

公益財団法人
応用科学研究所
平成 27 年度研究成果報告書

第 23 号

2015FY RESEARCH REPORT

No.23

2016

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	4
塑性加工・表面改質研究室の成果	秋山 雅義	11

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	23
銀被覆ビスマス系線材の機械的特性評価	長村 光造	25
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	27
超電導技術の国際標準化	長村 光造	29
文化財・美術品等の保存と普及のためのアーカイブ作成法の研究・開発	井手 亜里	31
磁性体球殻に関する渦電流問題	島崎 眞昭	33

3. 共同研究員による成果

自動車用ガスディスチャージランプ～始動メカニズム解明～	植月 唯夫	37
安全情報を伝えるメディアの研究（その3）	尾池 和夫	39
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 平田 研二	41
搬送装置及び電源装置の制御技術の開発	太田 快人 平田 研二	42
新規プロトン伝導性電解質を用いた中温燃料電池に関する基礎研究	小久見善八	43
液体水素容器内の可視化システム開発	白井 康之	46
電力変換技術を適用した電力ネットワークの安定性に関する研究	引原 隆士	48
大規模分散電源による電力システムの安定化	舟木 剛	49
マイクロ波帯次世代無線LANの適用評価研究	村田 英一	51
遮断器用真空バルブの絶縁設計に関する基礎研究	山本 修	53
再生可能エネルギーが大量導入された電力系統における蓄電設備の最適需給制御手法とその経済性評価に関する研究	横山 明彦	55

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

Mo に Ti や Zr などの元素を固溶させた合金を窒化処理や希薄 CO ガス熱処理すると、Ti や Zr の優先的窒化(内部窒化)や酸化(内部酸化)により Mo マトリックス中に合金元素の窒化物や酸化物が析出する。このような第二相粒子の析出により Mo 材料の硬度が増加し、耐摩耗性を向上させることが可能である。また、内部窒化や内部酸化で析出する微粒子は、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℃上昇させることも可能である[1,2]。この様に、内部窒化処理や希薄 CO ガス熱処理は Mo 材料の耐摩耗性や耐熱性を向上させる表面改質法として非常に有望であるが、窒素や酸素の拡散によって析出反応が進行するため、大型部品には適用が困難と言う欠点を有している。

本年度は、酸化物粒子を微細分散させた大型の高強度・高靱性焼結 Mo 材料の作製を目指し、液体ジルコニウム源を用いた新規 Mo-ZrO₂ 系焼結材料の開発について検討した。

2. 成果

前年度の成果に基づき、ZrO₂ 粒子およびマトリックスの粒成長を抑えるための焼結手法としてパルス通電加圧焼結を選択し、ZrO₂ 粒子のサイズと分布を適切に制御する事を試みた。得られた焼結体は、サブミクロンの ZrO₂ 粒子が比較的均一に分散した組織を有しており、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

- (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

口頭発表

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 28 年 6 月 29 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

Hv1400 以上を示す硬質材料の一つである Mo 窒化物は、エレクトロニクス材料における拡散バリア、アンモニア合成や水素化処理等の不均一触媒、銅合金材料の成型用切削工具等へのコーティング等への利用が検討されてきた。一方我々は、Mo 窒化物が沸騰硫酸に対して優れた耐食性を示す事を明らかにしており[1]、腐食環境下での耐摩耗性部品としての応用も可能である。しかしながら、Mo 窒化物は大気中での耐酸化性が皆無のため、耐酸化性の飛躍的改善が求められる。そのような背景から我々は、金属 Mo 表面に Cr を熱拡散させた試料をアンモニアガス窒化することにより、Cr が固溶した Mo-Cr 系窒化物皮膜の作製を試みた[2]。その結果、Mo-Cr 系窒化物固溶体皮膜は、Mo 窒化物皮膜と同等の耐沸騰硫酸性を有し、大気中 800°Cまで優れた耐酸化性を示す事を明らかにした。しかしながら、ひとたび皮膜に欠陥が発生し、母材である金属 Mo が露出すると一気に腐食や酸化が進むことから、上記 Mo-Cr 系窒化物の優れた特性を生かし切るためには、窒化物粉末を焼結して緻密なバルク材料を作製する事が望ましい。

そこで本研究では、Mo 窒化物粉末と Cr 窒化物粉末を出発原料とし、これらの混合粉末をパルス通電加圧焼結する事によって、Mo-Cr 系窒化物固溶体の緻密焼結体の作製を試み、得られた試料について大気中での耐酸化性と沸騰硫酸中での耐食性を検討した。

2. 成果

パルス通電加圧焼結を用いることで、Mo₂N の Mo サイトに Cr が置換した Mo-Cr 系窒化物固溶体の作製が可能であった。CrN 粉末との反応により Mo₂N 粉末の焼結性は向上し、CrN 量 20wt%以上で、相対密度が 95%以上、硬さが約 1100~1700Hv の焼結体が得られた。Mo₂N に対する Cr の固溶限は約 50 at%であった。CrN との固溶体化により Mo₂N の耐酸化性は大幅に改善され、CrN 量 35wt%以上の焼結体は、800°Cまで酸化による重量変化をほとんど示さず、耐酸化性に優れていることが分かった。CrN 量 75wt%の焼結体は 1000°Cにおいても自己修復性を有する良好な耐酸化性を示した。Mo₂N 型の Mo-Cr 系窒化物固溶体は 75wt%の沸騰硫酸中で完全耐食性を示し、Mo 窒化物とほぼ同様な耐沸騰硫酸性を有していることが分かった。

参考文献

- (1) Nagae et al; Proc.of 4th Pacific Rim Int. Conference on Advanced Materials and processing, Vol. II, 2759, (2001)
- (2) 長江正寛、伊勢直子、桑原秀行、高田潤；粉体粉末冶金協会秋季大会講演概要集、173 (2008)

3. 成果の公表

口頭発表

(1)長江正寛、伊勢直子；Mo-Cr 系窒化物焼結体の耐酸化性および耐食性、粉体粉末冶金協会平成 27 年度秋季大会、京都大学、平成 27 年 11 月 12 日
論文発表

(2)長江正寛、伊勢直子；Mo-Cr 系窒化物焼結体の耐酸化性および耐食性、粉体および粉末冶金、第 63 卷、第 1 号、pp.23-28、(2016)

報告書作成日 平成 28 年 6 月 29 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。

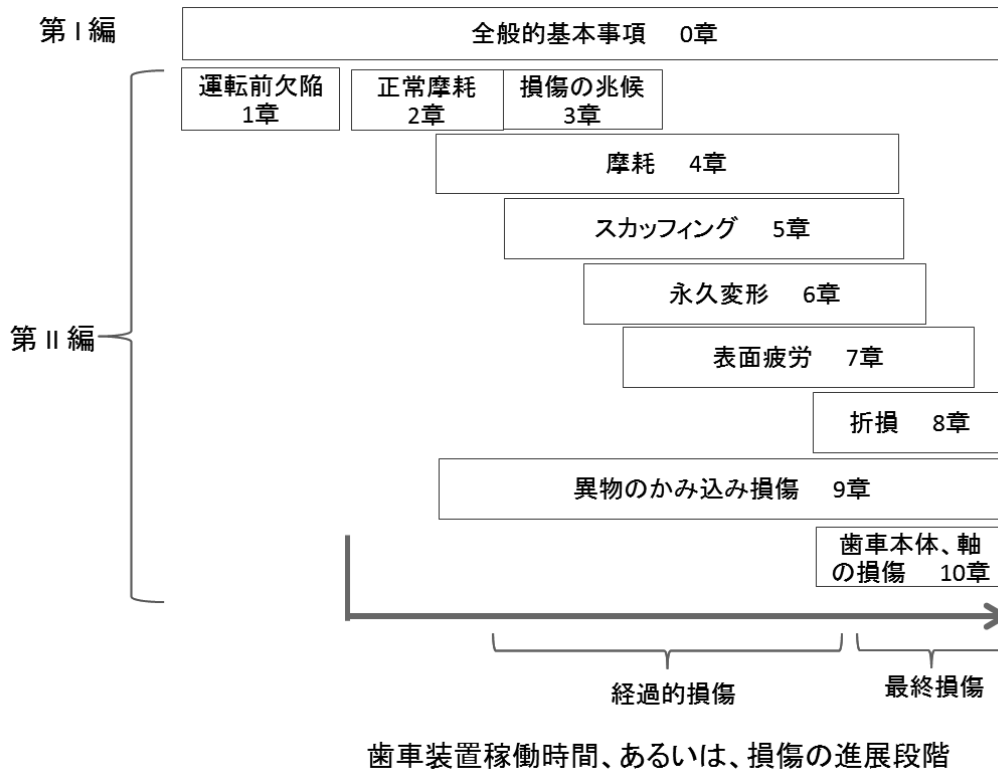
3. 成果の公表

日本機械学会 RC268 調査研究分科会で校閲作業中。

以下、「歯車損傷図鑑 改訂版 目次案」を掲載する。

目次

歯車の損傷の定義には、外観によるものと発生原因によるものとが混在している。本書では、前歯車損傷図鑑の編集方針を引き継ぎ、損傷の発展経緯を反映できるように、運転前欠陥、正常摩耗、損傷の兆候、損傷の兆候、損傷、と言う章節項の配列とした。その結果、本書の内容は次の目次の構成のように配列されている。



改定に際して	1
第 I 編	
0. 序論と全般的事項 (General information for gear trouble shooting)	5
0.1 社会環境と機械技術者の基本的態度 (Basic attitude of mechanical engineer)	
0.2 強い鉄を作るための基本的な方法 (Principle to make strong steel)	
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 歯先面取りの不同 (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. スカッフing、スコアリング (Scuffing、Scoring)
 - 5.1 高温スカッフing (Hot scuffing)
 - 5.2 低温スカッフing (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

塑性加工・表面改質研究室の成果

塑性加工・表面改質研究室 秋山雅義

平成 27 年度は、下記の発表がある。

(1)流体移送配管用ステンレスネジにおける焼付きメカニズムの検討

(2)Estimation of lubricity by numerical method on surface of NbC-reinforced tool for hot steel rolling

(3)Proposal of new specimen geometry for tension test restraining non-uniform deformation

以下、論文を掲載する。

流体移送配管用ステンレスネジにおける焼付きメカニズムの検討

塑学 *渡邊 祐介 (京工織大・院)

梅田 耕也 (梅田製作所)

塑正 飯塚 高志 (京工織大院)

塑正 秋山 雅義 (応用科学研)

1. 緒言

様々な機械製品に用いられるネジにおいて締結や開放時に雄ネジと雌ネジ間の摺動により焼付いてしまい、取り外しができなくなるという場面が度々見受けられる。この現象は生産性の低下をもたらし、実際の現場で問題となっている。その中でも食品や医療関係の分野では一般的なネジとは使用環境が大きく異なり、非常に焼付き易いと言える。例えば、不純物混入防止のために潤滑材の使用が制限されること、耐腐食性に注目されステンレスネジが用いられること^{1),2)}、座面の影響が少なく締結力がネジ面の接触に大きく依存すること等である。こういった点から上記分野で使用されるネジはより耐焼付き性が求められる。

本報告は上記分野のステンレスネジを対象として、焼付き発生メカニズムを調査し、その原因について考察する。

2. 締結方法および締結原理

本研究では実際に食品関係の分野等で使用されているネジを用いて焼付きに関する調査を行う。外観を Fig.1 に示す。対象は JIS B 0205 で規格される呼び径 16mm ピッチ 1mm の切削ネジである。締結時の概念図を Fig.2 に示す。まず、雄ネジの先端のテーパ部に流体移送用のプラスチックチューブを差し込み、押さえのステンレスリングをはめ込む。その上から雌ネジを締め込んでいく構造である。このとき Fig.3 のような原理で締結力が発生する。雌ネジが締め込まれていくとステンレスリングと接触し、リングを押し下げていく。リングとチューブ間の摩擦によりチューブも同様に押し下げられる。この構造によってチューブ内の流体が漏れないような仕組みである。このときチューブの変形に抵抗する力がリングを通して雌ネジに伝達し、雌ネジが図中上方向の力を受けることでネジ面に負荷がかかる。これは座面との接触前に締結力が上昇することを示しており、これらのことから本研究の対象が一般的なネジとは異なり、ネジ面に負荷がかかった状態で摺動する構造の締結体であることが判る。

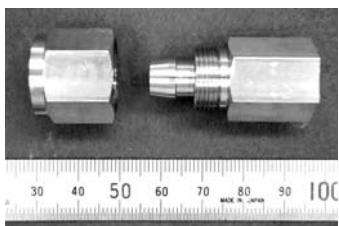


Fig.1 Example of a pair of stainless steel thread

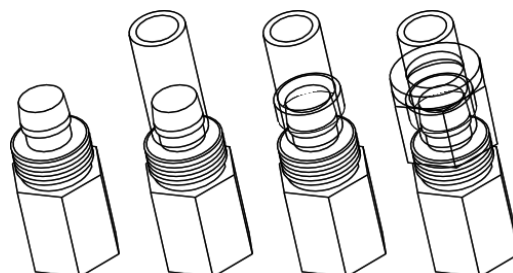


Fig.2 Schematic illustration of fastening operation

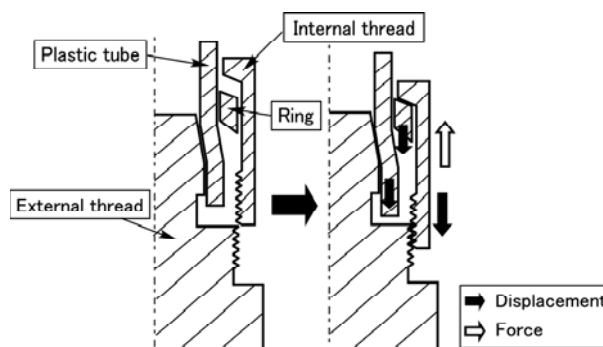


Fig.3 Fastening structure of threads

3. 焼付き現象

実際に対象ネジの使用環境に基づき、完全無潤滑下で締結実験を行った。この時の締結トルクの推移を Fig.4 に示す。トルクの計測は中村製作所製の 1/100Nm まで測定可能なデジタルトルクレンチを用いて行った。また、比較材料として S45C 炭素鋼ネジを用いた。ネジ山の数は不完全部を含むと雄ネジが 6 山、雌ネジが 9 山である。雌ネジの回転数を横軸に、締結トルクを縦軸に取りトルクの推移を示す。雌ネジを 3 回転締め込んだ時点で既にトルクが上昇していることが判り、座面との接触前に負荷がかかっていることが確認できる。ステンレスネジの場合、4 回転を超えるとトルクが大きく上昇するようになり、5 回転以降急激に上昇したため、焼付いたと判断した。また、トルクが 10Nm を超えた時点で解放が不可能であることが判り、これを焼付き判定の閾値とした。以上から、無潤滑下では 1 回の締結で焼付き解放できなくなるため、ネジとして機能しなくなることが判る。一方炭素鋼ネジではトルクの上昇は緩やかで最終的に約 7Nm に収束し、完全に締結させた後でも解放が可能であった。このことから鋼に比べるとステンレスの方が焼付き易いことが推察される。

焼付き発生過程を明らかにするために締結後のステンレスネジのネジ面の観察を行った。その一例として雄ネジを対象に締結前、雌ネジを 3 回転させた時、5 回転さ

せた時の写真を Fig.6 に載せる。測定箇所は Fig.5 中の四角で囲んだ部分に示す通りである。3回転させた時点で既に焼付きによる凝着物が確認でき、これは雄ネジの先端に該当する位置で起きている。さらに回転させるとこれが周方向に引きずられるようにして表面を傷つけ、摺動痕を形成していることが確認できる。5回転させたネジの表面には多くの箇所で焼付きによる凝着物が確認でき、3回転させたときよりもサイズが大きくなっている。焼付きが進行していることが判る。

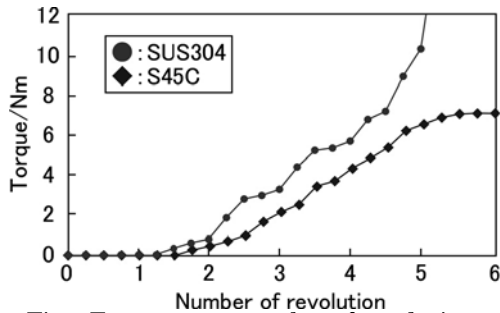


Fig.4 Torque every number of revolutions

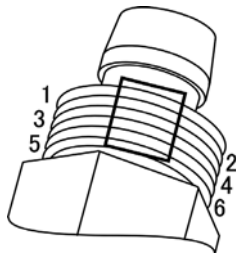
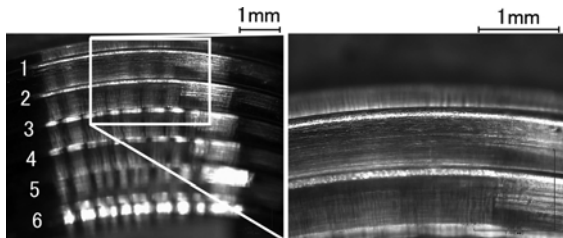
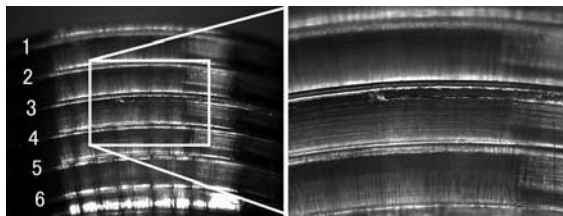


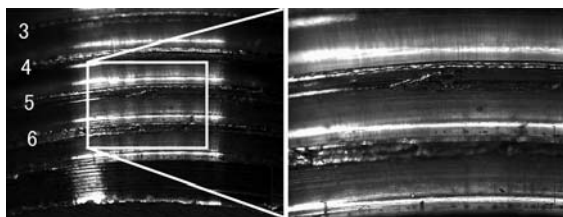
Fig.5 Observation point of external thread



(a) Before fastening



(b) 3times rotated



(c) 5times rotated

Fig.6 Flank condition of external thread

4. 焼付きメカニズムの考察

観察から得られた情報を基に焼付きのメカニズムについて考察する。雄ネジの先端の位置を起点として焼付きが発生する原因を明らかにするために、締結時の雌雄ネジ山同士の接触状態を調査した。その一例としてトルクが上昇し始める3回転させた時の接触状態を Fig.7 に示す。観察から雄ネジの先端部のみ接触しているわけではなく、ネジ面全体で接触していることが判る。ここで雄ネジ先端部で焼付く原因として考えられるのが、先端は体積が低部に比べ小さく、摩擦熱によって温度が上昇し易いため巨視的な凝着・融着が発生すると推測できる。また、さらに締結を進めると Fig.8 に示すように凝着した部分が周方向に移動しながら成長していき、最終的に解放不可能となる程の凝着となる。また、雄ネジテーパ部にチューブが押し込まれていく構造であるため、締結していくとより大きな負荷がかかる。噛み合うネジ山の数が増えることでネジ面の接触面積は増加するが、チューブによる抵抗と凝着物の成長が支配的となり、トルクが上昇していくと考えられる。これら2つの要因から凝着が広範囲で起こり、解放が不可となるような焼付きを生じていることが推察され、また4回転以降トルクの上昇率が高くなっていると考えられる。

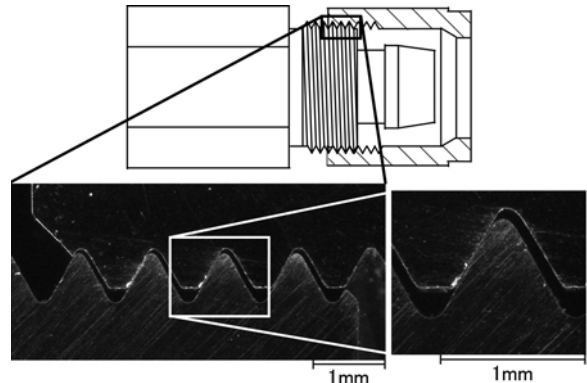


Fig.7 Contact view of external thread

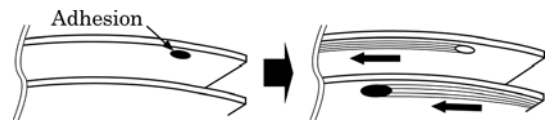


Fig.8 Process of adhesion

5. 結言

配管輸送用ステンレスネジにおける焼付き発生過程を調査し、そのメカニズムについて検討を行った。その結果、雄ネジ先端の位置で頻りに焼付きが発生することが明らかになった。また、焼付きがどのように進展するのかを調査し、解放不可となるまでのメカニズムを推察した。

参考文献

- 1) 小豆島明ほか：鉄と鋼，Vol.85(1999)，519.
- 2) 吉田彰ほか：日本機械学会，39-909(2001)，327.

Estimation of lubricity by numerical method on surface of NbC-reinforced tool for hot steel rolling

Masayoshi Akiyama *, Yoshifumi Higashigawa †

* Department of Mechanical and System Engineering, Kyoto Institute of Technology,
Gosho-Kaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585, Japan
e-mail: makiyama@kit.ac.jp, web page: <http://www.mesh.kit.ac.jp>

† Department of Mechanical and System Engineering, Kyoto Institute of Technology,
Gosho-Kaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585, Japan
e-mail: m3623041@edu.kit.ac.jp, web page: <http://www.mesh.kit.ac.jp>

ABSTRACT

It is known that the tool life for hot steel rolling extends ten times as long as that of conventional tool when the surface is reinforced by NbC powder using a Plasma-Transferred-Arc (PTA) welding technique^[1]. The reinforced tool is also applicable to stainless steel or Titanium^[2] but the mechanism operating on the surface for elongating the tool life has not been clarified yet. The authors have made clear the influences of size and fraction of NbC particle in the parent powder mix for PTA on the wear resistant characteristics of the reinforced tool. In the course of the past investigation it has been estimated that NbC grains on the tool surface may reveal lubricity when the tool is used at high temperature. In the present work attention is focused on the characterization of the surface of NbC grain on tools surface when it is exposed to high temperature. NbC changes to Nb₂O₅ at high temperature and Nb₂O₅ shows high lubricity. On the second stage of investigation attention is focused on the estimation of friction coefficient of Nb₂O₅ at high temperature. Elastic-plastic FEA is carried out on hot sheet rolling using Nb₂O₅ as lubricant. When no lubricant is applied on both surfaces of sheet the geometry of rolled sheet is flat, but when a lubricant is applied on one side of the sheet the rolled sheet curls exposing the lubricated side toward the outside depending upon the intensity of the coefficient of friction. The result of laboratory experiment showed that the value of friction coefficient of Nb₂O₅ is almost the same as that of graphite. The experimental result is compared to the result of FEA in order to estimate the value of the coefficient of friction. The estimated value is 0.15 when the coefficient of friction of ordinary hot rolling is 0.3.

REFERENCES

- [1] K. Tsubouchi, M. Akiyama and T. Okuyama, "Development and Optimization of Carbide-Reinforced Tools and Application to Hot Rolling of Stainless Steel", *Journal of Tribology*, Vol. 119, 10, 687-693 (1997)
- [2] M. Akiyama, K. Tsubouchi, T. Okuyama and N. Sakaguchi, "Applications for plasma transferred arc welded tools during hot steel tube making", *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 27, No.3, 183-188 (2000)

(注) 知財関係関連事項が絡んだため、国際会議COMPLAS XIIIの事務局の了解の下、事前提出資料はAbstractだけとし、本論文は未提出の形で、秋山がプレゼンテーションを行った。

PROPOSAL OF NEW SPECIMEN GEOMETRY FOR TENSION TEST RESTRAINING NON-UNIFORM DEFORMATION

RYO MORIMOTO^{*}, MASAYOSHI AKIYAMA[†]

^{*}2-20-9, Tomatsucho, Amagasaki-shi, Hyogo, 661-0003, Japan
e-mail: rmorimoto0@gmail.com

[†] Research Institute of Applied Science (RIAS)
49 Tanaka Ooi-cho, Kyoto, 606-8202, Japan
email: makiyama@rias.or.jp <http://www.riasa.or.jp/index.php>

Key words: Tension test, Elastic-plastic FEA, Stress distribution, Strain distribution, Non-uniformity, Propagation Mechanism

Summary. *Elastic-plastic FEA was carried out on a tension test of a sheet specimen in order to investigate the non-uniformity of stress and strain distributions. Attention was focused on the propagation mechanism of these non-uniform distributions that directly affects the precision of measured stress and strain and also on the transition of rupture point on the specimen according to the progress of the test. Analytical result showed that the length of parallel portion is the only factor that influences the uniformity of stress and strain among geometrical parameters. Compared to the ordinary specimen geometry specified by Japanese Industrial Standards (JIS) specimen with shorter parallel portion showed stability in suppressing the non-uniform distributions of stress and strain. A series of experiments was followed to check the validity of this result and also to propose a new geometry of specimen. The experimental result showed that the new specimen with a half parallel length well suppresses the occurrence of rupture in the vicinity of gauge point and ensures the centre rupture.*

1 INTRODUCTION

Tension test is a most commonly used mechanical testing of materials and the geometry of specimen has been specified by industrial standard by each country such as JIS or by international standard such as ISO. The specimens were designed so as to ensure the uniformity of measured stress and strain in tension test. However, it was presented that there is a case when non-uniform distribution arises^{[1], [2]}. Precise investigation on the propagation mechanism of these non-uniformities showed that a peak of stress appear in the vicinity of shoulder portion at the beginning of testing and the peak moves near to the gauge point in accordance with the progress of testing and finally to the specimen centre in the end^[3]. This result suggested that the peak shift might be one of the major causes of instability of rupture point in tension test. FEA was carried out to propose a new specimen geometry that well suppresses the instability of rupture point in tension test followed by a validation test.

2 ANALYSIS

The specimen adopted for the present purpose was JIS-5 of which geometry is given in Fig. 1. It was a sheet specimen and the thickness was 1mm. The symmetry of specimen was taken into consideration and only a quarter of the specimen was subjected to FEA. Because it was a sheet specimen plane-stress analysis was applied. The element adopted was a 4-noded 2D linear quadrilateral element. The code used for FEA was ELFEN developed at University of Swansea. It was assumed that the material was a carbon steel. The values of Young's modulus and Poisson's ratio were 200GPa and 0.15 respectively. In the plastic region the material was assumed to follow the n-power work-hardening rule shown by equation (1) and in Fig. 2. The value of n was 0.15.

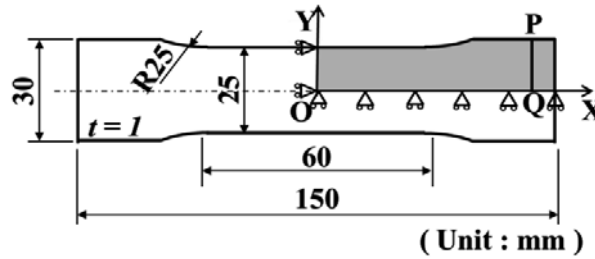


Fig. 1 Geometry of JIS-5 sheet specimen.

$$\sigma = F\varepsilon^n \quad (1)$$

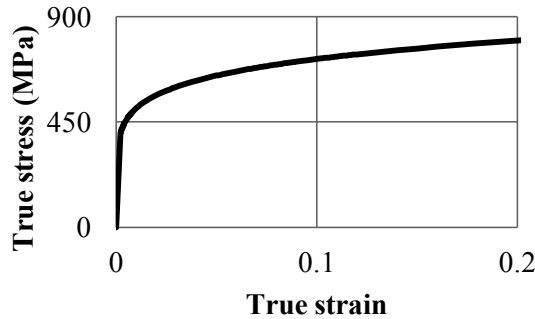


Fig. 1 True stress-true strain curve adopted in FEA.

Examples of stress and strain distributions are given in Fig. 3. On the elastic stage the distributions of stress and strain are mostly uniform in the parallel portion where stress and strain are measured. It is important to note that peaks of stress and strain appear in the vicinity of shoulder portion because of the stress concentration due to the specimen geometry. The distribution patterns of stress and strain change and non-uniformity patterns appear in the parallel portion. It is of important to note that peaks of stress and strain shift near to gauge point.

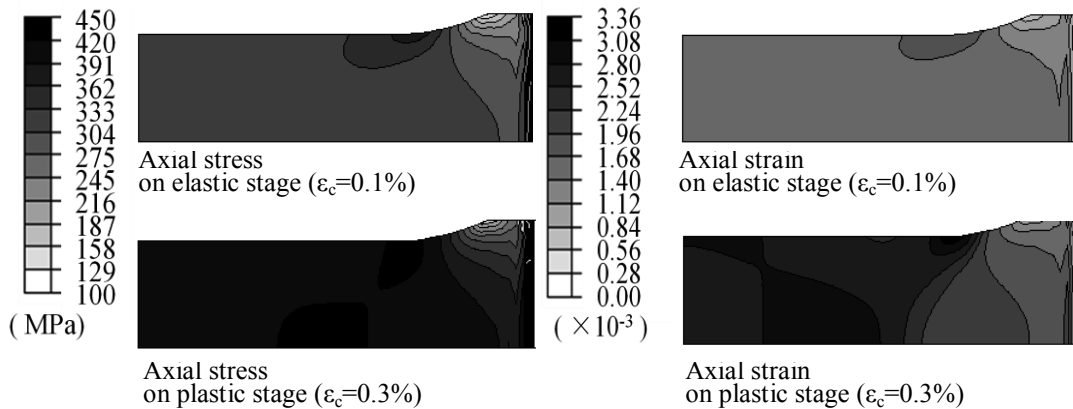


Fig. 2 Examples of stress and strain distributions on elastic and plastic stages.

The mechanism through which these non-uniform distributions on plastic stage arise is illustrated in Fig.4. Let us virtually divide the specimen into 3 portions P, S and G assigning virtual boundary lines as it is illustrated in Fig. 4(a). The parallel portion P tends to deform uniformly as shown in Fig. 4(b), whereas the deformation of shoulder portion S is not uniform in the axial direction because it has a constraint on the line facing the gripping portion G that does not deform throughout the test. However, the deformation should be continuous on the virtual boundaries because the specimen is a continuous body. As a result, the deformation of parallel portion becomes non-uniform as it is illustrated in Fig. 4(c).

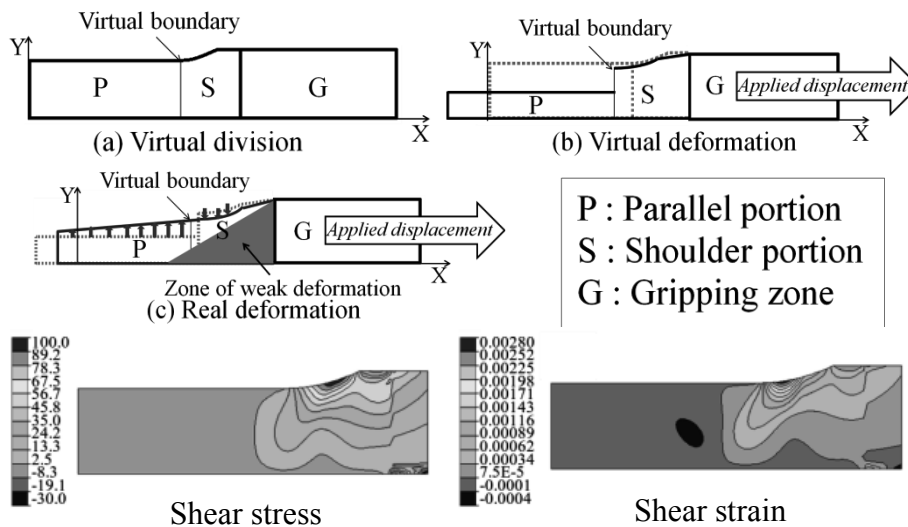


Fig. 3 Illustrated mechanism of occurrence of non-uniform deformation.

An illustrated mechanism of the peak shifts of stress and strain is given in Fig. 5. Shear strain appears on the shoulder portion due to the stress concentration and the hatched portion

in Fig. 5(a) tends to deform in the negative direction in Y-axis because of the landslide sinking by the shear deformation as it is illustrated in Fig. 5(b). However, the specimen is one continuous body and compensation of deformation occurs between the portion that is near to the X-axis and the portion near to the edge as it is shown in Fig. 5(c). For this purpose axial tensile stress must be added around the gauge point in the vicinity of X-axis, and compressive stress must be added on the portion near to the edge. As a result the peak shifts from the shoulder portion to the portion near to the gauge point.

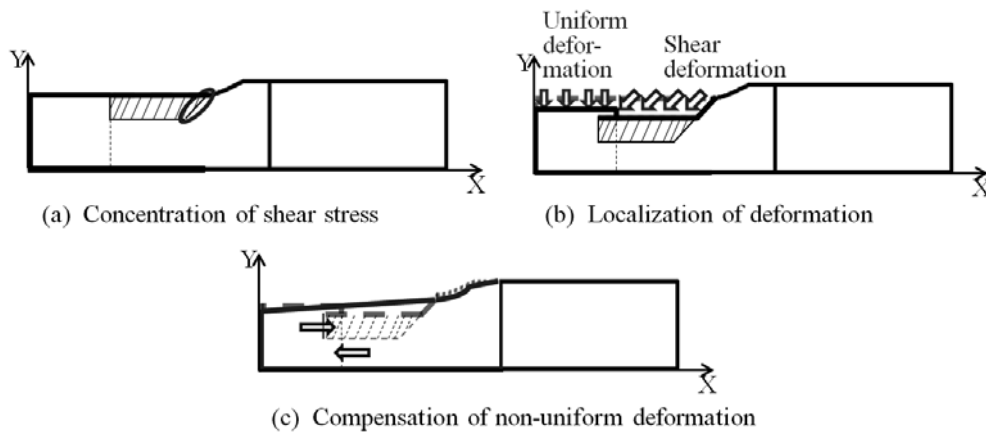


Fig. 4 Illustrated mechanism of peak shift of stress and strain.

Following the mechanism illustrated in Fig.4 and 5, the peaks of stress and strain shift from the shoulder portion R to the portion near to the gauge point M, and eventually shift to the centre C according to the increase in tensile strain. Illustration is given in Fig. 6. If the length L' becomes 0 centre rupture may be ensured.

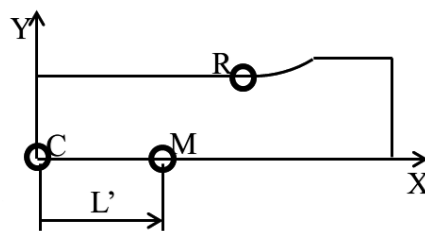


Fig. 5 Positions of occurrence of peak stress in tension test specimen.

This result suggests that peaks at R, M and C portions may induce the rupture at these three portions on each stage of tension test. In order to investigate the validity of this hypothesis evaluation was given of the yield criteria by Tresca given by equation (2) and by von Mises given by equation (3) at these three points.

$$\sigma_T = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right\}} \quad (3)$$

The parameter changed was the length L of the parallel portion. The major concern was the influence of L on the peak shift from M to C . In addition to the peak shift attention was focused on the uniformity of axial stress distribution on the cross section at centre that must be ensured. For this purpose an index Γ was introduced of which definition is the average axial stress on the centre cross section divided by the axial stress at the centre. The distribution of axial stress on the centre cross section is smooth, and when this value is 1.0 it means that the stress distribution is almost uniform. When the deviation from 1.0 is large it means that the uniformity of stress is not maintained or the stress state is tri-axial on the centre cross section. The influences of L on L' and Γ are shown in Fig. 7. There is a slight difference between the results drawn by using von Mises' criterion and Tresca's criterion, but the results are mostly the same. As soon as L becomes a half length of the standard specimen, i.e. $L=15\text{mm}$, the peak at M disappears. This result suggests that the possibility of rupture in the vicinity of gauge point may be suppressed by shortening the parallel portion to a half of that of the standard specimen. It may be allowed to shorten the parallel length even to one-third of the standard specimen. There is little influence of L on Γ on both cases and it may be concluded that the uniformity of axial stress on the centre cross section is maintained, i.e. the precision of measured stress is maintained. It may be concluded from this result that adoption of short specimen can contribute to the stabilization of the tension test.

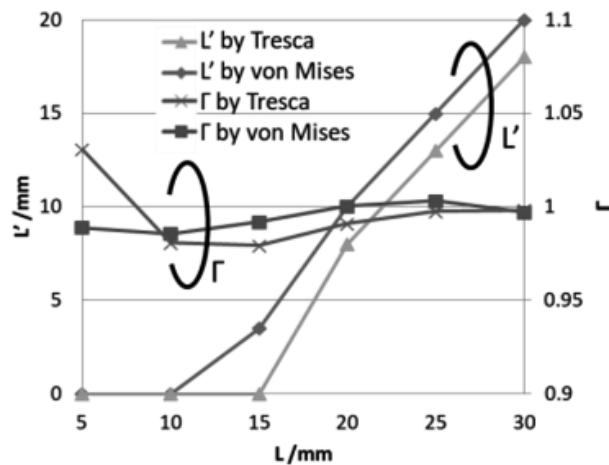


Fig. 6 Influences of length of parallel portion on peak shift and uniformity of stress on centre cross section ($\epsilon_c=1\%$).

3 VALIDATION

Tension test was carried out to validate the result of FEA. Two types of specimens shown in Fig. 8 were prepared. The specimen with parallel portion of 24mm was a proportional contraction of JIS-5 specimen, and the other specimen had a one-third parallel length of the former. The material was a carbon steel with 0.45% carbon content.

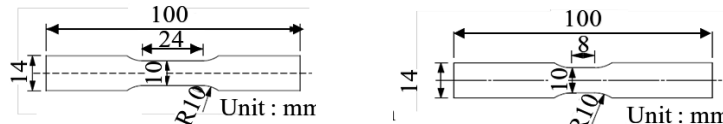


Fig. 7 Geometry of specimens used for validation test.

In order to control the ductility, or brittleness, specimens were subjected to thermal treatment of water-quenching from the temperature of 1000C followed by tempering at various temperatures ranging from 200C to 680C. Comparison is given in Fig. 9 of the hardness of final specimens. The hardness is uniform over the parallel portion and in the vicinity of shoulder portion. It is assumed that the mechanical property of each specimen is uniform over the portion of the present concern.

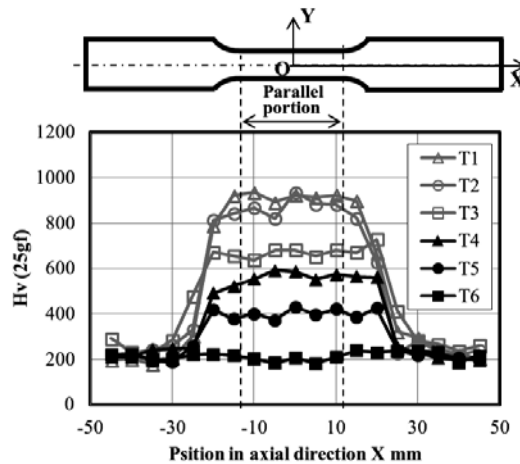


Fig. 8 Results of Vickers hardness test of specimens after thermal treatment.

The result of tension test at cross head speed of 1mm/min is shown in Fig. 10 for specimens with standard geometry and Fig. 11 for short specimens. It is clearly shown that there is no occurrence of the rupture at M portion for short specimens whereas the frequency of occurrence of the rupture at M portion is not negligibly small. This result suggests that adoption of short specimen stabilizes the testing. It is necessary to repeat the testing again when rupture occurred at portion other than centre of specimen. It is highly expected that short specimen helps reduction in redundant testing.

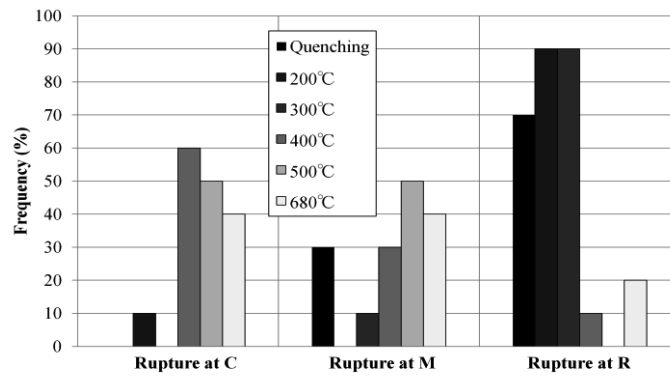


Fig. 9 Frequency of occurrence of rupture on standard specimens.

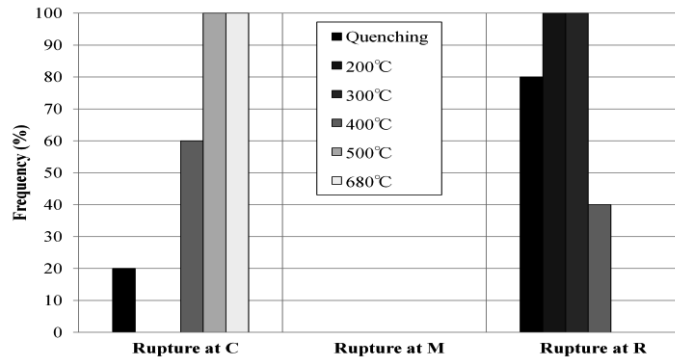


Fig. 10 Frequency of occurrence of rupture on short specimens.

4 DISCUSSION

Additional FEA was carried out to evaluate the influences of material properties on the above mentioned result. The parameters changed in the analysis were n for work-hardening ratio n and the initial yield stress σ_y as shown in Fig. 12. The geometry was also changed. The result is shown in Fig. 13. No strong influence of the material properties is observed on the conclusions obtained for the initial material.

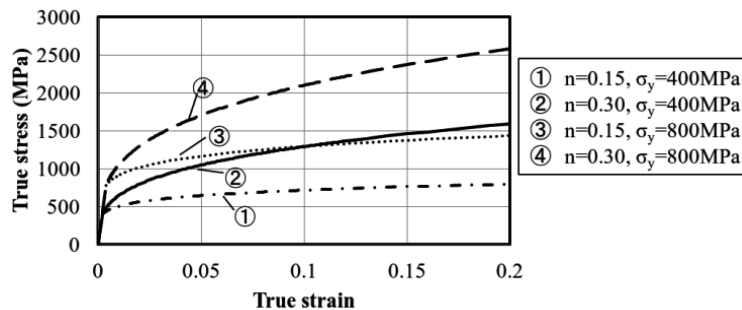


Fig. 11 Stress-strain curves for additional FEA.

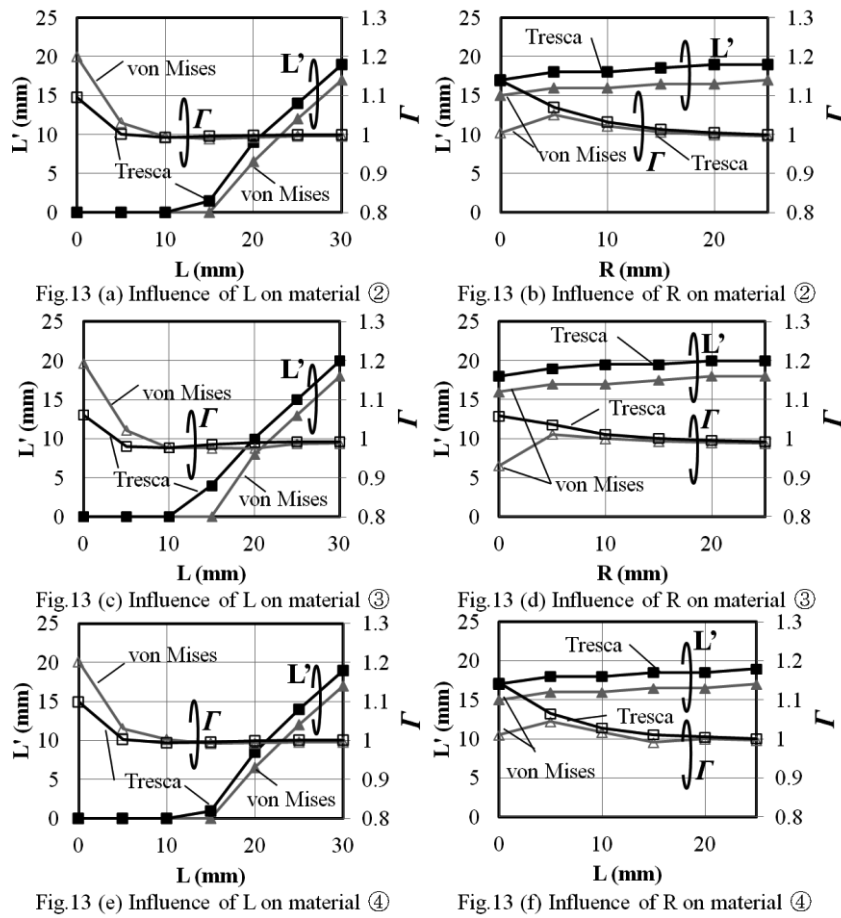


Fig. 13 Influences of material properties on shortening effect of specimen.

5 CONCLUSIONS

Elastic-plastic FEA was carried out to evaluate the precision and stability of stress and strain to be measured by tension test of a sheet specimen. Attention was focused on the peak shifts of stress and strain according to the progress of the test. Evaluation of the geometrical parameters of specimen on the peak shifts suggested that shortening of the parallel length of specimen suppresses the rupture without the range of centre portion. A series of tension test followed to verify the validity of the numerical analysis. Proposed short specimen can cut the number of redundant test

REFERENCESIONS

- [1] Katsuki, G. and Akiyama M., Precision of stress-strain curve obtainable by tension test, COMPLAS-X, (2009):451
- [2] Morimoto, R. and Akiyama, M., Propagation Mechanism of Non-uniform Distribution of Stress and Strain in Tension Test, COMPLAS-XII, (2013): 631
- [3] Morimoto, R. and Akiyama, M., CAMP-ISIJ, 27(2014), 942, CD-ROM

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。一例を Fig. 1 に示すが発明「超電導電力変換器」(長村光造、中村武恒、岡徹雄) 特許第 5497642 号の分割として申請した特願 2014-043518 について、平成 27 年 11 月 13 日に特許第 5835377 号として登録された。

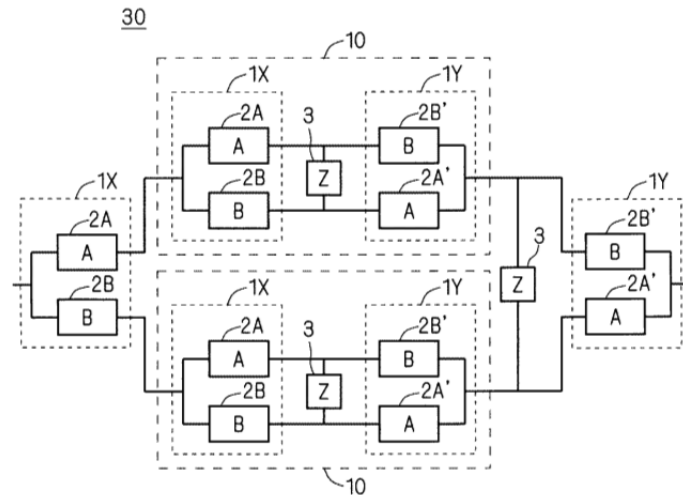


Fig. 1 An example of electric circuits using superconducting elements (A and B) proposed in the patent #5835377

今年度の主要目的は超電導インバータの基礎構成の再検討をすることであった。昨年度まで磁気の付与方法として電磁石を用いてきたが、永久磁石を用いて磁気を付与方法を検討した。その前提として用いる超電導素子は臨界磁場が 0.45 T の BSCCO-2223 テープ線材とした。そこで NdFeB 系永久磁石を用いて超電導インバータの基礎構成を検討した。基本的には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である。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ことが可能であることを数値計算により明らかにした。その結果をもとに次年度には具体的に超電導インバータを設計・製作することにした。

3. 成果の公表

特許第 5835377 号 “超電導電力変換器”、発明者：長村光造、中村武恒

報告書作成日 平成 28 年 6 月 27 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。また J-PARC において線材中の局所歪を測定するとともに超電導成分の可逆限界歪量を明らかにした。本年度は機械的性質を中心にその成果を下記専門書の 1.8 章として出版した。すなわち Type HT-CA (銅合金)、Type HT-SS (ステンレス)、Type HT-NX (ニッケル合金) の 3 種類の製品について調査を行った結果を報告した。調査項目は液体窒素温度における臨界電流、その一軸歪依存性、室温および液体窒素温度における機械特性であった。これらのテープ線材は複合材料であり銅合金、ステンレスあるいはニッケル合金テープを高温でラミネートするときに予歪を付与すること、高温からの冷却により超電導層に圧縮の残留歪が付与されている。これらの線材の応力-歪の関係を複合則にもとづき解析をすすめたところ、超電導層が引張歪により破断するときの応力(R_{atr})、ひずみ(A_{atr})は残留歪および構成成分の弾性定数および体積分率により決められることが明らかとなった。特に Fig.1 に示すように最近開発されたニッケル合金シートをラミネートした Type-HT-NX 線材の 95%臨界電流に対応する降伏強度が 500 MPa と非常に高いことを合理的に説明することができた。

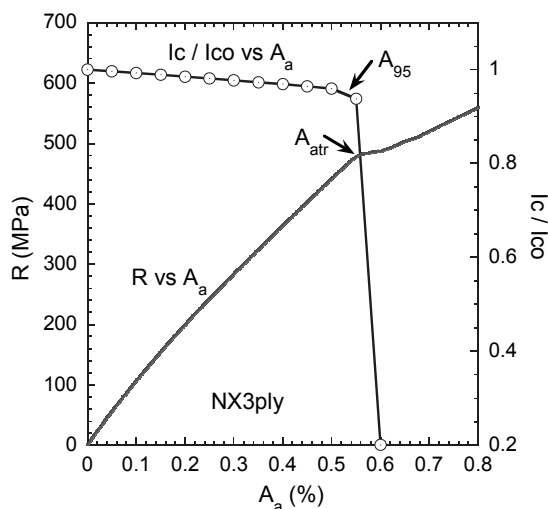


Fig. 1 Stress versus strain relation and strain dependence of the normalized critical current at 77 K for the NX3ply Bi2223 wire.

3. 成果の公表

Kozo Osamura; “MECHANICAL PROPERTIES OF Bi-2223 WIRES” in CHAPTER 1.8 of
“Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires”, edited by K Sato (2015)
World Scientific Publishing Co Pte Ltd, ISBN-13: 9789814749268 (published in Jan., 2016)

報告書作成日 平成 28 年 6 月 27 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ている。さらに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、提唱される理論がすべての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どうか検証する。さらに圧縮破断歪、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

Superpower, SuNAM 等の実用 REBCO 超電導線の臨界電流の一軸歪依存性に関して Fig.1 に示すように(a)単純に引張歪を印加する方法、(b)springboard に貼り付けて圧縮から引張の全一軸歪を印加する方法で測定した。一方計算により求めた(a), (b)の条件により生ずる 77K における超電導層に加わる熱歪を考慮した局所歪に対して臨界電流をプロットすると(a),(b)の両データを合理的に説明することができた。つまり臨界電流の真の歪依存性を知るためには、超電導層そのものに加わる局所歪に対する考察が必要であることを実証し、秋の低温工学・超電導学会で発表した。

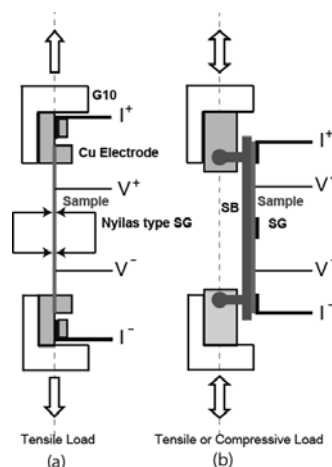


Fig. 1 Two techniques for evaluating the uniaxial strain dependence of I_c , where G10 is insulator, SG is strain gage, and SB is springboard, respectively.

すなわち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。島津製作所製引張試験機を用い試料部分を液体窒素に浸漬し、試料に電圧端子を取り付け、チャック部分から電流を流して I_V 測定を行い臨界電流及び n 値を決定した。また Spring-8 BL45XU において引張試験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。つまり(a)のように引張歪を印加して測定すると $A>0$ の範囲での臨界電流の変化を調べることができる。(b)の場合は試料テープをハンダ付けした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臨界電流を測定することができる。Superpower テープについての結果は $A>0$ の領域で両者の臨界電流の印加歪依存性を見ると、その依存性に違いがあることが明らかとなった。(b)の条件では臨界電流の歪依存性に極大が現れる。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起因すると考えられる。そこで Tape そのもの、スプリングボードにハンダ付けした Tape の各々について室温で測定した局所歪をもとに計算により 77 K における REBCO 超電導層に生起する局所歪 A_{REBCO} を求めた。局所歪 A_{REBCO} の関数として規格化した臨界電流をプロットし直した。両者のデータは A_{REBCO} について滑らかに連続して接続していること、臨界電流の極大が圧縮歪側に位置するようになった。また SuNAM テープについても同様の結果を得ることができた。

3. 成果の公表

(1)X. Jin a, K. Osamura, S. Machiya, K. Kajiwara, T. Shobu, H. Maeda; “Effect of epoxy impregnation on strain distribution of materials in Bi2223 superconducting coils by using synchrotron X-ray diffraction”, Journal of Alloys and Compounds, 650, 444-449 (2015)

(2)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”、2015 年度秋期低温工学・超電導学会講演概要集、92、220 (2015)

報告書作成日 平成 28 年 6 月 27 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た。臨界電流測定および引張試験の国際ランδροビンテストを当研究所で担当した。

最近では複数のメーカーから $REBa_2Cu_3O_{6+x}$ (RE=Y, Gd) テープ線が市販されるまでになってきている。これらの線材を超電導機器に使用するためには、諸特性を共通化された測定方法で比較検討することが求められる。ここでは特に 77K における機械特性、臨界電流の歪依存性等の測定結果を報告するとともに、測定方法の標準化 (規格化) について検討した。供試料には市販されている A, B, C, D の 4 種類の REBCO テープ線材を用いた。島津製作所製引張試験機を用いチャック間距離 10 cm で国際標準 IEC-61788-XX に準じて室温で引張試験を行った。さらに試料部分を液体窒素に浸漬し、同様の引張試験を行った。さらに引張試験とほぼ同様の試料配置で試料に電圧端子を取り付け、チャック部分から電流を流して $I-V$ 測定を行い臨界電流及び n 値を決定した。Fig. 1 に示すように室温および 77K で引張試験を実施した結果によれば、初期勾配および 0.2% 程度引張った後除荷したときの勾配とから決定したヤング率および 0.2% 耐力については一般的な傾向としてヤング率は 5% 程度 77K で大きくなること、降伏後の耐力は低温になると大幅に上昇することが明らかとなった。

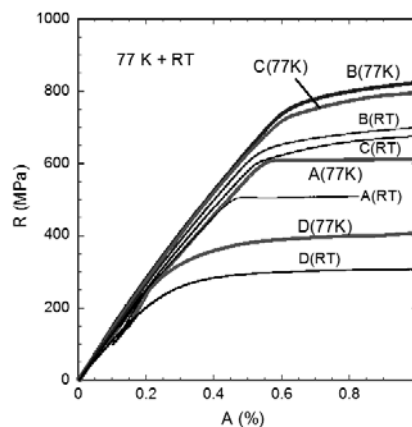


Fig. 1 Stress versus strain curves for 4 kinds of REBCO tapes at room temperature and 77 K.

臨界電流の引張歪依存性を次の手順で行った。まず引張歪ゼロの状態では臨界電流を測定し I_{c0} とする。次に A_a まで引張歪を印加した状態で測定した臨界電流を I_c とする。さらに引張応力をゼロにした状態での臨界電流を I_{cr} とする。結果からは I_c は引張歪が増加すると減少する。その原因は(1)様々な超電導特性を支配するパラメータの歪依存性に由来する可逆歪効果と(2)超電導層の破断によるものとが考えられる。ここで I_{cr} は外部応力をゼロにした時の値であり、もし超電導層の破断による劣化がなければ I_{c0} に戻るはずである。大きな引張歪を印加した後では I_{cr} は I_{c0} に戻らない。つまり I_{cr} / I_{c0} の1からの減少を観測することにより可逆限界歪を見定めることができる。ここでは $I_{cr} / I_{c0}=0.99$ を実用的な可逆限界歪/応力と定義して、試料ごとの値を実験的に求めた。これらの実験結果をもとに可逆限界歪についての定義を国際標準として提案することを検討した。

3. 成果の公表

- (1)Y Yamada, G Nishijima, K Osamura, H S Shin, W Goldacker, M Breschi and P Ribani; “International round robin test of the retained critical current after double bending at room temperature of Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires”, Superconductor Science and Technology, 29, 025010 (2016)
- (2)長村光造、町屋修太郎、西島元 ; “実用 REBCO テープ線の 77K における機械—超電導特性” 2015 年度春期低温工学・超電導学会講演概要集、91、88 (2015)

報告書作成日 平成 28 年 6 月 27 日

文化財・美術品等の保存と普及のための アーカイブ作成法の研究・開発

特別研究員 井手亜里
京都大学大学院工学研究科教授

1. 目的

様々な大型の絵画等を超高精細にデジタル化し、実物の持つ情報（寸法、色彩）を正確に記録、表示できる技術について研究開発を行う。

2. 成果

本研究の成果の事業化と国際展開へのさらなる発展を目指して、民間企業との共同研究、および公官庁からの事業委託によるプロジェクトを実施した。企業とのプロジェクトは株式会社便利堂と共同で「重要文化財指定のガラス乾板デジタル化保存と法隆寺の焼損壁画のフルカラー再現」を目指すものであり、公益財団法人京都産業 21 の補助金を受けている。もう一つの大型プロジェクトは文化庁より委託され、2年目を迎えた「ミャンマー連邦共和国の文化遺産のデジタル化保存プロジェクト」である。

ここで本研究開発について、主に二つの開発内容に分けてそれぞれについて述べる。

第一部としては、二次元・三次元対象物の高解像画像を取得するための技術開発と機器設計、そして製造があげられる。画像取得機器は、光源、光学機器（カメラ、レンズ、フィルター等）、フレーム構造（機器全体の形状を形成し、縦型、横型、回転型等がある）の三つの要素で構成され、これらを最適に組み合わせることによって設計・製造を行ってきた。光源開発においては、LED技術に基づき、周波数および空間的強度分布の均一性を高めた最高水準の光源を設計することに成功した。光学機器については、レンズとカメラのシステムを最適化し、 $5\mu\text{m}/\text{pixel}\sim 300\mu\text{m}/\text{pixel}$ で画像の空間解像度の柔軟性を高めることによって、画像の色彩や成分の高度な分析が可能となった。フレーム構造の設計については、より自由度の高い仕組み（モジュール化）を開発することで、対象物の形状やサイズに合わせた構成にすることが可能となった。また、博物館・美術館等での展示物などは、その場において、展示したままの撮像が容易に可能となる構造となった。

第二部としては、文化財や重要美術品の保存・修復等に役立つ情報提供を目的として、取得した画像を分析するためのソフトウェアを開発した。光源と対象物間の関連性をより正確に解明することが可能な新たなアルゴリズムの開発を実現できた。従来のアルゴリズムは、画像取得システムのスペクトル特性に関する既知の情報か学習データを必要としていたが、新たな物質のスペクトル特性を把握することが可能な新規の学習データの探索が必要になってきた。当研究室において新しいソフトウェア、計算の量を削減し実務的な方法を開発した。それにより、画像のより多くのスペクトルと空間分析が増すことになり、得られる情報量も格段に増加した。

研究目的は、ハードウェアとソフトウェアとの両方の開発を行う総合的なイメージングシステ

ムの構築であり、これはこの研究開始当初より掲げていた目的であった。これについては、今年度、すべての点において、これまで掲げてきた目標に達することができたと認識している。また、これらの研究成果を現場である博物館・美術館等（日本、トルコ、アメリカ合衆国、中華人民共和国、ミャンマー、イランなど）にて、世界最高レベルの文化財、美術品、国宝等に应用させ、その有効性を確認することができた。さらには、文化財等の現場において実用性と機動性、可搬性にも優れた新たな機器の設計と開発をも同時に行ってきた。本研究成果は、分析的イメージングが文化財の保全・保存科学における一般的かつ、最も代表的な手段と成り得ることを示すだけでなく、その応用範囲は文化財や美術品にとどまることなく、防災や環境管理、製造管理等への活用もおおいに期待されるものである。

本年度（27年度）は、日本国文化庁の支援プロジェクトとして、ヤンゴン大学（ミャンマー）に文化財デジタル化拠点を設定した。それにより、ミャンマー国内のその他の主要大学、博物館・美術館等でのデジタル化プロジェクトを行うことが可能となった。そして、これらの研究・実験成果を27年9月および28年2月のシンポジウムで発表・公開をした。その他には26年の香港での共同研究の一環として、27年も香港城市大学と共同で人材育成プログラムを実施し、中国の主要大学からの文化財、図書館の専門家に日本の最新のデジタル技術を紹介した。また、京都大学井手研究室の画像入力・処理技術は中国（内モンゴル）においても、現存する約1千年前の古墳壁画であり世界的にも類のない壁画群をデジタル化することに成功した（25年度に続き3回目）。

その他にも日本国内において多数の博物館、美術館、また主要な大学においてこれらの研究、発表、シンポジウム等を実施し、評価を得ることができた。

3. 成果の公表

- (1) Pengchang Zhang, Tomoyuki Takeda, Jay Arre O. Toque, Ari Ide-Ektessabi; A Line Scan Camera Based Structure from Motion for High Resolution 3D Reconstruction, Journal of Cultural Heritage, Vol.16, Issue 5, pp.656-663, 2015
- (2) Pengchang Zhang, Jay Arre Toque, Ari Ide-Ektessabi; Influence of Imaging Resolution on Color Fidelity in Digital Archiving, Journal of the Optical Society of America A, Vol.32, Issue 11, pp.2044-2048, 2015
- (3) Pengchang Zhang, Jay Arre Toque, Peng Wang, Ari Ide-Ektessabi; Identification, Analysis and Elimination of Craquelures in Old Oil Painting Images, Proc. IS&T Archiving, Vol.2015(1), pp.83-86, 2015
- (4) Jay Arre Toque, Pengchang Zhang, Peng Wang, Ari Ide-Ektessabi; High-resolution multispectral scanning for mesoscopic investigation of discoloration of traditional Japanese pigments, Computational Color Imaging Lecture Notes in Computer Science Volume, Vol.9016, pp.195-207, 2015

報告書作成日 平成28年7月5日

磁性体球殻に関する渦電流問題

特別研究員 島崎眞昭

1. 目的

電気機器、電子機器の高度設計のため高精度の磁界解析、渦電流解析の必要性が高まり、有限要素法や境界要素法などの数値解析手法の研究が進展している。これとともに数値解析手法の精度や性能を評価するためのベンチマーク問題の重要性も高まっている。基本的な問題に関する解析解はそれ自身に関する興味、有用性のほかに有限要素法などの数値解析手法およびソフトウェアのベンチマーク問題としての重要性を有している。特に商用ソフトウェアはブラックボックスになるのでベンチマークは重要である。本稿では円形コイルに流れる交流電流により軸対称的に励磁された球殻を流れる渦電流および球殻内外の磁気ベクトルポテンシャル、磁束密度に関する級数解を導出し、商用ソフトウェアによる解析結果と比較し、ベンチマーク問題としての有用性を確認することを目的とする。

2. 成果

(1)ベンチマーク問題の設定

真空中で、図1に示すように、球座標系 (r, θ, φ) の原点に中心を持つ内径 a 、外径 b 、透磁率 μ_1 、導電率 σ_1 の球殻があり、 $r = c, \theta = \theta_0$ の位置に線状のコイルがあるとす。コイルに $I_0 \times \exp(j\omega t)$ の交流電流を流したときに球殻に流れる渦電流および球殻内外の磁気ベクトルポテンシャル、磁束密度を求める。これを問題1とする。

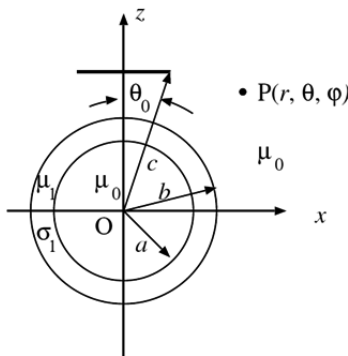


図1 軸対称励磁球殻渦電流問題

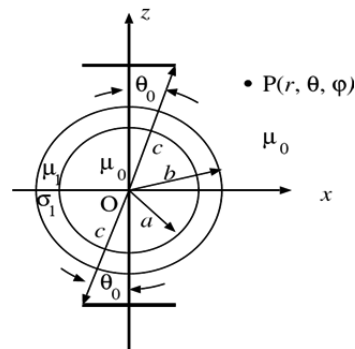


図2 軸対称励磁球殻渦電流問題2

本稿で述べる手法は、類似の問題として、図2に示すように $r = c, \theta = \theta_0$ のほか $r = c, \theta = \pi - \theta_0$ にもコイルを配置し、2個のコイルに同じ電流を流す場合も扱うことができる。この問題はHelmholtzコイルの中心に磁性体球殻を置いた問題である。この問題を問題2とする。

(2)問題の級数解

問題1について考える。準定常状態を考えるので電界、磁界、ベクトルポテンシャルなどは外部電流と同じ時間因子を持つ。問題の対称性を利用すると球座標での磁気ベクトルポテンシャルは球座標での A_φ 成分のみをもちHelmholtzの方程式を満たす。

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} A_\varphi \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial A_\varphi}{\partial \theta} \right) - \frac{A_\varphi}{r^2 \sin \theta} + k^2 A_\varphi = -\frac{\mu_0 I_0}{c} \delta(r-c) \delta(\theta-\theta_0) \quad (1)$$

ただし、真空中で $k=0$ であり、磁性体中で $k = \sqrt{\frac{\omega \mu_1 \sigma_1}{2}} (1-j)$, であり、 $\delta(x)$ はディラックのデルタ関数である。磁束密度の r 成分と θ 成分は次式で与えられる。

$$B_r = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta A_\varphi), \quad B_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\varphi)$$

式 (1) の斉次式はルジャンドルの陪微分方程式 ($m=1$) と球ベッセルの微分方程式に変数分離できるので $A_\varphi(r, \theta)$ を $A_\varphi(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n(r)}{d_n} P_n^1(\cos \theta)$ 形の級数に展開する。ただし、

$d_n = \frac{2n(n+1)}{2n+1}$ であり、 $P_n^1(\cos \theta)$ はルジャンドルの陪関数である。 $R_n(r)$ に関する微分方程式は以下の様になる。

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left\{ r^2 \frac{d}{dr} R_n(r) \right\} + \left[k^2 - \frac{n(n+1)}{r^2} \right] R_n(r) = -\frac{\mu_0 I_0}{c} \delta(r-c) P_n^1(\cos \theta_0) \sin \theta_0$$

$k \neq 0$ のとき微分方程式は球ベッセルの微分方程式で、その一般解は $j_n(kr), n_n(kr)$ であり、 $k=0$ のとき、一般解は $\frac{1}{r^{n+1}}, r^n$ である。そこで r の範囲に従って $R_n(r)$ を以下の様に $R_{i,n}(r)$ とかく。

$$R_{1,n}(r) = \frac{c^{n+1}}{r^{n+1}} x_{1,n}, \quad c \leq r$$

$$R_{2,n}(r) = \frac{c^{n+1}}{r^{n+1}} x_{2,n} + \frac{r^n}{c^n} x_{3,n}, \quad b \leq r \leq c$$

$$R_{3,n}(r) = j_n(kr) x_{4,n} + n_n(kr) x_{5,n}, \quad a \leq r \leq b$$

$$R_{4,n}(r) = \frac{r^n}{a^n} x_{6,n}, \quad 0 \leq r \leq a$$

磁性体表面における磁束密度法線成分の連続性、磁界の接線成分の連続性より次の境界条件を得る。

$$R_{1,n}(c) = R_{2,n}(c)$$

$$\left[\frac{dR_{1,n}(r)}{dr} \right]_{r=c+0} - \left[\frac{dR_{2,n}(r)}{dr} \right]_{r=c-0} = -\frac{\mu_0 I_0}{c} P_n^1(\cos \theta_0) \sin \theta_0$$

$$R_{2,n}(b) = R_{3,n}(b)$$

$$\frac{1}{\mu_0} \left[\frac{d\{rR_{2,n}(r)\}}{dr} \right]_{r=b+0} = \frac{1}{\mu_1} \left[\frac{d\{rR_{3,n}(r)\}}{dr} \right]_{r=b-0}$$

$$R_{3,n}(a) = R_{4,n}(a)$$

$$\frac{1}{\mu_1} \left[\frac{d\{rR_{3,n}(r)\}}{dr} \right]_{r=a+0} = \frac{1}{\mu_0} \left[\frac{d\{rR_{4,n}(r)\}}{dr} \right]_{r=a-0}$$

これより、係数 $x_{i,n}$ に関する次の連立一次方程式が得られる。

$$x_{1,n} - x_{2,n} - x_{3,n} = 0$$

$$(n+1)x_{1,n} - (n+1)x_{2,n} + nx_{3,n} = \mu_0 I_0 P_n^1(\cos \theta_0) \sin \theta_0$$

$$\left(\frac{c}{b}\right)^{n+1} x_{2,n} + \left(\frac{b}{c}\right)^n x_{3,n} - j_n(kb)x_{4,n} - n_n(kb)x_{5,n} = 0$$

$$\mu_s \left\{ n \left(\frac{c}{b}\right)^{n+1} x_{2,n} - (n+1) \left(\frac{b}{c}\right)^n x_{3,n} \right\} + \{j_n(kb) + kbj'_n(kb)\}x_{4,n} + \{n_n(kb) + kbn'_n(kb)\}x_{5,n} = 0$$

$$j_n(ka)x_{4,n} + n_n(ka)x_{5,n} - x_{6,n} = 0$$

$$j'_n(ka)x_{4,n} + n'_n(ka)x_{5,n} - \frac{\mu_n}{ka} x_{6,n} = 0$$

$$\text{ただし、} \mu_s = \frac{\mu_1}{\mu_0}, \mu_n = (n+1)\mu_s - 1$$

この連立1次方程式の解析解を示す。

$$x_{1,n} = \left\{ 1 + \left(\frac{b}{c}\right)^{2n+1} \frac{G_n}{F_n} \right\} \times \frac{\mu_0 I_0}{2n+1} P_n^1(\cos \theta_0) \sin \theta_0$$

$$x_{2,n} = \left(\frac{b}{c}\right)^{2n+1} \frac{G_n}{F_n} \times \frac{\mu_0 I_0}{2n+1} P_n^1(\cos \theta_0) \sin \theta_0$$

$$x_{3,n} = \frac{\mu_0 I_0}{2n+1} P_n^1(\cos \theta_0) \sin \theta_0$$

$$x_{4,n} = kb \left(\frac{b}{c}\right)^n \left[\{kbn'_n(kb) + (n\mu_s + 1)n_n(kb)\} \frac{G_n}{F_n} + kbn'_n(kb) - \mu_n n_n(kb) \right] \times x_{3,n}$$

$$x_{5,n} = -kb \left(\frac{b}{c}\right)^n \left[\{(n\mu_s + 1)j_n(kb) + kbj'_n(kb)\} \frac{G_n}{F_n} - \mu_n j_n(kb) + kbj'_n(kb) \right] \times x_{3,n}$$

$$x_{6,n} = \left(\frac{b}{a}\right) \left(\frac{b}{c}\right)^n \left[\{kbn'_n(kb) + (n\mu_s + 1)n_n(kb)\} \frac{G_n}{F_n} + kbn'_n(kb) - \mu_n n_n(kb) \right] / H_n \times x_{3,n}$$

ただし

$$F_n = k^2 ab \{j'_n(kb)n'_n(ka) - n'_n(kb)j'_n(ka)\} + \mu_n kb \{n'_n(kb)j_n(ka) - j'_n(kb)n_n(ka)\} \\ - (n\mu_s + 1)ka \{n_n(kb)j'_n(ka) - n'_n(ka)j_n(kb)\} + (n\mu_s + 1)\mu_n \{n_n(kb)j_n(ka) - j_n(kb)n_n(ka)\}$$

$$G_n = k^2 ab \{n'_n(kb)j'_n(ka) - n'_n(ka)j'_n(kb)\} + \mu_n ka \{j_n(kb)n'_n(ka) - n_n(kb)j'_n(ka)\} \\ + \mu_n kb \{j'_n(kb)n_n(ka) - n'_n(kb)j_n(ka)\} + \mu_n^2 \{n_n(kb)j_n(ka) - j_n(kb)n_n(ka)\}$$

$$H_n = kan'_n(ka) - \mu_n n_n(ka)$$

(3)式と計算プログラムの検証例

[1] 円形コイルので磁界の軸方向成分 B_z は $B_z = \frac{\mu_0 I_0}{2} a_0^2 (a_0^2 + z^2)^{-3/2}$ (2) で与えられる。ただし $a_0 = c \cos \theta_0$ は円形コイルの半径で、 z はコイル軸上の計算点とコイルの中心点との距離である。 $c = 0.1[\text{m}]$, $\theta_0 = \frac{\pi}{3}$, $I_0 = 100[\text{A}]$ 場合、点 $r = 0.175$, $\theta = 0$ における磁束密度(ピーク値)の計算例を表1に示す。 n_0 は数の打ち切り項数を示す。計算プログラムは Python で作成した。

表1 真空中の円形コイルの中心軸上の磁束密度

n_0	磁束密度[T]	式(2) [T]
8	$1.353745452622 \times 10^{-4}$	$1.340042337148 \times 10^{-4}$
16	$1.340379557921 \times 10^{-4}$	
24	$1.340035000682 \times 10^{-4}$	
32	$1.340042371275 \times 10^{-4}$	
48	$1.340042337133 \times 10^{-4}$	

[2] 円形コイルと磁性体球殻の問題

図 1 において以下のパラメータ $a=0.05[\text{m}]$, $b=0.06[\text{m}]$, $c=0.0917[\text{m}]$, $\theta_0=30.26$ 度, $\mu_s=10$, $\sigma_1=4.849 \times 10^6[\text{s/m}]$, $f=50$ Hz, $I_0 = 100[\text{A}]$ の場合について、球殻内の 3 点 $P_1: r = a/2, \theta = 0$, $P_2: r=0, \theta = 0$, $P_3: r = a/2, \theta = \pi$ における磁束密度（実効値）を本稿の手法で計算した結果および有限要素解析(FEM)ソフトウェア JSOL JMAG Designer15.0 で計算した結果を表 2 に示す。両者の結果はよく一致しているといえる。

表 2 磁性体球殻内の磁束密度分布

点	磁束密度（実効値）	FEM（実効値）
P_1	$1.75 \times 10^{-4}[\text{T}]$	$1.73 \times 10^{-4}[\text{T}]$
P_2	$1.38 \times 10^{-4}[\text{T}]$	$1.35 \times 10^{-4}[\text{T}]$
P_3	$1.04 \times 10^{-4}[\text{T}]$	$1.03 \times 10^{-4}[\text{T}]$

3. 成果の公表

平成 28 年度以降の予定

報告書作成日 平成 28 年 6 月 3 日

共同研究員による成果

自動車用ガスディスチャージランプ

～始動メカニズム解明～

共同研究員 植月唯夫
津山工業高等専門学校電気電子工学科教授

受託先名：株式会社小糸製作所

1. 目的

自動車用ヘッドランプに用いられている無水銀 HID ランプに関して、始動電圧の提言を目的とし、近接導体が始動性能に及ぼす影響を調べる。

2. 成果

<目的・背景>

自動車用ヘッドランプに用いられている無水銀 HID ランプの始動電圧に関して、過去の実験より発光管材質が始動性能に影響を及ぼす、かつランプ近傍の近接導体が始動性能に影響を及ぼすという実験結果が得られている。一昨年度の実験で、発光管の外側で微放電が発生しており、発光管外部の電荷が始動性能に影響を及ぼしそうだという結果が得られた。昨年度は、シミュレーションにより、始動電圧を低減させるには、発光管外部の電荷を蓄積させることが有効であること、発光管の形状や発光管外部の電界強度に影響を及ぼすこと、が確認できた。発光管外部にどのように電荷が蓄積されるか、その結果放電路がどうなるかを検討した。

<結果および考察>

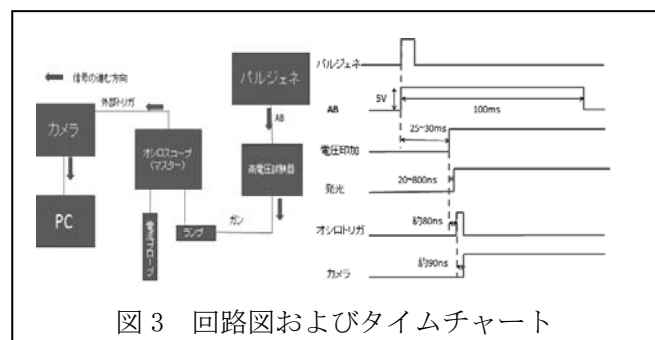
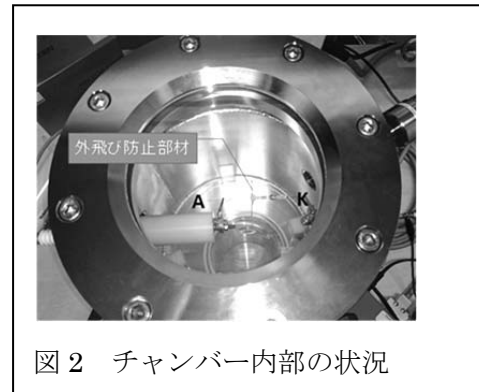
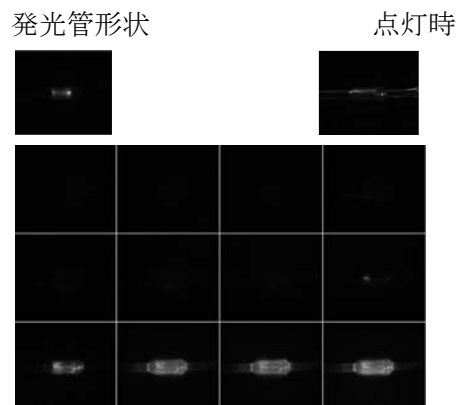


図1に示すように、超高速カメラ ULTRA Neo((株) ナックイメージテクノロジー製)を排気装置に取り付けたチャンバー上に取り付けた。チャンバー内部に発光管を取り付け、チャンバー内のガスを変化させることで、シュラウド内と同等の環境を作った。図2にチャンバー内部の状況を示す。チャンバー内部は Ar80kPa とし、図3に示すように測定装置に信号を送った。その測定結果の一例を図4に示す。この写真のフレーム間隔は 5ns であり放電直前の状態が撮影できているのがわかる。



左側：高圧(-15kv)、右側：アース

図4 測定写真

このように撮影条件を確立し、近接導体がある場合、無い場合の実験を行ったが、今回の測定では放電発光炉に特徴的な差異は観察できなかった。その原因として、今回は撮影条件の確立に時間を取られて、実際の放電路を測定する際に必要な初期条件の統一化が不十分だったと考えられる。

<結論>

高速カメラを用いた観察のための測定条件を確立することができた。ただ、発光管外部に電荷が蓄積される場所が近接導体により影響を受けるかどうかに関しては、今回は初期条件を同じにできていなかったため、その影響が把握できなかった。今後は、初期条件を統一し、近接導体と放電路の影響を把握していくつもりである。

3. 成果の公表

西村奈津也、植月唯夫；超高速カメラによる自動車用 HID ランプの始動メカニズム解析、平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集、5-2(p.25)、平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会、山口大学 (2015.10.7)

報告書作成日 平成 28 年 4 月 18 日

安全情報を伝えるメディアの研究（その3）

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もなう現象が多く、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

平成 26 年度までの成果をもとに、実際にメディアを作品として完成し、その伝達効果を確認することが重要であるという視点に立って、有効な情報の伝達手法を開発する目的で研究を行った。その結果、南海トラフの巨大地震の長期予測に関して、公的に発表されている次の南海トラフの巨大地震に関する長期予測を、さらに幅広い手段で伝達することが必要であり、また有意であるということがわかった。特にアンケートによる市民の意識に関する調査や高等学校の防災担当教員の意識の調査からさらなる研究の方向も明らかになった。

高等学校の防災担当教員に対するアンケートの結果は、回答数が多くなかったが、10名の回答は高等学校の防災を担当する教職員からの、具体的な意見を含む回答であり、十分に参考にすることができるものであると思われる。

この結果と対比するために、まったく無作為のアンケート調査を市民に対して実施した。この調査は、今後の課題として本調査を行うための予備調査を兼ねたものであるが、たいへん有意な

結果を得ることができた。

アンケートの対象地域は、次の南海トラフの巨大地震の影響を大きく受ける地域で、愛知県、三重県、和歌山県、徳島県、高知県である。また、対象の年齢は 15～80 歳とし、性別、職業など一切の区別はしていない。その結果、多くの市民が、次の南海トラフの地震は「明日起こっても不思議ではない」と認識し、長期的予測が政府から発表されていることを「新聞やテレビによって知っている」と答えた。また、地震の直前予報が可能になったら「精度が低くても公表すべきだ」と考えており、緊急地震速報のことは「重要な情報だと思う」と答えている。

さらに、次の南海トラフの巨大地震に関する知識の普及のために有効な手法として、多い順に「マンガなどの、やさしい内容のメディア」「アニメや映画などの、動画によるメディア」「啓蒙書の出版」と答えるとともに、高い視聴率のテレビ番組での広報、ラジオ、新聞などを意見としてあげている。

次に、漫画による宇宙の始まりから地球の近未来までの出版のために、今までの研究成果から実際に漫画で宇宙の始まりから地球の近未来までを作成する作業に入った。本の題目は仮に『あっ！ 地球が・・・』とすることとし、副題を『漫画による宇宙の始まりから地球の近未来まで』とした。漫画の本の原案は、尾池和夫、漫画の作画は漫画家の、はせべくにひことした。この本の第 1 部は漫画で、64 ページを占め、第 2 部は解説文として漫画の内容を説明する文章編、「解説なまずのページ」とした。これは、漫画での理解を深めるために、科学者の知識を翻訳しながら、解説なまずに解説してもらうことにしたもので、漫画のページの下の隅に解説なまずが登場すると、関連する何らかの解説が出ているというサインとした。

漫画の作成には、京都造形芸術大学マンガ学科と、公益財団法人応用科学研究所安全学研究会漫画グループの協力を得た。また、宇宙物理学の佐藤文隆、霊長類学の松沢哲郎、齋藤亜矢、地球物理学の竹村恵二、堀高峰には、漫画と解説文の細部に渡る検討を、それぞれの科学的知見から検証して貰うことができ、科学的にきわめて精度の高い内容を構成することができたと考えている。

3. 成果の公表

- (1)尾池和夫；海城地震の予報の成功から 40 年、公益財団法人日本地球惑星科学連合、報告、2015
- (2)尾池和夫；世界初の地震予知成功から 40 年、関西サイエンスフォーラム、第 83 号、2015
- (3)尾池和夫（単著）；2038 年南海トラフの巨大地震、マニュアルハウス、2015
- (4)尾池和夫（翻訳書）；中国的地震預報、中国社会科学出版社、2015

報告書作成日 平成 28 年 5 月 25 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、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有効性を確認した。本件に関しては、国際学会ならびに計測自動制御学会等の国内口頭発表を行っている。

3. 成果の公表

- (1)T. Ishii, K. Hirata, A. Ohori, N. Hattori and Y. Ohta; Distributed Active and Reactive power Flow Management for Grid Voltage Maintenance using Real-time Pricing Strategy, The 54th IEEE Conference on Decision and Control, Osaka, Japan, 1322/1327, 2015.
- (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用インバータ群の分散制御、第3回 制御部門マルチシンポジウム、3B2-2、2016.
- (3)阿久津慧、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；価格提示を利用した太陽光発電用インバータ群の有効・無効電力出力分散制御、第58回 自動制御連合講演会、2A1-5、2015.
- (4)阿久津慧、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；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実験、第59回 システム制御情報学会研究発表講演会、146-2、2015.

報告書作成日 平成28年7月5日

搬送装置及び電源装置の制御技術の開発

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 クリーンロボット事業部

1. 目的

半導体並びに液晶基板搬送用ロボットの制御技術を開発する。またパワーエレクトロニクスを用いた電源装置の高性能化をはかる。特に搬送用ロボットの高速かつ安定した動作を実現することを目的とする。

3. 成果の公表

今年度は、成果公開をする発表はありません。

報告書作成日 平成 28 年 7 月 5 日

新規プロトン伝導性電解質を用いた 中温燃料電池に関する基礎研究

共同研究員 小久見善八
京都大学産官学連携本部特任教授

受託先名：関西電力株式会社

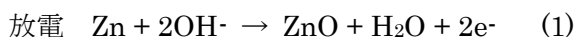
1. 目的

充電型の亜鉛-空気電池は充電できる金属燃料電池の一つである。この亜鉛-空気電池は高エネルギー密度の蓄電池として、自動車用途などに向けて注目を集めているが、亜鉛極のサイクル特性が悪いことが大きな課題である。充電時に亜鉛が樹枝状に析出して短絡を起こしたり、脱落をして効率低下を招いたりしてその二次電池化を妨げる主たる要因となっている。この樹枝状析出を克服することを目指して、亜鉛種の電解液への溶解度を制御した。亜鉛の溶存する水の活量を下げるという新しい発想のもと、水に安定な有機溶媒を大量に添加し、亜鉛のサイクル特性を飛躍的に向上させることができた。

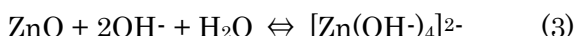
2. 成果

再生型の金属燃料電池ともいえるリチウム-空気電池やマグネシウム-空気電池が世界中で注目を集め、積極的に研究開発が進められている。しかしながら、これらの電池系はエネルギー密度は高いが、水分が著しい劣化を起こす。そのほか、これらの金属空気電池の実用化には負極、正極、電解質、隔膜、空気前処理などの多くの極めて困難な課題が横たわっている。これらの電池系に比べて、亜鉛-空気電池は重量当たりのエネルギー密度が高く、安全、且つ、安価なアルカリ水溶液系の金属-空気電池である。この亜鉛-空気電池は一次電池としては広く普及しているが、二次電池化、即ち、再生型金属燃料電池とするためには亜鉛極・空気極ともにサイクル特性の向上が必要である。本研究では特に亜鉛極の改善に取り組んだ。放電時に生成する亜鉛種の溶解抑制が重要と考え、水の活量を低下させる水-有機共溶媒電解液の利用により、サイクル特性の向上を図った。

亜鉛極の放充電反応は次のようになる。



濃厚アルカリ水溶液中では ZnO は次の平衡関係がある。



この平衡のために $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ の濃度が高くなり、それが充電時の亜鉛の樹枝状析出を引き起こすとの考えが一般的に受け入れられてきた。これまで種々の添加物を加えて亜鉛の析出形態を制御する試みがなされてきたが、十分なサイクル特性は得られていなく、亜鉛極を充電することは難しいとされてきた。

本研究では、 $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ が溶存するには式(3)で示されるように H_2O が必要であることに着目

した。即ち、 H_2O の活量を低下させての $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ 溶解度を低減することを目指した。

H_2O の活量を低下させるために水との相溶性が高く、また、濃厚アルカリ水溶液中でも安定な有機溶媒として種々検討した結果、プロピレングリコール (PG) が化学的安定性に優れ、水との相溶性も高いことが明らかとなった。

4 M KOH 水溶液中に 3 M PG を共溶媒として添加したところ、水の蒸気圧は約 40%低下し、 H_2O の活量が低下することが判った。同時に $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ の溶解度を測定したところ、式(3)の反応の平衡が左に偏り、溶解度が 1/2 以下に低下した。しかし、式(3)で示される平衡反応はその速度が遅く、2 週間経過後でも溶解度が若干変化した。

次に亜鉛の析出挙動を、光学顕微鏡を用いてその場観察したところ、4 M KOH に PG を添加しない場合には亜鉛の樹枝状析出が見られたのに対し、3.6M の PG を共存させた場合には、亜鉛の樹枝状析出が見られずに亜鉛負

極板全体に亜鉛が析出した。金属の電析では PG のような有機物を添加した場合には有機物が金属表面に吸着して平滑な析出物が得られることが多く報告されている。そこで、有機物の吸着効果を示すには十分な濃度である 0.1M の PG を共存させてその効果を調べたところ、0.1 M の PG の共存では樹枝状析出が見られた。これは、ここで用いた PG 添加の効果は PG の亜鉛表面への吸着としての界面修飾効果ではなく、別の要因であることが判った。すなわち、 H_2O の活量低減というバルク作用により、機能が発現していると考えるのが妥当である。この共溶媒電解液を用いて亜鉛極の充放電を行うと、PG なしの場合に比べて大幅にサイクル特性が向上することが明らかになった。特に図 1 に示すように、75%という高い利用率においても 1000 サイクル程度の充放電サイクルが可能であることが示された。このような高い効果は従来の改善手法を大きく凌駕しており、亜鉛負極の高エネルギー密度化とサイクル寿命の長期化の両立に向けて有用な技術となることが分かった

一方、グリコール類は亜鉛-空気電池の空気極で酸化される可能性がある。空気極に白金などの貴金属触媒を用いるとグリコール類は容易に反応してアルデヒドやカルボン酸などに酸化される。しかし、アルカリ性では銀などの安定で電子伝導性の高い酸化物被膜を生成する金属や、ペロブスカイトやブラウンミラーライトなどの安価な酸化物を空気極触媒として使用できる。銀触媒はアルコール類の酸化に対する活性が低いことが知られている。また、酸化物触媒では構成元素によってグリコールの酸化に対する活性が異なり、マンガンを含む酸化物ではアルコール基の酸化は著しく抑制される。しかし、蓄電池には 1000 サイクル以上、数年間以上の寿命が要求されるので、PG の非常に遅い酸化も劣化要因となると考えなければならない。そこで、グリコールの重合物を用いて亜鉛負極と空気極との間に分子篩膜を隔膜として用いるとグリコール重合物が空気極に移動することを阻止することができ、亜鉛負極のサイクル特性を向上させながら空気

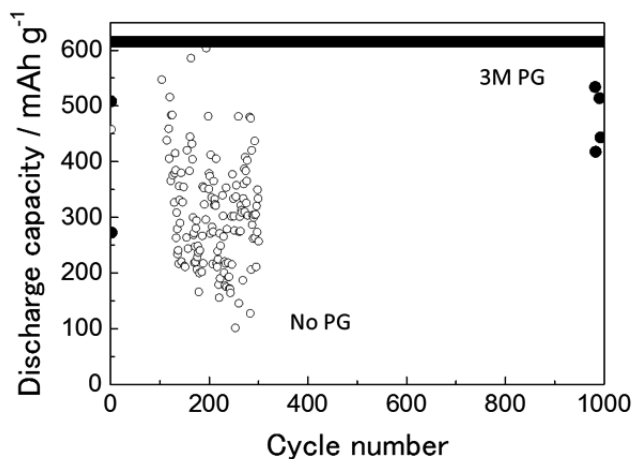


図 1 プロピレングリコールの添加による亜鉛極のサイクル特性の向上 (4M KOH、亜鉛利用率 75%)

極での反応を抑制することができる。

亜鉛-空気電池の二次電池化には亜鉛負極だけでなく、空気極の高活性化やサイクル特性の向上も重要である。本研究開発で目指した亜鉛-空気電池は負極側には安価な材料を使用しており、空気極にペロブスカイト系の酸化物などを使用することによって電池全体のコストが著しく低減される。このため、固体高分子電解質型燃料電池（PEFC）に要求されるような10年以上といった長寿命は求められることはないであろうが、車載用を考えた場合には3年程度の寿命が要求される。同時に、自動車を駆動するためのパワー、即ち、電池の出力の向上も必須である。現在積極的に研究開発が進められているリチウム-空気電池などの非水系の金属-空気電池に比べると亜鉛-空気電池は水溶液系の電池であり、より実現性が高い。本研究がアルカリ水溶液系の金属-空気蓄電池の実現に向けた一つの方向となることを願っている。

3. 成果の公表

口頭発表

小久見善八；亜鉛-空気電池の亜鉛極の改善に向けて、電池技術委員会第379回委員会、京都ガーデンパレス、2015年12月18日

報告書作成日 平成28年5月8日

液体水素容器内の可視化システム開発

共同研究員 白井康之
京都大学大学院エネルギー科学研究科教授

受託先名：株式会社ジェック東理社

1. 目的

密閉容器内で液体水素冷却した超電導材料の、過電流通電時の沸騰現象などをオンラインで可視化するためのシステムを開発する。

2. 成果

(1) はじめに

液体水素の沸騰現象を解明し、液体水素冷却高温超電導導体の性能を十分発揮できる最適な冷却技術を確立するために、高圧・極低温環境下で使用できる「可視化技術」を開発・製作し、液体水素中での沸騰現象の可視化実験により有用性を確認した。

(2) 可視化技術の開発

図1に、既存の液体水素実験装置の概要図を示す。本実験装置は、極低温の液体水素を保有するためのクライオスタット（内径 300mm）であり、液体水素保有量は 60L，設計圧力 2.0MPaG である。

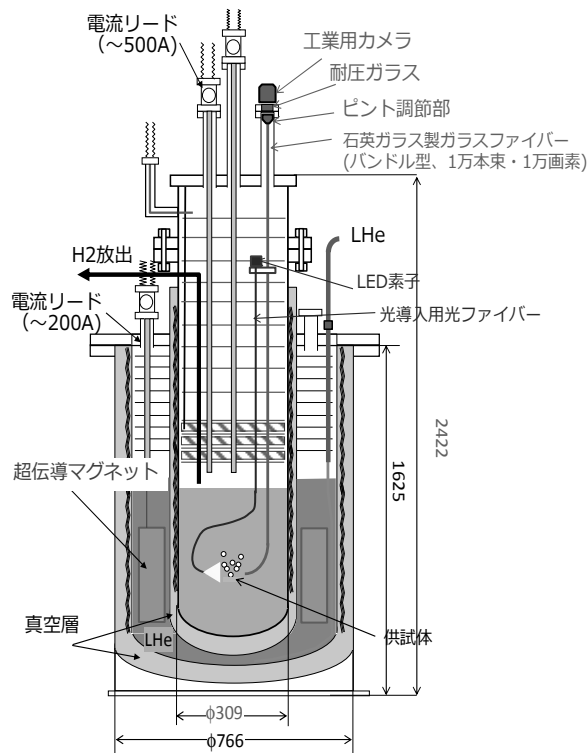


図1 液体水素用試験槽と可視化システム



図2 試験槽内の発熱体と各ファイバの設置

液体水素中の沸騰現象を解明するために、図 2 に示す高圧ガス保安法に準拠した光ファイバによる可視化システムを開発・製作した。受圧部である耐圧フランジ部に耐圧ガラス製窓（ガラスシール：低膨張ホウケイ酸ガラス：パイレックス）を設置し、常温、常圧部（大気環境）にカメラ、クライオスタット内に設置した光ファイバを通した画像を撮影する。光源は、チップ型 LED をクライオスタット内上部に設置し、光ファイバにより液体水素内に導入した。

図 2 のように、水素クライオスタット内に発熱試験体（PtCo ワイヤ）を水平に設置し、これを通電加熱した時の液体水素の沸騰現象を観察するために、撮影用ファイバと光源用ファイバを配置した。

図 3 は、圧力 0.6MPaG 液温 24K の状態で、液体水素中の PtCo ワイヤを通電加熱し、非沸騰から核沸騰、膜沸騰に遷移させた実験のビデオ映像の一コマ（核沸騰状態）である。当初目的としていた液体水素中の沸騰現象の可視化については、核沸騰のバブルや膜沸騰の沸騰膜が識別できるレベルの動画画像を得ることができた。しかし、全体に解像度とコントラストが不足しており、詳しい議論に耐えるデータには至っていない。今後改良を加える予定である。

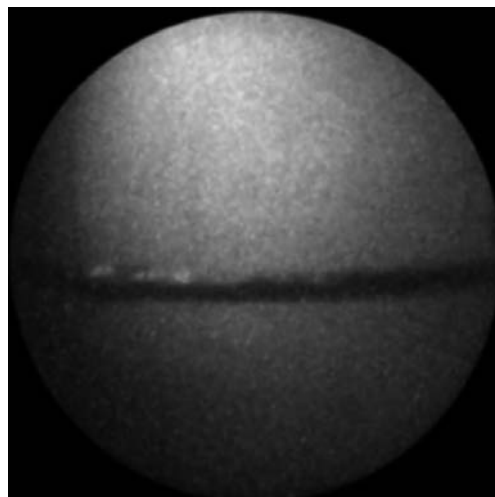


図 3 液体水素中の加熱 PtCo ワイヤの沸騰現象の可視化

3. 成果の公表

- (1)Y. Horie, Y. Shirai, M. Shiotsu, K. Yoneda, T. Matsuzawa, H. Tatsumoto, Y. Naruo, H. Kobayashi, H. Inatani; "Film boiling heat transfer properties of liquid hydrogen in natural convection", Physics Procedia 67, pp.643 – 648, Elsevier, 2015, (DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.109)
- (2)K. Yoneda, Y. Shirai, M. Shiotsu, Y. Oura, Y. Horie, Y. Matsuzawa, H. Tatsumoto, K. Hata, Y. Naruo; "Forced flow boiling heat transfer properties of liquid hydrogen for manganin plate pasted on one side of a rectangular duct", Physics Procedia 67, pp.637 – 642, Elsevier, 2015, (DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.108)
- (3)塩津正博、白井康之、米田和也、堀江裕輝、松澤崇之、茂田宏樹、比嘉大輔、達本衡輝、畑幸一、成尾芳博、小林弘明、野中聡、稲谷芳史；「矩形ダクト内片側平板における液体水素強制対流 DNB 熱流束」、3D-a03、第 91 回低温工学超電導学会講演、つくば、平成 27 年 5 月 27~29 日
- (4)白井康之、茂田宏樹、飼沼徹、塩津正博、達本衡輝、成尾芳博、小林弘明、野中聡、稲谷芳文、吉永誠一郎；「液体水素強制対流冷却試験のための循環ループ装置」、2D-a01、第 92 回低温工学超電導学会講演会、姫路、平成 27 年 12 月 2~4 日

報告書作成日 平成 28 年 5 月 31 日

電力変換技術を適用した 電力ネットワークの安定性に関する研究

共同研究員 引原隆士
京都大学大学院工学研究科教授

受託先名：関西電力株式会社

1. 目的

電力ネットワークの安定性に関する基礎検討に資するため、電力変換工学による運用技術の向上について検討、評価を行う。

2. 成果

電力ネットワークの安定性に関する基礎検討に資するため、電力変換工学による運用技術の向上について検討、評価を行うもので、諸外国における電力ネットワークを含む電力システム技術の動向について調査を行い、技術動向を精査し、将来技術のシーズの動向を調査、実施した。

主だった結果は以下のとおりである。

まず、交流電力に情報を付加して、その情報に基づき電源及び線路を選択して回線を交換することが可能な三相電力ルータの原理検証及び、プロトタイプについて、その電力機器としての可能性を評価した。

次に、直流配電システムに不可欠なコンバータの大容量化に向けて、並列運転の制御アルゴリズムの開発と、SiC パワーデバイスの高周波スイッチングによる小型化を合わせて検証した。

本年度が最終年度であることから、得られた成果について論文としてまとめた。

3. 成果の公表

(1)Alexandros Kordonis, Ryo Takahashi, Daichi Nishihara, and Takashi Hikihara;

Three-Phase Power Router and its Operation with Matrix Converter toward Smart-Grid Applications, *Energies*, 8, 3034-3046 (2015).

(2)佐段田裕平、引原隆士；並列接続された DC/DC コンバータへの受動性に基づく制御の適用に関する数値的検討、システム制御情報学会 研究発表講演会、制御応用 (1) 314-2、大阪 (2015.5.22)

(3)西原大智、高橋亮、引原隆士；三相交流電力ルータの回線切換えに関する実験的検討、電気学会電子デバイス/半導体電力変換研究会、EDD-15-081/SPC-15-163、長崎 (2015.10.29)

(4)西原大智、高橋亮、引原隆士；三相交流電力ルータの構成とその回線切換え方法について、平成 27 年電気関係学会関西支部連合大会、摂南大学 G4-2 (2015.11.14)

(5)佐段田裕平、引原隆士；DC/DC コンバータの小型・並列化のための高周波スイッチング手法に関する検討、電子情報通信学会総合大会、A-1-30 (2016.3.18)

報告書作成日 平成 28 年 5 月 24 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、電力システムに与える影響を評価するためのリアルタイムシミュレータにおいて、アナログ部分とデジタル部分の遅延がシミュレータの安定性に大きく影響を及ぼすことから、これを安定化する条件を求める方法を開発する。

2. 成果

PHILS システムは、図 1 のインダクタ結合システムに帰着できる。図 1 において、Simulator は RL 模擬回路、Hardware は RLC 回路から成り立っており、実電流 I_2 を Simulator へフィードバックし、Simulator の模擬電圧 V_1 をアンプで Hardware へ出力する構成となっている。むだ時間 T_d が大きくなると、安定性条件を満たす PHILS の各定数の制限が厳しくなる。本研究では Simulator 部分の改良により、PHILS の各定数の安定性を保証する領域を拡大する方法を検討した。手法としてはモデルベースの手法であるスミス法を用いた方法とモデルフリーの手法である FRIT を用いた方法の 2 つについて検討を行った。

図 2(a) に示すシステムが補償なしでは不安定となる条件で、スミス法を適用した時のパワーアンプ出力電圧 V_2 の時間応答を図 2 (b) に示す。同図より、システムが不安定な回路定数の条件の時に、むだ時間補償によりシステムが安定化しているのが確認できた。以上より、制御対象のモデルとむだ時間時間が既知な場合にスミス法の適用が有効である事を示した。

スミス法はモデルベースの手法であるため、むだ時間と PHILS のモデルが不明な場合には適用できない。安定化する対象のモデルが不明な場合、入出力データを直接用いた Iterative Feedback Tuning (IFT) という方法がある。この方法はシステムの応答が目標応答に近づくように制御器パラメータを調整する手法である。ただし、評価関数内に未知な要素を含んでいるため、最適な制御器を得るには調整パラメータを更新するごとに試験を繰り返す必要がある。そこで、FRIT を適用する。FRIT は IFT と同じモデルフリーの手法であるが、1 回の実験で取得したデータに目標応答を合わせるように制御器を設計することができる。試作を繰り返さずに制御器の設計を行うため、疑似参照信号を導入した。初期パラメータ及び、取得したデータを用いて最適化を行った結果をもとに実験を行った。実験により得られたパワーアンプの出力電圧 V_2 の時間応答を図 2(c) に示す。同図より、回路定数が不安定な条件でもシステムが安定化できることを示した。以上より、制御対象が不明なモデルの場合は FRIT の適用が有効である事を示した。

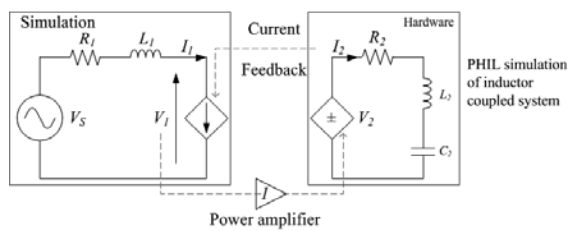
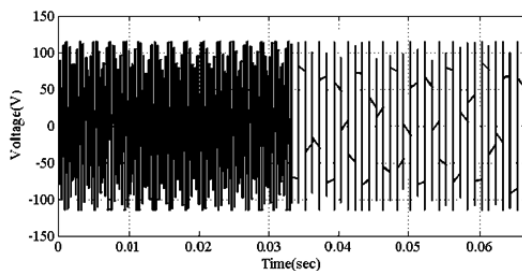
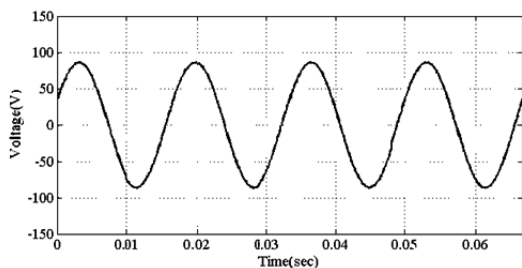


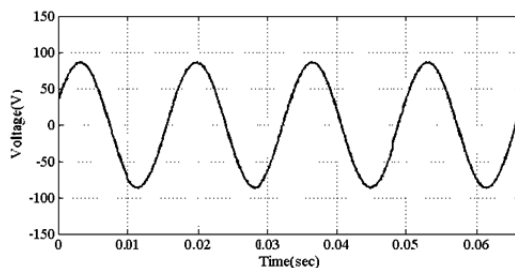
図 1 PHILS システム



(a) 補償なし



(b) スミス法による補償



(c) FRITによる補償

図 2 PHILS システムの過渡応答 (実験結果)

3. 成果の公表

Naoki Iwado, Akihiro Ohori, Nobuyuki Hattori, and Tsuyoshi Funaki; "Stabilization Techniques of Power Hardware-in-the-Loop Simulation with Time Delay Compensation", 35th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), PS04-14, Osaka, Japan, Oct. 18 - 22, 2015.

報告書作成日 平成 28 年 5 月 2 日

マイクロ波帯次世代無線 LAN の適用評価研究

共同研究員 村田英一
京都大学大学院情報学研究科准教授

受託先名：関西電力株式会社

1. 目的

無線 LAN の伝送容量を大きく向上させる 802.11ac 規格は既存無線 LAN の更新、無線の適用拡大として導入が想定され、検討が必要な状況である。802.11ac では、マルチユーザ MIMO 等の新技術が織込まれるが、当該技術を用いた無線システムの測定・評価手法について十分な知見を有していない。このため、マルチユーザ MIMO を用いる無線システムの測定手法や伝送特性向上のための方策等を調査によって明らかにする。

2. 成果

次世代無線 LAN や携帯電話システムで検討されているマルチユーザ MIMO の検討を行った。特に、携帯電話システムにおけるマルチユーザ MIMO の伝送特性を画期的に改善する技術としてユーザ端末の連携に着目し、ユーザ端末間の連携用無線リンクとして無線 LAN を用いた場合について研究を行った。また、将来の携帯電話システムとして世界中で活発に研究開発が進められている 5G 携帯電話システムを念頭に、文献調査を行い、無線 LAN と携帯電話の融合や MIMO 伝送技術の将来展望を明らかにした。以下で個別に述べる。

移動通信システムにはより高速な伝送の実現と周波数利用効率の向上が求められ続けており、高周波数帯の利用による大容量高速伝送、低遅延を特徴とする第 5 世代移動通信システム(5G)の研究開発が世界的に活発化している。年間 400 件前後の研究開発成果が報告されている電子情報通信学会無線通信システム研究会(RCS)においても、近年は 5G 関連の発表が多くを占めている。本研究では、RCS において最近報告された 5G 関連の研究発表を概観し、主に無線通信技術に関する研究開発の現状をまとめた。これによって、将来の 5G と無線 LAN、要素技術としての MIMO 伝送技術の将来展望が明らかにされている。

ユーザ端末連携では、その連携用無線リンクの特性が基地局信号の受信特性を左右することになる。そこで、この連携用無線リンクとして無線 LAN を用いる場合について、その伝送特性の把握を目的として実験を行った。実験では、基地局から実際に信号を受信している複数の端末を一台の車両内に設置し、その間で実際に無線 LAN を利用した連携通信を行った。この際のパケット受信成功率を分析し、定量的な評価を行った。

3. 成果の公表

(1)村田英一、岡本英二、岡崎彰浩、須山聡、井上高道、増野淳、山本哲矢、太郎丸真；“[奨励講演] 第 5 世代移動通信システムに関する RCS 研究会での研究発表概観、” 電子情報通信学会技術研究報告、RCS2015-140、 pp.49-54、 Aug. 2015.

(2)Hidekazu Murata, Eiji Okamoto, Manabu Mikami, Akihiro Okazaki, Satoshi Suyama, Takamichi Inoue, Jun Mashino, Tetsuya Yamamoto, Makoto Taromaru; “R&D Activities for 5G in IEICE Technical Committee on Radio Communication Systems,”Proc. The 21st Asia-Pacific Conference on Communications, Kyoto, Japan, Oct. 2015.

(3)Ou Zhao, Xiaoliang Shi, Hidekazu Murata; “A simple method to simulate inter-user links for collaborative communications in MIMO systems,” 第38回情報理論とその応用シンポジウム, 岡山県倉敷市, 6.2.2, Nov. 2015.

報告書作成日 平成 28 年 4 月 14 日

遮断器用真空バルブの絶縁設計に関する基礎研究

共同研究員 山本 修

受託先名：株式会社明電舎

1. 目的

真空遮断器用真空バルブの耐圧を向上させるために設ける電界緩和用シールドリング電極の帯電抑制効果を明らかにする。

2. 成果

真空遮断器に用いる真空バルブでは、沿面放電の抑制が喫緊の課題となっている。真空中では絶縁物と電極との接合部は電界が高くなり電界電子放出現象が生じやすいため、沿面耐圧低下の要因になる。すなわち、このような電子が絶縁物を衝撃して二次電子を放出させ、その表面を帯電させて沿面放電に至る。真空バルブではこの接合部の電界を緩和するために電界緩和用シールドリング電極が付設される。昨年度に引き続き、本研究ではシールドリング電極を備えた模擬真空バルブを対象に、測定と計算により帯電電荷分布を明らかにして、シールドリングの帯電抑制効果を検討した。模擬バルブはアルミナ製の絶縁円筒と陰陽両電極およびシールドリングで構成されている(図 1 参照)。シールドリングは 5 種類の形状が用意しており、それぞれ先端曲率半径 (R_{tip}) およびアルミナ内面との間隔(S)の組み合わせが異なる。この試料に直流高電圧を印加して絶縁円筒内面を帯電させる。この帯電の分布を明らかにするため、静電プローブを模擬バルブの外部に設置し、これに生じる誘導電荷を測定した。プローブは模擬バルブの長さ方向に移動することができ、また模擬バルブは回転させることができるので、試料全体を走査して誘導電荷のデータを収集することができる。本年度はこの誘導電荷のデータを用い、逆計算によって模擬バルブ内面の電荷分布を求めた。逆計算に先だって、 λ 関数法により表面の各位置に存在する真電荷の大きさとプローブに誘導される電荷の大きさとを関連付ける計算をおこなった。 λ 関数法ではプローブの誘導電荷を計算するのに電位計算のみでよく、電界の計算まで行う必要がないので計算精度向上の観点から利点がある。この計算には 3 次元の表面電荷法を用いており陰陽両電極、シールドリング電極、アルミナ製円筒およびプローブすべてを考慮しているので、シールドリングの形状変化を考慮した電荷分布の解析が可能である。なお簡単化のため、逆計算では帯電電荷の分布を回転対称分布と仮定した。逆計算の結果から、円筒内面の帯電電荷密度はシールドリングの先端半径、および円筒内面との離隔距離に依存して変化し、シールドリング電極を設けることによってシールドリングが無い場合の数分の 1~10 分の 1 に抑制できることが明らかになった。

3. 成果の公表

(1) N. Tanthanuch, B. Techaumnat, H. Fukuda, Y. Yamano, O. Yamamoto; “STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF SURFACE CHARGING IN A VACUUM INSULATION SYSTEM” ,

Proc. of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23–28, (2015)

(2) 福田英昭、石川啓太、山村健太、佐野陽、吉田遼平、山納康、山本修；「真空バルブにおける交流電圧印加条件の違いが帯電分布に与える影響」、電気学会放電研究会資料、ED-16-001 (2016年1月)

(3) H. Naruse and O. Yamamoto; “Estimation of Flashover Voltage along Cylindrical Insulator in Vacuum”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23, No. 1, pp. 22-27; February (2016)

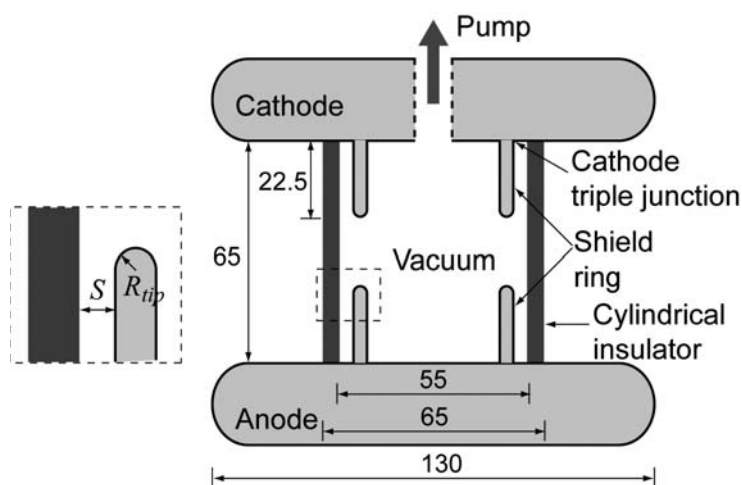


図 1. 模擬真空バルブ

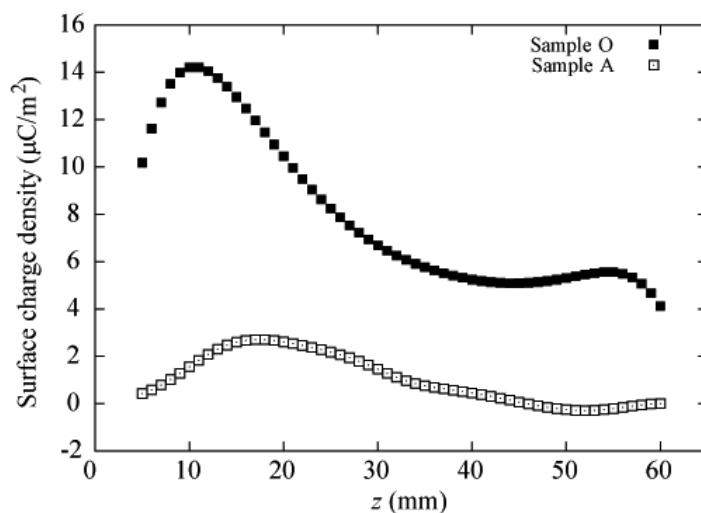


図 2. 逆計算で求めた電荷分布の例 (印加電圧 DC25kV)

Sample O; シールドリングなし. Sample A; $R_{tip}=1$ mm, $S=4$ mm.

報告書作成日 平成 28 年 5 月 10 日

再生可能エネルギーが大量導入された 電力系統における蓄電設備の最適需給制御手法と その経済性評価に関する研究

共同研究員 横山明彦
東京大学大学院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（PV）と風力発電が大量に連系された電力系統において、その発電出力予測を予測し、また特に風力発電出力の予測誤差を考慮して、火力発電機の燃料費最小化を目的関数とした電力貯蔵装置である揚水発電所、2次電池と火力発電機の週間運用計画の最適化を行い、予測誤差の最適スケジュールへの影響を評価する。その際、PVの季節ごとの予備力の確保や発電機の復旧手法といった改善点を加え、従来の結果との比較を行う。

2. 成果

本研究では先行研究で考慮されていなかった次のような点を変更したうえで、シミュレーション検討を行った。

まず、シミュレーションの初期条件である再生可能エネルギーに対する予備率の設定では、季節ごとに日射量の翌日誤差比が異なる点を考慮し、冬期の再生可能エネルギーに対する予備率のうちPVが占める割合を半分に変更した。また、冬期においては暖房需要があることから従来のシミュレーションでは軽負荷期と扱っていたところを重負荷期に変更した。発電機の故障については、変更前は本シミュレーションの時間断面である1時間ごとに復旧の判定を行っており、故障した発電機が1時間後に稼働してしまうケースが存在した。そこで火力発電機の起動には7~8時間必要であることを考慮し、その時間内には復旧しない条件を新たに設定した。経済性の評価の際に問題となってくるペナルティコストに対しては供給支障量に対して掛けるペナルティ係数をパラメータとしてシミュレーションを行うことでその影響を検討した。ペナルティ係数とは制約条件を緩和するために使用されるものであり、本シミュレーションにおいては週間運用計画を最適化する際に大きな影響を及ぼす要因であるとともに、週間需給シミュレーション中では最終的な火力発電機の週間燃料費に合算されるためその影響を調べることは重要であると考えられる。

以上のような変更を加え、モンテカルロ法による不確実性を考慮した需給シミュレーションによる評価を最適運用計画に対して行った。本シミュレーションでは近年の風力発電の予測技術の高精度化に着目し、実発電出力から10%程度の予測誤差に収めることができる現状を踏まえて、実発電出力から予測誤差が10%以内となるように乱数を用いて予測値を作成した。

ここでは、最も再生可能エネルギーの影響が大きい低需要期の春期の需給シミュレーション結果についてのみ述べる。蓄電池（BESS）の導入量を増やしていくことで供給支障（特に余剰電力）を抑制することができている。予測誤差を用いたWT出力予測と風速を用いた予測手法を比

較すると、特に BESS の導入が少ないケースで不足電力の抑制に差が出ていることがわかる。これは運用計画作成段階での風速データを用いた RE 電源発電出力の予測値が実発電出力を大きく上回ってしまい、需給シミュレーションでは十分に電力を供給できなかったのに対し、WT 出力予測誤差を用いた手法では精度良い予測となっていたために差が出たと考えられる。電力系統の実運用では余剰電力に比べ不足電力を極力減らすことは停電に対して重要であると考えられる。下図を見ると揚水発電所は揚発運転と揚水運転をほぼ毎日行うような運用結果となっているのに対し、BESS は週末の電力需要が小さい期間に充電し、平日に放電するというような運用結果となった。

日本では電力システム改革によって 2016 年 4 月から電力小売市場の自由化がされることから地域間の電力融通が盛んになると考えられる。そこで今後の方針として、地域間の電力融通を考慮するような制約条件を加えてシミュレーションを行いその経済性と供給信頼度の評価を行う必要があると考えられる。

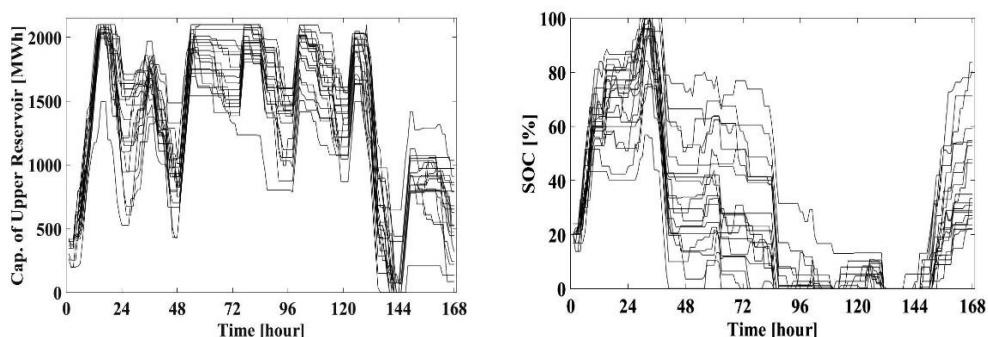


図 揚水発電所のダム水位（左側の図）と BESS(100MW) の SOC 推移（右側の図）

3. 成果の公表

W.Ukita and A. Yokoyama; “Optimal Weekly Operation Scheduling of Pumped Storage Hydro Power Plant and Storage Battery in a Power System with a Large Penetration of Renewable Energy”, IEEJ Collaborative Research Seminar at Chulalongkorn University, TJS-16-1, Bangkok, Thailand (2016)

報告書作成日 平成 28 年 4 月 3 日

平成28年9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：田中プリント

(無断複写複製厳禁)



Research Institute for Applied Sciences