

公益財団法人
応用科学研究所
平成 25 年度研究成果報告書

第 21 号

2013FY RESEARCH REPORT

No.21

2014

RESEARCH INSTITUTE FOR APPLIED SCIENCES

目 次

1. 研究員による成果

多段内部窒化 - 酸化法により組織制御した Mo 合金の耐照射特性	長江 正寛	1
超高速浸炭技術に関する研究	長江 正寛	3
高耐熱高耐摩モリブデン合金の開発	長江 正寛	5
熱処理加工に関する調査研究	松岡 裕明	7
複合医工学会 (ICME) における活動	西川 禎一	8
接続的エネルギーと環境フォーラム (SEE Forum) における活動	西川 禎一	9
久保研究室の成果	久保 愛三	10
The future of mechanical power transmission and of drive line - a 2013-view from Japan	久保 愛三	11
Contact Bending Fatigue test of gear material against failure due to tribo-cause to fatal subsurface crack propagation	久保 愛三	17

2. 特別研究員による成果

超電導インバータの基礎研究	長村 光造	29
シンバルの音響特性に及ぼす金属組織の影響評価の研究	長村 光造	31
超電導技術の国際標準化	長村 光造	33
銀被膜ビスマス系線材の機械的特性評価	長村 光造	35
実用超伝導線材の臨界電流の応力・歪効果の解明に関する基礎研究	長村 光造	37
核融合炉用超伝導線材の量子ビームを用いた応力・歪効果に関する研究	長村 光造	39
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	41
金属流体電磁ポンプとマルチグリッド法による電磁流体有限要素解析	島崎 眞昭	43

3. 共同研究員による成果

高温超伝導大電流導体の電磁特性についての基礎研究	雨宮 尚之	45
自動車用ガスディスチャージランプ ～始動電圧低減を目的とした始動メカニズムの解明～	植月 唯夫	47
安全情報を伝えるメディアの研究 (その1)	尾池 和夫	51
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	54

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	56
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	57
SiC 結晶キャリア寿命評価と再結合過程の解析	木本 恒暢	59
環境適合型電力・水素協調エネルギーシステムに関する調査研究	白井 康之	62
電力系統の分散制御に関する基礎研究	萩原 朋道	65
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	67
大規模分散電源による電力系統の安定化	舟木 剛	68
マイクロ波帯次世代無線 LAN の適用評価研究	村田 英一	70
真空中沿面放電前駆過程における三次元帯電電荷分布の計算法	山本 修	72
二次電池による需給制御に関する研究	横山 明彦	75

研究員による成果

多段内部窒化 酸化法により組織制御したMo合金の耐照射特性

第一研究室 長江正寛

1. 目的

Moなどの高融点高Z金属を核融合炉プラズマ対向機器などの照射環境下での構造材料として使用するためには照射脆化の改善が必須の課題である。本研究では内部窒化や内部酸化によって窒化物または酸化物粒子を分散させたMo合金に対して高速中性子照射を行い、析出粒子の形態やサイズなどの違いが照射脆化抑制効果に及ぼす影響について検討することを目的とした。

2. 成果

本研究に使用した試料は粉末冶金法で作製したMo-1.0wt%Ti合金ならびに Mo-1.0wt%Zr合金である。厚さ1mmの圧延材を約0.3mmの厚さとなるよう機械研磨し、打ち抜き加工により直径3mmのTEMディスクを作製した。その後、最終的な厚さが約0.15mmとなるように機械研磨し、電解研磨を行った。これらを真空中1500°Cにて1h加熱して再結晶化させた後、以下に示す5種類の条件で窒化または希薄COガス熱処理を行った。

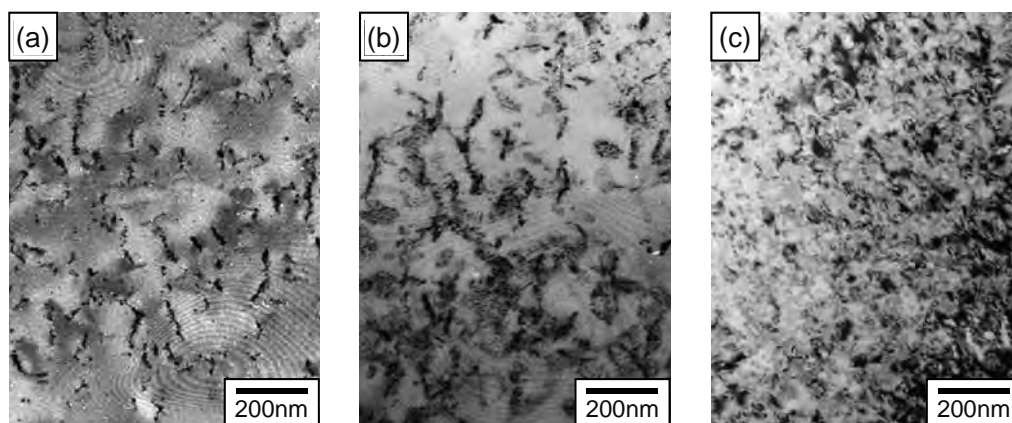
窒化処理 (1気圧 N ₂ 気流中)	希薄 COガス熱処理(CO/Ar=1/49の混合ガス気流中)
1100°C-16h	1400°C-9h
1300°C-16h	
1500°C-9h	
1600°C-9h	

照射条件は以下に示す2条件である。

照射条件： ① 290°C, 5×10^{24} n/m² ② 400°C, 5×10^{24} n/m² (08M-13BR, 14BR)

図1に照射後試料(Mo-1.0Ti合金)のTEM観察結果を示す。熱処理を行っていない未処理材(a)では、照射によって生成したブラックドット状の欠陥が認められる。図1(b)は1400°Cで希薄COガス熱処理した試料であるが、未処理材(a)と同様な照射欠陥が生成していることが分かる。希薄COガス熱処理ではTiO₂類似の酸化物粒子が析出するが、母相Moとの整合性が高いため歪場を形成し難い。両者の照射によるΔHvはそれぞれ239Hv(a), 172Hv(b)であった。一方、1500°Cで窒化した試料(c)では、歪場を伴った100nm程度の棒状TiN粒子が無数に存在し、未処理材(a)、

希薄COガス熱処理材(b)に比べて照射欠陥が少ない。窒化材の ΔH_v は45Hv(c)であり、照射硬化がかなり抑制されていることが分かる。以上の結果から判断すると、希薄COガス熱処理によって析出する酸化物粒子に比べて、窒化処理によって析出する窒化物粒子の方が歪場を形成しやすく、照射欠陥のシンクとしての作用が高いと考えられる。



未処理材, 400°C 照射 1400°C CO 処理材, 400°C 照射 1500°C 窒化材, 400°C 照射

図 1. 照射後試料の TEM 写真(Mo-1.0Ti 合金, 400°C 照射)

報告書作成日 平成26年7月31日

超高速浸炭技術に関する研究

第一研究室 長江正寛

1. 目的

浸炭焼入れは、鉄鋼材料の表面に炭素を浸入・拡散させた後に焼入れを行う手法であり、表面を硬くし、耐摩耗性の著しく優れた道具類を製造する方法として古くから活用されてきた。また、浸炭焼入れによって表面に圧縮応力が残留する結果、鋼材の耐疲労特性を著しく改善することが可能である。現在、自動車部品や工具・耐摩耗材料の浸炭法としてガス浸炭および真空浸炭(減圧浸炭)が工業的に広く普及している。近年、産業機器等の超小型化に伴い、そうした製品に使用される小型部品の高強度化が求められているが、従来の手法では小型部品の表面部のみを浸炭焼入れすることは困難であり、全く新しい超高速浸炭焼入れ法の開発が強く望まれている。

本研究では、グラファイトをスプレー塗布した鉄系材料を高周波加熱することによって、従来の浸炭焼入れ法に比べて簡単かつ格段に処理時間を短縮した画期的な超高速浸炭焼入れ法の確立を試みた。

2. 成果

SCr420、S15C、純鉄の3種類の材料に対して市販のグラファイトスプレーを塗布し、窒素ガス気流中 900℃~1000℃で 100s の高周波加熱後直ちに焼入れ処理を行った結果、いずれの材料の場合もほぼ同様な浸炭焼入れ硬化層が得られ、例えば 1000℃の場合、表面硬さは約 800Hv、硬化深さは約 200 μ m であった。鋼種によって表面硬さに差がないことから、グラファイトスプレーと鉄との反応により十分な量の炭素が拡散していることが分かる。これらの知見をもとに、モジュール 0.5 の小型はすば歯車に対する高周波浸炭焼入れの検討を行った結果、図 1 に示すように 1000℃・0s という非常に短時間の加熱で歯表面部のみ浸炭焼入れが可能であることが明らかとなった。このような小型歯車に対して従来のガス浸炭等を行うと、歯全体が焼入れされて非常に脆くなるが、本研究の高速浸炭焼入れ法では表面部のみが効果的に焼入れされ、芯部の靱性を保つことが可能である。

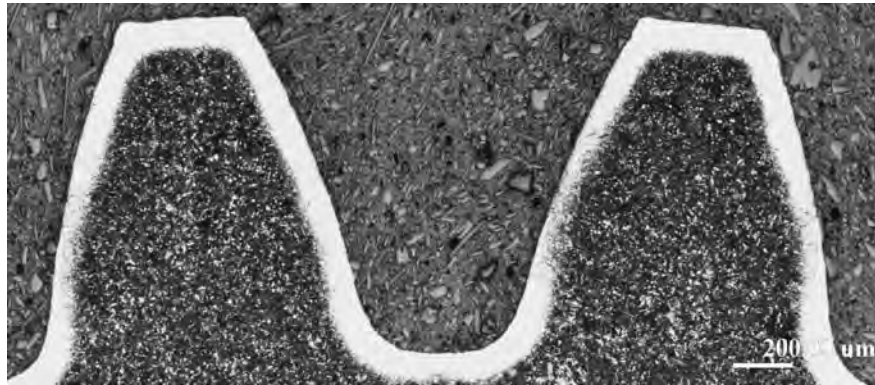


図 1. 1000°C-0s の高周波浸炭焼入れ処理を行ったはすば歯車の断面組織

報告書作成日 平成 26 年 7 月 31 日

高耐熱高耐摩モリブデン合金の開発

第一研究室 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 などの窒化物形成元素を固溶させた合金を窒化处理すると、Ti や Zr の優先的窒化(内部窒化)により Mo マトリックス中に TiN や ZrN が析出する。このような窒化物の析出により 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、内部窒化で析出する窒化物粒子は、母相 Mo の結晶粒界移動をピン止めする効果があり、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]。この様に、内部窒化处理は 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有望であるが、従来までの研究では、合金組成や窒化条件の最適化の検討は不十分であり、多段内部窒化处理を 3 日~5 日かけて行っていた[1,2]。

そこで本研究では、耐熱構造部材および耐熱耐摩工具の用途に応じて必要とされる高温強度や高温硬度を得るために、合金組成及びそれに応じた内部窒化处理条件の適正化検討を行い、量産における処理費用削減のために処理時間短縮化の検討を行った。また、得られた合金の微視的なミクロ組織調査を行い、多段内部窒化处理による材料の高強度化、高硬度化のメカニズムを効果的に発現させ、製品開発にフィードバックすることで製品化へのスピードを更に加速させることを目的とした。

一方、我々は Mo 合金に対して希薄 CO ガス熱処理を行うと、窒化物に比べてより安定な酸化物粒子を分散させることが可能であることを明らかにしている[3]。多段内部窒化で析出させた窒化物粒子を希薄 CO ガス熱処理によって酸化物粒子に変換できれば、材料の耐熱性をより高めることが可能であると考えられる。そこで本研究では、多段内部窒化した Mo 合金の希薄 CO ガス熱処理についても検討を行った。

2. 成果

(1) 窒化处理時間短縮化の検討

多段内部窒化条件を詳細に検討した結果、表面に維持される圧延組織の厚さは一次窒化時間に大きく依存することが明らかとなり、一次窒化時間を最適化することで、1mm 厚さの Mo 合金の場合、昇降温の時間も含めたトータルの窒化時間を 24h 以内とすることが十分可能であることが分かった。

(2) 合金組成の検討

Mo-Ti 系合金の TZM 合金よりも Mo-Zr 合金の方が見かけの窒化速度が速いため、Mo-Zr 合金の方

がより短時間の窒化処理で同じ厚さの圧延組織を維持できることが分かった。

(3) 機械的特性評価

多段内部窒化材の降伏強度は最終ステップの窒化時間でコントロールが可能であり、窒化時間が短いほど析出粒子のサイズが小さくなり高強度化することが分かった。TZM 合金に比べてMo-Zr 合金の方が多段内部窒化後の降伏強度が高く、Mo-1.0Zr 合金多段内部窒化材は、1500°CにおいてTZM 合金や純タングステンに比べて約4倍の降伏強度を示すことが分かった。

(4) 必要最低圧延組織厚さの検討

多段内部窒化によって維持すべき圧延組織の必要最低厚さを検討した結果、Mo-Zr 合金の場合、試料厚さの15%の圧延組織を維持すれば良いことが分かった。TZM 合金の場合(必要最低厚さ24%)と比較すると、多段内部窒化に要する時間を大幅に短縮出来る事が明らかとなった。

(5) 希薄COガス熱処理の検討

多段内部窒化と希薄COガス熱処理を組み合わせることで、Mo-Zr 合金多段内部窒化材の再結晶温度が1700°Cから1900°C以上に上昇した。

以上本研究で得られた結果をまとめて表1に示す。これらの結果を総合的に判断すると、多段内部窒化処理を耐熱構造部材や耐熱耐摩工具の用途に適用するためには、Mo-Zr 合金をベースとした材料開発を進めるべきであると結論付けられる。また、タングステン代替材料としての製品開発を含めて考えるなら、希薄COガス熱処理を組み合わせた熱処理が有望である。

表1. 本研究で得られた結果のまとめ

	TZM 合金 多段内部窒化材	Mo-1.0Zr 合金 多段内部窒化材	Mo-Zr 合金 多段内部窒化-CO 処理材
1mm の板材を窒化するのに必要な時間	約 20h	約 10h	—
高温強度(1500°C)	純 W の 2.5 倍	純 W の 4 倍	—
必要圧延組織厚さ	試料厚さの 25%	試料厚さの 15%	—
再結晶温度	1600~1700°C	1700°C	1900°C以上

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] M. Nagae, N. Ise, J. Takada, Y. Hiraoka, T. Takida ; Dilute Carbon Monoxide Gas Heating of Molybdenum Alloys, J. of the Japan Society for Heat Treatment, Vol.49, pp.667-670 (2009)

報告書作成日 平成26年7月17日

熱処理加工に関する調査研究

第二研究室 松岡裕明

1. 加工研究部調査（担当：松岡裕明、出野竜太）

依頼のあった事故品調査から不具合要因の推定、対策方法として材料履歴の確定化、加工方法、熱処理、表面改質方法までの改善指導をとおして、事故品のゼロ化、不具合対策方法として高周波焼入れによる部分強化方法の改善提案—例えば、強化部位の高周波誘導加熱による素材均質化後、高周波焼入れの実施—、他社プラズマ窒化処理不具合品の窒化処理方法の改善指導及び当所プラズマ窒化処理による機械部品性能向上、不具合の減少化と不具合率0など、最適な性能を得るべき基礎となる技術指導を行ってきた。新規開発品に対しては素材選択から最終表面改質までの加工工程（熱処理を含む）の指導及び適切な表面改質の実施、確性試験により完成度の高い製法を提供している。

2. 第二研究室調査（担当：松岡裕明、内山春生）

ステンレス製袋ナット等のカジリ低減の目的で部品を炭素鋼治具挿入し、N₂ ガス雰囲気中で高周波誘導により短時間加熱し、薄い窒化層を形成する基礎試験結果を基に量産化対応のガス選択機能、温度制御系を持つチャンバー装置の設計製作を行い、ステンレス鋼及びステンレス鋼主要元素の窒化挙動の調査、ステンレス製ネジ部品カジリ低減の実証等の準備を行った。

報告書作成日 平成 26 年 9 月 8 日

複合医工学会(ICME)における活動

西川研究室 西川禎一

複合医工学会(Institute of Complex Medical Engineering, ICME)は、2005年に我が国において設立された複合医工学に関する国際学会である。医学的知見と工学的技術の有機的な連携・協働によって、複合的要因に起因する障害や疾患に対処する様々の手段・手法を研究し、臨床の現場において実用化することを目的とする。そのために、医学及び工学分野の基礎学術研究者、現場の実際的専門家及び当該分野の学習者に共通のプラットフォームを構築することを目指す。

現在までのところ、日本、米国、中国(台湾を含む)、オーストラリア、ドイツ等が中心となって国際会議やシンポジウムの開催、学術誌 *Neuroscience and Biomedical Engineering* (NBE, Bentham Science Publishers)の刊行などを中心に活動が展開されている。

学会における中心的トピックスは、

Cognitive Neuroscience and Technology, Simulation of Neural Systems, Neural Networks and Mimetic Computation Technology, Measurement and Instrumentation Technology in Biology, Artificial Organ Technology, Information and Communication Technology in Medicine, Innovative Brain-Machine Interface, Biomedical Image Processing, Biomechatronics and Biomedical Robotics, Micro/Nano Biomimetics

等々である。近年は特に認知症(dementia)の予防と早期発見に関する議論が盛んである。

西川は学会創設以来理事を務めたが、現在は ICME 学会及び学術誌 NBE のアドバイザーとして活動を続けており、2014年6月に台北で開催された国際会議には特別会員として会議の企画、基調講演の司会などを務めるとともに、理事会にも出席して今後の運営方針及び運営計画についてアドバイスを加えた。

報告書作成日 平成26年9月5日

持続的エネルギーと環境フォーラム(SEE Forum)における活動

西川研究室 西川禎一

京都大学における「21世紀 COE：持続的発展のためのエネルギー・環境科学教育・研究拠点の形成」事業(2002-2006)及び同大学「グローバル COE：地球温暖化時代のエネルギー・環境科学教育・研究拠点形成」事業(2008-2012)における教育・研究活動を通じて、近年経済発展の著しい ASEAN 諸国との交流・連携ネットワークが構築された。その中で、2006年タイ国バンコクにおいて Sustainable Energy and Environment Forum (SEE Forum)の開催が提案され、爾来、日本、タイ、インド、インドネシア、ヴェトナム、マレーシア、ブルネイ及びフィリピンにおいて毎年1-2回、フォーラムが開かれた。

西川は上記の COE 活動のアドバイザー・チェアを務め、ほとんど毎回 Forum に出席して基調講演などを行うとともに、地域の持続的発展のためにはエネルギー・環境問題に加えてより広く、食糧と良質飲料水資源の確保、自然及び人為災害への対処、感染症などの疾患の防除等も含めた問題複合体を対象とする Network of Excellence (NOE)の形成が必要であると主張・提案した。幸い多くの国の理解と支持を受けることができ、この数年来は各国における NOE 形成活動の状況が詳細に発表される特別セッションが開催されるようになっている。

報告書作成日 平成 26 年 9 月 5 日

久保研究室の成果

久保研究室 久保愛三

平成25年度は下記2件の発表がある

1.The future of mechanical power transmission and of drive line - a 2013-view from Japan
Authors:Yoshikazu ABE (President of Japan Gear Manufacturers Association) Aizoh KUBO
(General manager of the Research Institute for Applied Sciences), Presentation at the
Podium Discussion “The future of mechanical transmission and driveline” at the VDI
International Conference on Gears, Oct. 7-9, 2013 TU Munich /Garching

2.Contact-Bending Fatigue test of gear material against failure due to tribo-cause to fatal
subsurface crack propagation,A.Kubo(Research Inst.Applied Sciences), S.Matsumoto &
T.H.Hou (Waseda University), I.Moriwaki, M.Nakamura & T.Tani, Proc.VDI International
Conference on Gears, Oct. 7-9, 2013, TU Munich /Garching, VDI Berichte 2199-2, pp.867-882

The future of mechanical power transmission and of drive line

- a 2013-view from Japan -

Aizoh KUBO, Prof.Dr.-Eng. Research Institute of Applied Sciences

Yoshikazu ABE Iwasa Tech. Co., Ltd.
Ex-President of JGMA (The Japan Gear Manufacturers Association)



Contents

1. The world in 10 years and the gears demanded
2. Class differentiation of gears
3. New technology to be developed
4. Japanese gear industry

1. The world in 10 years and the gears demanded

The most important point we should recognize is that the Asian population of middle class increases by 1 billion in the next 10 years.

The influence of this on economics and consequently on politics is far stronger than the influence of polarization of people into rich and poor classes.

In the human history it is the first experience that such large amount of population shifts into the middle class.

Behavior to satisfy this rising middle class could not be stopped, because this movement is based on their demand as fundamental human desire.

Serious problems such as battles to get resources, shortage of foods etc. are driven by this tide of desire.

Gear boxes in the next future must satisfy the desire for better life of such people of rising middle class.

Consequently the amount of gear box production will increase in mass.

This will be the biggest target market for us, gear manufacturers.

2. Class differentiation of gears demanded

2-1 Popular cheap edition: *Gear box that people of poor class demands*

This market and the gear box production is not target of Japanese gear manufacturers. The price in this category must be low and the Japanese production cost makes the entry of Japanese gear manufacturers into this market impossible.

2-2 Moderate price but high performance edition: *Gear box that people of the middle class demands*

The key word for the middle class people is "Desire to enjoy comfortable life". According to this demand, the market of gear box will aim the feature: small & light and quiet, but cheap. Comparable performance of gear box as today's products is OK also in 10 years, but the price must be lower than 50% of today's products.

2-3 High precision, high performance edition:

The special market that the state puts her budget in, such as big national project and defense.

The market concerning frontier technology that will bring tremendous gain in the future demands such gear box.

The demands exist in e.g. automotive, aeronautics, sea technology, IT technology and medical & nursing equipment industry .

To realize such gear box, steady investment for research and development is the must.

3. New technology to be developed

3-1 Art for cheap but high precision gear production:

"How we produce gear boxes economically" is the key technology that will support the life of rising middle class with their satisfaction.

The progress of this technology is the biggest task for us, gear manufacturers.

Technological revolution is expected

- (a) in gear parts made from new material, e.g. sintered metal and plastics,
- (b) in production technology in terms of machining time and gear accuracy,
- (c) in design methodology to pursuit small, light and durable gear box.

Industry of developing country will also come in this field with imported technology and with low workers cost, that brings serious cost battle in Japanese gear industry.

Sophisticated construction of complex gear arrangement that enables light gear box with special feature such as torque vectoring, high torque and thrust capacity and so on will be invented by some geneous people.

3-2 Art for ultimate high precision gear production:

The demands for the technology that will raise the presence of a nation in the world will realize some unique extra-ordinal performance of gear box that was thought to be almost impossible from the today's ordinal engineer's sense.

Such fields are (a) aeronautical development, (b) Deep sea development, (c) Defense

Technology transfer from those fields to public welfare production will raise the technological level of the country.

4. Japanese gear industry

The taught of Buddhism: Every thing is not existing and product will ruin and life will vanish.

From that sense, Japan is getting old and we have difficult problems in shortage of young potential mechanical engineers and in shortage of investment.

Such problem may become more serious in the next future.

Supremacy of Japanese is

- (a) Mass production art of relatively high quality goods with economical cost
- (b) Common activity for quality control in production

Also in this field though, we have to face serious competition in the today's world atmosphere, that demands money-cut and money-cut in short view of business administration.

In some special field in gear technology, Got sei Dank, continuous investment and strong activity for technological revolution is working on course.

Some examples are as follows:



4-1 Ultra high efficiency gear box

Gear box of CRP drive for coming Open Rotor turbo fan engine

One stage planetary gearing, sun pinion input and carrier / ring gear output

Rated power: 18,000 HP, Max. atmospheric temperature: 200 deg.C

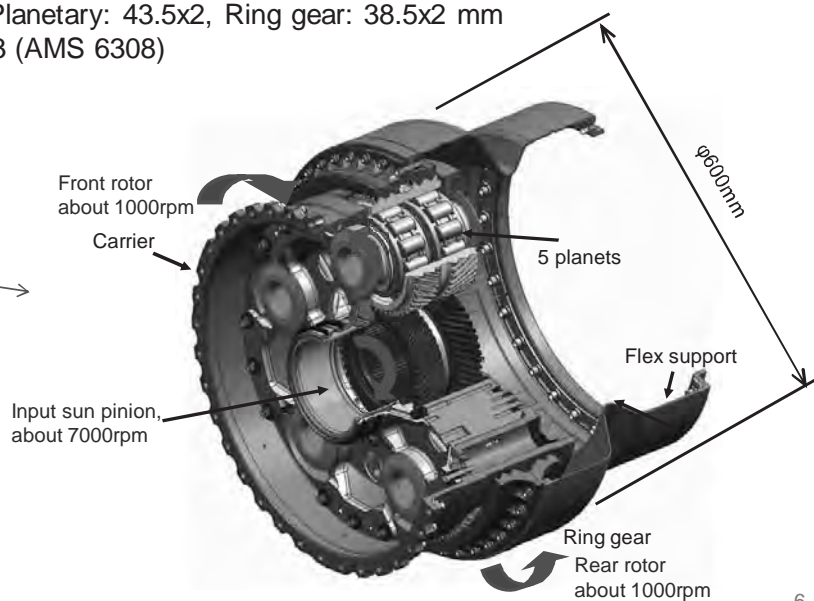
Very light construction: 159 kg

Input shaft speed & torque: 7,000 rpm / 18,400 Nm, Output speed: 1000/1000 rpm

Module: 3 PA: 22.5 deg. Helix angle: 30 deg.

Tooth width: Sun: 45.5x2, Planetary: 43.5x2, Ring gear: 38.5x2 mm

Gear material: Pyrowear 53 (AMS 6308)



Courtesy of Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

KHI propriety,

In gear design, special tooth height and 3D tooth flank form modification and special tooth fillet and bottom form is incorporated. Much CFD and other simulation technique was used.

Rated endurance test per EASA CS-E740 was conducted.

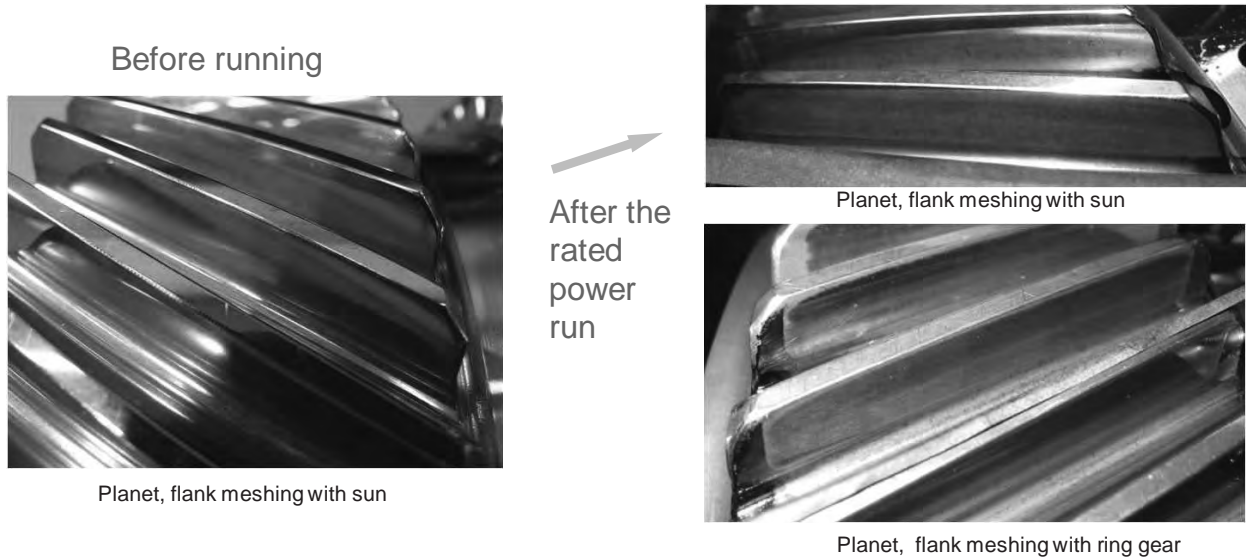
The measured power transmitting efficiency has shown 99.5 ~ 99.6 %.

Many gear specialists said that is not true. "You have made some mistakes in measurement."

The developing team has checked this value and the facilities in detail under cooperation of gear specialists and measuring specialists from out side of KHI using more than 6 months.

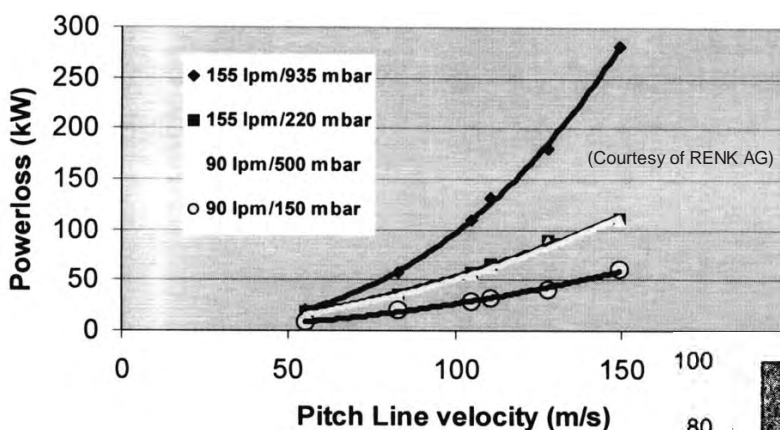
Reliability of measuring facilities is +/- 0.1 % at MTO driving condition.

The conclusion now is that we should judge this measured efficiency of 99.6 % is true !



$$\text{Efficiency} = \frac{[\text{Output power}]}{[\text{Input power}]} = 1 - \frac{[\text{Loss power}]}{[\text{Input power}]}$$

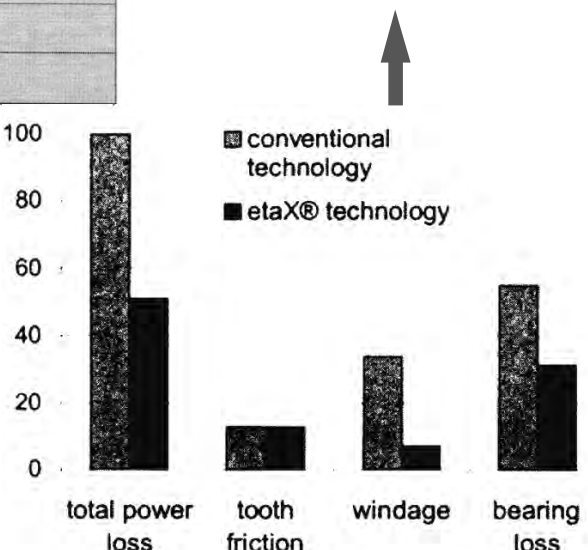
Power-loss increases exponentially and transmitting power increases proportionally as function of pitch line speed.



Power-loss

1. Proportional part to transmitting power
2. Non proportional parts such as windage, lub&air flow etc

Non-proportional part of power-loss increases exponentially as function of pitch line speed and becomes predominant in high speed gearbox.



For achieving high efficiency

Predominant power-loss in high speed gearing.

*To reduce this part of powerloss:
Modern designing method such as
utilizing CFD and choice of lubricant*

*To reduce this part of powerloss:
Gear design and manufacturing*

1. Proportional part to transmitting power
2. Non proportional parts such as windage, lub&air flow etc

$$\text{Efficiency} = \frac{[\text{Output power}]}{[\text{Input power}]} = 1 - \frac{[\text{Loss power}]}{[\text{Input power}]}$$

Make it large.

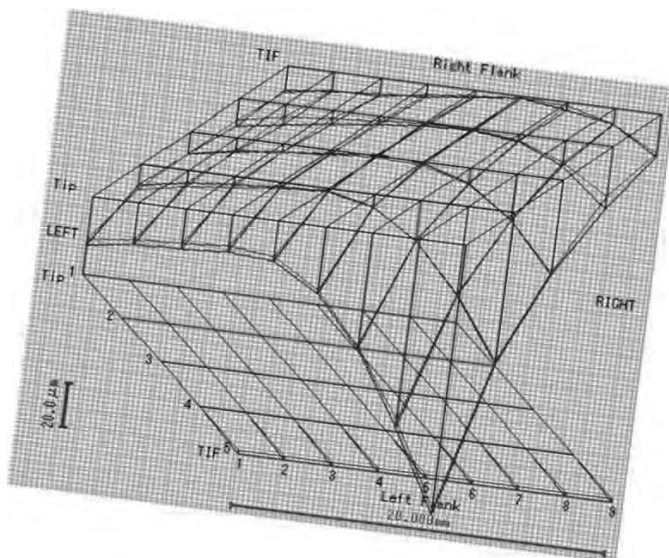
To achieve very high efficiency,

1. make the average stress level as high as possible,
2. Reduse the load-dependent powerloss by good gear design and manufacturing,
3. Reduce the speed-dependent powerloss, especially windage and lub.flow loss by utilizing CFD etc. and make the pitch line speed as high as possible without increasing the temperature.

4-2 Ultra high accurate gear grinding machine to realize arbitral 3D tooth flank form modification

To improve the performance of strong helical gears, 3D tooth flank form correction at meshing-in edge is very effective, but not easy to grind accurately.

Newly developed 5-axis grinding machine does that job without difficulty.



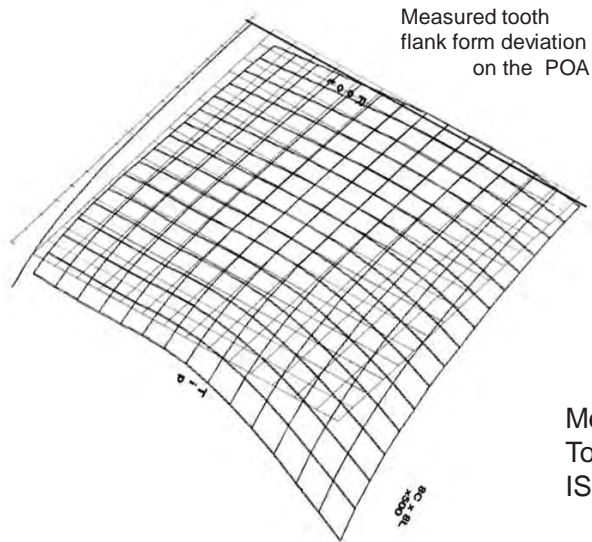
1 pass grinding for simultaneous involute & fillet of trochoidal form

Helical gear
 $m_n=3, z=19, \alpha=17.5, \beta=35,$
 $d=69.584, b=20$



Aimed 3D tooth flank form correction (red curve) and simulated ground figure (blue curve) on the POA (plane of action)

Courtesy of YASDA Precision Tools Co.



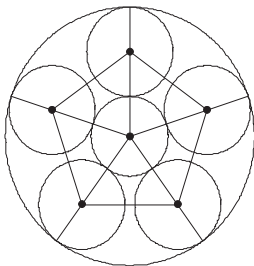
The max.deviation between aimed and measured 3D figure is around 2 to 3 μm , at edge 5 μm .

Measured single pitch deviation $f_{pt}=1.3\mu\text{m}$
 Total cumulative pitch deviation $FP=2.5\mu\text{m}$
 ISO 1328-1, class 1

Non-involute gear can also be ground with same accuracy.
 Bigger machine GT130 can grind gears to 1300 mm diameter with 4 μm cumulative pitch deviation.
 Internal gear can also be ground.

Only with good designing and good manufacturing, we have a good future in gear technology.

Fin



KBGT
 Kubo's Gear Technologies

Contact Bending Fatigue test of gear material against failure due to tribo-cause to fatal subsurface crack propagation

A. KUBO Research Institute for Applied Sciences, Kyoto Japan
S. MATSUMOTO, T.H. HOU Waseda University
I. MORIWAKI, M. NAKAMURA, T. TANI
Kyoto Institute of Technology

Abstract

Strength and durability of gear material predicted by conventional material tester does not correspond well to the strength and durability of gear teeth. Most of gear failures today is triggered by very local tribological failure of tooth flank, i.e. small cracks due to the tribo-failure occurs at first, then they develops in subsurface of gear tooth flank progressively during rather long operating time of gears, and reaches finally to the fatal failure. The Gear Technical Committee of the JSME now develops a new gear material testing rig, Contact Bending Fatigue (CBF) tester, that reproduces resemble loading and stress state in simple test piece as in the case of gear tooth flank. The principle and the construction and some test results are introduced.

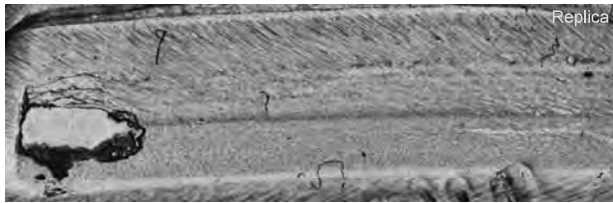
1. Introduction

Hertzian contact stress is accepted widely as the index for estimating tooth flank durability of gears. After EHL theory is well known, the influence of surface roughness and lubricating oil film thickness is also taken into consideration. The method of calculation for tooth flank durability is standardized and then most of engineers who design power transmission gears often forget the extent of validity of the calculation method. In accordance with rise of allowable stress value of gear materials, the number of such gear failure increases that gear designer could not analyze by conventional calculation method of load carrying capacity. On the other hand for evaluating the load carrying capability of gear materials, all the tests are carried out with considerably different state of induced stresses from that of actually operating gear teeth.

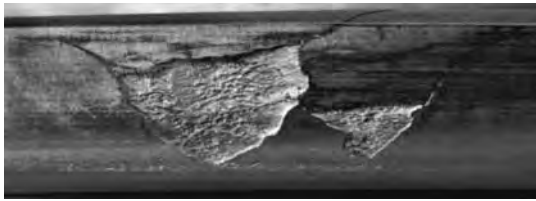
2. Typical failure of today's gears and state of induced tooth stress

An example of typical gear failure today is introduced in Fig.1^[1]. Very high contact stress due to the edge contact on tooth flank such with tip or side edge of tooth induces micro failure tribologically and it grows to so called spalling, flaking or case crushing. The trouble of such tooth flank failure cannot be dealt with conventional calculating method for load carrying capacity of gears based on the Hertzian stress between contacting tooth flanks of involute helicoid.

The final tooth failure is very serious to break down the gear transmission, but the triggering initial failure appeared in early stage of operation seems usually not serious and is very different from that of the fatal stage. Very typical gear tooth failure today is, that such small tribological failure develops itself, and in a long run, by changing the failure mode, it becomes some kind of final failure to end the gear life.



(a) Helical gear for automotive drive



(b) Middle size gear with longitudinal crowning

Fig.1 Typical gear failure of today's high strength gears



Fig.2 Trace of meshed-in foreign object and resulted flaking failure of hard tooth flank

In the case of Fig.2, spalling is found on tooth flank near tooth side end. This place is apart from the middle of lead form correction, so called crowning of tooth flank, and the Hertzian contact stress calculated for contacting tooth flanks at that position is not high. Close investigation of damaged tooth flank has found that foreign object came in engaging tooth flanks, meshed in and was crushed. High stress at that crush has induced the trigger of this spalling. The trace of such FOD (Foreign object damage) is usually not easy to find.

Planetary gearing is tend to receive more damage from foreign objects, because wear debris stay rather easily over tooth space bottom of internal toothing. Tooth flank of actual gears in field of operation is usually not well observed, so long as gear accident has not happened, but when you give good lighting on tooth flank, you surely observe many traces of FOD. If tooth flank of well used planet of drive train gearing of land construction vehicle is illuminated by good side lighting to enlarge the appearance of surface form irregularity, for instance, so much traces of FOD can be observed. This is the real world of heavily loaded gear tooth flank.

As seen in these examples, actual gear tooth flanks suffer some kind of tribo-failure and to escape from this phenomenon perfectly is impossible. That means, material of actual gears in operation has some kind of probable micro-cracks on tooth flank. Taking the failure of the example in Fig.1(a), the stress state of the damaged point at dedendum very near to the beginning point of tooth engaging of helical gears is schematically illustrated in Fig.3. On that part, shearing and compressive stress owing to tooth edge/flank contact act at first and then tensile stress owing to tooth bending is applied as the contact line moves on tooth flank during transmitting load. The [stress vs time] curve on tooth flank is schematically illustrated

in Fig.3(b). With progress of meshing, stress of such wave form acts repeatedly at the damaged part on tooth flank. At the crack apex, complicated multi-axial stresses act and the crack develops itself in acceleration.

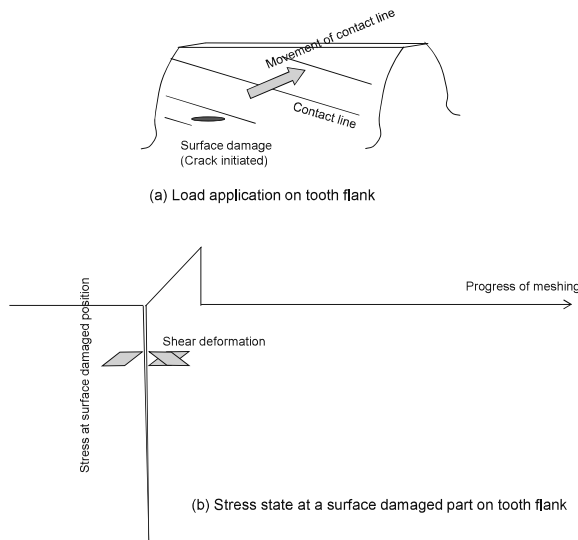


Fig.3 Loading and stress state at the micro-cracked part of tooth flank

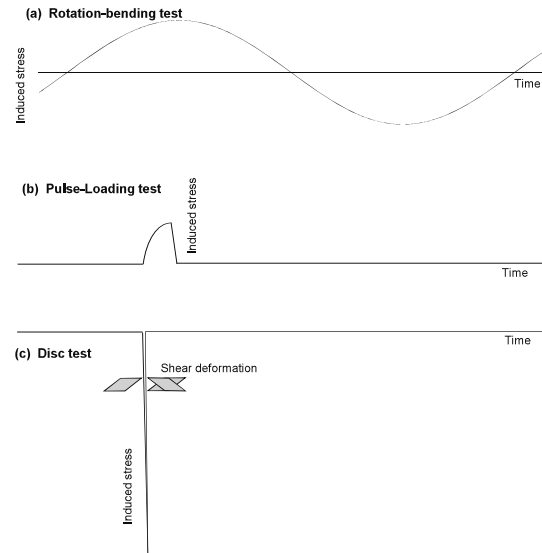


Fig.4 Stress state of TP in conventional material evaluation

In contrast with this figure, Fig.4 shows the [stress vs time] curves for the cases of conventional material testing rigs such as rotation-bending rig, pulse-loading rig and two-disc rig. These tests are usually carried out independently, and it is easy to see that the [stress vs time] curve on tooth flank, cf.Fig.3, is very different from those in Fig.4. The run of stress at the damaged position on the test piece (TP) surface is far different from that of gear tooth. The way of crack propagation is function of stress state. It is therefore impossible to evaluate gear material with these conventional material testers. To shoot the cause of failure modes shown before, conventional calculation methods of load carrying capacity of gears are also out of the region of their validity.

3. Construction of CBF rig

A new principle of gear material tester is demanded that can reproduce quasi equal [stress vs time] curve in TP(test piece) as that on tooth flank, cf.Fig.3. A good hint of construction is found in the paper concerning "Tribo-fatigue" tester that has been developed in Belarus^[3]. With tribo-fatigue rig, contact stress is given at the place of the maximum bending stress, because this makes the construction of rig very simple and easy. We change the construction to give the contact stress at the position of zero bending stress and in order to test case carburized high strength steels, all the construction is made solid.

Fig.5 shows the construction for bending stress application on the TP of rod form, cf. Fig.11. Dead weight on the both sides of TP gives the intended value of bending stress. The left end of the TP is clamped tightly and driven with desired rotational speed through digitally

controlled electric motor. In the back place of the TP, master roller is assembled on sliding table that is pulled with dead weight to make TP and master roller in contact with intended Hertzian contact stress, cf. Fig.6. The right end of the master roller shaft is driven with desired rotational speed through digitally controlled electric motor. The arbitrary slip ratio under Hertzian contact in circumferential direction of TP can be given within almost 0.001 accuracy. Fig.7 shows the plan of the CBF rig.

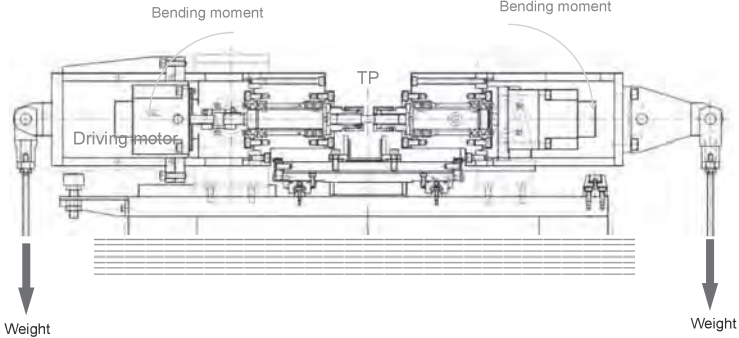


Fig.5 Application of Bending moment in CBF rig

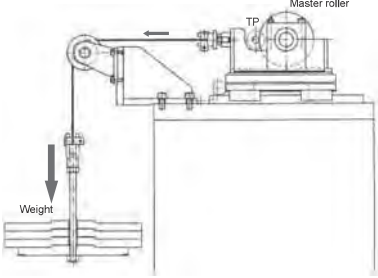


Fig.6 Application of contact stress in CBF rig

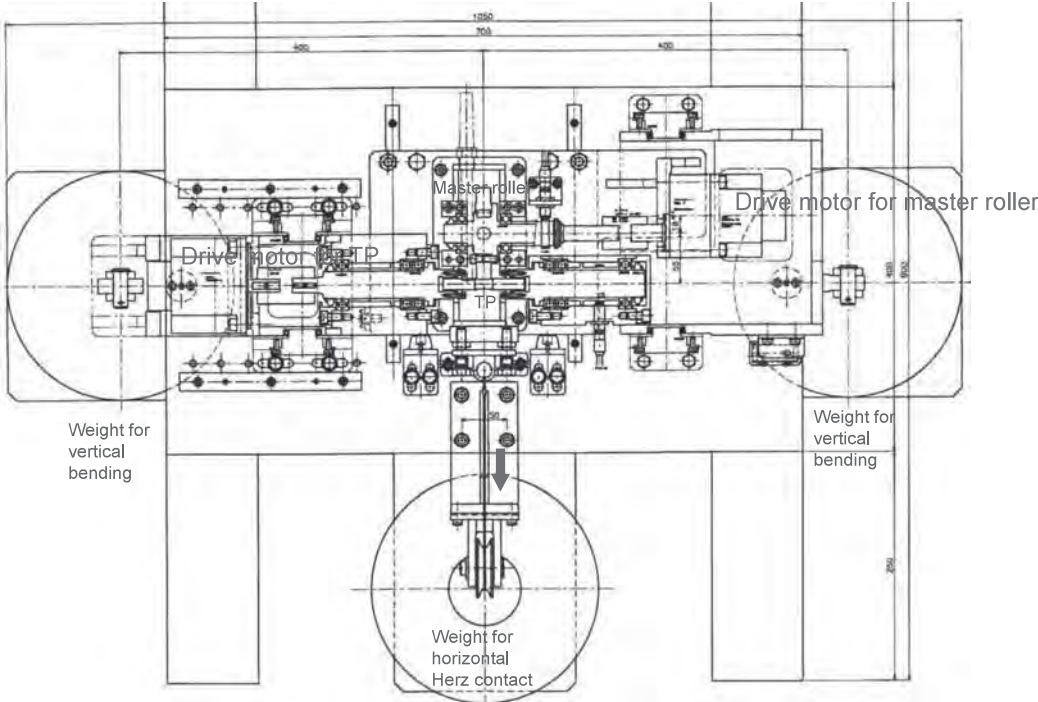


Fig.7 Plan of CBF rig

In the TP, bending stress is induced in vertical direction by the Fig.5 mechanism. Bending stress due to the pressing force of the master roller is added in horizontal direction of TP. When the master roller presses the TP on the same center height, the contact point of TP and the master roller becomes in a state of compressively bending stressed. In order to make the stress state at contact point zero bending stressed, the shaft center position of master roller must be set higher in some extent than the center position of TP in loaded state. Fig.8

shows this state schematically. Fig.9 shows one example of calculated state of bending stress in TP as function of shaft offset angle ϕ . The amount of the shaft offset angle must be set exactly to realize that the bending stress at the contact point be zero. That means, the shaft position setting is functions of given bending moment and contacting load with master roller.

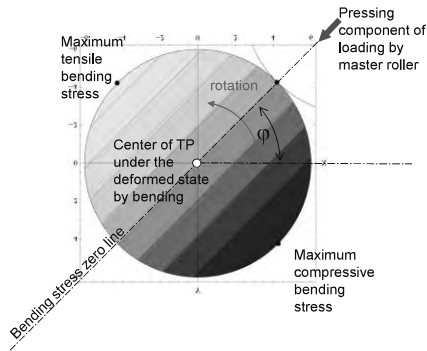


Fig.8 State of bending stress in TP during test

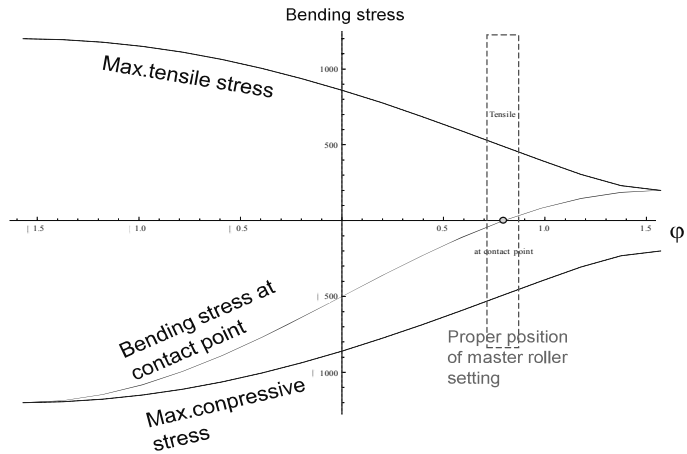


Fig.9 Example of induced bending stress in TP as function of master roller position ϕ

Fig.10 shows the resulted [stress vs time] curve of the TP. When you compare this curve with that of tooth flank, cf.Fig.3(b), stress state of CBF test corresponds well to that of gear tooth, save the compression part indicated by dotted oval. If the contribution of compression on the crack initiation and crack propagation is not large, it is expected, that the durability of gear material including the influence of heat treatment and surface treatment etc. can be evaluated by CBF test.

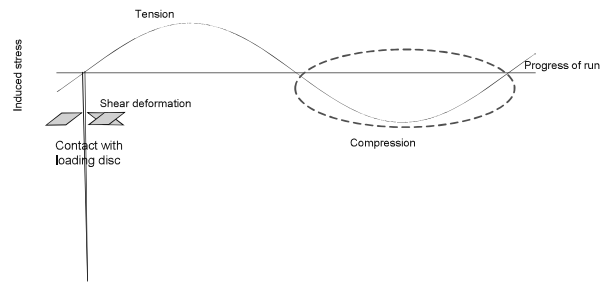


Fig.10 Induced stress in TP during Contact Bending Fatigue test

Fig.11 shows our prototype of CBF tester.

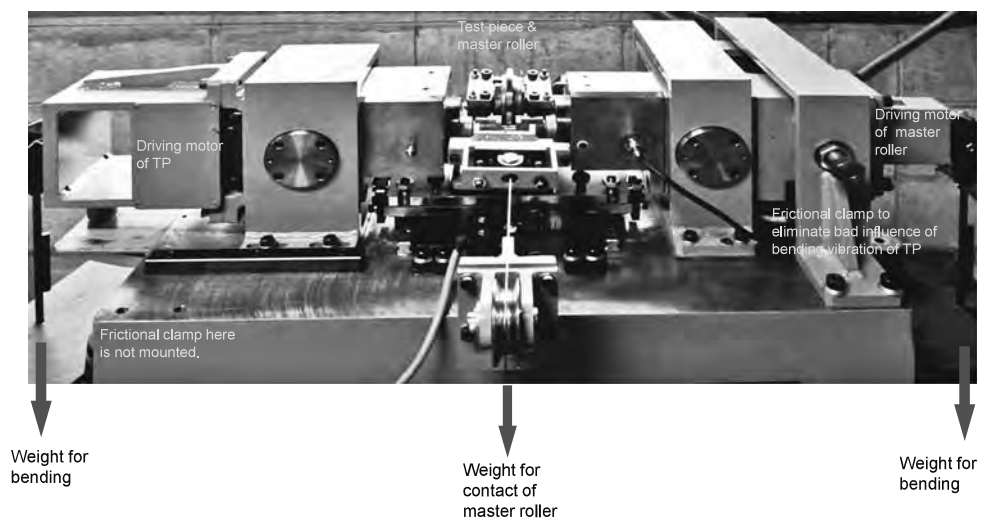


Fig.11 Outlook of CBF test rig

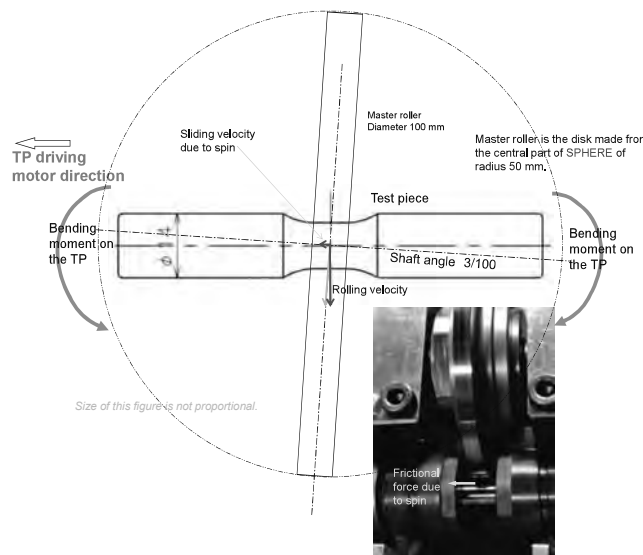


Fig.12 Skew setting of shafts to produce axial frictional force on TP

When the TP axis and master roller axis is parallel, the rig can give slip at contact point only in circumferential direction of TP surface. It is then expected that the direction of micro-crack initiation will be perpendicular to the circumferential direction of the TP. Then bending moment acting on the TP could not open this initiated micro-crack and this is strongly different from the stress state on tooth flank. To induce initial micro-crack in circumferential direction of TP surface, frictional force in the axial direction of TP is needed. To realize this situation, the master roller axis is set to skew to the TP axis. Fig.12 shows this situation. The master roller is the disc made from the central part of SPHERE of radius 50 mm. The incorporation of sphere as the model of contacting body can eliminate the difficult problem of alignment change at practical operation of CBF test and it is also profitable to make the contact analysis easier.

Fig.13 shows the way of lubrication. Oil pad is placed at a side of the master roller to lubricate the contact point of TP and the master roller. Upper side of TP and master roller is fully exposed and this enables many kinds of simultaneous real time measurement during the endurance test of materials. For instance, considerably large elastic bending deformation of the TP made from high strength steel receives also the influence of frictional force at the contact point. In the case of our CBF rig, the height of the TP during the test changes by ca. +/- 5 μm as function of the change of circumferential slip direction. That means it will be possible to measure the state of frictional force during endurance test. The measurement of surface temperature is also of no difficulty.

4. Failure mode of test piece by CBF rig

Fig.14 shows one example of TP broken by CBF test. The condition of this tentative test is shown on Table 1. It is very interesting, that the broken position of TP is not the middle of the Hertzian contact width where the contact stress in dry condition takes the maximum, but it is near the downstream side end of the contact width. "Downstream" here means that in the axial slip direction of contact due to skew setting of the shaft. Many severe traces of FOD

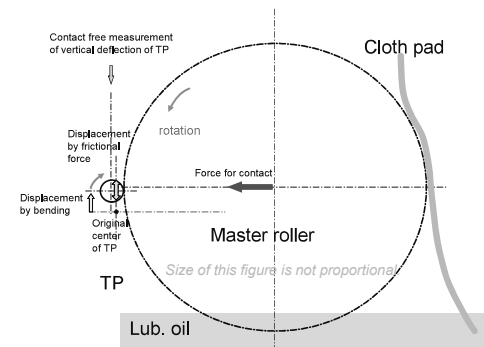


Fig.13 Lubrication and deformation of TP

are found in the downstream region of the contact width. Another test piece that was broken by the CBF test also showed the same position of breakage. It suggests therefore, there must be some definite reason why the TP tends to break at near the downstream side boundary of the contact width.

Table 1 CBF test condition

Material	JIS SCM420
TP & Master roller	case carburized, ground hardness HRC 60
Bending stress	934 MPa
Contact stress	1.9 GPa
TP rev.speed	300 rpm
Circumferential slip	zero
Rev.at breakage	ca. 600,000 cycles

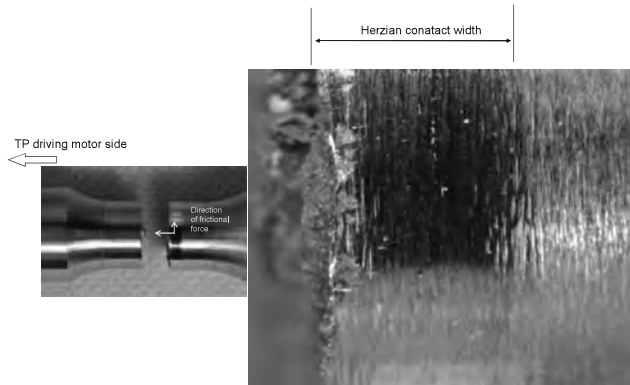


Fig.14 Example of TP breakage

Fig.15 shows a setup for basic investigation about EHL state of sphere on cylinder contact and some results investigated^{[4],[5]}. The sphere is made softer than the roller. When the roller is fixed without rotation under sphere driving, clear trace of metal-contact remains on the roller surface. The form of the contact trace is well corresponding to the theoretical U-shaped figure of the EHL oil film thickness, i.e. metal contact occurs in probability where the EHL oil film thickness becomes thin. The influence of the surface roughness does not bother much for the formation of oil film after the EHL theory, so long as the surface roughness is less or comparable to the minimum oil film thickness. Running test by driving sphere with free rotation of roller, i.e. almost slip zero, results the appearance of two scratch lines at symmetrical positions of minimum oil film thickness, a little inside of the side boundary of Hertzian contact ellipse. These two lines must be the trace of wear occurred by probable metal contact. This experimental result confirms the propriety of the U-shaped form of EHL oil film thickness .

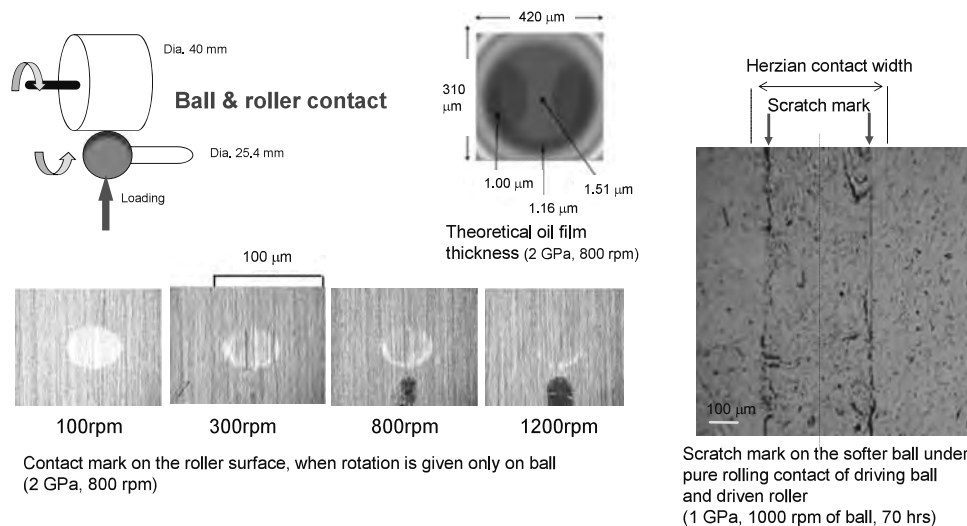


Fig.15 Minimum lub.oil film thickness and probable place of surface contact
(Experiment in this figure was not carried out with CBF rig.)

Fig.16 shows the state of the TP surface observed by SEM after the TP breakage by CBF test. Figure of position A shows the state of maiden surface, that is free from contact. Figure of position B shows the state of contact surface, a little inside of the Hertzian contact ellipse boundary. Grinding mark still exists, but the surface is plastically deformed or polished or worn considerably. Very interesting thing is, small cracks or wrinkles are generated in the axial direction of the TP. They exist over the grinding mark. Figure of position C shows the state of surface at almost the center of contact width. Micro-cracks are initiated in the circumferential direction of the TP surface. This is the result of the design intention of the CBF tester. Small axial cracks or wrinkles are plastically deformed or worn to disappear, but their traces are still recognizable. Fig.17 shows the state of FODed part near the broken section of the TP. By crushing of meshed-in foreign object, cracks are induced in many different directions. Fragments of crushed object have made scratching on the surface in frictional force direction.

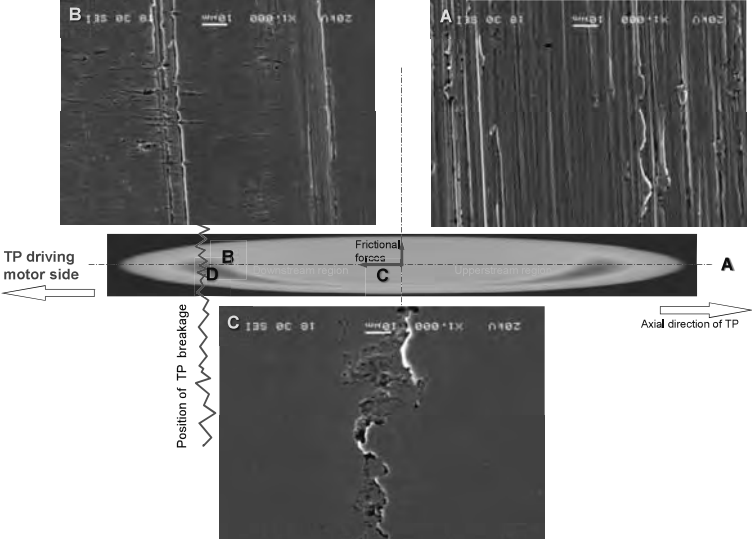


Fig.16 SEM figures of the surface of the broken CBF test piece
 A: Contact free surface
 B: Surface apart from the center of contact width
 C: Near the center of contact width



Fig.17 SEM figure of the surface near the broken position of the test piece (Position D). Surface damage due to crush of meshed-in foreign object

Fig.18 shows schematically an assumed history of the TP breakage by the CBF test:

1. In spite of U-shaped bank of minimum oil film thickness in EHL contact region, the rough surface at the center of contact region of the TP metallicly contacts to each other in probability and the contact part plastically deforms and wears. Micro-cracks are induced there in the circumferential direction of the TP.
2. The surface of skewed master roller carries foreign objects such as wear debris into contact region. In the upperstream region of contact, foreign objects are not well caught by U-shaped bank of EHL oil film thickness and trace of FOD is somewhat rarer than that on the downstream region. Traces of FOD exist more at the center of contact region due to probable encounter of surface roughness asperities.
3. In the downstream region, many foreign objects, sometimes considerably large one, are

trapped by U-shaped bank of EHL oil film thickness and the collision at the bank of minimum oil film thickness had made a serious crush of foreign objects that can cause some cracks to destroy the TP.

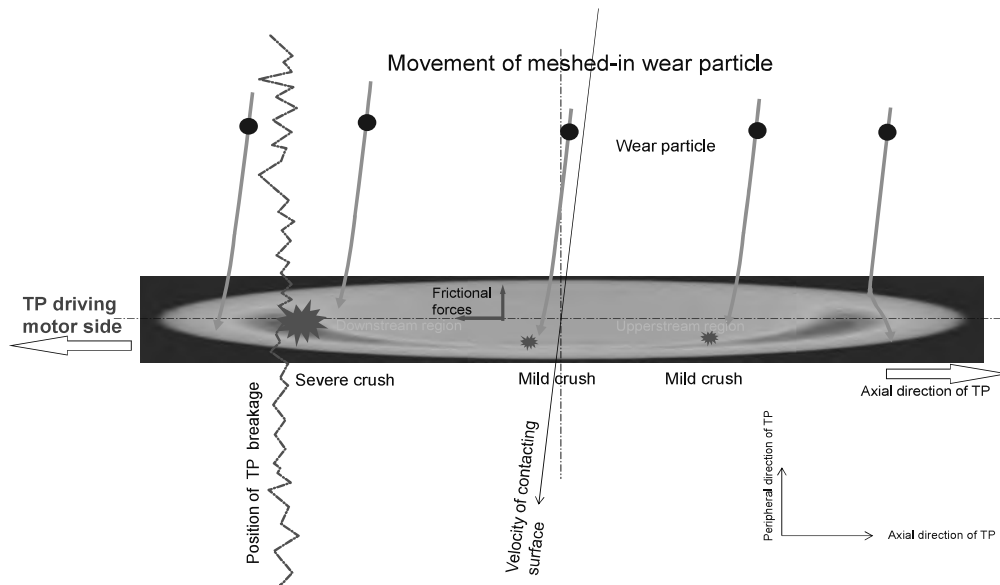


Fig.18 Assumed procedure of the TP breakage

5. Standing position of CBF tester for evaluation of gear material

Table 2 compares different methods of gear material evaluation. The comparison is made in terms of (a) items considered at the test, (b) influencing factors on gear durability and (c) cost for the test. Types of test rig include those often used by steel makers or by metallurgists, tribologists or gear researchers such as “Rotation-bending rig”, “Pulse-loading rig”, “Two-disc rig” and “Running bench of TP-gear”. Those often used by gear producer such as “Running test of actual unit under partial load” and the final “Operation test of actual unit under actual driving condition” are also listed for comparison. The grade in the table, from 1 to 5, indicates the rank from good to bad or well to poor. Alphabetic indication in the table explains remark for deciding each grade number. The ranking is decided by author’s personal feeling.

In practice, in order to cut the expense, we often incorporate acceleration test using higher loading over the rating. It reduces the grade of the evaluation tests in the table considerably. The reason of this grade reduction by acceleration test for each item on the left-most column of the table is summed up as follows:

Load distribution over tooth flank changes due to excessive loading, because micro shape correction of tooth flank form is function, not only of tooth deformation, but also of the gear unit deformation. Tooth profile and lead form crowning correction becomes out of the optimum. That increases the magnitude of induced stress and severity of trochoidal interference and of tooth side edge contact. Surface temperature of tooth flank increases and it becomes far different from the case of rating condition of the actual gear box in normal operation usage. High temperature of tooth flank changes the EHL state. Lubricating oil film becomes hotter and thinner and oil quality deteriorates fast and considerably. The amount of wear debris

Table 2 Different methods of gear material evaluation and their effectiveness

Factors influencing on test results (Grade number in the table for recognition of these factors refers the difference from the state of actual gears in operation)		Test rig types for gear material evaluation						
		Actual unit with real condition	Actual unit with partial load	TP gear on test bench	Disc rig	Pulse loading rig	Rotation bending rig	CBF rig
Test object		Real gears	Real gears	TP gear set	Disc/Disc	TP gear	Rod	Rod/Disk
1	Metallurgical character of gear material including effect of heat treatment and surface finishing, size effect of TP	1	4	2 e	3 h	3 e	4 k	2 k
2	Stress state at a position of possible damage apart from load applying point, e.g. for the case of tooth bending strength	1	5 c, d	4 f	5	3 f	5 l	4 l
3	Contact pressure as functions of loading value and distribution, surface curvature, slip and surface waviness & roughness	1	5 c, d	2 e, f	2 h	5	5	2 m
4	Subsurface stress under contact point, e.g. subsurface stress under spalled part	1	5 c, d	2 f, g	4 g	5	5	3 m
5	Surface temperature of contacting surface	1	5 c, d	2 f	3 i	5	5	3 m
6	Contact of side and/or tip edge of tooth, e.g. trochoidal interference at tooth side or at the center of lead crowning position	1	5 c, d	3 f	4 j	5	5	4 n
7	Angle between direction of initial crack caused by contact damage to bending stress to open the crack on damaged surface *	1	1	1	5	5	5	2
8	State of lubricating oil film	1 a	4 d	3 d	4 i, j	5	5	4 i, j
9	Meshing-in state of contaminants and wear particles in comparison with the case of field operating gears	2 b	2 b	3	4	5	5	3 b,o
10	Influence of dimensions & accuracy of TP	1	1	4	2	1	1	2
11	Cost and labor for testing	5	4	3	2	1	1	2

and contaminants in lubricating oil increases, that makes the probability of their crush by tooth flank meshing higher.

The big problem of running test using TP-gears is that the influence of gear accuracy comes in the result of material evaluation, and it is very difficult to separate the contribution of metallurgical influence and that of gear geometry and quality on the durability of gear material. It is impossible to escape from this fact. Big merit of CBF test is that the TP is

The remarks corresponding to the alphabetic indication at right side of grade number in the table are as follows:

- * Bending moment on gear tooth acts to open the crack caused by surface damage. No rig using non-gear TP can reproduce such direction of initial cracks and stress state due to bending moment there. The difference in stress state for helical gears and for CBF test piece becomes smaller.
- a: Due to oil deterioration and atmospheric influences, the ranking can be shifted down from 1 to 2.
- b: The degree of oil contamination and deterioration can be different from that in actual usage.
- c: Tooth flank is usually form corrected in its 3 dimensional micro-shape and its optimum amount is function of transmitting load. That means, under partial load, the state of tooth flank form correction is far different from the optimum state.

far simpler than gear in shape and the TP of CBF test suffers less influence from geometrical form accuracy of TP in comparison with that of gear test. There is no perfect way of testing, but the Contact Bending Fatigue test rig (CBF rig) will bring the results comparable to those of bench test rig using TP-gears, with considerably low cost and low labor consumption.

6. Conclusions

For evaluating high strength gear material, CBF test rig is now under development. With CBF test rig, test piece suffers very resemble stress history as that of tribologically attacked part of gear tooth flank.

Some test results show

1. Micro-crack perpendicular to the bending stress, i.e. in circumferential direction of the TP, appears at the center of the Hertzian contact width.
2. Unavoidable meshing-in and crush of wear debris is observed just same as the case of operating gear tooth flanks. Such crush of wear debris can damage TP surface.
3. Some small tribological surface damage of issue 1. or 2. above occurs at first. With stress repetition at that point, it develops, under existence of tensile and shear stresses, to the final breakage of the TP. This is the target process of failure progress to be checked for evaluating gear material, and the CBF rig showed the capability to reproduce such failure progress.

During the development work and early test of the prototype rig, following interesting phenomena are observed:

4. When the EHL oil film thickness is comparable with surface roughness, the U-shaped region of minimum oil film thickness contacts rather easily.
5. Also in the case that the surface roughness becomes far larger than the oil film thickness, U-shaped bank of minimum oil film thickness seems to exist in probability and meshed-in

- d: The minimum oil film thickness receives strong influence from surface temperature and surface temperature is functions of transmitting load and heat dissipation. The influence of gear box construction is very large.
- e: If gear dimension is different, stress state for the test becomes different, in spite of the usage of same material and same heat treatment.
- f: mainly because the TP gear is small and is often spur gear.
- g: The state of tensile stress for gear tooth at the initiation point of surface crack and in subsurface cracked zone is considerably different from that of disc, when the loading position moves from there e.g. toward addendum on gear tooth flank.
- h: The induced stress for gear tooth is considerably different from that for disc.
- i: The induced thermal condition for gear tooth is considerably different from that for disc.
- j: The state of contact deformation of tooth and that of disc is considerably different.
- k: Micro metallurgical state of rod and gear tooth is considerably different, even for the same material kind and same heat treatment are given.
- l: The global state of stress for rod and gear tooth is different, even in the case that the local nominal bending stress value is calculated as the same.
- m: The global state of contact stress for rod and gear tooth is different, even in the case that the local nominal Hertzian stress value is calculated as the same.
- n: The state of edge contact for gear teeth and for rod or disc is considerably different.
- o: Carrying capability of foreign objects with tooth flank and that with peripheral surface of rod and disc is considerably different.

foreign objects are trapped with U-shaped bank of minimum oil film thickness in the axial downstream region and crash severely the surface there.

6. Some tests with the ground TP of carburized JIS SCM420 steel showed, that the broken part of the TP is not the middle of the Hertzian contact width, but the place of minimum oil film thickness in the region of axial downstream direction.

We believe incorporation of CBF test rig for evaluating the allowable stress value of gear material brings us better and useful information than that from conventional test rigs.

The Gear Technical Committee RC-251 of the Japan Society of Mechanical Engineers wants many gear engineers over the world will try this method to evaluate high strength gear material. For that intension, no part of the CBF test and rig construction is patented and you can try freely as you like.

Acknowledgement

Authors thank the members of the JSME RC251 committee and SHINKO Engineering Co.Ltd. for their cooperation to develop CBF test.

References

- [1] A.Kubo, "On failure problem of gears made from very high strength steel", DETC2011-47642, Proc.11th ASME Int'l PTG Conference, August 28-31, 2011, Washington, DC, USA
- [2] A.Kubo, "Extent of validity of rules" , Invited lecture, Int'l Gear Conf. ICMT2006, Chongchin, China
- [3] L.A. Sosnovskiy, S.S.Sherbakov, "Surprise of tribo-fatigue", Magic Book, Minsk 2009, ISBN 978-985-6863-24-3
- [4] T.Hou, S.Matsumoto, Effect of EHL Oil Film Thickness Distribution on Initial Running-In and Rolling and Slidind Fatigue of the Point Contact Surfaces under Mixed Lubricating Condition, Proc.International Tribology Conference, Hiroshima2011 ,G2-02(2011.11)
- [5] Y.YASUE, S.MATSUMOTO, Yan Ken LIM, Effect of EHL Film THickness Distribution on the Running-In under Mixed Lubricating Condition, Tribologist(Japanese Society of Tribologists), Vol.56, No.5(2011.5) pp.312-319 (in Japanese)

特別研究員による成果

超電導インバータの基礎研究

特別研究員 長村光造

1. 目的

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、電気回路の開発研究を行うこと。

2. 成果

電力の次世代ネットワークについては、理想的には unnecessary 電力損失が最小になる超電導技術を基幹とすることにより、大きな省エネルギー効果が達成される。そのためには発電機、送電経路、変圧器、限流器等々の個々の電力機器の超電導化と共に、それらを連係するインバータ、コンバータ等の電力変換器の超電導化が進められてこそいわゆる次次世代ネットワークの実現が可能となる。そこでインバータの基礎技術分野であるパワーエレクトロニクス用スイッチングデバイスの特性について考えてみると、現用の Si を素材とするスイッチングデバイスの代表例を Si-MOSFET とすると、次世代高効率電力変換器としての方向性は WGS(ワイドギャップ半導体)の代表である SiC を素材とした MOSFET の開発が大きなターゲットとなっている。その特性は極めて優秀で製造コストが下がれば高い動作周波数で大きな電力変換容量の必要な用途に使用されると考えられる。一方本提案の超電導スイッチングデバイスはオン抵抗が極めて低いので導通損失を大幅に低減でき、大電流の通電が可能であるという特徴を持っている。しかし現状の技術では耐圧を高くできない、高速スイッチングが難しいという欠点がある。これらの欠点を含んでも、現状の超電導の性能により商用周波数帯での種々の応用に適用することが可能である。すなわちパワーエレクトロニクス用スイッチングデバイスは現状、将来共に Si および WGS を素材とするデバイスが主流を占めるが、低電圧、大電流、商用周波数帯での応用には超電導スイッチングデバイスが有利であり、省エネルギー、CO₂ 排出削減に大きく寄与すると考えられる。

そこで本年度は回路シミュレーターにより高効率な超電導インバータの成立条件を検討した。実際の回路で使用する多くの定電圧電源についてシミュレーションを行った。定電圧電源からの直流を方形波の交流に変換する安定な条件を考察したところ、負荷に 100A の電流を流す条件についても変換効率の高い回路条件があることが明らかとなった。定電圧電源による直流/交流変換に関して、本超電導ブリッジ回路においても電力消費効率 99% 以上の変換条件があることが明らかとなった。ブリッジ回路の最大電圧は 100 V 以下であることがわかり、超電導インバータとして実現可能な条件であることが明らかとなった。

その一つの応用として考えられるのは太陽光発電におけるいわゆるパワーコンディショナの問題である。太陽光電池からの直流電力はインバータ（パワーコンディショナ）により交流電力に変換し、交流系統に接続された負荷設備に電力を供給すると同時に、余剰電力を系統に逆潮流す

る装置で構成されている。その機能は最大電力追従機能(MPPT)、DC/AC 電力変換、系統連系の機能をそなえている。一例であるが太陽電池モジュールからの入力電圧 30V を昇圧チョップで 250V にしてから、インバータに投入する。電圧型 PWM インバータにはダイオード内蔵 IGBT が使用される。その消費電力は 200 – 326 W とかなり大きな値となる。そのためインバータの効率は一般的に 94%程度といわれている。日本メーカーの太陽電池モジュールの性能のひとつとして、例えば HIT-N230 モジュールは 72 枚のセルが 1580mm x 812mm のパネルに組み込まれている。1 セルあたりの解放電圧は 0.5~0.7 V 程度である。モジュール化した場合には電圧は 12~50 V である。このように太陽電池は本来的に低電圧・大電流の機器である。太陽電池で発電した電力をインバータ回路で交流に変換する。インバータの効率を高くするため昇圧チョップで電圧を高くすることが要求されている。この昇圧チョップ、インバータ回路でのトランジスター、ダイオードによる電力損失が大きいことが問題となっている。

そこで本研究では超電導インバータの低電圧・大電流の特性を生かして、太陽電池セルの起電力を直接交流に変換し、その後昇圧トランスで 100VAC/200VAC の交流を得ることを提案する。この超電導インバータ回路で 2V、500A の直流電力を変換した結果、4mΩ の負荷に 495A の方形波出力を得た。このときのブリッジ回路での消費電力は 2.6W であった。

現状の太陽光発電では太陽光セルを直列に並べているため電圧が高く、セルの不均一さにより電圧の変動が起りやすく、そのため MPPT のような機構が不可欠となる。一方太陽光セルを並列に配置する大きな利点は電圧が各セルの起電力 1V 以下で電圧変動が小さいことであり、そのため MPPT のような機構は不用になることである。また本研究で提案する冷凍冷却した超電導システムは大規模にするほど現状の半導体システムより省エネルギー性が優れていることを示すことができた。

3. 成果の公表

長村光造、中村武恒、岡徹雄；発明「超電導電力変換器」平成 26 年 3 月 14 日に特許第 5497642 号として特許原簿に登録された。

報告書作成日 平成 26 年 8 月 19 日

シンバルの音響特性に及ぼす金属組織の 影響評価の研究

特別研究員 長村光造

受託先名：株式会社大阪合金工業所

1. 目的

シンバルの音楽性の高い音響効果に関する特殊な合金と複雑かつ不均質な残留歪の存在の影響との相関を解明すること。

2. 成果

強度の加工・熱処理によりシンバルに残留する不均質な局所歪と音響特性の相関を解明することを目的に SPring-8 における局所残留歪測定および応用科学研究所における残留歪の緩和過程の計測等を実施した。

シンバルは青銅を素材とするが、その発展の過程で「トルコシンバル」と呼称されるように、錫を 20wt%含む非常に特殊な合金が最高の素材として認知され、世界の中でもトルコでしか長い間生産することができなかった。最近になり大阪合金工業所と小出シンバルが連携して世界水準のシンバルの製作を始めるようになった。製造過程として素材の成分調整、熱処理およびカップリング（1次成形）→へら絞り（2次成形）→ハンマリング（3次成形）→音溝加工（製品）を経るが、いずれの過程も複雑な音響効果に欠くことができない。しかしこれまでは職人的技により経験的に製造過程の工夫がなされてきた。これを客観的に数値化できるようになればシンバルの製造方法に変革をもたらすことができ、品質向上とともにシンバルのさらなる利用範囲の拡大等の工学的メリットをもたらすものと考えられる。そこで本研究においてシンバルでは音楽性の高い音響効果のためへら絞り、ハンマリング、音溝加工の塑性加工により生起するランダムな残留応力/歪分布が本質的に重要と考えられるので、その3次元空間分布の定量的解明を目的とした。

本研究では大阪合金工業所の素材を用いて小出シンバルで製作された4種類のシンバルを残留ひずみ分布測定に供した。すなわちへら絞り加工直後のシンバル(I-0)、歪計測後直ちにハンマリング加工を行ったシンバル(II-0)およびその比較材としてハンマリング加工して室温に3ヶ月保持したシンバル(II-3)とさらに音溝加工を施したシンバル(III-3)である。

歪測定には Spring-8 ビームライン BL28B2 の高エネルギー白色 X 線を使用した。シンバルは 16 インチ径（約 400mm φ）厚み約 2mm の笠形をしており、ゴニオへはビームがシンバル笠部分の平面と垂直に交わるよう縦方向に保持具で固定した。シンバル笠部分平面の内側（カップリング部近傍）、中央部分、外縁の3ヶ所での計測を行った。ひずみスキヤニング法により、中心から外縁方向に座標軸 X_s をとり、また深さ方向には表表面から裏表面に向かう座標軸を Y_s とした。各座標位置(X_s , Y_s)で2次元回折エネルギーマッピングを半径方向および周方向に対して

実施した。

一つのシンバル毎に(X_s , Y_s)の異なる 147 点の座標位置でエネルギーマッピングを行い、回折ピーク毎の相の同定と格子面間隔を求めた。一方電子顕微鏡観察からシンバルの主相は β 相であり、副相として主に α 相が観察されている。シンバルは粗大粒であるため場所により回折ピークが得られなかったり、面指数の異なる回折ピークが観察された。本報告では比較的広範囲に観測された β 相(420)面間隔から求めた格子定数 $a(\beta)$ の変化について考察を行った。垂直方向に設置した検出器からの値であり、したがってシンバルの周方向の残留歪を捉えたことになる。

へら絞り加工後のシンバル外縁部($X_s=-32\sim-28\text{mm}$)における深さ方向の格子定数変化については、 $y=-1.2\text{mm}$ は裏表面、 $y=1.2\text{mm}$ は表表面に相当し、裏から表に向かうに従い格子定数は増加することが観察された。これはへら加工により裏側が大きな圧縮応力をうけ、表側に向かうに従い圧縮状態が減少することを示している。なお $y=0$ はシンバルの厚みの中央に相当する。 $y>0$ では(420)面の回折ピークを観測することができなかった。また半径方向の位置が $X_s=-32\sim-28\text{mm}$ に変化しても格子定数はほぼ同じであった。このことは深さが同じであれば圧縮残留応力が同じであったことを示している。ただし残留歪がどこまで圧縮性で、引張性に変化するかの絶対値の定量的な判定は $d\theta$ を基準にした解析を行った後に判断する。

一方ハンマリング加工後の結果については、裏から表に向けての格子定数変化はへら絞り加工の場合と同じ傾向にあった、半径方向の位置が $X_s=-26\sim-30\text{mm}$ に変化すると格子定数は位置 X_s により変化することが明らかとなった。これは深さ y が同じであっても圧縮残留応力は位置 X_s によって異なることを示している。

シンバルの肉厚中央における β 相の格子定数の変化については、シンバルの任意の中心から半径方向に 1mm ずつずらした位置での格子定数の変化から周方向の残留歪の変動を評価することができる。なお上述したように残留歪の絶対値の判定は現段階ではできないが、へら絞り材では周方向の歪の変動は小さいが、へら絞り+ハンマー材では圧縮歪が大きくなり、変動も大きくなる。3ヵ月保持材では全体に残留歪は小さくなるが、変動は増幅される。このように音響特性に本質的に重要なシンバル内の不均質な残留歪の定量的な評価が可能となり、今後の高品質シンバルの製造の科学的な根拠を得ることができた。

3. 成果の公表

小出シンバル、福井大学、大阪合金工業所、応用科学研究所の連携による「シンバルの素材国産化および品種多様化への連携事業」により素形材連携経営賞経済産業大臣賞を受賞した。

報告書作成日 平成26年8月19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

超電導材料の臨界電流測定および引張試験方法等に関する国際規格作成のため国際共同研究を実施した。さらに超電導線材の通則の作成のため IEC/TC90 に WG13 が設けられコンビナーとして国際的な調査を行い、米国ボストンで 2013 年 7 月に開催された TC90/WG13 委員会で通則に関する意見の集約を行った。また WG5 のコンビナーとして 2014 年 1 月にドイツ カールスルーエで開催された TC90/WG5 委員会において REBCO 超電導線の室温引張試験の国際 RRT の結果のとりまとめを行った。

IEC-TC90 の国際標準の作成活動の一環として最近 REBCO テープの室温における機械特性の国際ラウンドロビンテスト(RRT)を 7 か所の研究グループが実施した。その試験結果をとりまとめ、測定データの標準不確かさを推定するとともに、結果の考察から試験方法の改良についての知見を得ることができた。

本 RRT では市販されている 4 種類の実用 REBCO テープを用いた。これらのテープはすべて銅あるいは銅合金でラミネートされたもので、テープ厚さは 0.22 mm (A)、0.10 mm(B)、0.19 mm(C) および 0.19 mm(D)であった。試験には長村光造 (応用科学研究所)、Shin Hyung-Seop (Andong National University)、Weiss Klaus-Peter (Forschungszentrum Karlsruhe)、Nyilas Arman (Cryogenic Engineering and Materials Expertise)、Nijhuis Arend (Applied Superconductivity Centre, University of Twente)、山本潔 (古河電工)、町屋修太郎 (大同大学) の 7 研究機関 P_j ($j=1$ to 7) が参加し、各機関でテープ毎に 5 回 ($N=5$) の試験を行った。試験は以前実施した BSCCO テープの RRT と同様の方法であり Guideline REBCO13 として公開された試験方法に従った。本試験では 2 種類の弾性定数と 2 種類の 0.2%降伏強度の値を決めた。

各研究機関から報告された試験データの妥当性を検討するため弾性定数の比 E_0/E_U が 0.7 から 1.3 の範囲を満たすとき、その試験は正常に行われたと判定した。今回報告された試験データはすべてこの条件をクリアした。

まず弾性定数についての結果から 4 種類のテープについて全平均と相対標準不確かさ(RSU)を求めた。RSU の変動を調べると、 $\langle E_0 \rangle$ に対してのほうが $\langle E_U \rangle$ より大きく、異なるテープ間では

テープ厚さが薄いほど RSU は大きくなる傾向が見られた。実験条件の中で引張速度を 10^{-4} [1/s] より遅くすること、テープ厚さの測定を精度よく行うことにより、RSU を小さくすることができることが明らかとなった。0.2%降伏強度の RSU の変動についても弾性定数についての結果と同様の傾向がみられた。ただし RSU は全体に小さな値となり、弾性定数よりは精度よく求められる機械定数であることが示された。

IEC-TC90国際標準の制定の一環として、国際RRTを実施しその試験結果を検討したところ、本試験で参考にしたガイドラインREBCOの試験条件よりさらに厳しい条件を課すことが必要であることが明らかとなった。

従前より国際標準化をすすめていた、BSCCO線材およびNb3Sn線材の室温引張試験方法の国際標準がIEC 61788-18および19として2013年に発行された。

3. 成果の公表

(1)IEC 61788-18:2013 Edition 1.0 (2013-09-12) Superconductivity - Part 18: Mechanical properties measurement - Room temperature tensile test of Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2223 and Bi-2212 composite superconductors

(2)IEC 61788-19:2013 Edition 1.0 (2013-11-19) Superconductivity - Part 19: Mechanical properties measurement - Room temperature tensile test of reacted Nb3Sn composite superconductors

(3)K Osamura, H-S Shin, K-P Weiss, A Nyilas, A Nijhuis, K Yamamoto, S Machiya and G Nishijima; International round robin test for mechanical properties of REBCO superconductive tapes at room temperature, SUST 27 (2014) 085009

(4)IEC TR 61788-20:2014 Edition 1.0 (2014-07-28) Superconductivity - Part 20: Superconducting wires - Categories of practical superconducting wires - General characteristics and guidance

報告書作成日 平成 26 年 8 月 19 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。またスプリングボードを用いた新しい臨界電流および局所歪測定方法の検討を開始した。以下その一部について報告する。

DI-BSCCO 線材について、スプリングボードを用いて、一軸性の引張・圧縮を与えた状態で臨界電流のひずみ依存性の測定を行った結果は次のように要約される。 A_{BSCCO} は BSCCO フィラメントに生起する歪の負荷歪(A_a)依存性を示している。圧縮側、引張側それぞれでのフィラメントが破断し始める限界の歪を A_{acr} , A_{atr} とすると、その内側では臨界電流の歪依存性は可逆となる。可逆歪範囲では臨界電流は歪が減少するとほぼ線形に増加する。しかしフィラメントが破断すると臨界電流は急速に減少することが示された。一方臨界電流の曲げ歪依存性には圧縮と引張の歪が同時に影響することになる。そこでスプリングボードの実験で得られた臨界電流の一軸性歪依存性との関係を検討したところ、両者の臨界電流の歪依存性に 1 対 1 の相関があることが明らかになった。

供試料は住友電工製の DI-BSCCO テープで、数種の金属テープをラミネートした補強テープを用いた。これを室温で所定の直径の治具に巻き付けて曲げ変形を与えた。その後直線状にして臨界電流測定用のホルダーに取り付けた。臨界電流測定は液体窒素中で行った。また Spring-8 において試料テープを曲げた状態で BSCCO フィラメントに分布する歪の状態を観察した。

臨界電流の一軸性圧縮/引張歪依存性については(1)の領域のフィラメントの破断が起こらない可逆歪領域がある。(2)の領域では引張荷重によりフィラメントが破断して急速に臨界電流が減少する。(3)の領域では圧縮荷重によりフィラメントが座屈やせん断破壊により臨界電流が徐々に減少する領域である。(4)の領域ではさらに大きな脆性破断が起こるため臨界電流が急速に減少している。

DI-BSCCO テープでは中心部分の厚さ約 0.1mm の範囲は純銀に囲まれた多数本の BSCCO フィラメントで構成されている。このテープを直径 D まで曲げると、歪ゼロの中立面の外側では最大引張歪(A_+)まで、内側では最大圧縮歪(A_-)まで歪が連続して変化する状態になる。臨界電流の

曲げ歪依存性のデータについて A_+ から A_- までの積分をとることにより評価することができる。このようにして計算で求めた臨界電流の曲げ直径依存性について直径に対応する一軸性歪の値を A_{c0} , A_{t1} で示した。このことより $A_{c0} \sim A_{t1}$ の間では圧縮歪の(3)の部分でのフィラメントの座屈等による臨界電流の減少に対応する。 A_{t1} より小さな直径では(2)の領域の引張歪によるフィラメントの急速な破断に対応させることができる。

要するに今回は特に臨界電流の曲げ歪依存性への一軸性圧縮・引張歪の寄与を明確に分離して議論できることを示した。

3. 成果の公表

(1) K Osamura, S Machiya, S Ochiai, G Osabe, K Yamazaki, and J Fujikami ; High Strength / High Strain Tolerance DI-BSCCO Tapes by Means of Pre-Tensioned Lamination Technique, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23(2013) 6400504-7

(2) K. Osamura, S. Machiya, S. Ochiai, G. Osabe, K. Yamazaki and J. Fujikami ; Direct evidence of the high strain tolerance of the critical current of DI-BSCCO tapes fabricated by means of the pretensioned lamination technique, Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 045012 (5pp).

(3) Kozo Osamura, Shutaro Machiya, Damian P. Hampshire, Yoshinori Tsuchiya, Takahisa Shobu, Kentaro Kajiwara, Goro Osabe, Kouhei Yamazaki, Yuichi Yamada and Jun Fujikami; Uniaxial Strain Dependence of Critical Current of DI-BSCCO Tapes, SUST 27 (2014) 085005 (11pp)

報告書作成日 平成 26 年 8 月 19 日

実用超伝導線材の臨界電流の応力・歪効果の 解明に関する基礎研究

特別研究員 長村光造

共同研究先:独立行政法人日本原子力開発機構

1. 目的

我が国が共同参加している ITER プロジェクトにおける超伝導線材の高性能化に関する基礎研究

2. 成果

ITER プロジェクトに関連して、 Nb_3Sn 線材、BSCCO 線材、および YBCO 線材における、臨界電流の応力・歪問題を統一的に理解し、解決するため、その歪依存性に関する挙動を温度依存性も含めて、詳細に明らかにした。本研究の一部の結果を下記に報告する。

実用超伝導線材は必要とされる工学的特性を満たすため最適な成分素材と構造から構成される複合構造を持っている。線材の内部構造は超伝導成分とブロンズマトリックス、バリアー層、銅安定化層等の機能成分から構成されている。そのため各構成成分の熱膨張係数(CTE)および弾性定数の違いから線材内部に複雑な局所歪/応力が発生する。超伝導成分に生じた局所歪はその超伝導特性に影響するが、しかしその影響を調べるために超伝導成分のみを取り出して調べることはできない。非破壊な方法で影響を調べるためには回折法は高い空間分解能がありかつ物質選択性があるので極めて有効な方法である。とくに中性子や放射光のような量子ビーム法は高輝度で透過性が高いので超伝導線材のように複雑な複合構造をもつ対象に対して効果的である。

Nb_3Sn 線材の超伝導特性は歪に敏感であり、その歪感受性は多くの研究者により調べられてきた。たとえば ITER CIC 導体の Nb_3Sn フィラメントに生じる局所歪は圧縮性で臨界電流の低下を招く。原理的には線材の複合構造を変えてこの大き過ぎる圧縮性歪を減少させることは可能である。従って現実の線材中の Nb_3Sn フィラメントに生じる局所歪を定量的に調べておくことは重要である。それに基づいて具体的に新しい線材の複合構造を設計することが可能となる。このような観点から量子ビーム法により一連の局所歪測定を続けるとともに、数値的評価を試みてきた。

本研究においては引き続き量子ビーム法により ITER 用 Nb_3Sn 実用超伝導線材中の超伝導フィラメントに生じる局所歪を測定し、とくに高温からの冷却過程のデータを拡充し、本研究で提案する局所歪の計算方法の正確さの確認を行った。さらに引張試験を行い、弾塑性挙動を基本とした数値解析結果と比較を行った。

本研究において以下の諸点を明らかにした。 Nb_3Sn 線材の応力—歪曲線は典型的な弾塑性的振る舞いを示した。この振舞を複合則をもとに数値的に評価するとともに、超伝導フィラメントに

生起する局所歪を量子ビーム法で測定した。また室温から700Kまで加熱および冷却過程で熱歪の変化を調べた。超電導フィラメントに生起する線材軸方向の熱歪は室温では圧縮性で、高温になると引張性になることが明らかとなった。この温度依存性は前報で提案した数値計算法により確かめられた。実測値との比較から熱歪が圧縮性から引張性に変化する際に熱歪がゼロとなる特性温度 T_0 を決めることができた。さらにある温度 T_c より高温では純銅成分のクリープ現象を考慮することにより実測の値と計算値を一致させることができた。

一方線材径方向の Nb₃Sn フィラメントに生起する熱歪は室温で圧縮性であり、また 700K までの加熱および冷却過程の全温度範囲で圧縮性であった。なお熱歪の大きさは線材軸方向に較べて小さな値であった。

3. 成果の公表

(1)長村光造、町屋修太郎、谷口博康、土屋佳則、鈴木裕士、菖蒲敬久、HARJO Stefanus、佐藤眞直、宮下克己、落合庄治郎、西村新；ITER 用 Nb₃Sn 線材中の超電導フィラメントに生起する熱歪の温度依存性、低温工学 48 巻 12 号 2013 年 617 - 624

(2)T Hemmi, S Harjo, Y Nunoya, H Kajitani, N Koizumi, K Aizawa, S Machiya and K Osamura; Neutron diffraction measurement of internal strain in the first Japanese ITER CS conductor sample, Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 084002 (6pp)

報告書作成日 平成 26 年 8 月 19 日

核融合炉用超伝導線材の量子ビームを用いた応力・歪効果に関する研究

特別研究員 長村光造

受託先名：自然科学研究機構核融合科学研究所
(LHD計画共同研究)

1. 目的

熱核融合炉の研究開発の一翼として LHD を用いた大型プラズマ実験と、その成果を基にヘリカル型熱核融合炉 FFHR の概念設計ならびに要素技術研究が進められている。これらの開発において必要とされる超伝導線材およびその集合導体の高性能化に関する研究

2. 成果

FFHR を想定した複合超伝導線材および大型超伝導導体の機械特性、超伝導特性の応力・歪効果を、計算機を用いた理論予測とその実験による検証を通して解明し、今後のヘリカル型熱核融合炉の研究開発に資することを目的とした研究を行った。その一部を下記に報告する。

Nb₃Sn および Nb₃Al 線材中の超伝導フィラメントに生起する熱歪は臨界電流の歪依存性を考察するとき直接に影響するので、その定量的な理解が重要である。本研究において量子ビームにより熱歪の温度依存性を精密に計測するとともに、理論的に精度よく計算する方法を開発した。

供試料として日立電線製作の 11000 芯を含むブロンズ法 Nb₃Sn 線材および 90 芯を含むジェリーロール法による Nb₃Al 線材を用いた。歪測定のため量子ビームを用いた回折実験を行った。J-PARC TAKUMI において電気炉で試料を加熱中の熱歪の変化を Spring-8 BL46XU では室温で引張荷重下での歪の変化を測定した。また応用科学研究所で室温引張試験を行った。

各試料に加わる熱履歴は超伝導相生成温度(T_f)から冷却され室温(RT)に持ちきたされる(この過程を step A とする)。この段階で引張試験中の局所歪を測定する。さらに別の試料を用いて室温から高温(Th)まで加熱して、その過程(step B)での熱歪の温度依存性を測定した。加熱の最高温度は Th=700K とした。線材中の超伝導フィラメントに生起する局所歪は熱歪と引張荷重により加わる格子歪の和となる。線材軸方向(axial)と径方向(transverse)の局所歪を計測したが、今回は主として軸方向の熱歪について考察する。

Nb₃Sn および Nb₃Al 線材の軸方向の熱歪の室温および加熱過程での変化のなかで、室温では $A^T < 0$ つまり Nb₃Sn, Nb₃Al いずれも圧縮の歪が生起している。これは超伝導相に比べて金属基成分の熱膨張係数が大きいことに原因する。室温における熱歪は Nb₃Sn のほうが Nb₃Al より大きい。その原因は Nb₃Al の熱膨張係数が Cu および Cu-Sn 合金に比較的近いことによる。室温から加熱してゆくと熱歪は圧縮性からゼロとなり反転して引張性($A^T > 0$)に変化する。T₀ という温度を境にして超伝導相に生起する熱歪は高温では引張性、低温では圧縮性になる。このような複雑

な熱歪の原因を明らかにするため、計算により熱歪の温度依存性を評価した。熱歪の計算方法の概要はすでに報告したが、複合体中の各成分に生起する熱応力の和がゼロになるという拘束条件を解くことにより各成分の熱歪を求めることができる。なおここで対象とする温度範囲で超電導相と Nb は弾性的に、Cu と Cu-Sn は弾塑性的挙動を示すものとして計算を行った。

一般に超電導相を生成させる高温では純銅は十分焼きなまされているので耐力が非常に低く、容易に塑性変形する状態にある。これを冷却すると純銅と超電導相や Nb との熱収縮の差から局所応力が高まり純銅は塑性変形する。また場合によっては Cu-Sn 成分の Sn 濃度は低くなっているので塑性変形する。step A により室温状態にある純銅はすでに塑性変形していることが計算からも示されている。次に室温から加熱するとほぼ逆の過程をたどるが、純銅の熱膨張が超電導相や Nb より大きいので、超電導相に引張性の熱歪を生来するようになる。さらに今回は高温では純銅はクリープ変形を起こす効果を考慮した。これらの要素を組み込んだプログラムにより計算により熱歪が求められることを示した。

従来から温度 T_0 以下で圧縮性の熱歪が超電導相に生起するとして、 T_0 の値を推定してきたが、本研究では Nb_3Sn および Nb_3Al 線材に対してそれぞれ $T_0=421K$ および $380K$ となることを明らかにした。本計算方法を延長すれば $4.2K$ 付近の極低温での熱歪の推定は可能となる。

本研究は核融合科学研究所平成22-24年度LHD計画共同研究の一環として実施されたものである。

3. 成果の公表

K. Osamura, S. Machiya, Y. Tsuchiya, H. Suzuki, T. Shobu, M. Sato, S. Harjo, K. Miyashita, Y. Wadayama, S. Ochiai and A. Nishimura; Thermal Strain Exerted on Superconductive Filaments in Practical Nb_3Sn and Nb_3Al Strands, Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 094001 (8pp).

報告書作成日 平成 26 年 8 月 19 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

京都大学大学院工学研究科
特別研究員 井手亜里教授

1. 目的

多様なサイズの絵画、屏風、掛け軸、彫刻などを超細密にスキャンし、実物の持つ情報を最大限に保全し、表示できる技術を研究開発する。

2. 成果

本研究開発内容は、主に二つに分けられることができる。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た。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、これはこの研究の当初から掲げていた目的であった。これらにおいては、今年度、すべての点について、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、アメリカ合衆国、中華人民共和国、マレーシアなど)にて、世界最高レベルの文化財、美術品、国宝等に応用させ、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(25年度)は、京都大学井手研究室の姉妹研究室として City University of Hong Kong(香港)に文化財デジタル化拠点を設立した。そのことによって、その他香港の主要な大学、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。そうして、これらの研究・実験成果を9月11—13日の間、シンポジウムで発表・公開をした。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)においても約1000年前の古墳壁画とよばれる、世界的にみても類のない壁画群をデジタル化することに成功した。

さらには、同年、日本国内においても多数の博物館、美術館、また主要な大学においてもこれらの研究、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) Jay Arre Toque, Ari Ide-Ektessabi ; Enhanced Spectral Reflectance Reconstruction using Pseudo-Inverse Estimation Method, International Journal of Image Processing

(2) 村山雄亮、井手亜里 ; ベイズ統計によるマルチバンドスキャン画像の波長・空間領域の同時復元、日本画像学会誌

(3) Pengchang Zhang, Tomoyuki Takeda, Jay Arre Toque, Yusuke Murayama, Ari Ide-Ektessabi ; A line scan camera based stereo method for high-resolution 3D image reconstruction, SPIE, San Francisco (America) 2014/2/2

(4) Jay Arre Toque, Ari Ide-Ektessabi ; Analytical Imaging and Scientific Recording for Cultural Heritage, International Workshop on Advanced Digital Imaging for Preservation, Conservation and Exhibition Design, Hong Kong (China), 2013/9/11-13

報告書作成日 平成26年8月29日

金属流体電磁ポンプとマルチグリッド法による 電磁流体有限要素解析

特別研究員 島崎眞昭

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

研究代表者が長年研究してきた代数マルチグリッド法（AMG法）に基づく有限要素電磁界解析法の発展として、電磁界解析と流体解析を連成させる電磁流体有限要素法へのAMG法の応用を目的とし、具体的適用対象として、原子力の分野で次世代高速増殖炉用に重要となっている金属流体用電磁ポンプの解析への適用を試みる。

2. 成果

(1)流体-磁界連成解析プログラムの開発

本研究の対象は非圧縮性電磁流体である。非圧縮性流体の移流拡散方程式に対する有限要素法では1)移流による数値不安定、2)非圧縮性に起因する数値不安定(圧力振動)の2種類の数値不安定を抑制する安定化手法が重要であることが知られている。移流による数値不安定を抑止するには、SUPG法(Streamline Upwind/Petrov-Galerkin)が有効である。非圧縮性に基づく数値不安定に対しては、圧力に関する補間関数と流速に関する補間関数との組み合わせに対する注意が必要で、いわゆる下限上限条件(inf-supcondition)を満たす必要があり、それを満足するものとして、圧力と流速に対して次数の異なる補間関数を用いる混合有限要素法がある。電磁気分野では、混合有限要素法は辺要素有限要素法において用いられているが、流体力学分野では伝統的な圧力、流速に同じ次数の補間関数を用いる手法が良く用い、その場合数値不安定抑止のため、PSPG (Pressure-Stabilized /Petrov-Galerkin)法が用いられる。SUPG/PSPG法では有限要素係数行列を要素単位の行列のみ作成する手法が広く用いられている。一方AMG法では有限要素法の係数行列全体を用いる必要があるため、係数行列全体をCRS(Compressed Row Storage)形式で圧縮格納する方法を用いることにした。2次元及び3次元のNavier-Stokes方程式に対するSUPG-PSPG法による流体解析については、24年度までに、係数行列をCRS形式で保存する流体解析プログラムを開発してきた。開発したプログラムの信頼性を確認するために、25年度に2次元および3次元立方体のcavity-flow問題を取り上げ検討した。レイノルズ数1000の場合について、既知の計算結果と比較し、プログラムの妥当性を確認した。さらに、この2次元流体解析プログラムに追加する形で2次元節点要素磁界解析プログラムを開発し、流体-磁界連成解析を行うことを可能にした。フラット型誘導電磁ポンプへの応用を想定した簡易モデルについて、予備的な数値計算を行った。

(2)代数マルチグリッド法による高速化

前項で開発したプログラムによる計算では、流体と磁界に関する有限要素解析に現れる線型方

程式の反復求解に、計算時間の大半が費やされる。25年度には、流体解析・磁界解析の両方について、代数マルチグリッド法の応用による反復求解の高速化について検討を行った。流体解析では、速度・圧力を未知数としたSUPG法により導かれる係数行列全体に代数マルチグリッド法を直接適用すると、十分な高速化がなされないケースが観察された。しかしながら圧力に関する部分行列のみに代数マルチグリッド法を適用することで、この問題を避けて、良好な結果を得られることが確認された。一方、磁界解析については、特に困難なく代数マルチグリッド法による高速化の効果が得られることが確認された。

3. 成果の公表

平成 25 年度の成果の公表は次年度以降に行うことにした。

報告書作成日 平成 26 年 7 月 30 日

共同研究員による成果

高温超伝導大電流導体の電磁特性についての基礎研究

京都大学大学院工学研究科

雨宮尚之教授

1. 目的

超伝導の大型応用のためには、大電流容量（数キロアンペア～数十キロアンペア）の超伝導導体が必要であり、その特性評価のためには超伝導特性を考慮した電磁界解析が有効である。本年度の研究は、大電流容量超伝導導体の中でも代表的な Roebel cable を対象として、超伝導特性と導体の三次元構造を考慮した電磁現象シミュレーションモデルを体系的に整備することを目的とした。さらに合わせて、研究の国際展開に向けた国際協力の推進、研究に対する社会の理解を深めてもらうためのアウトリーチ活動も目的とした。

2. 成果

(1)大電流高温超伝導導体の電磁現象シミュレーションモデルの体系的整備

比較的高い温度（液体窒素温度 77 K）で超伝導状態を維持できること、液体ヘリウム温度（4.2 K）まで冷やせば非常に高い磁界下で超伝導状態を維持できることなどから、セラミックス系の高温超伝導体は魅力的であり、単長百メートルクラスのイットリウム銅酸化物系の高温超伝導線が製造、市販されるようになった。しかし、一本あたりに流せる電流は数百アンペア程度であり、大型の電磁石や電気機器で要求される数キロアンペアから数十キロアンペアの電流容量を得るためには、テープ形状をしたこの超伝導線を複数本集合化する必要がある。Roebel cable はこのような集合大電流高温超伝導体のひとつであり、図 1 に示すようにジグザグ形状に切り出したテープ状の高温超伝導線を編んだような構造をしている。

高温超伝導線で構成した電気機器・電磁石においては、高温超伝導線の中の電流分布は一様でなく、複雑に分布し、かつ時間的にも変化している。このような時間的にも変動する内部の電流分布は、超伝導線に変動する電流を流したり、超伝導線が変動する磁界にさらされたりしたときに発生する交流損失という損失の原因となり、また、MRI や粒子加速器で要求される精密な磁界発生に対する障害と成り得る。高温超伝導線内部の電流分布についての知見を得、交流損失や電磁石の磁界精度を調べる上で電磁現象シミュレーションは有効な手段であるが、Roebel ケーブルは、その三次元的な形状故モデリングが難しいという問題があった。

我々は、非線形等価導電率で超伝導特性を表現し、また、Roebel ケーブルを構成する編み込まれたジグザグテープ形状の高温超伝導線の三次元的構造を少ない記憶容量で表現する手法を考え、Roebel ケーブルの電磁現象シミュレーションモデルを開発してきた。本研究では、基礎となる直線状の Roebel ケーブルのシミュレーションモデル、Roebel ケーブルで巻かれたソレノイドコイルのシミュレーションモデル等を体系的に整備し、また、数値計算結果と実験結果を比較検討することにより、モデルの妥当性の検証を行った。

(2)研究の国際展開に向けた国際協力

トルコにおいて、アンカラ大学に大規模な超伝導研究センターが開設され、これをナショナルセンターとして国内の各大学に所属する研究者が協力する形での超伝導の研究が推進されている。これまで、トルコにおける超伝導研究は、物理学、材料科学的側面の研究が中心であったが、今後、トルコ経済の工業化に向けて、超伝導の研究も応用研究に向けて舵を切りつつある。そのような状況の中で、高温超伝導線の交流損失測定の技術指導や超伝導工学の講義などの国際協力を推進し、今後、国際共同研究に発展させる礎を築いてきた。

(3)研究に対する社会の理解を深めてもらうためのアウトリーチ活動

大電流高温超伝導導体の電磁現象シミュレーションをはじめとする超伝導応用の研究に対する社会の理解を深めてもらうため、低温工学・超伝導学会の秋季講演会に伴う形の市民公開講座に参画した。この市民公開講座には千人を超える来場者を得た。

3. 成果の公表

(1)N. Amemiya, T. Tsukamoto, M.Nii, T. Komeda, T. Nakamura, and Z. Jiang; Alternating current loss characteristics of a Roebel cable consisting of coated conductors and a three-dimensional structure, Superconductor Science and Technology, Vol. 27, 035007 (2014)

(2)Y. Sogabe, M. Nii, T. Tsukamoto, T. Nakamura, and N. Amemiya,; Electromagnetic field analyses of REBCO Roebel cables wound into coil configurations, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 24, 4803005 (2014)

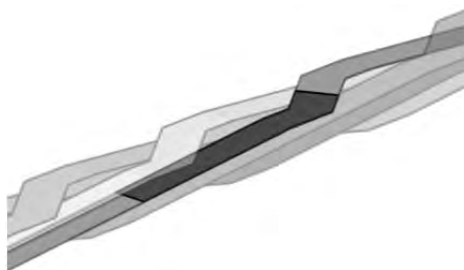


図1 Roebelケーブル。ジグザグ形状に切り出したテープ状の高温超伝導線を編んだような構造をしている。

報告書作成日 平成 26 年 9 月 30 日

自動車用ガスディスチャージランプ ～始動電圧低減を目的とした始動メカニズムの解明～

津山工業高等専門学校電気電子工学科
植月唯夫教授

受託先名:株式会社小糸製作所

1. 目的

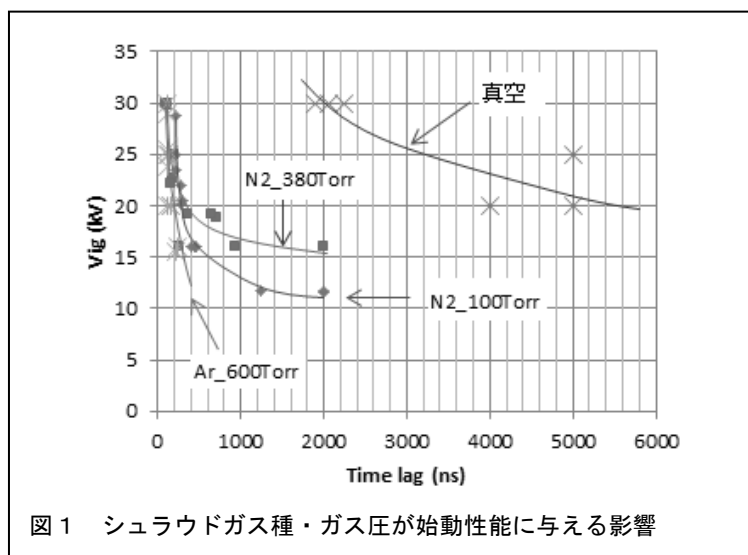
一般照明用 HID ランプは現在でも水銀が含まれているが、自動車用ヘッドランプ用の HID ランプは一般照明用に先駆け 2004 年世界初で水銀フリー化を達成した。日本では新車の自動車のヘッドランプの約 30%に HID ランプが装着されており、その約半数が水銀フリーとなっている。2012 年 7 月欧州 ELV 指令で自動車用ヘッドランプに水銀入りの HID ランプの使用禁止になる事と同調して、今後は水銀フリー化が一層進むと考えられている。

水銀が封入された HID ランプは、始動時は低圧の希ガス状態であり、点灯後はランプ温度の上昇に伴い水銀蒸気圧が上昇し適正なランプ電圧に達する仕組みになっている。しかしながら無水銀 HID ランプは水銀がないためその蒸気圧の上昇を利用することができず、点灯後のランプ電圧を確保するために高圧ガス(Xe)を封入する必要がある。このため始動時には従来の水銀封入 HID ランプ以上の高電圧の印加が必要となる。このことは点灯装置の大型化と高コスト化につながるため、始動電圧の低減は非常に重要である。現在の無水銀 HID ランプの始動電圧は約 20kV 以上であり、それを低減させるためには始動のメカニズムを把握することが非常に重要である。一般に始動電圧に影響を及ぼすものとして、印加電圧の極性、発光管と外管の間に封入するガス(以後このガスのことをシュラウドガスと表記する)の種類や圧力、また発光管近傍に近接導体の有無などが知られている。ここでは、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、印加電圧の極性やシュラウドガスが始動性能に及ぼす影響を調べ、無水銀 HID ランプの始動メカニズムについて考察する。

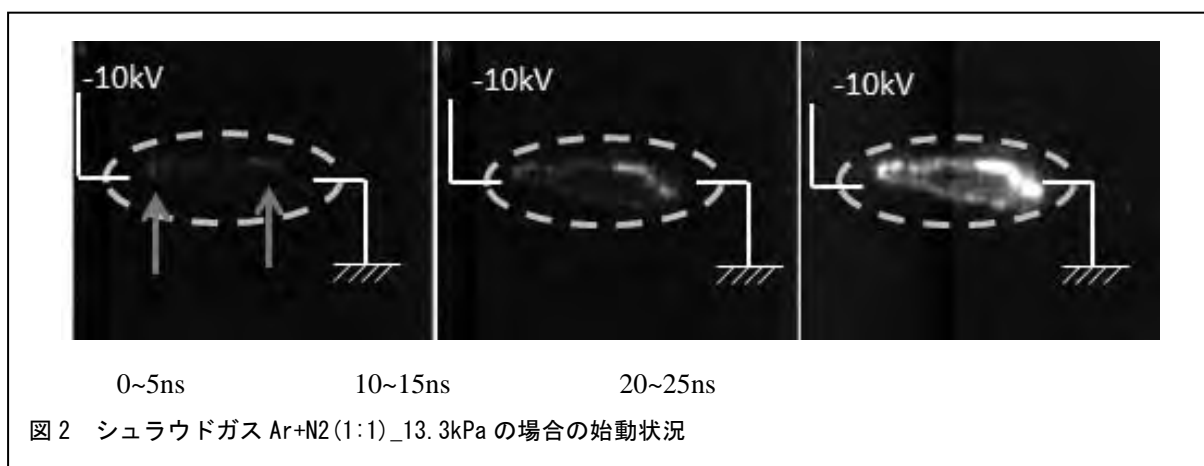
2. 成果

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、印加電圧の極性やシュラウドガスが始動性能に及ぼす影響を調べ、以下のことを確認した。

(1)ガス種およびガス圧を変えたときの始動電圧と始動時間の関係を図 1 に示す。放電管と外管の間にガス(シュラウドガス)が存在すると、存在しない場合に比べ大きく始動性能は向上する。



(2)ハイスピードカメラ ULTRA Neo(ナックイメージテクノロジー社製, 波長感度 400nm~850nm)を用いて始動状況を観察した結果を図 2 に示す。この高速カメラでの観察により、発光管内の放電開始時には正ストリーマが発生していることが確認できた。



(3)ハイスピードシャッターカメラ Pco.1200hs(ナックイメージテクノロジー社製, 波長感度 280nm~1000nm)を用いて図 2 の薄いプラズマがランプ内に発生し始める直前の写真を撮影した。観察のしやすさを考慮して、シュラウドガスとして Ar/N2(1:1)13.3kPa を用いた。その結果を図 3 に示す。高速カメラでの観察により、シュラウドガスが存在する場合には、放電管の始動直前にシュラウドガス内で微放電が発生することが確認できた。



(4)ランプの始動前に微放電がシュラウドガス内部で発生し、その残留電荷が発光管の外部に付着した場合を想定してシミュレーションを行った。シミュレーションとしては有限要素法を用いて、始動前に発光

管外部に電荷が帯電したときの電界分布がどうなるかを、ラプラスの方程式を解くことで求めた。

使用したソフトは COMSOL multiphysics である。計算は実際の実験条件に近い条件で行うこととし、図 4 に使用したランプの形状と境界条件を示す。まず電荷が帯電していない状態を計算した。シュラウド内部で発生した電荷がランプ管外壁に帯電している場合についての計算を行った。帯電状態として簡単化のために、電荷は発光管の外部に均質に付着するものとして計算した。発光管外面に帯電した電荷密度が変化するとき、ランプ内部の電界分布およびランプ内部の最大電界強度がどのように変化するかを計算によって求めた結果を図 5、6 に示す。シュラウドガス内部での微放電が始動性能に影響を及ぼす理由は、微放電に発生した電荷が発光管外壁に蓄積し、それにより電界ひずみが発生し、結果的に発光管内部の電界強度が高くなるためである。

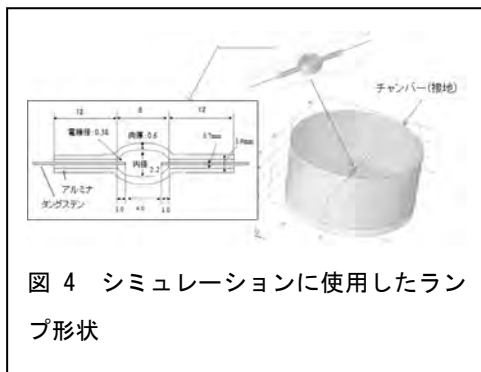


図 4 シミュレーションに使用したランプ形状

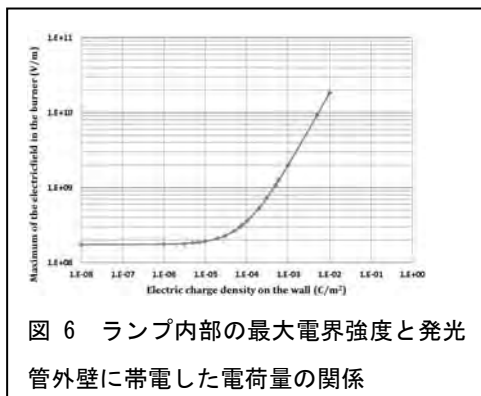


図 6 ランプ内部の最大電界強度と発光管外壁に帯電した電荷量の関係

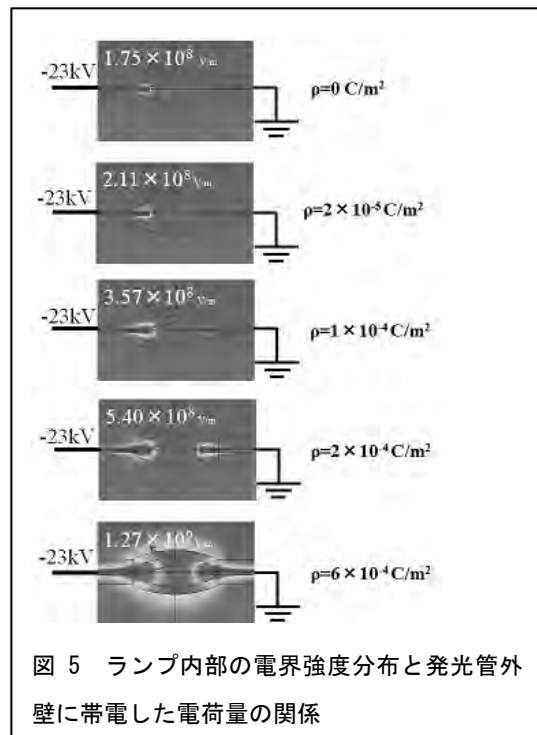


図 5 ランプ内部の電界強度分布と発光管外壁に帯電した電荷量の関係

(5)印加電圧の極性が始動性能(始動時間と始動遅れ時間の関係)に及ぼす影響を調べた。チャンバー内のシュラウドガスの条件を窒素 13.3kPa(100Torr)、50.5kPa(380Torr)、アルゴン 80.0kPa(600Torr)とした場合について、それぞれ極性を変えて実験を行った。測定結果を図 7 に示す。この結果から+パルスも-パルスも違いは無いことがわかる。

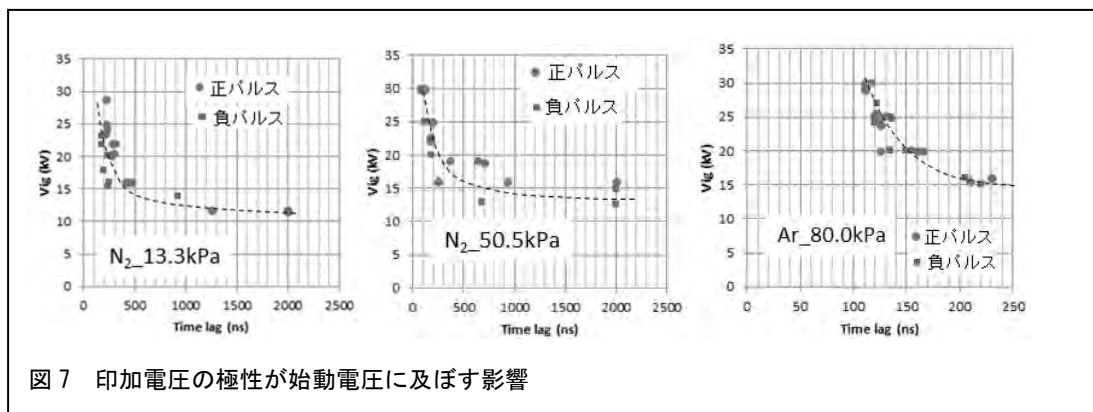


図 7 印加電圧の極性が始動電圧に及ぼす影響

これらの結果より、始動遅れ時間を短くするには素早くシュラウドガスを放電させればよいことが確認できた。今後は、その方法について研究を行っていく予定である。

3. 成果の公表

(1)Tadao Uetsuki, Takao Shimada, Ryota Yamamoto, Kotaro Shimizu ,Masaya Shido, Yukio Onoda; The proceeding of 66th Gaseous Electronic Conference,pp.24-25,2013.10, Ignition mechanism of mercury-free HID lamps for automotive headlamps

(2)山本遼太、嶋田賢男、植月唯夫;平成 25 年度(第 64 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会、p.351、2013.10、自動車ヘッドランプ用H I Dランプの始動メカニズム

(3)植月唯夫、志藤雅也、津田俊明、小野田幸央 ; 第 28 回光源物性とその応用研究会、2014.3、自動車用無水銀H I Dランプの始動メカニズムについて

報告書作成日 平成 26 年 3 月 31 日

安全情報を伝えるメディアの研究（その1）

京都造形芸術大学
尾池和夫学長

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。

2. 成果

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らぬ現象が多く、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。

このような視点で、情報を生産する立場の研究者、情報を伝えるメディアの研究者、情報を伝えるメディアの実践者たちで研究会を組織し、さまざまな観点からメール交換による議論を続け、下記のような作業を進めた。特に第1回の研究会を開催した結果、研究課題に関連する多くの課題の存在が明確になり、将来さらに新しい展開が必要であるということが明確になった。

以下に本年度における研究課題の細目と成果を列挙する。

(1)第1回安全学研究会の開催

市民に伝えたい情報を生産する研究者、情報を伝達するメディアの研究者と実践する人たち、また防災教育に関連する専門家などを組織し、それらの間の議論を通じて問題点の把握を行うことを目的として、安全学研究会を開催した。研究発表の一部を、「成果の発表」の項に挙げる。

(2)研究のよりどころとなる過去の成果の出版

本研究の先駆けとなった研究成果を、安全情報を伝えるメディアの研究の理論的裏付けとして活用するために出版した。「成果の発表」の項に挙げる。

(3)屋外で紙芝居など実施するためのスピーカシステムの開発

都会の騒音の中で紙芝居などを実施する場合のために、聞き取りやすい音声拡大装置を新たに開発するため、タイムドメイン理論によるスピーカとハンドフリーマイクによるシステムを試作し実験してモデルを作った。その試作品により、京都造形芸術大学漫画学科の学生たちが紙芝居を野外で実施し、システムの効果と改善点が確認された。



野外における紙芝居発表



屋内における紙芝居の実演

(4)情報を市民に伝えるメディアの実践

実際にアニメーションなどの手法により制作された作品を用いて、市民がどのように情報を受け取るかということを確認するための仕組みを構築するために、いくつかの集会を開催した。

(5)自然災害の基本的知識のマンガを制作するための基本的な調査

一般の書店で販売できるような形での防災知識の普及書のあり方を考察し、情報を提供する人、ストーリーを構築する人、マンガを制作する人たち相互間の認識を共通させる準備を始めた。また、そのための資料収集に着手し、英語の紙芝居、地球探索のための研究の漫画による紹介、防災対策の知識普及のためのイラスト、科学の現場を紹介する漫画などを収集した。

(6)自然現象を学習するための着地型旅行企画の開発と実践

地球に発生する地震、火山噴火、津波、熱帯低気圧などの現象を、専門家の蓄積した知的財産を市民が科学的に理解し、正確な知識として活かすことができるためには、さまざまな仕組みが必要である。その一環として、研究代表者が2008年以来進めてきたジオパーク活動の展開がある。その活用方法を旅行会社の専門家と共同して、現地の専門ガイドを養成し、それによる着地型の旅行企画を試行しながら開発することが重要であるという観点からそのための企画会議を立ち上げることができた。その結果、いくつかの試行を実践し、その成果の分析を継続している。

例えば、「活火山」という言葉で表される自然の代表である富士山に関しては、市民は美しい山として訪れて写真におさめ、ほとんどの場合「怖い」という表現は用いないのに対して、「活断層」という言葉で表される自然の仕組みで形成された京都盆地は、都の置かれた都市として訪れながら活断層地

形の恩恵を受けている一方、活断層そのものを「怖い」と表現する。その違いは何によるものかということ、市民を対象として活断層見学会などを実施することによって把握しつつ、将来の安全学研究につないでいくことが重要であるという認識が、この実践から得られた。

3. 成果の発表

- (1)尾池和夫;ジオパークが目指すもの、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、招待講演、2014
- (2)尾池和夫（共著）;ジオパークを楽しむ本・日本列島ジオサイト地質百選オーム社、2013
- (3)尾池和夫・竹本修三編集（共著）;天地人一三才の世界、マニュアルハウス、2014
- (4)尾池和夫;視点「安全と安心の概念」南海トラフ巨大地震を例に、高知新聞、2013
- (5)尾池和夫;地震を知って震災に備える、日本綿業倶楽部月報、2013 年 7 月
- (6)尾池和夫;視点「着地型観光旅行の魅力」室戸ジオのだるま夕日、高知新聞、2013
- (7)尾池和夫;宇宙・地球・人間—私の科学を語る、東北学、2014

研究報告日 平成 26 年 4 月 30 日

メガソーラー用インバーターにおける 制御アルゴリズム開発

京都大学大学院情報学研究科

太田快人教授

長岡技術科学大学

平田研二准教授

受託先: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ーの制御アルゴリズムを新たに開発する。特に、事故時運転継続要件を満たすように外乱に強く応答の速いインバータ制御を実現すること、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

従来制御法では、単相補償器を DQ 変換と組み合わせるフィードバック系を構成するが、その構成と等価になる線形システムが存在することを示した。その結果、DQ 変換ならびに逆 DQ 変換を用いることなく、直接補償器の実装ができる。さらにその等価理論を用いることによって、従来制御法が逆相外乱に弱いことを示した。さらに、正相外乱ならびに逆相外乱の双方を除去できる補償器設計方法を求める設計法を提案した。提案方法は、シミュレーション並びに実験によって、短絡事故などの場合においてもインバータ運転が継続できることを確認している。本件に関しては、IEEE CDC において、国際学会発表を行っている。

配電系統においては、太陽光発電の量が増えるにしたがって、電力逆潮現象による電圧上昇の問題が生じている。電圧上昇に対しては、無効電力補償による電圧調整が一般に行われている。本研究では、複数のインバータが協調して補償無効電力量を負担することによって、電圧上昇を抑える制御方を提案する。インバータの容量、あるいは温度上昇などの運転状況によって補償無効電力量の負担割合を均等、あるいは割合をつけて公平に受けもつための協調制御則を考察した。シミュレーションによって、提案法の有効性を確認している。本件に関しては、電気学会において、国内口頭発表を行っている。

3. 成果の公表

(1)Yoshito Ohta, Akihiro Ohori, Nobuyuki Hattori, Kenji Hirata ; Cotroller Design of a Grid-tie Inverter bypassing DQ transformation, 52nd IEEE Conference on Decision and Control, pp.2927-2932, December 10-13, 2013

(2)大堀彰大、服部将之、太田快人、平田研二；系統連系インバータ群による協調電圧制御ーその

1 ー、平成 26 年電気学会全国大会、愛媛、2014 年 3 月 18 日

(3)服部将之、大堀彰大、太田快人、平田研二；系統連系インバータ群による協調電圧制御ーその

2 ー、平成 26 年電気学会全国大会、愛媛、2014 年 3 月 18 日

報告書作成日 平成 26 年 5 月 12 日

搬送装置及び電源装置の制御技術の開発

京都大学大学院情報学研究科

太田快人教授

長岡技術科学大学

平田研二准教授

受託先名:株式会社ダイヘン ACT事業部

1. 目的

ウェハー搬送ロボットの制御技術を開発する。特に基板搬送用ロボットの振動抑制制御について考察することを目的とする。小型の脚型ロボットに対して繰り返し設計による制振性能の向上ならびに昇降機構をもったロボットの制御のためのモデル化を目的とする。

2. 成果

ウェハー搬送ロボットを模擬した小型の脚型ロボットに関して、Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT) と呼ばれる手法を用いて、繰り返し設計によって制振性能を向上させる研究を行った。具体的には、フィードフォワード補償器を、実際の動作データを用いて再調整することによって制振性能を高めることができるかを検討し、実験を行った。

昇降機構をもったロボットの制振制御を行うために、まず、制御のためのモデル化の検討を行った。このロボットは上昇時と下降時で振る舞いが異なり、また非線形性も大きいので、非線形システム同定の手法が適用できるかを検討中である。

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 26 年 5 月 12 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

京都大学産官学連携本部

小久見善八特任教授

受託先: 関西電力株式会社

1. 目的

燃料電池は自動車用途として平成 27 年度に実用化が考えられている。酸性電解液を用いる燃料電池では空気極触媒として多量の白金が使用されるが、アルカリ性電解液ではペロブスカイトなどの酸化物を酸素還元触媒として利用することができる。燃料電池の普及には電極触媒材料の資源制約からの脱却が課題である。非貴金属触媒の使用が可能となるアルカリ型燃料電池の酸素還元触媒の反応性について詳細に検討する。

2. 成果

水素を燃料とする燃料電池の実用化には水素の on board 貯蔵と水素インフラの整備が大きな課題である。一方、アルコール類を燃料とする直接アルコール燃料電池は燃料の貯蔵、供給インフラの課題から脱却できる。一方で、アルコールのアノード酸化反応は複雑で、C-C 結合を開裂させて二酸化炭素まで反応させるプロセスは反応速度が遅く、また、過電圧も大きく、エネルギー効率の点から課題が残る。さらに、溶解したアルコール類が正極で反応すると自己放電となり、これも電流効率と正極電位の両面からエネルギー効率を低下させる要因となる。これを防ぐことを目指してアルコール類の直接型アルコール燃料電池でアルコールのクロスオーバーを抑制できるアニオン交換膜を使用することが考えられたが、アニオン交換膜のアルカリ耐性が十分でなく、耐久性の確保が現状では難しい。さらに、高耐久性のアニオン交換膜が達成されても、それによってアルコールのクロスオーバーがどこまで解決されるかは、固体高分子電解質を用いるメタノール燃料電池のクロスオーバーが未だに課題として残っている現状から、疑問がと見えざるを得ない。

一方、金属-空気電池のうち、アルカリ水溶液で作動する亜鉛-空気電池の種類は金属燃料電池と捉えることができる。このアルカリ水溶液は水酸化カリウムの濃度を高くすることによって 120°C 程度の高温で作動させることも可能であり、燃料の供給・保存も容易である。また、空気極の構成はアルカリ型燃料電池と同一であり、その技術を直接転用できる。

本年度は貴金属触媒を使用しなくてよいアルカリ水溶液で作動する燃料電池として金属燃料電池をその一環としてとらえ、そのための空気極について研究を行った。

亜鉛を負極とすると亜鉛-空気電池では自己放電を抑制したり、充電する場合のデンドライト抑制のために多様な添加剤が添加される。本年度は各種添加剤のうちアルコール類を自己放電抑制剤とした場合の空気極に対する影響を調べた。

白金族触媒上ではアルコール類は酸化されるが、酸化銀触媒などではアルコール類の酸化は非常に遅いことが知られている。一方、アルカリ水溶液の系での酸素還元触媒には様々なペロブスカイトが高い活性を示す。

ABO₃ で表されるペロブスカイト型酸化物は A サイト、B サイトに多様な金属イオンが使われ、主に B サイトの金属が触媒能に大きな影響を与える。そこで、B サイト金属として Co、Fe、Mn を選び、La_{1-x}Sr_xMO₃ を合成し、その酸素還元触媒能を調べた。Co>Fe>Mn の順に酸素還元活性は高い。一方、これら種のペロブスカイト触媒のエチレングリコール添加による影響を調べた。回転円板電極を用い、1 M KOH に 0.1 M エチレングリコールを添加してその酸素還元電流を調べた。Fig.1 に示すように、Mn ペロブスカイトはエチレングリコールの添加による酸素還元電流の減少は軽微である。また、酸素還元開始電位がエチレングリコールの添加の影響を受けないことから、エチレングリコールの酸化反応が酸素還元反応と並行して進行することはない、すなわち、Mn ペロブスカイトはこの電位範囲ではエチレングリコールの酸化に対して不活性であることが分かった。

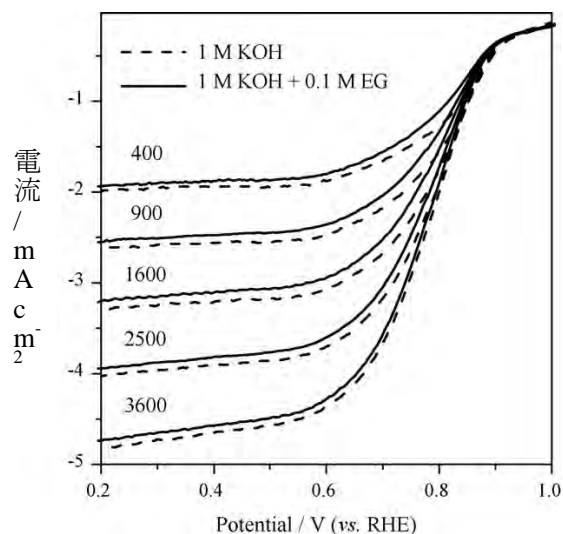


Fig.1 La_{1-x}Sr_xMnO₃ 触媒電極の酸素還元能に及ぼすエチレングリコールの添加の影響

アルカリ電解液での空気極のもう一つの課題は三相界面を有効に形成するためのイオノマーである。酸素還元能が白金に比べて低い酸化物触媒を用いるアルカリ性空気極では、高性能を達成するためには三相界面の設計が極めて重要である。しかし、アルカリ性では Nafion のようなアルカリ性でも安定な三相界面を構成するための電解質材料がなく、その開発・工夫が今後必要である。

3. 成果の公表

(1)Zinc-Air Battery – To enhance efficiency and cyclability –;Batteries for the Future Como 2013 2013 年 5 月 6 日(月)

報告書作成日 平成 26 年 4 月 14 日

SiC 結晶のキャリア寿命評価と再結合過程の解析

京都大学大学院工学研究科

木本恒暢教授

受託先名: 関西電力株式会社

1. 目的

SiC (炭化珪素) は、電力用に用いられる高耐压パワーデバイスに有望な半導体である。特に変電や電力系統制御に用いられる 10kV 超級のスイッチングデバイスやダイオードを作製するためには、少数キャリア注入による伝導度変調効果を用いるバイポーラデバイスが低損失化の観点で魅力的である。このようなバイポーラ型パワーデバイスの性能を支配するのは半導体中のキャリア寿命である。SiC は間接遷移型のバンド構造を有しており、本質的に長いキャリア寿命が期待されるが、実際の結晶ではキャリア寿命が $1\mu\text{s}$ 程度に留まっており、その原因の解明とキャリア寿命向上の指針を提示することを本研究の目的とする。

2. 成果

昨年度までの研究により、SiC の禁制帯幅中の伝導帯底(E_c)から 0.65 eV のエネルギーに存在する深い準位($Z_{1/2}$ センター))が、n 型 SiC における主要なキャリア寿命制限欠陥であること、およびこの欠陥を熱酸化により大幅に低減できることを明らかにした。今年度は、この欠陥低減プロセスの改善による大幅なキャリア寿命の向上に取り組んだ。

熱酸化により、結晶の表面からバルク領域に向かって欠陥が消滅することが分かっている。耐压 10~20 kV 級の SiC デバイスを作製するためには、厚さ 80~180 μm の SiC 結晶中の深い準位を低減する必要がある。しかしながら、初期(as-grown)の深い準位($Z_{1/2}$ センター)密度が典型的な値(10^{13}cm^{-3})である場合には、20~30 時間の長時間酸化を施しても、 $Z_{1/2}$ センターの消滅する深さが 40~50 μm に留まることが分かった。そこで、この欠陥低減プロセスを加速するために、より高い温度での熱酸化を試みた。用いた試料はホットウォール CVD により形成された n 型 SiC ホモエピタキシャル成長層であり、厚さは 100~220 μm 、ドナー密度は $1\sim 5\times 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ である。深い準位密度の深さ方向分布は、DLTS 測定と研磨を繰り返すことにより求めた。また、キャリア寿命は、YLF 3HG (波長 349 nm)を励起光源に用いたマイクロ波光伝導度減衰(μ -PCD)測定により測定した。

図 1 に as-grown (成長直後) および 1400 $^{\circ}\text{C}$ で熱酸化を施した試料における $Z_{1/2}$ センター密度の深さ方向分布を示す。約 16 時間の熱酸化処理により、厚さ 100 μm の成長層がほぼ完全に「 $Z_{1/2}$ センター・フリー(10^{11} cm^{-3} の検出限界以下)」となっていることが分かる。これは、熱酸化により酸化膜/SiC 界面で生成された過剰な炭素原子が格子間原子となり、この一部が SiC バルク結晶中に拡散して $Z_{1/2}$ センターの起源である炭素空孔を埋めるためであることを明らかにしている。また、この 1400 $^{\circ}\text{C}$ の高温酸化では拡散が加速されるために、炭素格子間原子に起因する深い準位

である HK0 センターが残存することなく、非常にシンプルなプロセスにより深い準位のほとんどない完全結晶が得られることも分かった。

図2に厚さ 220 μm の n 型 SiC 厚膜の成長直後の試料、高温熱酸化を施した試料(表面保護なし)に加えて、熱酸化後に堆積酸化膜により表面パッシベーションを施した試料の光伝導度減衰曲線を示す。この熱酸化処理(1400 $^{\circ}\text{C}$ 、48 時間)によって、厚さ 220 μm の SiC 成長層は、ほぼ完全に $Z_{1/2}$ センター・フリーとなる。厚膜減衰曲線から求めたキャリア寿命は、成長直後で 1.1 μs であるが、欠陥低減によって 26.1 μs と著しく増大している。さらに、SiC 表面に適切な絶縁膜(酸化膜堆積後に NO アニール)を形成して表面再結合を抑制すると、キャリア寿命は 33.2 μs まで向上した(世界最高値)。試料温度を上げるとさらにキャリア寿命は増大し、200 $^{\circ}\text{C}$ で 47 μs という長いキャリア寿命を得た。

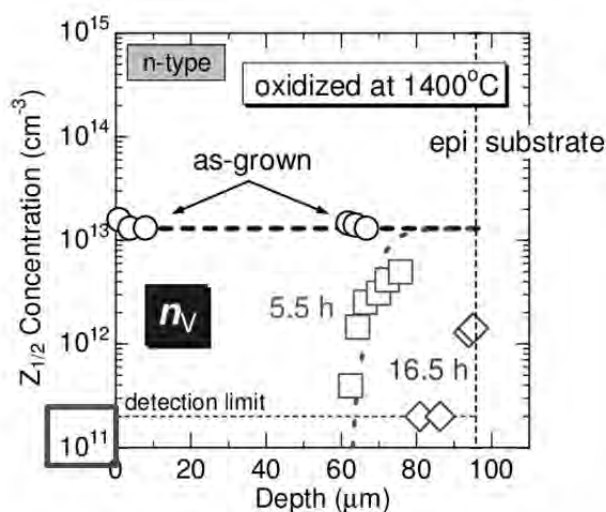


図1 SiC 結晶内のライフタイムキラー欠陥($Z_{1/2}$ センター)密度の深さ方向分布。高温での熱酸化処理を施すことにより、深さ 100 μm まで欠陥を消滅させることができる。

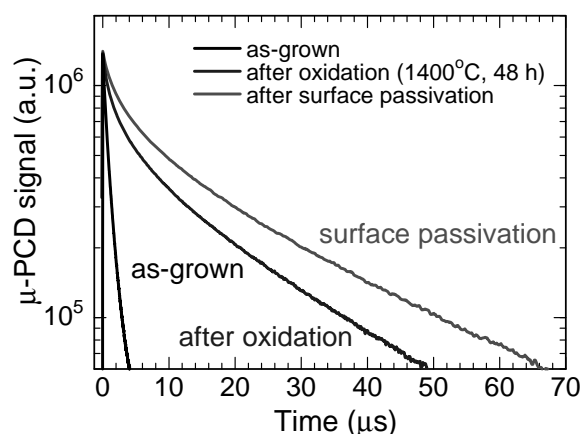


図2 厚さ 220 μm の SiC 結晶の光伝導度減衰曲線。熱酸化による欠陥低減処理によって、キャリア寿命が 1.1 μs から 26.1 μs に増大する。さらに、SiC 表面に適切な絶縁膜を形成した表面再結合を抑制すると、キャリア寿命は 33.2 μs まで向上した。

3. 成果の公表

(1) T.Okuda, T.Kimoto, and J.Suda: Improvement of carrier lifetimes in highly Al-doped p-type

4H-SiC epitaxial layers by hydrogen passivation, Appl. Phys. Express, 6, 121301/1-3 (2013)

(2) 木本恒暢; 高耐压 SiC パワーデバイスの進展と課題, 固体物理, 49, 35-43 (2014).

(3) T. Kimoto, C. Kawahara, S. Ichikawa, Y. Nishi, and J. Suda; Carrier recombination in SiC epilayers and substrates-impacts of point and extended defects, Ext. Abstr. of 27th Int. Conf. on Defects in Semiconductors, Bologna, Italy, 2013

(4) T. Okuda, T. Kimoto, and J. Suda; Carrier lifetime improvement in Al-doped p-type 4H-SiC epitaxial layers by hydrogen passivation, Technical Digest of Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2013, Miyazaki, 2013, Mo-1B-5, p.15

(5) T. Kimoto, H. Miyake, H. Niwa, T. Okuda, N. Kaji, and J. Suda; Progress and future challenges of high-voltage SiC power devices (invited), Ext. Abstr. of 2013 Fall Meeting, Mater. Res. Soc. Boston, 2013, T.8.1

報告書作成日 平成 26 年 4 月 30 日

環境適合型電力・水素協調エネルギーシステムに関する調査研究

京都大学大学院エネルギー科学研究科
白井康之教授

受託先名：関西電力株式会社

1. 目的

未来の電力・エネルギーネットワークのイメージ創生を目指し、自然エネルギーの開発状況、システム導入関連技術の調査、電力・水素協調エネルギーシステムの基盤技術の調査を行い、将来の見通しについて評価、検討を行う。

2. 成果

(1)システム同定を用いた配電システムの動的負荷モデリング手法の提案

これまで安定度解析における配電システムは主に静的な特性しか持たない機器で構成されていると仮定されてきた。しかし、近年の電力自由化の流れや分散型電源の普及、またそれに伴うパワエレ機器の導入などにより、配電システムに動的な特性を持つ機器が増加している。このような状況下では従来の安定度解析手法では精度の良い安定度評価に不十分である可能性があり、負荷の動的な特性まで評価可能な手法が求められている。

これまで負荷の動特性を把握する手法として雷害等の系統事故時に計測されたデータから特性を把握する手法や物理的な構造に基づいたモデル、又はその複合型などが提案されている。しかし、これらの手法では局所的な特性の把握にとどまってしまう可能性があり、また実際には常に変化を続ける負荷のモデルとしては不十分な可能性がある。

そこで本研究では、実際の系統に微小な電力擾乱を注入し、その応答から配電システムの動特性を把握する手法（微小擾乱注入手法）の開発、提案を行った。本手法は、配電システムの特性をオンラインから測定可能であるため、任意の時間帯の実際の負荷の特性を得ることができる。微小擾乱注入手法を用いた動的負荷モデリング手法の提案及び、シミュレーションによるモデル評価を行った。

シミュレーションには PSCAD/EMTDC(Manitoba HVDC Research Centre, Inc.)を用いた。図 1 に試験系統図を示す。図のように同期発電機(SG)と無限大母線間に電力注入装置及び配電システムが配置されている。配電システムは動特性を持つ代表的な機器である誘導電動機を含んでいる。また不安定な系統状態を模擬するため、配電システムと無限大母線間の距離は 290km と長めに設定した。同期発電機及び送電線の定数はそれぞれ図中に表記した。

同期機の母線に設置した電力注入装置は、理想的に有効電力、無効電力を同時に高速で出し入れ可能な機器を模擬しており、実機としては SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)等が該当する。

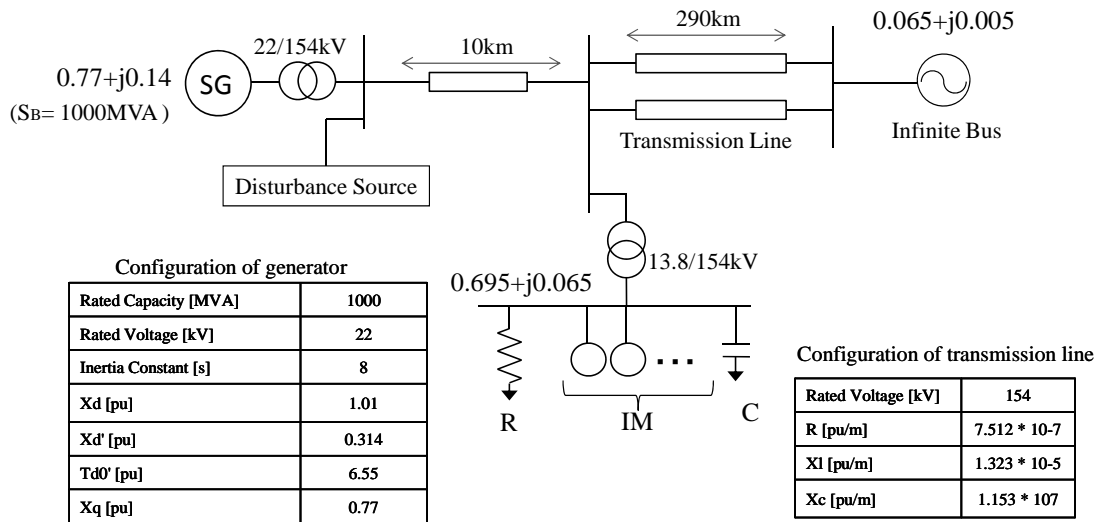


図1 シミュレーションに用いた系統例題

(2)シミュレーションによる検証

この装置から、微小なチャープ状の電力擾乱を系統に与え、この応答からシステム同定の手法を用いて、配電系統以下の動特性を伝達関数の形で求めた。配電系統部分を伝達関数の形のモデルとして導入して、系統安定度解析を行い、詳細モデルを用いた解析結果と比較し、モデルの妥当性を検証した。

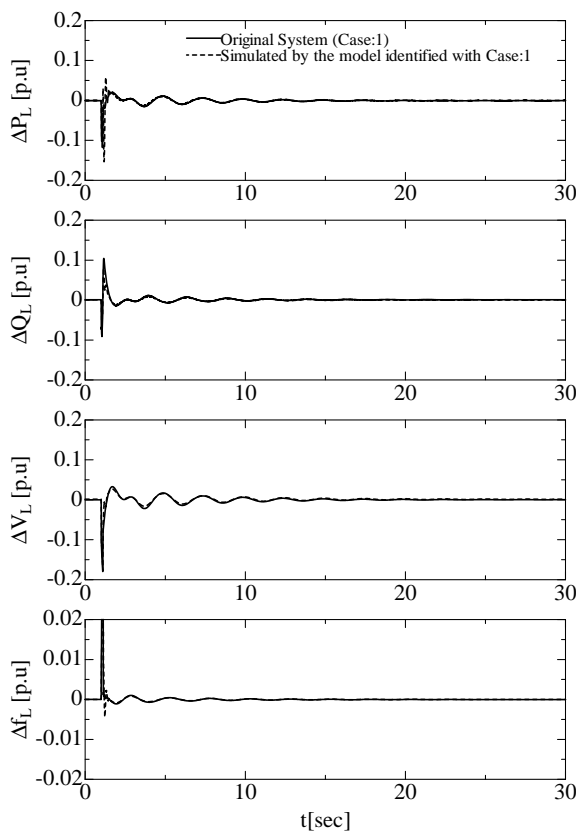


図2 負荷端における一線地絡事故応答

図2にその結果の一例を示す。

実線と破線がよく一致していることが分かる。特に事故後10秒ほど残る中周期の振動までよく模擬できていることが分かり、動態安定度の把握への利用可能性が示されている。

(3)まとめ

本研究では微小擾乱注入手法によるシステム同定を用いた動的負荷モデリング手法の提案を行った。またPSCAD/EMTDCを用いて、動的負荷モデルの作成及び性能評価シミュレーション試験を行った。シミュレーション試験により提案動的負荷モデルが、安定な系統の事故波形を正確に再現可能であることが示され、また一線地絡事故により最終的に崩壊してしまうような系統条件に関してもその傾向をある程度見て取れるこ

とが確認された。

今後は分散型電源等を含む系統への応用や、固有値解析等その他の安定度解析手法への応用を目指す予定である。

3. 成果の公表

(1)Ryohei Kawagishi, Daisuke Yamanaka, Yasuyuki Shirai ; Proposal of Dynamic Modeling of Distribution System with System Identification, Proceedings of International Conference on Electrical Engineering 2013, PS5-21,2013, to be appeared in Journal of International Council on Electrical Engineering (in press)

(2)川岸良平、山中大輔、白井康之；システム同定を用いた配電系統の動的負荷モデリング手法の提案、電気学会電力技術研究会、2013 PE-13-163、PSE-13-179、電気学会、九州工大、2015/9/13

(3)川岸良平、山中大輔、白井康之；微小擾乱注入手法による配電系統動的負荷モデル作成手法の提案、電気学会全国大会講演概要集、6-146、電気学会、名古屋大学、2015/3/21

報告書作成日 平成 26 年 4 月 17 日

電力系統の分散制御に関する基礎研究

京都大学大学院工学研究科
萩原明道教授

1. 目的

近年、太陽光発電や風力発電に代表される再生可能エネルギーの電力系統への大量導入がエネルギー問題解決のための現実的な方策の一つとして検討されている。大規模化、多様化する電力系統の運用・制御を行う上では分散的な処理が不可欠であり、このような背景のもとで電力系統の分散制御に関する研究の重要性が再認識されている。しかしながら、枯渇性エネルギーと再生可能エネルギーが混在する電力系統の分散制御を実現するための、系統のモデル化と制御に関する基礎的研究は未だ不十分である。本研究では、電力系統の分散制御のための礎として、複数の非負のサブシステムが結合することで形成される大規模結合システムの解析、設計手法に関する理論構築を目的とする。

2. 成果

非負システムとは、入力と初期状態が非負であるときには状態と出力が常に非負となるという性質を有する動的システムのことである。このような非負性は、資源、エネルギー、製品、化学物質といった“負の値を取り得ない物理量のやりとり”を表すダイナミクスにおいて普遍的に現れるものであり、非負システム理論は、経済学や社会システム工学、生物学といった多彩な分野で重要な研究対象となっている。また、国外の先駆的研究においては、非負システム理論を大規模電力系統の分散制御に応用する試みがなされている。このような背景のもと、平成 25 年度においては、大規模電力系統の解析、分散制御を念頭に置きつつ、その基礎研究を行うことを目的として、複数の非負のサブシステムが結合することで構成される大規模結合非負システムを対象とした検討を押し進め、そのようなシステムの解析と設計に関する研究を行った。一般的なシステムの中にあっては、非負システムはその中の特殊なシステムであり、したがって、現実のシステムの中で非負システムであるものは相対的には少ないことになるが、逆に特殊な性質を有していることが有用に利用できるという可能性が考えられる。研究成果は全体として、そのような特殊性がいかに関利用可能かという観点から有益な知見を与えたと解釈することが可能であると考えられる。

まず半正定値計画法や線形計画法に基づく(結合)非負システムの解析に関する基礎的な研究を進め、得られた成果を2編の論文にまとめ発表した(3.成果の公表の項目の論文(1)、(2)参照)。このうち、とくに論文(1)の研究内容は高く評価され、この論文に関して2014年度システム制御情報学会論文賞が授賞されることとなった。

また、結合非負システムの解析・設計の応用として、マルチエージェント非負システムのフォーメーション制御に関する研究を進めた(3 成果の公表の項目の論文(3)にて発表)。マルチエー

エージェントシステムのフォーメーション制御における基本的な問題設定は、各エージェントが近接するエージェントと位置情報の交換を行うことを通してその動き方を自律的に逐次定めていくことを通して、最終的な目的地を事前に指定されていない状況の中でもそれを結果として適切に定めることによって、所望のフォーメーションを最終的には構成する、というものである。本研究では、エージェントのダイナミクスの非負性を活用することで、所望のフォーメーションを達成するためのエージェント間の情報交換を規定する結合行列を効率よく設計できることを示した。さらにフォーメーション制御に関する理論を発展させることで、自動車群の車頭時間制御といったより具体的な実問題に対しても良好な結果が得られることを確認しており、これらの成果についてより完成度の高い形で今後さらにまとめていく作業を引き続き行っていく予定である。

さらに、より複雑で現実的な状況を念頭においた場合に検討が重要となる、むだ時間を有する非負システムの解析、通信遅延(すなわちサブシステム間の情報伝達に関するむだ時間)を有する結合非負システムの解析に関しても研究を行っており、良好な結果が得られつつある(3. 成果の公表の項目の論文(4)、(5))。実システムのフォーメーション制御を見据えた場合、通信遅延は(それがわずかであっても)不可避であり、したがって通信遅延がフォーメーションの達成の可否やフォーメーションの達成速度にどのような影響を及ぼすかを解析することは重要である。とくに論文(5)はこの点に関する研究を扱ったものである。

3. 成果の公表

- (1)松村大気、蛭原義雄、萩原朋道；LMI を用いた離散時間非負システムの安定性と H^∞ 性能解析、システム制御情報学会論文誌、Vol. 26, No. 1, pp. 45-51 (2013)
- (2)松村大気、蛭原義雄、萩原朋道； l_1 誘導ノルムを用いた離散時間結合非負システムの安定性解析、システム制御情報学会論文誌、Vol. 26, No. 10, pp. 355-364 (2013)
- (3)新谷翔吾、蛭原義雄、萩原朋道；マルチエージェント非負システムのフォーメーション制御下での支配極の効率的計算法、第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集、6 pages (2014)
- (4)西尾直也、蛭原義雄、萩原朋道；むだ時間を有する線形非負システムの支配極解析、第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集、5 pages (2014)
- (5)朝比奈和希、蛭原義雄、萩原朋道；通信遅延のある結合非負システムの解析、第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集、6 pages (2014)

報告書作成日 平成 26 年 9 月 18 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

京都大学大学院工学研究科
引原隆士教授

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

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の調査を行い、諸外国の電力ネットワークおよびシステムにおける技術動向を技術の原点に遡って精査し、将来技術のシーズの動向を調査した。また関連する技術に関する可能性を検討した。

3. 成果の公表

(1)南政孝、引原隆士；分散型電源の受動性に基づく目標値追従および系統連系制御手法—瞬時電圧低下の耐性について—、電気学会論文誌 D, Vol.133, No. 7 (2013) 685-691

(2)Ryo Takahashi, Yutaro Kitamori, and Takashi Hikihara；AC Power Local Network with Multiple Power Routers, Energies, 6(12), 6293-6303 (2013)

報告書作成日 平成 26 年 4 月 24 日

大規模分散電源による電力系統の安定化

大阪大学大学院工学研究科
舟木剛教授

受託先名:株式会社ダイヘン 分散電源事業部

1. 目的

大量に導入された太陽光発電の電力系統への影響を調べるため、数値解析および実機とシミュレーションを混合した Power Hardware in the loop による評価ツールを開発する。

2. 成果

再生可能エネルギー特別措置法の制定により、自然エネルギーを利用した電力の固定価格買い取り制度が始まった。これを受けて太陽光発電が大量に電力系統に連系されるようになった。太陽光発電の逆潮流により局所的には配電線の規定値からの逸脱、大域的には周波数変動などの問題が生じることが懸念されている。本研究では大量に導入された太陽光発電の電力系統への影響を調べるためツールとして、数値解析および実機とシミュレーションを混合した Power Hardware in the loop(PHILS)を開発する。評価対象が電力系統の安定性であるため、その解析には PHILS 自体の安定性が重要である。ただし、PHILS はアナログ回路とデジタルモデルおよびそのインターフェイスで構成されることから、これを構成するループのむだ時間により不安定化することが明らかになった。PHILS の安定化のためには、ハードウェア部分の条件を改善する方法もあるが用いることのできるハードウェアの限界があり、不足する部分についてはモデル部分の改良による安定化が必要となる。本年度は PHILS を安定に動作させるためのモデル部分の条件について検討した。検討を行った PHILS はインダクタ結合型と呼ばれる構成となっている。インダクタ結合型の PHILS 構成では、インダクタ部分のモデルとして微分を使用する必要がある。しかしながら数値計算を行う部分に微分モデルを適用することは数値不安定の原因となることから、微分モデルを擬似微分に置き換えてモデルを適用することを検討した。擬似微分モデルにおいて適切な時定数を設定することで、インダクタ部分のモデルの安定な動作が可能であることを示した。また AD 変換、DA 変換およびプロセッサでの演算部で生じるむだ時間の部分について、モデルに対して補償ブロックを挿入することで安定動作可能な範囲を広げることに検討した。ただし、アンプの非線形性、回路パラメータの誤差、遅延時間の誤差等のモデル化誤差により想定した範囲より安定動作可能な範囲が小さいという結果になった。このため補償部分の設計に FRIT を適用することを試みた。すなわち初期データとパラメータライズした制御器を用いて擬似参照信号を生成し、得られた出力の誤差から初期データおよびパラメータを算出する。これに対して出力誤差を最小化する評価関数を適用し、制御器を求める。最適化手法にはガウスニュートン法を適用した。FRIT を適用した制御器の適用により、安定動作可能な範囲が広がる

ことを確認した。

3. 成果の公表

(1) 大堀彰大、服部将之、舟木剛；複素係数フィルタを用いた系統連系インバータの位相同期ループ、電気学会論文誌 D, Vol. 133, No. 4, pp.388-394, (2013)

(2) Hideharu Sugihara, Tsuyoshi Funaki ; A method for evaluating installable capacity of distributed generators with power factor control in MV and LV distribution networks, Proceedings of IEEE Innovative Smart Grid Conference Europe 2013, No.isgt194, Copenhagen, Denmark (Oct. 2013)

(3) 舟木剛、田淵大、平川恵士；太陽光発電を利用したトンネル緩和照明における調光方式の検討、電気学会 ITS 研究会、ITS-14-010、pp.49-54、2014 年 3 月 13 日、京都大学

報告書作成日 平成 26 年 4 月 23 日

マイクロ波帯次世代無線 LAN の適用評価研究

京都大学大学院情報学研究科
村田英一准教授

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

今年度は、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 の通信路容量の検討を行った。これまでフェージングの相関がある場合の容量評価は多く行われているが、シャドウイングの空間相関を考慮した検討はほとんど見られなかった。これまでの大きなセルの場合、ユーザ間の距離は遠く離れていると想定でき、建物などによる遮蔽によって生じるシャドウイングもユーザ間で異なると仮定することがおおむね妥当であった。しかし、無線システムは伝送速度を高速化するためにセルが小さくなる傾向にあり、携帯電話システムにおいても市街地では百メートル以下となってきた。このため、建物の大きさに比べて同じセル内のユーザ間が十分に離れていると仮定できなくなってきた。このため、シャドウイングの空間相関を考慮してマルチユーザ MIMO システムの容量を評価する必要が生じている。

将来の無線通信におけるもう一つの重要な技術が分散アンテナシステム(DAS: Distributed Antenna System)である。アンテナが地理的に分散配置されることにより、ユーザのアクセス距離が短縮され、シャドウイングによる影響も軽減されることが期待できる。これまで、アンテナが基地局に集中的に配置された伝統的な集中アンテナシステム(CAS: Centralized Antenna System)と DAS について平均容量及びアウテージ容量の比較が広く検討されてきた。これらの検討では DAS によってチャンネル容量、特にアウテージ容量が大きく改善されることが示されている。しかし、伝搬損失、レイリーフェージング、シャドウイング損失を考慮した周波数選択性または非選択性のチャンネルモデルが用いられているものの、シャドウイングについては空間相関を考慮しない独立同一分布(i.i.d.)シャドウイングである。

これらの研究では、空間的に独立な対数正規分布によってシャドウイング係数を生成しているため、その係数はアンテナ間距離に依存しない。複数アンテナが近接して集中配置された CAS においては、そのアンテナ間距離を完全に 0 と見なし基地局アンテナ間に同一のシャドウイング係数を仮定して検討されている。一方、複数アンテナが分散配置された DAS においては、シャ

ドウイングの空間相関性が生じないようなアンテナ間距離が想定され、基地局アンテナ間に独立のシャドウイング係数を用いて検討が行われている。

このような仮定は、CAS には数十波長の、DAS には数キロメートルのアンテナ間距離が想定されている場合には妥当であったが、セルの小型化が進みシャドウイングの空間相関距離とセルサイズの比が小さくなっている状況ではアンテナの配置によっては適切ではなくなると考えられる。

空間相関性の影響を考慮してより現実に近い評価を行う場合、アンテナ間距離と空間相関距離によってはこれまでのシャドウイングモデルと比較して CAS のチャンネル容量が増加すると考えられる一方、アンテナが空間的に分散して配置されているため基地局アンテナ間では相関の小さいシャドウイングを期待できる DAS であるが、シャドウイングの空間相関性によって容量が減少すると予想される。

このように、空間相関性を考慮しない i.i.d. シャドウイングモデルによって得られる容量と比較して、空間相関性を考慮したより現実に近いシャドウイングモデルでは CAS の容量が増大し、DAS の容量が減少する。このため、DAS のチャンネル容量が CAS よりも大きいことを示すには i.i.d. シャドウイングモデルでは不十分であると考えられる。また、セル間干渉による影響と、CAS と DAS を区別するアンテナ間距離の変化がチャンネル容量に及ぼす影響もこれまで明確にされていない。

そこで本論文では、MIMO 伝送の DAS への適用効果を明確にするために、これまでの研究と同じく伝搬損失とフェージングを考慮し、さらに CAS と DAS のチャンネル容量の比較に関して今まで論じられていない空間相関を有する実際的なシャドウイングの影響とセル間干渉も考慮し、下りリンクについてシングルユーザ(SU)及びマルチユーザ(MU)を取り上げ、CAS-MIMO 伝送と DAS-MIMO 伝送のチャンネル容量特性の比較を行った。また、送信アンテナ間距離とチャンネル容量の関係を明らかにした。

3. 成果の公表

(1)Ou Zhao, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida ; Channel capacity of distributed MIMO antenna systems under the effect of spatially correlated shadowing, Proceedings of the IEEE 78th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC 2013 Fall), Las Vegas, Nevada, Sept. 2013

(2)Ou Zhao, Hidekazu Murata ; Outage probability analysis of ZF receivers in MU-MIMO systems for composite fading channel, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2013-225, pp.113-118, Dec. 2013

報告書作成日 平成 26 年 4 月 30 日

真空中沿面放電前駆過程における三次元帯電電荷分布の計算法

山本修

受託先名：株式会社日本AEパワーシステムズ

1. 目的

コンパクトで信頼性の高い真空高電圧機器の絶縁設計指針を明らかにするため、真空中における固体絶縁支持物の三次元帯電電荷分布の計算法を開発する。

2. 成果

真空高電圧機器では沿面放電の抑制が喫緊の課題となっている。重要な沿面放電の前駆過程として固体絶縁支持物の表面帯電現象がある。従来、帯電電荷の分布の解析法として回転対象座標系などの二次元電荷分布に対応する解析法が提案され、本研究者らはその数値解析法の開発を行ってきた。しかしながら、実機器に於いてより実際的な帯電は部分的ないしは非対称な分布、すなわち三次元分布になると考えられる。帯電をもたらす基本的な物理現象は二次電子なだけであり、結果として生じる分布が二次元であるか、三次元であるかの違いがある。

三次元電荷分布の解析手法として、

- ①モンテカルロ法を用いて個々の二次電子なだれを追跡し電荷分布を得る、
- ②二次電子なだれの最終の到達形態(電荷分布の平衡状態)について従来二次元分布の解析に適用されている電界の境界条件を三次元の境界条件に拡張し、この境界条件のもとで解析的に電荷分布を得る、

という二法が考えられる。本研究者らは、図1に示した円柱型試料について、部分的(幅 a の帯状部分のみが帯電)に帯電するようものとし、上記二法についてそれぞれ計算を行い、図2のように両結果がほぼ一致することを確認した。

一方、図3に示す実験系を用いて電荷分布の測定を行い、図4のように計算結果と測定結果とがほぼ一致する結果を得た。これらの結果は下記の国際会議で発表するとともに、より詳細な内容を現在論文誌 IEEE-TDEI に投稿中である。

3. 成果の公表

- (1)T. Umemoto, Y. Shimizu, H. Naruse and O. Yamamoto ; Three Dimensional SEEA Charge Analyses on an Insulator Surface in Vacuum, Proc. of 18th International Symposium on High Voltage Engineering, PD-34, pp.1053-1058, (Aug. 2013) Seoul, Korea

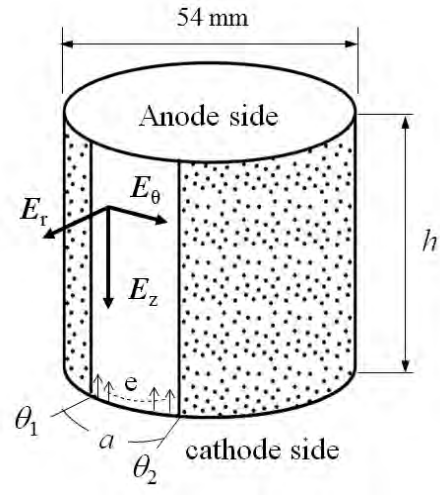


Figure 1. Solid cylinder with narrow band of SEEA progress region.

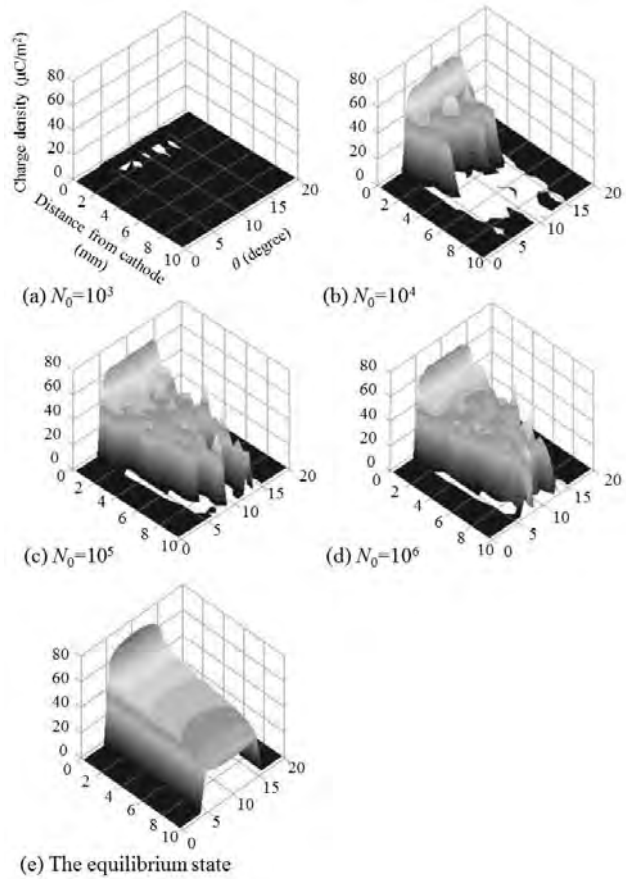
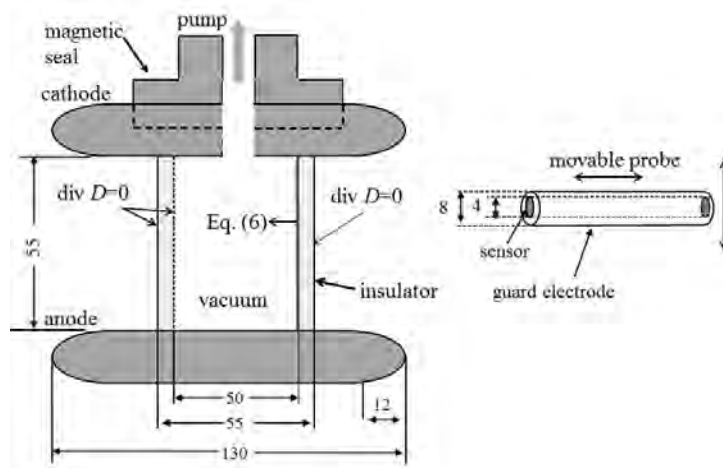
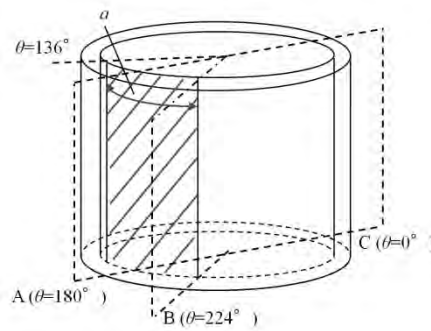


Figure 2. Results of random walk simulation (a-d) and the equilibrium state of SEEA charging (e). ($h=10$ mm, $(\theta_1-\theta_2)=20$ degree, $a=4.7$ mm)



(a) Experimental set up.



(b) Charging area.

Figure 3. Schematic of electrodes, insulator and movable probe.
(Hollow cylinder, $h=55$ mm, $a=40$ mm.)

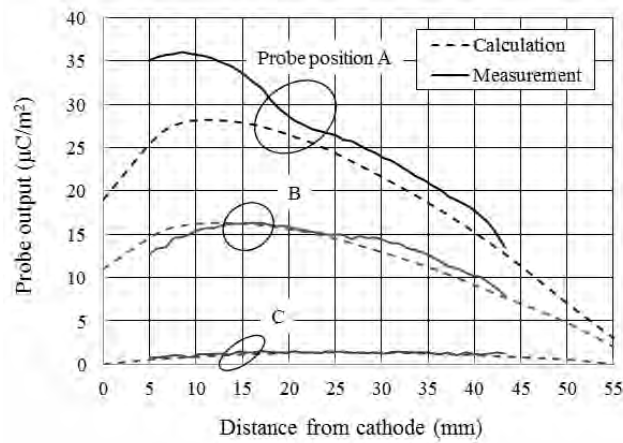


Figure 4. Measured and calculated probe outputs. Probe positions A, B and C are shown in Figure 4 (b)

二次電池による需給制御に関する研究

東京大学大学院新領域創成科学研究科
横山明彦教授

受託先名: 関西電力株式会社

1. 目的

太陽光発電が電力系統に大量連系された場合、その出力は自然まかせであり、変動が大きく変化スピードも速いため、水力や火力発電機で調整している現状の周波数調整方法では、適正な周波数に維持することが困難になってくることが懸念される。そこで、電力系統の需給制御に適した二次電池の制御方法を確立する。

2. 成果

(1) 複数台の蓄電池システム(BESS)の個別制御手法の効果の検証

BESS を周波数制御に利用する場合、BESS の充電量(SOC)が常に適切な範囲に保たれていなければ、需給調整上必要な出力ができないことが考えられる。また、交直変換器の効率は低出力時に悪化してしまうため、出力が低くならないように運用することが望ましい。これらのことを考慮して提案した、定格振り分け制御（バイアス一括）と定格振り分け制御（バイアス個別）という、複数台の BESS の個別制御手法の効果、様々な条件のもとで検証した。

定格振り分け制御（バイアス一括）とは、交直変換器効率を考慮して BESS の出力率を高くし、損失を抑えることを狙った制御である（図 1）。BESS を 5 分ごとに SOC 順に並べ替え、放電信号なら SOC の高い順、充電信号なら SOC の低い順に、それぞれの BESS の定格出力となるように信号を振り分ける。このようにすることで、BESS に高い出力をさせて損失を抑えるとともに、全ての BESS の SOC を同期させる。そして同期した SOC をもとに、BESS に割り当てられる出力信号に一括でバイアスをかけて出力を制御し、SOC を適切な範囲に保つ。

定格振り分け制御（バイアス個別）は、充放電レートの異なる 2 種類の BESS を併用することを考えた場合に、SOC の同期がとれないために定格振り分け制御（バイアス一括）では適切な SOC 制御ができない問題を修正した制御手法である（図 2）。この手法では、まずそれぞれの BESS に定格出力となるような信号を SOC 順に振り分けてから、その後で個々の SOC に応じて個別にバイアスをかけて SOC を制御する。

これらの制御手法を用いて、導入する BESS の条件を変えながら周波数制御シミュレーションを行い、どのような条件でも制御手法の効果が発揮されるのかを検証した。

まず 1 種類の BESS を使用する場合での検証では、定格振り分け制御（バイアス一括）を用いると、用いない場合と比べて周波数制御効果や SOC 変動を抑える効果を同等に維持しつつ、電力損失を大幅に抑えることができることが示された（図 3、4、5、6）。そして BESS の容量に余

裕のあるケースと BESS の数を増やしたケースでは、その損失削減効果がより顕著に現れるという結果となった。また、定格振り分け制御（バイアス個別）を用いて行った、ニッケル水素電池と NAS 電池の 2 種類の BESS を併用する場合での検証では、バイアスを一括でかけるよりも適切に SOC 制御ができるという、定格振り分け制御（バイアス個別）の効果が、導入された 2 種類の BESS の容量比を変えていったケースでも確認できることが示された。シミュレーションにより、様々な条件下でも提案手法はその効果を発揮できることが検証された。

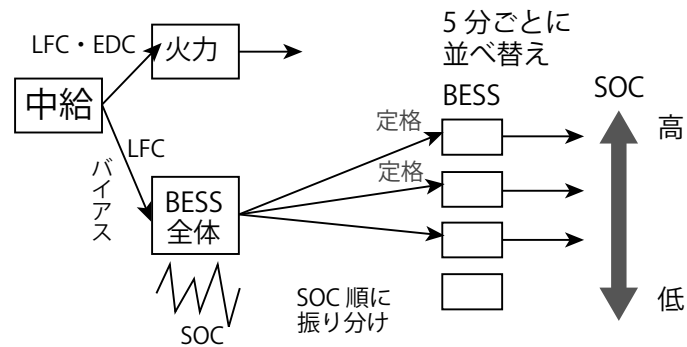


図 1 定格振り分け制御(バイアス一括)

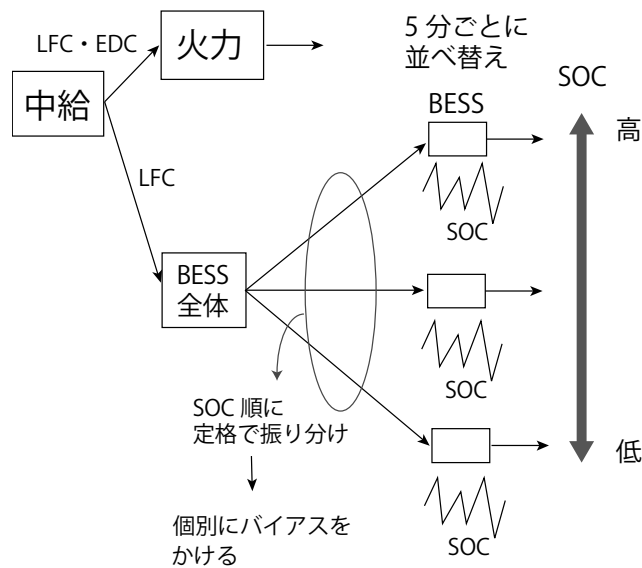


図 2 定格振り分け制御(バイアス個別)

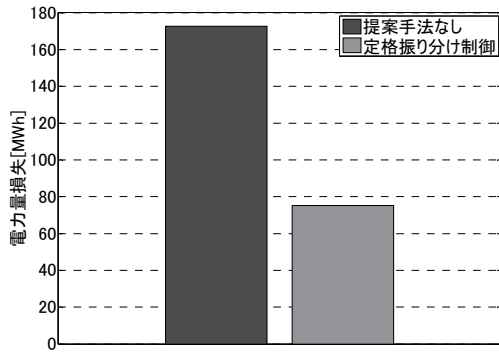


図3 電力量損失の比較

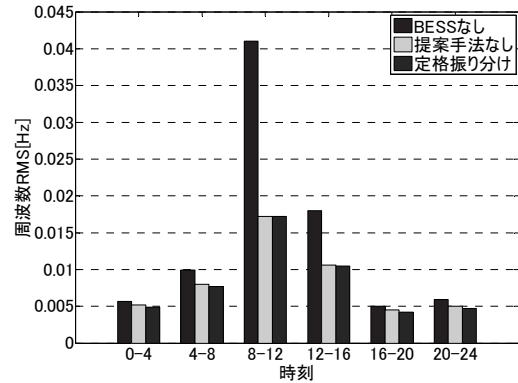


図4 周波数 RMS の比較

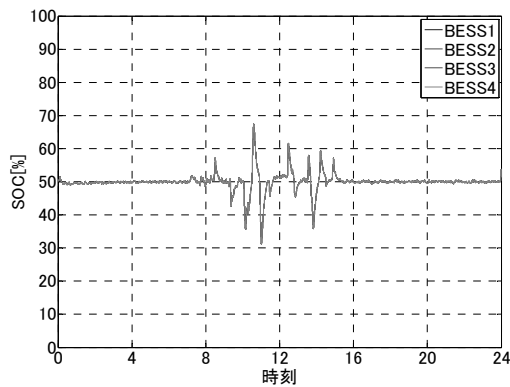


図5 SOC(提案手法なし)

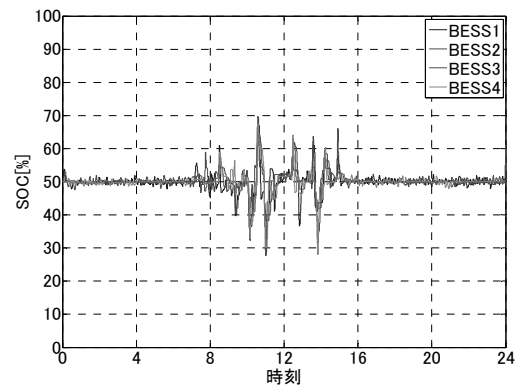


図6 SOC(定格振り分け制御)

(2)送電制約を考慮した複数台の BESS の個別制御手法の検討

周波数制御のために大容量の BESS を複数台導入する場合、その配置場所によっては送電線などに流れる電力潮流が偏り、熱容量の超過などの問題が生じることが懸念される。特にこれまで提案してきた定格振り分け制御では、損失を抑えるために BESS に大きな出力をさせているため、この問題が顕著になるのではないかと考えられる。そこで、送電制約を考慮して定格振り分け制御を改良した、新たな制御手法を提案し、効果を検証した。提案した手法は、次の新手法 1、新手法 2 の 2 つである。

交直変換器の効率が落ちてくるのは出力が 25%程度以下となるようなときであり、定格振り分け制御のように定格出力をさせなくても、損失を抑えることは可能である。新手法 1 は、このことを考慮して必要以上の出力は避けつつ、効率が悪くなるような小さな出力もしないようにした手法である (図 7)。この手法では、BESS の出力が 25%以上となる時は全ての BESS に出力信号を容量比で比例配分する。そして出力が 25%を下回ってしまう時は出力の優先順位の最も低い BESS の出力を切り、残りの BESS に出力信号を比例配分する。BESS の出力の優先順位は定格振り分け制御と同じように SOC 順により決定する。

新手法 2 は、新手法 1 で行っていた BESS の出力を切るといった動作をしないようにし、急激な出力変動を抑えて潮流への影響を小さくしようとした制御である (図 8)。この手法は、BESS の出力が 25% 以上になる場合は、新手法 1 と同じく全ての BESS に LFC 信号を比例配分する。そして BESS の出力が 25% を下回るようになってしまう場合は、新手法 1 のように優先順位の低い BESS の出力を切ってしまうのではなく、出力を下げるだけにする。この時、他の優先順位の高い BESS は 25% の出力を維持する。

新たに提案した制御手法の効果をシミュレーションによって検証した結果、新手法 1, 2 のどちらも、定格振り分け制御のように必要以上に大きな出力を出すことなく、提案手法を用いない場合と比べて大幅に電力量損失が削減できることが分かった。ただし新手法 2 では新手法 1 よりも損失が大きくなる傾向があることも確認された (図 9、10、11、12)。シミュレーションによって、系統の潮流状態に与える悪影響も軽減しつつも、効率的に周波数制御を行う手法であることが検証できたといえる。

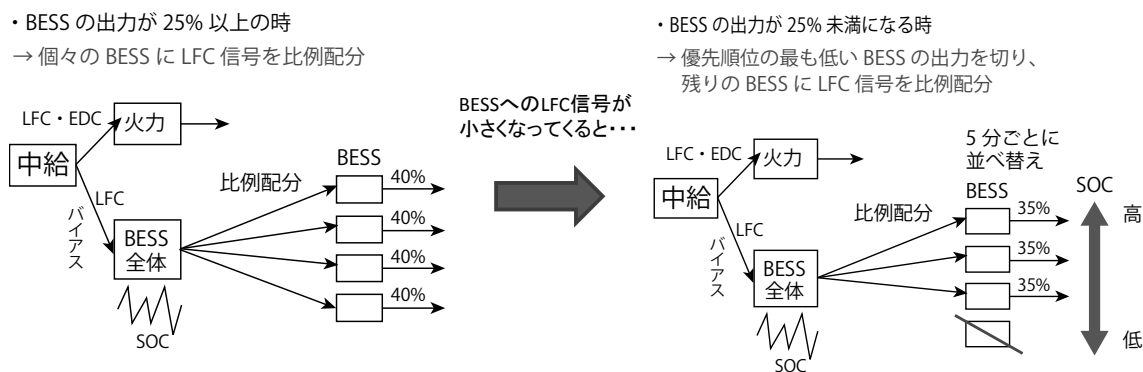


図 7 新手法 1

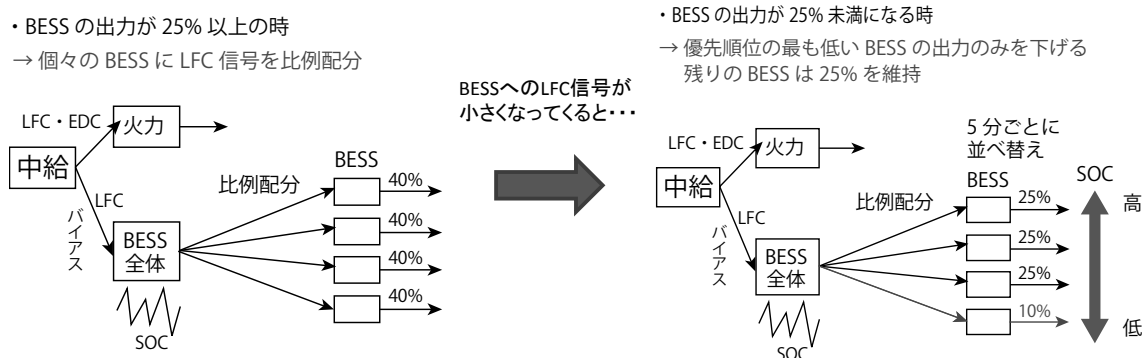


図 8 新手法 2

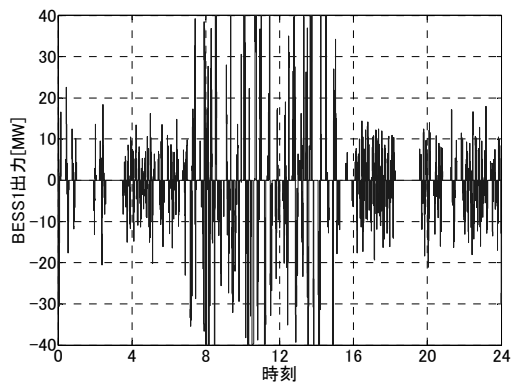


図 9 BESS 出力(定格振り分け制御)

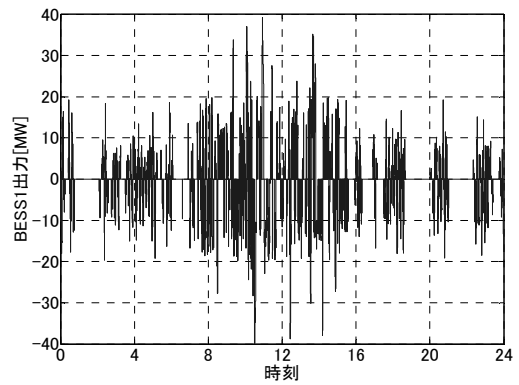


図 10 BESS 出力(新手法 1)

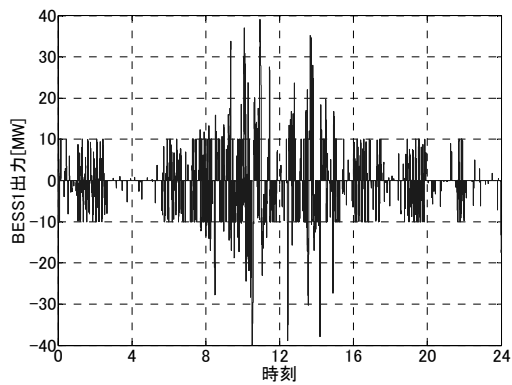


図 11 BESS 出力(新手法 2)

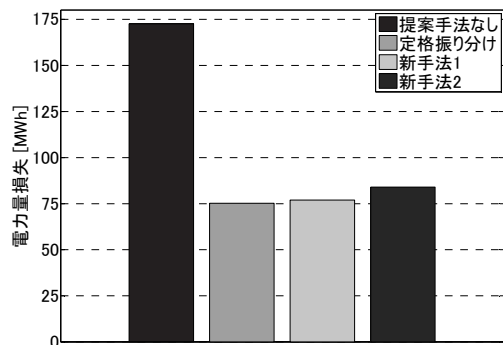


図 12 電力量損失の比較

3. 成果の公表

(1)橋本篤尚、横山明彦;負荷周波数制御における複数台の二次電池の個別制御手法に関する研究、平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会

(2)橋本篤尚、横山明彦;BESS の性質を考慮した負荷周波数制御における複数 BESS の個別制御手法、平成 25 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会

報告書作成日 平成 26 年 4 月 20 日

平成 26 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：株式会社 田中プリント

(無断複写複製厳禁)

Edited and Published
by Research Institute for Applied Sciences
49, Tanaka Ohi-Cho, Sakyo-ku,
Kyoto 606-8202, Japan
Tel. 075 (701) 3164, Fax. 075 (701) 1217
Printed in September, 2014