している。風力発電におけるNd焼結磁石モータの採用率⁹⁾も年々拡大しており、現在60%程度と推定。電源構成に占める再生可能エネルギーの割合は、風力が前年比30%増など急速に増えている。中国ではナンバープレートの要らない電動自転車(電動バイク)、低速電動車等が約3億台普及しており、その電動機にもNd系焼結磁石が多く使われている。

5-4. 希土類資源動向

中国では6大希土類企業集団への採鉱・生産の集約が進められ、環境対策と違法採掘への取り締まりが引き続きすすめられている。福建省の希土類の酸化物換算賦存量は約450万トンと言われており、これは中国全体の約10%に相当する。福建省の場合、約5%のDy、約1%のTbの含有量が見込め、Ndの含有割合も高い。イオン吸着鉱はThやUといった放射性元素も含まれておらず、Nd磁石の原料鉱石としては極めて良質である。中国国内外では引き続き、磁石材料の長期的なニーズ拡大トレンドを受けて、山東省、四川省、江西省など、希土類資源の賦存量の探査がすすめられている。

6. まとめ

希土類資源、希土類磁石生産の最大拠点国での開催ということもあり、ICEMS2019は永久磁石モーターとその応用に関連した講演の数・比重が高かった。今回大学等から提案された永久磁石モーターの実装には、さらに電気機器メーカーや磁石メーカーが保有するエンジニアリング技術や、技術者の経験に基づく知恵の活用が不可欠と感じた。磁性材料、電動機、電力システムの相乗的な進歩が、電動自動車の進化や再生可能エネルギー利用の拡大を通じて、地球温暖化抑止への貢献度を、今後飛躍的に高めてゆくと考える。

参考文献

- 1) <http://www.cxtc.com/default.aspx>
- 2) 永田浩、陳大崑、顔漢森：日本ボンド磁性材料協会 第95回技術例会 2019年5月16日
- 3) JOGMEC ニュースフラッシュ 2018.7.24
http://mric.jogmec.go.jp/news_flash/20180724/88168/
- 4) <http://jp.pm-magnets.com/>
- 5) <https://www.metal.com/>
- 6) 豊田俊介、谷川茂穂：JRCM NEWS No.384 2018.10.1 pp.2-4
- 7) 廣田晃一、中村元：NTS 刊次世代永久磁石の開発最前線(2019)より、pp.151-159
- 8) JETRO 地域・分析レポート 高橋大輔 2019.8.9
<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2019/e4192697fec6cd9e.html>
- 9) 豊田俊介、谷川茂穂：Proc.of 2019年電気学会産業応用部門大会(2019年8月) 3-S4-1 pp.III-19~24

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第396号

内容に関するご意見、ご質問はJRCM総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2019年10月1日
発行人 小紫正樹
発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階
TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>
E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp