

公益財団法人
応用科学研究所
平成 28 年度研究成果報告書

第 24 号

2016FY RESEARCH REPORT

No.24

2017

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
各種金属材料(鉄鋼材料、高融点金属等)の表面処理に関する研究.....	長江 正寛	2
「歯車損傷大全」草稿作成	久保 愛三	3
引張試験用試験片の形状最適化に関する研究	秋山 雅義	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	11
銀被覆ビスマス系線材の機械的特性評価.....	長村 光造	12
超伝導臨界電流の一軸圧縮/引張歪依存性とその非対称性.....	長村 光造	14
セラミックスコーティングを用いた核融合炉用先進的超伝導線材の開発と評価....	長村 光造	16
超電導技術の国際標準化.....	長村 光造	17
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	19
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 4).....	尾池 和夫	23
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	25
	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	26
洋上風力の実施可能性に関する調査研究.....	安田 陽	28
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	30

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 (ZrO₂) 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 (Y₂O₃) を添加した Mo-ZrO₂-Y₂O₃ 系焼結材料の開発について検討した。

2. 成果

予備実験として、ZrO₂ 前駆体含有粉末の調整方法について検討した結果、調整条件が不適切であると、焼結時に ZrO₂ が凝集し機械的特性が大きく低下することがわかった。その結果を踏まえ、粉末調整条件を最適化し、少量の Y₂O₃ 前駆体を添加して分散粒子である ZrO₂ を部分安定化した正方晶構造とすると、従来の Mo 焼結品と比較して格段に優れた低温延性が発現する事を明らかにした。

参考文献

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

渡辺祐里、角倉孝典、瀧田朋広、池ヶ谷明彦、長江正寛；Zr 酸化物分散モリブデン焼結体の特性、粉体粉末冶金協会平成 28 年度春季大会、京都工芸繊維大学、平成 28 年 5 月 24 日

報告書作成日 平成 29 年 6 月 23 日

各種金属材料(鉄鋼材料、高融点金属等)の 表面処理に関する研究

材料評価・開発研究室 長江正寛

1. 目的

Mo に Ti を固溶させた合金を窒化処理すると、Ti の優先的窒化(内部窒化)により Mo マトリックス中に微細な窒化物が析出する。このような第二相粒子の析出により Mo 材料の硬度が上昇し、耐摩耗性を向上させることが可能である。また、内部窒化で析出する微細窒化物粒子は、母相 Mo の結晶粒界移動をピン止めする効果があり、例えば、再結晶温度以下から段階的に温度を上げて窒化を行う多段内部窒化によって Mo 材料の再結晶温度を 500~700°C 上昇させることも可能である[1,2]。

本研究では、Ti と同族元素である Zr を添加して作製した Mo-Zr 合金圧延材について多段内部窒化処理を行い、合金元素の違いが再結晶抑制効果や機械的特性に及ぼす影響について検討した。

2. 成果

Mo-Zr 合金を多段内部窒化することにより、材料表面付近の再結晶化を抑制しつつ、析出物である窒化物粒子を幅約 20~50nm の板状粒子へと成長・安定化させることが可能であり、真空中での再結晶温度は 1700°C 以上に上昇した。この温度はほぼ同条件で多段内部窒化した Mo-Ti 合金に比べて約 100°C 高い。また、1500°C における Mo-Zr 合金多段内部窒化材の降伏強度は純 Mo の約 8 倍、Mo-Ti 合金多段内部窒化材の約 2 倍であった。

参考文献

- (1) M. Nagae, Y. Takemoto, T. Yoshio, J. Takada and Y. Hiraoka, Preparation of Structurally Controlled Dilute Molybdenum-Titanium Alloys through a Novel Multi-Step Internal Nitriding, *Materials Science & Engineering A*, 406, pp.50-56 (2005)
- (2) M. Nagae, T. Yoshio, J. Takada and Y. Hiraoka, Improvement in Recrystallization Temperature and Mechanical Properties of TZM Alloy through Microstructure Control by Multi-Step Internal Technique, *Materials Transactions*, 46[10], pp.2129-2134(2005)

3. 成果の公表

長江正寛、伊勢直子、高田潤、平岡裕；Mo-Zr 合金の多段内部窒化、*日本金属学会誌*、第 80 巻、第 11 号、702-706(2016)

報告書作成日 平成 29 年 6 月 23 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 1000 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 2 年後の完成を目指す作業を開始。

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。

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への取り扱い (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 flatter)
- 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(MC 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 (Overcarburizing 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 化学電気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、スコアリング (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 溶融 (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

引張試験用試験片の形状最適化に関する研究

塑性加工・表面改質研究室 秋山雅義

1. 目的

引張試験における安定したひずみ測定法に関する研究

2. 成果

機械的引張試験に関して JIS 規格に定められた引張試験片形状の妥当性について試験テクニックを含めた試験条件がひずみ測定精度に及ぼす影響について、試験を繰り返すことにより、調査した。用いた試験片は JIS5 号薄板試験片ならびに JIS10 号丸棒試験片の 2 種である。JIS5 号試験片には、平行部内の幅方向両側面と中心軸の 3 箇所と、軸方向に 5 箇所の合計 15 箇所の表裏、合計 30 箇所にひずみゲージを貼付し、引張試験を行った。その結果、引張試験の初期段階では、試験片平行部表面のひずみが複雑に分布することが判った。試験を繰り返した結果、定量的には試験片間での差異が認められるが、試験片内でひずみ分布が生じるという結果は同じであった。この現象の推定原因は、両端部で試験片を把持している部分の把持応力に濃淡があり、しかもその濃淡が試験の進行と共に変化するためと結論づけた。ある程度試験が進展すると把持治具の表面が強固に試験片端部表面を捉え、強固な把持が可能となり、薄板試験片の平行部内部のひずみの分布は安定するが、その時点迄は、不安定な把持応力の分布が原因で、把持部での均一な引張が行われないことが判った。例えば、薄板試験片の平行部の幅方向の両側面を見ると、片方の側面が選択的に引張られ、他方の側面は把持応力が低いために余り引張られない現象が起こっていることが強く示唆される結果が得られた。一方、JIS10 号試験片については、端部をネジとすることで、把持の不均一性を極力排することが出来ることが判った。JIS10 号丸棒試験片の平行部の中央面や肩部と中央面との位置に、ひずみゲージを 180 度対向して貼付し、引張試験の進展に伴うひずみ分布を観察したところ、JIS5 号平板試験片の様なひずみ分布は発生せず、安定していることが判明した。引張試験の極初期にはネジの懸かり方が必ずしも均質ではないためと推定される“僅かな曲げ”がかかっていることを示唆するデータもあったが、直ぐに雄ネジと雌ネジのほぼ全面が接触状態に入るため、測定ひずみは安定することが判った。以上のことから、引張試験で安定した応力-ひずみ線図を得るためには、薄板ではなく丸棒試験片を採用するべきであるという結論を得た。

本研究の成果は、経済産業省のプロジェクト“次世代鋼材測定・評価手法開発”の一環で採取する鋼材の応力-ひずみ線図の採取方法に、具体的には、JIS 試験片の選択とひずみの測定方法に活用した。

3. 成果の公表

XIV International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications
COMPLAS 2017, September 5-7, 2017, Barcelona, Spain

報告書作成日 平成 29 年 6 月 25 日

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を検討した。ブリッジ回路に配置した 4 個の超電導素子に交互に磁場を付与し超電導状態を破ることにした。超電導/常電導転移制御のため 4 個の永久磁石をそれぞれに配置し、そこを出入りする超電導素子の速度を回転するカムの形状で調整することにより、出力される交流電流の波形を正弦波から矩形波に任意に変化させるようにした。永久磁石を用いたのは将来的に微小過密なインバータ回路を実現するための試みであり、回路の試作・配線を終了し、冷却に成功した。実際のインバータ動作の確認は次年度行うことにした。

報告書作成日 平成 29 年 6 月 9 日

銀被覆ビスマス系線材の機械的特性評価

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

銀被覆ビスマス系線材とその応用製品の改良

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及び曲げ歪依存性を調べた。測定結果の解析を行い超電導特性に及ぼす残留歪依存性を明らかにした。

本年度は特にステンレステープをラミネートしたテープ線材の特性を系統的に調べた。まず余負荷を加えた YMX2505_SU20、SU50 および SU100 材の応力-歪曲線を室温で求めた。一般的に弾性域から塑性域に移る段階で“肩”が観測され、その後緩やかな加工硬化が観測された。これらの応力-歪曲線から弾性定数、降伏応力・歪および 0.2% 耐力を評価した。次に YMX2505_SU20、SU50 および SU100 テープ材の臨界電流 I_c/I_{c0} 、 I_{cr}/I_{c0} の負荷歪(A)と負荷応力(R) 依存性を調査した。

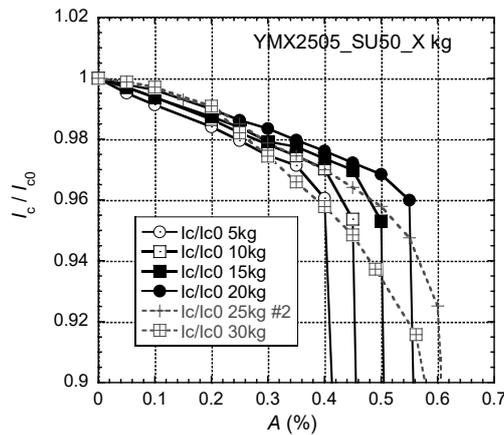


Fig. 1 Tensile strain dependence of the normalized critical current for several SU50/BSCCO tapes applied with different pretension

Fig. 1 に示すように全体に引張負荷依存性は同じ傾向を示したが、SU50_25kg および 30kg テープでは負荷歪依存性が他と異なることが明らかとなった。可逆限界として回復曲線上から 99%に臨界電流が減少したときの負荷応力 $R_{rec}(R_{0.99})$ と負荷歪 $A_{rec}(A_{0.99})$ を、また負荷曲線上から 95%に臨界電流が減少したときの負荷応力 $R_{ret}(R_{0.95})$ と負荷歪 $A_{ret}(A_{0.95})$ を評価した。可逆臨界電流

領域の回復限界歪($A_{0.99}$)の余荷重(P)依存性については SU50 の 25kg、30kg の異常を除いては $A_{0.99}$ は P に対して正の相関があった。可逆臨界電流領域の保持限界歪($A_{0.95}$)および保持限界応力($R_{0.95}$)の余荷重(P)依存性は回復限界条件と同様の余荷重依存性を示すことから、保持限界は超電導フィラメントの破断に依存すると判断された。さらにテープに一軸性の圧縮および引張歪を加え臨界電流を測定するためにスプリングボードを利用した。本年度はスプリングボードを用いたときの種々の問題点を詳細に検討した。さらにスプリングボードを用いて圧縮歪から引張歪にわたる範囲での臨界電流の測定を行った結果を解析した。

3. 成果の公表

菊地昌志、加藤武志、小林慎一、長部吾郎、山崎浩平、門谷琢郎、中島隆芳、鍵山知宏、武田宗一郎、岡田朋之、林和彦、長村光造、北口仁、下山淳一；高強度線 Type HT-NX 実用化に向けた開発、第 93 回春季低温工学・超電導学会講演概要集 22 (2016)

報告書作成日 平成 29 年 6 月 9 日

超伝導臨界電流の一軸圧縮/ 引張歪依存性とその非対称性

特別研究員 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

超伝導複合線材の臨界電流の歪依存性は2つの要因から負荷歪に対して非対称となると考えられる。最近の理論的取扱いによれば臨界電流は超伝導成分に生起する歪がゼロを中心に圧縮歪と引張歪に対して非対称に変化することが予測される。複合成分である金属からの影響で超伝導成分には圧縮性の熱残留歪が生起するため超伝導成分が破断して臨界電流が劣化する負荷歪は圧縮と引張側で異なる。この複雑さを理解するため回折実験から求めた超伝導成分に生起する歪に対する臨界電流の依存性を調べ、提唱される理論が超伝導材料で可逆歪領域における臨界電流の歪依存性を統一して説明できるか検証する。圧縮破断歪、引張破断歪、可逆負荷歪範囲等の機械超伝導特性を体系的に調べ、その制御・改良方法を考案することを目的とする。

2. 成果

[100]配向の実用 REBCO 超電導線の臨界電流の一軸歪依存性に極大が出現することはよく知られており、著者らもそれを確認した。その極大の特徴とその原因について検討した。供試料には市販されている、Superpower、SuNAM の2種類の REBCO テープ線材を用いた。引張試験機を用い試料部分を液体窒素に浸漬し、 I - V 測定を行い臨界電流及び n 値を決定した。試料の保持方法としては(a)テープそのものをチャックする、(b) テープを張り付けたスプリングボード (SB)をチャックする2通りの方法がとられた。また Spring-8 BL45XU において臨界測定に用いたと同様な治具を用いて印加歪の下での超電導層に生起する局所歪の測定を室温で行った。

Superpower のテープについて、2種類の方法で測定した臨界電流の印加歪依存性について、すなわち I/I_{c0} は歪 A_a のときの値、 I_{cr}/I_{c0} は $A_a=0$ に戻したときの値である。 I_{cr}/I_{c0} がほぼ1に戻った時にはまだ劣化の起こっていない可逆領域にあることを示す。つまりほぼ $A_a=0.5\%$ 付近で I_{cr}/I_{c0} が急激に低下するのは超電導層が破断したことを示している。(a)テープに引張歪を印加して $A_a>0$ の範囲での臨界電流の変化 (b)スプリングボードを引張および圧縮することにより圧縮歪から引張歪の範囲で調べた臨界電流の変化については、 $A_a>0$ の領域で両者の臨界電流の印加歪依存性に違いがあることが解った。(b)の場合には臨界電流の歪依存性に極大が現れた。この顕著な相違は試料テープをスプリングボードにハンダ付けすることにより REBCO 超電導層に生起する局所歪が変化したことにより起因すると考えられる。

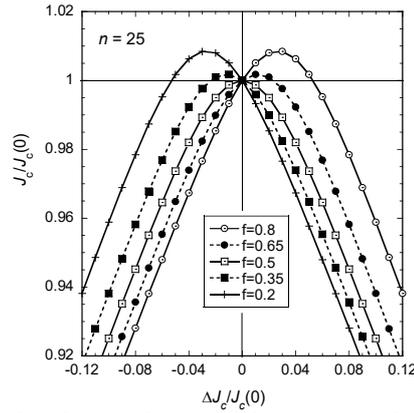


Fig.1 A calculation of the normalized critical current for a material with two populations of A-and B-domains contributing to J_c . The x-axis is the fractional change in J_c in these populations.

この状況を理論計算で確かめることにした。[100]配向の実用 REBCO 超電導線では軸方向に A 軸ドメインと B 軸ドメインが交互に配列しており、電流はこれらのドメインを直列的に流れることになる。この状況を反映する臨界電流の一軸歪依存性のモデルをもとにした理論計算を行った。Fig. 1 に規格化された臨界電流の $\Delta J_c/J_c(0)$ いわゆる歪依存性を示す。ここで f は A 軸ドメインの体積分率である。Superpower、SuNAM の 2 種類の REBCO テープ線材で実測した臨界電流の一軸歪依存性を良く説明できることが明らかとなった。

3. 成果の公表

長村光造、町屋修太郎、Hampshire Damian ; 実用 REBCO 超電導線における臨界電流の一軸歪依存性のメカニズム、第 93 回低温工学・超電導学会講演概要集 19 (2016)

報告書作成日 平成 29 年 6 月 9 日

セラミックスコーティングを用いた核融合炉用先進的超伝導線材の開発と評価

特別研究員 長村光造
(研究代表 大同大学 町屋修太郎)

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

ITER 熱核融合炉で使用される超伝導線材の特性改良のため、高機能化した窒化クロムグラデーション層を付与した高性能 Nb₃Sn 線材の開発とその導体への応用を図るための研究を行う。

2. 成果

本年度の分担研究者としての研究成果は次のとおりである。表面に Cr 複合膜を付与した未処理の Nb₃Sn 元線をアンモニア窒化して Fig. 1 に示すような CrN グラデーション膜を形成させ高強度・高性能化を行った。Cr/Ni/Cr/Cr₂N/CrN の構造になるような多層膜が形成された。安定化銅層と Cr メッキ膜、および Cr/Ni 膜間の密着性は良好で剥離が起こらないことを明らかにした。これらの線材についてヤング率、耐力、引張強度および臨界電流を評価した。さらに熱膨張係数を求め、中性子および X 線回折法により線材中の局所ひずみを測定した。一方で、超伝導複合線材の弾・塑性挙動および超伝導フィラメントに生起する局所ひずみを数値計算により求め実測値と比較検討し、特性を最適化した先進的超伝導複合線材の一般化したデザイン指針を検討した。

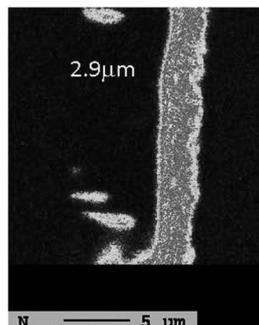


Fig. 1 Nitrogen characteristic image by EDS, where the red colored area indicates the Cr₂N / CrN layer

報告書作成日 平成 29 年 6 月 9 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するとともに、下記の公表論文のように臨界電流の可逆限界を示す応力・歪の決定方法について検討を行い、国際ワーキンググループ TC90/WG5 で報告を行った。

供試料には市販されている 4 種類の REBCO テープ A: Fujikura Ltd., B: SuperPower Inc., C: SuNAM Co. Ltd. and D: American Superconductor と 2 種類の SUS 及び Ni 合金テープをラミネートした BSCCO-2223 テープを用いた。必要部分を液体窒素で冷却するように引張応力下での臨界電流測定のためにテープを引張試験機に装着し絶縁した試料グリップを通して電流を流し、25mm 離れた電圧タップ間の電圧が $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ になった時を臨界電流とした。歪は Nyilas 型の伸び計で計測した。測定は例えばテープに引張応力 $R=350\text{MPa}$ 印加した状態で臨界電流を測定し初期値との比 I_c/I_{c0} を求める。次に応力をゼロ $R=0$ の状態に戻し測定した値を I_{cr}/I_{c0} とする。順次応力を増加させながらこれら 2 つの規格化された臨界電流を測定した。

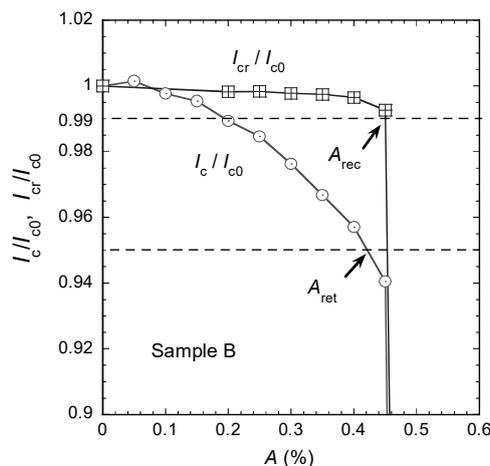


Fig. 1 Normalized critical currents, I_c/I_{c0} and I_{cr}/I_{c0} as a function of applied strain for sample REBCO_B

Fig. 1 に REBCO_B テープについて、2 種類の方法で測定した臨界電流の印加歪依存性を示す。引張応力をゼロに戻したとき I_{cr}/I_{c0} がほぼ 1 に戻っていればまだ劣化の起こっていない可逆領域

にあることを示す。ほぼ $A \approx 0.45\%$ 付近で鎖線で示したレベルより I_{cr}/I_{c0} が急激に低下する。これは超電導層が破断したことによるものと考えられる。そこで定義として $I_{cr}/I_{c0}=0.99$ になったときの歪(A_{rev})および応力(R_{rev})を臨界電流の可逆限界の歪および応力とする。一方引張応力印加時の規格化された臨界電流 I/I_{c0} は引張歪・応力とともに徐々に減少し、 $A > A_{rev}$ になると I_{cr}/I_{c0} が急激に減少するところで同様に急激に減少する。ここで $A < A_{rev}$ の範囲で臨界電流が徐々に減少するのは臨界温度の歪依存性に起因すると考えられている。Fig. 1 に示すように $I/I_{c0}=0.95$ になったときの歪および応力を A_{ret} 、 R_{ret} とした。従来はこの値を可逆限界の歪・応力とする報告があったが、本報告で述べるように適切ではない。

同様に BSCCO-2223 テープの場合について I_{cr}/I_{c0} の歪依存性についてみると $A < A_{rev}$ では徐々に減少しているが、これはマトリックス成分の弾塑性挙動の影響と考えられる。 $A > A_{rev}$ での急激な減少は超電導フィラメントの破断によるものである。一方 $A < A_{rev}$ の範囲で臨界電流 I/I_{c0} が引張歪（応力）とともに徐々に減少する原因についてはまだはっきりとした原因は明らかでないが、一つの可能性として超電導フィラメント中の小傾角結晶粒界の幅が引張歪とともに拡張することに関連すると思われる。

工学的な観点からは引張応力・歪に対して、どの範囲までなら安心して使用できるか、つまり臨界電流の応力・歪に対する“可逆限界”を定量的に明らかにすることは重要である。実用的な定義として $I_{cr}/I_{c0}=0.99$ になったときの A_{rev} および R_{rev} を臨界電流の可逆限界の歪および応力とすることを提案した。実用的にはあるいは $0.99 \sim 0.9$ の範囲に低下したときの歪・応力とすることも考えられる。この考え方の妥当性は下記の論文に報告したように歪・応力の繰り返し負荷実験からも裏付けられている。

3. 成果の公表

K Osamura, S Machiya and G Nishijima; Reversible Stress and Strain Limits of Critical Current of Practical REBCO and BSCCO Wires, Supercond. Sci. Technol. 29,094003 -094011 (2016)

報告書作成日 平成 29 年 6 月 9 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

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

NdFeB 永久磁石は、優れた磁石特性からハイブリッド自動車用モータを初めとする多くの応用機器に使われている。しかし、近年 NdFeB 磁石の原料の高騰から、保磁力を高めるために Nd の一部を置き換えて使われる重希土類である Dy の使用量を削減する多くの試みが行われている。このような状況において、新たな保磁力向上の方策を見つけるため NdFeB 磁石の保磁力メカニズムを解明することは重要な手がかりとなることが期待されている。

我々は、これまで検討されてこなかった保磁力と Nd₂Fe₁₄B 結晶配向度 (α =残留磁束密度(**Br**)/飽和磁化(**Js**)) の関係を調べ、保磁力が Nd₂Fe₁₄B 結晶粒の配向度が向上するに従い減少することを見出した。この現象を詳細に調べるため等方性磁石の保磁力からの保磁力変化の割合を表す指標として等方性磁石からの保磁力変化の割合を調べ保磁力メカニズムの考察を進めてきた。その中で NdFeB 焼結磁石の保磁力が配向度の向上とともに減少すること、特に高い配向領域 ($\alpha > 0.95$) で保磁力が急激に減少し、高い保磁力領域を完全配向 ($\alpha = 1$) に外挿した値は等方性磁石の保磁力の 7 割にまで減少することを明らかにした。その後、この現象は NdFeB 焼結磁石だけではなくフェライト磁石でも観測されることが明らかとなり、これら磁石の保磁力のメカニズムから発生していることが強く推定されるという結果が得られた。(図 1)

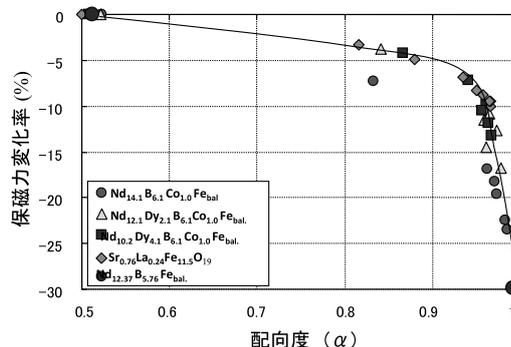


図1 保磁力変化率の配向度依存性

この実験事実を元に磁化の一斉回転モデルと磁壁移動モデルの保磁力の角度依存性から保磁力の配向度と保磁力の関係について考察すると、磁化の一斉回転モデルでは保磁力は結晶配向と共に増加するという結果となり、これは実験結果と異なる。一方、磁壁移動モデルでは保磁力は結晶配向の向上と共に減少し、完全配向磁石では等方性磁石の保磁力の 7 割となるという結果とな

り、定性的に我々の実験結果を説明することができることが分かった。この結果は、NdFeB 焼結磁石およびフェライト磁石の保磁力は磁壁移動で保磁力が決定されることを強く示唆するものである。

これらの結論については Micromagnetics 解析からも支持されている。

結晶の配向分布を考慮し残留磁束密度の配向度依存性を計算すると、実験結果と計算結果は良い一致を見る。しかし、保磁力に関しては全ての結晶粒の保磁力が独立して磁界に対し磁壁移動 ($1/\cos \theta$) で反転すると仮定し、配向分布を入れ保磁力の配向度依存性を計算すると実験から得られた保磁力と計算値には大きな乖離が見られる。このことは NdFeB 焼結磁石やフェライト磁石の磁化反転は全ての粒子が独立に $1/\cos \theta$ に従って反転しているのではないことを示している。

(図2) 実験と計算との乖離の原因として、磁壁が結晶粒界でピン止めされており、ピン止めが外れた時に複数の粒子が一度に磁化反転することにより反転が進むと考えており、この相違発生の原因を探ることは永久磁石の高保磁力化を進める上での開発指針を与えると考えられる。

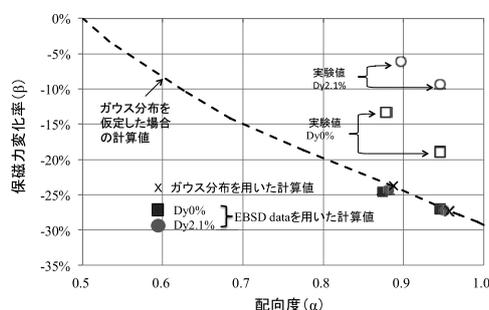


図2 配向度と保磁力変化率の関係 (実験値と配向分布から求めた計算値の比較)

2. 成果

配向度を変えた NdFeB 焼結磁石を信越化学より提供して頂いた。この磁石について①配向度と保磁力の関係調査、②等方性磁石の保磁力角度依存性の調査を行い、平成 29 年度から実施する SPring-8 での局所磁気特性調査のための基礎データとした。

2-1 局所磁気特性調査のための基礎データ

入手した磁石の磁気特性を表に示す。

また、電子線後方散乱(EBSD)を用いた(001)方向の測定結果は No. 2 から No.4 に従い(001)の分布は集中しており、磁石特性から得られた配向度を反映していることを確かめることができた。

Sample No.	Br(kG)	H _{co} (kOe)	配向度(Br/Js)	保磁力変化率(%) H _{coj} / H _{coj} (No.1)
1	7.38	17.56	0.5	0
2	13.21	15.46	0.90	-12.0
3	13.72	14.71	0.94	-16.2
4	14.09	14.28	0.96	-18.7

表 1 サンプルの磁気特性

2-2 等方性磁石の保磁力角度依存性調査

等方性磁石は Nd₂Fe₁₄B 結晶粒の配向分布は等方的であるので、結晶の配向分布関数は定数と考えて処理することができる。このことから全ての粒子が独立して磁壁移動するとして統計処理する場合、配向分布関数を仮定する必要がない。したがって、等方性磁石の保磁力角度依存性の測定結果が磁壁移動で説明できるのかどうかは、保磁力メカニズムを探る上で重要であると考えら

れる。図4に保磁力角度依存性の測定結果と計算から得られた保磁力角度依存性を示す。図からわかるように測定結果は60°まで計算結果とよく一致していることが確認された。

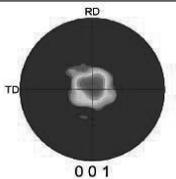
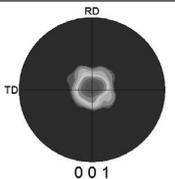
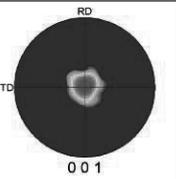
Sample No. 2	Sample No. 3	Sample No. 4
		
$\alpha=0.90$	$\alpha=0.94$	$\alpha=0.96$

図3 EBSD (001)方向極点図

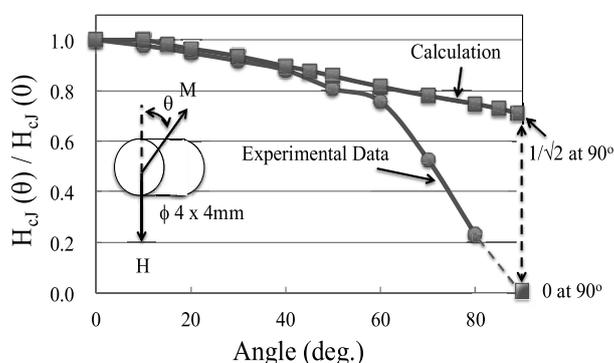


図4 等方性磁石の保磁力角度依存性

参考文献

- (1) Y. Matsuura; Proceeding of the 22nd International Conference on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications, pp.147 (2012)
- (2) Y. Matsuura, R. Ishii, J. Hoshijima; J. Magn. Magn. Mater. 336, pp88 (2013)
- (3) Y. Matsuura, N. Kitai, R. Ishii, M. Natsumeda, J. Hoshijima; J. Magn. Magn. Mater. 346, pp113 (2013)
- (4) Y. Matsuura, N. Kitai, R. Ishii, M. Natsumeda, J. Hoshijima, F. Kuniyoshi; J. Magn. Magn. Mater. 398, pp246 (2016)

3. 成果の公表

松浦裕；第40回日本磁気学会学術講演会、金沢大学、平成28年9月7日

報告書作成日 平成29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4）

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。

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、紙芝居やマンガ、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。

2. 成果

また 2015 年度に着手して約 2 年をかけて、漫画家と科学者の連携による本を出版した。地球が生まれる前、今から 137 億 7 千年ほど前に、私たちのいる宇宙が生まれた。それは、私たちの体の基本のリズムである脈拍を 1 秒に 1 回として、秒で数えると、43 京 5200 兆秒前ということになる。

その宇宙の中で、今から 14 京秒ほど前、太陽が生まれると同時に地球も生まれた。地球の年齢は、45.4 億年ほどと言われている。月ができたのは、地球が生まれて間もなくで、地球に原始惑星が衝突して月が生まれた。

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。

地球の歴史において、大陸は早くからできていた。それはマンツルの対流運動に乗って、いつ

も地球の表面に浮いており、分裂したり合体したりしている。その運動は、海のプレートの発生、沈み込み、消滅と関係していて、大陸は離合集散を繰り返してきて、今後もそれはしばらく続くことは間違いない。海のプレートが陸のプレートの下へ沈み込むとき、沈み込み口では、プレート間の固着状態に応じて、大地震や、ときに巨大地震が発生する。

南海トラフは、そのような大規模な地震の発生するプレート境界の1つであって、定期的に連動性の大地震を発生させる。南海トラフで、そのような現象が起こるようになったのは、伊豆半島が今の位置で本州島に合体し、フィリピン海プレートが今の運動様式になってからであろうと思われる。

このようなストーリーの漫画は、現在さまざまな場所ですでに読まれているが、概ね好評である。小学校の関係者からは解説文の漢字に振り仮名がほしいという意見が出た。また、京都に焦点があたりすぎているという批判を、最近の大震災のあった地域の方から数件いただいた。

地球を理解するための活動としてジオパークの考え方を広める努力を引き続き行っているが、着地型の旅行企画を実行しながら、ガイドのあり方を議論している。その一環としての学会発表などを行い論文を出版した。

3. 成果の公表

(1)尾池和夫；あつ！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、マニュアルハウス（2016）10月31日

(2)尾池和夫；日本ジオパークの教育力とは何か、地学雑誌 125 巻 6 号特集号、（公財）東京地学協会（2016）12月25日

(3)尾池和夫；熊本地震の仕組みと背景（解説）、熊本県山鹿市菊池川自然塾、（2016）11月20日

(4)尾池和夫；環境教育フォーラム、漫画でたどる宇宙の始まりから地球の未来まで、大阪国際交流センター、（2017）1月28日

報告書作成日 平成 29 年 4 月 26 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、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)阿久津慧、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；実時間価格提示を利用した太陽光発電用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.29、No.4、pp1-10 (2016)
- (2)石井貴弥、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；実時間価格提示を利用した配電系統電圧の分散制御、計測自動制御学会論文集、Vol.53、No.2、pp144-151 (2017)
- (3) Hikaru Akutsu, Kenji Hirata, Akihiro Ohori, Nobuyuki Hattori, Yoshito Ohta;
Decentralized control of inverter networks for PV generation plants using real-time pricing strategy, The 7th IEEE Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT 2016)
- (4)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目的とした太陽光発電インバータ群の分散制御と実機検証、第59回自動制御連合講演会 (2016)
- (5)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複数発電拠点の分散制御に関する考察、第4回制御部門マルチシンポジウム (2017)

報告書作成日 平成 29 年 6 月 24 日

大規模分散電源による電力系統の安定化

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系統に与える影響を評価する。そのうえで、これを抑制するために蓄電素子を適用するが、その適用方法を開発する。またその効果について実験により検証する。

2. 成果

図 1 に示す太陽光発電の出力変化に伴う電力系統の電力動を蓄電システムで補償するシステムの検討を行う。

蓄電システムに用いるインバータ制御系を図 2 に示す。図 1 の点線で囲んだシステムが電力動揺周波数成分を通さない周波数特性を持つインバータ制御系を設計した。既知の電力動揺周波数 ω に対して、内部モデル原理に基づいて(1)式のコントローラを設計した。

$$K = F \frac{s}{s^2 + \omega^2} \quad (1)$$

図 3 に蓄電素子として電解コンデンサ、Li 電池、電気二重層コンデンサ、Li キャパシタの 4 つのデバイスを用いて電力変動補償を行った実験結果を示す。実験結果より電解コンデンサの応答が最も速い応答を示し、他の 3 つのデバイスはほぼ同程度の応答特性であった。システムの動揺の抑制状態は、同図(b)より電解コンデンサはエネルギー容量が小さく PV システムが脱落した瞬間の動揺は僅かながら他のデバイスには劣るが、応答が速いため開始 3.5 秒以降はほぼ同じ特性となった。実用的には安価な電解コンデンサを採用すると上記の制御に必要な蓄電デバイスの電力量に対して、電解コンデンサの電圧変化範囲を広くとることで必要な容量の低減が可能である可能性を示した。

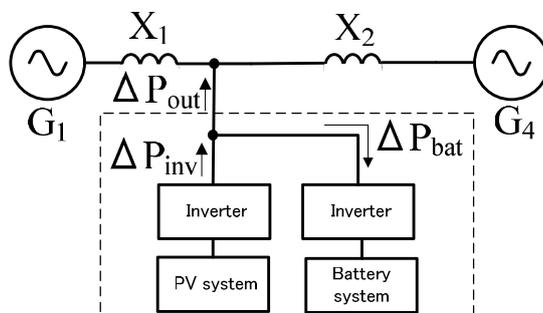


図 1 解析対象系統

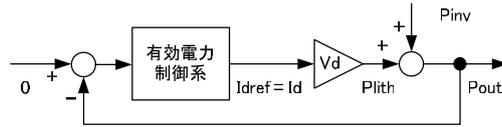
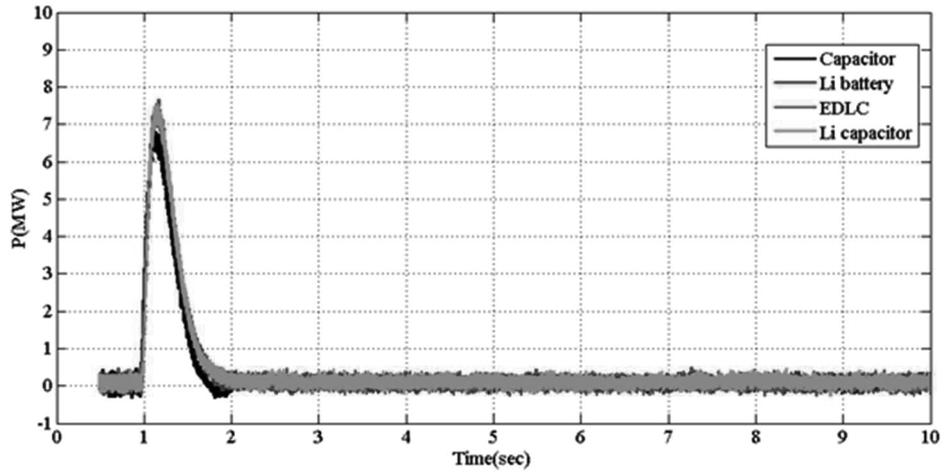
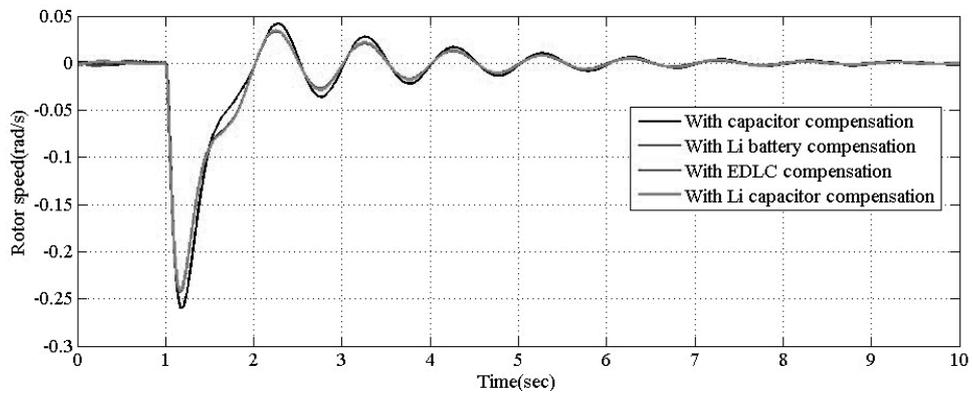


図2 インバータ制御系



(a) 蓄電池システム出力



(b) 角速度偏差

図3. 解析結果

報告書作成日 平成 29 年 4 月 12 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。

- a. 洋上風力発電に関する国内外の現状および最新動向調査：洋上風力発電の導入が進んでいる欧州と日本における洋上風力発電の現状および最新動向調査。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
- b. 制度的課題の整理・分析：国内で洋上風力発電を導入するうえでの政策・制度面での課題についての整理・分析
- c. 技術的課題の整理・分析：国内で洋上風力発電を導入するうえで電力系統面での技術的課題についての整理・分析

2. 成果

<目的・背景>

世界の洋上風力発電の累積設備容量は2016年末で14GWに達しており、そのうち英国だけで5GW、世界全体の35%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60MWと全世界の0.4%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、また2016年10月（英国およびオーストリア）および2017年3月（アイルランド）に現地視察にて聞き取り調査した結果なども反映した。

洋上風力発電の世界全体の動向として、(1) 英国、ドイツの2ヶ国で世界全体の60%以上を占めている、(2) 世界の洋上風力発電の90%以上が欧州に建設されている、(3) 中国が3位に食い込んでおり、既に1.6GWもの洋上風力発電を建設している、(4) 北米は建設計画は数年前から起こっているものの、実績としては洋上風力発電ゼロの状態が続いている、(5) 日本は世界ランキング8位に入っているが、全世界の設備容量のわずか0.4%に留まっている、などが明らかになった。特に(2)のドイツでは、2016年の1年間だけで約2GW分の設備容量が運開しており、過去1年で累積設備容量を倍増させている。これは、ドイツの長距離HVDC送電による離岸距離の遠い大型プロジェクトが同年に次々と運開したことに起因する。

現在の洋上風力発電所（OWPP）は平均設備容量が 500 MW 程度もあり、大型火力発電所に匹敵する設備容量を持つのが特徴である。このような大規模 OWPP 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。

また、欧州では 2002 年運開の Horns Rev 1 洋上風力発電所を皮切りに、現時点（2016 年末）で実に 60 基もの洋上変電所が建設されている。日本でも洋上変電所は 1 基建設されており、福島沖復興プロジェクトの一部として世界初の浮体式洋上変電所が 2013 年に運開しているが、洋上変電所としては現在日本には未だ 1 基しか建設されていないことに留意すべきである。欧州で 60 基もの建設実績があるということは、産業として成熟しつつあり、建設コスト低減や保守メンテナンス比の軽減に寄与していることが示唆される。また、洋上変換所については、現在世界中で導入されている 6 基は全てドイツに設置されており、製造メーカーも ABB や Siemens といった欧州メーカーに限られている。

しかしながら、欧州の洋上風力発電の開発は、必ずしも順風満帆ではない。むしろ、さまざまな失敗がありながらもそれを乗り越えてきた歴史であるとも言える。本報告では、(i) デンマーク Nysted 洋上風力発電所の変圧器焼損事故、(ii) デンマーク Anholt 洋上風力発電所のケーブル損傷事故、(iii) デンマーク Hons Rev 洋上風力発電所のケーブル損傷事故、(iv) ドイツ Bard 1 洋上風力発電所の変換器焼損事故、(v) ドイツ Dol Win 2 洋上風力発電所のケーブル不具合、など実際に欧州の OWPP で発生した事故例を紹介し、その原因を入手可能な限りの情報から分析した。

<結論>

欧州の洋上風力発電の発展状況と事故事例を分析した結果、我が国の洋上風力発電開発に将来起こりうるリスクと取りうる対策は、右表に示すようなものとなる。

表 我が国の洋上風力発電開発の
起こりうるリスクと取りうる対策

起こりうるリスク	取りうるリスク対策
ケーブル切断	ケーブル冗長設計の費用便益分析、故障位置特定のための診断技術
ケーブル絶縁破壊	ケーブル大容量化、冗長化
変圧器絶縁破壊	変圧器冗長化の費用便益分析、交換修理のための専用船の調達、港湾整備、サプライチェーン整備
	絶縁協調設計の強化
変圧器・変換器焼損	高調波解析
接近容易性（アクセシビリティ）の悪化	メンテナンススキームの効率化 保守作業員教育の高度化 健全性維持・稼働率向上
塩害・疲労	メンテナンススキームの効率化 自動故障診断、ブレード構造強化
落雷	
長期送電不能	補償・保険・契約

3. 成果の公表

原田祥平、安田陽；欧州の国際連系線利用電力量に関する統計分析、平成 29 年電気学会全国大会、富山、No.6-145（2017）3 月 15 日

報告書作成日 平成 29 年 6 月 27 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、及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、先行研究で考慮されていなかった下記のような点を加えたうえで、シミュレーション検討を行った。

まず、大規模系統に PV が大量導入され、その PV 設備に対して VSG モデル制御を用いることを本研究で想定しているため、シミュレーション検討は、大規模系統として電気学会西 10 機系統モデルを採用している。PV 出力の合計は、負荷の消費電力合計の 30%分としている。更に、PV が 100/200V の配電系統や、77kV の特別高圧系統などに連系されており、その影響をより現実的に評価するために、電力系統の 500kV 以下の下位系統を 100/200V 階級まで考慮している。PV は配電系統と特別高圧系統の二か所に同容量だけ連系されているものとしている。また、負荷として、定インピーダンスと誘導機負荷の混成モデルを採用し、負荷の動的要素を考慮しており、誘導機負荷は全負荷容量の 30%分導入されている。

VSG モデル制御としては、同期発電機の等価回路モデルのうち、簡易的である制動回路を考慮しないモデルを用いている。同期発電機のモデルの方程式に加え、調速機と AVR も一次遅れ系で模擬している。

以上の条件において、系統の一か所で一回線三相地絡事故が 0.07 秒間発生した時の VSG モデル制御による系統安定化への影響評価を行う。VSG モデル制御の比較対象として、PV 出力を系統事故発生前の出力で一定に保つ、出力一定制御を用いる。

ここでは、VSG モデル制御による系統安定化の効果についてのみ述べる。図に出力一定制御を用いた場合と VSG モデル制御を用いた場合の発電機内部相差角動揺を示す。出力一定制御を用いると、系統の慣性力の低下により、動揺収束に時間がかかることが分かる。また、VSG モデル制御は、出力一定制御よりも明らかな系統安定化効果をもたらすことが確認できる。主に、事故除去直後の動揺抑制は AVR による電圧制御が、その後の動揺収束性は、同期発電機の特性がも

たらしめていると考えられる。

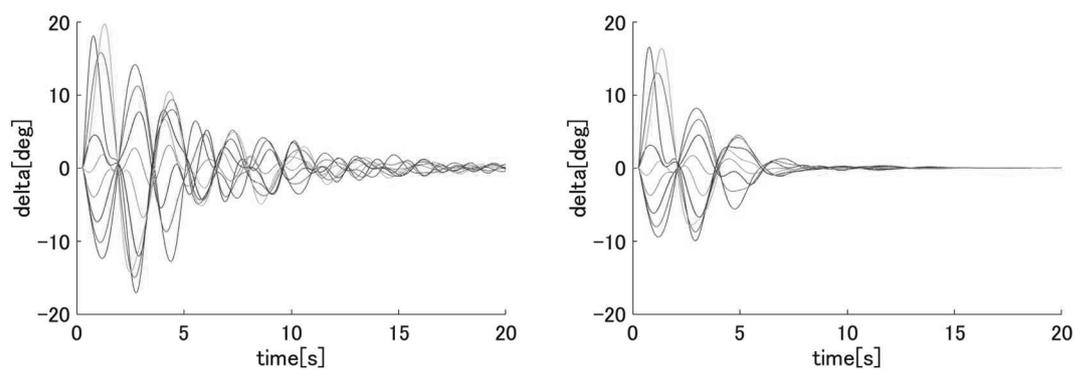


図 内部相差角動揺（左：出力一定制御、右：VSGモデル制御）

3. 成果の公表

野上、横山、大部、清水；下位系統を考慮した大規模系統における太陽光発電の仮想同期発電機制御による系統安定化効果、平成 29 年電気学会全国大会、6-073 (2017)

報告書作成日 平成 29 年 5 月 15 日

平成29年8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