

公益財団法人
応用科学研究所
令和元年度研究成果報告書

第 27 号

2019FY RESEARCH REPORT

No.27

2020

RESEARCH INSTITUTE FOR APPLIED SCIENCES

目 次

1. 研究員による成果		
高耐熱性材料の開発に関する研究.....	長江 正寛	1
鉄鋼材料の塑性変形形態と材料特性に関する研究.....	長江 正寛	
	久保 愛三	2
リサイクル炭素繊維を活用した高剛性 CFRP 遠心抄造法及び		
橋梁用 CFRP 補修工法の研究開発.....	長江 正寛	3
久保研究室の成果	久保 愛三	4
2. 特別研究員による成果		
銀被覆ビスマス系および実用超電導線材の		
機械的および電磁気的特性の評価	長村 光造	25
IEC 国際標準化.....	長村 光造	27
保磁力の配向度依存性と角度依存性の相関による磁化反転プロセスの解明		
～Ga 添加 Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力メカニズム～	松浦 裕	
	長村 光造	29
永久磁石の微細組織とその局所磁気特性の解析による高保磁力化の指針構築		
～軟 X 線磁気円二色性偏光 (XMCD) を用いた		
(SmCe) ₂ (Co,Fe,Co,Cu,Zr) ₁₇ 磁石の磁気反転挙動観察～	松浦 裕	31
3. 共同研究員による成果		
安全情報を伝えるメディアの研究(その 7)	尾池 和夫	33
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	36
大規模分散電源による電力系統の安定化.....	舟木 剛	37
洋上風力発電所の耐雷設計構築のための縮小モデル実験と電磁界解析		
～独立避雷鉄塔の費用便益分析手法の提案～	安田 陽	39
新しいエネルギービジネスの在り方	安田 陽	41
大量 PV の仮想同期発電機モデル制御による系統安定化への影響評価	横山 明彦	43

研究員による成果

高耐熱性材料の開発に関する研究

材料評価・開発研究室 長江正寛

受託先名：株式会社アライドマテリアル

1. 目的

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

本研究では、液体ジルコニウム源を含浸させた Mo 粉末を焼結することで、微細なジルコニア (ZrO_2) 粒子が均一に分散した、高強度・高靱性 Mo-ZrO₂ 系耐熱複合材料の作製を目指す。前年度までの研究により、液体ジルコニウム源に少量の Y₂O₃ 前駆体を添加すると、イットリア安定化正方晶ジルコニア(Y-TZP)を Mo 焼結体中に微細分散させることが可能である事がわかった。今年度は前年度に比べより少量のイットリア(Y₂O₃)を添加した Mo-ZrO₂-Y₂O₃ 系焼結材料をホットプレスによって作製し、その機械的特性などについて検討した。

2. 成果

今年度はジルコニア中のイットリア含有量が 0.5mol% となるように前駆体を調整し、ホットプレス焼結体を作製した。状態図では室温で斜方晶構造となる組成である。X 線回折の結果、分散させたジルコニアは焼結体の切断面では全て斜方晶構造であったが、電解研磨により加工変質層を除去すると、ピーク強度比で 5 割程度のジルコニアが正方晶として残存していることが明らかとなった。この結果は、焼結体中に残存している正方晶ジルコニアが非常に不安定であり、切断面では応力誘起相変態が効果的に起こったことを意味している。室温での 3 点曲げ試験の結果、本焼結体は十分な延性を有していることが分かった。

参考文献

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

3. 成果の公表

成果の一部は令和 2 年秋の学会にて口頭発表する予定である。

報告書作成日 令和 2 年 5 月 11 日

鉄鋼材料の塑性変形形態と材料特性に関する研究

材料研究部 長江正寛 久保愛三

1. 目的

近年、コストカットへのさらなる要求と材料調達のグローバル化により、同一規格の鋼種であれば可能な限り安価な材料を求めようとする傾向が強まりつつある。しかしながら、それに伴い、歯車等の重要機械部品に関して、材料の品質に起因すると考えられる損傷事故が増えているのも事実であり、購入した鋼材の品質検査の重要性が高まっている。こうした背景から、我々は、数百～数千点のビッカース硬さを短時間で測定可能な「多点硬さ自動測定装置」の開発に取り組んでおり、超多点のマイクロビッカース硬さ測定は、鋼材の実用特性に影響しかねない組織、合金成分分布などの不均一性を顕在化し、素材や熱処理の良否の判断や、機械部品の損傷原因の推定に対して有益な指針を与えることが明らかになりつつある。

今年度は前年度に引き続き各種鋼材の多点硬さ測定を行うとともに、約 100 万点以上の硬さ測定を行った使用済み圧子の表面状態等を観察・分析し、今後の装置運用方針を定める上で必要となる知見を得ることを目的とした。

2. 成果

各種鋼材の超多点硬さ測定を行った結果、偏析の有無、金属組織の違いによる硬さのバラツキ、焼入れなどの熱処理に起因する異常組織の存在、ミルシートからは読み取る事が困難な材料間の差異を視覚化できることがわかった。このような視覚化は、軽荷重(例えば 50gf)を用いて超多点硬さ測定を行う事でより明確になる。軽荷重の硬さ試験を超多点で行う事により、材料の異常を認知・可視化することが比較的簡単に出来るようになり、材料に起こりうる様々なトラブルに対する対策を考える上で、非常に有益な情報が得られると考えられる。

多点硬さ測定後の圧子には何らかの汚れ(異物)が付着し、場合によっては測定値を大きく狂わせることが判明した。圧子に付着した汚れを除去するためには、各測定前に最大荷重の 2kg で数回試し打ちを行う事が効果的であることが分かった。本装置は 50～100g の比較的軽荷重を使った硬さ測定がメインとなるため、圧子頂点(先端)付近約 30mm の範囲の状態には特に注意が必要である。圧痕内部の観察を定期的に行い、汚れや損傷の有無を確認する事が装置運用上きわめて重要であると考えられる。

3. 成果の公表

(1)長江正寛、久保愛三；“超多点マイクロビッカース硬さ測定による鋼材評価(第 2 報)” 日本金属学会 2019 年秋季(第 165 回)講演大会(2019)

(2) 井戸原修、魏嵐、三阪佳孝、川寄一博、長江正寛、久保愛三；“多点硬さ測定に関する研究(第 2 報)” 日本熱処理技術協会第 87 回講演大会(2019)

報告書作成日 令和 2 年 5 月 11 日

リサイクル炭素繊維を活用した高剛性 CFRP 遠心抄造法 及び橋梁用 CFRP 補修工法の研究開発

材料評価・開発研究室 長江正寛

令和元年度中小企業経営支援等対策費補助金（戦略的基盤技術高度化支援事業）

1. 目的

本事業では、用途開発が希求されているリサイクル炭素繊維を原料に使い、世界初の CFRP 遠心抄造法と過熱水蒸気を用いた加熱圧縮成形技術の確立により、従来製法では解決できなかった不連続炭素繊維の一方向化と高密度化を実現し、高強度・高剛性で安価なリサイクル CFRP 板を開発する。また、本製品を活用し、接着接合とボルト接合を併用した橋梁補修工法を開発することにより、老朽化が社会問題となっている橋梁補修の事業化を実現する。

本年度は、リサイクル CFRP 板の空隙の有無や繊維の配向状況の観察を主目的とし、光学顕微鏡観察ならびに SEM 観察用サンプル作製のための鏡面研磨技術の確立と、観察手法の検討を行った。また、次年度の研究に向けた足掛かりを得るために、イオンスライサを用いた TEM 観察用薄片サンプルの試作を行った。

2. 成果

今年度の目標は「研磨・観察技術の確立」である。研磨技術に関しては、光顕観察および SEM 観察に必要なレベルの鏡面状態が得られる研磨工程を確立した。観察技術に関しては、数十枚の光顕観察写真を繋ぎ合わせて 1 枚の写真とし、広範囲にわたる空隙の有無や繊維の配向状況が一目で分かるような情報が得られるようになった。SEM 観察では、適切な導電性コーティングを施すことにより、炭素繊維と樹脂の複合材料においてチャージアップ（帯電によるノイズ発生）のない破面観察が行える事を確認した。また、X 線 CT スキャン測定を行うことにより、空隙の有無や繊維の大まかな配向状況の 3 次元的情報を数時間の観察で動画表示させることが可能であることを確認し、リサイクル CFRP 板の製造工程で混入する介在物の存在を簡単に可視化できることも分かった。EDX 分析の結果、これらの介在物は主として鉄系酸化物であることが明らかとなった。

次年度で実施予定の TEM 観察に向けて、イオンスライサによるリサイクル CFRP 板の薄片化を試みたところ、加速電圧 15kV の電子線が十分透過する薄片サンプルを得ることが出来た。TEM の加速電圧は 200kV であることから、より広範囲にわたり電子線が透過すると考えられ、イオンスライサ加工は CF と樹脂の界面構造解析に適した加工手段の一つとして期待できる。

報告書作成日 令和 2 年 5 月 11 日

久保研究室の成果

久保研究室 久保愛三

令和元年度は、下記の学会にて2件の発表があった。

INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEARS

18th-20th September 2019

Munich, GERMANY

Influence of stressed volume of tooth flank on the surface durability

Japanese standardization for gear steel qualification via evaluation of HV-scattering

以下、論文を掲載する。

VDI

September 18 – 20, 2019

International Conference on Gears 2019

FZG, Garching/Munich, Germany

#VDI_Gears

Key topics:

- Optimization of gear design and geometry
- System-modelling, -simulation and -calculation of gears
- New calculation methods for load carrying capacity, strength and more efficiency
- NVH behavior and noise reduction of transmission systems
- Condition monitoring and damage detection
- Lubrication and TEHL

Gears interactive

GearLab
Speakers meet up
FZG lab tours
Poster exhibition with
impulse talks
Two gear community nights

Associated organisations:



Visit parallel conferences free of charge

+ Gear Production 2019
www.vdi-wissensforum.de/gearproduction

+ High Performance Plastic Gears 2019
www.vdi-wissensforum.de/plasticgears

An event organized by VDI Wissensforum
www.vdi-gears.eu

1st Conference day

Wednesday, September 18th, 2019

Lecture Room A



Flank strength

Moderation: Dr.-Ing. Ralf Georg Wittor, Eickhoff Antriebstechnik, Germany/Prof. Ahmet Kahraman, The Ohio State University, USA

13:45 Influence of stressed volume of tooth flank on the surface durability

- Introduction of big influencing factor on the surface durability of dedendum tooth flank of pinion
- Improvement of tooth flank durability calculation for pinion of small tooth number

Prof. Dr.-Ing. h. c. Aizoh Kubo, Manager of R&D, President of Research Institute for Applied Sciences, Kyoto, Japan

Influence of stressed volume of tooth flank on the surface durability

Aizoh KUBO, Prof.hc.Dr.-Ing.

Research Institute for Applied Sciences,
Ooicho 49, Kyoto 606-8202 JAPAN

Abstract

To investigate tooth flank durability, we usually utilize contact stress in the SN curve concept on the fatigue phenomena. We often though experience that dedendum flank is severely damaged, but the mate-contacting addendum tooth flank is free from damage, especially in case of gearing whose tooth number of pinion is small. This is a big contradiction, because the induced contact stress on dedendum and on the mate-contacting addendum is symmetric and the stress magnitude is same. To escape from this contradictory, a concept is proposed, that the enveloping stressed volume has strong influence on the durability of tooth flank, by showing some evidences and examples of such surface damage. Some hints are given to consider this effect of stressed volume in the calculation of surface durability. This will contribute for the safe design of pinion of small tooth number by avoiding dedendum surface failure to raise the gear life.

1. Introduction

The first design condition of speed changing gear box is to realize the transmission ratio. On the other hand, there is a strong demand to reduce gear box size, weight and the production cost. The easiest way to fulfil these conditions is to reduce the tooth number of pinion. There is though no 100% benefit bringing thing between heaven and earth: merit always comes together with almost equal weight of demerit. In this case of small tooth number pinion incorporation, the problem is the durability of pinion tooth flank: it becomes poor. All the methods today for the load carrying capability prediction of tooth flank incorporate the Hertzian contact stress of mating tooth flanks as the index for the durability. Gear academician usually adapts the contact stress value to the SN-curve concept according to the theory of steel fatigue. That means, the part of tooth flank at which the contact stress is high is liable to fail. We often though experience that dedendum flank is severely damaged but the mate-contacting addendum tooth flank is free from damage. This is a strong contradiction against the bases of surface durability estimation method mentioned above, because the induced contact stress on dedendum and on the mate-contacting addendum is symmetric and the stress magnitude is the same.

2. SN curve concept and tooth flank durability

Fig.1 shows an example for fatigue investigation and SN curve. Metallurgists carry out such fundamental research commonly with

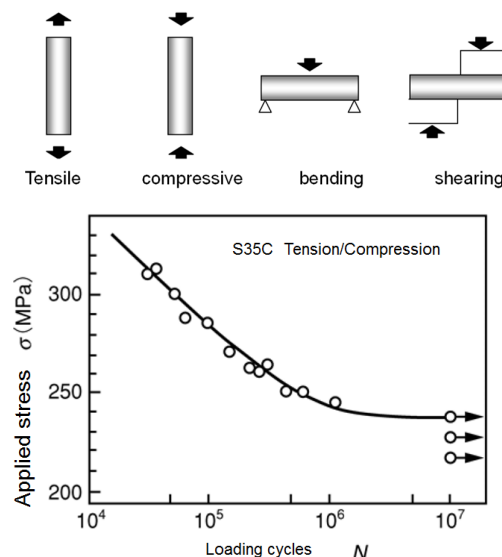


Fig.1 Fatigue investigation and SN curve

tension test, compression test or rotation-bending test. Such test induces the intended stress in the definite position of the test specimen (refer to TP). The same position of the TP, that means same material volume, receives the intended stress. That means the material that is subjected to check the fatigue durability is definitive. The SN curve that is usually employed to show the results of fatigue test deals with such situation, i.e. the definite material receives the intended repetitive stress history until it will be fatigue damaged. This is a matter of course; when different material receives the stress, it is impossible to draw the relation between given stress value and fatigue strength of the material.

When we consider the stressed situation of tooth flank material, the condition is considerably different from that condition mentioned above. In the case of fatigue of gear tooth flank, the stressed material changes along the tooth form. The stress condition at each local material on tooth flank is changing and different. When we adapt the basic condition of SN curve concept to the case of tooth flank fatigue phenomenon, each local material on tooth flank, say 1 to 9 etc. in Fig.2, must have each different SN curve for surface durability. This cannot be though adequately done, because the local tooth flank material along tooth form is continuous. Moreover summing up such evaluation method brings no industrial benefit to know the durability of gear tooth flank.

In the case of fatigue of gear tooth flank though, the induction of contact stress on and in both sides of contacting tooth flank is symmetric and the magnitude is the same, but the volume of surface material of addendum and that of the mate-contacting dedendum that transmit power is different, as shown in Fig.3, because some slippage exists between contacting surfaces. This is a fundamental difference between metallurgic fatigue investigation and gear investigation. The direct application of SN-curve data and its concept to the surface fatigue problem of tooth flank is therefore difficult.

3. Difference of tooth flank failure of addendum and of dedendum

Fig.4 shows an example to show the typical state of tooth flanks after an gear endurance test with using IAE rig. The figure shows both mating driving and driven tooth flanks with same magnifi-

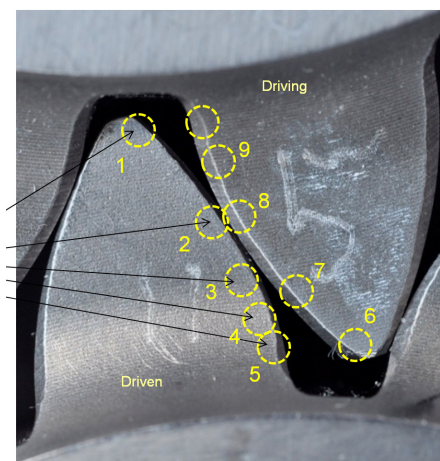


Fig.2 Different position on tooth profile whose material is subjected to be investigated with SN curve concept

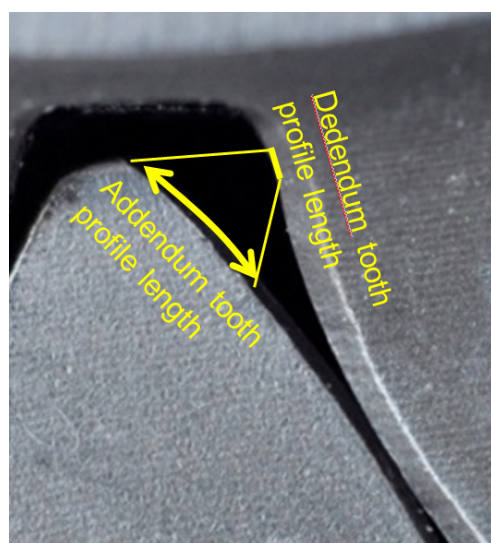


Fig.3 Different profile length that comes in contact in a definite time length (schematic expression)

cation and by setting the PCD position coincided for easy understanding of correspondence of the tooth flank contact. The IAE test gears have special addendum modification factors, so that hot scuffing or pitting failure easily occurs before tooth breakage. The slippage between tooth flanks at beginning and ending region of tooth meshing is large and the difference of stressed volume at addendum tooth

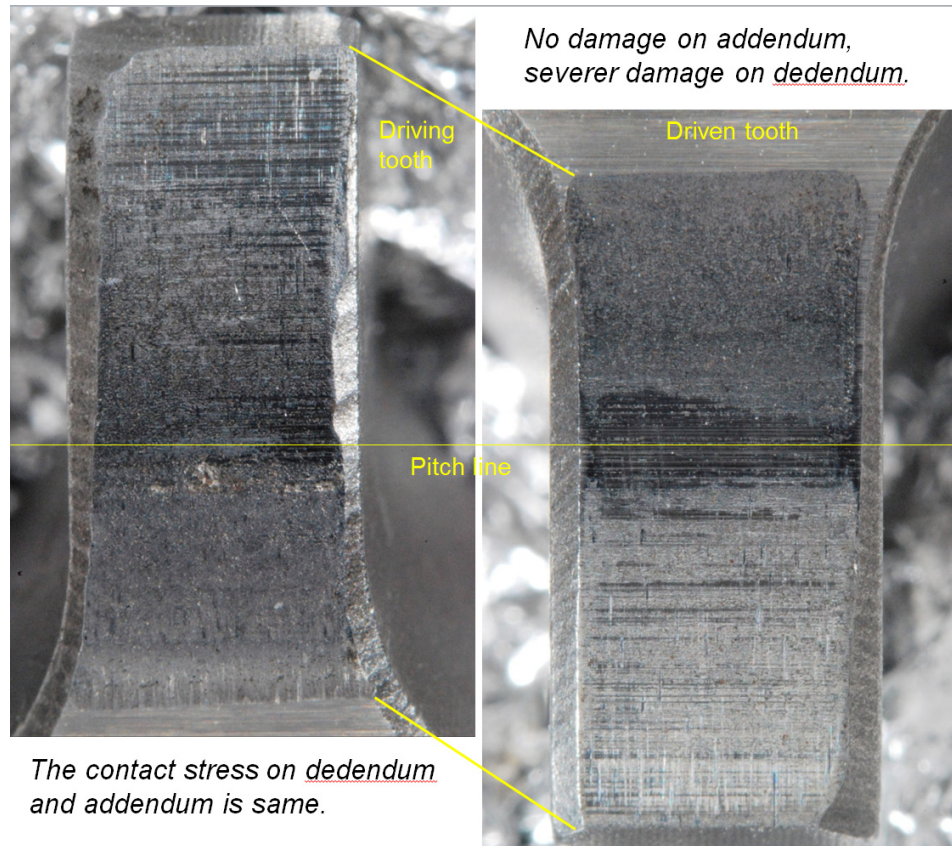


Fig.4 State of tooth flanks of driving and driven gear after endurance test

flank and that at the dedendum flank is big as seen schematically in Fig.3. The outlook of the tested tooth flanks is as follows, cf.Fig.4: the dedendum tooth flanks of both driving and driven gear are severely worn, but the mate-contacting addendum tooth flanks stay almost in wear-free state. On the addendum flank near the tooth tip, many cutter marks still remain to show that the wear proceeds there very mildly. We can say addendum is failure free and the residual margin of the addendum flank against tooth flank failure still remains a lot. There exists such big difference in wear state between addendum and dedendum, especially at the contact region near base circle, although the induced contact stress on the both tooth flanks and in the subsurface is symmetric and the magnitude is the same.

Fig.5 shows a worn tooth flank of sun pinion of a heavy duty planetary gearing. The surface damage of dedendum flank is far severer than that of the addendum. This big difference in the state of surface damage cannot be explained only by the sense of induced contact stress.

The tooth flank damage develops in the positive feedback system as

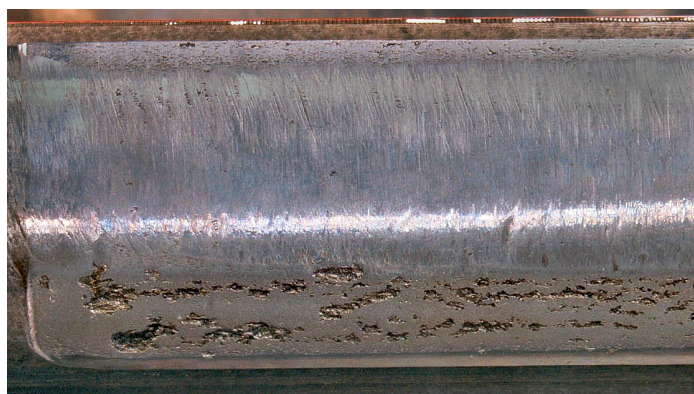


Fig.5 Severely damaged dedendum in comparison with that of addendum

shown in Fig.6. The triggering failure occurs often near the lowest position of the dedendum owing to some causes as described in Fig.6 and also to small stressed volume that is explained in the following sections of this paper. The triggering surface and/or subsurface failure at the lower dedendum proceeds then as the behavior of dynamic system of failure development, and as the result, almost whole dedendum tooth flank becomes severely damaged like Fig.5.

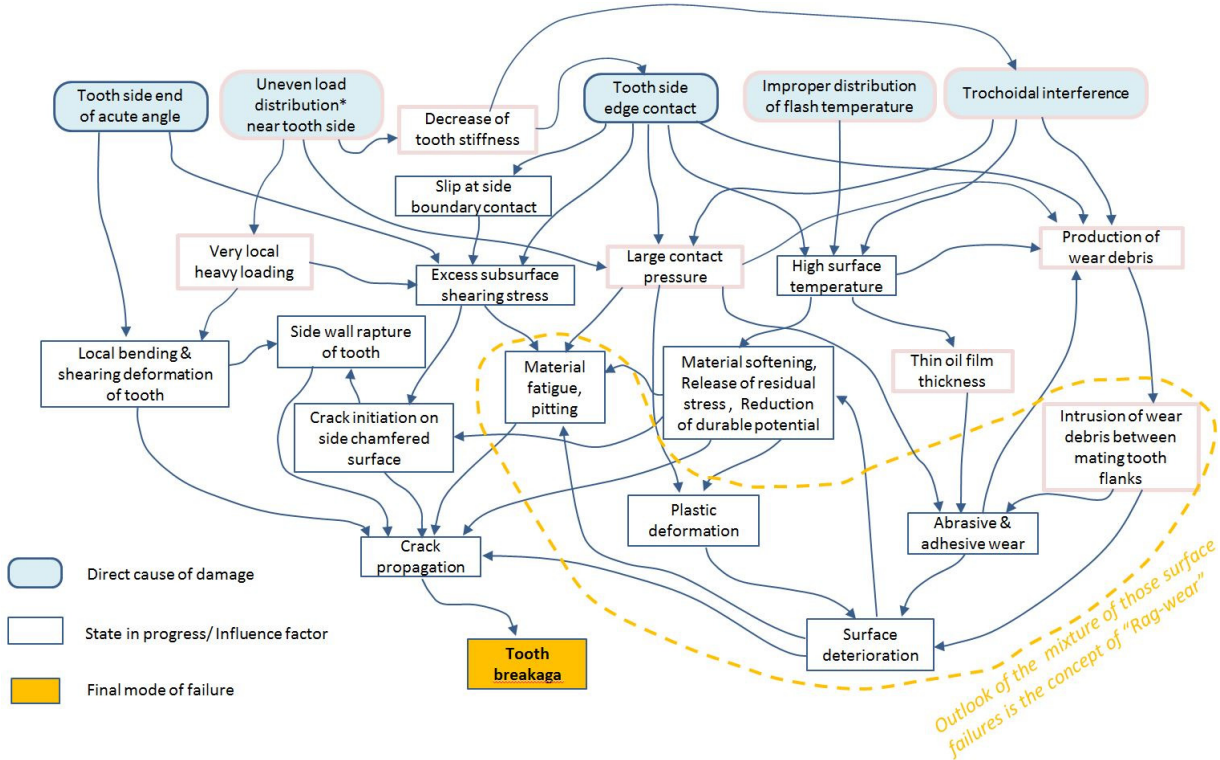


Fig.6 Positive feedback system for the development of tooth flank failure, triggering causes to the final stage

4. Stressed volume

When we consider the primitive principle of durability or strength of material, it is a matter of course that the damage of power transmitting material becomes softer, when the material size or volume becomes bigger. In the explanation above, I often used the expression “stressed volume”, but the definition of it is not yet clear.

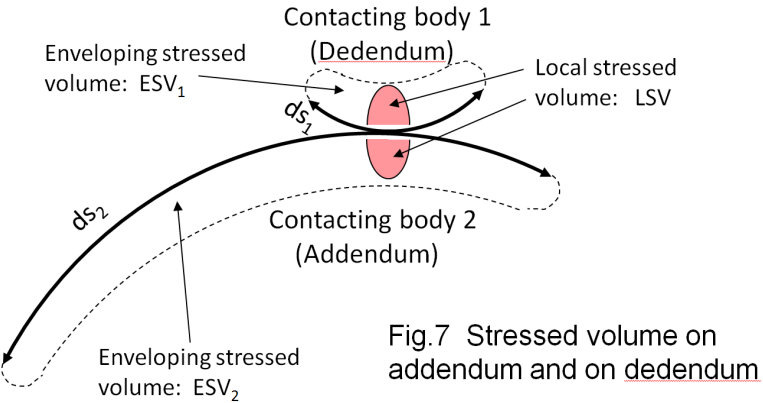


Fig.7 Stressed volume on addendum and on dedendum

Fig.7 illustrates what “stressed volume” is. Two short and long arcs indicate the rolling/sliding contacting surfaces during a definite time length. At the instantaneous contacting point of these two arcs, grey ellipse is indicated, and the upper half and lower half of that

ellipse express the contact stress that are induced in both contacting surfaces and bodies (in the figure, the contact pressure distribution is shown): They are symmetric and the magnitude are the same. The local material volume in which the induced stress effectively appears, we name it "Local Stressed Volume LSV ". Both the LSV 's on contacting dedendum and on addendum are instantaneous existence and of the same size. When we consider the rolling and sliding situation of contacting surfaces, like gear tooth flank meshing, the arc length ds_1 contacts with the arc length ds_2 during the definite time length. On one side, the LSV moves by ds_1 distance and the enveloping material volume in the contacting bodies becomes ESV_1 and that on the other side ESV_2 . These two enveloping stressed volumes on ds_1 side and on ds_2 side are of different sizes. Inside both the enveloping stressed volume ESV_1 and ESV_2 , the same stress of LSV moves, only the passing speed of the stress over the ESV 's is different. The question is, which stressed volume, i.e. LSV or ESV , is subjected to fatigue. ESV recognizes the influence of load movement and covers the stressed state over whole the tooth flank, but LSV does not and is an instantaneous concept. When the slippage between the rolling-sliding contact surfaces becomes large, the ratio of enveloping stressed volume ESV_2 / ESV_1 becomes large. In case of contact near the base circle, this ratio becomes infinitely large. The continuous change of the contacting material along tooth form that is subjected to fatigue makes the understanding of tooth flank fatigue phenomenon difficult, when we incorporate a simple extension of traditional fatigue theory from e.g. rotation bending fatigue test to that of tooth flank contact fatigue without considering the difference in the state of stress induction in the target material.

5. Damage density concept

To utilize the results of fundamental fatigue investigation of metallurgists concerning SN curve concept to the fatigue phenomena of gear tooth flanks, I propose the damage density concept. The application of contact stress on the ESV decides the probability of induction of micro-failure or the intensity of heat attack in the material that triggers the occurrence of serious tooth flank damage: Under a definite value of contact stress, a definite amount of damage during a definite time length is given to the ESV concerned. The resulted damage density for surface fatigue is thick, when the enveloping stressed volume ESV_1 is small.

The damage density becomes slight, when the enveloping stressed volume ESV_2 is large, as shown in Fig.8. This means, the damage density becomes thick on dedendum and that on addendum is sparse. We set here an assumption, that the local part of material of thick damage density is liable to fatigue fail. The dedendum flank is then easy to fail in comparison with addendum flank. This tendency of damage progress becomes extreme, when the contacting point of mating tooth flank approaches the base circle. The contradiction of probability difference of surface failure occurrence on mating dedendum and on addendum as shown in Fig 4 is then solved and explained

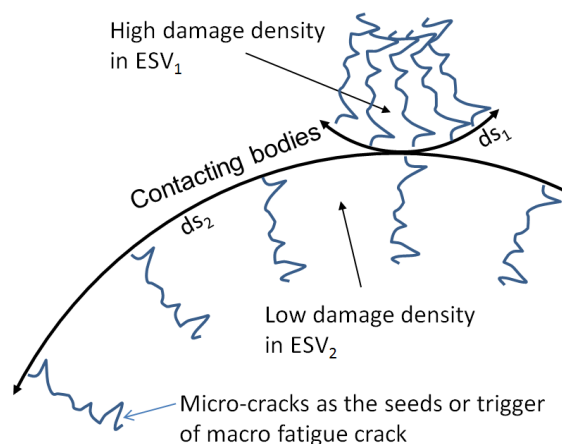


Fig.8 Probability of existence of induced trigger of fatigue, e.g. heat attack and micro crack initiation, in different ESV

rationally. This hypothesis also clarifies the phenomenon that the dedendum of pinion of small tooth number is easy to fail as estimated by today's calculation method for load carrying capacity for tooth flank durability, in which the concept of *ESV* is not yet introduced.

6. Influence factor in durability calculation

Gear engineers usually deal with the state of gear teeth meshing on the line of action (refer to LoA) or on the plane of action for convenience, thanks to the theory of involutemetry investigation, where the sense of movement of contacting point on the actual material of tooth form at the power transmission is though lacking.

The relation between an infinitely short distance dx on the LoA and the corresponding arc length ds over the tooth profile is $ds / dx = \tan \theta$, cf. Fig.9, where θ is the pressure angle of involute curve at the said contacting point. The width and the depth of the *ESV* are independent from the arc length ds . They are decided by *LSV*. The size of *ESV* is then almost proportional to ds and the enveloping stressed volume ratio ESV_2 / ESV_1 becomes equal to the ratio ds_2 / ds_1 . That is

$$\begin{aligned} ESV_2 / ESV_1 &= ds_2 / ds_1 \\ &= \tan \theta_2 / \tan \theta_1 \end{aligned}$$

Fig.10 shows how we calculate the enveloping stressed volume ratio ESV_2 / ESV_1 for the IAE test gears of Fig.4. At the beginning point A of the tooth contact, tooth flank material corresponding to the profile length of $\tan \theta_{p1}$ of the driving pinion carries the transmitting power and a larger tooth flank material corresponding to $\tan \theta_{g1}$ of the mate-contacting tooth of the driven gear receives the same transmitting power. The suffices *p* and *g* indicate driving pinion and driven gear respectively. During power transmission, the surface temperature of tooth flank of driving dedendum whose *ESV* is small becomes hotter and the temperature of driven addendum is lower, because of the volume difference of the *ESV* to be heated. The

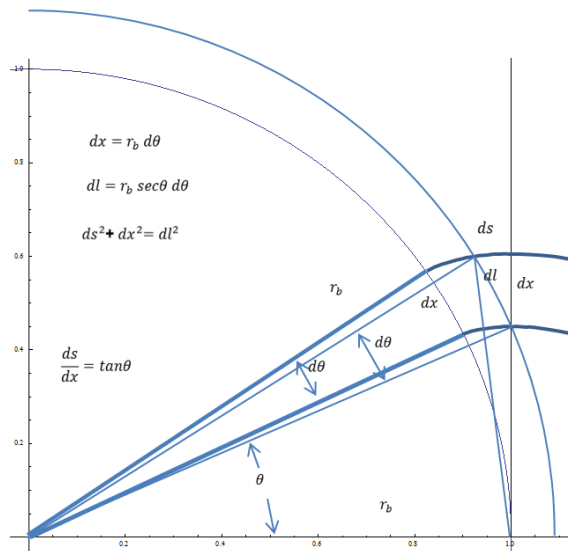


Fig.9 Relation between rotational distance on the LoA and the amount of surface length along tooth form

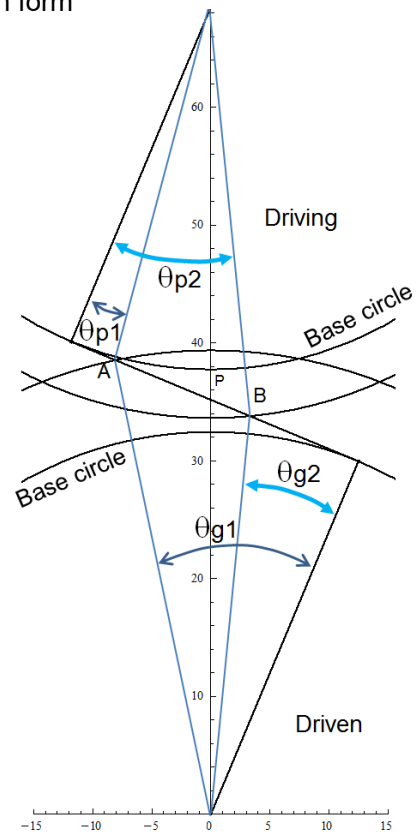


Fig.10 Ratio of profile length on addendum and on dedendum

difference in volume and in temperature of *ESV* on both sides of the contacting bodies makes the difference in damage density induced. In this explanation, the effect of tooth edge contact, i.e. trochoidal interference, at tooth meshing begin and at meshing end is omitted. There is therefore some minor imperfection in the explanation about the effect of *ESV* on the tooth flank durability of dedendum of pinion with small tooth number, but I hope gear engineer will understand the considerable influence of *ESV* difference on the surface durability estimation of dedendum tooth flank.

7. Conclusions

1. We often experience that dedendum flank of pinion of small tooth number suffers severe damage, but the mate-contacting addendum tooth flank is free from damage. This is a strong contradiction from the today's bases of surface durability estimation, because the induced contact stress on dedendum and on the mate-contacting addendum is symmetric and the stress magnitude is the same.
2. In the investigation on durability of tooth flank of gears, the material that receives definite stress cannot be fixed. This is a big difference from the traditional fatigue theory and SN-curve concept, where the material that receives stress is fixed and definitively constant.
3. To solve this problem, the concept of enveloping stressed volume *ESV* is introduced: the fatigue damage density increases proportionally to the decrease of the *ESV*. When we assume that the material of high damage density is easy to fail, the dedendum tooth flank of pinion is easily damaged than that of the addendum tooth flank of mating gear, in spite of the equal induced contact stress condition.
4. To introduce *ESV* influence to the today's tooth flank load carrying capacity calculation method, the *ESV*-ratio is proposed that is described simply with gear specification data.
5. The concept of *ESV* can contribute the safe design of pinion of small tooth number to raise its life by avoiding the dedendum surface failure.



3rd Conference day
Friday, September 20th, 2019

Lecture Room C



Gear material

Moderation: Dr.-Ing. Jörg Hermes, SEW-EURODRIVE, Germany/**Prof. Dr.-Ing. Michael Weigand**, Vienna University of Technology, Austria

Japanese standardization for gear steel qualification via evaluation of HV-scattering

- Scattering of micro-Vickers' hardness and gear steel quality
- Preparation of input data to AI-system for steel quality judgement

Prof. Dr.-Ing. h. c. Aizoh Kubo, Manager of R&D, President of Institute, Dr.-Ing. Masahiro Nagae, Head researcher, Material department, Dr.-Ing. Kazuhiro Kawasaki, Board member, Research Institute for Applied Sciences, Kyoto, Japan

Japanese standardization for gear steel qualification via evaluation of HV-scattering

Prof.hc.Dr.-Ing. Aizoh KUBO
Dr.-Ing. Masahiro NAGAE
Dr.-Ing.Kazuhiro KAWASAKI

Research Institute for Applied Sciences,
Ooicho 49, Kyoto 606-8202 JAPAN

Abstract

The Japanese Gear Manufacturers Association plans to make the Standard for the Vickers' hardness measurement for gear steels to check the real quality of gear steels machine builder purchases. This is a measurement of thousand-points-hardness automatically. Some examples are shown to show how this method is effective for quality evaluation of gear steels. The out-line and some contents, data processing incorporated in this standard are introduced.

1. Introduction

The probability of material problem causing gear failure looks increasing since the Globalization prevails as the base of world economy. The deterioration of gear steel quality is the rational result of the globalization, because purchasing department of machine company looks for the cheapest one among the same MILL certificated steels over the world. The usual question from the purchasing department of gear material is "Why we pay much money for the same steel". To check the real quality of gear steels purchased, a new tester for measuring thousands-points-hardness automatically in short time. Three years of field usage of this HV-checker conducted by the JGMA shows, the scattering evaluation of steel is really effective to find the bad quality steel and to fix the cause of the gear failure problem owing to material causes. On this experience, the JGMA plans to standardize the Vickers' hardness (refer to HV) measurement for gear steels. In this report the back ground of this tandardization is shown with some examples of steel quality problem of gears

2. HV scattering examples

2.1 Steel of quasi-even hardness

In a blank piece production for ring gear from SCM435 steel bar (purchased raw condition without heat treatment), crack often breaks out to destroy the gear blank piece. The multiple-HV was measured as shown in the Fig.1 left. The distribution of HV scattering shows, considerable center segregation exists in this steel bar material. Surely the center part of this bar is brittle that causes the crack initiation at the deforming

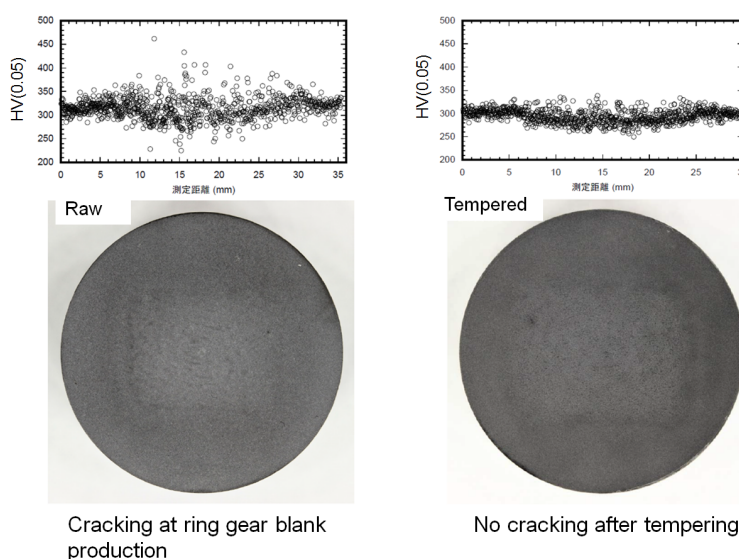


Fig.1 Scattering of 1200 pts. HV of SCM435 steel bar, raw and well tempered

procedure. To give ductility to the material, quenching and annealing process was given. The cracking problem was then over. Fig.1 right shows the HV scattering after this additional heat treatment.

Fig.2 shows a strange HV distribution over a diameter of a steel bar purchased. The material has some central segregation, but the problem is that the hardness near the skin behaves a comical run of the group. Perhaps something has happened during the roll-pressing deformation procedure to make steel bar from the CCT billet at steel production.



Fig.2 Result of non-uniform roll-pressing at production of SCM415 steel bar from the billet

Fig.3 shows how the HV distribution and scattering differs at the peripheral and central part of a SCM420 steel bar material of diameter 380mm. The most frequent hardness value of the peripheral part of the material exist in the lower part of the HV distribution, but the central part of material has 2 different values of frequent hardness.

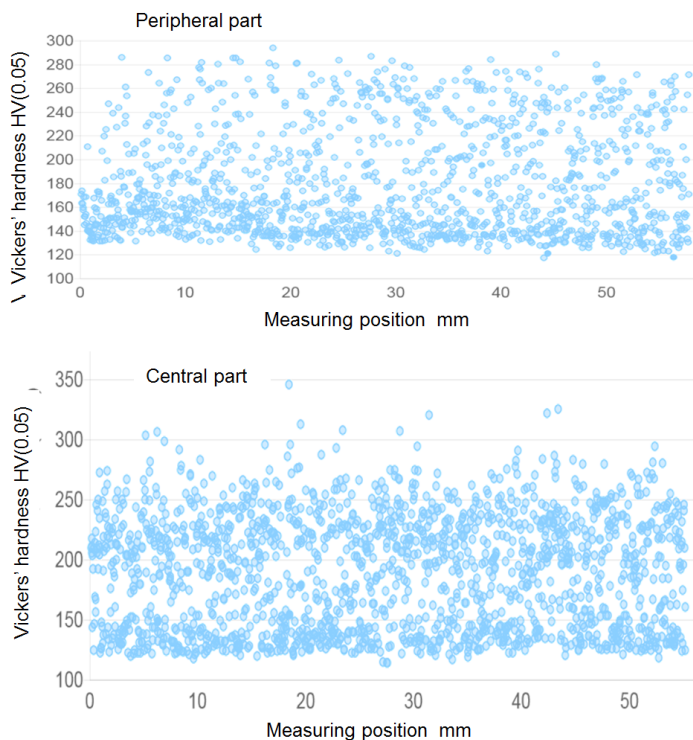


Fig.3 Difference in HV scattering of SCM420 steel bar (dia.380mm) at the peripheral and central part

A big machine part was produced from steel slab whose diameter is ca.1.35m. The material is tempered after forging. Fig.4 left shows the figure of the texture of this material and the HV scattering distribution. The texture is far from homogeneous, of dendrite like network figure and not beautiful enough. The texture of big steel material is though always somewhat heterogeneous and the state of Fig.4 left-up is considered to be a usual state. This big machine part has been worked fairly long time without any trouble. The management of the company intended to reduce production cost by changing the steel maker that delivers lower price steel. The kind of new steel has the same standardized name and the MILL specification certificate was attached to guarantee the quality. Several months after incorporation of new

machine part, it broke down. Fig.4 right shows the figure of the texture of this new material and the HV scattering distribution. The texture is irregular and of unevenly spotted pattern. From this heterogeneous figure, experienced engineer can estimate the bad quality of this steel and the measured HV scattering definitely shows that state: especially big waving form behavior of HV group suggests the abnormal metallurgical state of this steel.

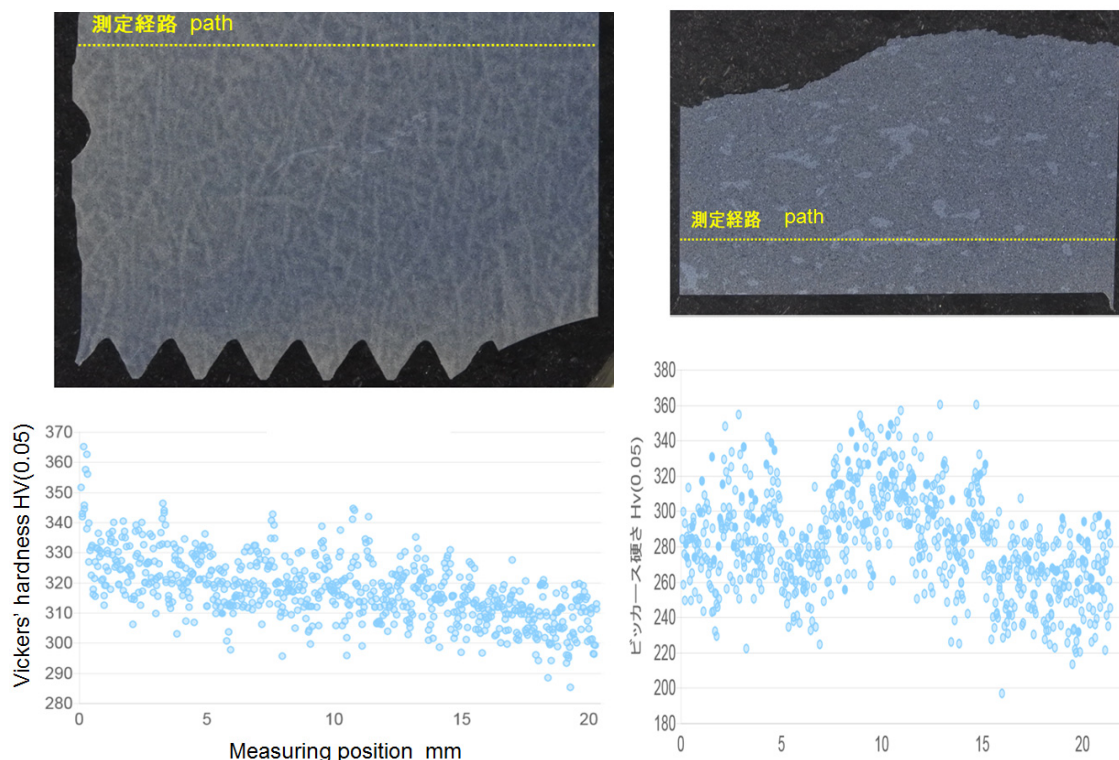


Fig.4 Texture and HV scattering of failed big machine part from forged SCM420 steel slab of dia.1380mm , OK and NG material

The SCM420 steel bar of 380mm diameter was carburized and hardened and Fig.5 shows how the core material of this steel changed. Fig.5 left shows the HV scattering of the central part of this steel bar before the heat-treatment. The HV distribution is normal and we cannot find any signal of improper steel quality. By the case carburized and quenched procedure, no carbon can reach the

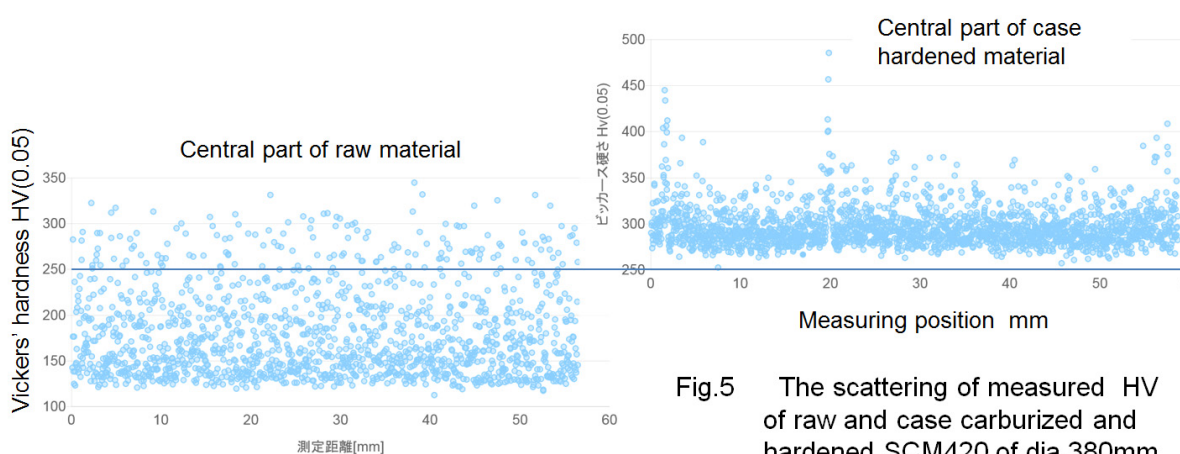


Fig.5 The scattering of measured HV of raw and case carburized and hardened SCM420 of dia.380mm

central part of this steel bar from the surface. That means the material experienced only the time-temperature change through this heat treatment. Fig.5 right shows the HV scattering after case carburizing and quenching. Some clear indication of segregation in the HV scattering is recognized: the central part of this steel bar perhaps contained uneven alloy element distribution in the raw steel condition, and with the high temperature history that this part of the material received through the heat-treatment procedure, some deposition appeared to make segregation.

2.2 Case carburized and hardened steel

The most commonly used gear steel in Japan is SCM420. The steel bars were purchased from 3 different Japanese steel makers. All the material were delivered with MILL certificate to show that they are of OK quality. These steel bars were then carburized and quenched by the same heat treatment company after same procedure. Fig.6 shows the result of HV distribution measurement. The surface hardness and effective case depth (depth of HV550) is somewhat different by each material. More interesting is that the figure of the run of hardness curve and the state of HV scattering are considerably different to each other. This fact means, regally OK material does not mean that the metallurgical quality is the same. From our experience the difference in HV scattering shown in Fig.6 brings different fatigue durability when they are used for gears.

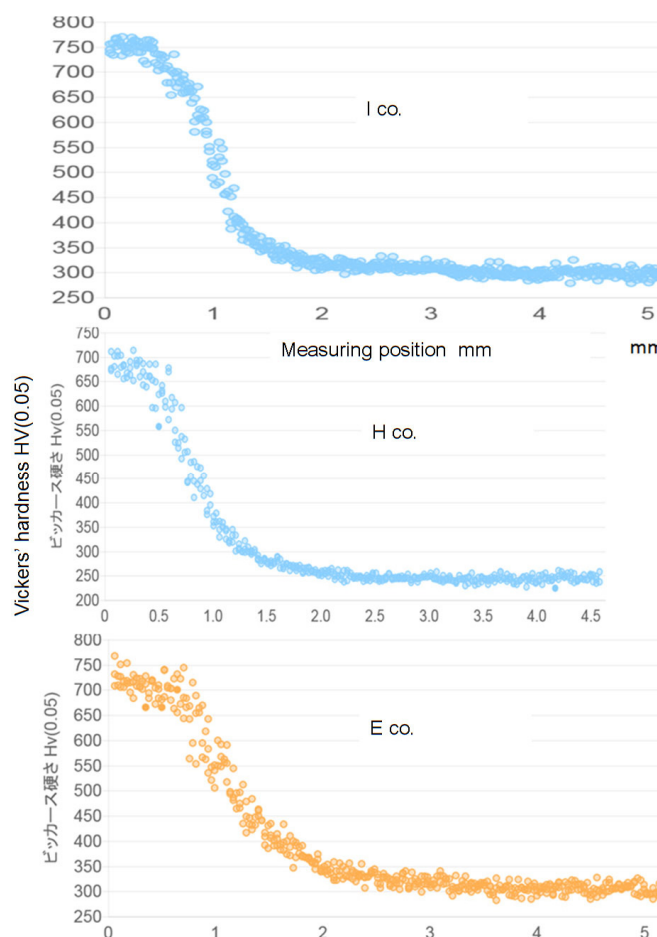


Fig.6 Difference in HV scattering, case carburized hardened SCM420 steel bar from Japanese makers

2.3 Induction hardened steel

The metallurgical property of steel is definitely decided by Continuous Cooling Transformation diagram (CCT diagram) for this steel kind. This means, the time-temperature history of each definite local material of the machine part decides the metallurgical texture of the steel at that point. It is extremely difficult at induction hardening to know the time-temperature history at each definite local point inside the machine part to be quenched. As the result, all operators at induction hardening carryout the job without knowing the real temperature history of this machine part. That means he does not know what metallurgical structure change of steel has occurred by his induction hardening. By induction hardening, skin of the processed machine part is heated, but the core of it is not. That means some part of the processed machine

part does not reach high enough temperature for phase changing of the steel and the holding time of high temperature is also not enough. To clarify this effect, carbon steel of 1mm dia. x 3mm length is in vacuum induction heated, holding definite high temperature for definite time length exactly and cooled with Helium gas as shown in the left low figure of Fig.7. When the temperature is enough high and long, carbon inside the carbon steel permeates and diffuses well to make new steel texture and the HV scattering becomes very low. On contrary, when the temperature is not high enough and short, carbon inside the steel cannot diffuse well and the HV scattering becomes very coarse.

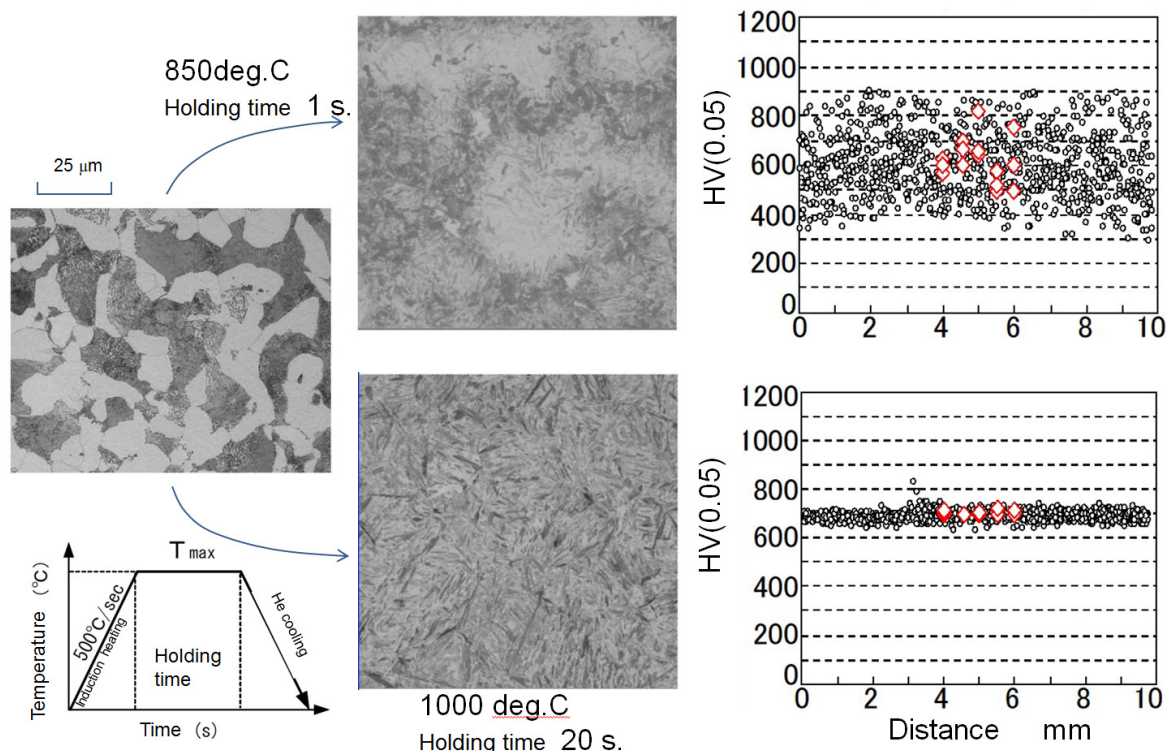


Fig.7 Texture and HV scattering of carbon steel S40C of 40% ferrite after induction hardening (The larger rectangle marks in HV are manually measured results with conventional machine.)

2.4 Internal gears

The center of a disc made from steel bar or billet is punched and bored, and that material is expanded by plastic deformation to be a ring form. This is a blank piece for internal gear and the inner peripheral of the ring blank piece corresponds to the center part of the original steel disk. It is usual that the central part of bar steel is of poor metallurgical state, where segregation and voids often exist and this part becomes inner-peripheral of gear blank piece for internal gears, where highly stressed gear teeth will be cut. That means the teeth material for internal gears is usually not homogeneous. It is common, that the texture of tooth material for internal gear is irregular and of unevenly spot-or-striped pattern. Fig.8 shows the HV distribution of an gas nitrided internal gear from SCM420H. This gear has experienced failure in field usage. The run of group of HV scattering is somewhat strange: The HV group shows two stage art at several position of the distribution. How such strange 2 stage art of HV scattering band comes? It is though well explained by corresponding the slant positioning of stripe texture of the tooth material to the HV

measuring direction. It is a matter of course, that the material durability of this internal gear teeth is considerably lower than that of external gears, when the same material of SCM420H is used.

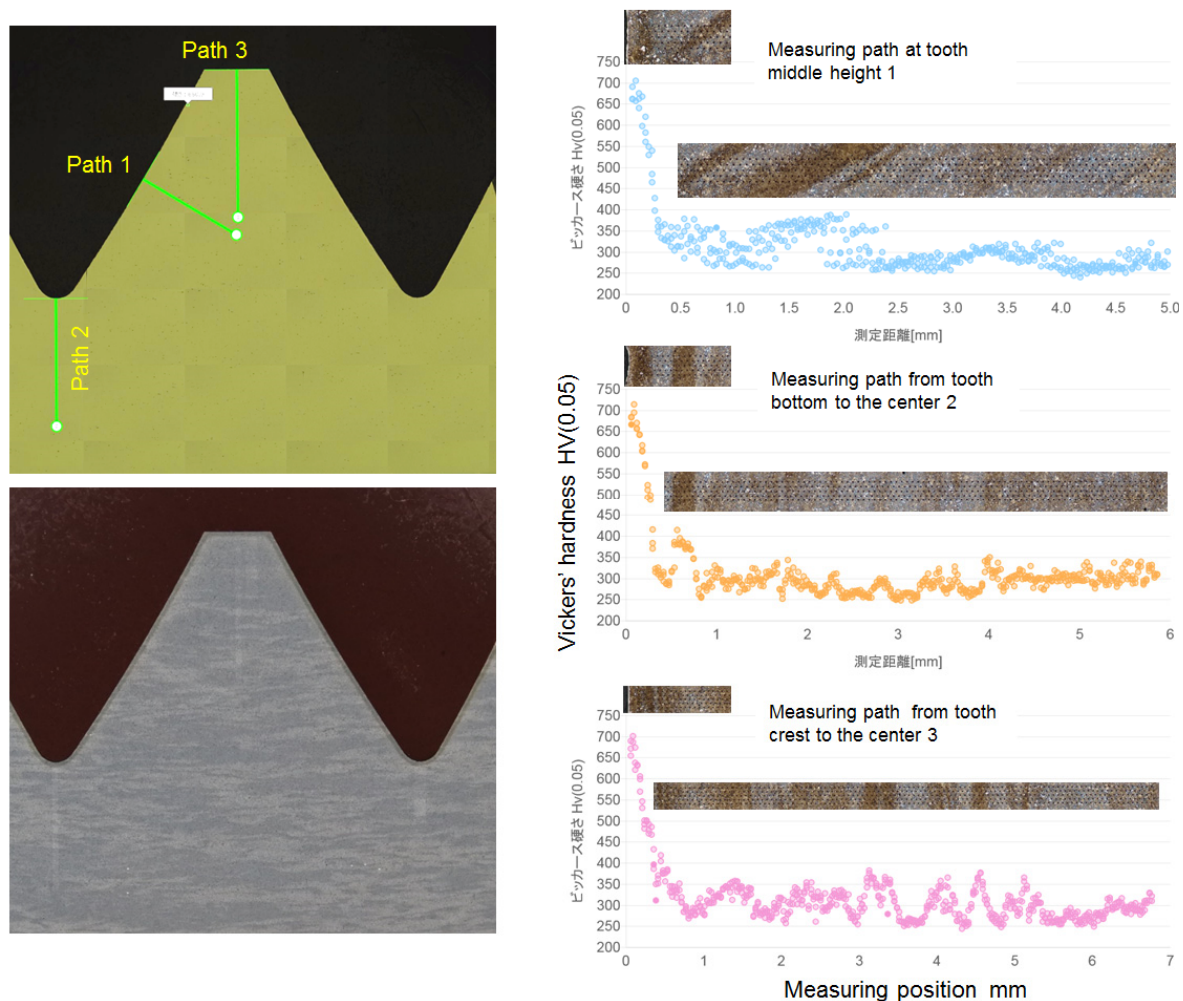


Fig.8 The texture and scattering of measured HV of nitrided internal gear from SCM420H

3. HV accuracy needed

To investigate the HV scattering for steel quality prediction, it is needed to use rather light loading for making HV indentation. From my experience, diagonal length of HV indentation (refer to diameter of indentation) between 10 μm to 18 μm gives good insight for gear steel quality investigation. It is though not easy to measure thousands of HV indentation diameters of this size correctly with contact free method and in good speed.

Fig.10 shows how a reading accuracy of HV indentation diameter changes the measured value of HV. This is a calculated result of differentiation of Vickers' hardness definition formula for a case that the reading accuracy of indentation diameter is 0.1 μm . The abscissa is loading value and the ordinate is resulted uncertainty of measured HV value. The parameter is the HV hardness of the target surface. When we incorporate HV15 for the tolerance of measured HV values and the hardness of the target surface to be inspected be of HV800, we cannot use lighter load than 50grf at

the measurement. To raise the accuracy of HV value measured, we have to use heavier loading, but it means the diameter of the indentation becomes larger to lose the detailed information that the HV scattering will bring.

In this examination, I use HV15 for the industrial tolerable value for deciding HV. Fig.11 shows a back ground for this choice. An artefact for the reference HV was

made from almost pure steel and prepared well to have almost flat HV value. Though this HV artefact has industrially a definite single hardness value, the micro hardness differs at each ferrite crystal constituting this artefact. At HV measurement of this artefact, following items were checked: 3D indentation form, projected figure that is usually incorporate at HV measurement and

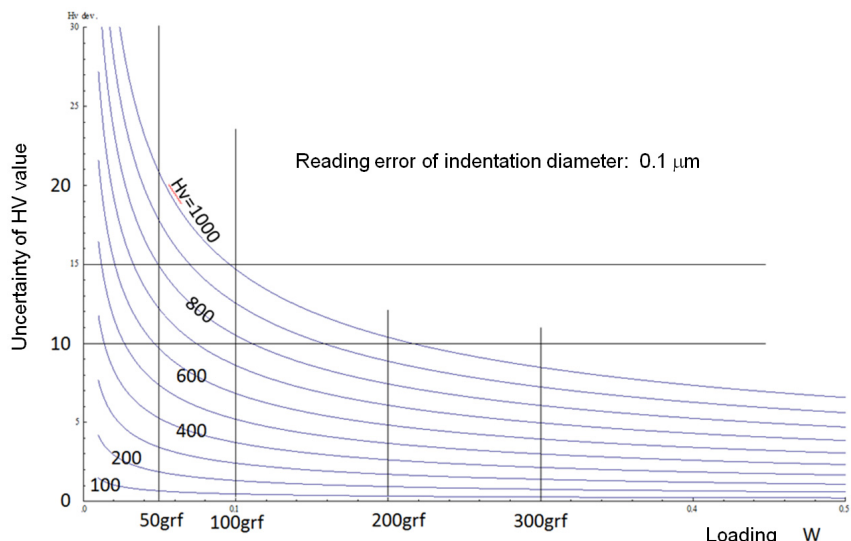


Fig.10 Accuracy needed for deciding the HV indentation diameter

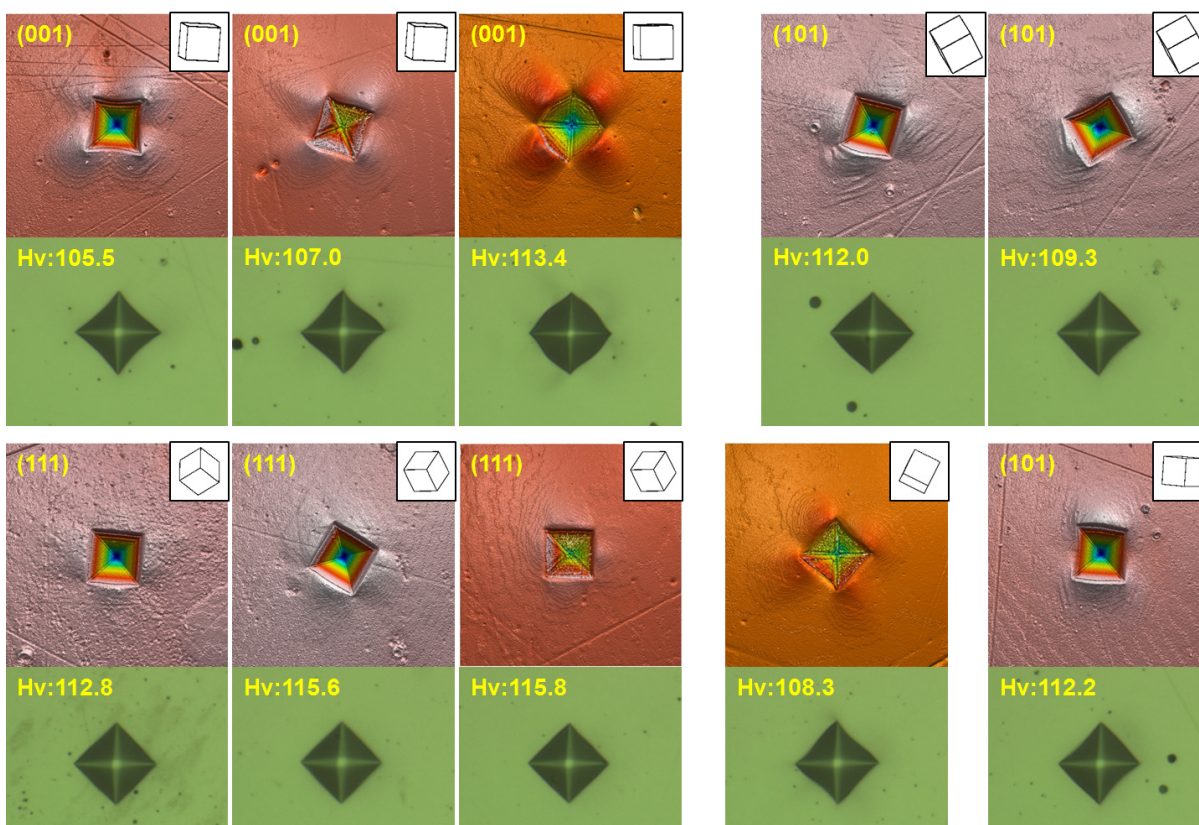


Fig.11 The texture and scattering of measured HV of nitrided internal gear from SCM420H

the EBSD crystal orientation. Fig.11 shows some results of that investigation. It is clearly observed, that the 3D form and HV value are different for each crystal orientation. In this figure the maximum deviation of HV is about HV10, but wide range of investigation shows the maximum difference becomes about HV20. This fact means, that the hardness difference less than HV20 should not be incorporated in the sense of industrial steel hardness.

4. JGMA Standard for HV measurement of gear steel

The usefulness of HV scattering examination for detecting gear steel quality problems makes JGMA set the Standard for HV measurement. Fig.12 shows the contents of the draft. The most important thing, whether the HV scattering investigation is effective or not, is the test specimen

preparation, i.e. from what part of the gear steel, the test specimen should be taken. In the standard, it is defined that the specimen is taken from the part of gear steel where gear teeth will be cut. The HV scattering should be measured in raw steel condition as well as heat-treated condition, just the same heat treatment should be given to the gear material.

The measured HV values are statistically treated to bring some information concerning the steel quality. Fig.13 shows an example of middle quality SCM420 steel bar. The average and most frequent value of the

1. Introduction <Informative>
2. History to the standardization <Informative>
3. Preparation of TP <normative>
 - 3-1. Steel bar of small diameter for gear blank
 - 3-2. Steel bar of medium diameter
 - 3-3. Steel billet of large diameter
 - 3-4. Gears after heat treatment
4. Preparation of measuring surface <normative>
5. Measurement of multi HV <normative>
6. Post processing of measured HV data <normative>
 - 6-1. Steel material of quasi-equal hardness
 - 6-2. Case hardened steel material
7. Maintenance of measuring machine <Informative>
8. Report of the HV measurement <normative>
9. How to use this standard <Informative>
10. Report of gear steel quality evaluation <Informative>
11. Remarks <Informative>

Fig.12 Contents of the JGMA standard for the evaluation of Vickers hardness measurement for gear steel

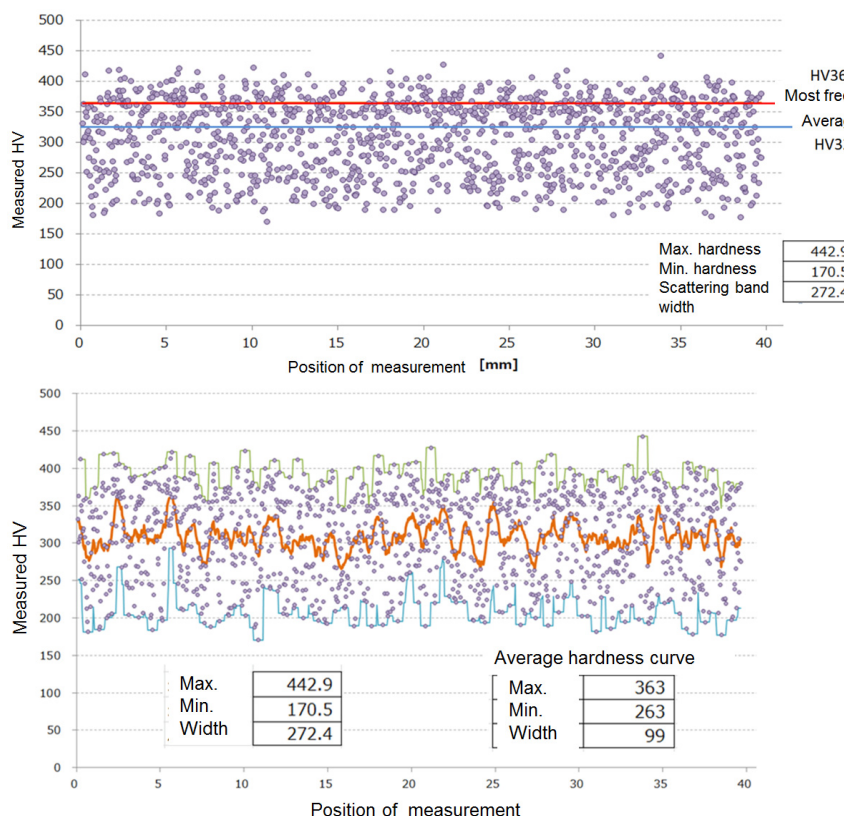


Fig.13 HV distribution and scattering of big gear blank of SCM420

measured data are indicated together with the HV distribution. Setting a window, in this case to 0.6mm, HV average curve and its maximum and minimum value and amplitude of the curve are shown. The fitted Normal Distribution and its standard deviation etc. are also shown. As an option, same treatment is given to the measured HV values via deciding the most frequent hardness value in the window is performed to have the curve for the most frequent hardness. The curve for differentiation of e.g. the HV average curve can also be given.

Gears are usually used after proper heat treatment. When this evaluation method is adapted to the same heat treated gear steel as that of the actual target gears, more proper or useful information can be obtained. Fig.14 shows an example of that for a case of case carburized and quenched gear steel. From such figure, the effective case depth can be decided more accurately and the degree of HV scattering around the hardness curve can be well recognized. Such scattering of HV distribution, especially the existence of abnormal points out of the main HV group, have some relation to the shortage of fatigue strength of gear tooth.

Fig.15 shows a typical example of the HV scattering around the HV average curve for case carburized and quenched gear steel. Near the surface, abnormal texture induced by this heat treatment makes the HV scattering somewhat strong. In the region of hardness gradient, the scattering becomes narrow and in the core, the scattering becomes wider again due to formation of pearlite. Such HV scattering around the HV average curve can be treated as same as the quasi-flat hardness material, such as the case of Fig.13.

Fig.16 shows a typical case of induction hardening. Such figure of scattering of HV distribution, the existence of abnormal points have some relation not only to the quality of steel quality, but also the

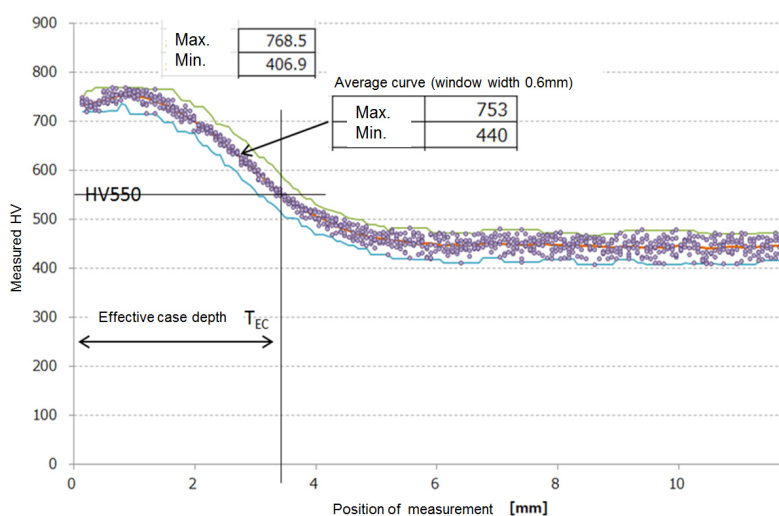


Fig.14 HV distribution and scattering of carburized hardened case

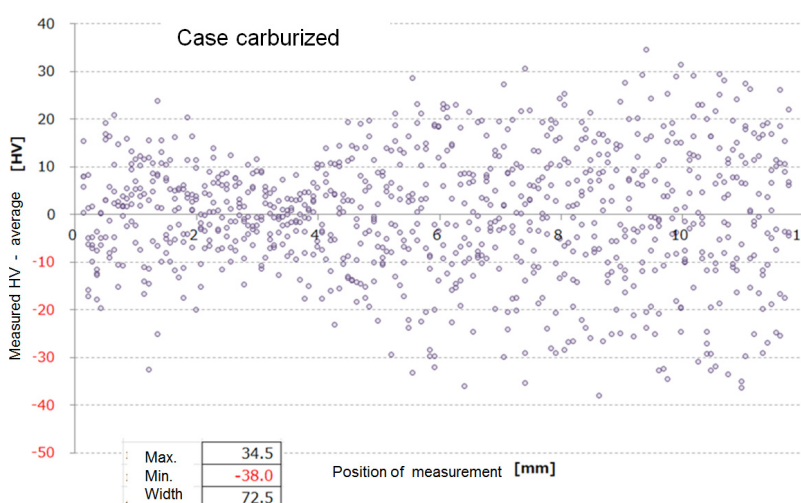


Fig.15 Scattering of HV values around their average curve

quality of induction hardening procedure. As I explained in Fig.7, induction hardened machine part could have some weak points that some local place inside the part does not heated enough and the holding time of high temperature is not sufficient for the phase change of steel texture. The acceptance of induction hardened machine parts is usually done only by checking the hardness value. When the hardness is lower than the specified value, the product is not accepted. But when the hardness is somewhat higher than the specified value, the product is usually accepted by the customer. This habit makes operator of induction hardening always produce harder results.

The objects of induction hardening are therefore usually over heated to obtain harder skin, and where the state of texture change is usually not be considered.

Fig.17 shows the same measured results by figuring the HV scattering around the HV average curve. Near the surface, the scattering of HV is fairly small, that indicate this part of the material is heated considerably high. In the region of hardness gradient the scattering becomes awfully wide, that indicate this part of the material is not heated well and the high temperature holding time must be also not enough, i.e. short. In the core, the scattering becomes wider, but it is the state of raw material. Such HV scattering around the HV average curve can show the quality of induction hardening, material problem and those chemistry very clearly.

5. Conclusions

By adapting the new JGMA Standard for HV scattering measurement, the quality of gear steel and of heat treatment can well be estimated. It will be convenient to escape from the problem of incorporation cheaper foreign gear steels, to find cause of failure due to material and/or heat treatment problems. The Standard will be published in the beginning half of 2020.

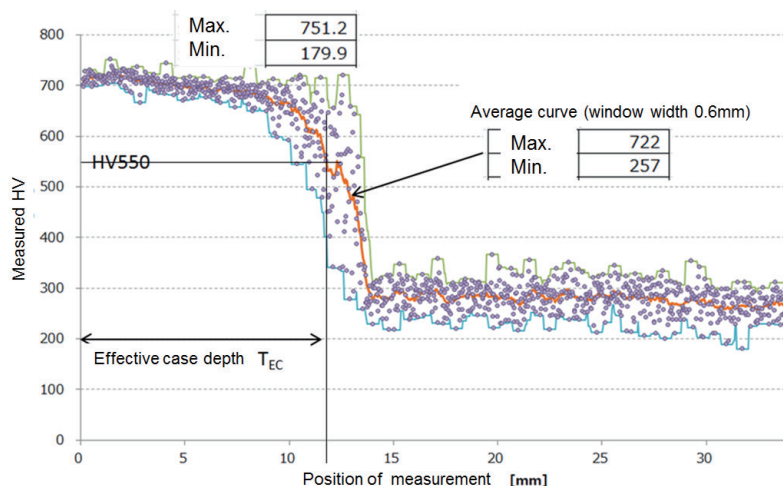


Fig.16 HV distribution and scattering of induction hardened case

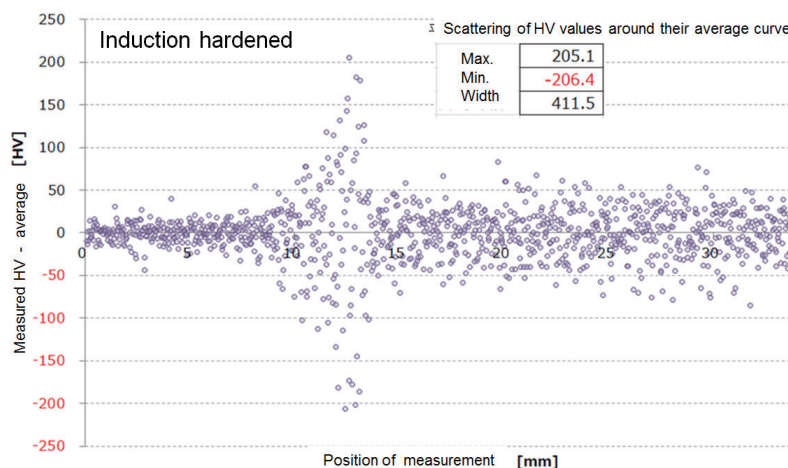


Fig.17 Scattering of HV values around their average curve

REFERENCES

- (1) Kubo,A., „Change of gear steel quality as function of globalization“, Proc.Int'l Conf.on Gears, Sept. 2017, Garching, Germany
- (2) Kubo, A., et al.,„Evaluation of gear steel by very local fracture test“, Proc.Int'l Gear Conf., Aug.27-29, 2018, Lyon Villeurbanne, France

特別研究員による成果

銀被覆ビスマス系および実用超電導線材の 機械的および電磁気的特性の評価

特別研究員 長村光造

受託先名：住友電気工業株式会社

1. 目的

銀被覆ビスマス系線材および実用超電導線材とそれらの応用製品の改良のため応用製品の製作および使用環境で想定される様々な条件における機械特性および電磁気的特性を評価する。

2. 成果

本年度は〔1〕BSCCOテープ製造時における不整の発生と対策に関する提案を行った。〔2〕高強度・高電気伝導度・高臨界電流密度線材の開発を目的にして i) HT-SS80 および NX100 の臨界電流測定を行った。下図に示すように臨界電流は引張応力がある一定以上になると急減減少する。これは超電導フィラメントの破断によるものであるが、この $R(95\%I_c)$ 応力は線材ごとに異なる値を示した。ii) 部分破断の原因解析を行った。iii) YRA3646-NX30 および YMA3759-NX30 について引張試験を行い、その結果の解析を行った。iv) SUS-WC、NiCr-WC、銅合金-WC シース用テープの特性評価を行った。〔3〕 $R(95\%I_c)$ 応力と 0.2%耐力との相関について考察を行った。本成果は低温工学学会で発表(1)するとともに、国際標準化に関連して“引張応力下における臨界電流測定方法”の RRT の素案として提案した。

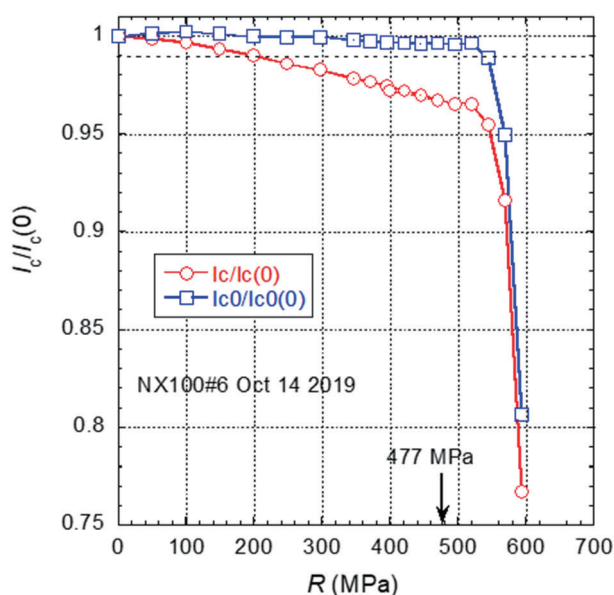


図1 規格化された臨界電流の引張応力(R)依存性

12T以上の高磁界で用いられている超電導体は脆性的で歪に敏感である。それは構成成分の熱膨張係数が各々異なることによるもので大きなローレンツ力に影響する。より高磁場での超電導磁石を開発するためには臨界電流 J_c の歪 ε 依存性をよく理解することが必要である。本報告(2)では高温超電導体(HTS) (Rare-Earth)Ba₂Cu₃O_{7- δ} (REBCO) coated conductorと低温超電導体(LTS)、Nb₃Snについて $J_c(\varepsilon)$ の歪に関する放物線的な依存性を考察した。多結晶体である低温超電導線の臨界電流の放物線的歪依存性は単結晶における真性歪依存性の角度平均によって与えられるものとした。一般に臨界電流の値は歪ゼロのとき最大となる。しかし本研究の解析によれば磁場および温度に依存してweakly-emergentな挙動を示す。本研究ではこの挙動を詳しく解析した。

工業化されているコーテッドコンダクターテープは、テープ長さ方向に<100>あるいは<110>配向した双晶(Rare-Earth) Ba₂Cu₃O_{7- δ} である。本報告(3)においてはこの2種類の異なる双晶構造が臨界電流に与える影響を臨界電流の歪依存性と放射光での回折実験により調べた。<100>配向したテープでは臨界電流の歪依存性は放物線的になる。AドメインとBドメインがテープ軸方向に交互に配向することに原因する。一方<110>配向したテープではこのような放物線的な歪依存性は見られなかった。

3. 成果の公表

- (1)長村 光造、町屋 修太郎、加藤 武志、南野 忠彦、長部 吾郎、山出 哲；“BSCCO-2223テープの臨界電流の歪依存性と機械特性の相関” 低温工学 3a-A02 (2020)
- (2)P.O. Branch, Y. Tsui, K. Osamura and D. P. Hampshire；“Weakly-Emergent Strain-Dependent Properties of High Field Superconductors” Nature Scientific Reports 9:13998 (2019)
- (3)Kozo Osamura, Shutaro Machiya, Kentaro Kajiwara, Takuro Kawasaki, Stefanus Harjo, Yifei Zhang, Shinji Fujita, Yasuhiro Iijima, and Damian P. Hampshire；“Inverted-parabolic and weak strain dependencies on the critical current in practical <110> and <100> oriented REBCO tapes” AIP Advances 9, 075216 (2019)

報告書作成日 令和2年6月14日

IEC 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

実用超電導線材の超電導特性測定技術および超電導線材の分類に関する国際標準の制定

2. 成果

本年度も超電導技術に関する IEC-TC90 国際および国内専門委員会のワーキンググループ WG2(臨界電流測定)、WG5(引張試験)および WG13(超電導線材)のグループリーダーとして国際標準作成の取りまとめを行った。

本年度の検討項目の一つは MgB_2 線材の室温引張試験方法に関する国際ラウンドテストの準備作業を行った。現在市販されている MgB_2 線材は Columbus、Hyper Tech、Sam Dong および Hitachi の 4 社のものであり、各社と交渉し標準化のために試料の提供を受けた。これらの試料を用いたラウンドテストにはドイツ、イタリア、中国、韓国から各 1 研究機関、日本からは 4 研究機関が参加することになった。そのラウンドテストの前段階として本研究所において試験方法の具体的な検証を行った。図 1 は SamDong 線材の応力-歪曲線を示すが、これよりヤング率、0.2%耐力を求める方法を示した。国際的に各機関が同じ試験方法で機械特性を求めたときの、それらのバラつきを検討してより精度の高い詳細な試験方法を提案する。

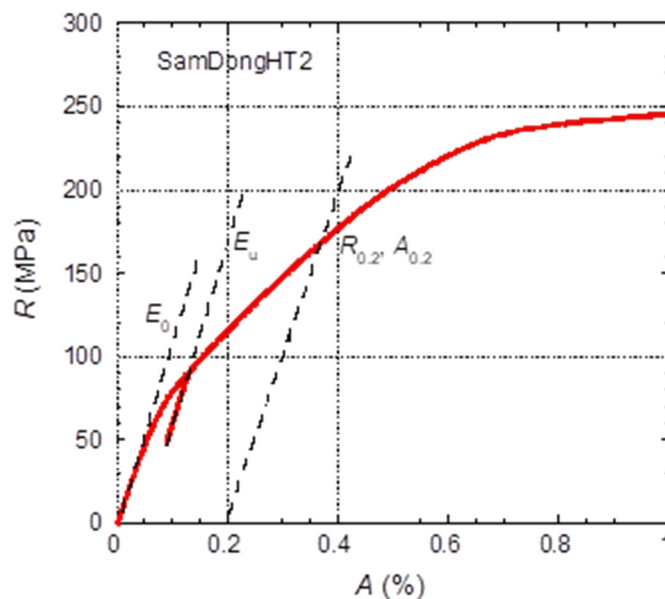


図1 MgB_2 線材の室温における応力-歪曲線

3. 成果の公表

(1)Kozo Osamura, Hidetoshi Oguro, Shutaro Machiya, Yoshimitsu Hishinuma and Hiroyasu Taniguchi ; “Statistical Analysis of Mechanical Property of Composite MgB₂ Superconducting Wires” 低温工学 9P-08 (2019)

報告書作成日 令和 2 年 6 月 14 日

保磁力の配向度依存性と角度依存性の相関による 磁化反転プロセスの解明 ～Ga 添加 Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力メカニズム～

特別研究員 松浦 裕 長村光造

科学研究費助成事業 学術研究助成基金助成金 基盤研究 (C)

1. 目的

これまで Nd-(Dy)-Fe-B 焼結磁石およびフェライト磁石の保磁力の配向度依存性(ALDC)の關係から保磁力の角度依存性(ANDC)との關係について調べてきた。これまでの考察から Nd-(Dy)-Fe-B 焼結磁石およびフェライト磁石では配向度の向上と共に保磁力が減少することが明らかになっており、これら磁石の磁化反転は磁化の一斉回転で進むのではなく、磁壁移動により進むことが強く示唆されている。

また、これら磁石の ALDC と ANDC はお互い相関があり、ALDC と ANDC は保磁力メカニズムの別側面であることが推定される。

我々は保磁力の ALDC から得られた結果を用い、磁化反転領域角度(θ_1)を用い ANDC を求めると、これら磁石の低角度側の ANDC の傾向を説明できることを述べてきた。

一方、Nd-(Dy)-Fe-B 磁石の ANDC は磁界との角度が大きくなるにつれ保磁力が大きくなるがフェライト磁石では磁界との角度が 0° から大きくなると一旦減少し、 40° 以上で増加することから、磁化の一斉回転で予想されるような ANDC を示す。

しかし、 θ_1 から求めたフェライト磁石の ANDC は低角度側の保磁力減少を説明できることから、フェライト磁石の保磁力も磁壁移動で説明できるように思われる。

これらの事実を更に積み重ねるために Nd-(Dy)-Fe-B 焼結磁石においてフェライト磁石と同じ ANDC を示すものを探すことを目的として Ga 添加 Nd-Fe-B 焼結磁石の ALDC および ANDC を調査し、フェライト磁石と比較した。

2. 成果

図 1 および 2 は Ga 添加 Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力の ALDC と ANDC から得られた、 θ_1 を示している。図から分かるようにこの磁石においても保磁力は等方性磁石から減少していることが分かった。ただし、その減少量は Nd-(Dy)-Fe-B 焼結磁石より少なくフェライト磁石に近いことを示した。

θ_1 の計算は全ての結晶が独立に磁壁移動により磁化反転するとして計算している。また磁石の θ_1 は ALDC から得られたデータを用い求めている。配向度(α)=0.945 の磁石の θ_1 の値は 41.7° でフェライト磁石の 40.7° より大きくなっていることが分かった。これから予想される保磁力の角度依存性はフェライト磁石と同じく 0° から低下する ANDC を示し、フェライト磁石より少し大きく低下することが予想される。

図 3 は Ga 添加 Nd-Fe-B 焼結磁石とフェライト磁石の ANDC を示している。 θ_1 から予想されるように Ga 添加磁石の ANDC はフェライト磁石と似た傾向を示し、フェライト磁石より大きい

減少を示すことが分かった。これらの事実は Nd-Fe-B 焼結磁石とフェライト磁石は同じ保磁力メカニズムであることを強く示唆すると共に、保磁力は磁壁移動で決定されることを示している。

ところで、これまでの Spring-8 における X 線 MCD の結果から Nd-Fe-B 焼結磁石およびフェライト磁石では保磁力より小さな磁界領域（減磁曲線の直線部分）において、結晶粒の離散的な磁化反転が起こり、保磁力近傍では離散的に反転が起こった結晶の周辺の結晶の磁化反転が磁壁移動で起こることが分かった。これらの実験事実から、 θ_1 は保磁力より低い磁界側で見られる離散的に磁化反転する結晶の数と関係しているものと推定している。

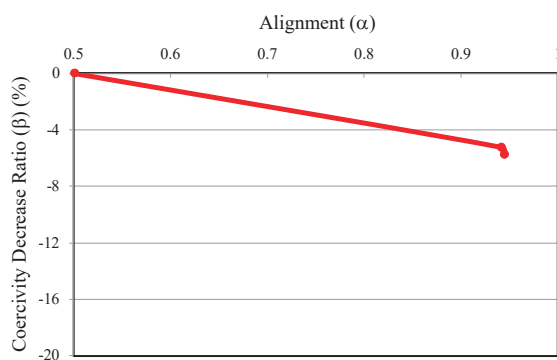


図 1 $\text{Nd}_{14.79}\text{Ga}_{0.57}\text{Co}_{1.11}\text{B}_{5.24}\text{Fe}_{\text{bal}}$ の保磁力の配向度依存性

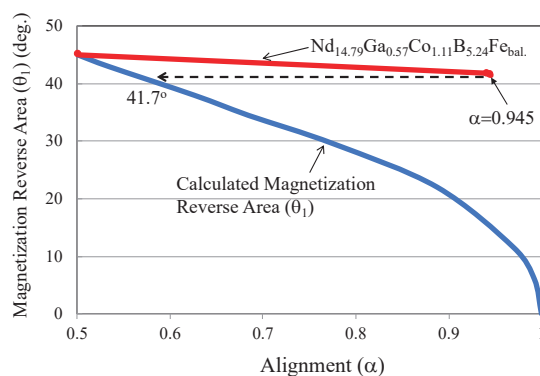


図 2 $\text{Nd}_{14.79}\text{Ga}_{0.57}\text{Co}_{1.11}\text{B}_{5.24}\text{Fe}_{\text{bal}}$ の磁化反転領域角度

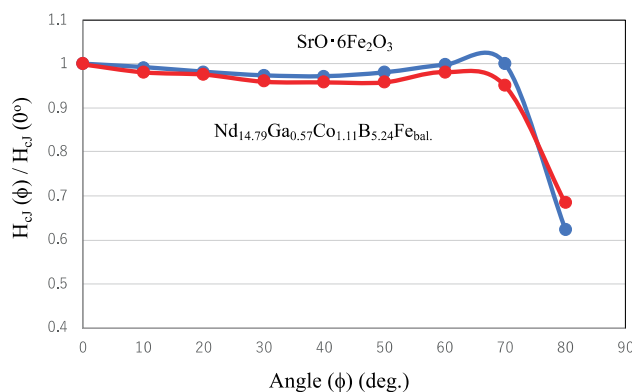


図 3 Ga 添加 Nd-Fe-B 焼結磁石およびフェライト磁石の保磁力角度依存性

3. 成果の公表

(1)Yutaka Matsuura, Tetsuya Nakamura, Keisuke Ishigami, Kentaro Kajiwara, Kazushi Sumitani, Ryuji Tamura, Masahiro Nagae, and Kozo Osamura ; “Coercivity Mechanism of Ga-doped Nd-Fe-B Sintered Magnets”IEEE Transaction on Magnetism, Vol. 55, No. 12, 5100606 (2019)

報告書作成日 令和 2 年 5 月 7 日

永久磁石の微細組織とその局所磁気特性の解析による 高保磁力化の指針構築

～軟 X 線磁気円二色性偏光 (XMCD) を用いた (SmCe)₂(Co,Fe,Co,Cu,Zr)₁₇ 磁石の磁気反転挙動観察～

特別研究員 松浦 裕

受託先名：国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)

共同研究先：公益財団法人高輝度光科学研究センター(SPring8/JASRI)
学校法人東京理科大学

1. 目的

SmCo 磁石は 1966 年に米国で SmCo₅ 化合物が大きな異方性磁界を持つ事が見出されてから、急速に開発が進んだ。日本においては 1970 年代の初めから SmCo₅ 化合物より大きな磁化を持つ R₂(CoFeCu)₁₇ 系磁石(R : Sm,Ce 等の希土類)で開発が進み 1970 年代後半には Zr を入れた R₂(CoFeCuZr)₁₇ 系磁石において 240kJ/m³(30MGOe)に到達した。この系の磁石は現在なお磁石特性の改良が進められている。

この磁石は高温で均一な R(CoFeCu)₇ 相が低温の熱処理で R₂(Fe,Co)₁₇ 相と R(Co,Cu)₅ に分解し、数十 μm の大きさの結晶内部に数十 nm の R₂(Fe,Co)₁₇ 相を数 nm の R(Co,Cu)₅ が取り囲んだセル構造を作る事が知られている。

この R₂(Fe,Co)₁₇ 相と R(Co,Cu)₅ 相の磁壁エネルギーの差により磁壁が境界でピン止めされていると推定されており、典型的なピンニング磁石と考えられている。磁化過程では磁界の大きさが磁壁のピンニング力を超えると、磁化が急速に進むと考えられてきた。

今回、信越化学から提供して頂いた Sm_{0.67}Ce_{0.33}(Co_{0.73}Fe_{0.2}Cu_{0.05}Zr_{0.02})_{7.2} を用い Spring-8 の軟 X 線磁気円二色性偏光(X 線 MCD)法を用い、最大 5T の磁界を掛け磁化した後、逆方向に磁界を掛け磁化反転過程を調べた。

2. 成果

図 1 に+5T、-0.4T、-0.5T、-1.1T、-5T の磁界をかけた時の磁化反転の状況を示している。ここで赤色は正方向に磁化されていることを示しており、青色は磁化が反転したことを示している。

図から分かるように+5T で磁性相は赤く着磁されていることがわかる。磁化反転は-0.4T の磁界でまず粒界で起こり、磁化反転領域は 0.5T の磁界で粒界および希土類酸化物相から粒内に侵入することが分かった。(図 1(C)の四角で取り囲んだ領域。)

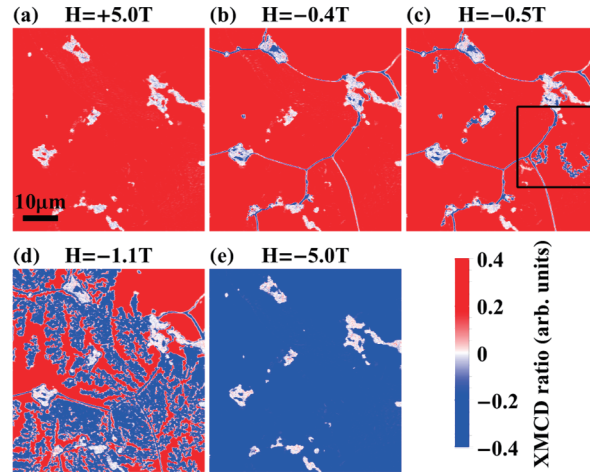


図 1. X 線 MCD 法を使った+5T, -0.4T, -0.5T, -1.1T および-5T の磁界における磁区像

これまで R_2Co_{17} 型磁石の磁化反転は粒内のセル組織の研究が行われており、粒界については、ほとんど調べられていなかった。今回 X 線 MCD 法により、これまで言われていた粒内のセル組織の構造だけで磁化反転が決まっているのではなく、その起点が粒界および粒内の希土類酸化物で生じ、保磁力近傍の磁化が急激に変化する磁界領域で磁化反転は磁壁移動により粒内に広がるということが明らかとなった。

粒界組成を EDX のラインスキャンにより調査したところ、粒界では Cu 濃度の低下と Fe 濃度が高くなっていることが認められている。しかし、EDX では分解能が粒界幅より大きく、粒界の詳細な組成は明らかになっていない。今後粒界の組成および構造について更なる調査を進め、磁気特性の改善の方法についても探っていく必要がある。

3. 成果の公表

(1)丸山 涼、上里 幸平、杉山 将崇、中村 哲也、梶原 堅太郎、隅谷 和嗣、小谷 佳範、石上 啓介、松浦 裕、田村 隆治；“軟 X 線 MCD 顕微鏡を用いた Sm_2Co_{17} 磁石の磁区構造解析” 日本金属学会秋季大会(2019)

報告書作成日 令和 2 年 5 月 7 日

共同研究員による成果

安全情報を伝えるメディアの研究（その7）

共同研究員 尾池和夫
京都造形芸術大学学長

受託先名：東電設計株式会社

1. 目的

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

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

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

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

2. 成果

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

- 1) 2013年度では、情報を生産する立場の研究者、情報を伝えるメディアの研究者、情報を伝えるメディアの実践者たちで研究会を組織し、さまざまな観点から議論を続けた。
- 2) 2014年度においては、南海トラフの巨大地震に関する予測の諸研究成果の分析を関係の研究者の議論によって行った。その成果を取り入れて、南海トラフの次の巨大地震発生までの地球史の整理を行い、将来の研究のための下地とすることとした。研究会での議論の結果、もっとも重要な結論は、1人ひとりが命を守るための行動をとることが、災害を軽減するために必要な考え

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

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

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

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

5) 2017年度においては、国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）のデータの利用に関して将来の分析の方針を各分野の専門家で議論し、尾池がその座長を務めて議論の結果をJAMSTECに提言し、また岩波書店の「科学」に論説を掲載する準備を行った。

6) 2018年度では、岩波書店の「科学」2018年5月および6月号において、将来の地震予測におけるビックデータの有用性について詳しく論じた。関西サイエンスフォーラムのシンポジウムにおいて得た結論から政府に提出した『地震火山庁の設置と地震火山予報士の制度化』の理解を深めるために漫画による解説を作成した。さらに日本の地震活動をVRによって立体的に観察できるようにするための準備を進め、気象庁の地震データから深さ5kmごとの地震分布図を作成し、アニメーション作成チームとの議論を進めた。

7) 2019年度ではこの研究の最終年度として、過去6年間の研究成果をまとめる年度とした。そのため、全体を振り返りつつ研究成果を残る形にまとめたいと考えた。年度末に研究会を実施する予定であったが、年度末に発生した諸般の事情で開催できなかった。

いくつかの実施計画の経過を以下に述べて報告に変えることとする。

－ 1. 21世紀前半の地震情報の展開を描くアニメーションの制作

すでに完成している漫画をもとにアニメーションを作成する企画を進めた。アニメーションの簡単な試作品をもとに研究会において議論する予定で、自己資金により、来年度継続して実施することになっている。

－ 2. ヴァーチャルリアリティによる日本列島地下構造の映像化

地震分布の4次元構造を視覚的に見せる映像を作成するため、気象庁のデータから深さ5kmごとの地震分布図を作成した。そのデータを映像化するためのソフトの開発途上であるが、京都造形芸術大学キャラクターデザイン学科でそれを担当し、継続して進める。

－ 3. 中国語での翻訳出版

漫画『あっ！ 地球が・・・漫画による宇宙の始まりから近未来の破局噴火まで』（2016年度出版）を、中国漫画学会会長の陶冶氏の発案により、中国語に翻訳し出版することが決定した。現在、すでに第1次翻訳作業を終了し、中国の若者向けに若干の調整をする段階となっている。2020年内の出版を目指している。

－ 4. 静岡県での活動

静岡県立大学附属グローバル地域センターの研究課題として「地震予知研究」を充実させるために、鴨川仁准教授を2019年度に採用し、同センターの楠城一嘉准教授、東海大学の長尾年恭教授と私を加え、研究グループを構成した。これにより、静岡県民に向かって地震情報を提供する仕組みと内容を検討する体制ができた。

漫画の効用を具体的に示す試みとして、静岡新聞より漫画と静岡県立大学での研究成果のエッセイとを組み合わせで連載することを企画し、現在その連載が行われている。新聞社が大きく取り上げてくれたのは、このようなメディアの効果を、当研究の成果として実証してきたことによる一つの具体的な成果であると考えられる。

－ 5. 研究の今後の展開

一連の研究によって得られた成果をもとに、実際に地域の住民に地震活動の状況を広報し、安全なことを安全と知ってもらおう仕組みを実用化したいと考えている。その中の1つの試みとして、防災先進県である静岡県において、地震予知研究会を設立し、そこから静岡県の地下の状況を広報する試みを開始したいと考えている。

具体的には静岡県立大学附属グローバル地域センターに地震予知研究部門を置き、若手の優秀な研究者を配置して、ビッグデータの分析を行いつつ情報を提供する仕組みとして、地震予知研究グループの活動を継続し、実践的に発展させる。

3. 成果の公表

- (1)尾池和夫；“伝わるということ” 京都新聞「天眼」(2019)
- (2)尾池和夫；“放射性廃棄物の処分場” 京都新聞「天眼」(2020)
- (3)尾池和夫；“大学の危機管理とは何か” 京都新聞「天眼」(2020)
- (4)尾池和夫；“日本ジオパークの一〇年” 学士会報 (2020)
- (5)尾池和夫；“静岡の大地” 静岡新聞「静岡県立大発『まんが しずおかのDNA』(1)」(2019)

報告書作成日 令和2年3月27日

メガソーラー用インバータにおける 制御アルゴリズム開発

共同研究員 太田快人¹ 平田研二²

¹ 京都大学大学院情報学研究科教授

² 富山大学大学院理工学研究部教授

受託先名：株式会社ダイヘン

1. 目的

太陽光発電による電力を系統連系するインバータの制御アルゴリズム、電力需要群に対する仮想発電所の制御アルゴリズムを新たに開発し検証する。複数のインバータや電力需要群が協調して制御目標を達成することを目的とする。

2. 成果

配電系統ならびにメガソーラーにおいて電力逆潮が発生したとしても電圧変動を許容範囲内に抑える分散協調制御方法を研究している。さらにこの方法を拡張し、電力需要群に対する消費電力を分散協調制御する仮想発電所に対する制御方法を考察している。これらの制御問題に対して価格提示分散アルゴリズムを提案し、シミュレーションならびに模擬電源装置による実験によって有効性を確認した。

3. 成果の公表

(1) Hikaru AKUTSU, Kenji HIRATA, Akihiro OHORI, Nobuyuki HATTORI and Yoshito OHTA ; “Decentralized Power Curtailment Control using Real-time Pricing Strategy for PV Generation Plants with Storage and its Experimental Verification” The 2nd IEEE Conference on Control Technology and Applications, Denmark, 436-443 (2018)

(2) 藤澤 雄大、平田 研二 ; “実時間価格提示方策を利用した離散値出力型機器を含む電力需要群の分散型運用方策” 第6回 制御部門マルチシンポジウム(2019)

(3) 藤澤 雄大、平田 研二 ; “価格提示方策を利用した電力機器群の分散型需要制御とチャタリングの発生に関する考察” 第61回 自動制御連合講演会(2018)

報告書作成日 令和2年4月10日

大規模分散電源による電力システムの安定化

共同研究員 舟木 剛
大阪大学大学院工学研究科教授

受託先名：株式会社ダイヘン

1. 目的

大規模の分散電源による上位系統が停止した場合における下位系統に電力を供給するオフグリッド状態での電力システムの安定運転方法を確立する。本年度はオフグリッド状態での電力システムの安定性が維持可能であるか検証するための配電線系統のミニモデルを構築する。

2. 成果

オフグリッドにおいて、大規模分散電源による電力の安定供給について検討するため、高圧配電系統の模擬系統を構築する。ここでは、一般送配電事業者で用いる線路のパラメータ値を用いて単位法に基づき模擬系統のインピーダンス等を求めて使用する。オフグリッドシステムとして図1に示す構成の模擬系統を用いる。模擬系統は三相電圧形インバータ、ローパスフィルタ(LC)、連系用リアクトル、模擬高圧配電系統、抵抗負荷から構成されている。配電系統の亘長は1.5kmとした。構築する模擬系統および大規模分散電源のインバータモデルの定格値は表1のようになる。50V、250VAの三相電圧形インバータは、2.5kHzのスイッチング周波数でPWM制御し50Vの出力実効値電圧を得ている。インバータモデルのスイッチング素子にはN-MOSFET(IRFB4227PbF)を用いた。平滑用フィルムコンデンサには40 μ Fを用いて直流側に現れる高調波を除去している。交流側の高調波除去にはローパスフィルタを用いた。出力される基本波成分以外の全ての搬送波周波数のサイドバンドは高調波である。60Hzの基本波周波数、2.5kHzのスイッチング周波数に対して主たる高調波は1900Hzから3100Hzに分布しており、それより高い周波数のスペクトルは基本波のスペクトルに比べて十分小さいと考えられる。このため1500Hz以下の遮断周波数を持つローパスフィルタを用いることで三相インバータの線間電圧は、高調波成分が除去されて基本波成分だけ残ると考えられる。従って模擬系統ではインバータに750Hzの遮断周波数を持つLCローパスフィルタを適用した。ただし十分な減衰効果を得るため二段構成のローパスフィルタの構造を採用した。

1.5kmに相当する模擬高圧配電系統を介して、平衡三相負荷抵抗($R_U=R_V=R_W=30\Omega$)に分散電源から電力を供給する条件での実験で得た受電端での瞬時電圧を図2(a)に示す。送電端と受電端間の電圧降下は0.3Vとなっており相電圧と線路インピーダンスより求まる値に一致していることを確認した。

また不平衡三相負荷抵抗($R_U=10\Omega$ 、 $R_V=15\Omega$ 、 $R_W=30\Omega$)に電力を供給した場合の実験より得た受電端での瞬時電圧を図2(b)に示す。線間電圧と相電流はそれぞれ $V_f(UV)=48.8V$ 、 $V_f(VW)=49.1V$ 、 $V_f(WU)=50.2V$ 、 $I_U=2.19A$ 、 $I_V=1.94A$ 、 $I_W=1.27A$ となっており、不平衡負荷に対しても安定した電力供給が可能であることを示した。

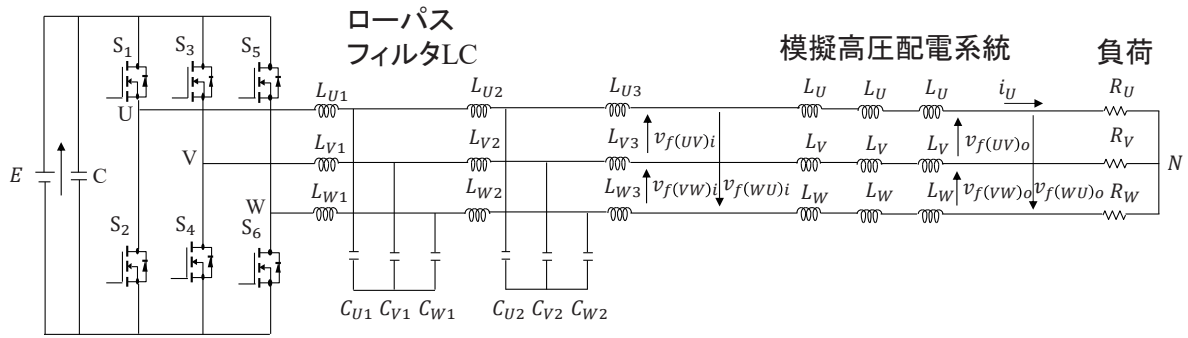


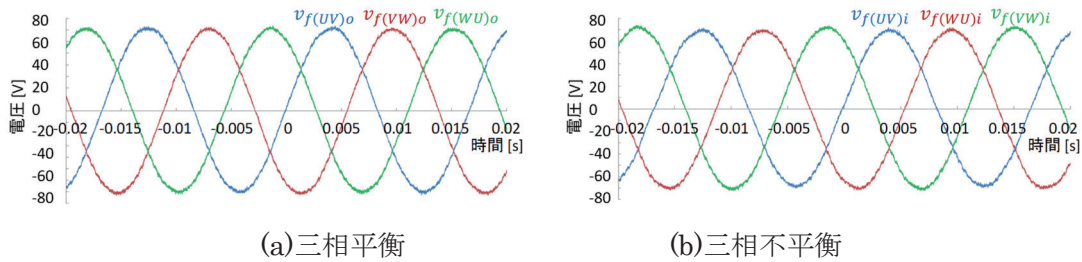
図1 検討対象の分散電源の連携されたオフグリッド配電線モデル

インバータ容量	250 VA
直流入力電圧E	102.5 V
平滑用コンデンサC	40 μ F
スイッチング周波数	2.5 kHz
出力周波数	60 Hz
変調度	0.8
デッドタイム	2 μ S

フィルタ用インダクタ L_1, L_2	1.42 mH(5.35%), 8.53 μ H(0.033%)
フィルタ用コンデンサ C_1, C_2	80 μ F(0.301%), 9.99 nF(3.77 10%)
連系用インダクタ L_3	0.254 mH (0.957%)
高圧線(L, R)(三つインダクタ)	0.8340 mH, 0.0923 Ω
負荷抵抗R	10-30 Ω

表1 モデル定格値

表2 配電線モデルパラメータ



(a)三相平衡

(b)三相不平衡

図2 配電線モデルを用いた実験結果

3. 成果の公表

(1)Y. Susuki, N. Kawamoto, Y. Ohashi, A. Ishigame, T. Funaki, D. Salvatore ; “A Modular Approach to Large-Signal Modeling of an Interconnected AC/MTDC System” IEEE ISGT-Europe(2020)

報告書作成日 令和2年3月19日

洋上風力発電所の耐雷設計構築のための 縮小モデル実験と電磁界解析 ～独立避雷鉄塔の費用便益分析手法の提案～

共同研究員 安田 陽
京都大学大学院経済学研究科特任教授

受託先名：音羽電機工業株式会社

1. 目的

近年、大規模洋上風力発電所(OWPP: Offshore Wind Power Plant)の計画が次々と公表されているが、中でも日本海沿岸は冬季雷が頻繁に発生する地域であり、これまでも陸上の風車(WT: Wind Turbine)で極めて深刻な事故が発生している。特に洋上の場合、メンテナンスや事故対応における接近可能性 (accessibility)を考慮しなければならず、陸上と同程度の雷被害であったとしても修理コストや機会コスト（発電不能期間の逸失利益）が莫大になり、発電所の経営に大きな影響を及ぼす可能性もある。このように、OWPP の場合は陸上風力以上に雷被害に対する対策を重視しなければならず、計画段階からリスクマネジメントの考え方に基づいて雷害対策を合理的に行う必要がある。

独立避雷鉄塔 (ILT: Independent Lightning Tower)は雷雲接近方向（冬季雷地域では概ね北西）に建設することにより WT への落雷確率が低減することが、陸上風車の事例から明らかになっており、複数基の WT からなる OWPP でも頻繁に落雷を受ける WT はほぼ特定できることから、多数の WT に対して 1 基ないし少数基の ILT で十分な雷保護機能があることが認められている。

OWPP の耐雷設計を考える場合、リスクマネジメント的手法に立った設計が合理的である。リスクマネジメントの手法は、被害リスクを確率的に予測することと、対策コストと被害コストを勘案した費用便益分析(CBA: Cost-Benefit Analysis)を行うことである。本研究では、ILT を建設した場合の対策コスト（建設コスト）と雷被害によって発生するコスト（補修コストおよび逸失電力量のコスト）を回避できるコスト（回避コスト）の CBA を行うための基本コンセプトを提示する。

2. 成果

<背景>

洋上に設置された WT および ILT を模擬した縮小実験の結果より、図 1 に示すような回避率が得られている。ここで回避率とは、放電実験回数から WT への放電数を引いたものを ILT への放電数で除した比率であり、回避率が高いほど ILT の避雷効果が高いことを示す指標である。図 1 の結果

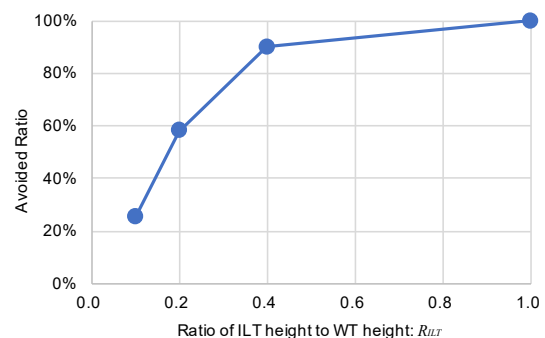


図 1 縮小モデル実験で得られた回避率

だけを見れば、ILT 高さを WT よりも小さくすればするほど回避率が下がるため、ILT 高さをできるだけ大きくとった方がよいという結論になる。しかし、ILT 高さを高くすればするほど建設費が上昇するため、ILT 設置によって事故を防ぐことにより得られる回避コスト（便益）が ILT の建設費を下回ってしまう可能性もある。したがって、事故確率を考慮した費用対効果を検討することが重要となり、CBA が必要となる。

<費用便益手法の提案>

ここでは問題を簡単化するために、ラフな仮定として、200 m の ILT を洋上に建設するための建設費が 1 億円、ある OWPP の運転期間（20 年）の間に落雷によりブレード等が破損しその修理にかかるコストと機会コスト（発電不能期間の逸失利益）の期待値が 5,000 万円であるとする。今回の試算では簡単化のため、割引率は考慮しない。

回避コストは、ILT 高さが WT 高さと同じである場合、ほぼ 100%被害が回避できるが、ILT 高さが低いと図 6 に示したような回避率を乗じた値に減額した見積もりとなる。また、ILT の建設費は ILT 高さに依存するため、

200 m 未満の高さの ILT を建設する場合、建設費が高さに線形に依存するケースをケース 1、指数関数的な関係を持つものをケース 2 と仮定する。

以上のような仮定のもと、図 6 で得られた ILT 高さ と回避率の関係も踏まえて、

1. ILT 建設費 $C = f(h_{ILT})$

2. 回避コスト $A = g(h_{ILT})$

（ILT を設置したことで回避できる修理コストと機会コストの期待値）

3. 純便益 $(= A - C)$

を ILT 高さ h_{ILT} の関数として図示すると、図 2 のようになる。ここで、関数 f は ILT 建設コスト $C = f(h_{ILT})$ 、関数 g は回避コスト $A = g(h_{ILT})$ で表される関数である。図 2 は ILT 建設コスト C が ILT 高さ h_{ILT} に対して指数関数的であると仮定した場合の例である。

<結論>

本研究では、今年度の研究では、洋上風力発電所 (OWPP) の雷害対策として独立避雷鉄塔 (ILT) を考慮し、ILT の建設コスト (ILT 高さに依存) と ILT を建設することで期待できる雷事故の回避コストを比較することで、簡単な費用便益分析(CBA)の手法を開発した。実サイトの CBA にあたっては、今回仮定した関数 f や g の特性や具体的な値は実際の OWPP の海域やサイトごとに異なり、一般にコスト情報であるため秘匿性が高い。そのため、サイトごとの条件を加味しながら実測や縮小モデル実験、数値解析により仮定の精度を高める必要がある。

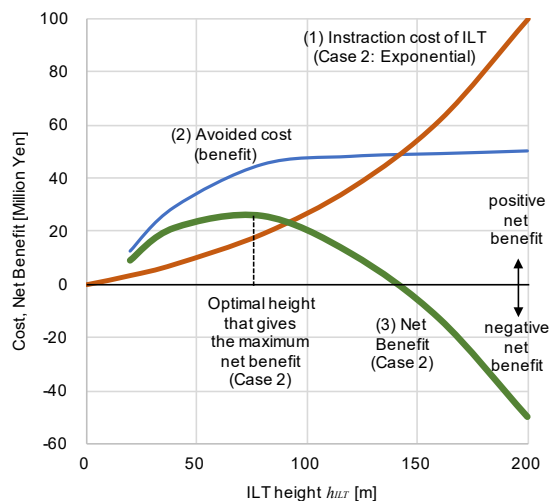


図 2 費用便益分析結果

新しいエネルギービジネスの在り方

共同研究員 安田 陽
京都大学大学院経済学研究科特任教授

受託先名：シン・エナジー株式会社

1. 目的

発送電分離と電力自由化が進んだ欧州では、現在、電力システムの需給バランスの担い手は、需給管理の最終責任を持つ送電系統運用者(TSO: Transmission System Operator)だけでなく、市場参加者にも拡大され、市場参加者は需給調整責任会社(BRP: Balance Responsible Party)を通じて各自の計画値同時同量を満足させながら市場取引を通じて需給調整に貢献できる制度設計が行われている。しかしながら、日本では BRP に関する学術論文や専門書・一般書が極めて少なく、市場参加者や電力技術者の中でも BRP の概念や役割に対する理解は十分浸透しているとは言い難い。

そこで本研究では、欧州の実際の BRP の行動や BRP が活躍できる市場設計・規制の在り方を探るため、文献調査と現地調査を行い、欧州の BRP の実態と課題を調査した。また、日本の電力市場の統計データを分析し、日本の現状と課題を指摘し、市場取引を通じて需給調整に貢献できる市場のあり方を示唆した。

2. 成果

<背景>

従来、電力系統は電力会社（旧一般電気事業者）の中央給電指令所を頂点としたヒエラルキー構造により需給調整を含む管理が行われてきたが、電力自由化および発送電分離が進むと不特定多数の市場参加者が需給調整にも貢献し、その責任が求められるようになる。欧州では、現物取引の市場であるスポット市場（前日市場）閉場後に需給調整やネットワーク制約による変更のための意思決定の場として、市場参加者が任意に取引を行い調整する時間前市場（当日市場）と、TSO が開設して最終調整を行う需給調整市場（balancing market）が開設されてきた（図1）。日本でも現在、時間前市場が開設され、需給調整市場の開設に向けた議論が進んでおり、欧州型の市場設計が踏襲されていると考えられる。

一方、欧州では「ジャーマンパラドックス」と呼ばれる現象が観測されている。これは、従来、変動性再生可能エネルギー(VRE)が増加すると予備力が増えると考えられていたが、ドイツでは2010年代後半より需給調整市場の取引電力量が少なく済んでいる傾向がみられている。これは、需給調整の主体が市場参加者の任意の取引の場である時間前市場に移ってきたことを意味している。

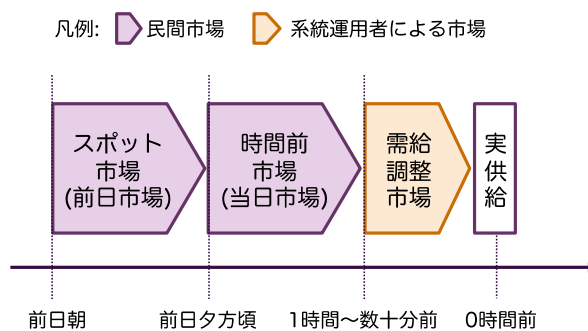


図1 欧州の電力市場の構造

欧州の市場参加者は BRP と呼ばれ、計画値同時同量が義務付けられ、計画値と実供給/実需要の差分を元にインバランス料金が設定される。この点では日本の現行制度であるバランスンググループ(BG)と同様であるが、実際に欧州の BRP がどのような行動を行うかを調査することにより、日本の将来の電力市場参加者のビジネスモデルのあり方を探ることができる。

<調査結果 1：文献調査>

公開された文献により得られる情報を精査することにより、欧州の状況を把握した。欧州の BRP は、例えばデンマークでは 47 社、ベルギーでは 87 社、オランダでは 91 社が登録されている（2020 年 3 月現在）。つまり、国内で数百社程度ある発電事業者・小売事業者に対して、少数の BRP が「アグリゲーター」として市場参加していることが伺える。この構成を図 2 に示す。一方、ドイツは BRP が 2000 社以上も登録され、他の欧州とは制度や運用が大きく異なることが明らかになった。

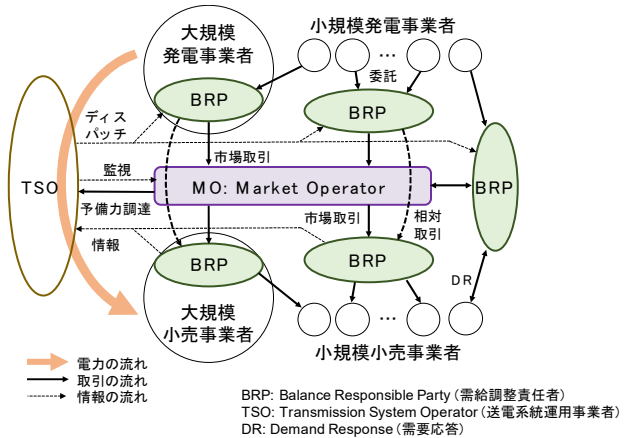


図 2 電力市場を中心とした市場参加者の構造

<調査結果 2：現地調査>

本研究では 2019 年 7～8 月にかけてドイツおよびデンマークの BRP、VPP 事業者、規制者、研究者を訪問し、ヒアリングやインタビューを重ねることにより実際の欧州の BRP の市場行動や経営方針を調査した。ドイツ国内に BRP が 2000 社以上ある理由は、ドイツ特有のシュタットベルケという地域公社の形態があるためであり、ドイツ国内に 800 社以上存在するシュタットベルケが発電・配電・小売部門それぞれで BRP として登録されているためである。また、小規模なシュタットベルケは法的には需給責任をもつものの、実際は VPP 事業者と委託契約をすることにより、VPP 事業者が契約上の需給責任を負いアグリゲーターとして市場取引や需給管理を代行している状況が浮かび上がった。図 3 にデンマークなどの欧州の一般的な国とドイツの状況の違いを示す。

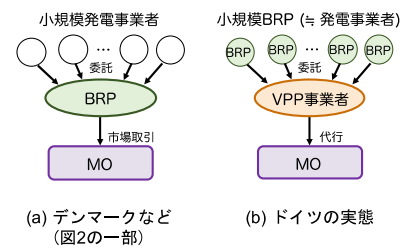


図 3 デンマークとドイツの BRP の位置付けの比較

<結論>

本研究では、市場参加者が時間前取引を通じて需給調整に貢献できその義務を負うという市場設計がなされており、市場参加者である BRP の市場行動や経営戦略について調査した。その結果、デンマークでは BRP が小規模発電事業者を束ねアグリゲーターとして市場取引や需給管理の代行業務を行い、ドイツでは VPP 事業者が小規模 BRP を束ね代行業務を行なっているという構図が明らかになった。このような欧州の状況は、今後の日本の市場設計や市場参加者のビジネスモデルに有益な示唆をもたらすものと考えられる。

大量 PV の仮想同期発電機モデル制御による 系統安定化への影響評価

共同研究員 横山明彦
東京大学大学院工学系研究科教授

受託先名：関西電力株式会社

1. 目的

本研究では、太陽光発電（Photovoltaic Generation：PV）が大量導入された電力系統において系統全体が保有する慣性力が低下されることの対策として、PV に同期発電機の動特性を持たせた仮想同期発電機（Virtual Synchronous Generator：VSG）モデル制御を用い、系統安定化を図る。主に大規模系統における VSG モデル制御を対象とし、20 分程度の日射量変動、需要変動に対して、その制御手法による系統周波数安定化への影響評価、および PV ホスティングキャパシティの評価を行う。

2. 成果

本研究では、大規模系統である電気学会西 10 機系統モデルに大量に系統に連系されつつある太陽光発電のインバータに対して VSG モデル制御を適応した場合の約 20 分の時間幅における系統周波数安定性の向上効果について検証した。以下の 2 ケース Case 1: PV 増加、容量減少ケース(従来制御、発電機容量減少)、Case 2: VSG モデル制御適用ケース-(VSG 制御、発電機容量減少)について検討した。また、各ケースにおいて EDC（経済負荷配分）による需要予測誤差 0%のケース、60%のケースをシミュレーションした。

図 1、2 に Case 1、2 の系統周波数を示す。Case 1 では PV 比率 80%以上では周波数不安定になり系統崩壊してしまっているのに対し、Case 2 では PV 比率 90%でも系統周波数は安定に保たれているのがわかる。よって、発電機容量が減少した状態でも、系統の慣性力の低下及び周波数変動を抑えることができていることがわかった。

図 3 に EDC 需要予測誤差が 60%時の VSG 制御時の系統周波数を示す。これにより、EDC 需要予測誤差があっても、VSG 制御を行うことで系統周波数を規定値内に保つことができている。周波数安定性に関してみると、PV 比率 100%近くとも VSG モデル制御によって、周波数が維持されることが確認できた。

図 4 は VSG 制御 PV に付与された電力貯蔵装置からの累積出力であり、定格出力何秒分の電力量を示す。VSG モデル実現に必要な電力貯蔵装置容量は、EDC 需要予測誤差に大きく影響を受けるため、PV ホスティングキャパシティの評価を行う上では、想定する需要予測誤差、外乱（負荷変動＋日射量変動）、電力貯蔵装置容量制約を考慮することが必要となることがわかった。

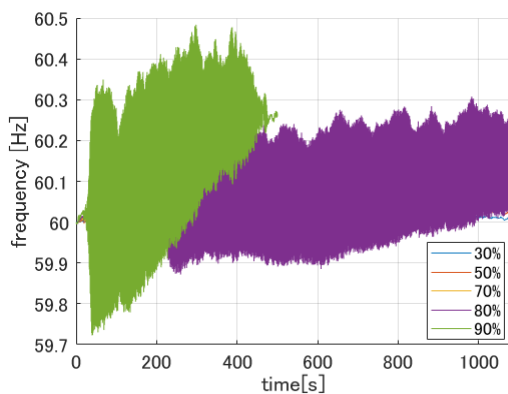


図 1. 系統周波数(Case 1 予測誤差 0%)

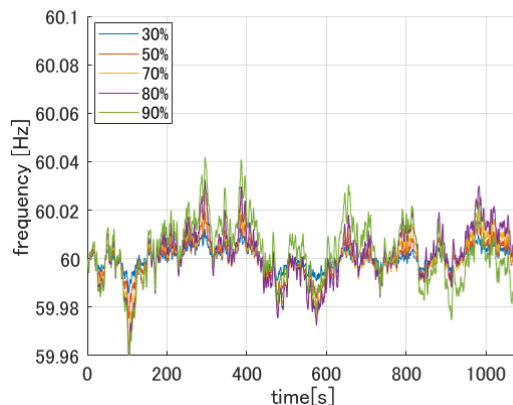


図 2. 系統周波数(Case 2 予測誤差 0%)

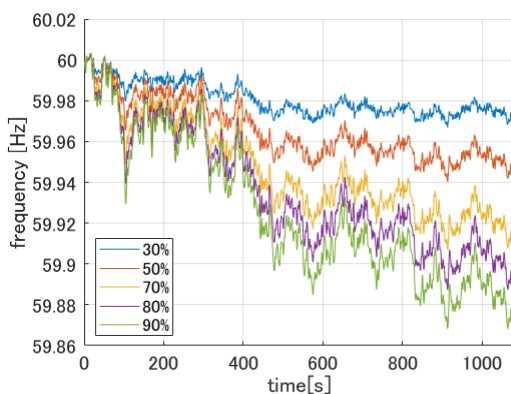


図 3. 系統周波数(Case 2 予測誤差 60%)

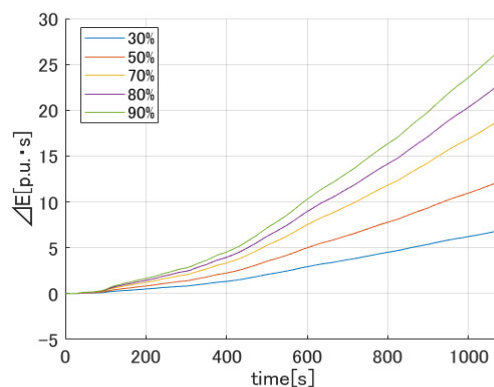


図 4. 電力貯蔵装置累積出力
(Case 2 予測誤差 60%)

3. 成果の公表

(1)山口航太、横山明彦、楠本晃大、河口健、川上智徳；“負荷変動と日射変動を考慮した仮想同期発電機モデル制御による周波数安定化効果の検討” 令和元年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会 (2019)

(2)山口航太、横山明彦、楠本晃大、河口健、沢井一智；“日射量減少時における PV の仮想同期発電機モデル制御による周波数安定化効果の検討” 令和 2 年電気学会全国大会 (2020)

報告書作成日 令和 2 年 3 月 12 日

令和2年7月印刷・発行

発行：公益財団法人応用科学研究所

〒606-8202 京都市左京区田中大堰町49

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

印刷・製本：株式会社北斗プリント社

(無断複写複製厳禁)



Research Institute for Applied Sciences