

公益財団法人
応用科学研究所
平成 29 年度研究成果報告書

第 25 号

2017FY RESEARCH REPORT

No.25

2018

RESEARCH INSTITUTE FOR APPLIED SCIENCES

目 次

1. 研究員による成果		
高耐熱性材料の開発に関する研究.....	長江 正寛	1
鉄鋼材料の塑性変形形態と材料特性に関する研究.....	長江 正寛	2
	久保 愛三	
「歯車損傷大全」草稿作成.....	久保 愛三	3
平成 28 年度、29 年度 次世代鋼材測定・評価手法の開発 成果要旨.....	久保 愛三	9
2. 特別研究員による成果		
超電導インバータの実用化実証研究.....	長村 光造	13
銀被覆ビスマス系線材の機械的特性の評価.....	長村 光造	14
超電導技術の国際標準化.....	長村 光造	16
組織制御による超電導特性の改良に関する研究.....	長村 光造	18
保磁力の配向度依存性と角度依存性の相関による磁化反転プロセスの解明.....	松浦 裕	20
	長村 光造	
保磁力の配向度依存性と保磁力角度依存性から得られる磁化反転挙動.....	松浦 裕	22
3. 共同研究員による成果		
安全情報を伝えるメディアの研究(その 5).....	尾池 和夫	25
メガソーラー用インバータにおける制御アルゴリズム開発.....	太田 快人	27
	平田 研二	
大規模分散電源による電力系統の安定化.....	舟木 剛	29
洋上風力の実施可能性に関する調査研究.....	安田 陽	31
海外の送電事業者の事業拡張モデルと国内への適用に関する調査研究.....	安田 陽	33
大量 PV の仮想同期発電機モデル制御による系統安定化への影響評価.....	横山 明彦	35

研究員による成果

高耐熱性材料の開発に関する研究

材料評価・開発研究室 長江正寛

受託先名：株式会社アライドマテリアル

1. 目的

高融点金属である Mo は、核融合炉壁材等の超高温耐熱真空部材として有望である。しかしながら、1000°C 以上での使用によって再結晶化し高温強度が大きく低下するのみならず、脆弱な結晶粒界に起因する低温脆性を示すことが大きな問題となっている。この問題を克服するために、我々は Mo 合金の希薄 CO ガス熱処理法を考案し、炭素の粒界偏析による粒界強化と内部酸化による粒子分散強化の同時発現が可能である事を見出した(1)。しかしながら、この手法は材料表面からの拡散反応が律速となるため、大型の部材には適用が困難である。

本研究では、液体ジルコニウム源を含浸させた Mo 粉末を焼結することで、微細なジルコニア (ZrO_2) 粒子が均一に分散した、高強度・高靱性 Mo-ZrO₂ 系耐熱複合材料の作製を目指す。今年度は少量のイットリア (Y_2O_3) を添加した Mo-ZrO₂-Y₂O₃ 系焼結材料の開発ならびにその機械的特性について検討した。

2. 成果

液体ジルコニウム源に少量の Y_2O_3 前駆体を添加すると、イットリア安定化正方晶ジルコニア (Y-TSZ) を Mo 焼結体中に微細分散させることが可能である事が分かった。室温における引張試験の結果、破断伸びは約 48% を示し、3 点曲げ試験の結果、延性-脆性遷移温度は -100°C 付近である事が分かった。従来 Mo 焼結品は室温で全く延性を示さないことから、本研究で得られた Mo-ZrO₂-Y₂O₃ 系焼結は、従来材と比較して格段に優れた低温延性を示す事を明らかにした。

参考文献

(1) M. Nagae, N. Ise, J. Takada, Y. Hiraoka, T. Takida ; J. of the Japan Society for Heat Treatment, Vol.49, pp.667-670(2009)

3. 成果の公表

成果の一部は平成 30 年秋の学会にて口頭発表する予定である。

報告書作成日 平成 30 年 5 月 31 日

鉄鋼材料の塑性変形形態と材料特性に関する研究

材料研究部 長江正寛 久保愛三

1. 目的

近年、歯車等の重要機械部品に関する損傷事故が増えている。その原因は様々であるが、鉄鋼材料の品質に起因すると考えられるケースも多い。鉄鋼材料の品質は JIS 規格で定められており、材料を購入する機械産業メーカーの担当者は、鉄鋼メーカーが提供する素材データ(ミルシート)やカタログを元に購入判断を行い、入手した鋼材に外観的な問題がなければそれで良しとしている風潮がある。本来、購入した素材の品質を正しく管理するためには、手間とお金をかけて組織観察等の品質検査を行う必要があるが、事故が起こるまでは、カタログやミルシートが盲目的に信用されていることが多いように思われる。

本研究では、鉄鋼材料の客観的な品質評価を簡便に行う事を最終目的として、各種鋼材について超多点のマイクロビッカース硬さ測定を行い、材料特性との相関について詳細に検討した。

2. 成果

予備実験において、純鉄粗大粒にビッカース圧痕を形成し、三次元形状計測を行った結果、圧痕形状と圧痕周辺部の変形形態は、結晶方位に依存して大きく変化する事が分かった。また、光学顕微鏡組織観察では材料特性の違いがはっきり分からないような場合でも、超多点のマイクロビッカース硬さ測定は、熱処理の良否や材料の良否を判断するための有効な指針となり得る事を見出した。各種鋼材の超多点硬さ測定を行った結果、ミルシートからは読み取る事が困難な材料間の差異が、あたかも 2 次元的画像データとして視覚化できること等を明らかにした。

3. 成果の公表

成果の一部は平成 30 年秋の学会にて口頭発表する予定である。

報告書作成日 平成 30 年 5 月 31 日

「歯車損傷大全」草稿作成

機械基盤研究施設 久保愛三

1. 目的

歯車ならびに歯車装置の損傷事例の蒐集とまとめを行い、歯車損傷事故が起こった時、その原因対策を過去の経験から参照できる資料を作成する。

2. 成果

日本機械学会編の「歯車損傷図鑑」の改定をも含み、古今の損傷事例に最新の情報を加え、内容を約 3 倍にした草案を作成。現在、日本機械学会 RC268 調査研究分科会で校閲作業中。草案完成約 800 ページ。日本機械学会側としてはこの草案に基づき、RC275 調査研究分科会の事業として 2019 年 3 月完成目途で作業が進行中。

3. 成果の公表

日本機械学会 RC275 調査研究分科会の調査研究資料（応用科学研究所久保愛三）として、公表予定。応用科学研究所のホームページで賛助会員に公開し意見を収集中。

以下、「歯車損傷図鑑 改訂版 目次案」を掲載する。

改定に際して

第 I 編

0. 序論- 社会環境と機械技術者の基本的態度(Basic attitude of mechanical engineer)
 - 0.1 トラブルシューティングの手順 (Procedure of gear trouble shooting)
 - 0.2 強い鉄を作るための基本的な方法と現実の問題 (Principle to make strong steel and practical problems)
 - 0.3 疲労と損傷起点発生の取り扱い (Way to treat fatigue failure and its initiating point)
 - 0.4 鋼ならびにギヤブランクの製造工程 (Process of gear blank piece production)
 - 0.5 材料強度の経時変化 (Deterioration of material allowance due to operation)
 - 0.6 材料屋の材料強度と歯車屋の材料強度 (Material strength for metallurgists and for gear engineers)
 - 0.7 歯車負荷容量計算法について (On methods for prediction of load capacity of gears)
 - 0.8 トロコイド干渉と歯面強さ計算法の有効範囲 (Trochoidal interference and scope of the prediction methods of tooth flank durability)
 - 0.9 自由端におけるヘルツ応力 (Contact stress induced at edges of surface)
 - 0.10 摩耗粉の発生 (Generation of wear debris)
 - 0.11 異物のかみ込みと歯面粗さ (Crash of foreign objects and surface roughness of tooth flank)
 - 0.12 負荷される歯面材料の応力体積 (Stressed volume of tooth flank material)
 - 0.13 表面粗さとEHL油膜厚さについて (On surface roughness and EHL film thickness)
 - 0.14 写眞(Photograph)について (On photograph of failed tooth)
 - 0.15 X線残留応力測定について (On residual stress measured by X-ray diffraction)
 - 0.16 歯車損傷とトラブルシューティングについて (On the trouble shooting of gear failure)

第 II 編

1. 設計製造上の損傷原因、運転前欠陥 (Causes of failure in design and in production)
 - 1.1 加工セッティング不良 (Insufficient machine, tool and workpiece setting and adjusting)
 - 1.1.1 歯元隅肉部への砥石接触の段差 (Notch due to grinding disk edge contact)
 - 1.1.2 歯先面取りの不均 (Uneven amount of tooth tip chamfering)
 - 1.1.3 歯車の偏心、ランナウト、面ブレ(Eccentricity and run-out, tooth side fluttering)
 - 1.2 仕上げ歯面の加工不良(Malfinishing of tooth flank)
 - 1.2.1 ホブ切り目、むしれ、カッターマーク(Hobbing mark, Cold-adhesive scratch, Cutter mark)
 - 1.2.2 マシニングセンター制御加工目、カッターマーク(NC mark, Mill-cutter mark)
 - 1.2.3 研削目、表面粗さ(Grinding mark, Surface roughness)
 - 1.2.4 ショットピーニングによる歯面の荒れ、歯先のまくれ(Rough surface and tooth tip deformation due to shot peening)
 - 1.2.5 切削焼け (Hard cut burn)
 - 1.2.6 研削焼け (Grinding burn)
 - 1.2.7 研削割れ (Grinding cracks)

- 1.2.8 歯車精度不足 (Shortage of gear accuracy)
 - 1.3 設計指示、製造時の問題(Design or manufacturing failure)
 - 1.3.1 歯元フィレット部の逃げ不足による相手歯先の干渉 (衝突) (Collision of tooth tip against mating tooth fillet)
 - 1.3.2 加工によるバリ (Machining burr)
 - 1.3.3 歯先稜角 (Tooth tip edge and chamfering)
 - 1.3.4 歯側端角と面取り (Tooth side edge and chamfering)
 - 1.3.5 微小歯車での中心距離の不良(Improper center distance by very small module gears)
 - 1.3.6 歯打ち、部品の踊り、重力の影響 (Tooth hammering & judder, gravity influence)
 - 1.3.7 稼働時の熱膨張 (Thermal expansion in operation)
 - 1.4 熱処理欠陥(Defects by heat treatment)
 - 1.4.1 焼割れ(Hardening cracks, Quenching cracks)
 - 1.4.2 残留応力異常(Abnormal residual stress)
 - 1.4.3 角部過浸炭 (Overcarbulizing of tooth edge)
 - 1.4.4 結晶粒の粗大化 (Grain growth)
 - 1.4.5 浸炭異常層、粒界異常 (Improper carburized layer and Granular imperfection)
 - 1.4.6 熱処理歪 (Distortion due to heat treatment)
 - 1.4.7 窒化化合物層の剥離(Peeling off of Nitrided epsilon layer)
 - 1.4.8 置割れ (Delayed fracture)
 - 1.5 材料欠陥 (Material defect)
 - 1.5.1 偏析 (Segregation)
 - 1.5.2 マイクロクラック、ボイドの存在 (Microcrack and void)
 - 1.5.3 組織の不均一 (Uneven texture of material)
 - 1.5.4 不純物、介在物過多 (Impurity, inclusion)
 - 1.6 過大応力負荷の前歴 (Stressed curriculum)
 - 1.7 打痕、ハンドリング・輸送の傷 (Nick, Handling and transportation problem)
2. 正常摩耗 (Normal wear, Running-in wear)
- 2.1 軽度の摩耗 (Moderate wear)
 - 2.2 ポリッシング (Polishing)
 - 2.3 軽度の異物かみ込み (Light crush of foreign objects)、スクラッチング(Scratching)
 - 2.4 軽度のトロコイド干渉、歯の側端接触摩耗 (Tooth edge contact and edge wear)
 - 2.4.1 トロコイド干渉(Trochoidal interference)
 - 2.4.2 歯の側端接触(Contact of tooth side edge)
3. 損傷の兆候 (Indication of failure)
- 3.1 歯面損傷と欠け (Tooth flank failure and chipping)
 - 3.1.1 初期ピッチング (Initial pitting)
 - 3.1.2 マイクロピッチングの初期状態 (Initial micropitting)
 - 3.1.3 独立的マイクロピッチング (Independent micro-pits)

- 3.1.4 歯側端接触部ピット (Pitting due to tooth side edge-contact)
 - 3.1.5 歯側端マイクロチップング (Microchipping at tooth side edge)
 - 3.1.6 歯先側端面内の欠け (Chipping at tooth side and at tooth tip edge)
 - 3.1.7 歯打ち (Tooth hammering)
 - 3.2 摩耗・熱的歯面損傷 (Wear and thermal failure)
 - 3.2.1 スクラッチング (Scratching)、軽度の異物のかみ込み (Light crush of foreign objects)
 - 3.2.2 トロコイド干渉による歯元摩耗 (Trochoidal interference wear)
 - 3.2.3 歯先エッジの損傷 (Failure of tip edge failure)
 - 3.2.4 背面干渉摩耗 (Non-backlash interference wear)
 - 3.2.5 歯側端接触部の凝着摩耗 (Adhesive wear due to tooth side edge-contact)
 - 3.2.6 スケーリング (Scaling)
 - 3.2.7 焼け (Burning)
 - 3.2.8 接触面の硬度低下 (Decrease of surface hardness)
 - 3.2.9 熱割れ (Thermal cracks, Heat cracks)
 - 3.2.10 熱亀裂 (Thermal cracks)
 - 3.3 化学電氣流体的歯面損傷と材料の劣化 (Other tooth flank failure and deterioration)
 - 3.3.1 化学腐食 (Chemical corrosion)
 - 3.3.2 フレッチングコロージョン (Fretting corrosion)
 - 3.3.3 電食 (Electric erosion)
 - 3.3.4 キャビテーションエロージョン (Cavitation erosion)
 - 3.3.5 流体エロージョン (Hydraulic erosion)
 - 3.4 亀裂 (Fissures and micro cracks)
 - 3.4.1 歯元疲労亀裂 (Fatigue cracks at tooth fillet)
 - 3.4.2 ピッチ点付近疲労亀裂 (Fatigue cracks in pitch line zone)
 - 3.4.3 ピッチング起点疲労亀裂 (Fatigue cracks from pitting)
 - 3.4.4 スポーリング起点疲労亀裂 (Fatigue cracks from spalling)
 - 3.4.5 フレッチング起点亀裂 (Fatigue cracks from fretting)
 - 3.4.6 材料欠陥起点疲労亀裂 (Fatigue cracks from material defects)
 - 3.4.7 歯側端面取り内疲労亀裂 (Fatigue crack inside tooth side chamfer)
 - 3.4.8 異物のかみ込みによる衝撃亀裂 (Collision crack due to crush of foreign object)
4. 摩耗 (Wear)
- 4.1 アブレシブ摩耗 (Abrasive wear)
 - 4.2 凝着摩耗 (Adhesive wear)
 - 4.3 摩滅 (Wear out)
 - 4.4 高温薄油膜摩耗 (High surface temperature thin oil film wear)
 - 4.5 班裂摩耗 (Rag wear)
 - 4.6 干渉摩耗 (Interferential wear)

- 5. スカフティング、スコーリング (Scuffing、Scoring)
 - 5.1 高温スカフティング (Hot scuffing)
 - 5.2 低温スカフティング (Cold scuffing)

- 6. 永久変形 (Permanent deformations)
 - 6.1 圧痕 (Indentation)
 - 6.2 塑性変形 (Plastic deformation)
 - 6.2.1 ローリングによる塑性変形 (Plastic deformation by rolling)
 - 6.2.2 歯の倒れ (Plastic leaning deformation of tooth)
 - 6.2.3 歯面の圧壊 (Flank destruction)
 - 6.3 リップリング (Rippling)
 - 6.4 リッジング (Ridging)
 - 6.5 バリ (Burrs)
 - 6.6 熔融 (Fusion, Melting)
 - 6.7 乗り上げ (Tooth on tooth jamming)

- 7. 表面疲労 (Surface and subsurface fatigue)と亀裂伝播 (Crack propagation)
 - 7.1 ピッチング (Pitting)
 - 7.1.1 進行性ピッチング (Progressive pitting)
 - 7.1.2 ローラ試験機によるピッチングの観察 (Observation of pitting on disk machine)
 - 7.2 トロコイド干渉部疲労とその他損傷 (Failure due to trochoidal interference)
 - 7.2.1 はすば歯車のかみ合い始め部の損傷 (Failure at the beginning part of tooth flank contact on strong helical gears)
 - 7.2.2 歯筋クラウニング中央部歯元の損傷、片当たり歯元の損傷 (Failure at middle of tooth width and tooth side end)
 - 7.2.3 歯先の干渉接触 (Interference of tooth tip edge)
 - 7.3 歯側端接触損傷 (Failure of tooth side edge)
 - 7.4 マイクロピッチング (Micropitting)
 - 7.5 フレーキング (Flaking, Flake pitting)
 - 7.6 スポーリング (Spalling)
 - 7.7 ケースクラッシング (Case crushing)
 - 7.8 材料の組織変化型剥離と水素攻撃 (Hydrogen attack)
 - 7.9 材料欠陥起点剥離 (Spalling due to material defects)

- 8. 折損 (Tooth breakage)
 - 8.1 過負荷折損 (Overload breakage)
 - 8.1.1 脆性破壊 (Brittle fracture)
 - 8.1.2 延性破壊 (Ductile fracture)
 - 8.1.3 半脆性破壊 (Semi-brittle fracture)
 - 8.2 せん断折損 (Tooth shear)

- 8.3 塑性流動破断 (Breakage after plastic deformation, Smear fracture)
- 8.4 疲労折損 (Fatigue breakage)
 - 8.4.1 歯元曲げ疲労 (Bending fatigue)
 - 8.4.2 表面疲労起点折損 (Breakage from surface fatigue)
 - 8.4.3 材料欠陥起点折損 (Breakage from material defects)
 - 8.4.4 歯底・リム折損 (Rim breakage, Breakage from the center of tooth bottom space)
 - 8.4.5 キャップオフ損傷 (Cap-off failure)
 - 8.4.6 チッピング起点折損 (Breakage from chipping)
 - 8.4.7 歯内部起点疲労損傷 (TIFF: Tooth interior fatigue failure)
 - 8.4.8 歯端部折損 (Tooth side end breakage)
 - 8.4.9 衝撃折損 (Shock breakage)
 - 8.4.10 熱処理不良に起因する折損 (Breakage due to heat treatment failure)
 - 8.4.11 歯の遅れ破損 (Breakage due to residual damage)
- 8.5 歯の部分欠損 (Partial breakage of tooth)

- 9. 異物のかみ込み損傷 (FOD: Foreign object damage)
 - 9.1 歯面へのかみ込み (Intrusion and crush of foreign objects)
 - 9.1.1 かみ合い開始時のかみ込み (Intrusion at beginning of tooth meshing)
 - 9.1.2 かみ合い終わり時のかみ込みと歯先チッピング (Intrusion at ending of tooth meshing)
 - 9.2 EP剤中の燐や硫黄成分の影響 (Influence of Sulphur and Phosphor)
 - 9.2.1 ギヤオイルの場合 (Influence for Gear oil)
 - 9.2.2 ATFの場合 (Influence for ATF)
 - 9.3 フレーキング、ケースクラッシュ、スポーリング的歯面剥離 (Lamellar separation of tooth flank)
 - 9.4 歯頂部と歯底の間のかみ込み (Crush of Foreign object between tooth crest and tooth bottom)
 - 9.5 微小モジュール歯車の歯の磨滅 (Wear-out of teeth of micromodule gears)

- 10. 歯車本体・軸の損傷 (Failure of gear body and shaft)
 - 10.1 リムやウェブの亀裂 (Rim and web cracks)
 - 10.2 軸の折損 (Shaft breakage)

- 11. 索引
 - 11.1 見かけによる索引
 - 11.2 用語による索引

- 12. 参考文献

平成 28 年度、29 年度 次世代鋼材測定・評価手法の開発 成果要旨

機械基盤研究施設 久保愛三

産業技術実用化開発事業費補助金

1. 目的

鉄鋼材料について多点のマイクロビッカース硬度測定とその結果の迅速な統計処理機能を有する測定機を開発し、併せて材料性能を評価する技術の方向性を示す。

2. 成果

実用されている多くの鋼材ならびに実稼動中にトラブルを起こした歯車や軸の材料について、この試験機で超多点ビッカース硬さを測り、そのバラツキ状態を調べることで、鋼材の良否をかなり確実に判定できることが実証でき、開発した測定装置が鋼材の品質評価装置として実用に耐えることが確認できた。

以下、「平成 28 年度、29 年度産業技術実用化開発事業費補助金（次世代鋼材測定・評価手法の開発）成果要旨」を掲載する。

平成 28 年度、29 年度産業技術実用化開発事業費補助金
 (次世代鋼材測定・評価手法の開発) 成果要旨

機械部品を作る鋼材を世界中から調達する世の中になったが、その品質を調べるには長い時間とかなりの費用を要するため、鋼材が規格に合格し、ミルシートと呼ばれる品質証明書がついていれば、まともな鋼材として取引されている。日本の鋼材メーカーも、中国やインド、韓国などのメーカーとの熾烈な競争の中で生き残るための努力をせざるを得ないので、規格で意図された品質の鋼材を作るのではなく、規格に違反しない鋼材をどれほど安く作れるかの方向に進んでいる。一方、鋼材品質を容易に判定できる手段は無いのが現状で、その結果、鋼材品質低下が原因の事故が増えている。そこで、日本の機械メーカーを守るため、現場で、容易に、客観性を持った評価データが得られる鋼材品質の検査装置の開発を行った。この装置は対象鋼材のビッカース硬さを極めて高速に多点自動測定するものである。例えば 1200 点の硬さを約 90 分で人的要素が入らず自動測定できる。

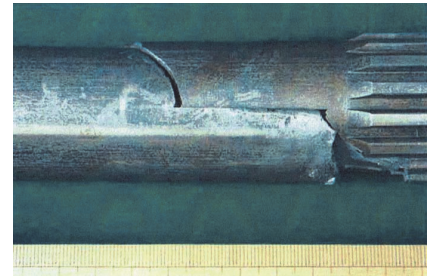


図 1 折損事故を起こした歯車軸

その有用性を確認するため、事故品の調査、購入鋼材の評価などをかなり広範囲に行った結果、効果的に運用可能であることが明らかとなった。その一例を挙げれば以下の通りである。

- 図 1 は、運用後 18 ヶ月で折損事故を起こした高周波焼入れ歯車軸で、鋼材は値段に惚れて採用した外国製である。大きなお金と 2 週間以上の時間をかけて評価会社でこの事故品の材料を調査したところ、層状の硫化マンガンとアルミ系の介在物の存在が事故原因とされた。しかし、この材料は JIS 規格に合格しており、鋼材メーカー側は、規格合格品の材料であるので「問題ないはずですよ」と言う。本プロジェクトで開発した検査装置で硬さ分布を測定したところ、本来は図 2 のようになるはずのものが、事故品では図 3 のような結果となった。その硬さのバラツキは正常とは考えがたく、材料に問題ありとの答えが、オペレータの拘束時間 4 分、自動測定時間 90 分で得られた。確認のためこの材料の元素成分分布を調べた結果、Cr、Mo、Si 等の偏析が激しく、硫化マンガンも層状に存在していた。すなわち、この鋼材の元素成分は、全体の平均値としては規格に合格しているが、材料の組織が均一でなく、場所によって違った鋼種であるほどの状態であることが分かった。

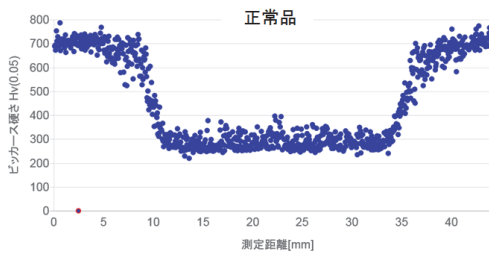


図 2 正常品の硬さ分布

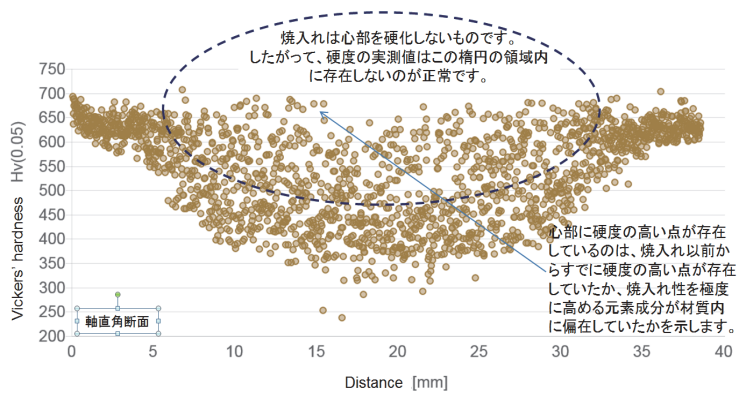


図 3 事故品の硬さ分布

- 図 4 は日本の鋼材メーカーと韓国のメーカーが供給しているドイツ DIN 規格の鋼材を調べた結果である。硬さのバラツキに大きな差のあることが認められる。機械部品に使われる鋼材では、内部に硬さの高いところが局所的に存在すると、機械装置運用中、その周辺に大きな応力が発生して近辺の硬さの低いところから亀裂が入るので、硬さのバラツキが大きいくほど材料としての信頼性は低くなる。また、これらの硬い局所が、この鋼材の加工性を悪くする。各々の鋼材の品質評価測定は、試験片作成の手間を除けば、極めて短いオペレータの拘束時間でヒューマンファクターの入らない客観的な数値出力結果が得られる。図 4 から、日本の一流メーカーの製品で規格合格品、品質証明書がついている材料であっても、実品質には大きなメーカー差のあること、日本製の約 1/2 の値段で入手可能な韓国材は、やはり値段相応にあまり品質が良くなかったこと、等が一目瞭然である。外国材などでは、採用検討時のサンプルによる品質検査は OK であ

っても、実際に納入される鋼材の品質が経時的に変化するなどの問題も経験されているが、本例のように容易に客観的な品質評価結果が出るとなると、もし妥当な値段でこの検査装置が市販されれば、機械産業の企業で鋼材の受け入れ検査用途に使える可能性が高く、日本製機械の高品質維持に必要な検査の役割を持たせることも可能となる。

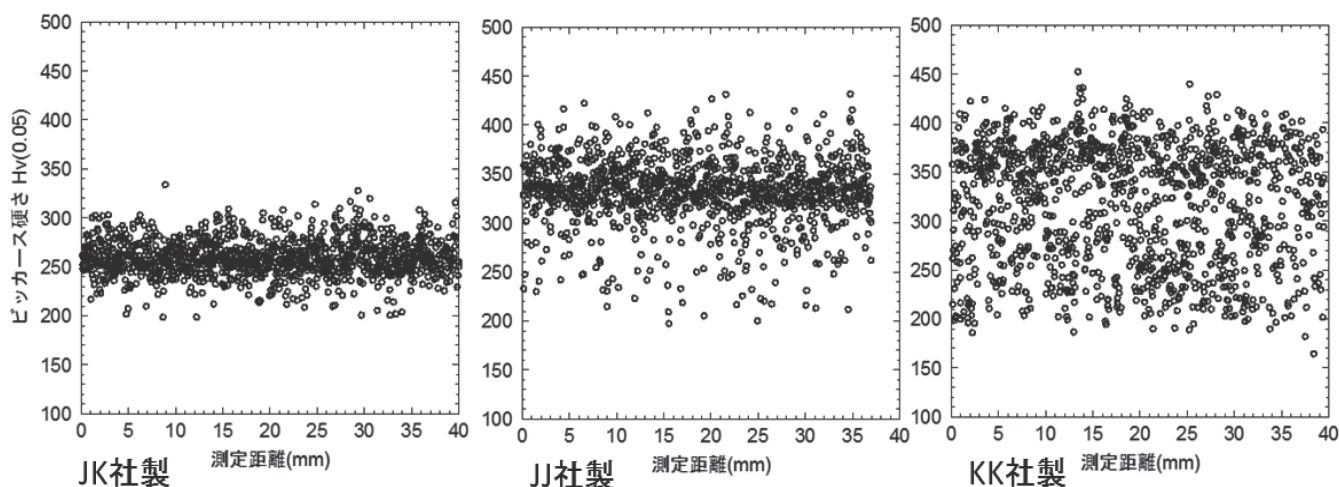


図4 日本2高炉メーカー製鋼材と韓国製鋼材の硬さのバラツキの相違

(どの鋼材も DIN 規格 18CrNiMo67 の品質証明ミルシート付きの規格合格品)

従来、鋼材の品質を詳しく見るには、試料をエッチングし、組織を調べる必要があった。エッチングをした材料の組織観察からその品質の良否を判断するには、極めて高度な専門的知識と熟練が必要であり、その判断は主観的で客観的な数値データとはなり難い。また、硝酸やピクリン酸などの有毒薬液を使わなければならないのも問題である。一方、硬さ試験は焼入れが適切に行われているか等の判断に用いられることが多いが、材料そのものの偏析や介在物クラスターを発見する目的に用いられることはなかった。圧痕をつける際に適切な負荷を選び、極めて多点で測定すれば、材料の良否もかなり分かるはずであるが、通常の硬さ試験機ではそのような測定は人間の労力的にほとんど不可能であった。今回、METIの補助金を得て、超高速で超多点のビッカース硬さ、および、その圧痕の深さを測ることが可能な鋼材品質評価用の測定装置のプロトタイプを完成させることが出来た。

実用されている多くの鋼材ならびに実稼動中にトラブルを起こした歯車や軸の材料について、この試験機で超多点ビッカース硬さを測り、そのバラツキ状態を調べることで、鋼材の良否をかなり確実に判定できることが実証でき、開発した測定装置が鋼材の品質評価装置として実用に耐えることが確認できた。

向後は、超多点ビッカース硬さのバラツキの状態と鋼材の品質の良否の関係を明らかにする判断基準を作成することが望まれる。その規格化をおこなえば、日本の機械産業従事者が悪い鋼材を掴まされることに悩むことが少なくなり、日本の機械産業の発展に寄与できるであろう。

鋼材品質・性状検査装置	競合機能装置		
	本研究開発	硬さ試験	エッチング 組織検査
鋼材性質検査精度	優	良	優
検査装置コスト	高い	普通	高い
検査オペレータの必要技量	不用	並	要専門技 量・知識
検査の手間、時間費用	少ない	並	多
安全性	良	良	有害薬品使用

図5 開発した鋼材評価装置の立ち位置

主管・鋼材調達：一般社団法人日本歯車工業会、 技術開発：公益財団法人応用科学研究所 + NIKON

特別研究員による成果

超電導インバータの実用化実証研究

特別研究員 長村光造

1. 目的

超電導インバータの基礎構成の確立

2. 成果

理想的にはオン抵抗がゼロになる超電導素子を用いたインバータの基礎研究として、それに必要な超電導素子、電気回路の検討を行った。本年度は臨界磁場が 0.45 T となる BSCCO-2223 テープ線材を超電導素子とし、NdFeB 系永久磁石を超電導/常電導切り替えスイッチとして用いた超電導インバータの基礎構成回路の設計を行い、その試作・配線を終了し、冷却に成功した。本インバータによって発生させた交流を端末に接続した超電導コイルに通電し、これにより超電導コイルに交流磁場が発生したことを確認した。

報告書作成日 平成 30 年 5 月 24 日

銀被覆ビスマス系線材の機械的特性の評価

特別研究員 長村光造

受託先名：住友電気工業株式会社

1. 目的

住友電気工業が開発した銀被覆ビスマス系線材の応用製品の製作および使用環境で想定される様々な条件における機械—超電導特性を評価する。

2. 成果

BSCCO 超電導複合線材の機械的性質を室温及び 77K で測定するとともに、77K において臨界電流の一軸歪依存性および曲げ歪依存性を調べた。臨界電流の可逆限界歪・応力は超電導線材を実際に使用するときの安全限界を示すものとして重要である。Fig.1 に BSCCO および REBCO テープ線材の臨界電流の可逆限界歪(A_{rec})・応力(R_{rec})の関係が示されている。例えば先進的 NMR では 31T の磁場発生が求められているが、その時のフープ力はある設計では 400MPa に達する。現状の BSCCO テープの R_{rec} は 400MPa 程度で、より一層の改良が求められる。

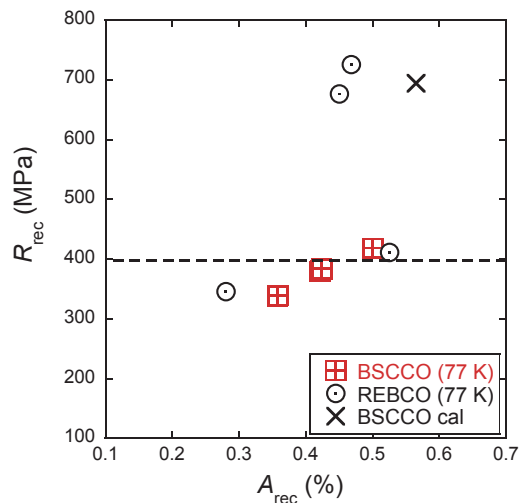


Fig. 1 Reversible stress / strain limit for critical current of BSCCO and REBCO practical wires

BSCCOテープの可逆限界歪は高温におけるラミネーション時に導入される予歪 (A_{pre})、冷却時に発生する熱歪 (A_t)、および超電導フィラメント自身の破断歪 (A_{sc}) の3つの要素の和になる。ここでラミネーションする金属テープの熱膨張係数(α_5)、ヤング率(E_5)および体積分率(V_{f5})とし、対応するBSCCOフィラメントの値を α_1 、 E_1 としたとき熱歪は近似的に次式で与えられる。

$$A_t \cong \frac{(\alpha_s - \alpha_1)E_s V_{fs}(T - T_B)}{E_c} \quad (1)$$

代表的なラミネーションに使用可能な金属テープの物性を用いて可逆限界歪の計算を行ったところ、Brass-(YY)系テープにおいてFig. 1 中に **X** で示したように特性の高い計算結果が得られた。

3. 成果の公表

- (1) 長村光造、町屋修太郎、長部吾郎、山崎浩平、加藤武志；高強度BSCCO-2223線材の開発、第95回低温工学・超電導学会講演概要集184(2017)
- (2) 山出悟、長部吾郎、山崎浩平、菊池昌志、長村光造、他7名；高強度DI-BSCCO線材の実用化開発、第95回低温工学・超電導学会講演概要集183(2017)

報告書作成日 平成 30 年 5 月 24 日

超電導技術の国際標準化

特別研究員 長村光造

受託先名 : IEC/TC90 国内技術委員会

1. 目的

実用超電導線材の機械的性質、臨界電流の引張歪依存性に関する国際標準および超電導線材の通則に関する国際標準の制定

2. 成果

超電導技術に関する IEC-TC90 専門化委員会においてワーキンググループ 2 (WG2) (臨界電流測定)、WG5 (引張試験) および WG13 (超電導線材料) のグループリーダーとして、国際標準作成のとりまとめを行ってきた。本年度は液体窒素温度における高温超電導線の引張試験の国際ラウンドロビンテストに参加した。REBCO 線および BSCCO 線の液体窒素温度での引張試験方法に関してグループリーダー Dr N. Bagrets のもと RRT (Round Robin Test) が実施された。BSCCO 線は住友電工の線材、REBCO は SuNAM、フジクラ、SuperPower、Theva、SuperOX の各社の線材を使用して、試験は KIT、応用科学研究所、Andong National University、NHMFL、SuperPower で行なわれた。

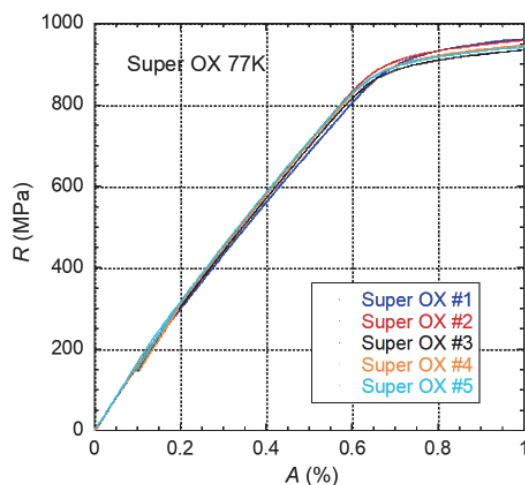


Fig. 1 Stress vs strain curve measured at 77 K for Super OX wires

本研究所で測定した例を Fig. 1 に示すが、この応力—歪曲線の初期勾配から弾性定数 E_0 および除荷曲線の勾配から E_U を決定する。また 0.2% 耐力 $R_{0.2}$ および対応する歪 $A_{0.2}$ を決定した。参加した 5 研究機関は各試料について 5 回実験を繰り返してその平均値と標準不確かさについて解析が現在行われている。

3. 成果の公表

長村光造、町屋修太郎、西島元；実用 REBCO および BSCCO 線材における臨界電流の可逆応力・歪限界、第 94 回低温工学・超電導学会講演概要集 178 (2017)

報告書作成日 平成 30 年 5 月 24 日

組織制御による超電導特性の改良に関する研究

特別研究員 長村光造

1. 目的

複合材である実用超電導線材の構造と超電導特性の相関を解明し、組織制御による超電導特性の改良を図る。

2. 成果

水素は地球環境に負荷をかけない次世代のクリーンエネルギーとして注目されている。とくにその貯蔵や輸送の際に優位な液体水素を基軸とした持続可能社会を進展させることが提案されている。2001年に我が国で発見された二ホウ化マグネシウム (MgB_2) は他のどの実用超電導材料よりも最も液体水素温度での利用が適しており、その性能向上や、工業化に必要な技術開発が求められている。しかし図1に示すように他の実用超電導線材に比較して MgB_2 線材の弾一塑性特性の改良が求められている。

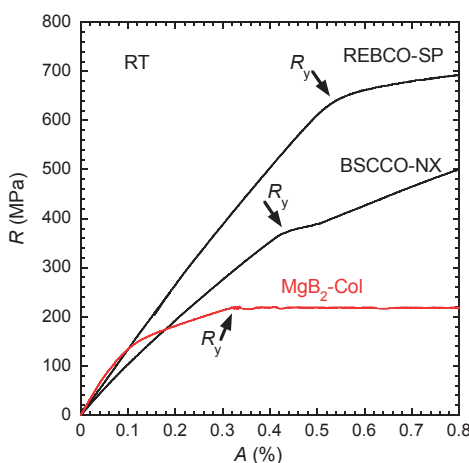


Fig. 1 Stress vs strain curve for three kinds of practical superconductive wires

複合材である MgB_2 線材中の超電導相 MgB_2 に生起する局所歪には線材作製に発生する加工歪、冷却過程で発生する熱歪、さらに低温で外部から印加された外力による圧縮・引張歪等が関与する。本年度はこの局所歪を最適化する方法について Nb_3Sn 複合線材の構造とその特性を参考にして定量的にその評価を行った。その結果、本研究の知見をもとに 20 K の低温において 400 MPa 以上の巨視的降伏応力 (R_y) および臨界電流に対する可逆限界応力 (R_{rec}) を実現するため、安定化相、強化相を付与した新しい MgB_2 複合線材の設計・製作指針を明確にすることができた。

3. 成果の公表

(1) T Hemmi, S Harjo, H Kajitani, T Suwa, T Saito, K Aizawa, K Osamura ; Evaluation

of Bending Strain in Nb₃Sn Strands of CIC Conductor Using Neutron Diffraction, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 27,1-5,(2017)

DOI:10.1109/TASC.2017.260064

(2) 谷口博康、長村光造、菊池章弘、水田泰次 ; Nb₃Sn 用高 Sn ブロンズ中の Ti 基三元化合物の挙動、第 95 回低温工学・超電導学会講演概要集 145 (2017)

報告書作成日 平成 30 年 5 月 24 日

保磁力の配向度依存性と角度依存性の相関による 磁化反転プロセスの解明

特別研究員 松浦 裕 長村光造

科学研究費助成事業 学術研究助成基金助成金 基盤研究 (C)

1. 目的

Nd-Fe-B 焼結磁石およびフェライト磁石の保磁力は磁石の配向度(B_r/J_s , B_r は残留磁束密度、 J_s は飽和磁束密度を示す。)の向上とともに減少することが知られている。この現象は保磁力の角度依存性と同様に、これら磁石の保磁力メカニズムから生じていることが推定される。

今回、Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力配向度依存性および保磁力角度依存性の温度変化について調査を行い、両者の間の相互の関係から温度変化した時の Nd-Fe-B 焼結磁石の磁化反転メカニズムについて考察を行った。

2. 成果

Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力の配向度依存性は温度の上昇とともに全ての粒子が独立して磁壁移動により磁化反転が進むとして求めた曲線に近づくことを示した。また保磁力の角度依存性の温度変化も、温度が上昇するに従い全ての粒子が独立して磁化反転すると仮定して求めた保磁力の角度依存性に近づくことを示した。

これらの事実から、配向したNd-Fe-B磁石の保磁力は磁壁が配向方向から倒れた結晶にピンニングされており、ピンニングが外れると複数の結晶を飛び越え移動することで決定される。すなわち、結晶は集合体で磁化反転が進むことを示しており、集合体の大きさは温度とともに小さくなることを示している。このことは磁壁をピンニングしている配向方向から倒れた結晶粒角度が温度上昇とともに小さくなることを示唆している。

結晶の配向分布がガウス分布していることを考えると、配向方向から倒れる角度が小さくなると結晶の数は増大する。したがって、温度上昇とともに、磁壁をピンニングしている結晶の数すなわち反転が起こる場所は増大する。

以上のことから Nd-Fe-B 焼結磁石では温度上昇とともに磁壁の飛びによる磁化反転の大きさは小さくなり、磁化反転が起こる場所が増大する。今回の研究により、従来と異なる保磁力メカニズムの描像を描くことができた。

3. 成果の公表

(1) Yutaka Matsuura, Tetsuya Nakamura, Kazushi Sumitani, Kentaro Kajiwara, Ryuji Tamura, Kozo Osamura ; Angular Dependence of Coercivity Derived from Alignment Dependence of Coercivity in Nd-Fe-B Sintered Magnets, AIP Advances 8(1), 015226 (2018)

(2) Yutaka Matsuura, Tetsuya Nakamura, Kazushi Sumitani, Kentaro Kajiwara, Ryuji Tamura, Kozo Osamura ; Angular Dependence of Coercivity in Isotropically Aligned Nd-Fe-B Sintered Magnets, AIP Advances 8(5), 056236 (2018)

(3) 松浦裕 ; Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力の配向度依存性から導かれる保磁力のメカニズム、電気

学会マグネティクス研究会、MAG-17-094、43-46 (2017)

(4) 松浦裕 ; Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力の温度依存性から得られる磁化反転挙動、
MAG-17-234、25-30 (2017)

(5) Y. Matsuura, T. Nakamura, K. Sumitani, K. Kajiwara, K. Osamura ; 62nd Annual
Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2017) Angular Dependence of
Coercivity in Isotropically Aligned Nd-Fe-B Sintered Magnets, Pittsburgh, USA, (2017)

(6) Y. Matsuura, T. Nakamura, K. Sumitani, K. Kajiwara, K. Osamura ; Angular Dependence
of Coercivity Derived from Alignment Dependence of Coercivity in Sintered Nd-Fe-B Magnets,
第 41 回日本磁気学会学術講演会、九州大学 (2017)

(7) 松浦裕 ; SrO·6Fe₂O₃ フェライト磁石の磁化反転メカニズムについて、日本金属学会春季第
162 回講演大会、千葉工業大学 (2018)

報告書作成日 平成 30 年 6 月 11 日

保磁力の配向度依存性と保磁力角度依存性から得られる磁化反転挙動

特別研究員 松浦 裕

受託先名：国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)

共同研究先：公益財団法人高輝度光科学研究センター(SPring8/JASRI)

学校法人東京理科大学

1. 目的

これまで Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力のメカニズムについては保磁力近傍の外部磁界で逆磁区の芽が発生すると結晶粒全体の磁化が反転するという磁化の一斉回転モデルと熱揺らぎ磁気余効による逆磁区芽が発生し、発生した磁化反転領域が磁壁の形で結晶粒内に侵入することで磁化反転が進むとする磁壁移動モデルが提唱されており、これら理論の検証をするため配向した磁石の保磁力の角度依存性が用いられてきた。しかし、配向磁石の保磁力角度依存性から、どちらの理論が正しいかについては結論が得られていない。我々は保磁力の配向度依存性を調査し、保磁力が配向度の向上とともに減少することを見出すとともに、その考察によって、保磁力の決定要因が磁化の一斉回転によらないことを見出した。その結果について、原著論文等として成果報告を行った。今回、保磁力メカニズムを明らかにすることを目的として、保磁力の配向度依存性と保磁力角度依存性の間にどのような関係があるかを調べた。

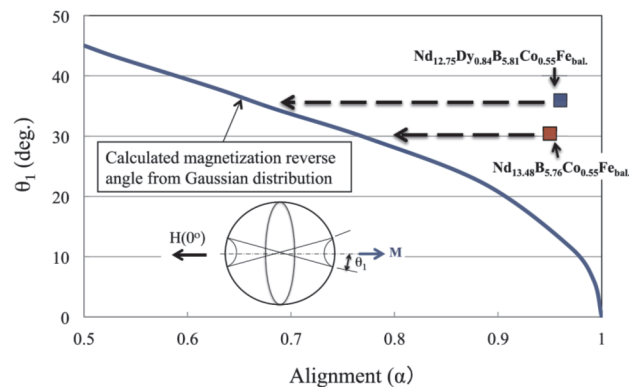


図1 保磁力点での磁化反転領域(θ_1) 成果論文(1)より引用

2. 成果

図1に示すように保磁力の配向度依存性から保磁力点での磁化反転領域角度(θ_1)を求めたところ、図の実線の全ての結晶粒子が磁壁移動で磁化反転すると仮定して求めた θ_1 の値より大きくなっていることが分かった。このことは配向度の高い異方性磁石では、磁壁は配向方向から倒れた結晶粒にピン留めされており、ピン留めが外れる時に、磁壁の飛びにより複数の粒子が同時に反転することで保磁力が決定することを示唆している。この振る舞いから、配向した磁石の磁化反転は配向度の低い磁石のように振る舞っていると推定される。この推定を確認するために保磁力の配向度依存性から得られた θ_1 から、配向分布関数 ($P(\theta)$) を求め、保磁力の角度依存性を計算

し、配向磁石の保磁力依存性と比較した。

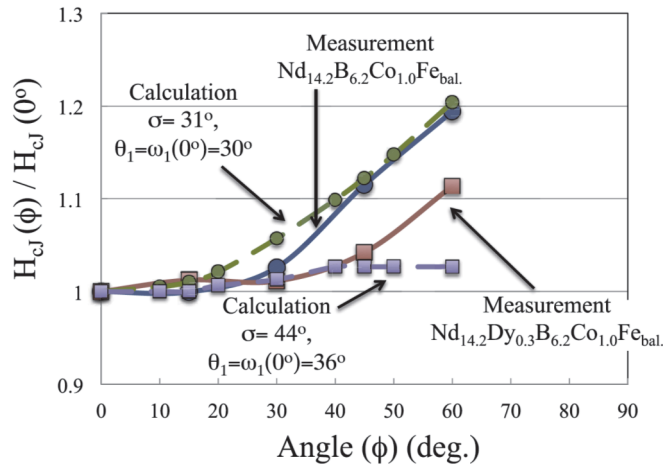


図2 保磁力の角度依存性 成果論文(1)より引用

図2の破線は配向度依存性から得られた配向分布関数の標準偏差 (σ)、および、 $\theta_1 = \omega(0^\circ)$ から求めた保磁力の角度依存性を示している。一方、実線は実験から得られた保磁力の角度依存性を示している。図から分かるように、 $\text{Nd}_{14.2}\text{B}_{6.2}\text{Co}_{1.0}\text{Fe}_{\text{bal.}}$ では 60° まで、 $\text{Nd}_{14.2}\text{Dy}_{0.3}\text{B}_{6.2}\text{Co}_{1.0}\text{Fe}_{\text{bal.}}$ では 50° まで良い一致がみられた。これらの結果はNd-Fe-B焼結磁石では低い磁場で発生した磁壁は配向方向から傾いた結晶にピン留めされており、磁壁がピンングサイトから外れる時に、複数の結晶粒を飛び越えて移動するという我々のモデルを支持している。一方、等方性磁石の保磁力角度依存性についても考察を行った結果、磁化反転挙動が配向性磁石とは異なり、個々の粒子が独立に磁化反転すると予測した。そこで、SPring-8において測定を行った等方性磁石の磁区観察結果(図3)と比較したところ、磁化反転が粒子単位で進行する様子が確認され、我々が予測したモデルを支持する結果を得た。

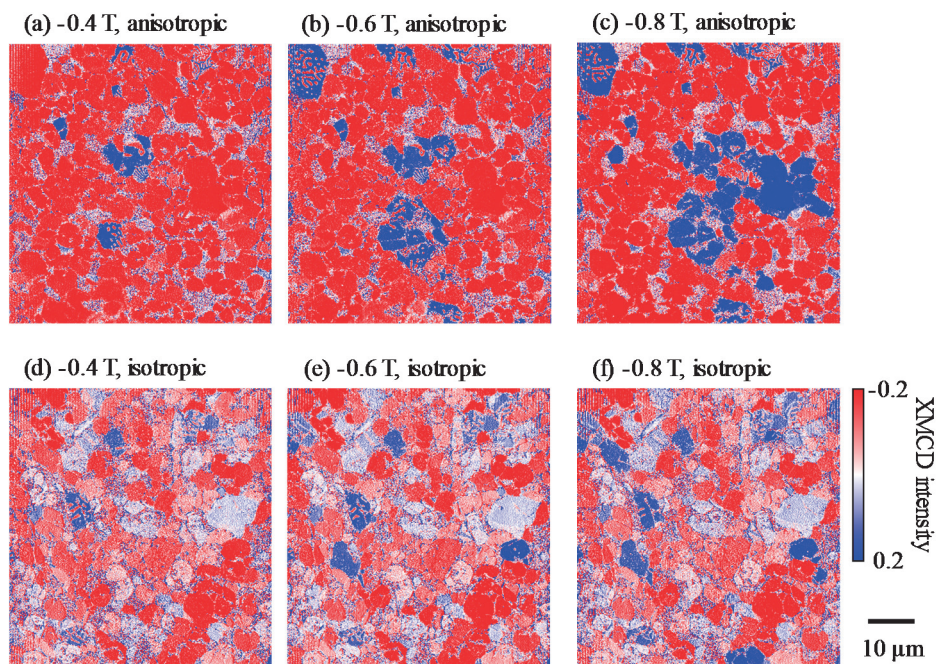


図3 (a)、(b)、(c)異方性(anisotropic)磁石および(d)、(e)、(f)等方性磁石(isotropic)の減磁過程における磁区変化。配向性磁石では、反転核となった粒子から逆磁区が伝播していくのに対して、等方性磁石では、個々の粒子ごとに反転していく。

3. 成果の公表

- (1) Yutaka Matsuura, Tetsuya Nakamura, Kazushi Sumitani, Kentaro Kajiwara, Ryuji Tamura, Kozo Osamura ; Angular Dependence of Coercivity Derived from Alignment Dependence of Coercivity in Nd-Fe-B Sintered Magnets, AIP Advances 8(1), 015226 (2018)
- (2) Yutaka Matsuura, Tetsuya Nakamura, Kazushi Sumitani, Kentaro Kajiwara, Ryuji Tamura, Kozo Osamura ; Angular Dependence of Coercivity in Isotropically Aligned Nd-Fe-B Sintered Magnets, AIP Advances 8(5), 056236 (2018)
- (3) 松浦裕 ; Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力の配向度依存性から導かれる保磁力のメカニズム、電気学会マグネティクス研究会、MAG-17-094、43-46 (2017)
- (4) 松浦裕 ; Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力の温度依存性から得られる磁化反転挙動、MAG-17-234、25-30 (2017)
- (5) Y. Matsuura, T. Nakamura, K. Sumitani, K. Kajiwara, K. Osamura ; 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2017) Angular Dependence of Coercivity in Isotropically Aligned Nd-Fe-B Sintered Magnets, Pittsburgh, USA, (2017)
- (6) Y. Matsuura, T. Nakamura, K. Sumitani, K. Kajiwara, K. Osamura ; Angular Dependence of Coercivity Derived from Alignment Dependence of Coercivity in Sintered Nd-Fe-B Magnets, 第 41 回日本磁気学会学術講演会、九州大学 (2017)
- (7) 松浦裕 ; SrO·6Fe₂O₃ フェライト磁石の磁化反転メカニズムについて、日本金属学会春季第 162 回講演大会、千葉工業大学 (2018)

報告書作成日 平成 30 年 5 月 29 日

共同研究員による成果

安全情報を伝えるメディアの研究（その5）

共同研究員 尾池和夫
京都造形芸術大学学長

受託先名：東電設計株式会社

1. 目的

一般に、どれだけ危険なものであるか、あるいはどれだけ危険なことであるか、という視点で認識されている概念がある場合、それらは言い換えれば、どれだけ安全なものであるか、あるいはどれだけ安全なことであるか、というように表現できる場合が多い。そのような視点で、いくつかの具体例を取り上げて分析し、その「もの」や「こと」の内容を科学的に正しく一般の市民に認識してもらえるような伝達メディアの最適化を図ることを研究の目的とする。

このような目的のために「安全学研究会」を組織して、その研究会を適宜開催しながら研究を進めることとした。

たとえば、日本列島のような変動帯の島には、基本的な自然現象は、地震、噴火、津波などの災害をとまなう現象が多く、人びとは、それらを驚異としながら、一方でそのような現象がもたらす恩恵を享受して暮らして来た。災害を軽減するためには、自然現象を正しく理解して、正しく怖がり、正しく付き合うということが重要である。そのためには、何よりも基礎知識と現象の観測情報を正しく伝える手法が重要で、多くの機関がそのための工夫をしている。それらは多くの場合、行政の人びとや自然現象の研究者たちの工夫によるものであり、必ずしも市民に直接受け入れられる形になっていない場合も多く見受けられる。

このような場合に、情報伝達のプロセスに、もう一つのステップを、紙芝居や漫画、あるいは、映像などのメディアで持ち込むことによって、市民の正しい理解を促進する役割をもたせるというのが、この研究の大きな特色であり、そのような試みを実践しつつ、試行錯誤を重ね、市民の理解を確認しながら、伝達手段の開発を行ない、効果的な情報伝達手段を実際に作り出すことによって、最適な伝達メディアのモデルを、それぞれの現象の具体例に応じて完成させることとする。

2. 成果

上記のような視点で、2013年度から一連の研究を進めてきた。今までの研究の概要は以下の通りである。

1. 2013年度では、情報を生産する立場の研究者、情報を伝えるメディアの研究者、情報を伝えるメディアの実践者たちで研究会を組織し、さまざまな観点から議論を続けた。

2. 2014年度においては、南海トラフの巨大地震に関する予測の諸研究成果の分析を関係の研究者の議論によって行った。その成果を取り入れて、南海トラフの次の巨大地震発生までの地球史の整理を行い、将来の研究のための下地とすることとした。研究会での議論の結果、もっとも重要な結論は、1人ひとりが命を守るための行動をとることが、災害を軽減するために必要な考え

であるが、そのためには、地球の仕組み、地震や津波の仕組みを理解して、南海トラフの大地震が近い将来、かならず起こるということを認識することが大切である。

そのために、少し回りくどいと感じても、宇宙と地球の生い立ちから説明することが必要であるという認識ができた。

3. 2015年度では、以上のような議論の結果から、1つは市民向けに解説書を出版し、もう一つは、宇宙の誕生から地球の誕生までの歴史を漫画と解説で出版することとした。

4. 2016年度においては、このようなストーリーをもとにして漫画家と科学者の連携による漫画『あっ！地球が・・・漫画による宇宙の始まりから近未来の破局噴火まで』というタイトルで出版を実行した。

5. 2017年度においては、次のような研究活動を行った。

(1) 国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)のデータの利用に関して将来の分析の方針を各分野の専門家で議論し、尾池がその座長を務めて議論の結果をJAMSTECに提言した。

(2) 上記の結果を広報する手段として、岩波書店の「科学」に論説を掲載する準備の座談会を行い、現在原稿をまとめつつある。

(3) JAMSTECでは、南海トラフの巨大地震に関連する海底観測を実施しており、その観測網から得られる膨大なデータを、BIG DATAとして処理し分析している。その分析結果を市民といかなる形で共有するかという課題を以前から研究している。その研究会の座長を、本研究のための組織「安全学研究会」の代表である尾池和夫がつとめ、両者の連携によって、市民に伝えるべき研究成果を見極めながら、それを表現するアニメーションなどの作品を具体的な形で試作して提示し、改善するという方向が模索されている。

(4) 現在から南海トラフの巨大地震発生後の社会までを含めて、アニメーションを制作するためのシナリオを作成した。またそのシナリオをもとに、アニメーションの前段階としてのストーリー漫画を制作するよう研究会を重ねながら準備した。

(5) 将来の日本のために地震火山庁の設置と地震火山予報士の制度化が必要であるという本研究会の議論の結果を応用して、関西サイエンスフォーラムでのシンポジウムに参加し、そこから提言をまとめて発表し内閣府などに提出した。

(6) 日本列島の地下構造をダイナミックに市民が理解するためにはプレート運動とともに地震発生 of 仕組みを可視化する必要がある。そのため、気象庁の最近の地震分布からヴァーチャルリアリティーの手法による立体視の手法による可視化を準備しつつある。

3. 成果の公表

(1) 尾池和夫；京都の地球科学(276)熊本での講演会(二)氷室(2017)

(2) 尾池和夫；科学と技術と芸術と、電気評論(2017)

(3) 尾池和夫；地震火山庁の設置と地震火山予報士の制度化の必要性、関西サイエンスフォーラムシンポジウム(2017)

(4) 尾池和夫；熊本地震の仕組みと背景(2017)

(5) 尾池和夫；京都の地球科学(286)下仁田ジオパーク(一) 氷室(2018)

(6) 尾池和夫；下北半島の寒立馬、モンキー(2018)

報告書作成日 平成30年3月20日

メガソーラー用インバータにおける 制御アルゴリズム開発

共同研究員 太田快人¹ 平田研二²

¹京都大学大学院情報学研究科教授

²長岡技術科学大学准教授

受託先名：株式会社ダイヘン 分散電源システム事業部

1. 目的

太陽光発電による電力を系統連系するインバータの制御アルゴリズムを新たに開発する。特に、複数のインバータが協調して無効電力補償を行うことによって配電系統の電圧変動を抑えることを目的とする。

2. 成果

配電系統ならびにメガソーラーにおいて電力逆潮が発生したとしても電圧変動を許容範囲内に抑える制御方法を研究している。具体的には、複数のインバータが協調して無効電力ならびに有効電力を調整するための価格提示による分散アルゴリズムを考案し、電圧変動の抑制、出力抑制指令への対応、蓄電装置の効果的な利用が可能となる制御を実現している。これらの有効性をシミュレーションならびに模擬電源装置による実験によって確認した。本件に関しては、IEEE、計測自動制御学会、システム制御情報学会論文誌などの論文誌、国際学会ならびに国内学会での口頭発表を行っている。

3. 成果の公表

- (1) 笠輪寛明、阿久津慧、平田研二；価格提示を利用した蓄電拠点の分散制御におけるワインドアップに関する考察、計測自動制御学会論文集、Vol.54、No.2、167-174(2018)
- (2) 阿久津慧、平田研二、大堀彰大、服部 将之、太田 快人；出力抑制指令への対応を可能とする蓄電池併設型太陽光発電システムにおけるインバータ群の分散制御、システム制御情報学会論文誌、Vol.30、No.11、439-448(2017)
- (3) Kenji Hirata , Hikaru Akutsu , Akihiro Ohori , Nobuyuki Hattori , Yoshito Ohta ; Decentralized Voltage Regulation for PV Generation Plants using Real-time Pricing Strategy , IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.64, No.6, 5222-5232(2017)
- (4) Hikaru Akutsu, Kenji Hirata, Akihiro Ohori, Nobuyuki Hattori , Yoshito Ohta ; Decentralized Control Approach to Power Curtailment Instruction Problem for PV Generation Plants with Storage, The 2017 Asian Control Conference, 2825-2830, Gold Coast, Australia (2017)
- (5) Hikaru Akutsu, Kenji Hirata, Akihiro Ohori, Nobuyuki Hattori , Yoshito Ohta ; Decentralized Active and Reactive Power Control for PV Generation Plants using Real-time

Pricing Strategy, 2017 American Control Conference, 2761-2766, Seattle(2017)

- (6) 笠輪 寛明、平田 研二；価格提示を利用した蓄電拠点の分散制御におけるワインドアップ現象と Price Governor によるアプローチ、第 5 回制御部門マルチシンポジウム、Su53-3 (2018)
- (7) 阿久津慧、平田研二、藤澤雄大；価格提示方策を利用した電力機器群の分散型需要電力制御に関する考察、第 5 回制御部門マルチシンポジウム、Su53-1(2018)
- (8) 阿久津慧、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；出力抑制指令への対応を可能とする蓄電池・太陽光発電 PCS 群における分散制御の実機検証、第 60 回自動制御連合講演会、SaB3-4(2017)
- (9) 阿久津慧、西澤幸蔵、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；出力抑制指令への対応を可能とする蓄電池・太陽光インバータ群の分散制御実験、第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会、226-5(2017)

報告書作成日 平成 30 年 5 月 31 日

大規模分散電源による電力システムの安定化

共同研究員 舟木 剛
大阪大学大学院工学研究科教授

受託先名：株式会社ダイヘン 分散電源システム事業部

1. 目的

太陽光発電が大量に導入された場合に、その出力変動により電力システムに与える影響を評価する。太陽光発電の出力は直流であるが、電力システムは交流であり、交直混在システムとなる。本研究では、交直混在システムにおける動特性のモデル化について検討する。

2. 成果

過渡安定性を対象として変換器を介した有効電力の授受に着目してモデリングを行う。このため自励式変換器の動作は理想的なものと仮定し、Fig.1 に示す 6 つの理想的なスイッチで構成され、変換器での損失は無視できるものとして扱う。さらに簡単のため自励式変換器の駆動は 1 パルス駆動とする。自励式変換器の数式モデルをスイッチング関数を用いて記述すると、次式で与えられる。

$$SW_1(t) = \frac{\omega_B \alpha}{2\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\omega_B \alpha}{2\pi} \sin n(\omega_B t - \theta)$$

ただし、 ω_B スwitching 周波数で系統周波数と一致する。 α はスイッチのオン時間、 θ は位相を表す。他のスイッチ Si に対しても同様のスイッチング関数 $SW_i(t)$ で表される。

変換器を介した有効電力の授受をモデル化するために、スイッチング関数の基本波成分 $n=1$ に着目すると、自励式変換器の交流側の三相電圧 e_a, e_b 及び e_c を $dq0$ 変換した $dq0$ 相電圧 e_d, e_q 及び e_0 と直流電圧 V_{dc} の関係は、スイッチング関数を用いて求めると次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{dc} \sin \frac{n\omega_B \alpha}{2\pi} \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ 0 \end{bmatrix}$$

自励式変換器の制御入力にはスイッチのオン時間 α と初期位相 θ により決まる。過渡安定性ならびに有効電力の授受に着目し、この 2 つのパラメータを Fig.2 に示すシンプルな制御系で決定する。この制御系は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} V_{dcref} - V_{dc} \\ P_{ref} - P \end{bmatrix}$$

ただし、 V_{dcref} はゲイン行列、は直流電圧、電力の指令値である。

また同期発電機は次式の同様方程式で表される。

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega, \quad \frac{2HP_R}{\omega_B^2} \frac{d\Delta\omega}{dt} = -D\Delta\omega + P_m - P$$

ただし、 δ は同期発電機の位相、 $\Delta\omega$ は基準角周波数からの偏差、 H は慣性定数、 P_R は定格容量、 P_m は器械入力、 P は電気出力、 D は減衰定数である。

以上をもとに、直流回路の応答を付加することで、下式のように規格化した交直混在システムの数式モデルとして非線形微分方程式が得られた。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \\ 2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = -D\Delta\omega + P_m - \frac{\sqrt{6}VV_{dc}}{k_v X} (u_q \sin \delta - u_d \cos \delta) \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} \\ C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{\sqrt{6}V}{k_v X} (u_q \sin \delta - u_d \cos \delta) - i_{dc} \\ L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} = v_{dc} - R_{dc}i_{dc} \end{array} \right.$$

ただし、 X は連系インピーダンス、 L_{dc} 、 C_{dc} 、 R_{dc} は直流回路のインダクタンス、キャパシタンス、抵抗である。

本年度は1機の同期発電機と自励式変換器が混在した交直混在システムの数式モデルを導出した。数式モデルを用いた動特性のシミュレーションについては次年度以降に検討する。

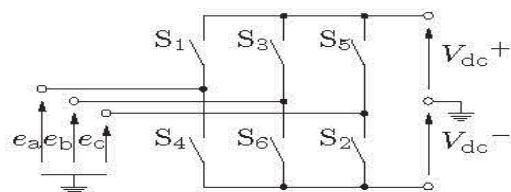


図1 自励式変換器の回路モデル

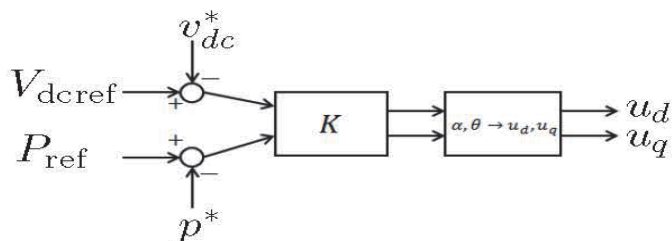


図2 変換器の制御系モデル

3. 成果の公表

大橋悠介、薄良彦、石亀篤司、舟木剛；自励式変換器を用いた交直混在システムの動特性モデリングに関する一検討、平成29年電気学会電力・エネルギー部門大会46(2017)

報告書作成日 平成30年5月1日

洋上風力の実施可能性に関する調査研究

共同研究員 安田 陽
京都大学大学院経済学研究科特任教授

受託先名：関西電力株式会社

1. 目的

本研究は、洋上風力発電の実施可能性に関する調査研究として、主に洋上風力発電の導入が爆発的に進む欧州の先事例を中心に、海外の洋上風力発電の動向を調査し、および我が国における実現可能性を探ることを目的としている。

本研究で実施した調査（国内外での比較分析）は以下の通りである。

- (1)国内外での比較・分析
- (2)風力発電大量導入時の課題および施策の検討・分析
- (3)国内での洋上風力発電の実施可能性の検討・評価

2. 成果

<目的・背景>

世界の洋上風力発電の累積設備容量は2017年末で18.8GWに達しており、そのうち英国およびドイツだけでそれぞれ6.8GW、5.3GWを占め、この2国で全世界の洋上風車の設備容量の64%を占めるなど、そのほとんどが欧州に集中している。一方、我が国の洋上風力発電は2016年末の累積設備容量で65MWと全世界の0.3%を占めるに過ぎず、海に囲まれた島国という似たような環境にありながら、その差は大きく開いている。そのため、国内外での洋上風力発電の導入促進に向けた施策・取組みの差異・特徴について比較・分析を行った。

<調査結果および考察>

調査研究は、主に欧州の政府機関・産業界から発行されている洋上風力発電関係の報告書等の資料を広範囲に調査した。

まず、洋上風力発電の世界全体の動向として、英国、ドイツ、デンマーク、オランダ、ベルギーでの洋上風力発電の導入動向とそれを可能にする政策の紹介を行った。欧州で大型の洋上風力発電の建設が進み、発電コストも劇的に低減している背景には、政府が立地選定に対して主導的な役割を担い、事業者の事業リスクを低減しながらも地域の合意形成を図るという「ゾーニング」手法が進んでいるからだと推測できる。

また、大量の洋上風力発電の導入を可能とするには電力システムの整備が必要であり、単に洋上風車への電源線だけでなく、大陸大の広域システムまで視野に入れた風力連系研究について文献調査を行なった。特に欧州では、送電インフラへの投資が活況であり、「電力システムに受け入れ能力がないから再生可能エネルギーの接続を制限する」という発想ではなく、「(外部コストが小さく便益の大きい)再生可能エネルギーの導入を促進するために、電力システムを増強する」という方針に立って2030年までに200件以上の新設・増設プロジェクトが計画されている。また、電力システムの運用や電力情報の通信も国際協調が進み、それぞれ独自の主権を持つ国家間でも電力(電力量)や

予備力の融通が比較的簡単に迅速に行える仕組みづくりが整備されつつあることが確認された。

現在の大規模風力発電所では、発電所から電源線への接続端で発電所全体を一括制御する「パークコントロール」の機能を持つのが一般的である。パークコントロールにより、(a) 系統電圧、力率または無効電力制御、(b) 系統周波数および有効電力制御と予備力供給、(c) 制御システムによって模擬された慣性応答、といった風力発電所レベルでの系統支援能力、すなわち系統へのアンシラリーサービスを供給する機能も有し、系統に対して最も便益をもたらすよう複数の風車の全体協調制御が搭載されている。系統側から見ると、風車群は系統の従来型発電所と同様の容量と制御能力を備えた風力発電所のユニットとして認識され、大規模集中型の発電所に比肩する無効電力供給能力をもっていることが明らかとなった。

このように、風力発電はもはや「電力系統に迷惑をかけるもの」ではなく「電力系統に貢献するもの」という認識ができつつあり、風力発電、とりわけ洋上風力発電が電力系統に与える価値を定量化する議論も進んでいる。

このように、洋上風力発電の大量導入にあたっての技術的課題はほとんど解決され、「この技術がないと導入が進まない」という技術的障壁はほとんど解消されているが、一方、商業的な事業としては、事故や故障などのリスク要因は依然として残るため、リスクマネジメント的考え方で事故リスクを低減させていく努力が行われている。例えば、洋上風力発電所の事故リスク計算や事故リスクも考慮した発電所設計（特にケーブル構成）はすでに 2000 年代初頭より論文が散見し、現在では専門のソフトウェアの開発も進んでいる。

<結論>

欧州の洋上風力発電の発展状況を広範囲に文献調査し、分析した結果、以下のような結論を導くことができる。

1. 洋上風力発電は技術的問題がほとんど解決された成熟した産業であると言えることができる。もちろん、さらなるコスト低減や信頼性向上のために「改善」すべき技術課題はあるが、それが解決されない限り導入が不可能なほど深刻な課題はもはや存在しないと言ってよい。
2. 洋上風力発電を日本に導入するにあたって、もし「技術的課題」が存在するとしたら、
 - ① 技術的課題と考えられていたものが実は政策的・市場的障壁によって発生しているに過ぎないのか、
 - ② その課題が諸外国では存在しない日本固有の技術的課題であるか、を峻別する必要がある。現在日本で問題になっている系統連系問題は①であり、日本特有の②としては日本海の冬季雷が挙げられる。
3. 事故・故障等の事業リスクに関しては、欧州で知見やノウハウの蓄積が進んでおり、後発の日本でもリスクマネジメント的考え方でリスク低減を合理的に図る必要がある。

報告書作成日 平成 30 年 5 月 9 日

海外の送電事業者の事業拡張モデルと 国内への適用に関する調査研究

共同研究員 安田 陽
京都大学大学院経済学研究科特任教授

受託先名：関西電力株式会社

1. 目的

日本の送配電事業は 2020 年の法的分離以降、需要家の電気料金収入から得られた全社の原資を各部門で分け合うという現在の形ではなく、原則、託送収入内で認められた原価内の費用において業務を行うことになる。送配電部門として、将来にわたって健全な財務体質を構築するためには、自律的な事業モデルによる経営を持続していく必要がある。そのためには、総括原価方式による託送料金制度の規制下において、事業を拡張し、収益を向上させる方策を確立させなければならない。

欧州（EU）では 1996 年の第一次自由化指令および 2009 年の第三次自由化指令を受け、日本より先行して発送配電分離が行なわれている。また、電気事業制度も大幅に変更しており、ほとんどの国は総括原価方式からインセンティブ規制と呼ばれる新しい形の規制に移行している。ドイツやフランスなどが導入しているインセンティブ規制は収入キャップ方式と呼ばれ、ドイツの場合、連邦ネットワーク規制庁（BnetzA）が規定した上限値以内であれば、自由に収入を上げることができる。この制度においては、新規投資や業務効率化に取り組むと利益が増加するので、強いインセンティブを持つことができる。そのため、欧州の送配電事業者は新しい電気事業制度のもとで、事業モデルを構築している。

そこで、本調査研究では海外の送配電事業者の収益拡張方策を調査し、日本への適用可能性や導入時の影響を示すことで、事業モデル検討に資する情報を取り纏めることを目的とする。

2. 調査の概要と成果

<調査概要>

本調査研究では、再エネ導入促進政策下にあり、発送配電が分離されている中で、電力設備の整備及び強化における投資スキームや費用回収方法等が確立しているドイツを対象国とした。調査は 2017 年 10 月に 50Hertz（送電事業者）、Elia grid international（送電事業者のコンサル部門会社）、Bundesnetzagentur（BnetzA、ドイツネットワーク規制庁）、Next Kraftwerke（アグリゲータ、需給調整責任会社）、e.dis（配電事業者）などを訪問し、聞き取り調査ならびに提供頂いた資料の文献調査を行なった。

<調査結果と得られた知見>

50Hertz 社への調査の結果、事業モデル策定にあたって、下記の 4 点を重要視していることが明らかになった。

- ・自社の利益を最大化させるのではなく、社会全体の関心と受益を最大化する。

- ・顧客への高い透明性と公平性
- ・従業員の安全性
- ・株主への持続的な還元

特に重要なのは 1 つ目であり、「いかに社会全体の関心と受益を作り出し、自社の利益に還元するか」という考え方である。その為には、社会の時流を適切に捉え、新たなフィールドを開拓する必要がある。そして、他の利害関係者を含め、皆の利益となるモデルを構築しなければならない。

また、レベニューキャップ制度について 50Hertz 社、BnetzA、e.dis 社への調査を実施した。レベニューキャップ制度の枠組みの中では、業務効率化によるコスト削減と再エネ導入に伴う設備増強が重要であると考えている。一定の評価基準において最も効率化している TSO が目標基準値となり、他の TSO は最も効率化している TSO に応じた効率化が求められるベンチマーキングの考え方にに基づき、効率化対象コストは評価される。しかしながら、ベンチマーキングよってどの TSO がどれだけ効率化を評価されるかはブラックボックスであり予見は難しい。一方で、BnetzA に必要だと認められた新規設備投資（主に再エネ導入対策）については効率化対象外コストに整理されることから、TSO の収益向上に繋がる。その為、既存設備をそのままリプレースするよりも、必要な送電線計画を積極的に打ち出し、その中で新規設備として対応することにインセンティブが働いている。この取り組みで向上した事業収益の一部をメンテナンス費用にも補填している。よって、日本のように費用削減のために投資を削減するという考え方はないことが大きな特徴である。

これは規制局である BnetzA への聞き取り調査の結果においても同様の考え方であった。配電事業者である e.dis 社への聞き取り調査の結果においても、積極的な設備投資を事業モデルとしていた。特に e.dis 社は再エネ導入量が高く、年間の 2/3 は逆潮流となり、他エリアへ輸出している。そのため、再エネ導入に伴う設備投資が実施しやすい環境にあることから、配電事業者の中で最も高いネットワークコストとなっている。

<結論>

本研究ではドイツの送配電事業者を対象にレベニューキャップ制度などの枠組みの中における事業戦略について調査した。

その結果、特に重要なのは「いかに社会全体の関心と受益を作り出し、自社の利益に還元するか」という考え方であり、その為には、社会の時流を適切に捉え、新たなフィールドを開拓する必要がある。そして、他の利害関係者を含め、皆の利益となるモデルを構築しなければならないことが明らかになった。またそのために、再エネ導入に伴う工事への積極的投資による託送料収入が電気事業における大きな収益となっている。レベニューキャップ制度において BnetzA に必要だと認められた新規設備投資については効率化対象外コストに整理されることから、送電事業者の収益向上に繋がる。それにより、費用便益分析を活用し社会全体の受益を評価するとともに、既存設備のリプレースとも適切に協調し、必要な送電線計画を積極的に打ち出すことにインセンティブが働いていることがわかった。

報告書作成日 平成 30 年 5 月 25 日

大量 PV の仮想同期発電機モデル制御による 系統安定化への影響評価

共同研究員 横山明彦
東京大学新領域創成科学研究科教授

受託先名：関西電力株式会社

1. 目的

本研究では、太陽光発電（Photovoltaic Generation：PV）が大量導入された電力系統において系統全体が保有する慣性力が低下されることの対策として、PV に同期発電機の動特性を持たせる、仮想同期発電機（Virtual Synchronous Generator：VSG）モデル制御を用い、系統安定化を図る。主に大規模系統における VSG モデル制御を対象とし、その制御手法による系統安定化への影響評価、および制御実現の際必要となる電力貯蔵装置の性能（定格容量、定格出力）やコストの評価を行う。

2. 成果

本研究では、大規模系統である電気学会西 10 機系統モデルに大量に系統に連系されつつある太陽光発電のインバータに対して VSG モデル制御を適応した場合の PV の地域偏在に対する系統安定化効果について検証した。PV が全負荷ノードに接続されている場合（Case1）、PV が系統の左半分のみ接続されている場合（Case2）、2 か所のみ接続されている場合（Case3）、PV が系統の右半分のみ接続されている場合（Case4）の 4 つのケースを検討した。比較対象として PV が導入されていない場合を Case0 としている。シミュレーションの結果から、大規模擾乱に対して、事故地点に PV が大量に導入されているほど、ダンピング向上効果が大きくなる一方で、事故地点の PV 導入量が大きすぎると、ダンピング向上のための出力抑制が電圧低下の原因となる恐れがあることが確認できた。

また、電力貯蔵装置を用いる場合と PV の出力抑制を行う場合の VSG モデル制御を実現するための条件を明らかにした。電力貯蔵装置に6600[円/(kW・year)]の電気二重層キャパシタを用いるとした場合、1,736~2,356[円/(kW・year)]ほどの費用となる一方、稼働時間中、常に出力を抑える場合の機会損失は 964~7,884[円/(kW・year)]、定格近くのみ出力を抑える場合の機会損失は、150~1,800[円/(kW・year)]となることが確認できた。これらの結果から、PV の出力抑制によって VSG モデル制御を実現する場合には、定格近くのみ出力を抑えるといった制約を設けないと機会損失が電力貯蔵装置の費用を上回る場合があることが分かった。

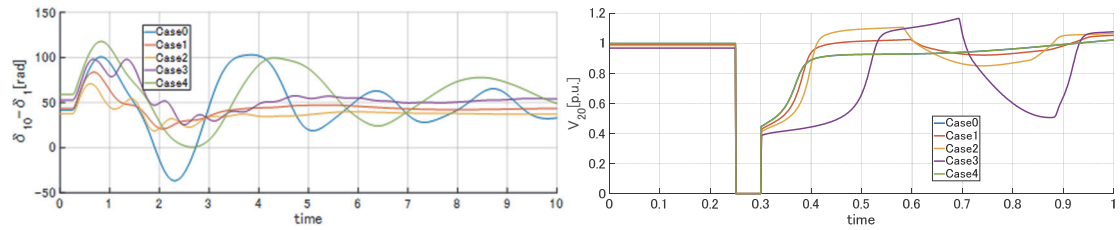


図 発電機内部位相角差（左）と事故地点の電圧の大きさ（右）

3. 成果の公表

- (1) 野上駿、横山明彦、大部孝、清水浩一郎；誘導機負荷を考慮した太陽光発電の仮想同期発電機モデル制御による電圧安定性向上効果、平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会、217 (2017)
- (2) 野上駿、横山明彦、大部孝、芳野祐樹；PV の分布の違いによる PV の VSG モデル制御の系統安定化効果に関する検討、平成 30 年電気学会全国大会 (2018)
- (3) S. Nogami, A. Yokoyama, H. Amano, T. Daibu and K. Shimizu ; Virtual Synchronous Generator Model based Control of PV for Power System Stability Improvement in a Large-Scale Power System with a Massive Integration of PVs, The International Conference on Electrical Engineering, 201701310000007 (2017)

報告書作成日 平成 30 年 5 月 4 日

平成30年7月印刷・発行

発行：公益財団法人応用科学研究所

〒606-8202 京都市左京区田中大堰町49

TEL 075-701-3164 FAX 075-701-1217

印刷・製本：株式会社北斗プリント社

(無断複写複製厳禁)



Research Institute for Applied Sciences