

公益財団法人  
応用科学研究所  
平成 26 年度研究成果報告書

第 22 号

**2014FY RESEARCH REPORT**

**No.22**

**2015**

**RESEARCH INSTITUTE FOR APPLIED SCIENCES**

# 目 次

## 1. 研究員による成果

高耐熱性材料の開発に関する研究	長江 正寛	1
各種金属材料（鉄鋼材料、高融点金属等）の表面処理に関する研究	長江 正寛	2
久保研究室の成果	久保 愛三	3
Influence of enveloping stressed volume and trochoidal interference on durability of gear teeth	久保 愛三	4
Crush of wear debris by tooth engagement, and tooth flank damage	久保 愛三	14
秋山研究室の成果	秋山 雅義	24
NbC 粒分散強化型工具の対熱間炭素鋼作用特性	秋山 雅義	25

## 2. 特別研究員による成果

超電導技術の国際標準化	長村 光造	35
銀被覆ビスマス系線材の機械的特性評価	長村 光造	37
超伝導臨界電流の一軸圧縮／引張歪依存性とその非対称性	長村 光造	39
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	42
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	44
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	46

## 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	51
自動車用ガスディスチャージランプ ～始動メカニズム解明～	植月 唯夫	54
安全情報を伝えるメディアの研究（その2）	尾池 和夫	57
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	太田 快人 平田 研二	59
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	61
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	62
SiC 結晶のキャリヤ寿命評価と再結合過程の解析	木本 恒暢	65

液体水素容器内の可視化システム開発	白井 康之	67
電力系統の分散制御に関する基礎研究	萩原 朋道	69
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	71
大規模分散電源による電力系統の安定化	舟木 剛	73
マイクロ波帯次世代無線LANの適用評価研究	村田 英一	75
遮断器用真空バルブの絶縁設計に関する基礎研究	山本 修	77
二次電池による需給制御に関する研究	横山 明彦	80
4. トピックス		
木村磐根副理事長 公益社団法人日本地球惑星科学連合 (JpGU) 設立 25 周年記念式典 (2014 年 5 月 1 日) においてフェローを受賞	野村 俊雄	83

# 研究員による成果



# 高耐熱性材料の開発に関する研究

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 などの元素を固溶させた合金を窒化处理や希薄 CO ガス熱処理すると、Ti や Zr の優先的窒化(内部窒化)や酸化(内部酸化)により Mo マトリックス中に合金元素の窒化物や酸化物が析出する。このような第二相粒子の析出により Mo 材料の硬度が増加し、耐摩耗性を向上させることが可能である。また、内部窒化や内部酸化で析出する微粒子は、母相 Mo の結晶粒界移動をピン止めする効果があり、例えば、再結晶温度以下から段階的に温度を上げて窒化を行う多段内部窒化によって Mo 材料の再結晶温度を 500~700℃上昇させることも可能である[1,2]。この様に、内部窒化处理や希薄 CO ガス熱処理は Mo 材料の耐摩耗性や耐熱性を向上させる表面改質法として非常に有望であるが、窒素や酸素の拡散によって析出反応が進行するため、大型部品には適用が困難と言う欠点を有している。

本年度は、酸化物粒子を微細分散させた大型の高強度・高靱性焼結 Mo 材料の作製を目指し、焼結条件などの基礎的知見を得ることを目的として検討を行った。

## 2. 成果

本年度は添加する酸化物粒子として  $ZrO_2$  を選択し、種々の方法にて添加した試料の焼結処理を行った。添加手法の違いにより、 $ZrO_2$  の凝集挙動に明確な違いが現れることが分かったが、いずれの場合も非常に微細な  $ZrO_2$  を分散させることが可能である事が明らかとなった。

## 参考文献

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

報告書作成日 平成 27 年 5 月 29 日

# 各種金属材料(鉄鋼材料、高融点金属等)の 表面処理に関する研究

第一研究室 長江正寛

## 1. 目的

圧延などの強加工を施した Mo 材料は、室温付近でも高い強度とある程度の延性を示す。しかしながら、1000°C 以上の温度域で長時間使用され再結晶化(結晶粒の粗大・等軸粒化)すると、高温での使用中に自重や付加重によって容易に変形するばかりでなく、粒界に沿って亀裂が伝播しやすくなり、延性-脆性遷移温度(DBTT)は室温付近まで上昇し、耐衝撃性が著しく低下する。このような再結晶脆化の改善方法の一つとして、我々は炭素拡散による粒界強化法に関する研究を行っている。

本研究では、グラファイトをスプレー塗布した Mo 材料の真空加熱挙動ならびに希薄 CO ガス熱処理による粒界強化についての検討を行った。

## 2. 成果

### (1) グラファイトをスプレー塗布した Mo 材料の真空加熱挙動

表面にグラファイトスプレーを塗布した Mo 材料を 1100~1500°C で真空加熱すると、表面にはいずれも薄い Mo 炭化物被膜が生成した。この状態で 3 点曲げ試験を行うと、破断強度は未処理材に比べて低下するが、破面観察の結果、全ての試料が粒内破面を呈することから(未処理材は粒界破面)、粒界そのものは炭素拡散によって強化されていることが示唆された。真空加熱時に生成した Mo 炭化物被膜を電解研磨で除去した試料について同様に 3 点曲げ試験を行ったところ、未処理材に比べて約 1.5 倍の破断強度を示すことが分かった。また、炭素拡散深さを検討した結果、グラファイト粉末に埋め込んで真空加熱した場合に比べて、スプレー塗布による方法ではより内部まで炭素が拡散していることも明らかとなった。

### (2) 希薄 CO ガス熱処理による粒界強化

Mo 材料に対して希薄 CO ガス熱処理を行うと、炭素の粒界拡散による粒界強化と、酸素の体積拡散による内部酸化が同時に進行する。従来我々は、Ar ガスで 2vol%に希釈した CO ガスを用いて様々な検討を行ってきたが、より低濃度の CO ガス中における熱処理挙動は全く不明である。本年度の検討結果では、CO 濃度を 0.5%まで低下させても粒界強化と内部酸化が可能である事を明らかにした。

報告書作成日 平成 27 年 5 月 29 日

# 久保研究室の成果

久保研究室 久保愛三

平成26年度は、下記の学会にて2件の発表がある。

INTERNATIONAL GEAR CONFERENCE

26<sup>th</sup>-28<sup>th</sup> August 2014

Espace Tête d'Or, 103 Boulevard Stalingrad, Lyon Villeurbanne, FRANCE

(1)PLENARY SESSION -3

Influence of enveloping stressed volume and trochoidal interference  
on durability of gear teeth

(2)Session 24: Durability, fatigue (II) -3

Crush of wear debris by tooth engagement, and tooth flank damage

以下、2件の論文を掲載する。

# Influence of enveloping stressed volume and trochoidal interference on durability of gear teeth

## Contents

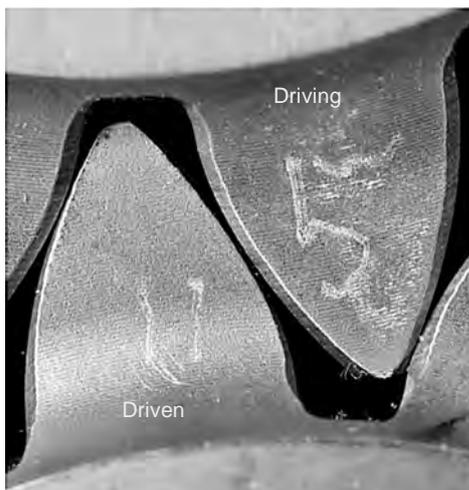
1. Local stressed volume (LSV) and Enveloping stressed volume (ESV) of material at transmitting power
2. Gear tooth flank failure as function of ESV and trochoidal interference
3. Rag wear and tooth failure as the result of positive feed back system of surface failure development



KBGT (Kubo's Gear Technologies)  
General manager of the Research Institute for  
Applied Sciences, Kyoto 606-8202 Japan

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

## In case of IAE gear & lubricant tester



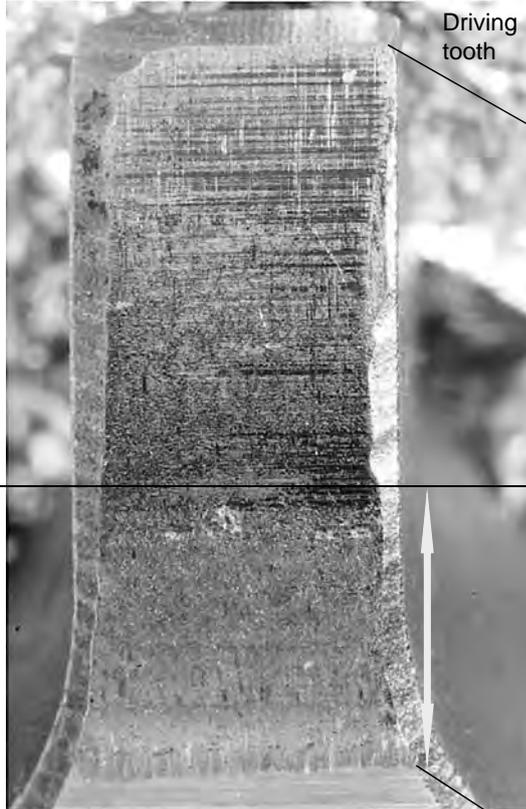
The long addendum engages with rather short dedendum.

That means, small amount of tooth flank material on dedendum carries same power that large amount of tooth flank material on addendum carries.

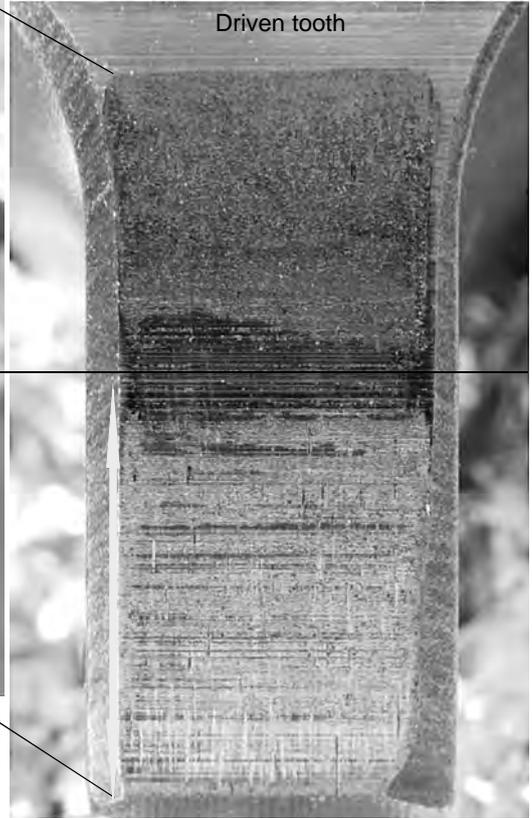
As the result, damage of dedendum is far severer than that of addendum, though the contact stress on contacting dedendum and addendum is same.

*Very primitive thought !*

Mating  
tooth flanks

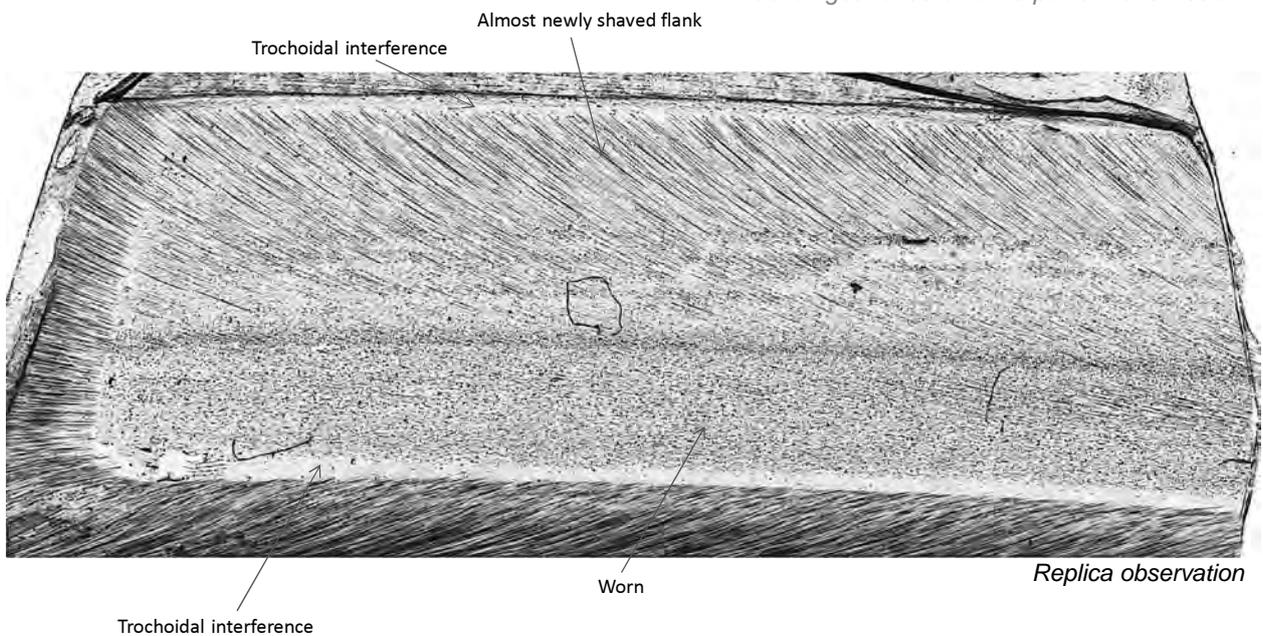


No damage on addendum,  
severer damage on dedendum.



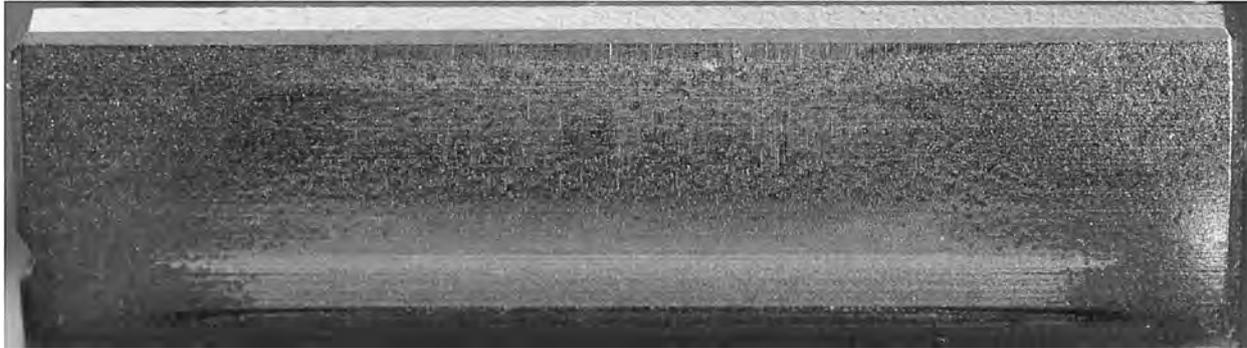
The contact stress on dedendum and addendum is  
same, but damage of dedendum is far severer than that  
of addendum .

*Traction gear of automotive power transmission*



Save the region of trochoidal interference, dedendum is considerably worn (normal wear),  
but addendum is almost fresh.

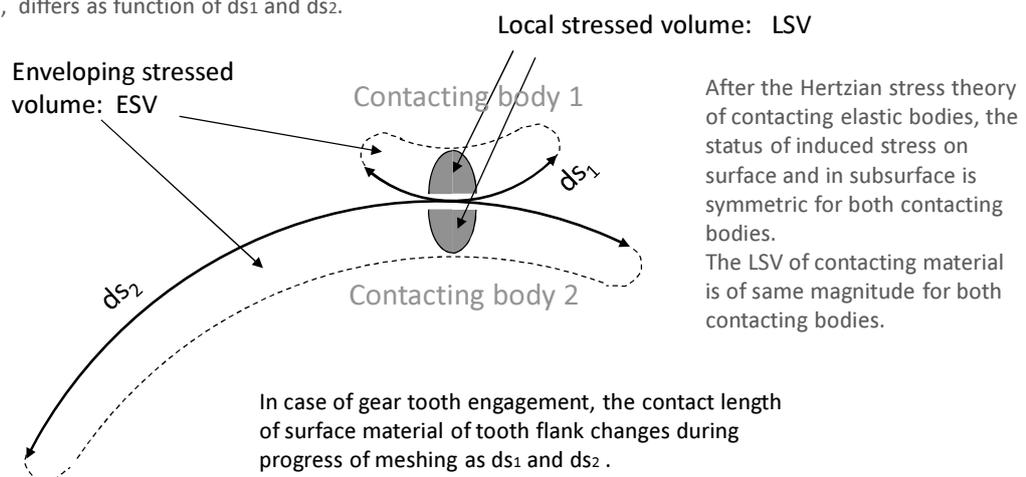
The tooth flank is not yet damaged, but wear state of addendum and of dedendum looks considerably different.



Planet gear of land construction machinery

ESV is the volume of envelope drawn by LSV during the rolling & sliding movement of contacting bodies that transmits power in unit time length.  
The ESV of contacting material on both contacting bodies, e.g. tooth flanks, differs as function of  $ds_1$  and  $ds_2$ .

Volume of material that is stressed during transmitting power by rolling and sliding contact-surfaces



At common testing method for material strength, e.g. tensile strength test, bending strength test etc., there is no sense to distinguish LSV and ESV. Because they are usually of the same volume.

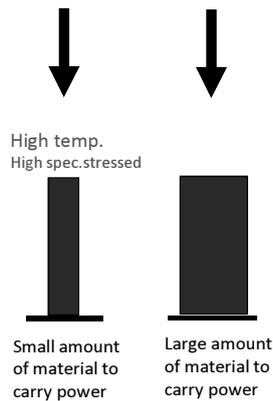
But when we consider the surface durability of gear tooth flank, we have to treat surface material under rolling & sliding contact. In this case, the LSV and ESV is quite different, when the contacting point is far from the pitch point.

*Very primitive thought !*

Same loading  
Same heat input

Actually the surface temperature of dedendum, especially near base circle becomes considerably higher than the temperature of mating addendum surface.

Amount of material that carry transmitting power



*Does this general feeling of experience valid to treat material durability under rolling & sliding contact? , though it is perhaps not correctly corresponding.*

When we adapt Coulomb's law of wear for the case of rolling & sliding contact- bodies, we have a relation that the difference of ESV is corresponding to the difference in wear amount. Perhaps though this results does not explain the real world of failure involving material fatigue.

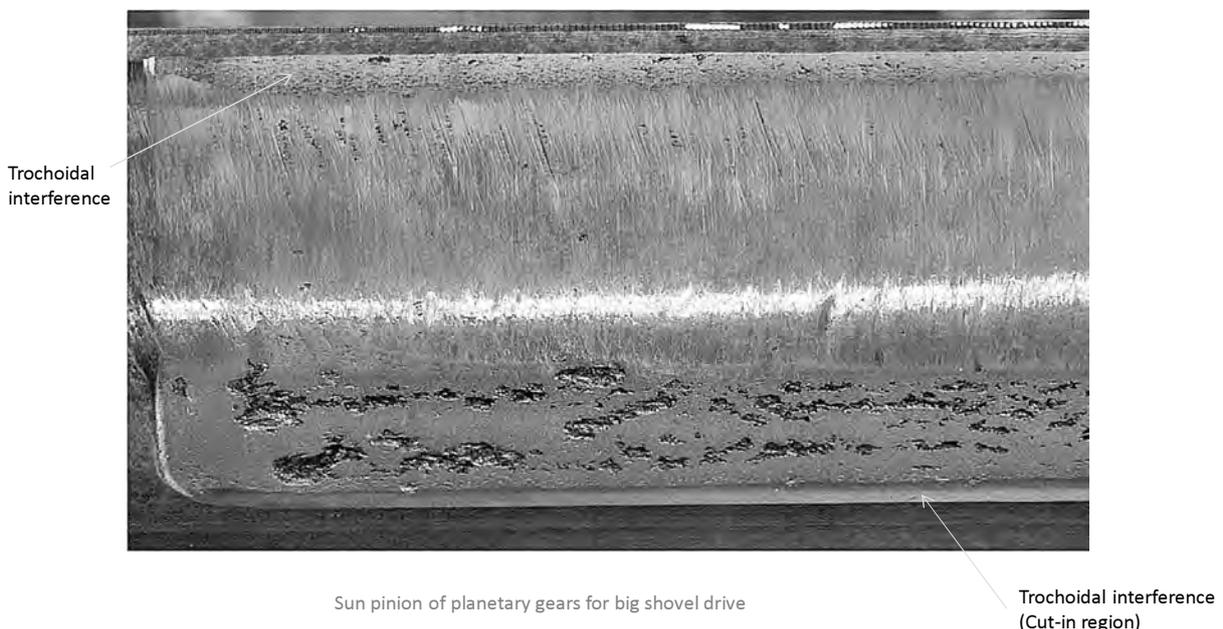
*When the amount of material is different to carry same power and load, we know empirically, that the material of smaller stressed volume has to suffer larger damage.*

When we adapt the theory of fatigue of material for this case, there appears no influence of the difference in ESV on the durability of contacting surfaces.

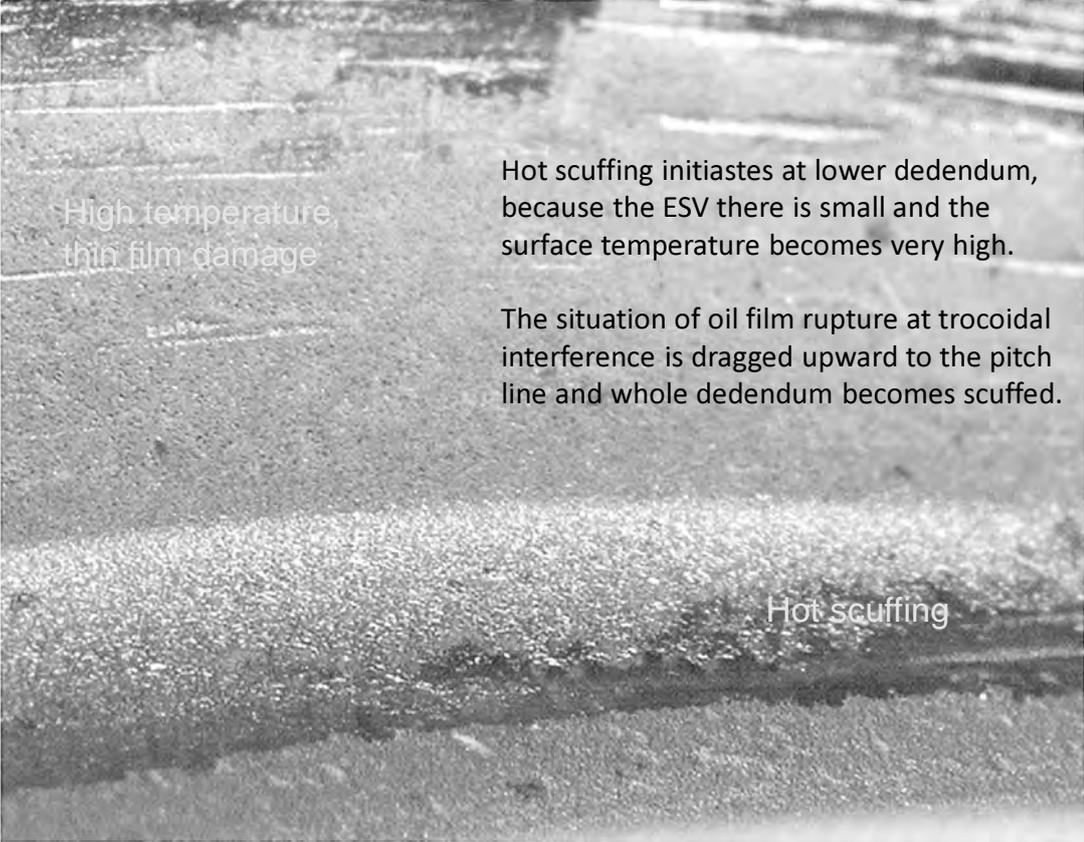
*This is perhaps our common experience during using tools in human history.*

Historically, the different state of pitting on addendum tooth flank and on dedendum tooth flank and the difference of their damage development have been often so explained, that the state of oil trapped inside crack of pitting is different on addendum and on dedendum as function of rolling and sliding direction.

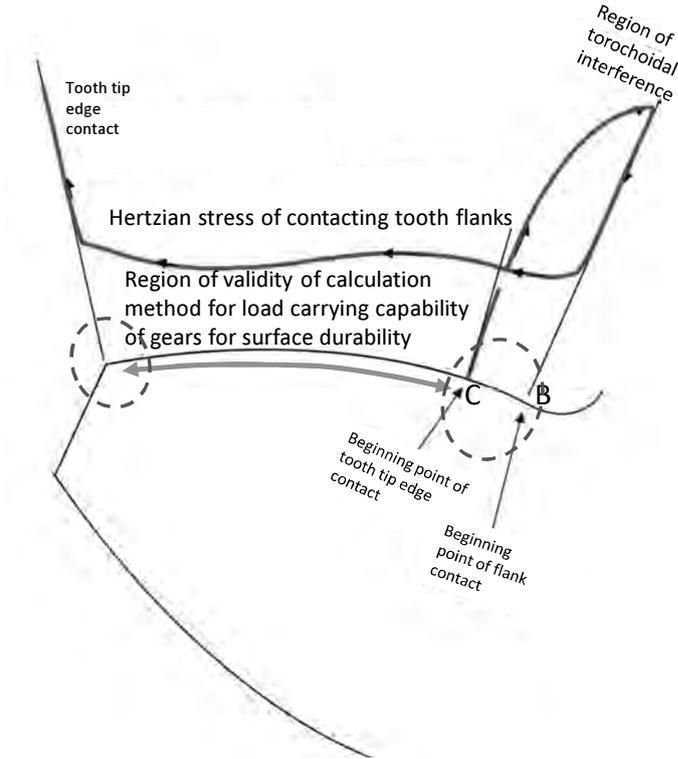
The difference of actual surface damage on addendum and on dedendum is though too large to explain it by such oil trapping hypotheses.



# High temperature damage



Skematic state of contact stress including the period of trochoidal interference

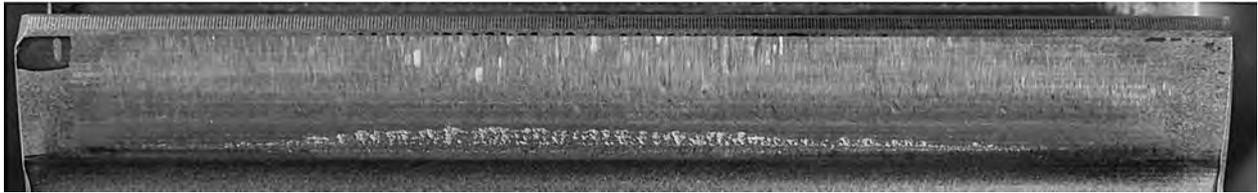


Most of gear failure initiates on this part of tooth flank.

Because of trochoidal interference, contact of tooth tip edge begins at point C. The edge contact moves from point C to point B, at which inv.to.inv. tooth flank contact begins.

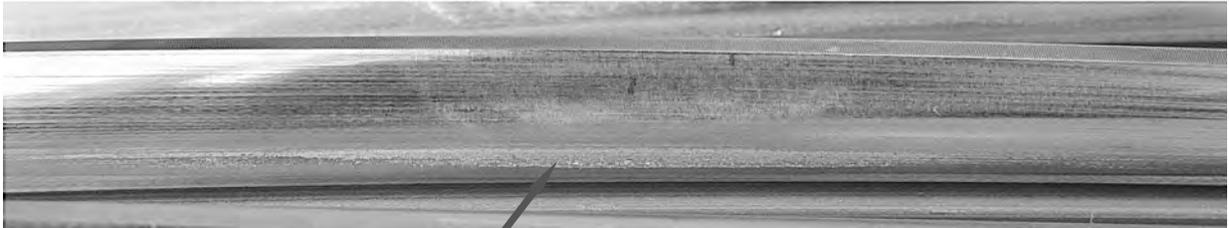
At tooth tip edge and at dedendum inside trochoidal interference zone, far higher contact stress and thermal state occurs than the value predicted for inv.to.inv. contact.

The trigger of tooth flank failure exists predominantly in such zone.

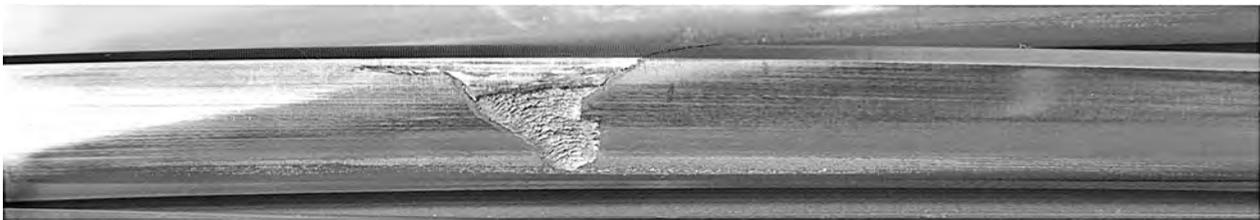


Highly loaded spur gears for land construction vehicle drive

Tooth with lead form correction of crowning suffices usually strong damage from trochoidal interference at the middle of tooth width.

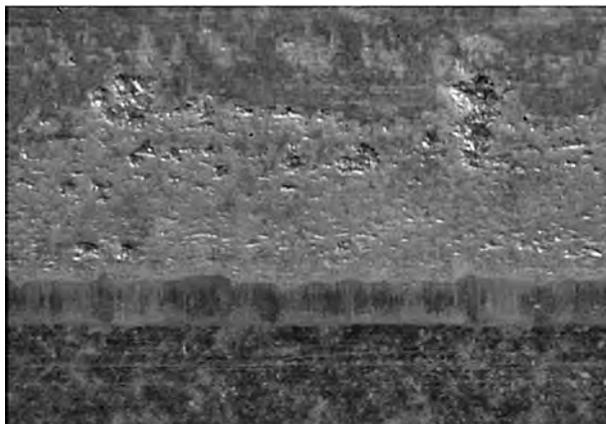
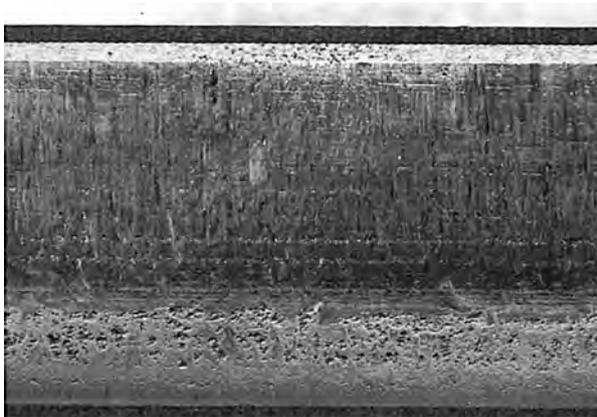


Note the depth of trochoidal interference corresponding to the form of lead form modification of crowning

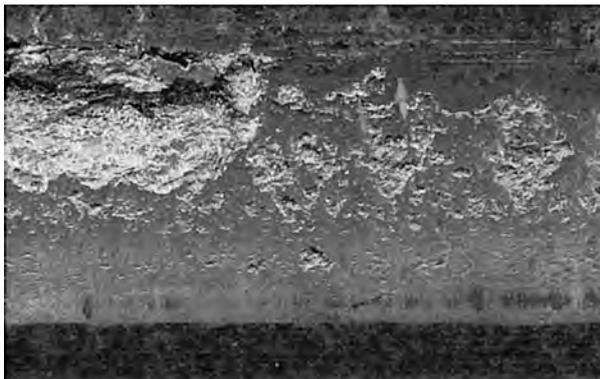


High precision helical gears industrial use

### Wording: "Rag-wear"



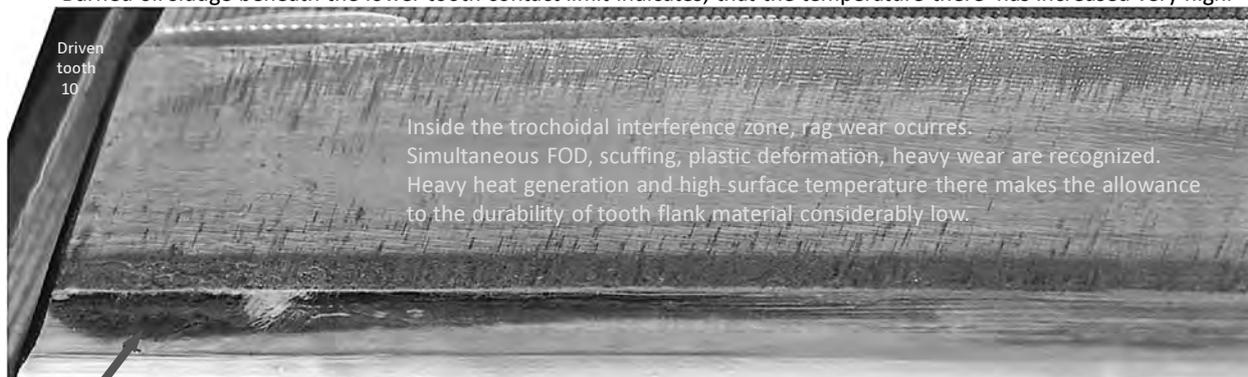
*For convenience for discussion, I define here the concept of following gear tooth flank damage as "Rag-wear":*



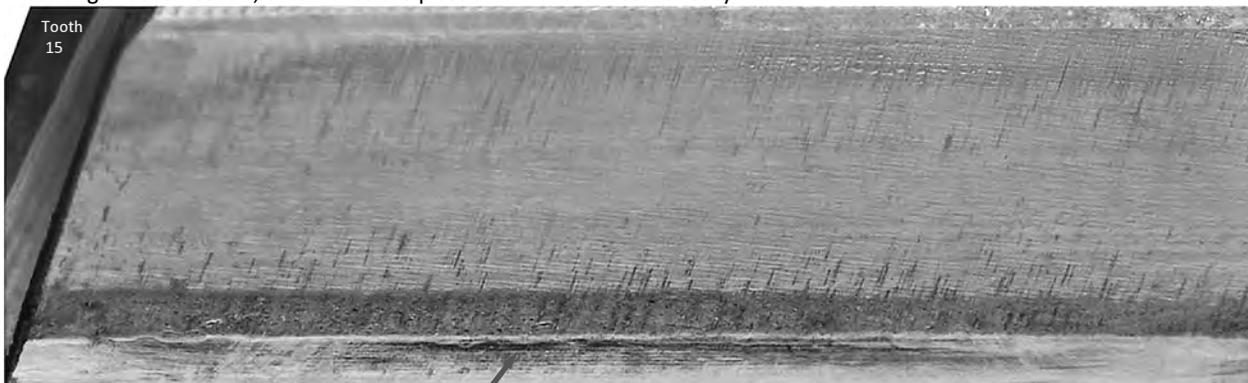
*Under very high surface temperature, the thickness of lub.oil film becomes very thin and granular falling-off of surface material occurs, adhesive wear occurs, pitting occurs, crush of wear debris occurs, plastic deformation of that tooth flank occurs simultaneously. Such complex situation of gear tooth flank wear develops itself with run of operating time as positive feedback system of failure development. During the damage development, tooth flank wear and plastic deformation often covers pitted area and eliminates pitting.*

*The expression "Rag wear" indicates such state of gear tooth flank wear with one word.*

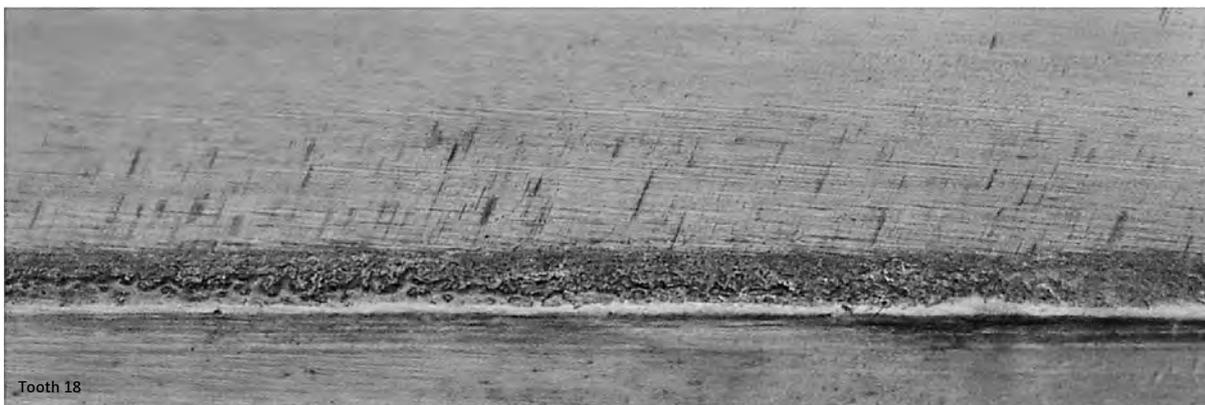
Burned oil sludge beneath the lower tooth contact limit indicates, that the temperature there has increased very high.



Underneath the limit of tooth contact, piling-up of plastically flown tooth flank material due to the tooth tip edge movement by trochoidal interference is recognized. (This observation thanks to the sophisticated lighting at photograph.) Because of high temperature of tooth flank material, especially inside the trochoidal interference zone, its hardness and strength becomes low, that makes the plastic flow of the material easy.



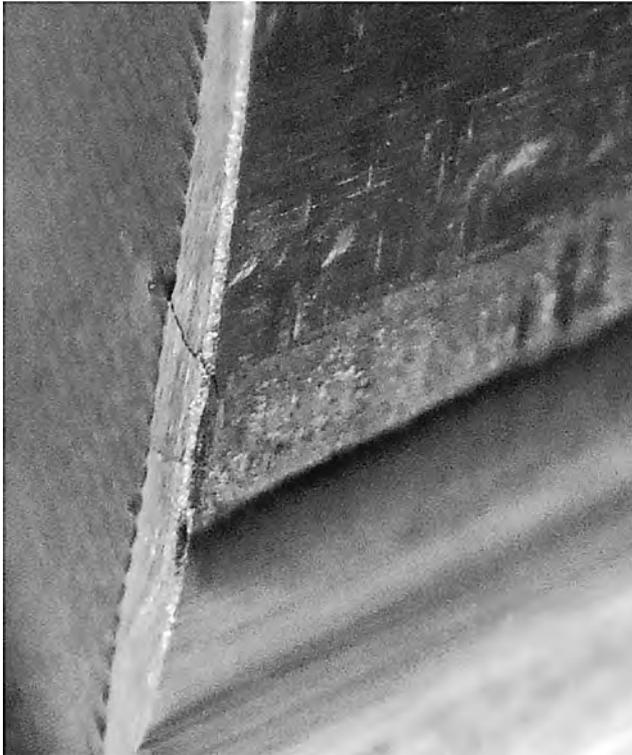
In the region of small ESV, especially in trochoidal interference zone, material temperature on the surface becomes so high, that is enough to melt the surface very locally.



【①】Driven wheel tooth  $1 \times 10^6 + (1600N \cdot m) 5.2 \times 10^4$  cycles

Initiation of crack at side edge of helical tooth on acute angle side

Tooth13



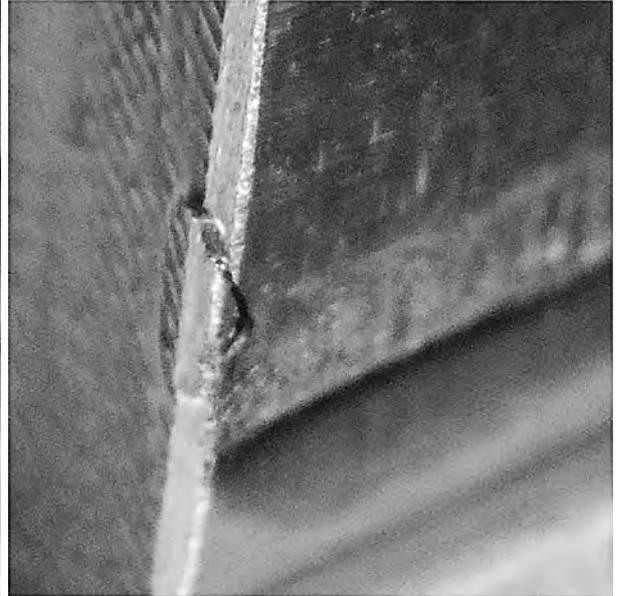
Inside trochoidal interference zone, severe rag wear occurs.

The material strength decreases there and crack initiate easily.

That surface crack acts as notch and it develops into deep macro crack.

A kind of side wall rapture, chipping, also occurs.

Tooth16



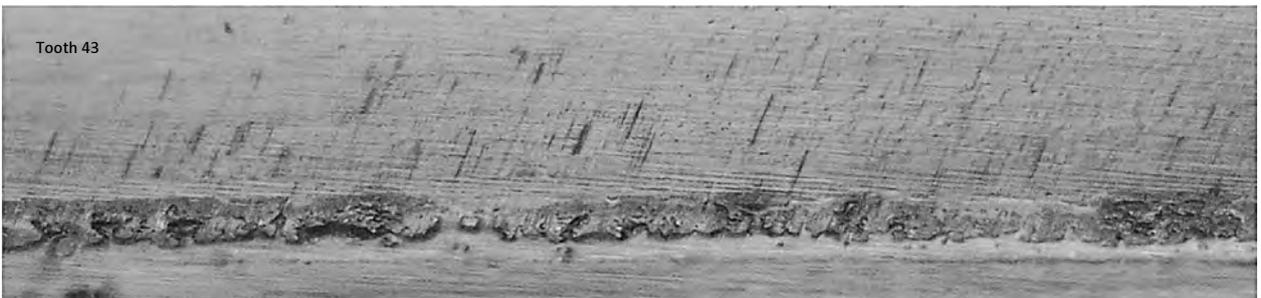
Some clear view of tooth surface melting in trochoidal interference zone, observed under sophisticated lighting at photograph.

You can easily assume, that the reduction of material strength there must be very big, though such influence is not taken in consideration at gear designing.

Tooth 29



Tooth 43

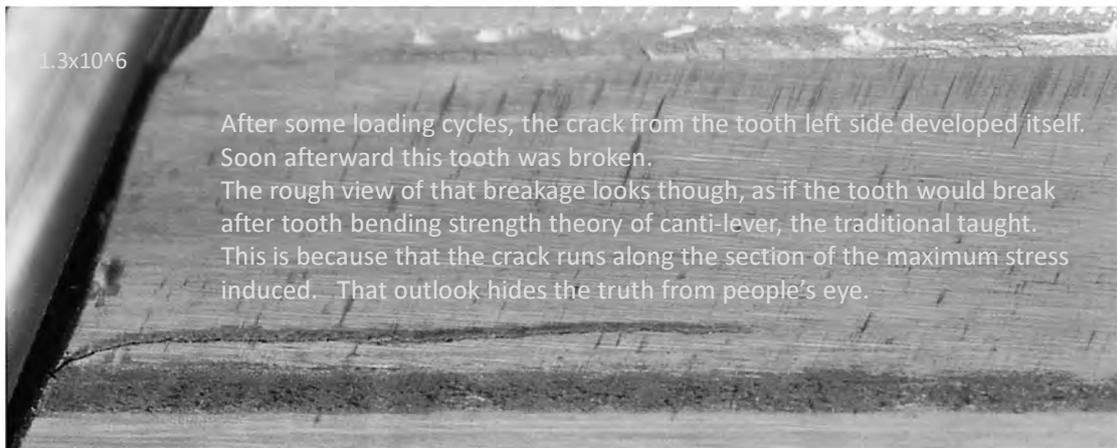


Tooth 14  
1.0x10<sup>6</sup>



You can recognize the initiation of crack at the upper boundary of the softened band of dedendum material, both at left tooth side edge and also at the tooth middle.

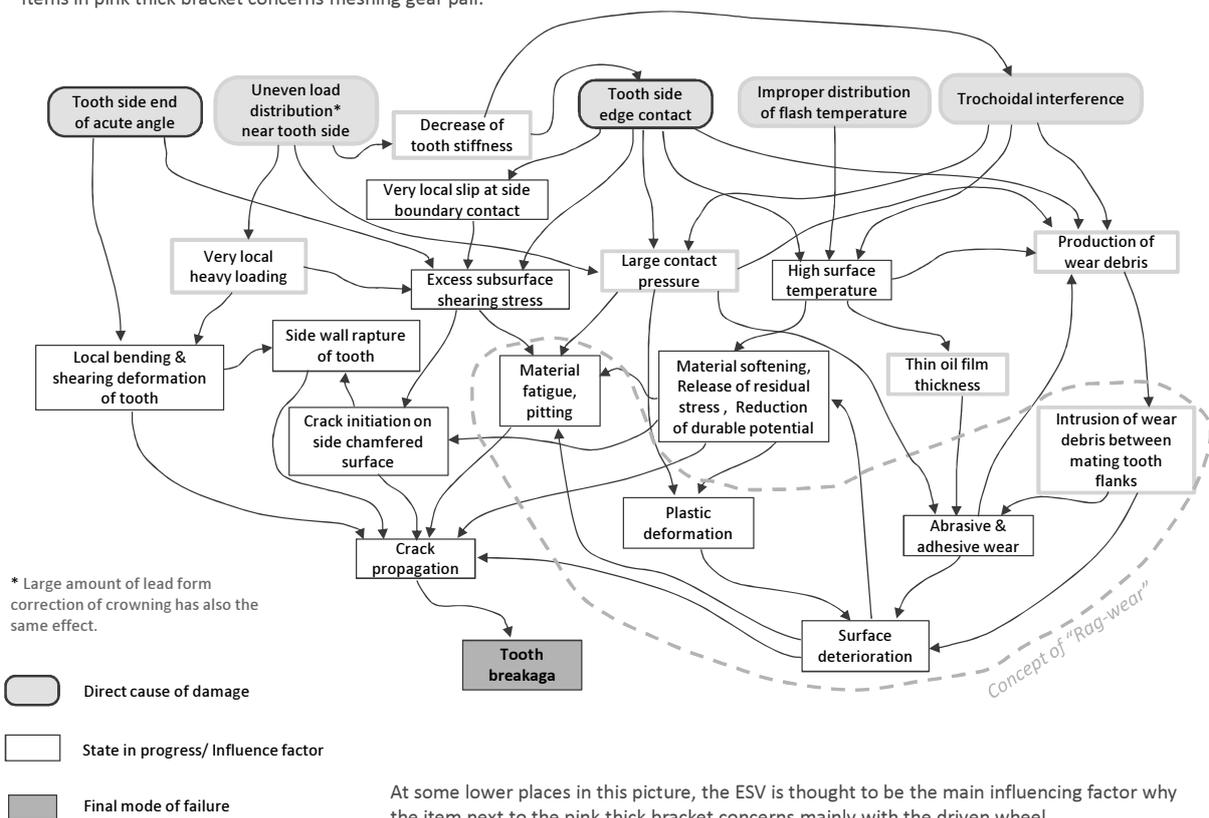
1.3x10<sup>6</sup>



After some loading cycles, the crack from the tooth left side developed itself. Soon afterward this tooth was broken. The rough view of that breakage looks though, as if the tooth would break after tooth bending strength theory of canti-lever, the traditional taught. This is because that the crack runs along the section of the maximum stress induced. That outlook hides the truth from people's eye.

### One typical mode of tooth flank failure that depends on run of operational time

The following picture deals with driven wheel.  
Items in pink thick bracket concerns meshing gear pair.



At some lower places in this picture, the ESV is thought to be the main influencing factor why the item next to the pink thick bracket concerns mainly with the driven wheel.

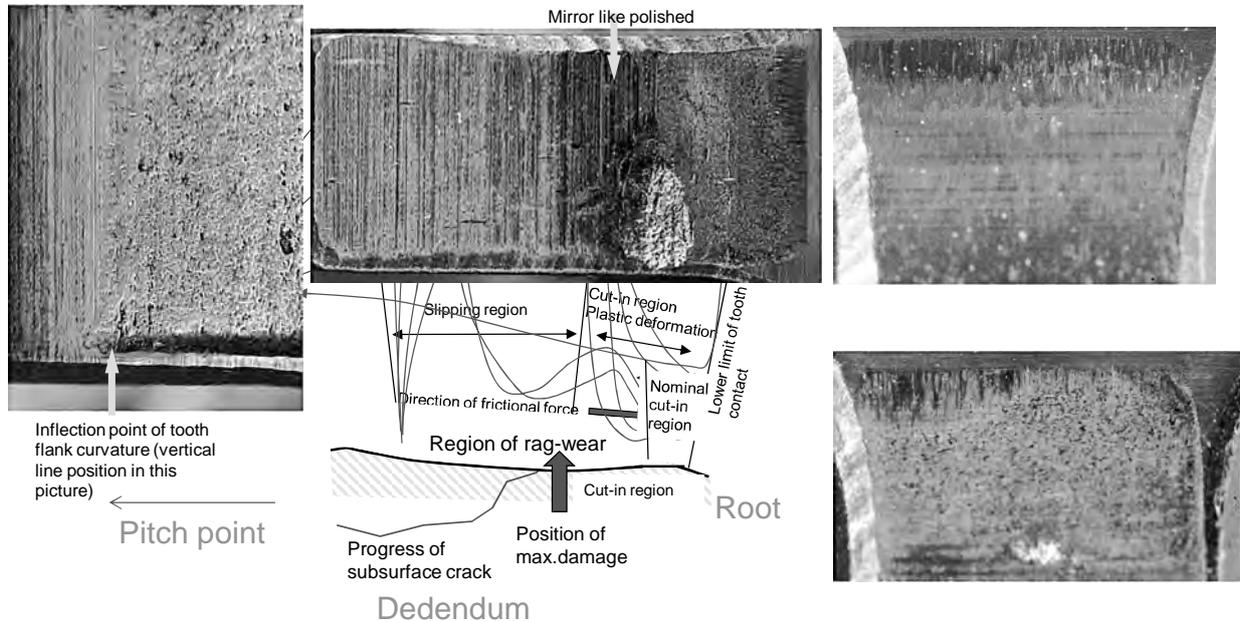
## Progress of tooth flank failure by IAE gear endurance test

The rag-wear develops in the direction of larger contact stress and violates the cut-in region inside trochoidal interference zone. As the result, the depth of cut-in region becomes narrower.

Tooth flank out side of rag-wear on the middle of tooth flank near pitch line is polished under high contact stress to become mirror like.

At the boundary between the polished flank near pitch line and rag-worn region, the tooth flank curvature has inflection point. Pitting or spalling failure often occurs there due to the high contact stress. FOD also often occurs there.

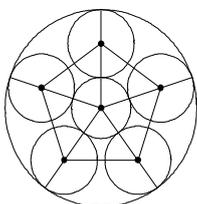
The tooth flank material suffers considerable surface and subsurface fatigue damage.



The durable-capability of tooth flank material changes with run of gear operation, mainly due to the surface temperature effect induced.

Tooth flank damage is often the result of the behavior of positive feed-back system of surface failure whose factor is ESV and trochoidal interference.

*Fin*



KBGT  
Kubo's Gear Technologies



# Crush of wear debris by tooth engagement, and tooth flank damage

**A. KUBO, Prof.hc.Dr.Eng.**

aizokubo@hera.eonet.ne.jp

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

<http://www.rias.or.jp/>

## 1 INTRODUCTION

Lubricating oil of gear box becomes dark after some operating time has passed. It is because, wear debris is suspended in the oil. Most of wear debris comes from gear meshing. Wear debris, from considerable particle size to very fine, intrudes between engaging tooth flanks of gears with some probability and tooth flanks crush it. Crush of wear debris with engaging tooth flanks gives considerable damage on the tooth flank. Same kind of phenomena happens also by rolling element bearings: Researcher of rolling element bearing and also machine engineer using ball or roller bearings knows this phenomenon since about 30 years and much investigation has been carried out to clarify the influence of such crush of wear debris on the reliability or on the life of rolling element bearings. Gear designer or engineer though does not or cannot take this mal-effect of crush of wear debris in consideration at the prediction of load carrying capacity or of life of gears. With conventional gear design method, this strong influence is not taken in consideration. This sets a limitation to the today's technical level in gear design for predicting the load carrying capability. In this report, many evidences of crush of wear debris and the state of tooth flank damage are shown to clarify the strong influence of crush of wear debris on gear failure.

## 2 OBVIOUS TRACE OF CRUSH OF FOREIGN OBJECTS

When we watch tooth flanks of heavily operated gears under sophisticated lighting, we find generally so many traces of crush of foreign objects. Fig.1 shows such an example: tooth flank of planet of final drive of land construction machine. Though plastic indentation and surface irregularity of tooth flank is emphasized by lighting technique at photograph, we find, there occurred so strong intrusion of foreign objects and engaging tooth flanks crush them during machine operation. The most of foreign objects are wear debris generated by the gear meshing. This is not a special case, but is common status in normal operation of gears in actual heavy usage. Case hardened tooth flank deforms plastically and is scratched.

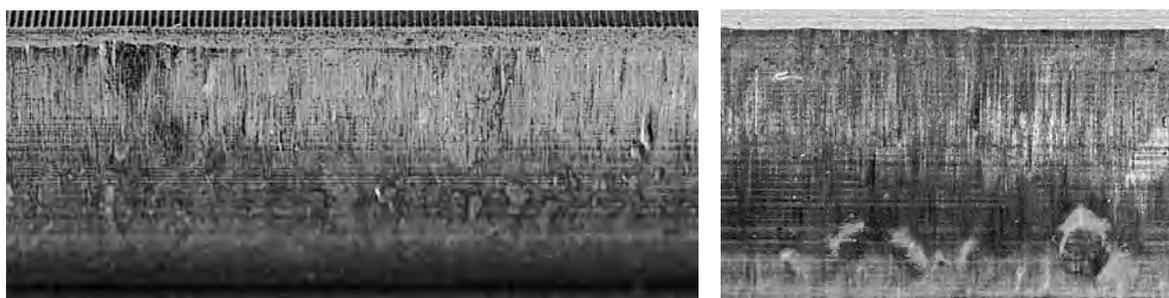


Fig.1 Tooth flank crushing foreign objects (Final drive gears of bulldozer)

### 3 PECULIAR TOOTH FLANK FAILURE

Sometimes, judging from the results of standard calculation for tooth flank durability, very peculiar but serious tooth flank failure occurs in practical operation of gears. Fig.2 shows one example of spalling found in gearbox operating without stopping under very severe atmospheric temperature condition: Only one tooth of driving pinion has severe failure and all other tooth flanks of the same gear are OK. On OK tooth flank, any signs of surface failure cannot be found. It is not rational from the sense of calculating load carrying capacity of high precision gears that only one tooth flank suffers such a severe spalling or case-crashing failure.

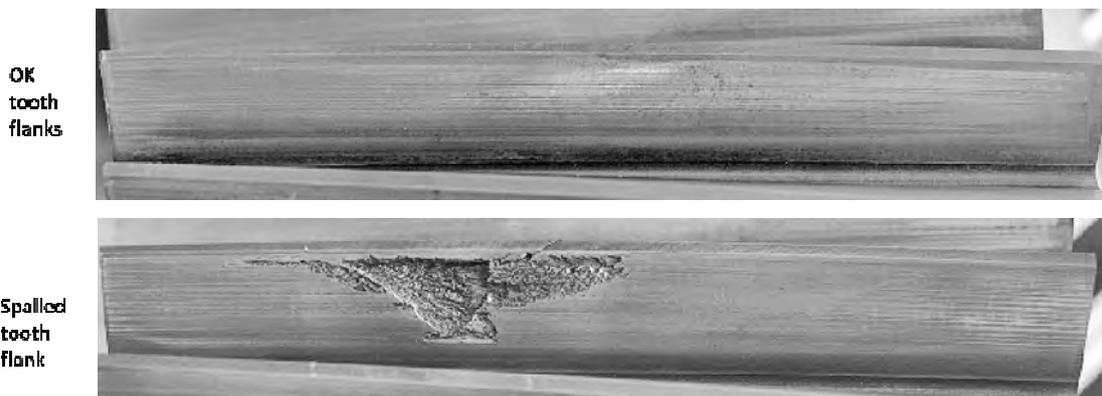


Fig.2 Severe spalling found only on a tooth flank, all other flanks of this pinion are OK



Fig.3 Spalling on tooth flank near side contact limit of a tooth with lead form modification of crowning

In the case of fig.3, spalling occurred on tooth flank near its right side end. The gear is case hardened and shot peened. The tooth lead form has considerable amount of crowning modification. The contact stress induced at that place is surely low in comparison with that at the middle of tooth flank. The tooth bearing pattern shifts a little to the right side, but the side edge contact stays inside OK level.

Both examples show, if the failed tooth has no special condition that other teeth do not have, such failure cases indicate that today's tooth flank durability calculation method is not reliable. The tooth that suffers unique failure must therefore have some special condition that other teeth do not have. Possible special condition unique at that tooth is 1. Existence of abnormal pitch in tooth spacing, 2. Material defect, 3. Crush of intruding foreign objects. The condition 1. is thought to be not possible from the machining accuracy of the gear. The condition 2. is also hardly realistic, because if the material of that production lot has defects, much number of other units must have the same kind of trouble. The prospective cause looks to be the item 3.

### 4 CRUSH OF WEAR DEBRIS

Close investigation of the flaking part of fig.3, a rubbed and dragged trace of foreign object was found from trochoidal interference zone to the apex point of this flaking. We can also find some scratching and plastic indentation on this dedendum flank, cf. fig.4.

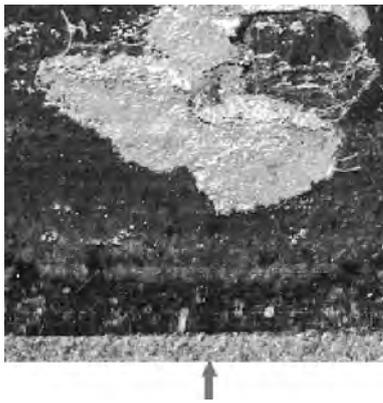


Fig.4 Drag of foreign object

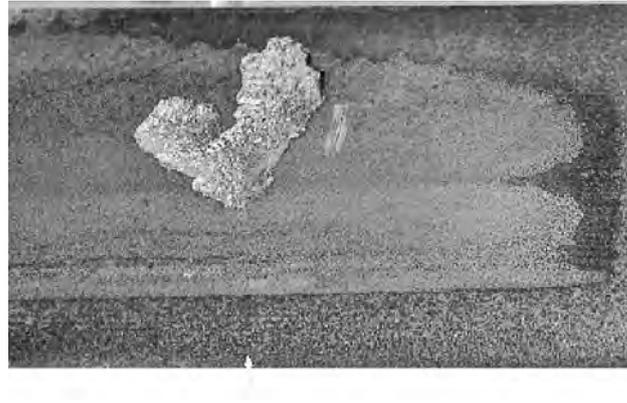


Fig.5 Drag and crush of foreign object to make spall

Fig.5 shows another example: Trace of dragging of foreign object is observed from outside of tooth contact region on tooth fillet. The intruding foreign object was crushed at the apex position of flaking to destroy tooth flank. These both examples show, intrusion of foreign objects and crushing them is the suspect of this failure.

When we run disc machine with case hardened and very smoothly ground TP made from excellent high strength gear material under good and clean lubricating condition, the endurance limit reaches ca. 3.5 – 4.0 GPa. In such endurance test, we can find white phase, butterfly, fish eye etc. in the subsurface of the tested roller. That indicates the stress state has reached real limit of endurance from the consideration of metallurgical observation. On the other hand the highest Hertzian contact stress employed in practical gear design is ca. 2 GPa. There is more than 3 times difference in transmitting torque, when the ultimate limit of the endurance of the material is decided by the induced contact stress value after standard calculation method for surface durability. When a brave gear designer set the limiting contact stress value over 3 GPa at gear design using conventional calculating method for load carrying capacity of gears, he will surely have trouble of gear failure soon in practical gear operation. The question is, what is the cause of this big difference between labo-testing result using simple TP and the results of practical operation of gears. There could be many suspects for this big difference and one of them is intrusion of foreign objects between engaging tooth flanks.

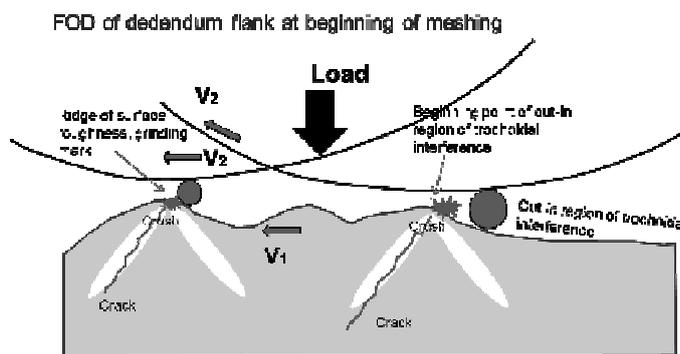


Fig.6 Crush of foreign object and damage of tooth flank

Heavily loaded gears usually suffers some amount of trochoidal interference due to big elastic tooth deformation by transmitting load, tooth lead form modification of crowning and uneven and partially strong contact near tooth side end, existence of pitch error and uneven tooth form deviation at each tooth etc. Trochoidal interference generates cut-in region inside interference zone. Intruding foreign objects, wear debris, collide with (1) the inflection point of tooth flank curvature between sliding region and cut-in region inside trochoidal interference, and (2) against the top of ridge of surface

roughness e.g. of grinding mark, cf. fig.6. At that crush of foreign objects with tooth flanks, subsurface crack often initiates there and it proceeds upward inside the tooth, usually between core and case of carburized and hardened gear tooth. Fig.7 shows an observed pitting initiation due to these two reasons to indicate the prosperity of the model of fig.6. Of course, surface fatigue at some tops of surface roughness asperity could be the cause of micro-pitting.

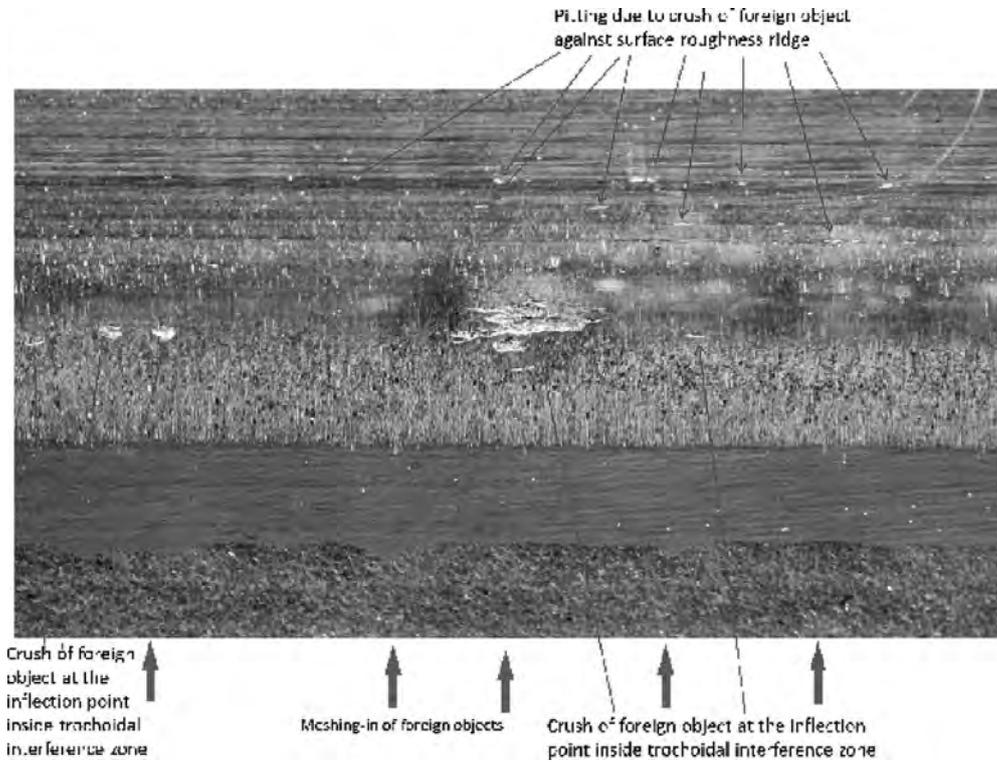


Fig.7 Different kind of pitting initiated due to crush of wear debris

When we see the tooth flank of traction gear of personal car drive after endurance test, we often judge easily, it looks OK. But when the lighting is well adjusted to emphasize the state of surface irregularity, we can usually see so much scratching, trace of crush of fine wear debris over whole tooth flank. Fig.8 shows a typical failure observed at the beginning part of tooth engaging of strong helical driving pinion. Inside the cut-in region

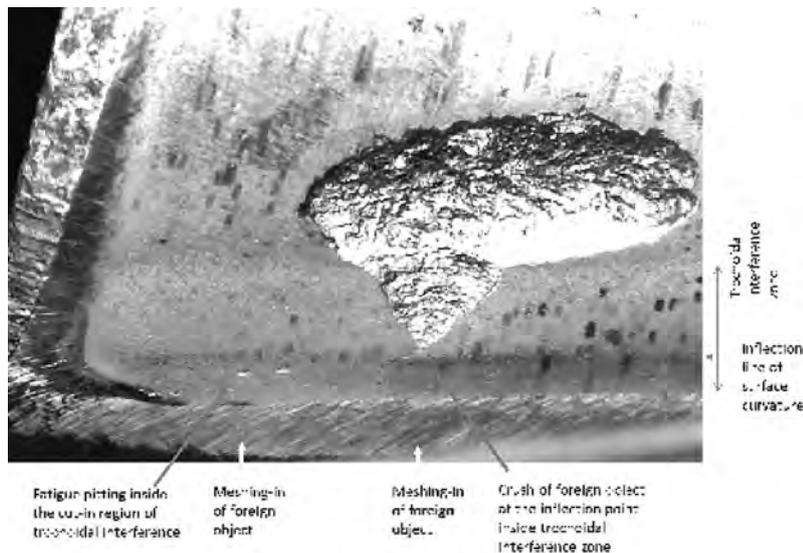


Fig.8 State of pitting and spalling initiated due to crush of wear debris

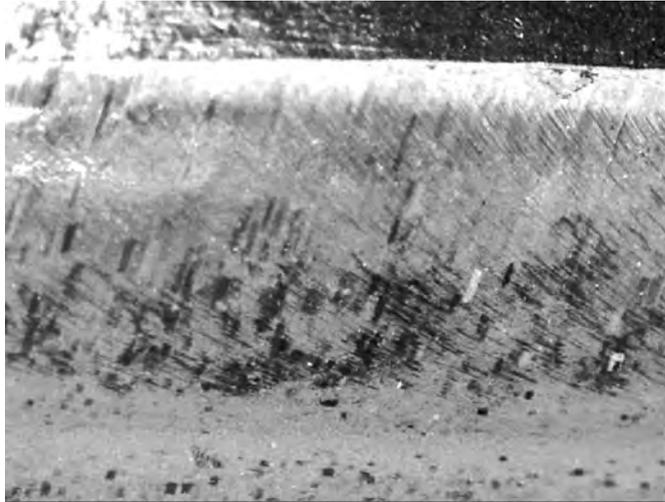


Fig.9 tooth tip chipping due to crush of wear debris

of trochoidal interference zone, micropitting due to material fatigue is observed. The initiation of big spalling is thought due to the crush of intruding foreign object at the inflection point of tooth flank, at the joining point of cut-in and slipping region inside trochoidal interference zone.

In fig.9 the pitting like failure at the tooth tip on upper right part of the photograph is perhaps not the failure due to material fatigue. Downward from that failure you can observe the trace of rubbing and dragging of foreign object on tooth flank. Surely a foreign object of considerable size intruded between the engaging tooth flanks and it rubbed the tooth flank under high pressure. At the moment that the foreign object passed over the tooth tip edge, the edge was ruptured and has made chipping.

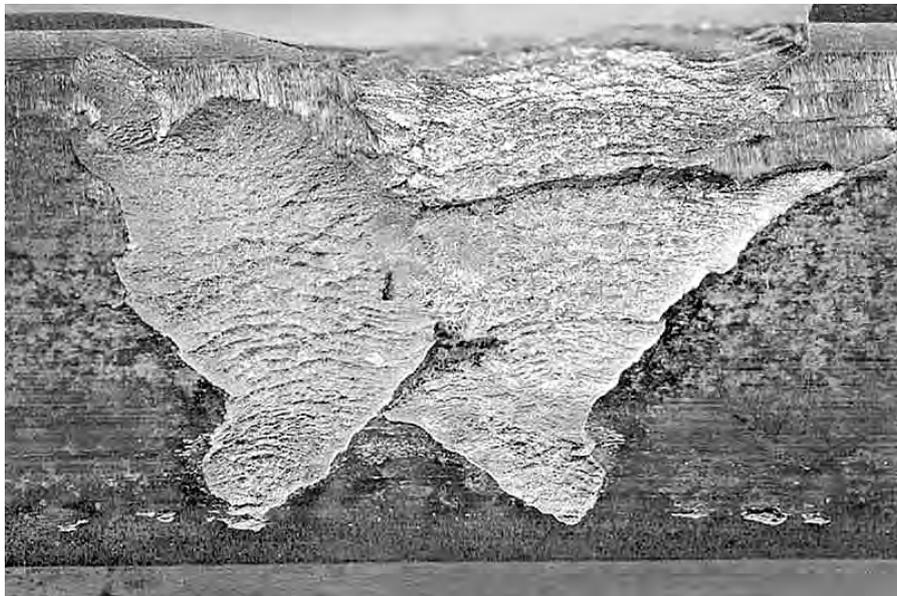


Fig.10 Partial tooth breakage as a result of failure triggered by the crush of intruding foreign object at the inflection point of tooth flank curvature at beginning point of cut-in region inside trochoidal interference

Figure 10 shows one fatal result induced by spalling that is triggered by the crush of wear debris against the inflection point of tooth flank curvature at the joining point of slipping region and cut-in region inside trochoidal interference zone: The subsurface crack proceeds upward between case and core boundary and reaches finally to the back

flank of the tooth. Then the cracked part is fallen-off. Besides the big triangular spalling, many pitting are observed at the inflection line between slipping and cut-in region inside trochoidal interference. Note the obscure shape of those pitting: it is quite different from the figure of fatigue pitting observed by the e.g. roller-to-roller endurance test of gear material under clean lubricating condition. You can see also the same status of obscure figure of pitting in fig.7. Judging from that obscure figure of those pitting, they must be initiated by collision and crush of foreign objects at that part.

## 5 OUTLOOK OF TOOTH FLANK AFTER CRUSHING WEAR DEBRIS

Fig.11 shows an example of spalling initiated by the crush of intruding wear debris. Down ward from the apex of spalled part on tooth flank, you can observe the trace of rubbing and dragging of intruding foreign object. Crush of those foreign objects (perhaps wear debris) initiates the cracks to make this spalling. The trace of dragging of intruding foreign objects can be recognized from lower outside of tooth contact limit. Then, some kind of contact evidence must exist on tooth tip of mating gear teeth.

Fig.12 shows it: Over the chamfer-surface at tooth tip and on addendum flank near tooth tip edge, you can observe some slight plastic deformation, i.e. indentation of oval form, that was printed by the strong contact with crush of intruding foreign object. This gear is carburized and quenched. The tooth tip is very hard about hardness HRC 63. In spite of this hardness, such oval trace of plastic deformation remains and is observed. It means the intruding foreign object is so strongly pressed to be crushed. The contact mark on chamfer at tooth tip means that the intrusion of foreign objects occurred from outside of contactable tooth flank decided by involute gear meshing theory.

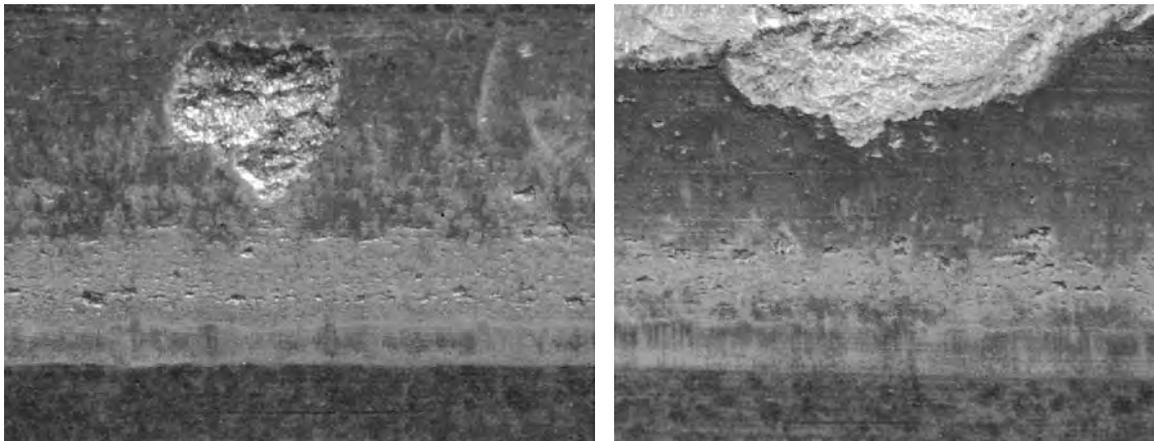


Fig.11 Crush of intruding wear debris to initiate spalling-off of tooth flank

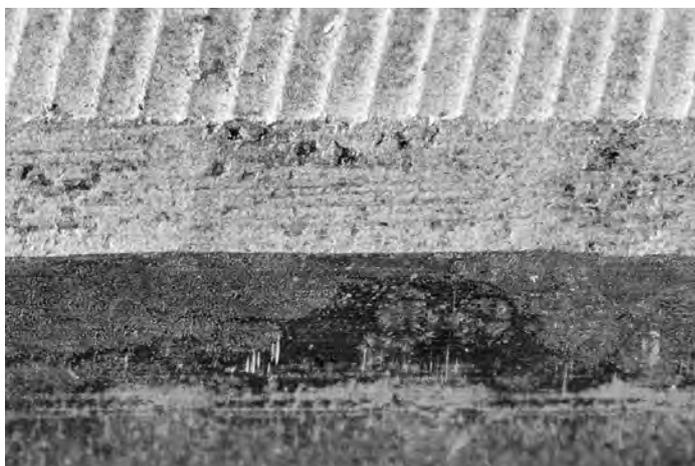


Fig.12 Plastic deformation on tooth tip chamfer due to crush of intruding foreign object

## 6 INFLUENCE OF SIZE AND HARDNESS OF WEAR DEBRIS

The behaviour of wear debris scattered in gear lubricating oil looks different as function of its size and weight and Reynolds number. The constituting factor “length” in Reynolds number is tooth size or the module, when we deal with the phenomenon of intrusion of foreign objects between tooth flanks. When the diameter of debris is less than ca. 50  $\mu\text{m}$ , such “fine debris” moves almost same as the flow of lubricant. When the diameter of debris is about some 100’s  $\mu\text{m}$ , such “small debris” receives considerable influence of gravity, but suspended in lubricant. When the diameter of debris is about some 400’s  $\mu\text{m}$  or larger, such “large debris” sinks and piles on the bottom of oil sump within shorter time.



Fig.13 Scratching by soft wear debris



Fig.14 Scratching by hard, brittle and fine wear debris

The hardness and ductility of wear debris has considerable influence on the damaging state of surfaces acting as crushing-wall against wear debris. That means, the outlook of tooth flank is considerably different as function of chemical characteristics of lubricant.

As function of kind of lubricant and EP-additive, when wear debris is hard and brittle, wear debris becomes smaller and smaller by crushing. Abrasive wear of projected part of surface roughness asperities proceeds like frosting or micro-pitting on tooth flank. Ridge of grinding mark and crater mountain made by crush of foreign object is abrasively worn. When the hardness of wear debris is soft and ductile, wear debris does not become smaller by crushing: fine and small wear debris plastically put themselves together to become large. In such case, large indentation and crater is made by crush of foreign object.

Fig.13 shows the state of scratching after endurance test<sup>[1]</sup> by FZG rig using ground gears from 16MnCr5 steel and gear oil of VG320 with EP-additive of S: rich 0.53%, P: rich 0.04%. The state of collision of fine wear debris with ridge of grinding mark shows that the fine wear debris looks to destroy the top of the ridges. It looks like micro-pitting occurring at the projection part of surface roughness. Near the grooves of scratching, some black ball, perhaps melted steel, are found.

Fig.14 shows the state of scratching by wear debris, here the EP-additive of lubricant is S: rich 0.53%, P: poor 0.02%. Intruding wear debris crushes themselves into finer size. Collision of fine wear debris with ridge of grinding mark also occurs and tooth flank wears abrasively. It looks like very fine micro-pitting occurring at the projecting part of surface roughness. Some black balls, perhaps melted steel, are also here found.



Fig.15 Craters, scratching and melted steels due to crush of intruding wear debris

Fig.15 and fig.16 show very different outlook of damaged tooth flanks lubricated by ATF with EP-additive of S: rich 0.12%, Ca: poor 0.005%, P: const. 0.03%, and that lubricated by ATF with EP-additive of S: poor 0.06%, Ca: rich 0.01%, P: const. 0.03%. At this endurance test, we have put the same wear debris taken from contaminated gear lubricating oil of heavily tested gear box. The amount and nature of wear debris added

in the lubricant of these both tests was therefore the same. On tooth flank many scratching are recognized. At some position, such scratching destroys ridge of grinding mark by collision of fine foreign objects. The resulted outlook of the damaged tooth flank is so different between the cases of fig.15 and of fig.16: in the case of fig.15, crush of large foreign objects induces plastic deformation of tooth flank in forms of crater and horse shoe. It induces also cracks inside tooth flank. We can see black oxidized steel at the side of deep scratching grooves and on the crater mountain. In the case of fig.16, the size of intruding foreign object seems to be very large, though the size of wear debris put in the lubricant is same as the case of fig.15. The abrasive wear of crater mountain and projecting part of tooth flank, i.e. wear of asperity of surface roughness, is very fine. On the bottom of craters, very local melting of tooth flank or melting of crushed wear debris is observed.



Fig.16 Worn craters and evidence of melted steels on the basin of craters

## 7 PROCESS OF DAMAGE CONCERNING CRUSH OF WEAR DEBRIS

Summing up much observation of tooth flanks of heavily used gears, we have the following impression: the progress of tooth flank wear as function of operating time is expressed by the positive feedback system as shown in fig.17. The most of gear life is under the state of failure-in-progress and different kinds of failure modes change their own grade by mixing their failure modes.

Meshing and crushing of foreign objects in engaging tooth flanks is serious trigger of forthcoming fatal failure. The gear design and operation under the recognition not to produce wear debris is very important to realize long life and reliable gear unit. Lubricant especially its containing EP additive, e.g. phosphorus, sulphur, calcium etc. has considerable influence on generation and characteristics of wear debris.

## 8 CONCLUSIONS

1. Foreign objects, most of them are wear debris, intrude between engaging tooth flanks more as we expected.
2. Foreign objects of small size make an appearance of scratching. The work of scratching generates considerable heat to melt some amount of intruding wear debris and of tooth flank material.



# 秋山研究室の成果

秋山研究室 秋山雅義

平成26年度は、下記の発表がある。

「NbC粒分散強化型工具の対熱間炭素鋼作用特性」

Working Features of Surface Layer of Tool Reinforced with Dispersed NbC Particles

トライボロジスト第60巻 第1号(2015)75～83

以下、論文を掲載する。

## NbC 粒分散強化型工具の対熱間炭素鋼作用特性

東川 佳史<sup>1\*</sup>, 森田 正樹<sup>2</sup>, 秋山 雅義<sup>3</sup>

### Working Features of Surface Layer of Tool Reinforced with Dispersed NbC Particles

Yoshifumi HIGASHIGAWA<sup>1\*</sup>, Masaki MORITA<sup>2</sup> and Masayoshi AKIYAMA<sup>3</sup>

Experiments have been carried out to clarify the roles of matrix and dispersed NbC particles on the reinforcement of tool surface. It was at the end of the last century that outstanding performance in hot metal rolling was reported of the surface layer of tool reinforced with coarse NbC particles by Plasma-Transferred-Arc (PTA) welding but little has been investigated on the roles of matrix and optimum dispersion of NbC particles. In the present work specimens manufactured by PTA welding using NbC particles with different sizes and different fractions were subjected to hot sliding test against medium carbon steel in order to investigate the roles of matrix and the NbC particles held in the matrix. The result showed that the matrix is reinforced as soon as a small amount of NbC is injected into the welded layer and keeps the constant strength regardless of the increase in the fraction of NbC particles. With the increase in the fraction of NbC particles in the welded layer the performance of the surface increases linearly. In the previous use of coarse NbC powder was recommended but present result showed that the effect does not depend upon the size of NbC powder to be PTA-welded.

**Key Words :** NbC, PTA, reinforced tool, hot wear resistance, optimum size of NbC, reinforcement of matrix

#### 1. はじめに

ステンレス鋼管の熱間圧延に用いられる管内工具の表面に、プラズマ粉体溶接 (Plasma Transferred Arc Welding, 以下 PTA 溶接) 技術<sup>1)</sup>を用いて、粗大 NbC 粒を 50%程度含む SUS316L 粉との混合粉を肉盛溶接することで、工具寿命を 10 倍に伸ばしたという報告<sup>2)</sup>がなされてから大凡 15 年が経った。また、その技術はチタン管の熱間圧延用管内工具や、炭素鋼線材の熱間圧延用工具<sup>3)</sup>に対しても効果があるとの報告がなされている。従来の工具製造技術の特徴は、先ず成分調整した素材を作り、適切な加工や熱処理を施すことによって析出物等を形成させ、所定の特性を発現させる<sup>4-6)</sup>というものが主流であったが、上記の技術は PTA 溶接に

よって析出などでは形成され得ない粗大な硬質炭化物を外部から工具表層に強制注入することによって、表層のみに高い耐摩耗特性を付与することができるのが特徴である。類似の設計思想の下に製造される工具は冷間加工分野でも開発事例があり、例えば TiC を分散強化させた工具が優れた冷間耐摩耗特性を示すという報告<sup>7,8)</sup>があり、また熱間では VC が有効という報告<sup>9)</sup>もある。しかしながら熱間摩耗試験で比較を行い、NbC の方が VC よりも優れた耐摩耗特性を示すという報告<sup>2,5)</sup>があり、上記の粗大 NbC 粒分散強化型熱間加工用工具はこの結果を下に設計製造されている。ところで、上記の技術開発の過程では、100 μm 超の粗大 NbC 粒を、溶接割れを起こさない限界の重量分率まで多く含ませた粉体を強制注入するのが良い、

- 1 京都工芸繊維大学 大学院生 (〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町)  
Student, Graduate School, Kyoto Institute of Technology (Gosho-kaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 606-8585)
- 2 アイセイハード(株) (〒454-0831 愛知県名古屋市中川区三ツ屋町 1 丁目 15)  
Aisei-hard. Co., Ltd. (1-15, Mitsuya-cho, Nakagawa-ku, Nagoya-shi, Aichi 454-0831)
- 3 京都工芸繊維大学大学院 機械システム工学部門 (〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町)  
Department of Mechanical and System Engineering, Kyoto Institute of Technology (Gosho-kaido-cho, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 606-8585)

\* Corresponding author : E-mail: m3623041@edu.kit.ac.jp

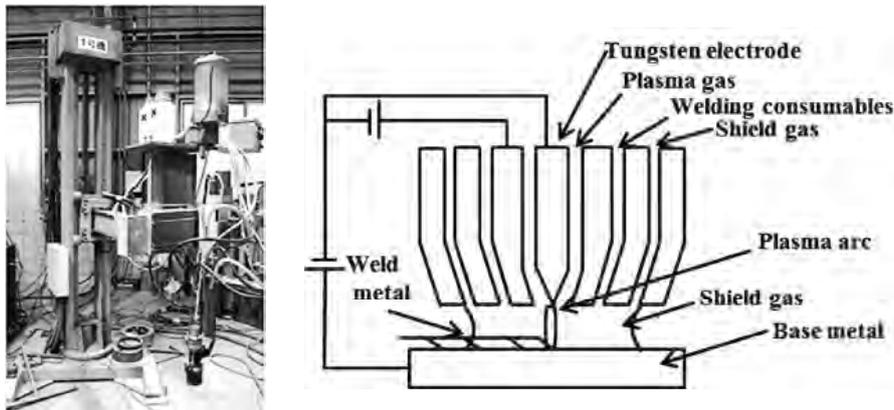


Fig. 1 View of PTA-welding machine and schematic illustration of PTA-welding

とされているが、強制注入する NbC 粒の適正な粒度や重量分率については明らかにはされておらず、また溶接工具表層で硬質 NbC 粒を保持するマトリックス部の作用についても明らかにはされていない。これらの点が明らかになれば、NbC 粒を強制注入する熱間加工用工具に更なる高い特性を付与することも可能になると考えられる。本研究では、強制注入する NbC 粒の粒度を変化させると共に注入する NbC 粒の重量分率をも変化させて PTA 溶接を行い、溶接層の構成と機械的特性の関係を評価した上で熱間摩耗試験<sup>10)</sup>を行い、上記の点を明らかにすることを試みた。

## 2. 試験片の作製

摩耗試験用の試験片の素材は PTA 溶接技術を用いて作製した。PTA 溶接の概略図を Fig. 1 に示す。PTA 溶接においては、母材と母材に対して電位差を有するタングステン電極の間でプラズマを発生させ、Ar 等のキャリアガスに乗せて運ばれるマトリックス形成用の粉体と NbC 等の強化材の粉体の混合粉をプラズマ中に送り込んで瞬時に粉体を溶解しながら母材上に溶接層が形成される。高温のプラズマを利用するために、PTA 溶接は融点が極めて高い硬質炭化物等の異種材料を母材表面に強制注入するには適した方法であり、その利点を最大限に活用することを目的に、本研究でも PTA 溶接を採用した。

先行文献<sup>2,5)</sup>では、マトリックスを形成させる粉体を SUS316L 粉としてこれを NbC 粉と混合して素材粉としているが、本研究ではマトリックスの

靱性向上を狙って SUS316L に変えて SUS309L 粉を用いた。母材は機械的強度を重視する観点から中炭素鋼 S50C を用いた。熱間耐摩耗試験用の試験片作製手順を Fig. 2 に示す。PTA 溶接処理後の素材からの試験片切出し処理を行い、肉盛り溶接層部分に対して研磨を施した。これらの前処理を施した試験片について、ビッカース硬度測定と光学顕微鏡による組織観察を行い、続いて走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) とエネルギー分散型 X 線分光分析法 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX) による観察を行った。

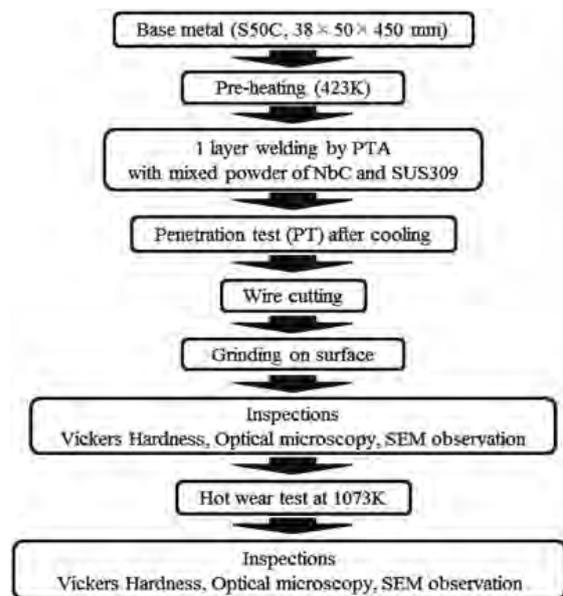


Fig. 2 Flow chart of specimen manufacturing and evaluation

Table 1 Conditions of PTA-welding

Base metal	Powder		Size of NbC particle, $\mu\text{m}$			Weight fraction of NbC, %
	No-1	No-2	Fine : 10~45	Medium: 45~75	Coarse : 75~150	
S50C	NbC	SUS309L				20, 40, 60
Plasma arc current, A	Plasma arc voltage, V		Pre-heating temperature before PTA-welding, K		Carrier gas	Post-cooling condition
170	33		423		Ar	Slow cooling

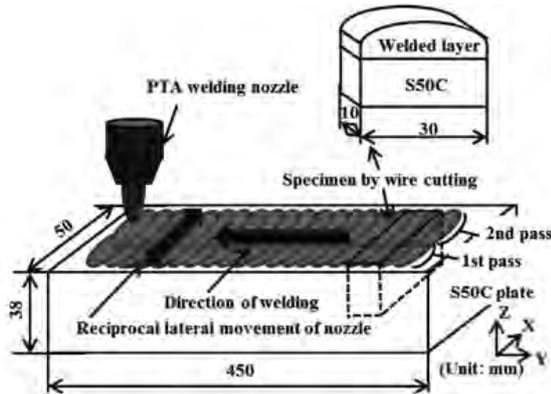


Fig. 3 Schematic illustration of specimen manufacturing by PTA-welding and wire-cutting

### 2.1 PTA 肉盛溶接

素材製作のための PTA 溶接条件を Table 1 に、素材ならびに試験片製作の概要を Fig. 3 にそれぞれ示す。先行文献<sup>2)</sup>では工具表面の粗大 NbC 粒の効果が議論されており、細粒の硬質炭化物粉は PTA 溶接時に飛散してしまうために歩留まりが悪いと考えられ、細粒の NbC 粉を用いた PTA 溶接は行われておらず、供される NbC 粉も粗大なものに限定されていた。本研究では、溶接層を形成するマトリックスとそこに抱えられている NbC 粒それぞれが耐摩耗特性に及ぼす作用を明らかにすることを目的としており、耐摩耗特性向上に適した NbC 粒の粒度探索も行う。そのため、アトマイズ法によって作製された素材 NbC 粉を篩にかけ、75~150  $\mu\text{m}$  の粗粒、45~75  $\mu\text{m}$  の中粒、10~

Table 2 Results of PT on PTA-welded surfaces

NbC, wt%	20	40	60
Fine	○	○	○
Medium	○	○	○
Coarse	○	○	△

○: With no crack, △: With small hair crack

45  $\mu\text{m}$  の細粒と、異なる粒度を持つ三つの群に分別した。また、溶接層のマトリックスとマトリックス中の NbC 粒が耐摩耗性を示す作用を区別するために、NbC 粉と SUS309L 粉の混合比率をも変更した。

なお、Fig. 3 中で PTA ノズルは幅方向に揺動を繰り返しながら溶接方向に移動するので、幅方向端部近傍と同中央部では NbC の実密度が異なる。一方、溶接層内部の NbC の実密度は溶接方向には安定しており、摩耗試験片中の摩耗試験に供する場所を適切に選ぶことで、異なる NbC 粒の実密度が摩耗特性に及ぼす影響を評価することができる。

### 2.2 浸透探傷試験

溶接作業完了後の材料は、冷却後、その溶接表面部に浸透探傷試験 (Penetration test: PT) を施し、溶接割れの状況を検査した。PT による表面検査結果の一例を Fig. 4 に、溶接割れ発現の状況を Table 2 にそれぞれ示す。先行文献<sup>2)</sup>では、SUS316L と粗粒の NbC の場合は NbC の重量分率が 60% であれば実害のある溶接割れは発生しない、と報告されているが、ここでも同様の結果が得られている。

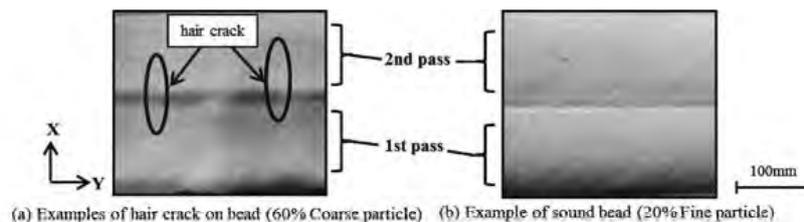


Fig. 4 Examples of inspected PTA-welded surfaces by PT

粗粒 NbC を用いた場合, Fig. 4(a)に示すように PT により僅かな割れが認められるが, 致命的な巨大な割れは見当たらない. また, 中粒ならびに細粒の場合は素材粉の NbC 分率の大小によらず割れは認められない. 一例を Fig. 4(b)に示す. 以上の結果から, 素材粉中の NbC の重量分率が 20~60% であれば, 実害のある溶接割れは発生しないと考えて良い.

### 2.3 試験片加工

作製した各 PTA 溶接材からワイヤカットによって熱間摩耗試験用試験片を切り出した後, 研削加工を施して摩耗試験への供試面を平滑化した. 研削後の試験片の例と試験片寸法を Fig. 5 に示す. 同写真の上部が溶接層であり, その厚さは平均 3

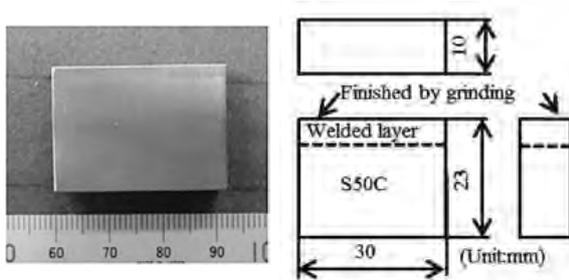


Fig. 5 Example of finished specimen for hot wear resistance test and geometry

mm である.

### 2.4 試験片特性評価

作製した試験片中の粒の分散状態と硬度分布ならびに元素分布を, 光学顕微鏡, ビッカース硬度計, SEM-EDX により評価した.

**2.4.1 粒の分布評価** PTA 肉盛溶接層の光学顕微鏡観察結果の例を Fig. 6 に示す. 観察場所は試験片の肉盛層の表層部直下の側面である. PTA 肉盛層には, ある程度大きな粒とマトリックス中に微細に分散した粒の 2 種類があることが判る. ある程度大きな粒は投入された NbC 粉の粒径より僅かに小さい. マトリックス中には, 粒径 10  $\mu\text{m}$  より小さな粒が微細に分散していることが観察されるが, この微細な粒は, 投入した素材 NbC 粉には無かった小ささである.

マトリックス中の NbC 粒のサイズ範囲とその範囲の粒がマトリックス中に占める割合, ならびにマトリックス中の NbC 粒の総面積率の関係の一例を Fig. 7 に示す. 粒径 15  $\mu\text{m}$  以下の微細 NbC 粒は, 数が多いが, その面積率は小さく, 総面積率に及ぼす影響は小さい. そのためマトリックス中の NbC 粒の総面積率は素材 NbC 粒の平均粒径より僅かに小さい径の NbC 粒の面積率でほぼ決

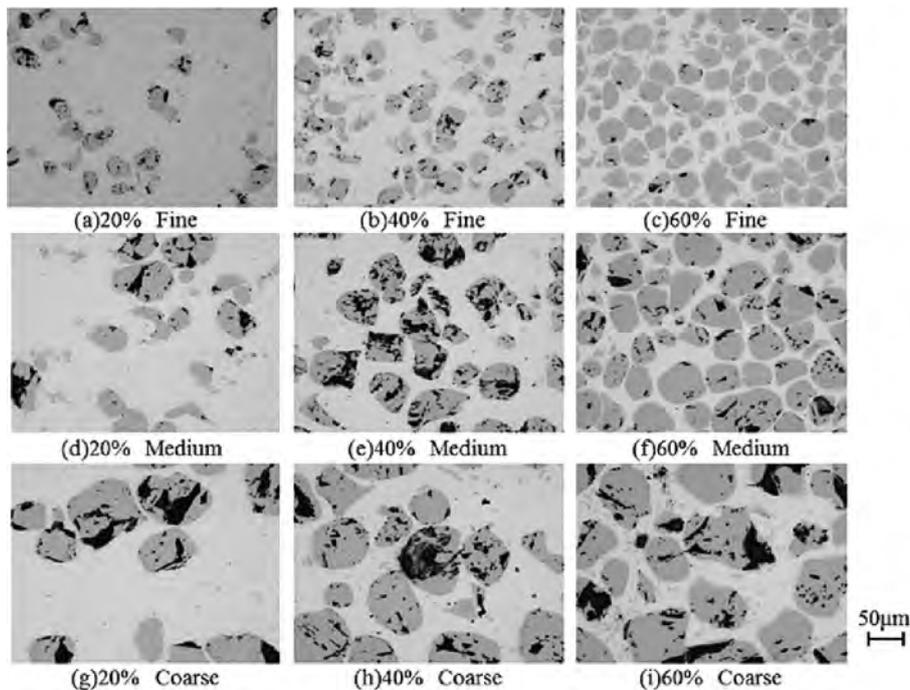


Fig. 6 Relationship between NbC particles in powder and NbC particles in matrix

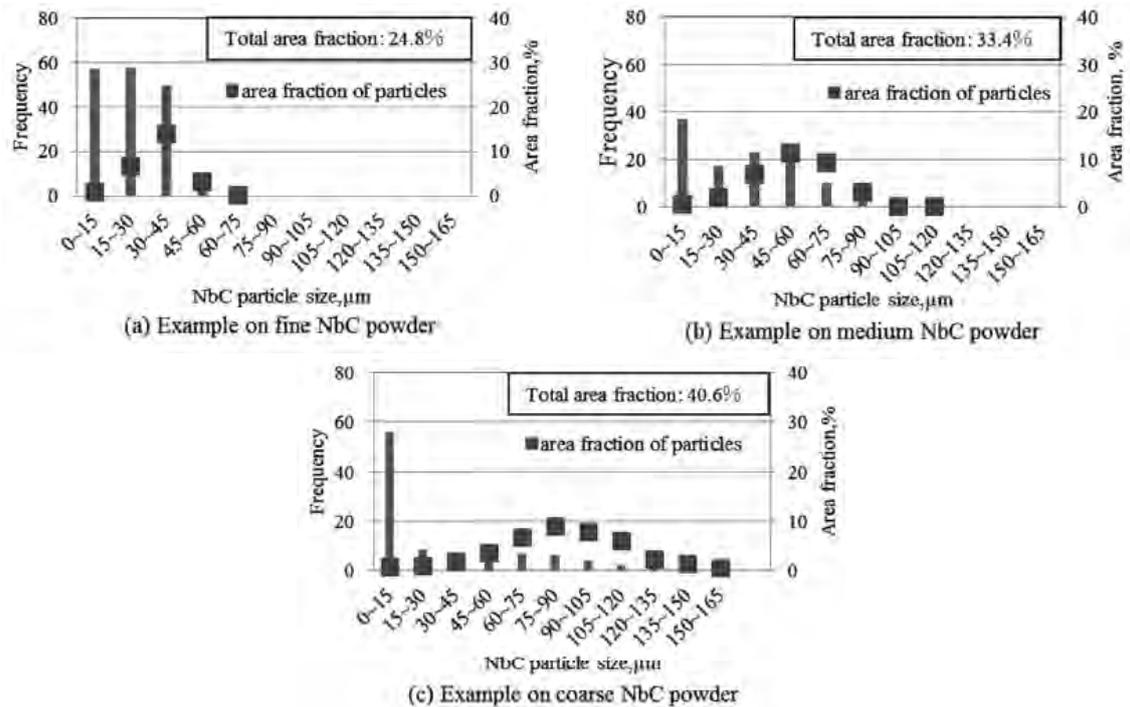


Fig. 7 Examples of intensity and area fraction of NbC particles in matrix

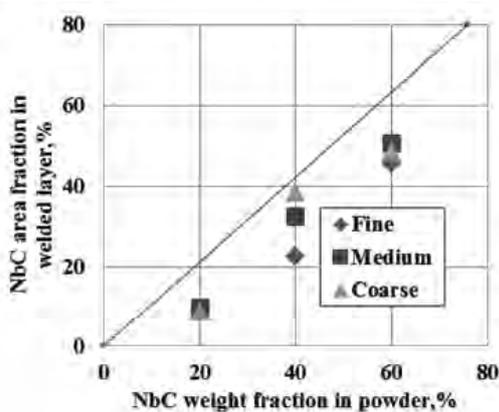


Fig. 8 Relationship between weight fraction of NbC in parent powder and area fraction of NbC particles in PTA-welded layer

まってしまうことがわかる。

素材粉中の NbC 粉の重量分率と、溶接層のマトリックス中の粒の面積率を比較して Fig. 8 に示す。NbC の比重は 7.56<sup>11)</sup>、SUS309L の比重は 7.98<sup>14)</sup> であるので、もし、PTA 肉盛溶接時に素材粉に投入した NbC 粉が、飛散も固溶も無く総てマトリックス中の NbC 粒になったと仮定し、更にマトリックスは総て投入した素材粉で構成され、且つマトリックス中の NbC 粒が三次元的に周期性を持った均一に近い分布をすると仮定すると、Fig. 8 中に X

軸と Y 軸に対して上記の二つの比重に見合った傾きをもつ直線がマトリックス中の NbC 粒の面積率の上限値になる筈である。結果はこの線よりも下に分布し、素材粉中の NbC 粉の重量分率とマトリックス中の NbC 粒の面積率の間には明確な相関があり、その相関関係は素材 NbC 粉の大小には余り依存しないことがわかる。このことから、マトリックス内に溶け込む NbC や Nb があっても、その溶け込み量は極僅かの値で、一定以上の溶け込みは無い、と推定される。

**2.4.2 硬度評価** Figure 5 に示した試験片上面部の精密研削面にバフ研磨を施した後、マトリックス部のビッカース硬度を測定した。マトリックス中には 10 μm より小さい 1 μm 程度の極微細 NbC 粒が存在するが、その影響を極力排除するために、視野中で極微細 NbC 粒を避けながら、測定荷重を 10 g まで漸減させて行った。細粒 NbC 60% の素材粉を用いた場合のマトリックスの硬度測定結果の例を Fig. 9 に示す。同図中の硬度測定結果から縦軸上の値を外挿し、それをマトリックス硬度とした。

この作業を同一試験片内の 3 箇所で行い、それらの平均値をマトリックスの硬度とした。Figure

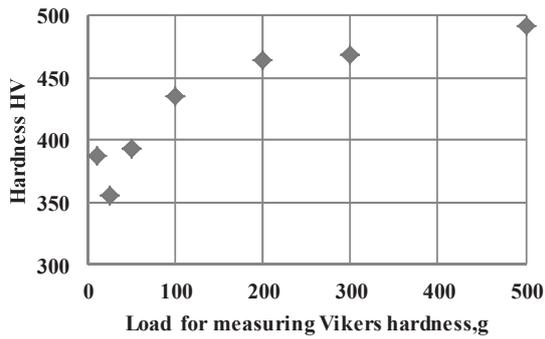


Fig. 9 Example of influence of load on Vickers hardness of matrix

10に結果を示す。NbC粒を分散させた試験片のマトリックス硬度が、320HV~420HVの間に収まっていることがわかる。NbC粒の面積率が0%，すなわち SUS309L 粉のみを用いて作製した試験片のマトリックス硬度は220HVであるが、NbC粒の面積率の僅かな増加と共にマトリックス硬度は320HV程度に急増しNbC粒の面積率40%程度まで、その硬度が保持されていることがわかる。この間のマトリックス中のNbC粒を観察すると、NbC粒の面積率が小さい場合はNbC粒の痕跡は観察されず、NbC粒はほとんど固溶されていると考えられる。NbC粒の面積率の増加に伴い極微細な粒がマトリックス中に観察されるようになるが、マトリックスの硬度自体はそれ程上昇しない。これはマトリックスに固溶されるNbCが極少量であり、その時点でマトリックスの硬度上昇がほぼ完了するためであると推定される。一方NbC粒の面積率が40%程度以上になると、マトリックスの

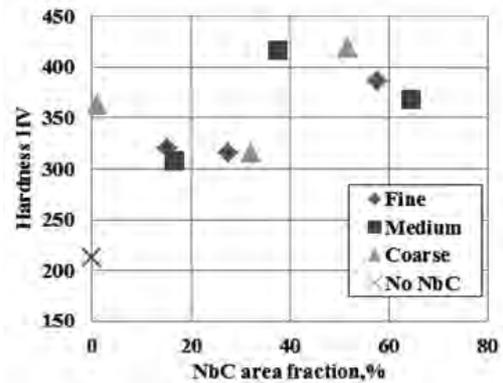


Fig. 10 Influence of area fraction of NbC particle in matrix on Vickers hardness of matrix

硬度は一段の上昇を迎えるように見えるが、この理由はマトリックス中に分散した大きな硬質NbC粒の密度が高くなるため、硬度測定結果に近接硬質NbC粒の影響が及ぶためと推定される。また、NbC粒と考えられる粒にも圧痕を打ち、その硬度を測定したが、その値は1600前後であったことから、NbCの硬度と言われている2170<sup>11)</sup>には及ばないが、極小さな粒を圧倒的に硬度の低いマトリックス中で測定していることを勘案すると、これらの粒はNbCであると推測される。

2.4.3 ミクロ解析 ワイヤカットされた熱間摩耗用試験片の表層からサンプルを切り出し、SEM観察の後、SEM-EDXによる元素分析を行った。細粒NbCを60%投入した場合のマトリックス観察結果の一例をFig. 11に示す。PTA肉盛層にはある程度大きな粒とマトリックス中に微細に分散

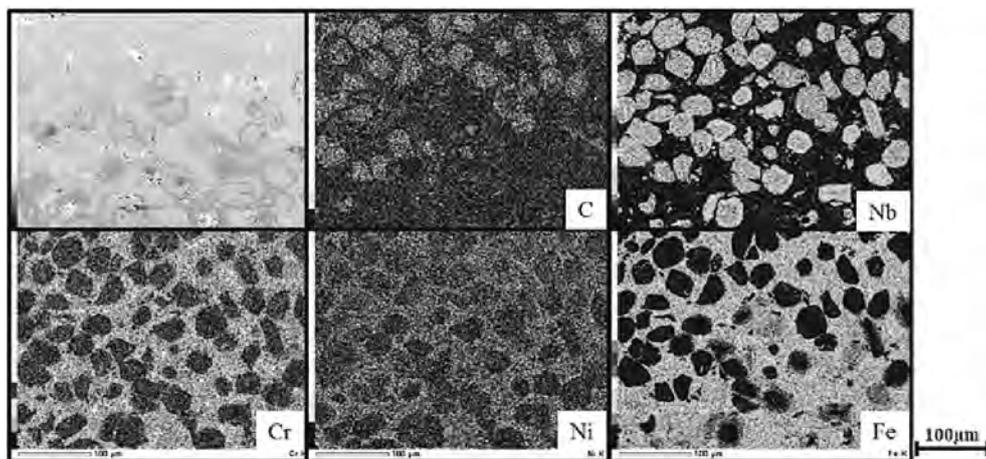


Fig. 11 Examples of SEM-EDX images and distribution of elements in PTA welded layer

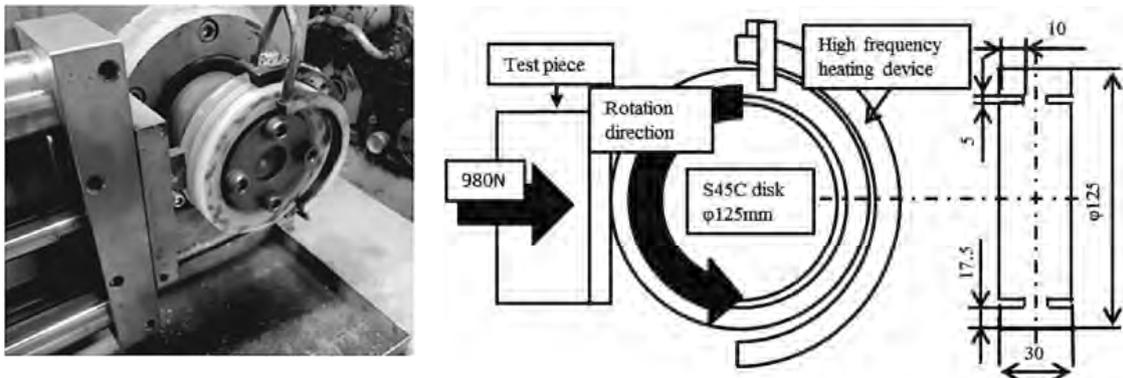


Fig. 12 View and illustrated image of hot wear resistance test

Table 3 Conditions of hot wear resistance test

Base metal	Temperature, K	Applied load, N	Sliding speed, m/s	Sliding distance, m	Lubrication
Size,mm material					
φ 125×30 S45C	1073	980	0.22	600	No lubricant

した粒の2種類があり、何れもNbとCの反応が強く出ていることからNbC粒であると考えられる。ある程度大きな粒は素材粉中のNbC粒の大きさより僅かに小さいことから、素材NbC粉の表層がプラズマによって溶解された上でマトリックス中に封じ込められたと考えられる。この結果は、マトリックス中にある粒のピッカース硬度が1600程度であったことと符合しており、以上のことからマトリックス中の大きな粒はNbC粒であると結論づけることができる。また、マトリックス中に微細に分散した粒は、素材NbC粉中には元々は存在していなかった大きさの粒であり、PTA肉盛溶接時に溶解したNbC粉の表面の一部が分離してマトリックス中に微細分散したものと推測される。素材NbC粉の大小や分率に依らず、マトリックス中にはNbやCの単独の痕跡はほとんど見られず、投入されたNbC粉が溶解して、あるいはNbとなってマトリックス中に多量に溶け込んでいるとは考え難い。もし溶け込んでいるとしても極僅かでその変化がマトリックスの強度に影響を及ぼすことはほとんど無いと推測される。この結果は、前節で述べたマトリックス硬度からの推定結果と一致する。また、マトリックス中にはCrやNiが均一に分散していることが観察されるが、これは素材粉体中のSUS309Lがマトリックス中に均一分散されたことを示している。

### 3. 熱間摩耗試験

熱間摩耗試験の概要をFig. 12に、試験条件をTable 3にそれぞれ示す。摩耗試験機に固定された試験片を、回転するディスクに押し当てて試験が行われる。押しつけ力は980 N、ディスクの直径は125 mm、回転速度は1分間に33回転である。ディスクには試験片と反対側に誘導加熱コイルが半周分巻かれてあり、それによってディスクが加熱される。ディスクの形状はFig. 12中の写真に示す通り、加熱部分の熱が半径方向に流れにくくするために周方向に溝加工を施してある。素材温度は加熱されたディスク面が回転して試験片に触れる直前の位置で、放射温度計を用いて測定した。

### 4. 結果

熱間摩耗試験の結果得られた摩耗痕の例をFig. 13に示す。試験片を上面から観察すると、定性的には投入NbC粉の大小や重量分率は、摩耗痕の幅には極端な影響を与えることが無いようである。

摩耗痕を以下のように評価した。摩耗痕幅の計測法の概要をFig. 14に示す。摩耗痕の上には鋼の酸化物と推定される堆積物があるため、上面から摩耗痕の長さを測定する方法では堆積物の長さを測定してしまい摩耗痕の実際の長さがわからない場合がある。そのため、試験片の両側面を観察し

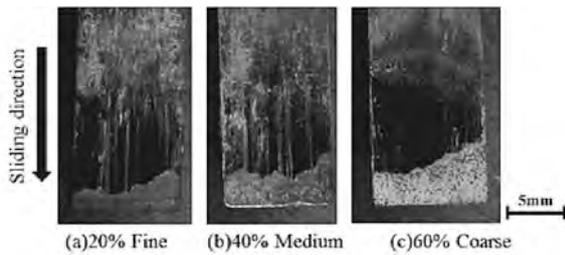


Fig. 13 Examples of wear track after hot wear resistance test

て、研削加工された表面から陥没している部分の長さ  $L_1$  と  $L_2$  とを光学顕微鏡下で測定し、両側面のそれらの値の平均値を摩耗痕の長さとした。

熱間摩耗試験に先だって、試験片中の NbC 粒の分布状況を予め撮影しておき、その撮影した像の中から摩耗痕の場所に対応した箇所の NbC 粒の面積率を求め、この値を Fig. 14 で求めた平均摩耗痕長さ  $L$  と対比した。結果を Fig. 15 に示す。過去の炭化物分散強化型工具の報告において、硬質物質の投入により摩耗痕の長さはどのようになるかを定性的に述べた文献<sup>5)</sup>はあるが、溶接層内の硬質粒の分率と摩耗痕長さを定量的に比較したものはほとんどなく、Fig. 15 は横軸の範囲が 10~50% 強と限定的ではあるが、有意義な比較であると考えられる。PTA 肉盛溶接層における NbC 粒の面積率が增加すると 20% までは顕著な摩耗低減効果が見られるが、それ以上ではその効果の程度は漸減することがわかる。また、この傾向は PTA 肉盛溶接層の NbC 粒の大小には依らないことを示唆している。溶接層内の NbC 粒の面積率とその大小は、PTA 肉盛溶接時に投入する NbC 粉の重量分率と大小とに対応しているので、巨視的な観点から述べれば、熱間加工用工具の耐摩耗特性は PTA 肉盛溶接に投入する NbC 粉の重量分率を上げれば向上するが、その効果は面積率 20% で収束する、とすることができる。

### 5. 考察

前節までの結果で NbC 粒で分散強化された PTA 肉盛層の熱間耐摩耗性の効果発現の傾向は明らかになったが、効果発現の作用メカニズムは明らかにはなっていない。ここでは摩耗痕表面のミ

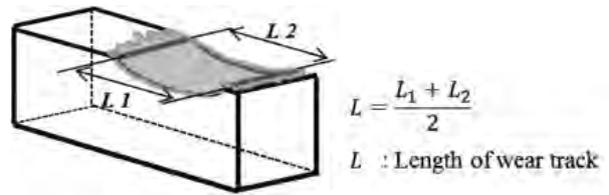


Fig. 14 Schematic illustration of method for measuring length of wear track

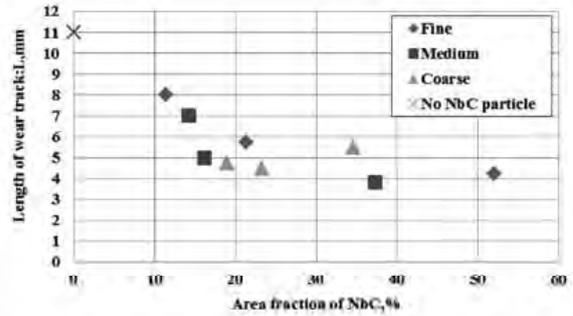


Fig. 15 Influence of area fraction of NbC particle in matrix on length of wear track

クロ観察を通じてそのメカニズムの推定を試みた。摩耗痕表面は主として回転する試験片から剥離したと推定される堆積物で覆われている。SEM-EDX を用いてその堆積物の成分分析を行った。もし摩耗痕が主として試験片側から剥離した堆積物で覆われているなら、摩耗痕には NbC や Nb、そして PTA 素材粉を構成する SUS309L の成分である Ni や Cr が検出されるはずである。一方、堆積物がディスク側から供給された材料で形成されているなら、堆積物にはこれらの元素は確認されない筈である。結果の一例を Fig. 16 に示す。堆積物には Nb の局在化が認められるが、対応した場所に C の局在化は観察されず、そこには O の局在化が認められる。また Cr や Ni の分布は明瞭ではなく、Fe の反応が強く出ている。この結果から、NbC 分散強化型工具と被加工材である S45C ディスクの摺動では、両者の間に何らかの潤滑作用のある物質が生成されると考えられ、その物質は Nb, Fe, O を含んでいる可能性が高いと推定される。Figure 13 および Fig. 16 からわかるように、NbC 分散強化型工具と鋼の摩耗形態はアプレシブ摩耗<sup>12)</sup>であるが、一部で凝着摩耗が起こった際、この物質がシビア・マイルド遷移<sup>13)</sup>を促し、NbC 分散強化

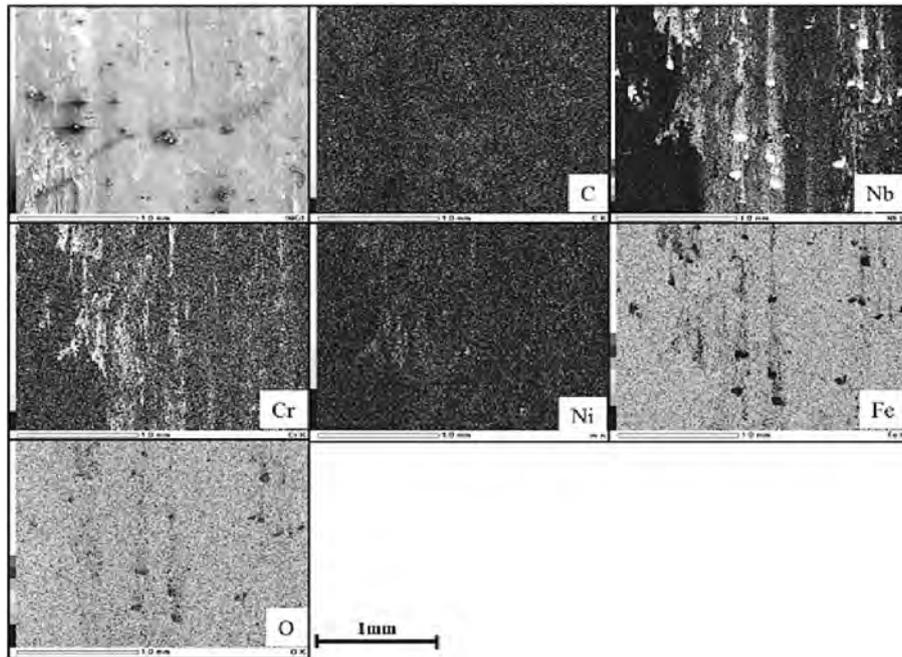


Fig. 16 Example of distributions of elements on wear track

型工具の耐摩耗性向上を促しているものと考えられる。

## 6. おわりに

PTA 肉盛溶接技術を用いて NbC を表層部に強制注入した工具は、ステンレス鋼やチタンなどの熱間圧延で用いられる場合に長寿命化効果を発現すると言われている。その効果発現メカニズムを、NbC 粒の粒度と分率を変化させた試験片を試作して熱間摩耗試験に供することで推定した。その結果、従来言われていた粗大 NbC 粒の使用ではなく、マトリックスに含まれる NbC 粒の面積率が効果発現の鍵であり、粒の大小は問わない、ということがわかった。強制注入する NbC の分率が 20% までであれば急激な摩耗低減効果が現れるが、それ以上の分率では、効果の拡大は限定的であることが判明した。マトリックスは NbC の強制注入によって極端に強化されることはなく、極少量の NbC の注入で一旦強化されるとそれ以上には強化されないこともわかった。また、熱間摩耗低減効果の発現の裏には、NbC 粒が酸化物となって何らかの作用を及ぼしていることが推定された。

## 文 献

- 1) 神戸製鋼溶接事業部門：技術ガイド, **205**, 5 (1987) 28.
- 2) K. TSUBOUCHI, M. AKIYAMA & T. OKUYAMA : Development and Optimization of Carbide- Reinforced Tools and Application to Hot Rolling of Stainless Steel, *ASME J. Tribology*, **119** (1997) 687-693.
- 3) M. AKIYAMA, K. TSUBOUCHI, T. OKUYAMA & N. SAKAGUCHI : Applications for Plasma Transferred Arc Welded Tools during Hot Steel Tube Making, *Ironmaking and Steelmaking*, **27**, 3 (2000) 183-188.
- 4) K. TSUBOUCHI, M. AKIYAMA & S. TSUMURA : Development of New Material and Heat Treatment for Tools Ensuring High Performance in Hot Seamless Tube Rolling, *Materials Science and Technology*, **16** (2000) 65-71.
- 5) K. TSUBOUCHI, M. AKIYAMA, M. TSUMURA & S. AMANO : Development of a Wear-Resistant Surface Layer for a Tool to be Used for High-Temperature Stainless Steel Rolling, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, **213**, Part J (1999) 473-480.
- 6) 清永：工具鋼 叢書・鉄鋼技術の流れ 第 2 シリーズ, 社団法人日本鉄鋼協会 (2000) 176-191.
- 7) 高橋・岡田・志田・中西：チタンへの炭化物分散による耐摩耗性改善, *鉄と鋼*, **77**, 8 (1991) 1336-1343.
- 8) 高橋・岡田・志田・桑山・阪上：炭化物分散耐摩耗チタン合金の開発, *まてりあ*, **34**, 5 (1995) 620-622.
- 9) 中島・山本：鉄鋼材料の熱間圧延における圧延ロールのトライボロジー特性, *大同工業大学紀要*, **31** (1995) 37-49.
- 10) K. TSUBOUCHI, M. AKIYAMA, E. YAMAMOTO & T. MASE : Development of a New Tool Material to Ensure High Performance in Hot Steel Rolling, *ASME J. Tribology*, **121** (1999) 7439-745.
- 11) ゲ ヴェ サムソノフ・イ エム ヴィニツキー：データブック 高融点化合物便覧, 日ソ通信社 (1977) 108, 304.
- 12) 日本トライボロジー学会：摩擦・摩耗試験機とその活用, *養賢堂* (2007) 1-16, 95-97.
- 13) 野呂瀬：摩耗機構の解析と対策, *テクノシステム* (1992) 3-32.
- 14) 日本規格協会：JIS ハンドブック 2 鉄鋼 II, 日本規格協会 (2003) 734-739.



## 特別研究員による成果



# 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総則の作成のため IEC/TC90 に設けられた WG13 のコンビナーとして国際的な調査研究を行ってきた。また WG5 のコンビナーとして 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国際標準案の提案を行った。以下それらの概要を報告する。

最近になり超電導応用製品の世界市場が立ち上がりつつあるが、それを反映して世界標準に適合した超電導製品の必要性が高まってきている。測定規格、製品規格等多くの世界標準の制定が必要となるが、まずそれらの規格の全体を統括する総則が必要となる。WG13 において 2010 年に示された方針に従い、実用超電導線材の製品規格に関する総則と測定規格に関する総則について検討を続けてきた。その後製品規格に関する総則は 2014 年に下記公表文献(1)のように”Technical Report”として発行された。測定規格に関する総則は本年 5 月に公表文献(2)のように国際標準として発行された。

測定規格の総則について簡単に紹介する。超電導線は同じサイズの通常のアルミニウムおよび銅線より何百倍もの電流を流すことができる。従って超電導状態で流すことのできる最大の電流値、すなわち臨界電流の測定方法を決めておく必要性が生ずる。また様々な環境下で使用される工業製品であるためその他の電磁氣的、機械的、熱的特性に関する測定方法についても測定規格の制定が必要となる。これらの種々な特性は大きく 2 つのカテゴリーに別けられる。一つは超電導線に特有な特性、すなわち臨界温度、臨界磁場、不可逆磁場、臨界電流、 $n$  値、交流損失等々である。第 2 のカテゴリーは機械的性質、銅比、残留抵抗等の材料としての特性であることが説明されている。これらの特性についての試験規格の制定が必要であるが、IEC-TC90 でこれまでの活動で制定されてきた国際標準の現状を記述し、今後の国際標準の取り組みについて提言している。

2012 から 2013 年度にかけて 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を世界 7 か所の研究グループで実施した。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を行った。その解析結果は公表論文(3)に報告した。IEC-TC90 に提案した国際標準案については下記公表文献(4)のように”New

Work Item Proposal”として本年5月に受理された。

2014年度の国際WG5においてはBSCCOおよびREBCO実用線材の液体窒素温度での引張試験方法について予備的な試験結果を参考に原案作成の検討が始められた。またMgB2線材の室温引張試験方法についてはイタリアの研究者がプロジェクトリーダーとなり原案作成を行うことが決められ、国際RRTには応用科学研究所も参加することにした。

### 3. 成果の公表

- (1) IEC TR 61788 - 20:2014 Ed.1.0:Superconductivity - Superconducting wires - Categories of practical superconducting wires - General Characteristics and guidance.
- (2) IEC 61788 - 21:2015 Ed.1.0:Superconductivity - Superconducting wires - Test methods for practical superconducting wires - General Characteristics and guidance, Intl. Standard.
- (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 61788 - XX:2015 Ed.1.0 NP: Superconductivity - Mechanical properties measurement - Room temperature tensile test on REBCO wires

報告書作成日 平成27年5月28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。

Type HT-CA(銅合金)や Type HT-SS(ステンレス)に用いる補強材と比べて飛躍的に高い降伏応力を有する Ni 合金を補強材に用いると、3-ply 加工時の Pre-tension を高めることが可能である。このため、3-ply 加工後には Type H 線材に高い残留圧縮歪み加わり、引張応力、引張歪みに対して優れた耐性を与えることができる。この補強材料を用いた新たな Type HT 材の開発が進められ、500MPa を超える引張強度が得られる線材が住友電工で開発されている。この線材について特性評価を行った。

この線材は 4.2K 磁場中臨界電流測定や両曲げ試験の結果より、4.2K への冷却や  $\phi$  40mm 以上の曲げ加工後も特性の劣化がないことが明らかとなった。300m の長尺 HT-NX 線材の 77K における臨界電流分布は全長に亘って均質な性能が得られることが示された。また短尺線材を対象に、引張試験と曲げ試験を実施し機械強度の信頼性を評価した。引張試験では、液体窒素中で 400MPa の引張応力を経験させた試料の  $I_c$  を試験前の  $I_{c0}$  と比較し、また曲げ試験では、室温で  $\phi$  40mm の両曲げを経験させた試料の  $I_c$  を  $I_{c0}$  と比較した。引張応力印加後は全てのロットにおいて 99% 以上の臨界電流維持率を示した。また、両曲げ試験後の臨界電流維持率も全て 98% 以上という高い水準を示した。超電導フィラメントの破断によって臨界電流が不可逆的に低下し始める際の維持率は 95% であることが知られているが、本試験ではこれを十分に上回る結果が得られているため、目標とする引張応力 400MPa、許容曲げ径 40mm を十分に満たしていることが確認された。

住友電工からの受託研究の結果、同社と共同で「超電導線材、および超電導線材の接続構造」と称する特許申請を行った。本発明は、超電導線材に関し超電導材料部を含む本体部を機械的に補強する補強部を備える超電導線材に関するものである。従来から超電導材料を線材に適用するに当たり、超電導材料部を含む本体部を機械的に補強する必要がある。超電導材料部を含む本体部と、超電導材料部を含む本体部を機械的に補強する補強部とを備える超電導線材が知られている。顧客の様々な要望に応じて、超電導線材を構成する構成要素(例えば、超電導材料部、補強部)

の材料、厚さなどが異なる超電導線材を準備する必要がある。そのため、顧客が求める超電導線材の様々な仕様に応じて、超電導線材を構成する構成要素の材料、厚さなどを設計しなければならない。

従来は、超電導線材の補強部に対する様々な要求に応じて、その都度、様々な材料の中から超電導線材の補強部に適した材料を探索していた。しかし、超電導線材の補強部に対する様々な要求に応じて、その都度、様々な材料の中から超電導線材の補強部に適した材料を探索することは、手間がかかる。また、超電導線材の補強部に対する要求に適した材料が見つからないため、超電導線材の一部の特性を犠牲にするように超電導線材の設計を見直さなければならないこともあった。そのため、超電導線材の設計の自由度が制約されていた。

本発明は、上記課題を解決するためになされたものであり、本発明の目的は、超電導線材の補強部に適した材料を探索する手間を減らし、超電導線材の設計の自由度を高めることである。本発明の一態様に係る超電導線材は、超電導材料部を含む本体部と、超電導材料部を含む本体部を機械的に補強する補強部とを備える。補強部は、銅または銅含有合金からなる第1の材料と、第1の材料と異なる第2の材料とからなる非固溶性銅系合金から実質的に構成される。本明細書において、非固溶性銅系合金は、銅または銅含有合金からなる第1の材料に、第1の材料と異なる第2の材料が固溶しない合金をいう。本明細書において、銅含有合金とは、銅と他の元素を含む合金をいい、他の元素は銅に固溶してもよいし、固溶しなくてもよい。本明細書において、非固溶性銅系合金から実質的に構成されるとは、非固溶性銅系合金に加えて、不可避不純物を含んでもよいことを意味する。

発明の効果の効果として、超電導線材の補強部に適した材料を探索する手間を減らし、超電導線材の設計の自由度を高めることができる。

### 3. 成果の公表

(1) Takayoshi Nakashima, Kohei Yamazaki, Shinichi Kobayashi, Tomohiro Kagiya, Masashi Kikuchi, Souichirou Takeda, Goro Osabe, Jun Fujikami, and Kozo Osamura ; Drastic Improvement in Mechanical Properties of DI-BSCCO Wire With Novel Lamination Material, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY Vol25, No.3 (2015) 6400705 (5pp)

(2) 特許出願「超電導線材および超電導線材の接続構造」 特願 2015-088658

報告書作成日 平成 27 年 5 月 28 日

# 超伝導臨界電流の一軸圧縮/ 引張歪依存性とその非対称性

特別研究員 長村光造

科学研究費助成事業 学術研究助成基金助成金（基盤研究 C）

## 1. 目的

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

## 2. 成果

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

臨界電流の一軸応力依存性の実験に関して応用科学研究所に所有する応力負荷環境下での臨界電流測定装置の試料ホルダー部分を本研究で提案するスプリングボードに交換し、圧縮側から引張側まで一軸性の応力を負荷して、無磁場のもとで臨界電流を測定する方法を完成した。これにより試料に貼り付けた歪ゲージにより負荷歪の関数として臨界電流を測定できるようになった。また磁場中臨界電流測定のため現有の臨界電流測定装置を改良して試料に磁場を印加するため、長さ 50mm、幅 20mm の試料範囲に均一磁場が印加でき、また磁場強度を変動できる装置の製作の検討を行った。

本研究の一部として Nb<sub>3</sub>Sn 線材の高性能化を図るため、高錫濃度ブロンズ合金の使用が有効と

考えられている。そのため大阪合金と共同で合金開発を行っているがその成果の一部を下記に報告する。実用 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の製造方法には Cu-Sn 合金（ブロンズ）と Nb の界面反応を利用したブロンズ法が広く用いられている。また、ブロンズに Ti 添加を行うと Nb<sub>3</sub>Sn の高磁界特性が明瞭に向上することが知られているが、熱間押出や冷間伸線加工におけるブロンズの塑性加工性に対しても、大きく改善させていることが最近明らかになってきた。ブロンズ中の Sn 濃度が α 相の Sn 固溶限（9.1at%Sn）以下の場合、Ti が Sn 及び Cu と三元化合物を形成して α 相中の実質的な Sn 濃度を引き下げて、冷間加工を容易にさせている。さらに Sn 固溶限を大幅に上回る高 Sn 濃度ブロンズでは、加工を阻害する粗大な δ 相（Cu<sub>41</sub>Sn<sub>11</sub>）の析出が抑制されて Ti 基三元化合物が優先的に生成する。それらは鍛造等により容易に微細分散させることができ、高 Sn 濃度ブロンズの冷間加工性が格段に向上して多芯線材の試作が行われている。このように、Cu-Sn-Ti 三元系ブロンズ合金は、Nb<sub>3</sub>Sn 線材の性能向上の突破口の一つであり、その材料科学的な詳細を理解することは非常に重要である。本研究では、高 Sn 濃度ブロンズ合金の金属組織並びに母材中に析出する Ti 基三元化合物について詳細な調査を行ってきた。

実験方法としては原料に電気銅板材（純度 3Nup）、Sn 塊材（純度 3Nup）及び Ti パイプ材（純度 2.5Nup）を用い、水田式溶製法により実験合金を溶製した。配合組成は Cu-10.5at%Sn-0.72at%Ti とした。溶製塊から約 10mm 角の立方体ブロックを複数個切り出し、所定の温度と時間の熱処理を大気中で行った。熱処理後は、炉内から素早く試料を取り出して水冷急冷し、熱処理条件下の組織の凍結を行った。熱処理後の試料は鏡面研磨を行った後、電界放出型電子線マイクロアナライザー（EPMA：日本電子製 JXA-8500F）で組織観察及び組成分析を行った。EPMA での定量分析は加速電圧 15kV、照射電流 20nA で、ZAF・補正法により行い、元素マッピングは加速電圧 15kV、照射電流 50nA で、ステージスキャン法（1000 倍）にて各元素の特性 X 線を検出した。得られた特性 X 線強度をしきい分けして、析出粒子の面積を画像解析により求めた。

先に奈賀等は、Cu-Sn-Ti 三元系において CuSn<sub>3</sub>Ti<sub>5</sub> 相と CuSnTi 相（以下 Ti<sub>135</sub> 相及び Ti<sub>111</sub> 相と略す）の存在を報告している。本研究においても、それら二種類の Ti 基三元化合物が EPMA による定量分析で確認された。Ti 元素のマッピングを行い、Ti の特性 X 線強度が濃度に比例するものとして、画像解析により Ti<sub>135</sub> 相と Ti<sub>111</sub> 相の割合を求めた。550°C の熱処理における Ti<sub>135</sub> 相と Ti<sub>111</sub> 相の面積割合の時間依存性を調査すると、凝固後の組織では、Ti<sub>135</sub> 相の面積が多く全体の 9 割以上を占める。その後、熱処理時間の経過とともに Ti<sub>111</sub> 相の面積比が急激に増加し、30min を過ぎ 60min になると割合が反転して、Ti<sub>111</sub> 相が主相となる。300min を過ぎると面積の変化は緩慢になるが、依然として 1440min においても Ti<sub>111</sub> 相の増加割合が正であることがわかる。熱平衡に達するためには更に時間がかかると推定されるが、550°C では Ti<sub>135</sub> 相から Ti<sub>111</sub> 相への相変態が起こると断定される。次いで、550°C で 1440 min の熱処理を行って Ti<sub>111</sub> 相が主相となった試料を初期状態とし、750°C での Ti<sub>135</sub> 相及び Ti<sub>111</sub> 相の面積割合の時間変化を調べた。750°C では、わずか 30min の等温保持で面積比が逆転し、Ti<sub>135</sub> 相が Ti<sub>111</sub> 相よりも大幅に多くなることがわかった。その後、100min の熱処理で Ti<sub>135</sub> 相の面積比はほぼ 100% になり、熱平衡状態に達している。550°C での相変態と比較すると、750°C の高温では熱平衡に達する変態時間が短くなると推定される。このように、Ti 基三元化合物相は高温では Ti<sub>135</sub> 相、低温では Ti<sub>111</sub> 相が主に存在することが本研究により明らかとなった。

最近では複数のメーカーから  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  ( $\text{RE}=\text{Y}, \text{Gd}$ ) テープ線が市販されるまでになってきている。これらの線材を超電導機器に使用するためには、諸特性を共通化された測定方法で比較検討することが求められる。本年度は特に 77K における機械特性、臨界電流の歪依存性等の測定を行い、測定方法の標準化(規格化)について検討したので報告する。

供試料には市販されている、ここでは A,B,C,D と称する 4 種類の REBCO テープ線材を用いた。島津製作所製引張試験機を用いチャック間距離 10cm で国際標準 IEC-61788-XX に準じて室温で引張試験を行った。さらに試料部分を液体窒素に浸漬し、同様の引張試験を行った。さらに引張試験とほぼ同様の試料配置で試料に電圧端子を取り付け、チャック部分から電流を流して I-V 測定を行い臨界電流及び  $n$  値を決定した。

室温および 77K で測定した引張試験結果を比較検討した。ヤング率は初期勾配および 0.2% 程度引張った後除荷したときの勾配とから決定した。また降伏条件を知るため 0.2% 耐力を求めた。一般的な傾向としてヤング率は 5% 程度 77K で大きくなること、降伏後の耐力は低温になると大幅に上昇することが明らかとなった。このような室温から 77K への機械的性質の挙動は妥当なものであり、このことより室温での試験方法に準じて液体窒素温度で行った試験結果は十分に再現性のある信頼性のある結果が得られた。この液体窒素温度での引張試験結果をもとに国際標準を提案する足がかりが得られたと考えられる。

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

実用超電導線を様々な応用に供するとき、機器の製作過程で機械的変形が加わり、また低温への冷却過程、磁場中で電流を流す動作中に引張、圧縮、曲げ等の様々な機械的変形が加わる。このような環境中で超電導線の健全性を前以て見定めておくことは重要である。ここで扱った可逆限界歪および応力は超電導線の安全な使用限界を与える重要なパラメータとなる。そこで国際標準によりその測定方法および決定方法を決めておくことは重要と考えられる。なおここでは  $I_{cr}/I_{c0}=0.99$  としたが、これが妥当であるかは議論がなされるべきところと考えられる。

### 3. 成果の公表

- (1) 谷口博康、長村光造、菊池章弘;  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超電導線用ブロンズ中の Ti 基三元化合物の挙動、低温工学50(2015)、186–193
- (2) 長村光造、町屋修太郎、西島元; 実用 REBCO テープ線の 77K における機械—超電導特性、第 91 回 2015 年度春季低温工学・超電導学会、講演概要集 88 頁

報告書作成日 平成 27 年 5 月 28 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

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やさらにITERプロジェクトに資することを目的とした研究を行う。

## 2. 成果

最近ITERプロジェクトに使用されるNb<sub>3</sub>Sn線材の臨界電流の歪依存性に関する国際ベンチマーク試験が実施された。臨界電流が極大になる印加歪の値は研究機関が用いたホルダーの構造により異なることが明らかにされた。このホルダー構造依存性を議論するためには真にNb<sub>3</sub>Snフィラメントに生起する局所歪を知らねばならない。本報告では中性子回折法で求めたNb<sub>3</sub>Snフィラメントに生起する局所歪の印加歪依存性およびその解析結果について報告する。

本研究で用いたブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材は国際ベンチマーク試験に用いられたと同じ Twente 大学で熱処理されたものであった。局所歪測定は中性子回折により格子定数変化を精密に測定する方法で J-PARC TAKUMI に装備されている低温引張装置を用いて実施した。本装置では線材の軸方向と横方向の歪を同時に求めることができる。また同時に複数の回折線を測定できるので、Nb<sub>3</sub>Sn の場合には(210)、(211)、(321)回折線から歪を求めた。

低温引張装置で到達最低温度まで冷却した状態で線材中の Nb<sub>3</sub>Sn フィラメントに生起する熱歪 ( $A_{Nb_3Sn}^T$ ) を測定後、線材に印加歪を与え、その時の格子歪 ( $A_{Nb_3Sn}^{lattice}$ ) を計測した。従って Nb<sub>3</sub>Sn フィラメントに生起する局所歪は  $A_{Nb_3Sn}^{local}(A) = A_{Nb_3Sn}^T + A_{Nb_3Sn}^{lattice}(A)$  で与えられる。8.5Kにおける Nb<sub>3</sub>Sn フィラメントに生起する局所歪の印加歪依存性については、線材軸方向の局所歪について熱歪は -0.22%の圧縮歪であり、外部から印加した歪に対してほぼ直線的に格子歪は増加した。3つの格子面から得られた格子歪の印加歪に対する勾配は(210)面からの値が明らかに小さい。これは[210]方向のヤング率が他に較べて大きいことと矛盾しない。

印加歪を増加させて行くと、ある値( $A_{ff}$ : force free strain)で局所歪はゼロとなる。ここで線材の軸方向の Nb<sub>3</sub>Sn フィラメントに生起する局所応力はゼロとなる。Nb<sub>3</sub>Sn 線材の臨界電流極大に関していくつかの理論があるが、その妥当性を議論するために重要なデータである。国際ベンチマーク試験の報告によれば臨界電流極大はホルダーとして Ti-Al-V および Cu-Be を用いたときに 0.10% および 0.33% の印加歪のときに出現していた。

一方線材の横方向の局所歪の変化については、熱歪は引張性で 0.043%であり、印加歪とともにほぼ直線的に圧縮方向に減少する。横方向の force free strain は線材軸方向の値とは異なっている。すなわち偏差歪が完全にゼロになる状態は出現していない。

銅およびブロンズマトリックスの格子歪の印加歪依存性に関しては、ブロンズ中のスズ濃度は最初 15.5wt%であったが Nb<sub>3</sub>Sn の生成により 0.9wt%に減少しており、観測された回折線は重なっておりここでは一つの相と仮定して解析を行った。格子歪の印加歪依存性は典型的な弾・塑性挙動を示す。塑性変形の程度は[111] > [220] > [200]の順に大きくなるが、各々の結晶軸方向のヤング率の大きさの関係している。

本研究では Nb<sub>3</sub>Sn 線材を構成する超電導フィラメント、Nb バリヤー、Cu およびブロンズの極低温における局所歪の挙動を詳細に解析した。これらのデータをもとに今後臨界電流極大と局所歪の関係について明らかにしてゆきたい。

### 3. 成果の公表

Kozo Osamura, Shutaro Machiya, Stefanus Harjo, Tatsushi Nakamoto, Najib Cheggour and Arend Nijhuis ; Local Strain Exerted on Nb<sub>3</sub>Sn Filaments in an ITER Strand, Supercond. Sci.Technol.28(2015),045016(9pp)

報告書作成日 平成 27 年 5 月 28 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

大型から小型までの絵画等を超細密にスキャンし、実物の持つ情報（寸法、色彩）を正確に記録、表示できる技術について研究開発を行う。

## 2. 成果

本研究開発内容は、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、オーストラリア、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 응용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(26年度)は、京都大学井手研究室の姉妹研究室として University of New South Wales (オーストラリア) に文化財デジタル化拠点を設定した。そのことによって、その他オーストラリアの主要な大学、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月のシドニーでのシンポジウムで発表・公開をした。25年の香港での共同研究の一環として、26年も香港城市大学と共同で人材育成プログラムを実施し、中国の主要大学からの文化財、図書館の専門家に日本の最新のデジタル技術を紹介した。また、京都大学井手研究室の画像入力・処理技術は中国(内モンゴル)においても約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(25年度に続き2回目)。

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。

本年度先端イメージング研究室の取り組みを紹介する、国際記者説明会を実現し、イタリア、ドイツ、韓国、中国などの技術部、文化部の記者発表を行い、国際的に取り上げられた。

### 3. 成果の公表

(1)Ryo Ogino, Toque Jay Arre, Zhang Pengchang, Ide-Ektessabi Ari; A High Speed Dynamic System for Scanning Reflective Surface with Rotating Polarized Filter, Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection Volume 8740, pp59-69

報告書作成日 平成27年6月2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

次世代高速増殖炉において重要とされる金属流体電磁ポンプ解析の基礎となる非圧縮性電磁流体解析のため、非圧縮性流体解析と電磁界解析を交互に行う弱連成解析ソフトウェアの開発を目的とする。そして有限要素解析において有用性の高い代数マルチグリッド法の応用を行う。

## 2. 成果

非圧縮性流体解析においては、1) Navier-Stokes 方程式と 2) 非圧縮性条件式とに通常の Galerkin-有限要素法を適用すると移流項と非圧縮性に起因する不安定性が問題となる。本研究では安定化有限要素法として、SUPG(Streamline Upwind Petrov-Galerkin)/ PSPG(Pressur Stabilizing Petrov-Galerkin)法を採用した。本研究の場合 GLS 法 (Galerkin/Least-Square method)と等価である。これは節点有限要素法を用いる。非圧縮性流体解析に現れる大規模連立一次方程式の反復解法として GPBi-CG(Generalized Product-type method on Bi-CG)を採用した。全体係数行列は CRS(Compressed Row Storage)形式で格納する方式を採用している。今年度 3次元の流体解析コードの改良を行った。係数行列の計算式を  $4 \times 4$  の行列演算を多用する形にしてプログラムを見通しの良い形に改良したものである。今年度扱う具体的問題として外部磁界印可 lid-driven cavity flow をとりあげ、このための解析プログラムの整備を進めた。外部磁界として今回は一定磁界を考えることとした。電磁界解析法として、一般に 1) A 法と 2)  $A \cdot \phi$  法と電流発散項 = 0 の拘束条件が考えられるが、本研究では係数行列の優対角性を重視して、A 法を採用するのが良いことがわかった。

以下、科学研究費助成事業の研究成果報告書より掲載する。

報告書作成日 平成 27 年 6 月 24 日

## 1. 研究開始当初の背景

2011年の東北大地震とそれに続いた福島事故の影響は大変大きく、以来高速増殖炉や関連機器である電磁ポンプに対する関心、特に実験的研究に対する関心は大幅に低下した。また研究代表者の身分、所属に変化が生じ、実験的研究の継続が不可能となったため、より基礎的な非圧縮性電磁流体に関する流体-電磁界連成有限要素解析のためのソフトウェア開発を中心とすることとした。

## 2. 研究の目的

電磁ポンプなど電気機器解析への応用に鑑み、本研究では差分法ではなく、有限要素法による非圧縮性電磁流体の流体-電磁界連成解析のソフトウェアの開発を目的とする。マルチフィジックス解析で大規模な計算量となるのでマルチグリッド法による高速化を試みる。

## 3. 研究の方法

流体-電磁界連成解析の方法としては、時間発展に沿って有限要素法による流体解析と電磁界解析を交互に行う方式を採用した。まず2次元解析ソフトウェアを開発し、直線状流路における移動磁界による流体駆動問題を解析した。その後3次元解析のソフトウェアの開発を行い、磁界印可 cavity flow 問題に適用した。記述の簡潔性のため、(1)、(2)、(3)で2次元解析について説明し、(4)で3次元開発での特別の点に触れる。

### (1) 安定化有限要素法による流体解析

#### ① 非圧縮性粘性流れの支配方程式

非圧縮性粘性流れの流体解析における基礎方程式は以下のように記述される。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p - \mu \nabla^2 \mathbf{u} = \rho \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\mathbf{f}$  はそれぞれ、速度、圧力、密度、粘性係数、単位質量あたりに働く外力（ここではローレンツ力を想定）である。

#### ② SUPG/PSPG 法による離散化

式(1)(2)に一般的な Galerkin 有限要素法を適用すると、移流項と非圧縮性に起因する不安定性が問題となる。本研究では、式(1)(2)に対して SUPG (Streamline Upwind Petrov-Galerkin)/PSPG (Pressure Stabilizing Petrov-Galerkin)有限要素法による離散化を行うことで安定な流体解析を行う。このとき最終的な方程式が非線形となることを避けるため、式(1)の移流項（第2項）については移流速度に陽的近似を用いる。

有限要素法の形状関数としては、 $\mathbf{u}$ ,  $p$  の両方について三角形1次要素を使用する。

### (2) 有限要素法による電磁界解析

#### ① 電磁界の基礎方程式

本研究で扱う電磁流体は良導体とみなせるため、マクスウェル方程式中の変位電流の項を無視する準定常解析を行う。ベクトルポテンシャルを未知数として整理した基礎方程式は、以下のように表される。

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{A}$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  はそれぞれ、透磁率、導電率を表す。

#### ② 有限要素法による離散化

式(3)について、Galerkin 有限要素法による離散化を行う。有限要素法の形状関数は2次元解析では三角形1次要素を用いるものとし、流体解析と共通の三角形分割を使用する。電磁界解析により得られた電磁界分布から、式(1)中の  $\mathbf{f}$  に相当する電磁力を求め、次のタイムステップの流体解析で使用する。

#### (3) 代数マルチグリッド法による高速求解

上述した有限要素法による流体解析・電磁界解析のいずれにおいても、最終的に線形連立方程式を解くことが求められる。これらの線形連立方程式を標準的な解法によって解く場合、解析の大規模化にしたがって計算時間が爆発的に増大する。そのため、本研究で現れる線形連立方程式に適した効率的な高速求解法の検討が重要となる。

本研究では、代数マルチグリッド法の応用による線形連立方程式の求解について検討を行った。代数マルチグリッド法は、偏微分方程式の離散化によって現れる大規模連立方程式に対して有力な高速求解法の一つである。

#### ① 流体解析の連立方程式の求解

SUPG/PSPG 法により式(1)(2)を離散化して得られる線形連立方程式は、2次元解析では以下の形で表される。

$$\begin{pmatrix} A_{uu} & A_{uv} & A_{up} \\ A_{vu} & A_{vv} & A_{vp} \\ A_{pu} & A_{pv} & A_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_u \\ \mathbf{x}_v \\ \mathbf{x}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_u \\ \mathbf{b}_v \\ \mathbf{b}_p \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、添字付きの  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{b}$  はそれぞれ、SUPG/PSPG 法により導かれた方程式の係数行列、解ベクトル、右辺ベクトルを構成する要素である。添字の  $u, v, p$  はそれぞれ、当該の行列・ベクトルが流速の  $x$  成分、流速の  $y$  成分、圧力に関連していることを示す。3次元解析では流速の  $z$  成分の項が付加される。

式(4)の係数行列は非対称であるため、非対称行列を対象とした反復解法 GP-BiCG 法を適用し、その前処理として代数マルチグリッド (Algebraic Multigrid, AMG) 法を使用する。以下では2次元解析について述べる。

本研究では、優対角性を持つ行列に対して

有効性の高い Stüben の代数マルチグリッド法の使用を検討するが、式(4)の係数行列は優対角性を一般には満たさない。しかしながら行列  $A_{pp}$  は近似的に優対角行列とみなすことができるため、以下の行列

$$\begin{pmatrix} I & O & O \\ O & I & O \\ O & O & A_{pp} \end{pmatrix} \quad (5)$$

を考え、この行列に対して代数マルチグリッド法を適用したものを、GP-BiCG 法の前処理とする方法を検討する。式(5)中の  $I$  は単位行列、 $O$  は零行列を表す。

## ② 電磁界解析の連立方程式の求解

Galerkin 有限要素法により式(3)を離散化して得られる線形連立方程式の係数行列は、上記の  $A_{pp}$  と同様に、近似的に優対角行列とみなすことができる。また、その係数行列は ( $A_{pp}$  と同じく) 実対称でもある。したがって電磁界解析で現れる線形連立方程式については、実対称行列を対象とする反復解法 CG 法を適用し、その前処理として Stüben の代数マルチグリッド法を使用する。

## (4) 3次元解析-磁界印可 cavity flow 問題

電磁界解析を行う。支配方程式は以下となる。記号は2次元の場合と同じである。  
流体領域(1)

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p - \mu \nabla^2 \mathbf{u} = \rho \mathbf{f} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{u} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right) = 0 \quad (8)$$

流体外領域(2) ( $\sigma = 0$ )

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = 0 \quad (9)$$

メッシュ分割は四面体分割で、流体領域では流体解析と電磁界解析とがメッシュを共有している。流体解析は四面体1次要素の節点有限要素法を用い、電磁界解析では1次の辺要素有限要素法を用いる。

## 4. 研究成果

### (1) 数値解析結果

#### ① 直線状流路における移動磁界による流体駆動

図1に示す長さ25、幅4(無次元長)の直線状流路を考え、正弦波状の移動磁界による金属流体の駆動を想定した連成解析を行った。流体解析の境界条件として、流路の側壁ではすべり条件(流速の  $x$  成分が0)、上流および下流側の境界については、トラクション・フリー条件を与えた。電磁界解析については、図1の灰色の部分に印加する周期8(無

次元時間)の移動磁界に対応した境界条件を設定した。

初期流速を零とし、時刻10(計算ステップ数1000)まで流体-電磁界連成解析を行って得られた流速分布を図2に示す。磁界印加領域以外ではほぼ一様な  $y$  方向流れが起きており、想定に適合した結果が得られている。磁界印加領域で流れが一様でないのは、電磁流体中に発生する誘導電流が流路中央付近で印加磁界を打ち消すためと考えられる。

図3に、各計算ステップにおいてGP-BiCG法・CG法の収束に要した反復回数を示す。

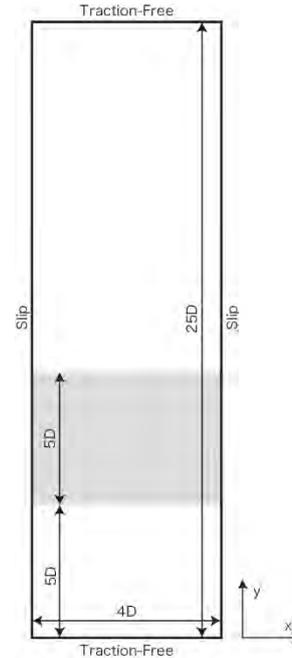


図1 直線状流路モデル

(磁界印加領域は灰色の部分)

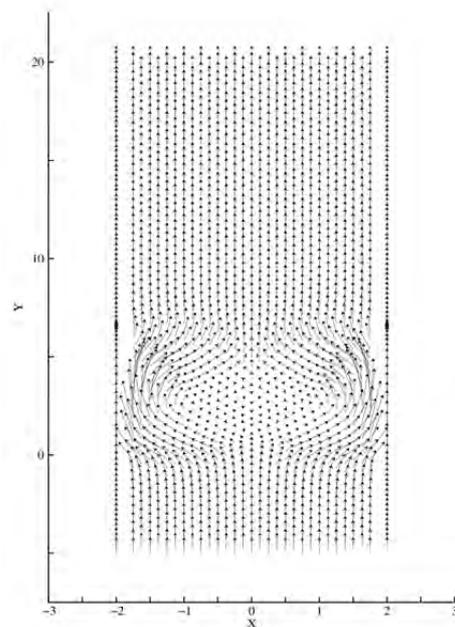


図2 流速分布(磁界印加領域付近)

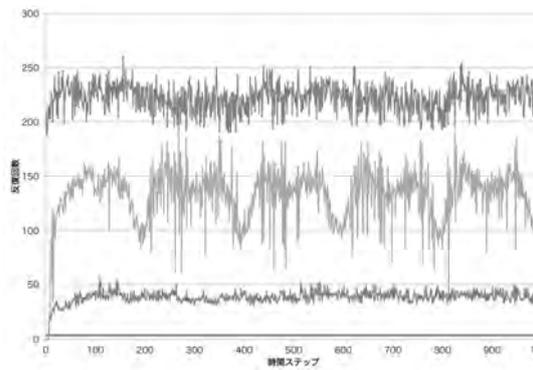


図3 反復回数の推移

[緑：流体解析（前処理無し）、青：流体解析（AMG 前処理）、紫：電磁界解析（前処理無し）、赤：電磁界解析（AMG 前処理）]

比較のため、前処理無しの場合の結果も示している。電磁界解析における代数マルチグリッド法の効果は顕著で、反復回数を劇的に削減することが出来ている。流体解析においては式(5)に代数マルチグリッド法を適用する形をとっているためその効果は限定的ではあるが、平均して反復回数を1/5程度に削減できた。本連成解析において検討した代数マルチグリッド法の導入は有効であったといえる。

② 一定磁界印可 lid-driven Cavity Flow 問題(3次元)  
立方体領域

$$0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq L, 0 \leq z \leq L$$

を考える。速度の  $x, y, z$  成分  $u, v, w$  の壁面での境界条件として

$$u = 1, v = 0, w = 0 \quad (z = L)$$

その他の壁面で  $u = v = w = 0$  とする。 $z$  軸方向に一定磁界  $B_0$  を印可したときの非圧縮性電磁流体解析を問題とする。磁界解析領域は

$$-d \leq x \leq L+d, -d \leq y \leq L+d, -d \leq z \leq L+d$$

とする。計算では  $L=1, d=0.1$  とした。

一定磁界はベクトルポテンシャルの固定境界条件を指定することにより指定した。レイノルズ数 1000、磁界なしの場合の中心点周りの速度  $u, w$  プロフィールを図4に示す。流体領域で、ノード点数 9261、四面体数 48000 のメッシュを用いた。

レイノルズ数 1000、磁気レイノルズ数 1、ハルトマン数 10 の場合の中心点周りの  $u, w$  速度プロフィールを図5に示す。流体解析—電磁界解析の連成解析が安定的に行えていることがわかる。

電磁界解析の連立一次方程式の反復回数及び流体解析における反復回数を計算ス

テップの推移とともに図6に示す。なお、AMG法による計算の高速化は duct flow 問題の場合にとどまり、Cavity flow 問題の場合は課題として残った。

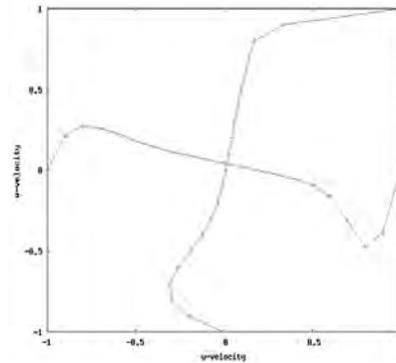


図4 中心点周りの速度プロフィール  
Re=1000 磁界なし

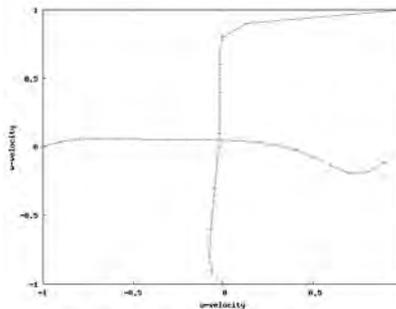


図5 中心点周りの速度プロフィール  
Re=1000, Rm=1, Ha=10

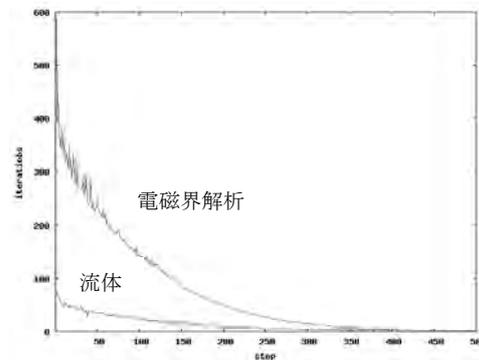


図6 連立一次方程式求解の反復回数  
上線：電磁界解析、下線：流体解析

電磁ポンプの解析で、文献 (N. Takorabet: Computation of Force Density Inside the Channel of an Electromagnetic Pump by Hermite Projection, IEEE Trans. Mag. Vol. 42, pp. 430-433, (2006)) に見られるように、流体の流速一定の近似を用い、電磁界解析にフーリエ変換法が用いられることがあるが、本研究においても、研究初期の予備的手法として、フーリエ変換法を採用し、電磁ポンプの側壁が絶縁体の場合と導体の場合とについて、側壁に流れる渦電流により、時間平均推進力にどの程度の違いがみられるかの研究を行った。(学会発表論文参照)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

(1) 島崎眞昭: フーリエ変換を用いた液体金属用電磁ポンプの準定常解析、電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-12-92, RM-12-107, pp.77-80, 2012

(2) M. Shimasaki: A Fourier Analysis of Flat Linear Induction Electromagnetic Pumps for a Liquid Metal, CEFC2012, Poster Session MP1, 2012.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

島崎眞昭 (公益財団法人応用科学研究所)

研究者番号: 60026242

### (2) 研究分担者

美船健 (京都大学大学院工学研究科)

研究者番号: 20362460

## 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る。高温超伝導線材ならびにそれをもって構成された大電流高温超伝導導体の電磁特性についての知見の体系化をはかり、関連する研究領域における国際連携と研究成果の広報・社会還元を進めることが本研究の目的である。

## 2. 成果

### (1) 高温超伝導線材の電磁特性についての知見の把握・体系化

高温超伝導線材の電磁特性については、様々なプロジェクトの中で、交流電損失測定、SQUID磁化計による磁化緩和測定、臨界電流測定などを行った。これらの測定結果から、超伝導線材固有の電界—電流密度 ( $E-J$ ) 特性についての知見を把握し体系化を進め、これらを交流損失やマグネット発生磁界精度の理論的検討を行うための基礎データとすることができた。

### (2) 大電流高温超伝導導体の電磁特性についての知見の把握・体系化

テープ状の高温超伝導線材一本あたりに流せる電流は数百アンペア程度であり、大型のマグネット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、高温超伝導線材を複数本集合化する必要がある。このような集合大電流高温超伝導導体の代表例であるロエベルケーブル(図 1)を対象として、その電磁特性についての知見の把握と体系化を進めた。

前年度から整備を進めてきた超伝導線材の非線形な導電特性とロエベルケーブルの三次元的構造を考慮した電磁現象シミュレーションモデルを利用して、ロエベルケーブルの電磁特性の解明を進めた。具体的には、ロエベルケーブルを発電機や変圧器といった電力機器に用いることを想定して、ロエベルケーブルを交流で用いた際に発生する交流損失の理論的評価を行った。その結果、ロエベルケーブルの幾何学的構造パラメータ(素線数、転位長、素線間ギャップなど)が交流損失に与える影響について、体系的に把握することができた。さらに、ロエベルケーブルを超高エネルギーの粒子加速器用マグネットに利用することを想定し、ロエベルケーブルの素線の中の非一様電流分布が磁界精度に与える影響についての研究にも着手することができた。

### (3) 高温超伝導線材・大電流導体の電磁特性についての国際動向調査と国際連携推進

高温超伝導線材・大電流導体の電磁特性に関して、海外の諸会議に参加し、また、海外の諸研究機関・大学を訪問して動向調査を行った。高温超伝導大電流導体は、高温超伝導の大型応用の

研究開発の鍵となるものであるが、日本における研究開発は限定的である。しかるに、海外では、特に欧州を中心に、将来の物理研究のための超高エネルギー粒子加速器用の超伝導マグネットや大型電力機器、核融合への応用を目指したロエベルケーブル、核融合への応用を目指したスタック・ツイスト導体といった大電流導体の開発が着実に進められていることを動向調査により把握することができた。これを踏まえ、特に、ロエベルケーブルを対象として、欧州原子核研究機構を中心とした国際連携を推進した。

アンカラ大学の超伝導研究センター(CESUR)を相手方として、トルコにおける超伝導応用研究に対する協力を進めた。超伝導線材に交流電流を流したときに発生する交流損失の測定技術の指導、当該研究センターにて整備を検討している伝導冷却による超伝導線・コイルの試験装置の設計に関するコンサルティング等を行った。交流損失は超伝導を様々な交流電力機器で用いる際に問題となるものである。トルコのように将来の電力需要の伸びに応じて電力システムの増強が期待される国において、超伝導電力機器の導入・実用化を考えていく上で、交流損失の研究は重要である。また、トルコは硼素の資源量が豊富であることから、二硼化マグネシウムという日本発の超伝導材料に特に注目している。伝導冷却による超伝導線・コイルの試験装置は、将来的には、この二硼化マグネシウムの超伝導線やコイルの試験を意識したものである。トルコとの国際連携も着実に進捗し、これまでの実績を踏まえ、日本学術振興会の二国間協力事業への応募を検討する水準に達することができた。

#### (4) 関連する広報・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、前年度に続き、低温工学・超電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。平成 26 年度の市民公開講座は福島市で開催され、約千人の来場者を得ることができたが、特に、研究員は、超伝導に関する講演を担当した。

### 3. 成果の公表

T. Tsukamoto, T. Mifune, Y. Sogabe, Z. Jiang, T. Nakamura, and N. Amemiya ; Influence of geometrical configurations of HTS Roebel cables on their AC losses ,IEEE Trans.Appl. Supercond., Vol.25, No.3,4802005,6,2015

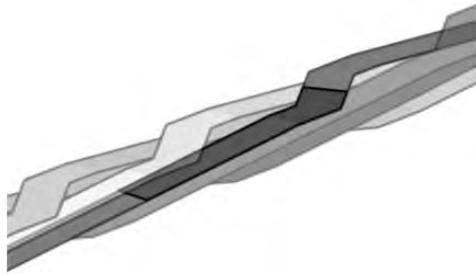


図1 ロエベルケーブル

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。



図2 アンカラ大学の超伝導研究センター（建設中の写真）

報告書作成日 平成 27 年 6 月 30 日

# 自動車用ガスディスチャージランプ ～ 始動メカニズム解明 ～

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

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

## 2. 成果

### <目的・背景>

自動車用ヘッドランプに用いられている無水銀 HID ランプの始動電圧に関して、過去の実験より発光管材質が始動性能に影響を及ぼす、かつランプ近傍の近接導体が始動性能に影響を及ぼすという実験結果が得られている。一昨年度の実験で、発光管の外側で微放電が発生しており、発光管外部の電荷が始動性能に影響を及ぼしそうだという結果が得られた。本年度は、それらをシミュレーションにより明確にしていくことを目的とする。シミュレーションに使用したソフトは COMSOL multiphysics®である。

### <結果および考察>

まず、発光管材質が始動性能に影響を及ぼす実験結果を図 1 に示す。そして、発光管形状が同じで材質のみが異なる場合のシミュレーション結果を図 2 に示す。図 2 は、発光管内部の電界強度に大きな変化は及ぼさない、というシミュレーション結果をしめしている。そこで、実際のランプ形状を正確に得測定し、その条件でのシミュレーションを行った。その発光管蛍光と計算結果を図 3 に示す。その結果、発光管材質はランプ内部にさほど影響を及ぼさず、むしろ発光管の外部の電界に影響を及ぼすことが確認できた。

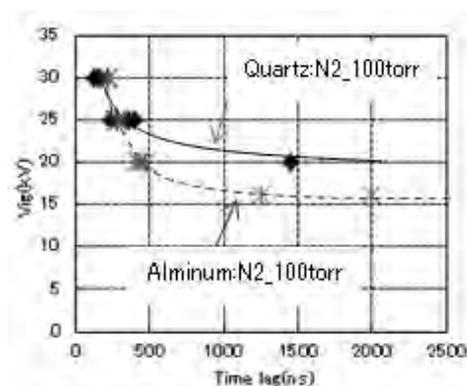


図 1 発光管材質による始動性能の差

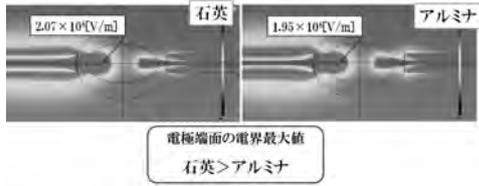


図2 発光管材質がランプ内部の電界強度に及ぼす影響



図3 実形状におけるシミュレーション結果

次に、発光管近傍の近接導体が始動性能に影響に関する実験結果を図4に示す。そして図5始動時の発呼状態を写真撮影した結果を示す。これらの結果は、発光管材の外側に導体がある場合、始動性能が向上することと放電の形状が変わる（導体に沿った形状になる）ことを示す。また、発光管が外部の金属の電位は影響が小さいことがわかる。これらを基に、発光管外部に電荷が蓄積された場合、そしてその電荷が正あるいは負のばあい、発光管内部の電界強度にどのような変化が起きるのかをシミュレーションにより調べた結果を図6に示す。この結果より、電荷量が大きくなると発光管内部の電界強度は上昇すること、電荷量がある程度以上になると、その種類（正負）は影響を及ぼさないことが確認できた。

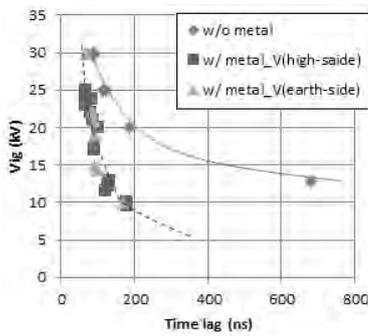


図4 発光管近傍の導体が始動性能に及ぼす影響



図5 近接導体有り無しでの放電形状の違い

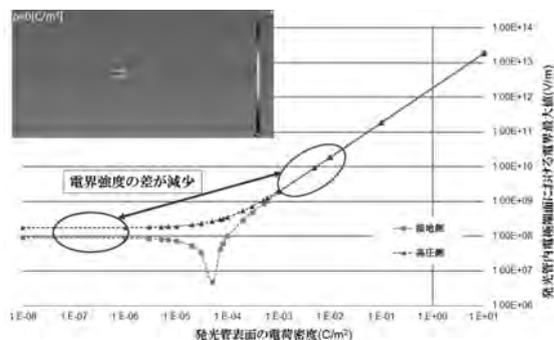


図6 発光管外部の電荷の量・種類（正負）が発光管内部の電界強度に与える影響

始動電圧を低減させるには、発光管外部の電荷を蓄積させることが有効であること、発光管の形状や発光管外部の電界強度に影響を及ぼすこと、が確認できた。近接導体の結果を踏まえ、今後は、発光管外部にどのように電荷を蓄積させるかを検討していく予定です。

### 3. 成果の公表

(1)植月唯夫、嶋田賢男、小野田幸央、津田俊明、志藤雅也；無水銀メタルハライドランプの始動メカニズムに関する研究、照明学会誌、第 98 巻、第 8A 号 pp.346-351、2014

(2)山本遼太、嶋田賢男、植月唯夫；自動車ヘッドランプ用 HID ランプの始動電圧低減方法の検討、平成 26 年度(第 47 回)照明学会全国大会(2014 年 9 月 5 日)

報告書作成日 平成 27 年 5 月 7 日

# 安全情報を伝えるメディアの研究（その2）

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よう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

平成 25 年度の先行研究、および平成 26 年度に併行して行われた研究によって得られた知見を生かして、その成果として提案された漫画の作成を実際に具体化することを目標に研究活動を企画した。安全情報を伝えるメディアの具体的な姿を求めて、アニメ、漫画、紙芝居などを含めて、さまざまな手法を比較検討する中で、実際にメディアを制作してその効果を実験的に調べた結果、有効な手段の一つとして漫画を作成し、その効果を調べることを目指した。

漫画の作成を漫画家に依頼し、その提案をもとにして、さまざまな分野から編成した検討会議を繰り返して、宇宙の始まりから地球の近未来までのストーリーを試行的にまとめた。その漫画の実例を下記に示す。

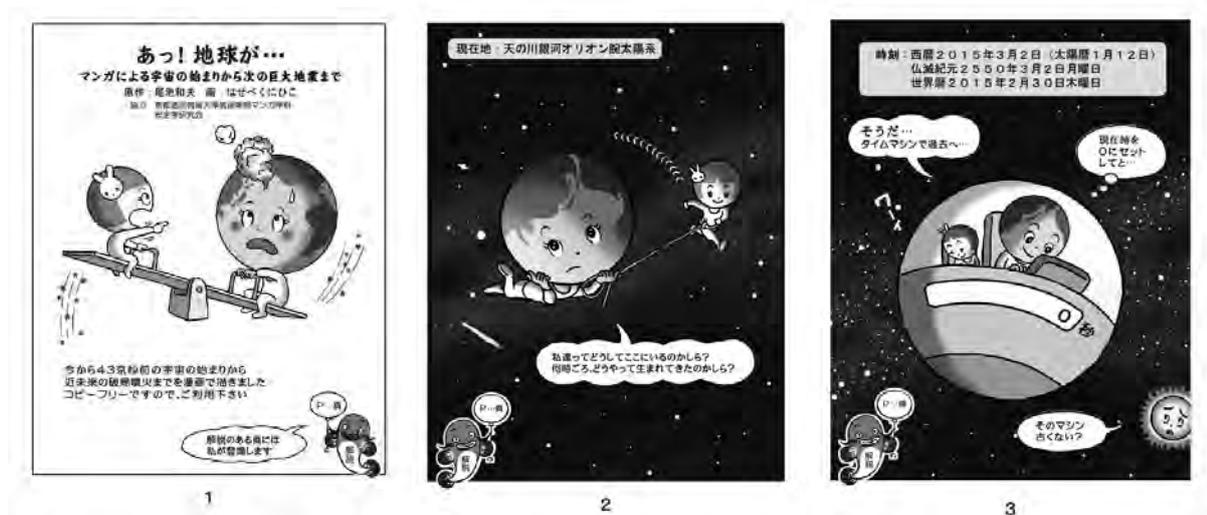


図 漫画の最初の部分を例示

漫画本の仮の題は『あっ！ 地球が・・・』、副題として「漫画による宇宙の始まりから地球の近未来まで」としている。

それぞれの駒の隅に「解説なまず」を登場させ、それがあある画面については、後半に詳しい解説を設け、知識を深めたい人のための学習を可能とする内容としている。その最初の部分を下記に示す。

・・・・・・・・・・・・・・・・

#### 【解説なまずのページ】

漫画での理解を深めるために、科学者の持っている知識を少し翻訳しながら、解説なまずに解説してもらうことにしました。漫画のページの下に隅に解説なまずが登場すると、この解説なまずのページに、何らかの関連する解説が出ているというサインです。別にそれを読まなくても、漫画をめくっていくと、宇宙の始まりからの歴史が何となくたどれるようにしたつもりです。でも、解説を読むと、また少し深い理解が得られるかもしれません。

解説なまずのページだけを読んでも、何らかの知識が得られるように、お互いに独立して使えるように心がけました。

このような組み立ての本が役立つかどうか、初めての試みをご覧いただき、皆様からのご意見をいただきたく存じます。

それでは、私たちのいる宇宙の旅を、137億年前から近未来までの旅を、短時間で体験してみてください。

#### 【タイムマシンに乗って】（漫画ページ2～3）

宇宙が生まれ、太陽が生まれ、太陽系が構成されて、その中に地球が生まれ、そして月が生まれました。太陽の名は、ソルクン、地球はテラさん、月はルナさんと呼ぶことにしました。（中略）

#### 【宇宙の始まりを観る】（漫画ページ4～5）

私たちの観測できる宇宙は、今から、 $137.72 \pm 0.59$ 億年前に始まったとされています。その永い時間を、私たち人間の脈拍のリズムに置きかえてみました。脈拍のリズムは、1ヘルツ、つまり1秒間に1回のリズムです。それを単位として、 $137.72 \pm 0.59$ 億年を数えると、今から43京5千2百兆秒 $\pm$ 1千8百兆秒前に私たちのいる宇宙が生まれたこととなります。（後略）

・・・・・・・・・・・・・・・・

このように、実際の制作を進めるとともに、その効果を広い分野の人びとの理解度から調べ、さらに充実したものに仕上げることを引き続き目指すこととしている。

### 3. 成果の公表

尾池和夫（単著）；2038年南海トラフの巨大地震、マニュアルハウス、2015

報告書作成日 平成27年5月29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

受託先名：株式会社ダイヘン 分散電源システム事業部

## 1. 目的

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

## 2. 成果

配電系統においては、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策を提案する。特に、合意アルゴリズムや価格提示アルゴリズムによって分散協調的な制御アルゴリズムを開発しており、シミュレーションならびに模擬電源実験装置によって提案法の有効性を確認している。本件については学会発表を行っている。

## 3. 成果の公表

- (1) 石井貴弥、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；価格提示を利用した配電系統電圧の分散制御に関する考察、第 57 回自動制御連合講演会、群馬、2014 年 11 月 10-12 日
- (2) 阿久津慧、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；価格提示による大規模太陽光発電インバータ群の負荷分散制御、第 57 回自動制御連合講演会、群馬、2014 年 11 月 10-12 日
- (3) 石井貴弥、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；価格提示を利用した電圧上昇抑制分散制御、SSI2014、岡山、23<sup>rd</sup>、November、SS5-8、2014
- (4) 阿久津慧、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；価格提示による大規模太陽光発電インバータ群の分散型電圧抑制、SSI2014、岡山、23<sup>rd</sup>、November、SS5-9、2014
- (5) 石井貴弥、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；価格提示を利用した配電系統電圧の分散制御、SICE 第 2 回制御部門マルチシンポジウム、東京、2015 年 3 月 6 日

(6) 阿久津彗、平田研二、大堀彰大、服部将之、太田快人；価格提示を用いた系統連系インバータ群による連系点電圧制御の実機検証、平成 27 年度電気学会全国大会、東京、2015 年 3 月 25 日

報告書作成日 平成 27 年 6 月 29 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：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や昇降機構をもったロボットの制御について、問題点を抽出することを目的とする。

## 3. 成果の公表

今年度は、成果公開をする発表はありません。

報告書作成日 平成 27 年 6 月 29 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 26 年度に商用化が達成された。酸性電解質を用いる燃料電池では電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電極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並びに触媒担体の安定性について詳細に検討する。

## 2. 成果

燃料電池の触媒担体には比表面積の大きい炭素材料が用いられる。この炭素担体の酸化還元に対する安定性は燃料電池の寿命に大きな影響を与える。これまで、水溶液中における過酸化水素による黒鉛表面の酸化や、プロピレンカーボネート(PC)を用いた系でのリチウムの挿入時の黒鉛表面の剥離などを明らかにしてきた。

還元に対する安定性は燃料電池の条件では課題となることは少ないが、炭素材料の表面欠陥などからのアニオンの挿入は燃料電池の条件でも起こりうることである。そこで、本年度は黒鉛への挿入に対する溶媒並びに添加物の影響を詳細に検討した。

炭素材料は Basal 面と Edge 面を持ち、炭素材料によって両面の比率が異なる。Basal 面は反応に対して非常に不活性であり、一方、Edge 面は酸化や還元に対して活性である。例えば、白金微粒子を高配向性熱分解黒鉛 HOPG 表面に担持して過酸化水素のような酸化剤で酸化すると Edge 面が酸化され、白金微粒子が Edge 面に集合してくる。また、グラファイト層間化合物(GIC)の挿入脱離反応も Edge 面で進行する。

リチウムイオン電池(LIB)の黒鉛負極でよく知られているように、ethylene carbonate(EC)系の電解液では表面に Solid Electrolyte Interface(SEI)と呼ばれる被膜が生成し、この被膜を Li<sup>+</sup>が通過するときに脱溶媒和がおこり、グラフェン層の剥離を抑えて Li<sup>+</sup>の挿入が可能となる。一方 PC を溶媒とすると、不働体化が起こらずに黒鉛の剥離が進行して Li<sup>+</sup>の挿入反応が起こらない。EC 系の電解液でも、初期サイクルでは部分的に黒鉛の剥離が起こり、Li<sup>+</sup>のロスになり、クーロン効率が低下し、電池の容量を低下させる。この初期不可逆反応をできるだけ抑制して高容量化するために種々の添加物が工夫されている。また、有機電解液を用いる LIB では発火といった安全性が大きな課題である。

安全性の向上を図るための意難燃性の電解液の開発を目指して多くの研究がされているが、初

期クーロン効率との両立を図り、高いサイクル特性を持つ電解液は容易ではない。

リン酸エステル系の溶媒は電解液の難燃化のための有力な添加剤である。しかし、リン酸エステル類は初期不可逆容量が大きくなるという欠点がある。電解液を難燃化し、不可逆容量を低減するためにリン酸エステル類を部分フッ素化した添加剤を検討した。

EC と diethyl carbonate(DEC)を 1:1 に混合した溶媒に 1M LiClO<sub>4</sub> を溶解した電解液を基準電解液として選んだ。実用電池では LiPF<sub>6</sub> が電解質塩として用いられるが、痕跡程度の水分に対して非常に敏感である。そこで、脱水の難しいリン酸エステルの効果を詳細に調べるために、痕跡程度の水分の影響を受けにくい LiClO<sub>4</sub> を電解質塩として選択した。実験はすべて露点が -80°C 以下の Ar グローブボックス中で行った。

難燃化添加剤としてフッ素を含まない trimethyl phosphate(TMP)と triethyl phosphate (TEP)に加えて、TMP の methyl 基を 2,2,2-trifluoroethyl で置換した 2,2,2-trifluoroethyl dimethyl phosphate (TFE-DM), bis(2,2,2-trifluoroethyl)methyl phosphate (TFE-M)、tris(2,2,2-trifluoroethyl) phosphate(TFE)を調べた。これら添加剤を EC-DEC に 20%添加した。

TMPはECよりもLi<sup>+</sup>に強く溶媒和し、PCの場合と同様に溶媒和した状態で黒鉛に共挿入してグラフェン層の剥離が進行する。一方、TEPはLi<sup>+</sup>に溶媒和しにくく、EC-DEC-TEPの系ではLi<sup>+</sup>の挿入脱離が進行する。しかし、TEPを添加することによって初期不可逆容量が増加する。これはリン酸エステルの方がカーボネート系よりも還元に対して不安定であることによると考えられる。

多くの有機添加物で添加物にフッ素基を導入すると不可逆容量が減少することが知られている。一般に、電子吸引性の強いフッ素基の導入によって有機物の還元電位は高くなるが、還元分解によって生成した含フッ素中間体が黒鉛上の安定化被膜(SEI)の生成に寄与し、有機物の還元に対する不働態化を促進するためと考えている。

TMPのmethyl基を1個2,2,2-trifluoroethyl基に置換したTFE-DMや2個置換したTFE-MではTMP添加の場合よりも不可逆容量が大きくなった。すべてのmethyl基を置換したTFEPでは無添加の場合に比べると10%程度ほど不可逆容量が大きくなる程度にとどまる。

これらの2,2,2-trifluoroethyl置換リン酸メチルエステルのLi<sup>+</sup>イオンとの相互作用、すなわち、Li<sup>+</sup>への溶媒和の相対的強さをRaman散乱によって調べると次のようになった。

**TMP > TFE-DM > TFE-M > TFE**

TFEではECよりもLi<sup>+</sup>に対する配位能力が低い。これはTMPのmethyl基に電子吸引性の高いtrifluoromethyl基を導入することによってリン酸エステルのOの電子密度が減少し、donor数が減少することが原因となっていると推定される。しかし、2,2,2-trifluoroethyl基の嵩高さが立体障害になることも否定できない。これらの解明は今後の課題である。

一方、フッ素基の導入は一般には有機物を還元されやすくするが、上述のように、多くのフッ素化有機物がSEIの生成に有効であるのと同じ効果により、フッ素化リン酸エステルでも少ない不可逆容量で不働態被膜(SEI)が高い電位で素早く生成するものと推定される。

TFEとTMPの難燃化への寄与については今後明らかにしなければならないが、フッ素化、特にtrifluoromethyl化、は耐熱性を向上させる場合が多いので、TFEでも難燃化効果が期待される。

以上のように、tris(2,2,2-trifluoroethyl)phosphateをEC-DECの系に添加することによって不可逆容量を大きく増大することなくLIB電解液の難燃化する可能性を見だした。このフッ素化さ

れた有機物が黒鉛の表面に安定な被膜を生成させるという結果は燃料電池空気極の炭素担体の表面安定化とフッ素化による疎水性制御の可能性を示すものであり、アルカリ性電解液を用いる燃料電池の空気極三相界面の形成と安定化を目指した一つの方向を示すものである。

### 3. 成果の公表

口頭発表

Invited Lecture, At Daegu Geonbuk Institute of Science and Technology(2014年10月30日)

報告書作成日 平成27年5月26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圧・低損失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製作するためには、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、この深い準位の起源を解明する研究に取り組んだ。

SiC のキャリア寿命制限欠陥である  $Z_{1/2}$  センターは、成長した全ての SiC 結晶で観測され、イオン注入や電子線照射によってその密度が著しく増大すること、C 過剰の条件で成長するとその欠陥密度が減少すること等の実験事実から、炭素空孔を含む何らかの点欠陥ではないかという推測がされてきた（最初に実験データを提示して提案したのは当グループ）。

そこで、 $Z_{1/2}$  センター密度と炭素空孔の密度を比較する実験に取り組んだ。 $Z_{1/2}$  センター密度を正確に測定するために、接合容量の過渡解析から欠陥情報を得る DLTS 測定を行った。また、欠陥に存在する不対電子の性質と対称性を調べるために電子スピン共鳴(EPR)測定を行った。ここで重要なことは、DLTS 測定と EPR 測定を同一の試料に対して行うことである。一般に、DLTS 測定は低い欠陥密度を有する試料に適しており、EPR 測定は非常に高密度の欠陥を含む試料に適した分析法であることを考慮して、意図的な不純物ドーピングと電子線照射を活用して、高ドーピング密度でかつ高い欠陥密度を有する試料を複数準備した。また、下地基板からの信号を排除するために、厚膜エピ成長を行い、基板を研磨により除去した自立膜を準備した。さらに、欠陥密度の  $100\mu\text{m}$  以上に亘る深さ分布の精密測定、negative-U と呼ばれる欠陥の特殊性を解決するために低温、光照射下で EPR 測定を行うという困難に挑んだ。

図 1 に最も大きな信号強度を示した EPR スペクトルの例を示す。その g 値や対称性から、この信号は炭素空孔(Vc)からの信号であることが分かった。次に、EPR 測定から得られた炭素空

孔のスピンドensityと DLTS 測定から得られた Z センター密度の相関を図 2 に示す。ドーピング密度や欠陥密度の異なる 12 種類の試料全てに対して、ほぼ  $V_C$  密度と  $Z_{1/2}$  センター密度が一致していることが分かった。EPR、DLTS 測定において、他に同じ桁で存在する欠陥はないことも確認した。以上の結果、SiC におけるキャリア寿命制限欠陥である  $Z_{1/2}$  センターの起源が炭素空孔であることを明確に同定した。

昨年度の報告書で記載した熱酸化による  $Z_{1/2}$  センターの低減とキャリア寿命の大幅な向上は、SiC 熱酸化時に不要となった炭素原子の一部が SiC バルク結晶中に拡散し、炭素空孔 ( $Z_{1/2}$  センター) を表面から順次消滅させたと理解することができる。

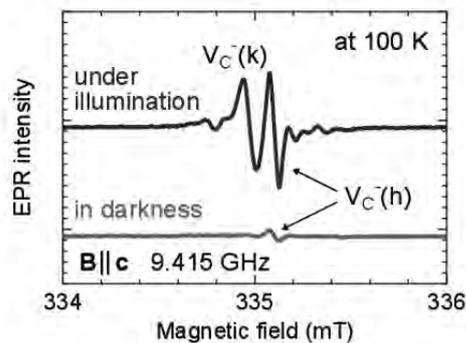


図 1 炭素空孔の EPR スペクトルの例

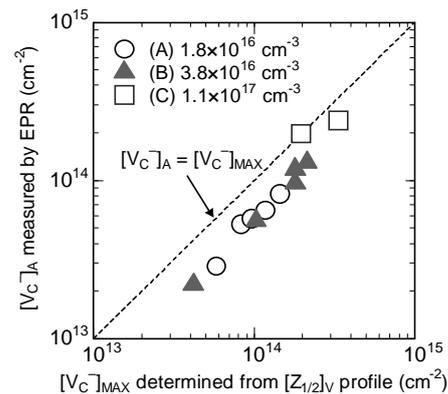


図 2 炭素空孔密度(EPR)と Z センター密度(DLTS)の相関

### 3. 成果の公表

- (1) K. Kawahara, X. T. Trinh, N. T. Son, E. Janzen, J. Suda, and T. Kimoto ; Quantitative comparison between  $Z_{1/2}$  center and carbon vacancy in 4H-SiC, *J. Appl. Phys.*, 115, 143705/1-6 (2014).
- (2) T. Okuda, T. Miyazawa, H. Tsuchida, T. Kimoto, and J. Suda ; Enhancement of carrier lifetime in lightly Al-doped p-type 4H-SiC epitaxial layers by combination of thermal oxidation and hydrogen annealing, *Appl. Phys. Express* 7, 085501/1-3 (2014).
- (3) T. Kimoto ; Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices (Invited Review Paper), *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 040103/1-27 (2015).
- (4) T. Kimoto, K. Kawahara, H. Niwa, N. Kaji, and J. Suda ; Ion implantation technology in SiC for power device applications (Plenary), *Tech. Digest of IEEE 14th Int. Workshop on Junction Technology (Shanghai, 2014)*, p. 1-6.
- (5) T. Kimoto, H. Niwa, T. Okuda, N. Kaji, and J. Suda ; Progress and future challenges in SiC material for high-voltage power devices (Invited), *American Vacuum Society 62th Int. Symp. (Baltimore, 2014)*, S8-2.

報告書作成日 平成 27 年 3 月 27 日

# 液体水素容器内の可視化システム開発

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：株式会社ジェック東理社

## 1. 目的

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

## 2. 成果

### (1) はじめに

新たに導入する「可視化技術」とこれまでの「熱伝達実験計測技術」を併用して、液体水素の沸騰現象を解明し、液体冷却高温超電導導体の性能を十分発揮できる最適な冷却技術を確立するために、高圧・極低温環境下で使用できる「可視化技術」を開発した。

### (2) 可視化技術の開発

図1に、既存の液体水素実験装置の概要図を示す。本実験装置は、極低温の液体水素を保有するためのクライオスタット（内径 300mm）であり、液体水素保有量は 60L である。2.0MPaG の設計圧力を有し、高圧ガス保安法に準拠して製作、運用を行っている。液体水素中の沸騰現象を解明するために、図1に示すような、高圧ガス保安法に準拠した光ファイバーによる可視化システムを新たに開発した。考案した可視化装置では、クライオスタット外の常温、常圧部（大気環境）にカメラで、クライオスタット内に設置した光ファイバー（1 万本を束ねたバンドル型）の画像を撮影するために、受圧部である耐圧フランジ部に耐圧ガラス製窓を設置した。この窓部は、受圧部となるが、液体水素の液面から約 1500mm 離れており、ほぼ常温に保持される。そのため、高圧ガス保安法に準拠したガラス材を選択できた。

光ファイバーの低温領域での性能劣化を評価するために、事前に、液体窒素に浸してみたが、画像の劣化がないことが確認できたため、液体水素中でも適用を試みた。

可視化用ガラス設置部から供試体部までは対流防止板等構造物が多数あるため、光ファイバーを保護するために、SUS 製のフレキ管によるガイドを設けた。

光源には、チップ型 LED を使用した。しかし、LED は温度が低くなると輝度が低下するため、LED 素子は、クライオスタット内上部の常温付近の環境下に設置し、SUS フレキガイド内を設けた光ファイバーにより液体水素内に光源を導入することにした。来年度には、今年度開発した可視化システムの試験を実施予定である。

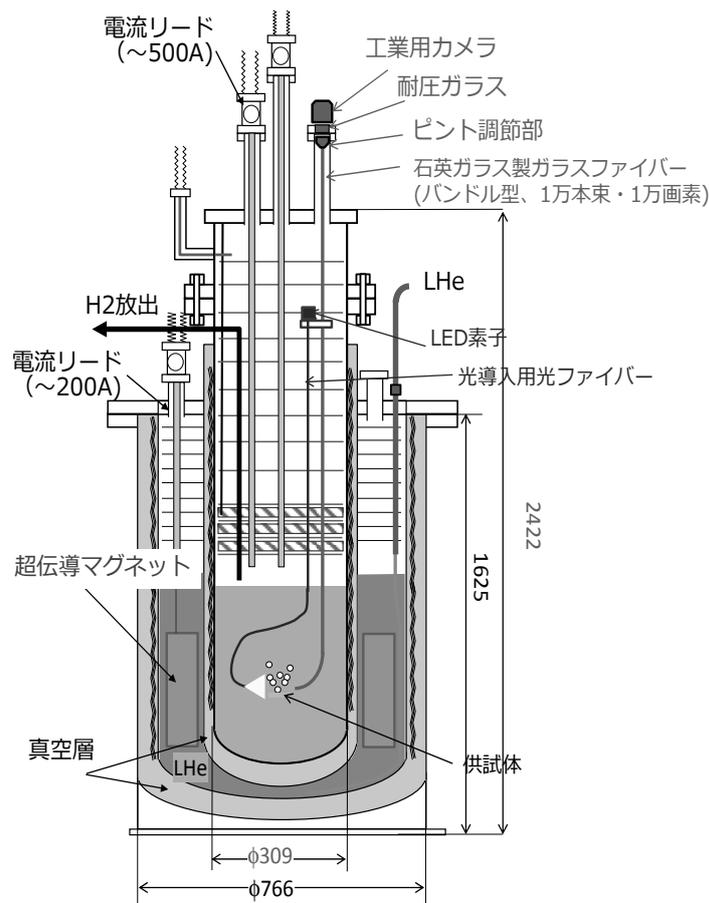


図1 液体水素クライオスタットと可視化システム

### 3. 成果の公表

- (1) Yuki Horie, Yasuyuki Shirai, et al.; Film boiling heat transfer properties of liquid hydrogen in natural convection, Proceedings of ICEC25-ICMC2014
- (2) 堀江裕輝、松澤崇之、米田也、塩津正博、白井康之他；自然対流における液体水素膜沸騰熱伝達特性、3D-a06、第89回低温工学・超電導学会(2014年春季)
- (3) 松澤崇之、堀江裕輝、米田和也、大浦洋祐、白井康之、塩津正博、畑幸一他；液体水素冷却 MgB2線材の磁場下における過電流特性、3D-p06、第89回低温工学・超電導学会(2014年春季)
- (4) 茂田宏樹、堀江裕輝、松澤崇之、米田和也、白井康之、塩津正博他；拡散法で作製した MgB2線材の液体水素冷却下における臨界電流特性、2C-a03、第90回低温工学・超電導学会(2014年秋季)

報告書作成日 平成27年4月13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

萩原朋道教授

## 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れば状態と出力が常に非負となる動的システムである。このような非負性は、エネルギーや濃度といった“負の値を取り得ない量”の関わる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ある。本研究では、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の解析と設計について論じた。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、学会発表を行った（3. 成果の公表の項目の論文(1) 参照）。フォーメーション制御の基本的な考え方は、複数のエージェントに対してネットワークを介して相互に位置情報の交換を行わせ、その情報に基づき各エージェントにその位置を調整させることで所望のフォーメーションを形成するというものであり、同様の考え方は大規模電力系統の分散的な制御に応用できると考えられる。本研究においては、システムの非負性を利用することでロバストなフォーメーション制御則が導出できることなどをまず明らかにした。これらの研究成果をもとに、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と設計に関する研究を行った。電力系統に代表される大規模結合システムにおいて、サブシステム間の情報通信における遅延は（たとえ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システムの安定性や制御性能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。以上を踏まえ、論文(2)、(4)ではむだ時間を有する安定な非負システムの収束性に関する解析を、論文(3)、(6)では通信遅延を有する結合非負シ

システムに対するフォーメーション形成則の導出と収束性に関する解析を行った。また、これらの理論的な成果の応用の一つとして、論文(5)では非負システム理論に基づいた自動車群の車頭時間制御に関する検討を行い、学会発表を行った。

今後はこれらの成果をもとに、電力系統の分散制御への非負システム理論の応用を目指したい。また、昨今のエネルギーマネージメントの動向を踏まえ、BEMSやHEMSにおける非負システム理論の活用に関する検討も進めたい。

### 3. 成果の公表

- (1)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)
- (2)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、5pages、(2014)
- (3)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、6pages、(2014)
- (4)西尾直也、蛭原義雄、萩原朋道；複数のむだ時間を有する線形非負システムの支配極解析、システム制御情報学会論文誌、Vol.28、No.4、pp.147-154、(2015)
- (5)島本拓和、蛭原義雄、萩原朋道；通信遅延を有する結合非負システムの解析と移動体のフォーメーション制御、計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会講演論文集、pp.56-61、(2015)
- (6)高橋誠也、蛭原義雄、萩原朋道；通信遅延を有する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と収束性能解析、第59回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文、6pages、(2015、発表予定)

報告書作成日 平成27年5月8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について検討を行った。主だった結果は以下のとおりである。

まず、交流電力の電源と負荷の絶縁に関して、マトリクスコンバータの接続により、パワーエレクトロニクス・トランスの実現の可能性を実験的に検討した。その結果、高周波スイッチング素子である SiC の適用により、歪みの少ない電圧変換が可能で、また絶縁は高周波トランスで維持できることを確認した。この成果は論文誌に公開した。

次に、新しい電力の伝送方式として、電力をパケット化する方式を提案している。本手法に関して、独立電源系への実現を前提として、ネットワーク運用の可能性を数值的、実験的に検証した。

最後に、電力変換回路を並列化する場合にそれらの制御をどのように実現するかが重要な課題となる。本研究では、受動性に基づく制御により、分散配置された変換回路を並列化し、相互が補完するよう動作させることができることを確認した。

## 3. 成果の公表

(1)Alexandros Kordonis and Takashi Hikihara:Dynamic model of direct matrix converter and its experimental validation,Int.J.Circ.Theor.Appl.,Published online in Wiley Online Library (wileyonline library.com). DOI: 10.1002/cta.2072(2015)

(2)R.Takahashi,K.Tashiro, and T.Hikihara:Router for Power Packet Distribution Network:Design and Experimental Verification, IEEE Trans. on Smart Grid, Vol.6, No.2, pp.618-626 (2015)

(3)石原浩毅、引原隆士、受動性に基づく制御を用いたコンバータ・インバータ回路の並列接続に関する検討、SCI'14 212-2-7 (2014.5.22)

(4)西原大智、高橋亮、引原隆士、交流電力ルータの三相交流への適用 ―構成と動作に関する検討―、電気関係学会関西支部大会 G4-13 (2014.11.24)

- (5)石原浩毅、引原隆士、受動性に基づくコンバータ・インバータ並列システムの状態安定化に関する一検討、NLP2014-139、コンパルホール (2015.1.27)
- (6)佐段田裕平、引原隆士、並列接続されたコンバータにおける受動性に基づく制御の制御ゲインに関する一検討、回路とシステム A-1-15、立命館大学 (2015.3.10)
- (7)Alexandros Kordonis , Ryo Takahashi, Daichi Nishihara, and Takashi Hikiyara, Three-Phase Power Router and its Operation with Matrix Converter toward Smart-Grid Applications, *Energies*, 8, 3034-3046 (2015); doi:10.3390/en8043034.

報告書作成日 平成27年 5月29日

# 大規模分散電源による電力システムの安定化

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システムへの影響を評価する。

## 2. 成果

系統事故や負荷変動により電圧、電力が変動し、持続する電力動揺が問題となっている。電力動揺により発電機が解列されたり、多数の発電機に波及すれば大規模な停電や大きな事故に繋がる可能性がある。また我が国では固定価格買い取り制度の導入を契に、各地に太陽光発電所の設置が進んでいる。今後太陽光発電が電力システムに大量導入されると、太陽光発電システムの出力が電力動揺を助長する恐れがある。そこで今年度は、太陽光発電システムの出力変動の補償を目的として蓄電池を用いた電力動揺を抑制する手法を検討した。本研究では系統モデルとして、Fig.1の太陽光発電システムを含む一機無限大母線モデル系統を考える。ここで、G1は定格100MVAの発電機、G4は60Hzの無限大母線である。また無効電力変動や電圧変動は小さいとし、これを見捨て有効電力のみに注目して太陽光発電システムの有効電力変動 $\Delta P_{inv}$ によるG1の有効電力変動 $\Delta P_1$ を求める。

電力動揺を抑制するために、発電機G1へ入力される有効電力 $\Delta P_{inv}$ から動揺周波数成分を除去する事を考える。これを実現するために、Fig.1に示す太陽光発電システムに併設された蓄電池システムを用いる。Fig.1の点線で囲んだシステムが電力動揺周波数成分を通さないノッチフィルタの様な特性を持つように蓄電池側のインバータ制御系を設計する。Fig.2の $I_{dref}$ はコントローラKから出力される有効電力に対する電流指令値を表す。この制御系は $\Delta P_{inv}$ と $\Delta P_{bat}$ の加算電力 $\Delta P_{out}$ をフィードバックし、 $I_{dref}$ の指令値に対して蓄電池の出力 $\Delta P_{bat}$ を調整する制御系である。電力動揺周波数 $\omega$ は既知とすると、内部モデル原理に基づいてコントローラを設計した。

太陽光発電システムの有効電力出力が10[MW]から0[MW]へ急減した事を想定したシミュレーションを行った。ここでは蓄電池システム有無での系統周波数変動を比較し、電力動揺の抑制効果を検証する。ただし、蓄電池の容量に特に制限は設けない。太陽光発電システムの有効電力出力はシミュレーション開始1秒後に急減させた。シミュレーション結果をFig.3に示す。太陽光発電システムが-10[MW]急減した時に、蓄電池システムが約7.5[MW]のパルス出力をすると、蓄電池が動揺成分を補償する事で系統の角速度変化分が大幅に抑制されている事が分かる。以上より、本手法で電力動揺を抑制出来る事が確認できた。

以上のように、本年度は電力系統で電力動揺が起きた際に、その原因となる動揺周波数成分を蓄電池により除去させ、系統の安定化を図る手法を提案し、シミュレーションにてその有効性について確認した。

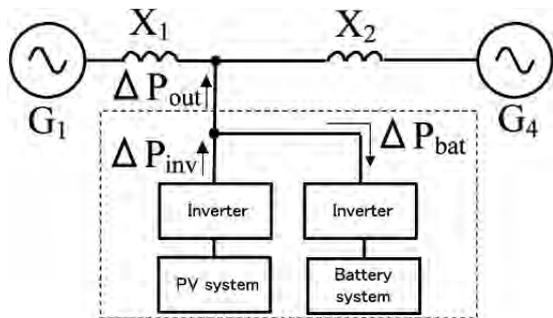


Fig. 1 検討対象

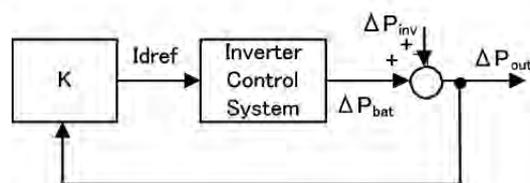


Fig. 2 制御系

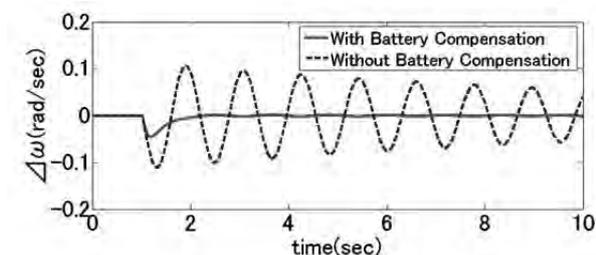


Fig. 3 解析結果

### 3. 成果の公表

- (1) 岩藤直貴、服部将之、大堀彰大、舟木剛；PV の出力変動補償用蓄電池による電力動揺抑制効果、電気学会全国大会、4-096、(2015)
- (2) Tsuyoshi Funaki, Akihiro Ohori, and Nobuyuki Hattori ; Fast and high-precision phase detection of positive phase sequence component by three phase PLL with complex coefficient filter, The 5<sup>th</sup> IEEE Conference on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG2014), NUI Galway, Ireland, June 24-27, 2014.

報告書作成日 平成 27 年 5 月 21 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

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。特に今年度は、計算機シミュレーションのみならず、理論的にも検討を行った。

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性が生じている。

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。

そこで今年度は、MIMO 伝送の DAS への適用効果を明確にするために、昨年度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、特に理論解析も含めて 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、干渉が存在する場合のチャンネル容量特性の変化についても検討した。

### 3. 成果の公表

(1)Ou Zhao, Hidekazu Murata ; Sum rate analysis of ZF receivers in MU-MIMO systems under the effects of spatial correlation, 電子情報通信学会技術研究報告, AP2014-2, pp.7-12, Apr. 2014.

(2)Ou Zhao, Hidekazu Murata ; Effects analysis of spatial correlation on the sum rate distribution in MU-MIMO systems, Proceedings of the IEEE 79th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC 2014 Spring), Seoul, Korea, May 2014.

報告書作成日 平成 27 年 5 月 30 日

# 遮断器用真空バルブの絶縁設計に関する基礎研究

山本 修

受託先名：関西電力株式会社  
株式会社明電舎

## 1. 目的

真空遮断器用真空バルブの帯電を抑制し、耐圧を向上させるための電界緩和用シールドリング電極の帯電抑制効果を明らかにする。

## 2. 成果

真空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。本研究では、まず、図1に示すように絶縁円筒内の陰極にシールドリングを取り付け、直流高電圧を印加したときの帯電の様子を外部に設置した可動型の静電プローブにより調べた。図2に示すように、シールドリングの高さ（図1中のb）に応じてプローブ出力、したがって帯電の極大点が陰極から遠ざかる。なお、シールドリングが無い場合の極大点は最も陰極に近く、かつ値も大きい。

次に、測定したプローブ出力に最も適合する電荷分布を理論計算により調べた結果を図3に示す。この電荷分布の理論計算は二次電子なだれ現象を考慮したもので、二次元シミュレーションである。プローブ出力の計算には、この電荷分布を考慮した三次元の電界計算を行っている。すなわち、計算と測定の両プローブ出力が適合するように求めたのが図3の電荷分布である。図3より、シールドリングと対面する絶縁円筒の内面の帯電が抑制されることが明らかとなった。

## 3. 成果の公表

(1) Y. Shimizu, O. Yamamoto, H. Morii ; Control of Surface Charge on Insulating Hollow Cylinder by Using Shield-ring in Vacuum, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.21, No.3, pp. 1312-1318, 2014.

(2) R. Yoshida, Y. Yamano, O. Yamamoto, K. Hasegawa, H. Saito, K. Kitakizaki ; Charge distribution characteristics of bottle type insulator with shield ring in vacuum, 3rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Mumbai, India, pp.73-76, 2014.

(3) H. Naruse, O. Yamamoto ; Estimation of flashover voltage along cylindrical insulator in vacuum 3rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), pp.65 – 68, Mumbai, India, 2014.

(4) H. Naruse, H. Saito, M. Sakaki, O. Yamamoto ; Flashover mechanisms of bridged vacuum

gaps based on cathode electric field measurement, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22 , Issue: 1, pp. 597 – 603, 2015.

(5) Takahiro Umemoto, Yusuke Shimizu, Hiroki Naruse, Osamu Yamamoto ; 3-D SEEA Charge Analyses on Surface of Insulators in Vacuum, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, Issue 2, pp. 1298-1305, April 2015.

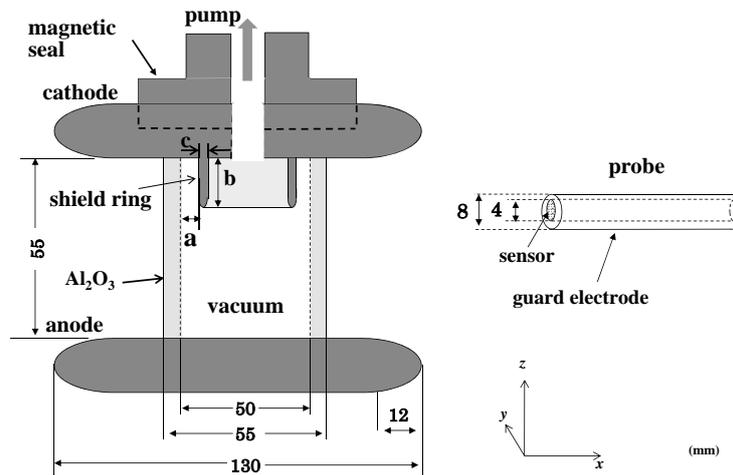


図 1. 実験装置 (a= 1mm,  $2 \times 10^{-3}$  Pa)

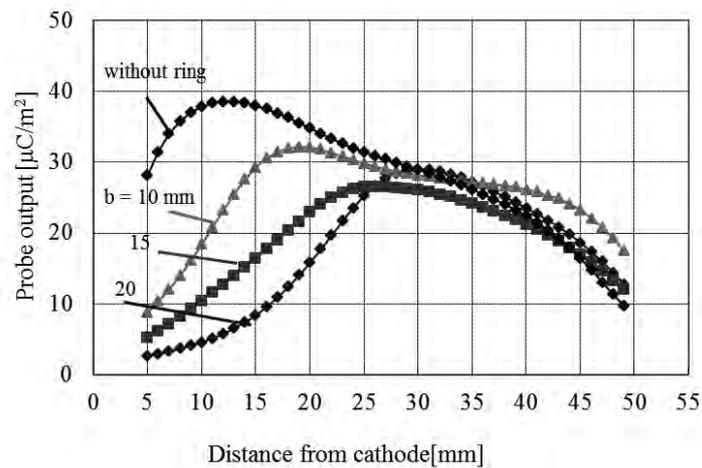


図 2. プローブによる測定結果 (印加電圧 20kV)

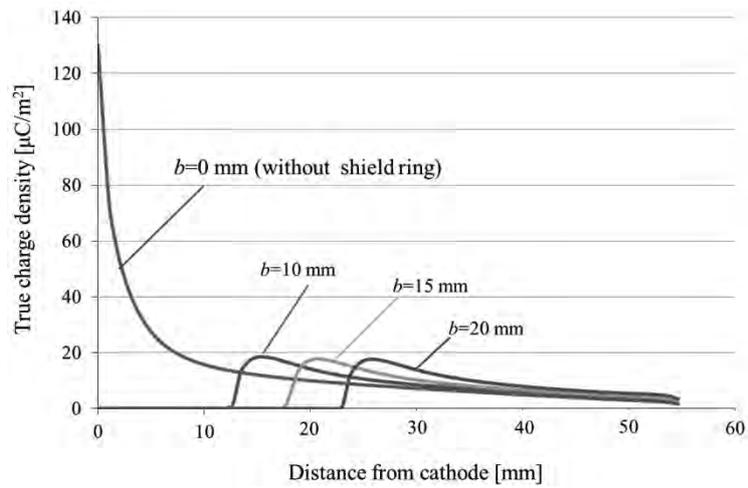


図 3. 計算により推定した電荷分布 (印加電圧 20 kV)

報告書作成日 平成 27 年 3 月 31 日

# 二次電池による需給制御に関する研究

東京大学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

太陽光発電の大量導入による周波数変動問題への対策として、蓄電池システム(BESS)の利用が考えられるが、BESSを配置する場所によっては、BESSの出力変動により系統に新たな潮流変動や電圧変動を及ぼす恐れがある。そのため、BESSの周波数制御出力が潮流に与える影響を最小にするBESSの最適な配置場所を求める手法を提案し、その評価を行う。

## 2. 成果

### (1) 系統シミュレーション手法

LFC用BESSの出力が系統の潮流に与える影響を計算するためには、まずLFC利用時にBESSがどのような出力をするのかを知る必要がある。そこで本研究では、あらかじめBESSを用いた周波数制御シミュレーションをしてその際のBESSや火力機の出力を求め、次にそのデータをもとに潮流計算を時間断面ごとに行うという方法をとった。

シミュレーション条件については、電力系統モデルとして図1に示す電気学会東30機モデルのうちの小規模システムを用いた。負荷曲線とPV出力のデータは図2に示すものを用いた。導入されるBESSの容量は、トータルで120 MW, 48 MWhとした。また、原子力発電機出力は定格出力で一定としている。

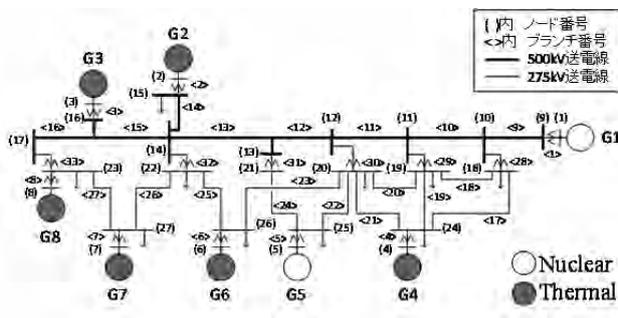


図1 電力系統モデル

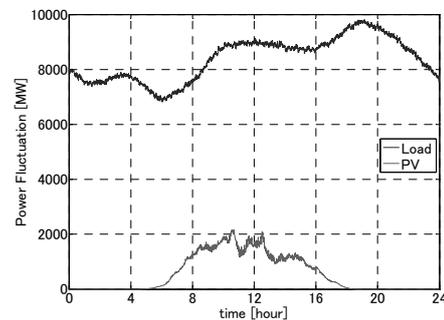


図2 負荷変動とPV出力

潮流計算をするため、図1の系統モデルにおける時間断面ごとの各発電機の出力データや各負荷の負荷データを作成する。各火力発電機の有効電力出力は、火力機全体の出力を、各火力機に定格出力の比で比例配分することで作成した。各負荷の有効電力は、図2に示した系統全体の有

効電力負荷の値を、東30機系統モデルのピーク時負荷の比で比例配分することで作成した。負荷の無効電力の指定値は、

$$Q = -86 + 0.38P \quad (P: \text{MW}, Q: \text{MVar}) \quad (1)$$

によって求めた。PVについては、各負荷に導入されているとし、同日の異なる地点の日射量データをもとに、各負荷に導入されているPVの出力パターンをそれぞれ作成した。図2のPV出力は、これらのPVの出力の合計値である。また、PVの導入量は、負荷の大きいところほど多いと考え、各負荷のピーク時負荷の大きさに比例するように設定している。各データは全て5秒刻みのデータとして作成し、潮流計算は11時から13時までのデータを用いて行った。

## (2) BESSの最適配置

系統モデルにおいてBESSが設置されるノードは、ノード18～27であるとする。本研究では、BESSの最適配置問題を、「設置するBESSの総量をN個の小さな単位(10MW程度) に等分割し、その小さなBESSをどのノードに何個設置するのが最適か」という問題として考える。最適化には、タブーサーチ法を用いた。

本研究では、系統の全ブランチについて、潮流変動の増加値を (BESS設置後の、ブランチ有効電力の標準偏差) - (BESS設置前の、ブランチ有効電力の標準偏差) によって求め、増加値が最大となるブランチの値を目的関数とし、これを最小化することを目標とする。つまり目的関数OFは式(2)のようになる。

$$OF = \max(SDFlowBESS_1 - SDFlowNoBESS_1, SDFlowBESS_2 - SDFlowNoBESS_2, \dots, SDFlowBESS_N - SDFlowNoBESS_N) \quad (2)$$

ただし、 $SDFlowBESS_i$  はBESS設置時の、ブランチiを流れる有効電力の標準偏差、 $SDFlowNoBESS_i$  はBESS設置前の、ブランチiを流れる有効電力の標準偏差である。

最適配置手法を用いた場合と、用いなかった場合(ノード18～27のそれぞれに120MWの大きなBESS1つを設置していった場合)の結果を表1に示す。表1には、設置する前と比べて最も潮流変動の大きくなったブランチと、そのブランチでの潮流変動の増加値が示されている。なお、最適配置手法では120MWのBESSを12個に等分割して探索を行っている。結果を見ると、大きなBESSを1つ設置した場合、潮流変動の増加が最も小さかったのはノード27にBESSを設置した時である事が分かる。そして、BESSを最適配置手法によって得た配置にした場合は、潮流変動の増加がそれよりも小さくなっており、より良い配置が得られている事が分かる。

表1 最適配置手法の効果

	BESSを設置したノード	最も潮流変動が大きくなったブランチ	潮流変動の増加値 [MW]
それぞれに1つの大きなBESSを置いた場合	ノード18	ブランチ28	17.5167
	ノード19	ブランチ29	7.8970
	ノード20	ブランチ30	8.5664
	ノード21	ブランチ31	41.2469
	ノード22	ブランチ32	3.9713
	ノード23	ブランチ33	16.3285
	ノード24	ブランチ21	6.5469
	ノード25	ブランチ22	19.4137
	ノード26	ブランチ25	11.4942
	ノード27	ブランチ26	3.7179
最適配置	ノード22:20MW, ノード27:100MW	ブランチ14	2.5025

## (3) まとめ

本研究では系統の潮流に与える影響を最小限に抑えるBESSの配置場所を求める手法を提案した。今後は地域ごとのPVの導入率など、様々な条件を変えた場合について検討を行っていき、BESSの設置に適した場所に関する考察を行う予定である。

### 3. 成果の公表

- (1) 橋本、横山；電力潮流への影響を考慮したLFC用蓄電池配置場所に関する基礎検討、電気学会、電力系統技術・電力技術合同研究会、PE(PSE)-14-146 (2014年)
- (2) 橋本、横山；太陽光発電が大量導入された電力系統への周波数制御用BESSの最適配置に関する研究、電気学会 全国大会 (2015年3月)

報告書作成日 平成 27 年 3 月 5 日

トピックス



## 木村磐根副理事長 公益社団法人日本地球惑星科学連合(JpGU) 設立 25周年記念式典(2014年5月1日)において「フェロー」を受賞

常務理事・事務局長 野村俊雄

本研究所副理事長の木村磐根が、2014年度公益社団法人日本地球惑星科学連合(JpGU)の設立25周年記念式典(2014年5月1日)において「フェロー」を受賞しました。

JpGUでは、その活動が25周年を迎えることを記念して、地球惑星科学研究領域におけるパラダイムシフトやブレークスルーもしくは発見などを中心に、地球惑星科学の発展に著しい貢献をされた先達、また日本の地球惑星科学の発展または地球惑星科学の知識普及に貢献された方々を顕彰することを目的として、初回の2014年度は43名のフェローが選ばれました。

以下に、2014年度公益社団法人日本地球惑星科学連合 フェロー授賞記念特集号に掲載された木村副理事長の寄稿記事を転載します。



### 木村 磐根

京都大学名誉教授, 大阪工業大学名誉教授, 応用科学研究所代表理事

専門分野 超高層電波科学

### 学術情報公開と金沢 WPGM 会議

このたび日本地球惑星科学連合(JpGU)のフェローとして寄稿の機会を与えられたので、学術情報の国際公開に関連した話題と、この連合の当初の思い出に関する独立した二つの話題をご紹介しますことにしました。

私の研究者生涯で宇宙科学関係の研究活動は科学衛星観測によるものを含め多方面にわたるが、そのバックボーンの一つは VLF(超低周波帯)電波の地球周辺プラズマ空間内での伝搬通路計算(レイトレーシング)法の開発とその活用である。数 kHz オーダの電波のこの領域内の伝搬は、地磁気の影響を強く受けるので、ループ状になっている地球磁場の形に大きく依存する。この通路はプラズマの空間分布と、地球磁力線方向と強さを決める解析的な式を与えて伝搬路、伝搬ベクトル方向、及び伝搬に要する時間を計算する方法である。すなわち電離層下部の出発点から、与えられた方向を初期条件としてレイトレーシングの式を逐次数値積分する。地上高度 100 km 以上の領域のイオンを含むプラズマ分布は定常的には拡散平衡などの解析的な数式で近似されるので、これらを前提とすれば通路は比較的簡単に追跡できる。これらのレイトレーシング手法は当初は主としてホイッスラーという、雷から発生する電波現象の理解に用いられてきたが、我が国でも科学衛星観測が広く活用されるようになり、地上から発射された航法用の電波、たとえばオメガ信号(10kHz 付近)を科学衛星あげぼのに搭載の観測器で受信し、その電波の電波源からの伝搬時間と伝搬方向、並びに衛星位置での電子密度を衛星搭載機器により *in situ* で測定することができたので、レイトレーシングにより得られたこれらの情報と一致するようなプラズマ密度分布を決めることができ、衛星の南北 1 時間ほどの軌道に対応して、衛星軌道経度付近のプラズマのグローバルな分布をそのタイムスケールで解析関数によって表現することが可能となった。

このように我々の開発したソフトは、プラズマと地球磁場の影響のある空間内の電波の通路計算に広く使用できるものであり、応用範囲は広い。その原理の理解はそれほど難しくはないが、ソフトウェアの開発には結構時間を要する。一方科学衛星での観測技術が精密になってゆくの、特に地球周辺の超低周波、あるいは数 MHz の短波帯電波の電離層・磁気圏内の伝搬情報を、科学衛星観測の補助手段として使用する若い研究者のために、そのソフトウェアを国際公開するのは意味があると判断した。また国際的な要請もあったので、金沢大学の後藤由貴准教授の協力を得て 2010 年 3 月から金沢大学のサーバーから (<http://waves.is.t.kanazawa-u.ac.jp>) の URL で国際公開をして頂いた。その後のアクセス状況を見てみると、国内はもとより、米国、英国、フランス、ドイツ、カナダ、オーストラリア、フィンランド、ベルギー、インドなどの主要大学、研究機関からの多くのアクセスがあった。近年インターネットが充実し、我々は科学技術の現状把握にも、また最新の学術・技術情報を得る手段としてもインターネットが大いに役立っている。一方 JpGU の学術誌が最近オープンアクセスジャーナルとして出版されていることは上記の観点からも大いに歓迎される。特に若い研究者にとっては、学術論文が無料でアクセスできることは、ソフトウェアの国際公開同様大変歓迎されることである。

本年(2014) 5 月に開催された JpGU 総会は創設 25 周年記念の総会であった。思い出すと、米国地球物理連合(AGU)の誘いかけにより、1990 年 8 月に金沢市で Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM) の第 1 回が開催された。日本の学界は AGU と異なり、1989 年以前は、各分野の学会が独自に活動していて春秋の講演会もそれぞれ独立に開催していたので、米国のようにそれらの学会が一つになって活動することのメリットは認識されており、学会連合のための代表者の会合はもたれていた。

筆者は、当時地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) の会長を務めていたが、上記の金沢の国際会議の 4 年ほど前から、当学会関連の米国のローデラー氏や、AGU の事務局長スピルハウス氏からのコンタクトがあり、日本を含む西太平洋沿岸諸国を対象にした AGU ミーティング(WPGM)を日本で開催できないかという打診があった。当時は米国 AGU のアジア諸国への働きかけに対しては、AGU の覇権を、日本を含む西太平洋地域にまで広げようとする意図での企画であり、我が国の関連学会ではそれを歓迎しないという意見が強かった。SGEPSS の運営委員会では、米国からの提案がむしろ学会連合推進の足がかりとなると考え、AGU 主催のシンポジウムを日本で開催するというのではなく、日本の関連学会が米国と対等の主催者となるという立場で開催する姿勢を貫き、また本学会が国内の他の学会を牽引する形で、積極的に AGU への協力姿勢を出すべきであるという結論を出し、同学会の総会でも承認された。その後開催候補地として金沢市が良いということもわかり、AGU はこれらの総合案を了承して、1989 年 3 月に正式に日本の地球物理関連学会に共同開催を申し入れてきた。その結果日本側は、我々の学会 (SGEPSS) のほかに地球化学、測地、地質、気象、海洋、地震、火山、陸水関係学会の賛同が得られ、同年 4 月、AGU と日本の計 9 学会からの代表による組織委員会が開催された。また関連して翌 1990 年 4 月の学会を地球化学、測地、地震、火山、SGEPSS の 5 学会の合同開催とすることも決定された。1990 年 8 月に開催された金沢市での WPGM は、上記の国内学会のご支援が実り、1077 名(内、国外 225 名)の参加を得、成功裏に開催された。この年の 4 月に始まった前記の 5 学会による東京工大での合同開催が、4 半世紀の間に国内の 50 の学協会からなる大連合体に発展するとはどなたも予測できなかったと思われる。この素晴らしく成長した連合が我が国のみならず世界のこの分野の学術向上発展のためにも大いに貢献できることを祈念している。

当初の方向づけは、前記の諸学会の強いご協力によったことは勿論であるが、SGEPSS 学会会員として努力された本蔵義守会員、及び WPGM 金沢開催の発案と会議の成功に貢献された金沢大の長野勇会員のご貢献に負うところが大変大きい。これらの経緯の詳細は SGEPSS の会報 191 号(2007 年 4 月)にも掲載されている。

---

平成27年9月印刷・発行  
発行：公益財団法人応用科学研究所  
〒606-8202 京都市左京区田中大堰町49  
TEL 075-701-3164 FAX 075-701-1217  
印刷・製本：田中プリント

---

(無断複写複製厳禁)





**Research Institute for Applied Sciences**