

特別付録

将来技術シンポジウム

Aiming at The Rare Earth Iron Age

希土類－鉄磁石の魅力と将来を考える技術シンポジウムを開催

当社は、7月5日（水）に名古屋マリOTTアソシアホテル（名古屋市）において、希土類－鉄磁石の魅力と将来を考える技術シンポジウム「Aiming at The Rare Earth Iron Age」を開催しました。聴講者は約450人。磁石に特化したシンポジウムがこの規模で開催されることは世界的にも珍しく、さらに希土類－鉄磁石の発明者4名が顔を揃えるのは今回が初めて。さらに、国内最先端の磁石材料研究者や主要ユーザーの講演が聴講できる滅多にない機会とあって、

全国の磁石ユーザーや大学関係者、関係省庁・機関等から参加がありました。

開催の記録として、当日配布したプログラム・予稿集を特別付録として本号に収載いたします。

将来技術シンポジウム *Future Technology Symposium*
Aiming at The Rare Earth Iron Age

— プログラム ・ 予稿集 —
- Program and Abstract Book -



2017年7月5日(水)

名古屋マリオットアソシアホテル16階 タワーズボールルーム
(名古屋市中村区名駅1-1-14)

July 5th (Wed), 2017

Towers Ballroom, 16th floor, Nagoya Marriot Associa Hotel
1-1-14, Meieki, Nakamura-ku, Nagoya city

主催:大同特殊鋼株式会社

Organized by Daido Steel Co., Ltd.

プログラム

開会挨拶

9:20～9:25 石黒 武, 大同特殊鋼株式会社 代表取締役社長執行役員

来賓挨拶

9:25～9:40 坂元 耕三 様, 経済産業省 製造産業局 金属課 金属技術室長

基調講演

ネオジム鉄磁石発明者が語る「磁石発明物語」 ～ネオジム磁石発明 35 年 過去を振り返り未来を語る～

- 9:40～11:20 ① 「Nd-Fe-B Magnet-Past, Present and Future」
佐川 真人, 大同特殊鋼株式会社 顧問
- ② 「The Historical Development of Melt Spun NdFeB Magnetic Powder」
Dr. J. J. Croat, Consultant

サマリウム鉄磁石発明者が語るサマ鉄窒素磁石の魅力

- 11:20～12:30 ③ 「Interstitial Magnets-Background and Prospects」
Prof. J. M. D. Coey, Trinity College
- ④ 「サマリウム鉄窒素磁石の発明とその魅力」
入山 恭彦, 大同特殊鋼株式会社 理事
- 12:30～13:45 休憩

新磁石材料開発の最前線

- 13:45～15:00 ⑤ 「元素戦略に基づく次世代永久磁石材料開発」
宝野 和博 氏, 国立研究開発法人物質・材料研究機構フェロー
- ⑥ 「高性能磁石開発と新規磁石材料探索に向けて」
杉本 諭 氏, 東北大学教授

主要磁石ユーザーが語る今後の用途動向と磁石への期待

- 15:00～17:45 ⑦ 「トヨタにおける自動車用モータ開発の歴史」
水谷 良治 氏, トヨタ自動車株式会社 HV 先行開発部 プロフェッショナルパートナー
- ⑧ 日本発の省エネ技術「インバーターエアコンと希土類 IPM モータ」
大山 和伸 氏, ダイキン工業株式会社 常務専任役員
- ⑨ 「日産における電動車用モータの将来技術研究開発～磁束可変型永久磁石同期モータ～」
加藤 崇 氏, 日産自動車株式会社 総合研究所 EV システム研究所 主任研究員
- ⑩ 「安川電機のサーボモータとその技術開発」
鹿山 透 氏, 株式会社安川電機 開発研究所 モータ・アクチュエータ開発部 部長
- ⑪ 「ホンダ電動車用モータの開発」
藤岡 征人 氏, 株式会社本田技術研究所 四輪 R&D センター
第4技術開発室 第3ブロック 主任研究員

閉会挨拶

17:45～17:50 清水 哲也, 大同特殊鋼株式会社 執行役員技術開発研究所長

18:00～19:30 **立食懇談会(無料)**

※全ての講演において同時通訳(英語⇄日本語)を実施致します。
※シンポジウムの進行を見ながら、途中で小休憩を挟みます
※プログラム・講演内容は予告なく変更することがありますのでご了承ください。

Program

Opening remarks

9:20-9:25 Takeshi Ishiguro, President & CEO, Representative Executive Director,
Daido Steel Co., Ltd.

Greeting from the guest

9:25-9:40 Dr. Kozo Sakamoto, Director of Metal Industry Technology Office,
Manufacturing Industries Bureau, Ministry of Economy, Trade and Industry

Keynote lecture

- 9:40-11:20
- 1) Nd-Fe-B Magnet-Past, Present and Future
Masato Sagawa, Adviser, Daido Steel Co., Ltd.
 - 2) The Historical Development of Melt Spun NdFeB Magnetic Powder
Dr. J. J. Croat, Consultant

SmFeN magnet material

- 11:20-12:30
- 3) Interstitial Magnets-Background and Prospects
Prof. J. M. D. Coey, Trinity College
 - 4) Development of SmFeN magnet material
Takahiko Iriyama, Head Staff, Daido Steel Co., Ltd.

12:30-13:45 Break

Research for new magnet materials

- 13:45-15:00
- 5) Next generation permanent magnet materials based on elements strategy
Prof. Kazuhiro Hono, National Institute for Materials Science
 - 6) Toward development of high performance magnets and search for new-type magnets
Prof. Satoshi Sugimoto, Tohoku University

Current status and future prospect for applications of rare earth iron magnet

- 15:00-17:45
- 7) History for development of automotive motors in TOYOTA
Ryoji Mizutani, Professional Partner, Hybrid Vehicle Advanced Technology
Engineering Div., TOYOTA MOTOR CORPORATION
 - 8) Japan's World-Leading Energy Saving Technology Inverter Air Conditioners
and Permanent Magnet Motor
Kazunobu Ohyama, Senior Associate Officer, DAIKIN INDUSTRIES, LTD
 - 9) Future technology development for EV traction motor in NISSAN
-Variable Flux Permanent Magnet IPM motor-
Takashi Kato, Manager, EV System Laboratory, Research Division 2,
Nissan Motor Co., Ltd.
 - 10) YASKAWA's servo motor and technology development
Toru Shikayama, Manager, Motor Actuator Development Dept., Corporate Research
& Development Center, YASKAWA Electric Corporation
 - 11) Development of motors for HONDA Hybrid Electric Vehicles
Masato Fujioka, Chief Engineer, Department 3, Technology Development Division 4,
Honda R&D Co., Ltd. Automobile R&D Center

Closing remarks

17:45-17:50 Tetsuya Shimizu, General Manager, Corporate R&D Center, Executive Officer,
Daido Steel Co., Ltd.

18:00-19:30 **Reception party (Free)**

*Simultaneous translation is available (English <--> Japanese)

*Programs may be changed without prior notice

Nd-Fe-B magnet-past, present and future

大同特殊鋼（株） 顧問
佐川 真人

私は富士通研究所在籍中に与えられたサマリウムコバルト磁石の研究をしながら、なぜ資源豊富な鉄で強い磁石ができないのか疑問に思っていた。1978年11月31日に東京で開催されたシンポジウム「希土類磁石の基礎から応用まで」に出席していた時、希土類鉄磁石のヒントを得た。最初の講演者である浜野正昭氏は、何故希土類鉄化合物が磁石にならないのかを説明された。「希土類鉄化合物中の鉄・鉄間原子間距離が小さすぎる。これがこの化合物の強磁性体としての安定性を低くしている。」この話を聞いたとき、私は炭素やホウ素のような原子半径の小さな原子を結晶格子内に入れてやれば結晶格子が膨張し、鉄と鉄の原子間距離を拡げられるのでは、というアイデアをもった。私は次の日から実験を始めた。このときのひらめきがほぼ4年後のNd-Fe-B磁石の発明につながった。私は1983年にピッツバーグで開催されたThe Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM)にてNd-Fe-B焼結磁石の最初の論文発表を行った。

Nd-Fe-B磁石の工業化を住友特殊金属の仲間たちと早期に実現し、1985年に量産を開始した。その最初の応用はHDDのような電子機器であったが、生産量は倍々ゲームで増大し、2000年には年間1万トンを超えた。最近ではエアコン、電気自動車、ハイブリッド車に使用されて省エネルギーに貢献している。今やNd-Fe-B焼結磁石の生産量は年間10万トンに達している。

上述のピッツバーグでのMMM会議では、アメリカのいくつかのグループから超急冷法により作製されたNd-Fe-B磁石に関する発表があった。超急冷法によるNd-Fe-B磁石材料は、樹脂ボンド磁石(MQ1)および熱間加工磁石(MQ3)として実用化されている。

2050年にはロボットの数が300億個に達するとの予測がある。同じ頃には車は全て電気自動車となっているであろう。それぞれの用途ではおそらく100個以上のモータが搭載されている。そして、それに使われる磁石は「希土類-鉄」磁石であろう。時代の名称は、その時代を代表する材料から名付けられてきた；過去には、石器時代、青銅器時代、鉄器時代があった。そして、現在は、頭脳の役目を担っている半導体が重要なため「シリコン時代」と呼ばれている。近い将来の2050年頃はどうか？私は予言する。「希土類-鉄時代」である。なぜならば、この時代には手足の働きを担う材料が我々の社会において圧倒的に重要となっているはずだからである。



At MMM Conference, November 10, 1983

Historical Development of Melt Spun NdFeB Magnetic Powder for Bonded Nd Magnets

Dr. John J. Croat

Abstract

This presentation begins by reviewing the situation that confronted all researchers in the 1970s that were interesting in developing a lower cost rare earth-iron based permanent magnet to replace Sm-Co permanent magnets, which were too expensive for use in many high volume application. The major problem was the absence of any suitable R-Fe binary intermetallic compound. In about 1976, the Physics Dept. at the GM Research Labs. began a project involving the possible creation of suitable metastable intermetallic compounds from rapidly solidified precursors. This project eventually lead to the discovery of the technically important $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ intermetallic phase by the melt spinning route in 1982 and the development of bonded Nd magnets from melt spun magnetic powder. The primary focus of this presentation is an overview of the development of high volume melt spinning of NdFeB magnetic powder that took place at the Delco Remy Division, General Motors Corp. in Anderson, Indiana between about 1983 and 1985 as a collaboration between the Delco Remy Process Engineering Dept. and several departments from the GM Technical Center in Warren, Michigan. Presented is a discussion of some of the several material and process problems that were encountered in getting the melt spinning process to start and run consistently for many hours. Many of these problems were related to the highly reactive nature of the high temperature, molten NdFeB alloy.

Interstitial Magnets, Background and Prospects.

J. M. D. Coey, School of Physics and CRANN, Trinity College Dublin, Ireland.

In the close-packed crystal structures of metals and intermetallic compounds, there are always interstitial sites that are too small to fit in an extra metal atom, but big enough to accommodate one of the small atoms from the top row of the periodic table. Boron, Carbon or Nitrogen have atomic radii that are less than 100 pm. Ternary $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ is a well-known ternary compound, where the tetragonal crystal structure is stabilized by interstitial boron atoms. The boron is needed because no stable binary intermetallic compounds of Nd and Fe exist.

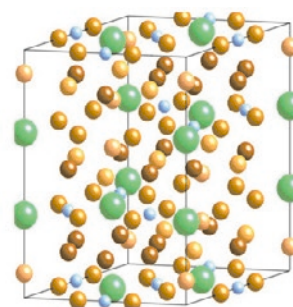
The idea of gas-phase interstitial modification arose from studies of hydrogen in metals. Some metals and alloys can absorb hydrogen from the gas phase, or electrochemically. Work on hydrogen in amorphous $\text{Y}_x\text{Fe}_{1-x}$ provided a lead [1]. This alloy is not magnetic at room temperature but after absorbing hydrogen during electrolysis, its composition changes to $\text{Y}_x\text{Fe}_{1-x}\text{H}_{3x}$, which is strongly ferromagnetic with a Curie temperature of 200°C. The volume expands by a few percent after absorbing hydrogen, which transfers some electrons to the iron. We know that the magnetic exchange interaction in iron is greatly influenced by its electronic structure and interatomic spacing. Lattice expansion can be critical for strengthening the ferromagnetic exchange in iron-based alloys.

This work led us to the idea of gas-phase interstitial modification (GIM) with H_2 , N_2 , NH_3 or another gas. Using a simple thermopiezic analyser equipped with a pressure sensor, we discovered in 1989 that the $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ compound, which has a Curie temperature T_C of only 116°C becomes a good ferromagnet with $T_C = 476^\circ\text{C}$ after absorbing nitrogen [2]. Moreover, there is strong uniaxial anisotropy because the samarium is surrounded by a triangle of interstitial nitrogen atoms (Sm is green in the Figure, nitrogen is blue). The intrinsic magnetic properties of $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$, which we called 'Nitromag', rival those of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Table). The GIM process was then extended to make 2:17, and then nitrides and carbides of other iron-based rare-earth intermetallics [3]. The discovery of these new materials was based on our understanding of crystal field theory, helped by the Concerted European Action on Magnets.

Unfortunately the interstitial phases tend to become unstable at elevated temperatures, so $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ and the related compounds could not be used for sintered magnets, but they have considerable promise for anisotropic bonded magnets. As demand for Nd-Fe-B soars, we need to balance requirements for Nd and Sm, which appear in a 4:1 ratio in rare earth ores. The Sm-Fe-N magnets will certainly play their part in the coming rare-earth iron age.

Intrinsic Magnetic Properties of Rare-earth Iron Compounds.

	T_C (°C)	M_s (MA/m)	K_1 (MJ/m ³)
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	315	1.28	4.9
$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$	116	0.80	-0.8
$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$	476	1.23	8.6
$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_3$	395	1.14	7.4



Crystal structure of $\text{Sm}_3\text{N}_{17}\text{Fe}_2$

References.

- [1] J. M. D. Coey, *et al*, Journal of Applied Physics **53** 7804 (1982)
- [2] J. M. D. Coey and Sun Hong, J. Magnetism Magnetic Materials, **87** L251 (1990)
- [3] *Rare-Earth Iron Permanent Magnets*. J. M. D. Coey (editor), Clarendon Press, Oxford 1996

Notes

Interstitial: (adj) Space in a crystal surrounded by sites occupied by atoms.

(n) A small atom occupying an interstitial site

Gas-phase interstitial modification: A process whereby a powder of an intermetallic compound is exposed to a gas composed of small atoms which then occupy interstitial sites and thereby change the magnetic properties of the compound.

Thermopiezic analyser: Simple laboratory equipment for studying the GIM process. (Thermo = heat; piezic = pressure)

Intrinsic magnetic properties: Those magnetic properties (Curie Temperature, Spontaneous magnetization, Magnetocrystalline anisotropy) that characterize a ferromagnetic material, and are independent of the form of the sample (powder, sintered body, composite ...)

Sinter (v) To create a dense body of a substance with little porosity, starting with a powder and heating it to high temperature in a controlled atmosphere.

Intermetallic compound. A metallic compound of two (or more) elements A and B with differently-sized atoms that combine in a fixed ratio to form a stoichiometric compound; e.g. AB_2 , A_2B_{17}

Stoichiometric (adj) Having a well-defined ratio of atoms in a compound.

Alloy (n). A compound of two or more chemically similar elements that with atoms of similar size that can combine over a range of composition. e.g. A_xB_{1-x} .

Amorphous (adj). An alloy with a random packing of two or more different atoms, with no crystal lattice.

Uniaxial anisotropy (n) The tendency for the magnetization of a ferromagnet to lie along one special direction in a crystal lattice.

Anisotropy energy. The energy difference according to whether the magnetization lies along the anisotropy axis or perpendicular to it. A material with a large positive anisotropy energy is said to be hard.

Bonded magnet. A composite where particles of a hard magnetic phase are combined with a polymer to make a magnet.

Oriented magnet. A magnet (sintered or bonded) where all the particles of the hard magnetic phase are arranged with their anisotropy axes in the same direction. Oriented, sintered magnets are the strongest.

サマリウム鉄窒素磁石の発明とその魅力

大同特殊鋼（株） 理事
入山 恭彦

1. はじめに

Fig. 1 に日本で量産されている永久磁石材料の特性を示す。最強磁力を誇るネオジム系磁石 (Nd-Fe-B) が産業界の主役となっている。サマリウム鉄窒素系磁石 (Sm-Fe-N) は、本来の磁気特性が Nd-Fe-B に匹敵するものの、約 500°C を越える温度域で SmN と α -Fe に分解してしまうため高温焼結できず、応用はボンド磁石に限られており、その製造量もまだ少ない。ただし、Sm-Fe-N は Nd-Fe-B に比べ耐食・耐熱性に優れており、自動車用途のような分野での存在価値が今後高まっていくものと期待される。本講演では、Sm-Fe-N 磁石の発明に到る経緯について紹介したのち、本材料の特徴・魅力について述べたい。

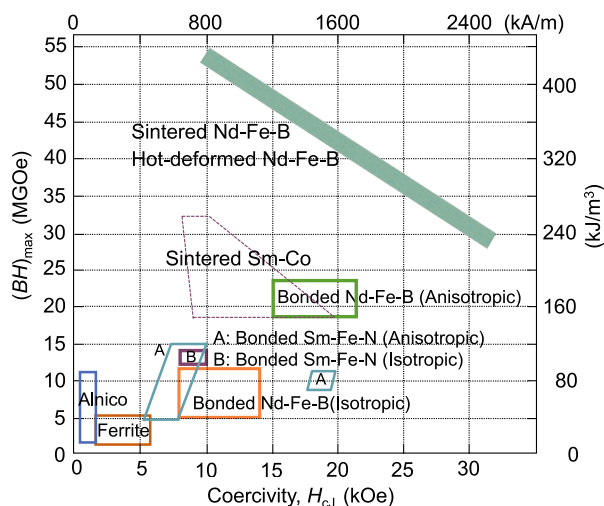


Fig. 1. Magnetic Properties of Commercial Permanent Magnets in Japan.

2. Sm-Fe-N 磁石の発明

開発開始のきっかけは、1986 年秋の応用磁気学会学術講演会であった。本講演会における窒化鉄 Fe_{16}N_2 に関する発表に筆者は興味をもった。数件の発表はいずれも「 Fe_{16}N_2 は Fe よりも大きな飽和磁化をもつ[1]。そこでその合成を試みたが純粋試料は得られなかった[2], [3]」という内容であった。その後の調査で、永久磁石としての窒化鉄の研究例がないこと、および窒化鉄に添加元素を加えたバルク材料の研究例が少ないことが判明した。そこで、「 FeN_x に第 3 成分を添加すれば飽和磁化が大きく、かつ結晶磁気異方性も大きな新たな化合物を作り出すことができるのではないか」とい基本発想に基づく研究を 1986 年の 12 月に始めることとなった。

探索実験の手順は、以下の通りであった：Fe-X（ここで X は第 3 元素）のアーク溶解→粗粉碎→アンモニアガスによる窒化→特性評価（磁気特性（飽和磁化、保磁力、結晶磁気異方性）、結晶構造）。ここで窒化温度は 700°C に固定した。周期律表を見て可能な元素はほとんど全て第 3 成分として添加してみたが面白い結果は得られなかった。次に窒化温度を 450°C に下げ、再度探索を行った。そして、1987 年の春、ついに約 500 点目の実験において、窒化により Fe-R 系（ここで R は希土類元素）の結晶が膨張した Fe-R-N 系化合物が存在することを発見した。そして、希土類元素として Sm を選択したときに優れた磁石特性をもつことがわかり特許出願した[4]。なお、論文と

しては、本材料を我々とは独立に発見した Coey らの論文[5]が最も早い。

3. Sm-Fe-N の特徴

現在実用化されている Sm-Fe-N には、異方性 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ ($\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ 型構造) と等方性 $(\text{SmZr})\text{Fe}_9\text{N}$ (TbCu_7 型構造) の 2 種類があり、その製法も異なる。基本磁気特性を Table 1 に示す。ボンド磁石としての特性は Fig. 1 に示されているが、等方性 Nd-Fe-B 系ボンド磁石と比較すると同等以上の特性をもつことがわかる。

Sm-Fe-N の大きな特徴は、耐食性に優れることである。Fig. 2 は、表面塗装をしていない圧縮成形ボンド磁石を 70°C の温水に長時間浸漬したときの磁束変化を示している。Nd-Fe-B ボンド磁石は発錆により磁束が大きく低下する一方、Sm-Fe-N ボンド磁石の磁束低下が小さいことがわかる。自動車分野のような高耐食性・高耐熱性が要求される用途において、今後 Sm-Fe-N 系材料の重要度が高まっていくことが期待される。

Table 1 Intrinsic Magnetic Properties of SmFeN and Nd-Fe-B

Magnet Material Molecular Formula	SmFeN $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$	NdFeB $(\text{SmZr})\text{Fe}_9\text{N}^{*1}$ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	
Saturation Magnetization (kG)	15.7	17.0 ^{*2}	16.0
Anisotropy Field (kOe)	260	77	67
Theoretical $(BH)_{\text{max}}$ (MGOe)	62	72	64

*1 : Produced by Rapid-Quenching Process;

M. Katter, J. Wecker, and L. Schultz: *J. Appl. Phys.*, **70**, 3188 (1991)

*2 : S. Sakurada, T. Hirai, A. Tsutai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **21**, 181 (1997)

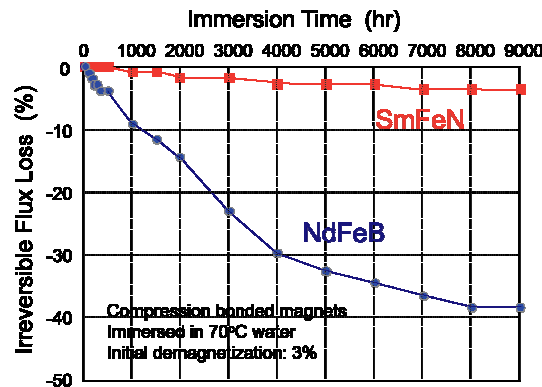


Fig. 2. Flux Losses of Compression-Molded Bonded Magnets during Aging Test.

参考文献

- [1] 高橋実：固体物理、**7** (1972) 483
- [2] 宇田川昌治、宮島英紀、近角聡信：第 10 回日本応用磁気学会学術講演概要集(1986) p.296
- [3] 佐々木堂、奥村芳輝：第 10 回日本応用磁気学会学術講演概要集(1986) p.399
- [4] T. Iriyama, K. Kobayashi and H. Imai: European Patent Appl., Pub. Num. 0-369-097-A1 (1989)
- [5] J. M. D. Coey and Hong Sun: *J. Magn. Magn. Mater.*, **87** (1990) L251

Nd-Fe-B permanent magnets with ultimate hard magnetic properties

K. Hono, H. Sepehri-Amin, T. T. Sasaki, and T. Ohkubo

Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials, National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba, Japan

Due to the recent concern about the stable supply of heavy rare earth elements, attaining high coercivity in Nd-Fe-B magnets without using heavy rare earth (HRE) elements has received intense research interest in the past decade. However, the supply of rare earth elements has been stabilized in the last few years, and the renewed goal is how to achieve the highest permanent magnetic properties with a balanced use of critical elements. In this talk, we will overview our recent progresses on the development of high coercivity Dy-free Nd-Fe-B permanent magnets that were carried out at NIMS in collaboration with many industrial partners. Thereafter, we discuss how to achieve ultimate permanent magnet properties with trace additions of HRE. To obtain better understandings of the microstructure-coercivity relationships, we investigated the microstructures of experimental Nd-Fe-B sintered magnets, those processed from HDDR power, and hot-deformed magnets with different values of coercivity depending on chemical compositions, processing routes and post-manufacturing heat treatments. The microstructure and magnetic domain observations have been carried out using aberration-corrected STEM, atom probe tomography (APT), magneto-optical Kerr microscopy and finite element micromagnetic simulations. We found that the intergranular phase parallel to the c-planes are mostly crystalline with a higher Nd concentration in contrast to that lying parallel to the c-axis that contains higher Fe content with an amorphous structure in both sintered and hot-deformed magnets. Micromagnetic simulations suggest that the reduction of the magnetization in the latter is critical to enhance the coercivity. Based on these new experimental findings together with our detailed characterization results of the intergranular phases in Ga-doped Nd-Fe-B magnets, we developed a method to increase the coercivity of Nd-Fe-B hot-deformed magnets while keeping relatively high remanence.

This talk includes results obtained in collaboration with industrial collaborators including TOYOTA, Toyota Central Research Laboratory, Intermetallics and Daido Steel conducted under CREST and Collaborative Research Based on Industrial Demand projects.

高性能磁石開発と新規磁石材料探索に向けて

東北大学大学院工学研究科 教授
杉本 諭

【はじめに】 永久磁石は、様々な用途で使われ、我々の生活に欠かすことができない材料となっている。本講演では、我々が取り組んできた Nd-Fe-B 系磁石における Dy 削減と新規材料開発に関する研究の一端を紹介する。

【結晶粒微細化による省 DyNd-Fe-B 系磁石】 我々は、宇根と佐川¹⁾とともに He ジェットミルの利用によって、従来よりも細かな 1 μm 程度の粉末の製造に成功し、この粉末を用いて作製した Dy 無添加焼結磁石において、室温で 1.6 MAm^{-1} 以上の保磁力 H_{cJ} と 400 kJm^{-3} の $(BH)_{\text{max}}$ を両立した。これにより省 Dy の可能性を示唆した。また、HDDR 現象と HD 現象をジェットミル法と併用し、さらに粒界拡散法も駆使して、単磁区粒子サイズの高保磁力粉末を作製した^{2),3)}。この粉末を用いた焼結磁石は未だ保磁力は低いものの優れた温度特性を示すことがわかっている。

【新規磁石材料の探索】 我々は、新規磁石材料の探索を目指して、種々の材料的手法（薄膜技術、微粒子・粉末技術、超高压技術）を用い研究を行ってきた。その結果、Rh 基板上に成膜後窒化した FeCo-Ti 系膜で膜厚 7.7 nm で $K_u=1.39 \text{ MJm}^{-3}$ 、膜厚 62 nm でも $K_u=0.46 \text{ MJm}^{-3}$ と高い磁気異方性を得た⁴⁾。また、高温の ζ 相が β -Mn 相とペロブスカイト相に二相分離することによって希土類磁石並みの高保磁力を発現する新しい Mn-Sn-Co-N 系バルク合金を発見した⁵⁾。さらに、リチウムアミドと Mn の微粉末の高圧合成により、 $H_{cJ}>300 \text{ kAm}^{-1}$ と高保磁力を示す正方晶系の新規化合物の合成に成功した⁶⁾。いずれにしても Nd-Fe-B 系磁石を超える材料は未だ開発されていなく、その壁は厚く高いが、今後も材料開発の面白さを実感して継続したい。

[参考文献]

1. 宇根康裕, 佐川真人, 日本金属学会誌, 76(1), (2012), pp.12-16.
2. M. Nakamura et al., Appl. Phys. Lett., 103 (2013), 022404-1-022404-4.
3. S. Sugimoto et al., IEEE Trans. Magn., 51(11), (2015), 2101004.
4. M. Matsuura, et al., J. Appl. Phys., 117 (2015), 17A738.
5. K. Shinaji, et al., Mater. Trans., 54(10) (2013), pp.2007-2010.
6. I. Matsushita et al., Mater. Trans., 57(10), 1832-1836.

トヨタにおける自動車用モータ開発の歴史

トヨタ自動車（株）HV 先行開発部 プロフェッショナルパートナー
水谷 良治

【はじめに】 まず、多くのお客様にハイブリッド車(HEV)をお乗り頂き感謝申し上げます。そして、多くの方々のご支援を得ることにより、専門家でない私達がモータ造りを続けることが出来ました。関係各社様への感謝の気持ちを込めて、トヨタのモータ開発の経過をご紹介します。

振り返ると、モータ開発を開始した 1980 年頃はモータ開発維新とでもいうべき時代の変化がありました。すなわち、我々はネオジウム磁石、マイコン、パワーランジスターという強い追い風を受けてモータ開発を進めてきました。

【第1部：生産設備用モータ開発】 我々はトヨタ生産方式に適した設備のためのモータの形状・特性・制御を求めてモータスタジオをつくり、設計・試作・テストを行う短期間のモータ開発の仕組みと製造設備の開発まで取組みました。まず取り組んだ NC 加工機、テスター、ロボット、無人搬送車などの設備用モータ開発事例をご紹介します。

【第2部：自動車用モータ開発】 1990年代からの自動車には50以上のモータが搭載されています。その中でもEV等走行用モータは搭載する車両での使い方により、色々な要求性能に分かれます。今回はその中でも高性能磁石の恩恵を受けているHEV用モータを代表して、プリウスモータの高速化による小型化の変遷とそれらに使われているモータ技術についてご紹介いたします。

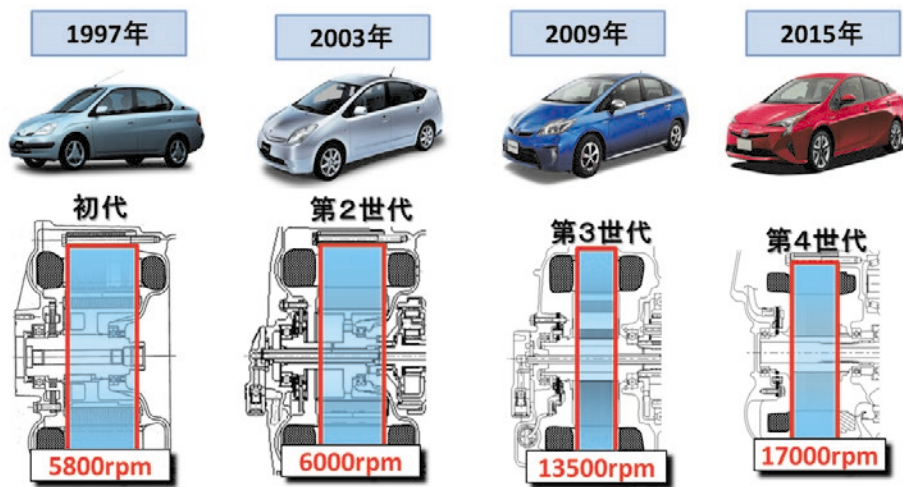


図 初代～第4世代プリウスの写真と高速化により小型化してきたモータ

日本発の省エネ技術「インバータエアコンと希土類 IPM モータ」

ダイキン工業（株） 常務専任役員
大山 和伸

快適性・利便性をユーザーに提供する目的で、1980年代に世界に先駆けて日本国内の電化製品のインバータ化が進んだ。中でも、1981年に世界初の家庭用インバータエアコンが東芝から発売され、インバータ技術の素晴らしさが広く一般に知られるようになった。その後、1990年代の年間電気代削減競争やトップランナー方式の省エネ規制を経て、日本のインバータエアコンの高効率化が急進展した。

このような中、1996年にネオジム磁石による強力な磁石トルクに加えてリラクタンストルクを併用するIPMモータ（IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）を搭載したルームエアコンがダイキン工業から発売され、希土類IPMモータが日本の強み技術に位置付けられるようになった。

本講演では、モータ省エネの重要性を述べるとともに、日本発の省エネ技術であるインバータエアコンとネオジム磁石を用いた希土類IPMモータ商品化の歴史を振り返り、究極の省エネインバータを目指した日本発の取り組みと、今後の材料開発に対する期待を述べる。

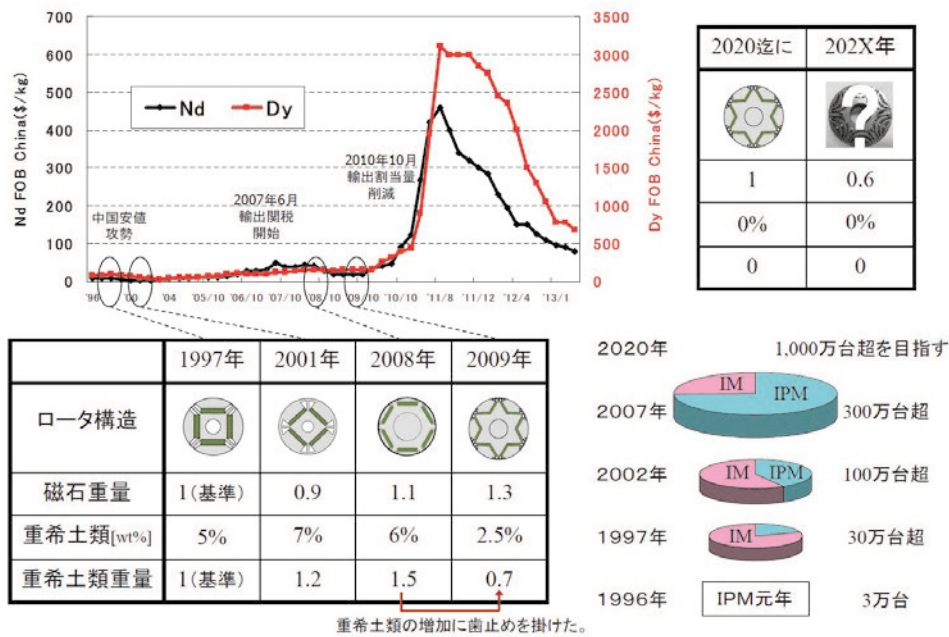


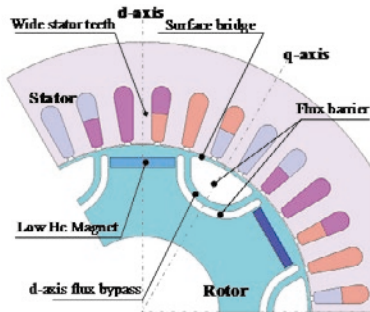
図1 当社エアコン用IPMSMの希土類使用量の変遷

磁束可変型永久磁石同期モータ

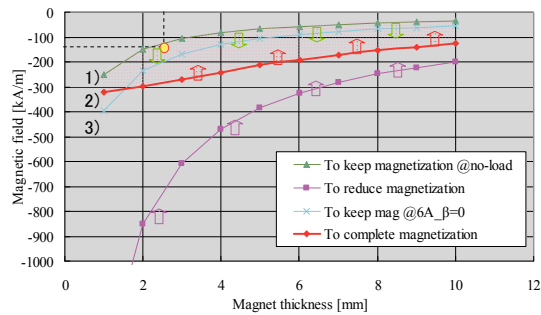
日産自動車（株）加藤 崇

【はじめに】 EV や HEV などの電動駆動車両の普及拡大に伴って、小型・高効率化な主駆動モータの研究開発が進められている。自動車用途では低速大トルク～高速域までの広範囲における効率の向上が求められる。本講演では将来モータの研究開発事例としてこれらのニーズに適した2つの可変特性モータについて解説する。

【磁力可変モータ】 低保磁力磁石と順突極磁気回路を組み合わせることで、磁力の制御性と負荷時の磁力安定性を両立した。低保磁力磁石の保磁力と厚み設計の考え方や磁力制御手法について述べる。



(a) Proof of principle model

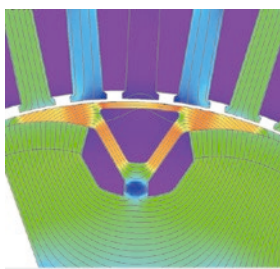


(b) Boundary conditions for low Hc magnet

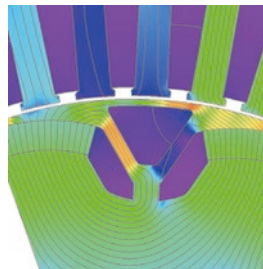
Figure 1. Variable magnetomotive force FI-IPM motor

【漏れ磁束可変モータ】

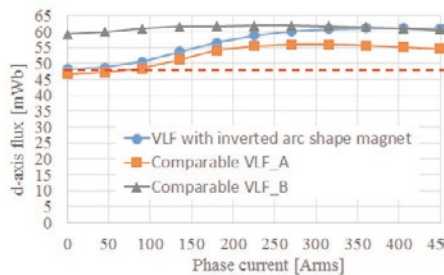
磁気回路中に磁束バイパス部を適切に設けることで、電流負荷や進角に応じて受動的に鎖交磁束を可変し、特に低～中負荷 & 高速域の効率を大幅に向上した。円弧型ラジアル配向磁石を適用による磁気回路設計自由度向上と効率向上について述べる。



(a) No load



(b) Loaded



(c) Variable flux properties

Figure 2. Variable leakage flux IPM motor

【参考文献】

- [1] T. Kato, N. Limsuwan, C. Yu, K. Akatsu, R.D. Lorenz, "Rare earth reduction using a novel variable magnetomotive force, flux intensified IPM machine," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 50 No. 3, May/June 2014, pp. 1748-1756
- [2] 福重 孝志, 加藤 崇, 赤津 観, Robert D. Lorenz, 「電動車両における可変磁力モータの検討」, 電気学会論文誌 D, Vol. 135 (2015) No. 9
- [3] T. Kato, H. Hijikata, M. Minowa, Kan. Akatsu, Robert D. Lorenz, "Design Methodology for Variable Leakage Flux IPM for Automobile Traction Drives", IEEE Trans. Appl. Ind., vol.51 no. 5, pp. 3811-3821, Sep.2015
- [4] T. Matsuura, K. Sasaki, T. Tanimoto, T. Kato, "A High Power and High Efficiency Variable Leakage Flux Machine Using Inverted Arc Shape Magnet," Proc. of JSAE, pp. 44-49, 2016.

安川電機のサーボモータとその技術開発

(株)安川電機 開発研究所 モータ・アクチュエータ開発部
鹿山 透

サーボモータは高速かつ精密な位置決めや動作を行うモータとして、産業用ロボット、工作機械、電子部品実装機、半導体製造装置、繊維機械、食品加工機械、プレス機械等の様々な生産機械・装置に適用されている。例えば産業用ロボットでは多関節の動きを複数台のサーボモータが行っており、高速・高精度な動きを忠実に繰り返し再現するだけでなく、熟練者の作業を実現させるほどの絶妙な動きを可能にしている。サーボモータは生産性の向上や製品品質の安定だけでなく、熟練労働者不足への対応など、生産分野のあらゆる面で貢献している。

当社は1962年に当時の常識を覆す高性能を有するDCサーボモータ(ミナーシャモータ)を製品化、1969年に機械のメカニクスと電気のエレクトロニクスを融合した意味のメカトロニクスを世に提唱し、1977年に日本で初めて全電気式産業用ロボット(MOTOMAN)を発表した。1992年には現在のサーボモータの礎とも言えるACサーボモータ(Σ シリーズ)を製品化、現在の Σ -7シリーズまで性能・機能の向上と小型・高出力化を続けている。特に小型化が格段に進み、その重量は1960年の“1/10”にまで軽量化されている。その結果、産業用ロボット等の生産機械の劇的なスリム化と様々な用途への最適化を可能にしている。

このようなサーボモータの小型化は紛れもなく磁石技術の進歩を享受したものである。当社では高性能レアアース磁石の製品適用をいち早く進め、新製品への最新Nd-Fe-B磁石の適用を積極的に行っている。また、省レアアース磁石の採用はもちろんのこと、磁石磁束を鉄心で集中させることで省レアアース磁石を効率良く使う構造を開発するなど、未来に向けた地球に優しいサーボモータの開発にも努めている。

本講演では、安川電機のサーボモータへの取り組みとして、その概要と産業用ロボットへの適用事例について説明し、さらにはサーボモータにおける磁石応用技術や最新技術の開発事例について紹介する。本講演を聴講される皆様の今後の参考にしていただければ幸いである。

ホンダ電動車用モータの開発

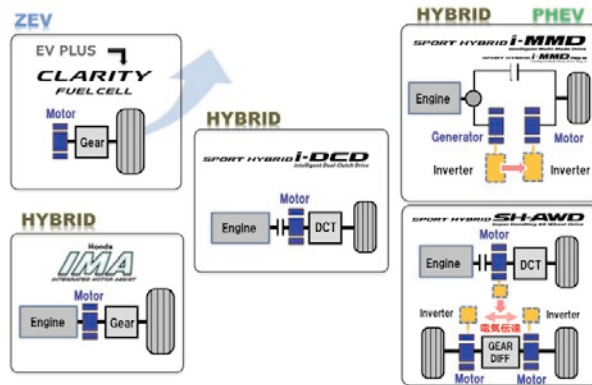
(株) 本田技術研究所 四輪 R&D センター
主任研究員
藤岡 征人

【はじめに】

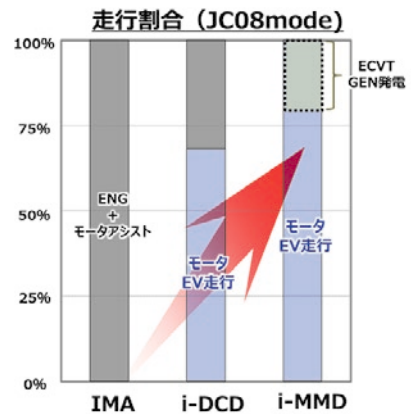
自動車産業においてはCO₂排出量の削減や低燃費化など環境性能に対する要求が年々厳しさを増しており、HEV (Hybrid Electric Vehicle) など電動車の生産、市場投入を行い、電動車の普及が拡大している。近年、電動車におけるモータの使用頻度、走行割合は拡大し、モータへの依存度は増加している。さらにはコンパクトカー、セダン、ミニバンなど多岐にわたる車種への展開が望まれており、モータへの要求は小型化、高効率にとどまらず、低資源リスク、低NV化など高性能化の要求が増している。

本講演ではホンダの電動車パワートレインシステム及び各システムに対応したモータ開発のアプローチについて紹介する。

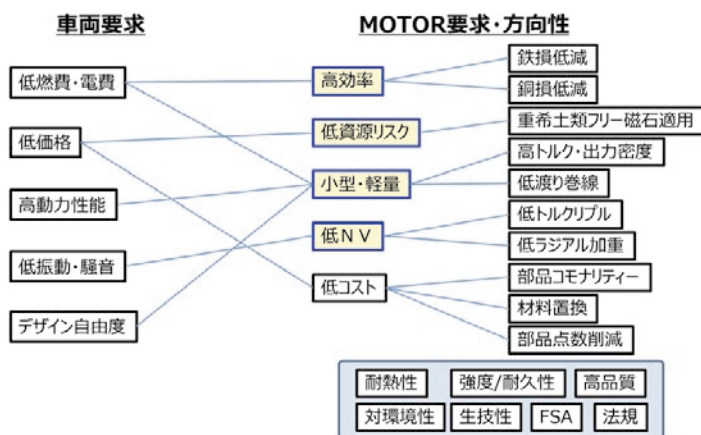
【ホンダ電動車パワートレイン】

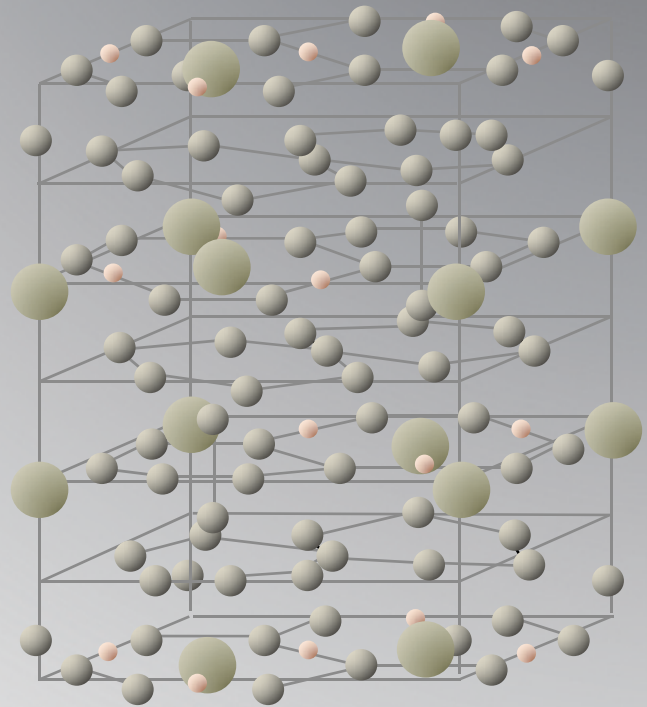
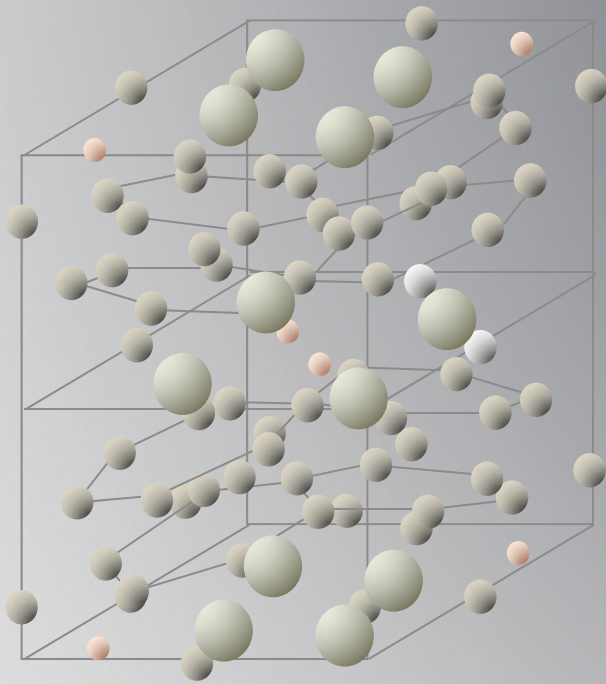


【モータ走行割合】



【モータ技術開発アプローチ】





後援 公益社団法人日本金属学会、公益社団法人日本磁気学会(協賛)、
元素戦略磁性材料研究拠点、高効率モーター用磁性材料技術研究組合
日本学術振興会アモルファス・ナノ材料第147委員会

Supported by:

The Japan Institute of Metals and Materials, The Magnetics Society of Japan

Elements Strategy Initiative Center for Magnetic Materials (ESICMM)

Technology Research Association of Magnetic Materials for High-Efficiency Motors (MagHEM)

No. 147 Committee of Japan Society for the Promotion of Science