

佐 賀 大 学  
理 工 学 部 集 報

第47卷 第2号

---

目 次

有限化学ポテンシャルにおける格子QCDシミュレーション  
.....河野宏明..... 1

博士論文要旨及び審査要旨公表 ..... 5

---

平成30年12月  
佐賀大学理工学部



# Lattice QCD simulations at finite chemical potentials

By  
Hiroaki Kouno\*

**Abstract:** The results of the lattice QCD simulations at real isospin and imaginary quark number chemical potentials, which is free from the sign problem, are shown. At finite temperature, the results can be well reproduced by the effective model of QCD. On the contrary, at low temperature, the present effective model underestimates the lattice QCD result. Possible improvements of the effective model are discussed.

**Key word:** the lattice QCD, sign problem, isospin, imaginary chemical potential

## 1. Introduction

The studies of QCD phase transition at finite temperature and finite density are important subjects not only in nuclear and elementary particle physics but in astrophysics and cosmology. It is expected that quarks, which are confined in a baryon and are heavy, become free and light at high temperature and/or high density. The transitions are called the deconfinement transition and the chiral symmetry restoration, respectively. At high temperature but at zero quark number density (or, equivalently, zero quark number chemical potential), the QCD transitions have been well studied by using the Monte Carlo lattice QCD simulations. At zero density, it was established that the both transitions are not pure phase transitions but continuous crossover transitions [1]. The equations of states of hot QCD matter have been also well analyzed. However, at finite quark number chemical potential, there is a famous sign problem and the lattice QCD simulations are not feasible there. When the quark number chemical potential is introduced in the lattice QCD, the effective action, which appears after quark field integration in path integral calculation, is complex and the Monte Carlo simulations cannot work well. To circumvent this problem, several methods were proposed. One of them is the imaginary chemical potential approach [2][3]. When the quark number chemical potential is pure imaginary, the effective action is real and positive, the Monte Carlo method can work. From the results at imaginary chemical potential, the results at real chemical, which we want to know, can be obtained by the analytical continuation.

On the other hand, it is known that the lattice QCD has no sign problem when the isospin chemical potential is real and finite [4]. Furthermore, it was shown that the lattice QCD with real isospin and imaginary quark number chemical potentials has no sign problem [5]. The lattice QCD simulations are also feasible in this case.

In this brief report, we report the results of the lattice QCD simulation with real isospin and imaginary quark chemical potentials. This paper is organized as follows. In Sec. 2, we review the sign problem briefly and explain our approach. In Sec. 3, numerical results are shown. Section 4 is devoted to summary and discussions.

## 2. Sign problem

In this section, we consider two flavor QCD. In QCD at finite temperature and density, the partition function  $Z$  is given by the following path-integral form.

$$Z = \int DUDqD\bar{q} \exp(-S_{QG} - S_G)$$
$$S_{QG} = \int_0^\beta d\tau \int d^3x \bar{q} M q$$

where  $U$  and  $q$  are gluon and quark field variables, respectively, and  $\beta=1/T$ .  $M$  is the matrix which depends on the imaginary time  $\tau$ , the spatial coordinate  $x$ , the color and flavor indices, spinor indices, temperature  $T$  and the quark chemical potential  $\mu$ . Hereafter, we only show the chemical potential dependence of  $M$ , explicitly.  $S_G$  is the pure gluonic action the concrete form of which is not important in our discussions and we do not show it explicitly.

After integration of quark field,  $Z$  becomes as the following form.

---

Received November 1, 2018

\*Department of Physics

@Faculty of Science and Engineering, Saga University

$$Z = \int DU \det[M(\mu)] \exp(-S_G)$$

It is easily shown that the determinant satisfies the following relation.

$$\det[M(\mu)]^* = \det[M(-\mu^*)]$$

Hence, the determinant is not real when  $\mu$  is real and finite. In this case, we cannot regard the integrand as a probability function and the Monte Carlo simulations are not feasible.

On the contrary, if  $\mu$  is pure imaginary, the determinant is real and nonnegative, and the Monte Carlo simulations work well [2][3]. The physical results at real chemical potential may be obtained by the analytic continuation from the ‘‘unphysical’’ results at the imaginary chemical potential.

There is a one more case where the sign problem does not exist. Consider the real isospin chemical potential  $\mu_I$  instead of the quark number chemical potential. In this case, the quark determinant becomes the following form.

$$\det[M(\mu_I)] \det[M(-\mu_I)]$$

Here the first determinant represents the u quark contribution and the second does the d quark one. Hence, we obtain

$$\begin{aligned} & \det[M(\mu_I)] \det[M(-\mu_I)] \\ &= \det[M(\mu_I)] \det[M(\mu_I)]^* \\ &= |\det[M(\mu_I)]|^2 \end{aligned}$$

For two flavor case, the above equation is nonnegative and the Monte Carlo simulations work well. Furthermore, if  $\mu$  is pure imaginary and  $\mu_I$  is real, the determinant becomes

$$\begin{aligned} & \det[M(\mu_I)] \det[M(-\mu_I)] \\ &= \det[M(\mu_I + \mu)] \det[M(\mu_I + \mu)]^* \\ &= |\det[M(\mu_I + \mu)]|^2 \end{aligned}$$

In this case, the Monte Carlo simulations are also feasible [5]. The results with finite real isospin and quark number chemical potential may be obtained by the analytic continuation along the  $\mu$  axis. This fact is very important for nuclear physics and astrophysics, since high density matter in a compact star such as a neutron star is expected to have large isospin number density as well as the large quark number density.

### 3. Numerical results

The lattice action and the parameter settings used in this study are the same as the ones used in Ref. [6], but a lattice with the spatial size  $12^3$  and the temporal sized 4 is used. We used the renormalization-group-improved Iwasaki gauge action [7] and the clover-improved two-flavor Wilson quark action [8]. The simulations were done by the Hybrid Monte Carlo program based on the Lattice QCD Tool Kit [9]. See Ref. [6] for the detail.

Once the results at the imaginary quark number chemical potential are obtained, the result at real chemical potential may be obtained by the analytical continuation. However, here we postpone the analytical continuation of our lattice simulation results. Instead, we compare our lattice QCD results with the one obtained by the effective model. If the effective model can reproduce the lattice data, it can be justified to investigate QCD at real chemical potential by using the effective model instead of the lattice QCD itself.

Figure 1 shows the  $\theta$ -dependence of quark number density at high temperature ( $T=1.35T_c$ ) and  $\mu_I=0.4T$ , where  $\theta=\text{Im}(\mu)/T$  and  $T_c$  is the pseudocritical temperature at  $\mu=\mu_I=0$ . The dots with error bars represent the lattice simulations results, while curves represent the result of the effective model proposed in Ref. [10]. The model is based on the PNJL model [11,12]. The PNJL model has the quark field and the Polyakov-loop as dynamical variables. To reduce the finite lattice volume effects, we normalized the lattice results by the results of Stefan-Boltzmann limit on the same size lattice, while the effective model results are normalized by the same limit in the continuum theory. Note that the normalized result is real, although the chemical potential and the unnormalized density are pure imaginary. The normalized number density has small  $\theta$ -dependence. But this does not mean that the unnormalized number density itself is almost constant. It is approximately proportional to the Stefan-Boltzmann limit. This tendency hardly depends on the isospin chemical potential. We also see that the effective model well reproduces the lattice data.

Figure 2 shows the same as Fig. 1 but for  $T=1.08T_c$ . The normalized quark number density decreases as  $\theta$  increases. This tendency may be related with the spontaneous chiral symmetry breaking. It is known that the effects of the spontaneous breaking of the chiral symmetry becomes large as  $\theta$  increases. Hence, quarks are less thermally excited at large  $\theta$  when  $T$  is not large enough. We also see that the effective model underestimates the lattice data. The same tendency has been seen at lower temperature. This shortcoming of the effective model is originated in the fact that the hadron contributions are not correctly included in the effective model.

Figure 3 shows the same as Fig. 1 but for the isospin

number density. Note the isospin number density is real, since  $\mu_I$  is real. We see that the effective model well reproduces the lattice data as in the case of the quark number density.

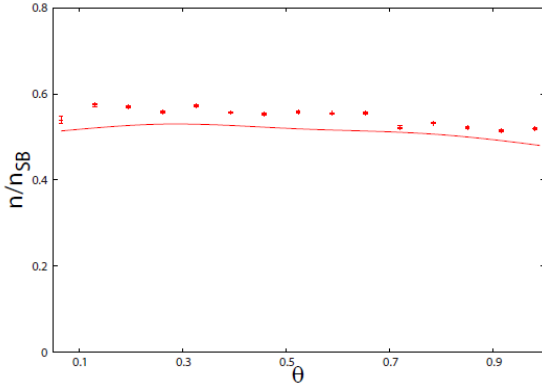


Fig. 1 The  $\theta$ -dependence of the quark number density.  $T=1.35T_c$  and  $\mu_I=0.4T$ .

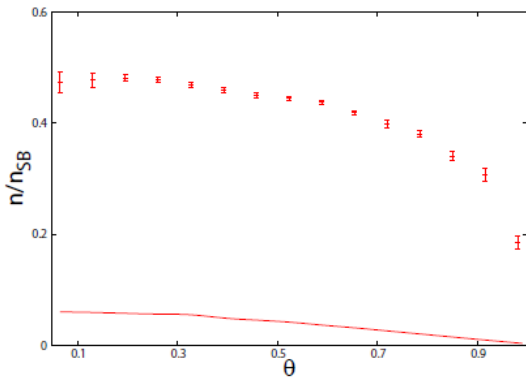


Fig. 2 The  $\theta$ -dependence of the quark number density.  $T=1.08T_c$  and  $\mu_I=0.4T$ .

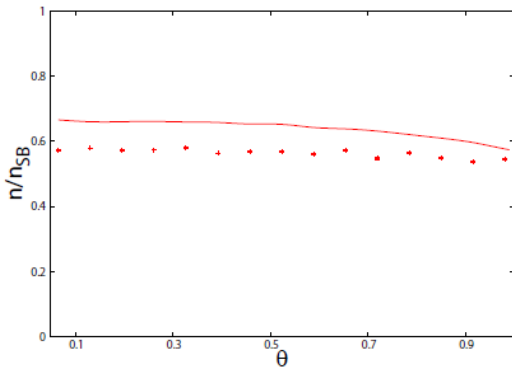


Fig. 3 The  $\theta$ -dependence of the isospin number density.  $T=1.35T_c$  and  $\mu_I=0.4T$ .

Figure 4 shows the same as Fig. 3 but for  $T=1.08T_c$ . As is in the case of the quark number density,

the normalized isospin density decreases as  $\theta$  increases. We also see that the effective model underestimate to the lattice data. The same tendency has been seen at lower temperature.

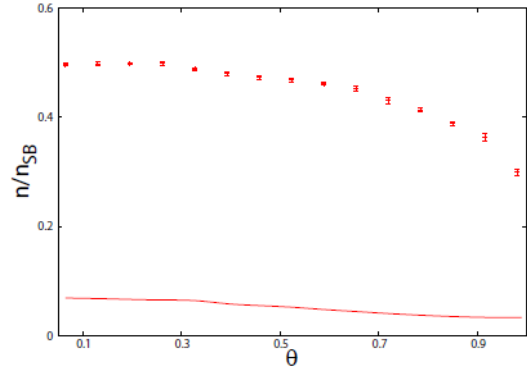


Fig. 4 The  $\theta$ -dependence of the isospin number density.  $T=1.08T_c$  and  $\mu_I=0.4T$ .

#### 4. Summary and discussions

In this report, we report the results of the lattice QCD result with finite real isospin chemical potential and finite imaginary quark number chemical potential. At high temperature, the normalized quark number and isospin densities do not depend much on the imaginary quark number chemical potential. This means that the unnormalized quark number and isospin densities are approximately proportional to the Stefan-Boltzmann limits. It may be expected that this tendency happens even at real  $\mu$ . On the contrary, at low temperature, the normalized densities decrease as  $\theta$  increases. This fact may indicate that the effect of spontaneous chiral symmetry breaking becomes larger as  $\theta$  increases.

It is also seen that the present effective model well reproduces the lattice data at high temperature, but underestimates the lattice data at intermediate and low temperatures. This shortcoming of the effective model may be originated in the fact that the hadron contributions are not correctly included in the model. It has been suggested that the contributions of hadron resonance gas are important for analyzing the equations of states of QCD matter. (See, e.g., Ref. [13], and the references therein.) It must be needed to improve the effective model to include the hadron effects correctly by connecting quark-type model and the hadron resonance gas model. It is an important study in future.

#### Acknowledgements

The author deeply thanks to Atsushi Nakamura, Masanobu Yahiro, Junichi Takahashi, Masahiro Ishii, Junpei Sugano, Akihisa Miyahara and Takehiro Hirakida for useful discussions and their supports. This work was

done in the collaborative research with them. This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (No. 26400279) from the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS).

### References

- (1) Y. Aoki, G. Endrödi, Z. Fodor, S. D. Katz, and K. K. Szabó, *Nature (London)* 443, 675 (2006).
- (2) P. de Forcrand and O. Philipsen, *Nucl. Phys. B* 642, 290 (2002).
- (3) M. D'Elia and M. P. Lombardo, *Phys. Rev. D* 67, 014505 (2003).
- (4) J. B. Kogut and D. K. Sinclair, *Phys. Rev. D* 66, 034505 (2002).
- (5) H. Kouno, M. Kishikawa, T. Sasaki, Y. Sakai and M. Yahiro, *Phys. Rev. D* 85, 016001 (2012).
- (6) J. Takahashi, H. Kouno and M. Yahiro, *Phys. Rev. D* 91, 014501 (2015).
- (7) Y. Iwasaki, *Nucl. Phys. B* 258, 141 (1985).
- (8) B. Sheikholeslami and R. Wohlert, *Nucl. Phys. B* 259, 572 (1985).
- (9) S. Choe, A. Nakamura, C. Nonaka and S. Muroya, *Soryushiron Kenkyu (in Japanese)*, vol. 108 no.1, 1 (2003).
- (10) J. Sugano, J. Takahashi, M. Ishii, H. Kouno and M. Yahiro, *Phys. Rev. D* 90, 037901 (2014).
- (11) K. Fukushima, *Phys. Lett. B* 591, 277 (2004).
- (12) C. Ratti, M. A. Thaler and W. Weise, *Phys. Rev. D* 73, 014019 (2006).
- (13) A. Miyahara, Y. Torigoe, H. Kouno and M. Yahiro, *Phys. Rev. D* 94, 016003 (2016).

## 博士論文要旨及び審査要旨公表

佐賀大学大学院工学系研究科において、博士の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）独8条の規定に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨をここに公表する。





氏名(本籍) 高崎 克也 (熊本県)  
 学位の種類 博士(工学)  
 学位記の番号 甲第 628 号  
 学位授与の日附 平成 30 年 9 月 25 日  
 学位論文題名 動翼形状変化による波力発電用ウエルズタービンの性能改善

#### 論文審査委員

(主査)	佐賀大学	教授	木上 洋一
(副査)	〃	〃	松尾 繁
〃	〃	〃	光武 雄一
〃	〃	准教授	塩見 憲正
〃	〃	名誉教授	瀬戸口 俊明

### 論文内容の要旨

波力発電において、振動水柱内の往復空気流の 2 次エネルギーを用いて発電するタービンとしては、イギリスの J.J.Wells が 1977 年に、単純な対称翼が往復流において常に一方向に回転するウエルズタービンを提案して以来、世界中で研究が進められている。ウエルズタービンとして単葉式、複葉式、反転複葉式などがこれまでに提案されているが、いずれにおいても高回転時に失速特性を有しており、失速特性の改善が必要な課題であることが知られている。

本論文においては、単葉式のウエルズタービンの欠点である失速特性の改善を始めとして、最大効率の増加や高効率域の拡大を目指して、翼形状を変化させることが提案された。すなわち振動水柱型波力発電の 2 次エネルギー変換装置として使用される往復流型タービンの一つであるウエルズタービンの性能改善手法として、種々の動翼形状に変化させ、それらの効果が実験的および解析的に調査された。具体的には、ウエルズタービンの動翼として三次元形状翼およびセレーシオン翼(翼後縁部に多くの切り込みを入れた翼)を採用し、定常流と非定常流によるタービン性能試験および定常流の試験結果を用いた準定常解析手法で得られる往復気流におけるタービン性能により、三次元形状翼およびセレーシオン翼の効果が評価された。本論文はその結果を取り纏めたものであり、全 7 章で構成されている。

第 1 章は序論として、波浪エネルギーに関する概論や波力発電装置の分類について概説し、波力発電に関する従来の研究と諸問題、および本研究の目的を述べている。

第 2 章では、波力発電用空気タービンの種類や特徴について詳述している。

第 3 章では、本研究で使用した試験装置や試験方法について述べている。

第 4 章では、波力発電用空気タービンの実験や解析で得られたデータを基に空気タービンの性能を評価する方法について述べている。

第 5 章では、ウエルズタービンの動翼として三次元形状翼を採用した場合について、定常流のタービン性能試験および往復気流におけるタービン性能解析の結果を述べている。

第 6 章では、ウエルズタービンの動翼としてセレーシオン翼を採用した場合について、定常流のタービン性能試験および往復気流におけるタービンのヒステリシス特性調査の結果を述べている。

第 7 章では、本研究で得られた成果をまとめている。

### 論文審査結果の要旨

本論文において、三次元形状翼を有するウエルズタービンにおいては、タービンの最大効率が向上することが明らかとなり、またセレーシオン翼(翼後縁部に多くの切り込みを入れた翼)を有するウエルズタービンについては最大効率が低下しない一方で、タービン前後の圧力差が低減することが明らかとなるなど、ウエルズタービンの性能改善に関する有用な知見が示されている。

平成 30 年 7 月 26 日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

また本研究は、審査付学術論文 3 編、国内学会発表 3 編、国際学会発表 3 編で報告されており、本研究は博士の学位に値するといえる。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士（工学）の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員で合格と判定した。

氏名(本籍) 張 舒 (中華人民共和国)  
 学位の種類 博士(学術)  
 学位記の番号 甲第 629 号  
 学位授与の日附 平成 30 年 9 月 25 日  
 学位論文題名 地域社会におけるソーシャル・キャピタル形成の社会経済的影響

#### 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 張 韓 模  
 (副査) " " 有 馬 隆 文  
 " " " 山 下 宗 利  
 " " 准教授 中 尾 友 香 梨  
 " 西九州大学 教授 田 中 豊 治

### 論文内容の要旨

現代世界は、産業化や都市化そしてグローバル化が急速に進むについて、GDP などの経済指標は確実に向上しているものの、一方において信頼や信用の崩壊、孤独の蔓延、人間関係の希薄化、所得格差の拡大、幸福度の低下といった諸課題にも直面している。ソーシャル・キャピタル (social capital) というキーワードは、この課題に取り組む過程で生まれた。しかし今のところ、ソーシャル・キャピタルという概念の捉え方も学者によって異なり、分析内容や測定方法もさまざまである。

このような状況を問題意識としている本研究は、ソーシャル・キャピタルの概念を再定義したのち、佐賀県と中国の福建省を事例として、ソーシャル・キャピタル形成が地域社会と地域経済に与える影響を明らかにするものである。この目的を達成するために、本研究は 3 つ仮説を立て、非構造化インタビュー調査、アンケート調査、文献調査に基づいて研究を行い、これらの仮説を検証した。本研究は 8 つの章で構成される。

第 1 章は序論として、本研究の研究背景と問題意識、先行研究や研究方法等について論じた。

第 2 章は、本論の導入部として現代社会の病理を概観し、格差社会の進展やアノミー現象、特に家庭関係の崩壊から地域コミュニティの崩壊、人と人との間の関係性が喪失しつつある現状と課題を明らかにした。

第 3 章ではソーシャル・キャピタル理論を再検討した。日本におけるソーシャル・キャピタルに関する研究は、パットナム (Putnam) の研究に基づいた分析が大半を占める。しかし、パットナム研究はソーシャル・キャピタル研究の大きな 2 つの流れの片方に該当するものである。本章では、ソーシャル・キャピタル理論を、ソーシャル・キャピタルを「個人財」(individual asset)として扱う研究と、もう一つ「集合財」(collective asset)として扱う研究とに分

類したのち、両理論の統合を試みた。

第 4 章は佐賀県のソーシャル・キャピタルを分析した。内閣府などが行った調査によると、佐賀県は、付き合い指数が突出して高い、ボンディング指数とブリッジング指数を追加した 2007 年と 2016 年の結果を見れば、ボンディング指数は両方ともに相対的に高いという特徴がある。この結果を踏まえて、佐賀県職員 3 名、佐賀市職員 1 名、佐賀市民 6 名に対してインタビュー調査を行い、佐賀県の特徴と佐賀県の政策、市民意識との関連性を分析した。

第 5 章は、NPO (Non-profit Organization) とソーシャル・キャピタルの関連を議論した。佐賀県内にある NPO 法人スチューデント・サポート・フェイス (S.S.F.) のスタッフを対象にアンケート調査を行った。調査の結果、ソーシャル・キャピタルが高い人ほど、NPO 活動に対する積極性も高く、活動を行うことによって生じた充実感も高かった。この分析結果は、自治体のより積極的な NPO 支援の必要性を裏付ける。

第 6 章は、中国の福建省を取り上げ、ソーシャル・キャピタルが地域経済に及ぼす影響について議論した。福建省は古来より東南アジアとの関係が深く、人的交流が多かっただけに東南アジア諸国へ移住した福建籍華僑が多かった。福建省の華僑資本の形成と発展を纏めると、華僑による為替送金は不動産、教育、公益事業への影響と役割が大きかった。改革開放以降、福建省は外国から華僑資本を導入するだけでなく、近年福建省からアセアン諸国への投資も増えている状況を明らかにした。

第 7 章は台湾資本の福建省進出を取り上げた。同省は台湾海峡に面し、台湾との距離が最も近く、昔から台湾と同文化を有する地域と言われている。本論での議論を通じて福建省の台湾資本受入が変化しつつあることを明らかにした。

最後の 8 章は本研究の結論と課題である。本研究は、華僑・華人のソーシャル・キャピタルについては文献調査だけ実施したが、現地調査や華僑のソーシャル・キャピタルの測定など課題も残した。本研究は、地域社会におけるソーシャル・キャピタル形成は人的ネットワークを強化して、社会経済面において地域の活性化にも影響を与えていることを明らかにした。張舒氏の研究は、ソーシャル・キャピタル研究において、二つの理論の統合を試み、ソーシャル・キャピタルの概念を広げたところに、研究のオリジナリティーがある。また、この分析結果に基づいて、ソーシャル・キャピタル形成に向けて自治体の積極的な役割を提案しているが、これからこの研究の実践が期待される場所である。

平成 30 年 7 月 30 日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

また、本研究は、審査付学術論文 3 編、学会発表 3 件等で報告されており、本研究は博士の学位に値すると言える。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士（学術）の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

### 論文審査結果の要旨

学位申請者、張舒氏に対して、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する内容について口述試験をおこなうことを事前に通知し、平成 30 年 7 月 30 日に実施した。

口述試験は博士論文（「地域社会におけるソーシャル・キャピタル形成の社会経済的影響」）を中心として、特にソーシャル・キャピタルの概念、自治体の役割、華僑の役割、ソーシャル・キャピタルの測定手法について行われたが、申請者自身の研究成果を踏まえた適切な説明がなされた。さらに申請者は、口述試験から地域経済学や社会学に関して十分な知識と理論構成力を有していると判断された。

以上に述べたように、本申請者は博士論文を中心とした最終試験では、いずれも十分な内容の知見を示し、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) KRISANA KOBWITTAYA  
(タイ王国)  
学位の種類 博士(工学)  
学位記の番号 甲第630号  
学位授与の日附 平成30年9月25日  
学位論文題名 Upconversion luminescence in  
ZnO-TiO<sub>2</sub> composite doped with  
rare earth elements

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 大石 祐司  
(副査) " " 渡 孝則  
" " " 山田 泰教  
" " 准教授 成田 貴行

## 論文内容の要旨

一般のセラミック蛍光体は照射エネルギーより低いエネルギーの可視光を発するが、アップコンバージョン(UC)蛍光体は赤外線などの電磁波を高いエネルギーの可視光に変換し、発光する。UC 蛍光体はマトリックスとなる母材結晶、感光成分、活性化成分からなる。母材結晶には従来フッ化物が用いられてきたが、耐候性に劣るため高耐候性の酸化物が注目されている。また、Ybが赤外線を効率的に吸収することより感光成分として利用されているが、活性化成分にはEr, Ho, Tmなどがあり、最適添加量は母材結晶により変化する。ZnO-TiO<sub>2</sub>系複合酸化物は本研究で見出されたUC用母材であり、容易に入手でき安価である。この母材について活性化成分を系統的に変化させ、発光メカニズムを検討した報告は無く、今後も更なる研究展開が求められている。

本論文は6章で構成されている。

第1章は、序論として研究の背景、専門用語の解説、蛍光の基礎、各種蛍光体とそのエネルギー変換、UCに関する説明と蛍光体の製法、UC蛍光体の応用、本研究の目的を述べている。

第2章ではHoとYbを添加したZnO-TiO<sub>2</sub>複合体を固相反応法で製造し、製造条件とUC特性の関係を述べている。生成物には4種の結晶、Zn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>、Re<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>、Re<sub>2</sub>TiO<sub>7</sub>、TiO<sub>2</sub>が含まれており、これらの含有率はZnO/TiO<sub>2</sub>仕込比(X)により変化し、それと共に緑色(542nm)発光強度が変化し、X=1で最大となることを見出した。この発光はZn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>のZnサイトに固溶したHo, Ybにより生じると考え、最適添加量を調べたところ、前者が0.05 mol%、後者が9 mol%であった。共に同じZnサイトに固溶するため、競合固溶により最適量が決まると考えられる。発光はYbからHoへのエネルギー移動と無放射緩和に続く基底状態への緩和により起こっていると推察された。本系における励起段数は1.16と理論値2より小さく

なり、エネルギーロスが起きていることが分かった。

第3章ではErとYbを添加したZnO-TiO<sub>2</sub>複合体をゾル溶液法で製造し、製造条件とUC特性の関係を述べている。まずゾル溶液からの沈殿物の加熱分解挙動を解析し、最適加熱温度は1300°Cであることが分かった。さらに高温では原料とムライトボートが反応し、Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>が生成することを状態図から説明した。第2章と同様な手法により、生成物には4種の結晶が含まれており、赤色(657nm)の発光強度もX=1で最大となることを見出した。ErとYbの最適添加量はそれぞれ3mol%、9mol%であった。Yb添加量はHo系と同じ値であったが、Er添加量は60倍となることが分かった。本系における励起段数は1.33と理論値2より小さくなったが、Ho系より大きくなることが分かった。これはYbとErの励起エネルギー準位が近いとめと考えられる。

第4章は第2章及び第3章の結果を基に、HoとYbを添加したZnO-TiO<sub>2</sub>複合体をゾル溶液法で製造し、製造条件とUC特性の関係を述べている。製造法に寄らず生成物には4種類の結晶が含まれておりX=1, Yb添加量: 9 mol%で最大発光強度を示した。Ho添加量は0.03 mol%と少量で最大発光強度を示したが、これは溶液法のため混合時の均一性が増し、Hoが固溶し易くなったためと考えられる。励起段数は固相法と同じであった。

第5章ではTmとYbを添加したZnO-TiO<sub>2</sub>複合体をゾル溶液法で製造し、製造条件とUC特性の関係を述べている。Tm系では近赤外(795nm)の発光を示すことが分かった。この系では発光強度はX=0.5~1でほとんど変わらず、TmとYbの最適添加量はそれぞれ0.125 mol%、15 mol%であった。Tm系ではYb添加量はこれまでの値より6 mol%も多くなった。本系における励起段数は1.13と小さく、近赤外発光、多量のYbが必要、の点から実用性に劣ると考えられる。

第6章ではこれまでの結果をまとめ、今後の研究方針を提案した。

補足では、Zn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>結晶のリートベルト解析により希土類金属(Ho, Er, Tm)イオンのZnサイト占有優先率を計算し、六配位サイトのZn空孔が八配位サイトへ移動し、この空孔に希土類金属イオンが固溶すると考えられること、空孔はTiO<sub>2</sub>の共存により発生すること、がX=1で最大発光を示すメカニズムであると提案した。

以上、本論文は希土類金属を含むZnO-TiO<sub>2</sub>複合体において、Zn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>結晶のZn空孔への希土類金属イオンの固溶によりUC発光が生じ、Hoで緑色、Erで赤色、Tmで近赤外の発光を示すことを見出した。また、Zn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>とTiO<sub>2</sub>の共存が重要であること、結晶構造解析よりZn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>結晶への固溶メカニズムを提案し、今後のUC蛍光体の展開に重要な知見を示

している。

平成30年8月7日に実施した博士論文公聴会において種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

また、本研究は、審査付学術論文4編、国際会議発表2件等で報告されており、本研究は博士の学位に値すると言える。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士（工学）の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

### 論文審査結果の要旨

学位申請者、Krisana Kobwittaya 氏に対して、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する内容について口述試験を行うことを事前に通知し、平成30年8月7日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに関連する内容について行った。活性化成分の最適添加量及び発光色の違いについて問うたところ、活性化成分と感光成分とのエネルギー準位の違いと両者間のエネルギー転移量の相違、 $Zn_2TiO_4$ 結晶の配位数交換空孔への固溶、など申請者自身の研究成果を踏まえた適切な説明がなされた。さらに申請者は、口述試験からアップコンバージョンに関する最近の理論や一般の蛍光体に関して十分な知識と理論構成力を有していると判断された。

以上に述べたように、本申請者は博士論文を中心とする最終試験では、いずれも十分な内容の知見を示し、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) Md. Jahangir Alam  
(バングラデシュ)  
学位の種類 博士(工学)  
学位記の番号 甲第 631 号  
学位授与の日附 平成 30 年 9 月 25 日  
学位論文題名 Measurements and Prediction of  
Transport Properties of Low GWP  
Refrigerants

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 宮 良 明 男  
(副査) " " 光 武 雄 一  
" " " 松 尾 繁  
" " 准教授 仮 屋 圭 史

## 論文内容の要旨

Environmental Concern over global warming potential (GWP) of conventional refrigerants has motivated researchers to find alternative fluids with low GWP. Hydrofluoroolefins (HFOs), Hydrochloro-fluoroolefins (HCFOs) and Hydrofluoroether (HFEs) families are the most promising candidates to design high temperature heat pump and organic Rankine cycle because of their favorable properties especially low-GWP. Viscosity and thermal conductivity are key transport properties to design the process and heat exchangers. Therefore, the motivation of this research is to measure the viscosity and thermal conductivity of next generation potential low GWP working fluids. The viscosities and thermal conductivities of R-1233zd(E), R-1336mzz(Z), R-1234ze(Z), R-356mmz, R-1224yd(Z) and mixture (R-1123+R-32) were measured over a wide range of temperature and pressure in this study. The Tandem capillary tubes method is used to measure viscosity. In this method, the pressure drop of a laminar flow was measured to determine the viscosity of test fluids.

The Tandem capillary tubes method based on the Hagen-Poiseuille equation with considering pipe end and kinetic corrections. Two capillary tubes were connected in series in the test section to minimize the end effects of capillary tubes. For R-1233zd(E), the viscosity was measured from temperature 314 to 434 K at pressures from 1.0 to 4.07 MPa for liquid phase and from 394 to 474 K with pressures from 1.0 to 3.06 MPa for vapor phase. For R-1336mzz(Z), the viscosity was measured from temperature 314 to 434 K at pressures from 0.5 to 4.06 MPa for liquid phase and from 375 to 475 K with pressures from 0.5 to 2.0 MPa for vapor phase. For R-1234ze(Z), the viscosity was measured from temperature 313 to 414 K at pressures from 0.5 to 4.0 MPa for liquid phase and from 354 to 455 K with pressures from 0.5 to 3.0 MPa for vapor phase. For R-356mmz, the kinematic viscosity was measured from temperature 313 to 453 K at pressures from 1.0 to 4.0 MPa for liquid phase and from 393 to 454 K with

pressures from 0.5 to 2.0 MPa for vapor phase. For R-1224yd(Z), the viscosity was measured from temperature 303 K to 424 K at pressures from 1.0 MPa to 4.0 MPa for liquid phase and from 394 K to 475 K with pressures of 1.0 MPa to 3.0 MPa for vapor phase. For mixture (R-1123+R-32), the viscosity was measured from temperature 251 K to 313 K at pressures from 3.0 MPa to 4.0 MPa for liquid phase and from 354 K to 364 K with pressures of 3.0 MPa to 4.0 MPa for vapor phase.

On the other hand, the well-known transient hot wire method is used to measure the thermal conductivity of fluids. Two thin (diameter 15 $\mu$ m) platinum wires in parallel connection have used in this hot wire apparatus as short and long wire, which is worked as both electrical heat source and resistance thermometer to measure the temperature rise during experiments. In addition, the two wires compensating system was considered to eliminate the axial heat conduction. The temperature ranges were considered for the measurements from around room temperature to high temperature for pure working fluids as well as for mixture in this study. For R-1233zd(E), the thermal conductivity was measured from temperature 313 to 433 K at pressures from 1.0 to 4.1 MPa for liquid phase and from 334 to 474 K with pressures from 0.15 to 1.55 MPa for vapor. For R-1336mzz(Z), the thermal conductivity was measured from temperature of 314 to 435 K at pressures from 0.5 to 4.0 MPa for liquid phase and from 321 to 496 K with pressures from 0.10 to 2.0 MPa for vapor. For R-1234ze(Z) the thermal conductivity was measured from temperature 313 to 423 K at pressures from 1.0 to 4.18 MPa for liquid phase and from 354 to 452 K with pressures from 0.20 to 1.59 MPa for vapor phase. For R-356mmz, the thermal conductivity was measured from temperature 319 to 462 K at pressures from 0.5 to 4.0 MPa for liquid phase and from 393 to 452 K with pressures from 0.18 to 1.57 MPa for vapor.

Uncertainties of measured data of viscosity and thermal conductivity have calculated by the method of propagation uncertainty. The estimated combined standard uncertainties were about 3.0% for viscosity and 2.0% for thermal conductivity in this study. Prediction of the viscosity and thermal conductivity of low GWP working fluids is the key issue in commercial area. Simplified correlations are developed for the viscosity and thermal conductivity at saturation conditions for above mentioned refrigerants. Also, the extended corresponding states (ECS) models were applied to predict the viscosity and thermal conductivity of next generation refrigerant R-1233zd(E), R-1336mzz(Z) and R-1234ze(Z). Predicted values with the ECS models are compared with measured data of viscosity and thermal conductivity. In addition, viscosity and thermal conductivity shape factors are introduced to improve the prediction capability.

## 論文審査結果の要旨

地球環境、特にオゾン層破壊および地球温暖化への影響が小さいオレフィン系の冷媒がいくつか開発されているが、それらの熱物性、その中でも粘度や熱伝導率といった輸送性質はほとんど測定されていないのが現状である。一方、冷媒に対する規制はさらに厳しくなる方向に向かっているため、これらの冷媒を早期に実用化する必要がある、システム実験やシミュレーション、設計の基盤情報となる輸送性質の正確なデータが必要不可欠である。

本研究では新規に開発されたオレフィン系の冷媒、R-1233zd(E)、R-1336mzz(Z)、R-1234ze(Z)、R-1224yd(Z)、や混合冷媒 R-1123+R-32、含フッ素エーテル系の R-356mmz(Z)、などの粘度および熱伝導率を世界に先駆けて測定し、広く研究者や技術者が利用できるようにしたものである。

第1章では、冷媒の種類や基本的な特性、可燃性や毒性などのクラス分け、また地球環境に影響を与える冷媒、などについて解説するとともに、モントリオール議定書やそのキガリ改正、都議定書などによる冷媒規制について説明がなされている。また、そのような背景を踏まえて、本研究における目的や目標が示され、博士論文のアウトラインについても説明されている。

第2章では、広範囲な文献レビューがなされており、冷凍機が開発された初期の段階で使用された第1世代の冷媒から、現在開発途上にある第4世代の冷媒までの歴史とその背景、冷媒として望まれる性質、オゾン層破壊係数 ODP や地球温暖化係数 GWP に関する文献レビュー、伝導率測定に関する文献のレビューがなされると共に、本研究の位置づけが示されている。

第3章では、粘度測定に関して、新たに開発した本研究のオリジナルな方法であるタンデム型細管法による測定方法が詳細に説明され、具体的な装置の構造、信頼性の検証、不確かさ解析などが示されている。また、拡張対応状態原理に基づいた粘度の推算方法の解説も行われ、本研究で得られたデータを用いたフィッティングによる推算値の改善についても説明されている。そして、3.2 節では R-1233zd(E) の測定結果、3.3 節では R-1336mzz(Z) の測定結果、3.4 節では R-1234ze(Z) の測定結果、3.5 節では R-356mmz の測定結果、3.6 節では R-1224yd(Z) の測定結果、そして 3.7 節では混合冷媒 R-1123+R-32 の測定結果がそれぞれ示されている。

第4章では、熱伝導率測定に関して、独自に製作した非定常細線法による測定方法が詳細に説明され、具体的な装置の構造、信頼性の検証、不確かさ解析などが示されている。また、拡張対応状態原理に基づいた熱伝導率の推算方法の解説も行われ、本研究

で得られたデータを用いたフィッティングによる推算値の改善についても説明されている。そして、4.2 節では R-1233zd(E) の測定結果、4.3 節では R-1336mzz(Z) の測定結果、4.4 節では R-1234ze(Z) の測定結果、4.5 節では R-356mmz の測定結果がそれぞれ示されている。

第5章では、本研究で測定された結果の総括が行われると共に、今後の研究課題、方向性に関する提言を行っている。

本研究で得られた成果は、独創的な新しい結果を含んでおり、工業的に広く応用できるものである。

平成30年7月20日に実施した博士論文公聴会では、これらの内容が分かりやすく丁寧に説明され、質問に対しても適切な回答がなされた。なお、本研究の内容は4件の査読付き Journal 論文に掲載されるとともに、10件の国内外の会議で発表されている。

以上のことより、本論文は博士(工学)の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員の一致で合格と判定された。



氏名(本籍) MD. AMZAD HOSSAIN (Bangladesh)  
 学位の種類 博士(工学)  
 学位記の番号 甲第 632 号  
 学位授与の日附 平成 30 年 9 月 25 日  
 学位論文題名 Development of Magnetized Plasma  
 Sputtering Source for Effective  
 Target Utilization with Various  
 Magnet Setups  
 (ターゲット有効利用のための  
 様々な磁石配置を用いた磁化プ  
 ラズマスパッタ源の開発)

## 論文審査委員

(主査)	佐賀大学	教授	大津康徳
(副査)	"	"	大石敏之
"	"	"	田中徹
"	"	准教授	猪原哲

## 論文内容の要旨

A high-density radio frequency (RF) magnetized sputtering plasma source with a rotational square-shaped magnet arrangement for uniform target utilization has developed. Eight neodymium rod magnets of  $30 \times 5 \times 3$  mm, where the connection between N-pole and S-pole magnets is one side of the square, are mounted on a circular iron yoke disc and an iron cover of  $5 \times 3 \times 1$  mm is also used for magnetic shielding of otiose magnetic fields from the permanent magnets. The magnetic field simulation, the measurement of the target erosion and the time-averaged ion flux to the target have been investigated for case (a) without iron cover, no air gap between N-pole and S-pole magnets, case (b) with iron cover, no air gap, and case (c) with iron cover, 5 mm air gap, respectively. It is found that the iron covers suppress the horizontal magnetic flux density and the copper target utilization percentage increases from 74.15 % to 87.49 %. Moreover, by decreasing the air gap between the shielded magnets, the copper target utilization percentage rises from 83.85 % to 87.49 %. The target utilization as well as the time-averaged ion flux to the target are optimum for case (b).

A gyratory square-shaped capacitive radio-frequency (RF) discharge plasma sputtering source is proposed for materials processing and functional film preparation, composed of magnet arrangements consisting of eight neodymium bar magnets of dimensions  $30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ . In order to evaluate its performance, two square-shaped magnetic arrangements were investigated: case (a) without iron shielding and case (b) with iron shielding of dimensions  $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ . The film thickness and the resistivity profiles of case (b) are more uniform than their corresponding profiles in case (a). The lowest electrical resistivity of the film is  $4.33 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  at  $r = 30 \text{ mm}$  for case (b), which is of the same order as

the bulk resistivity of the copper. The roughnesses of the film thickness profile for cases (a) and (b) are  $\pm 24.4\%$  and  $\pm 7.2\%$ , respectively. Using atomic force microscopy (AFM) analysis, the film surface for case (b) was observed to show an improved smooth surface with reduced needle-shaped grain size, as well as a lower surface roughness than that of case (a). The surface roughness of the films is approximately 3.73 nm and 2.49 nm for case (a) and case (b), respectively. From the X-ray diffraction (XRD) patterns, the film texture, the relative intensity ratios of the (111) peak to the (200) [ $I(111)/I(200)$ ] were found to be 13.76 and 4.08 for the cases (a) and (b), respectively.

To improve the target erosion near the edge, the outer ring-shaped RF magnetized plasma is produced near the chamber wall by a monopole magnet scheme. Three monopole magnet schemes such as the setups (a)  $R = 5$  mm, (b)  $R = 20$  mm and (c)  $R = 35$  mm has been investigated are chosen, where "R" is the gap distance between magnets in consecutive circles. Distributions of the 2D magnetic flux lines, absolute value of the horizontal magnetic flux density and discharge voltage are investigated for the proposed setups to produce outer ring-shaped plasma. A high luminous ring-shaped plasma is observed for (b)  $R = 5$  mm, whereas multi-ring discharges are observed for (b)  $R = 20$  mm and (c) 35 mm. It is found that the electron temperature decreases with increasing gas pressure for the all cases. The electron temperatures were 2.42, 1.71 and 1.15 eV at Ar gas pressure of 4 Pa for the setup (a), (b), and (c), respectively. The plasma density is approximately same for the setups (b) and (c) at all gas pressure. The highest plasma densities were  $6.26 \times 10^{15}$ ,  $1.06 \times 10^{16}$  and  $1.11 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  at 5 Pa for the setups (a), (b), and (c), respectively. Radial profile of ion saturation current for case (b)  $R = 20$  mm is more uniform than that for case (a)  $R = 5$  mm and case (c)  $R = 35$  mm set up.

The capacitively coupled RF outer ring-shaped magnetized plasma discharge is developed with a concentric monopole arrangement of magnets to erode the target in a specific area, in especial, near the chamber wall. The three concentric monopole magnet arrangements with a center magnet, and magnets in setups (a) three circles, (b) two circles, and (c) one circle were investigated. From the magnetic flux lines profiles, it was found that the magnetic flux density in component parallel to the target surface has a peak magnitude in the outer circle of magnets for all setups. Ring-shaped plasma in the specific outer area was observed. The results showed that the target utilization could be controlled in the outer specific area near the wall.

A pulsed direct current discharge ring-shaped plasma source has been proposed using single pole magnet arrangements, including a center magnet, with magnets in the setups (a) one circle, (b) two circles, and (c) three circles. The strong ring-shaped plasma discharges was observed for all setups. The typical discharge voltages were 1.0, 0.6, and 0.6 kV for setups (a), (b), and (c),

respectively. Setup (b) has the best profile among the three setups.

## 論文審査結果の要旨

太陽電池，スマートフォンなどには，様々な機能性を持つ半導体薄膜が広く利用されており，その膜にはレアメタルを含む高価な薄膜が含まれている。その合成方法にはマグネトロンスパッタ法が広く利用されている。しかしながら，プラズマが不均一に形成されるため，薄膜材料ターゲットの侵食分布が不均一になり，ターゲットの約30%程度しか使用できず，残り70%は廃棄されている。

本論文では，資源の有効利用の観点から，従来にない磁石配置を提案し，従来の平板状ターゲットを均一に侵食できるスパッタ装置を開発することを目的としている。本研究は，半導体製造装置の中の製膜装置として注目されており，今後も更なる研究展開が期待される分野である。

本論文は全8章で構成されている。第1章では研究の背景と本研究の意義について詳細に述べている。第2章では，実験装置および計測方法について述べている。第3章では，棒磁石を正方形に配置したスパッタ装置を提案し，その特性を明らかにしている。(1)磁石を正方形配置した際の磁界分布解析結果を示し，磁石に設置する遮へい鉄片の影響を明らかにしている。(2)(1)で得られた磁界解析結果から予想されるプラズマ形状と実測によるプラズマ発光分布が一致することを実証している。(3)提案した磁石配置により発生させたプラズマを回転させることにより，薄膜材料ターゲット利用率87.5%を達成させた。薄膜材料ターゲットの侵食分布とターゲットに入射するイオン電流分布の関係も明らかにしている。

第4章では，第3章で提案したスパッタ装置を用いて合成した銅薄膜の特性を検討している。次のような研究成果を得ている。(1)プラズマ特性や放電特性に及ぼす圧力依存性を明らかにしている。(2)銅薄膜の膜厚分布やその抵抗率分布に及ぼす正方形に配置した磁石に設置する遮へい鉄片の影響を検討した。遮へい鉄片を付加すると，膜厚分布の均一性が良くなる。抵抗率は遮へい鉄片を付加することにより，付加なしに比べて低くなり，銅バルク値とほぼ同程度になることを見出した。

第5章では，前章までに提案した磁石配置で侵食されていなかった部分，即ち，円板状薄膜材料ターゲットの端部を侵食させるために，新たな磁石配置を提案している。磁石配置は小さい円筒磁石を鉄ヨーク板に同心上に，かつ，その極性が同じ極になるように配置している。具体的には次のような研究成果を得ている。(1)磁石間隔 $R=5\text{mm}$ ， $20\text{mm}$ ， $35\text{mm}$ の3つの磁石配置について磁界解析を行っている。(2)

3つの磁石配置において観測されたプラズマ発光分布は，(1)の解析で得られた磁界分布から予想されるプラズマ形状と一致していた。(4)3つの磁石配置における放電特性，プラズマ密度や電子温度を明らかにしている。(5)薄膜材料ターゲットに入射するイオン電流分布を計測し，薄膜材料ターゲットの侵食分布を予測した。

第6章では，第5章と同様な目的に基づいて， $R=5\text{mm}$ と一定とし，鉄ヨークに同心上に配置する磁石数の影響を実験的に検討し，以下の研究成果を得ている。(1)3つの磁石配置とも磁界解析結果は，一番外側の磁束密度が最も高くなることを見出した。

(2)(1)の磁界解析結果から予測される分布と一致するプラズマ発光分布が得られことを明らかにした。(3)計測されたイオン電流分布はプラズマ発光分布と一致することを実験的に明らかにした。

第7章では，第5章と第6章で提案した磁石配置を用いたリング状パルス放電プラズマ特性を実験的に解明している。(1)3つの磁石配置において，磁界解析結果を用いて電子と正イオンのラーマー半径やホールパラメータなどの磁化特性を明らかにしている。(2)3つの磁石配置における放電電圧，放電電流，放電電力を計測し，それらの時間推移を明らかにしている。(3)薄膜材料ターゲットに入射するイオン電流の時空間変化を詳細に計測し，興味深いイオン電流分布の時間変化を見出した。

第8章は，全体を総括し，今後の検討課題を提案している。

以上，本論文は，様々な磁石配置を提案し薄膜材料ターゲットの利用率を向上させるスパッタ装置の開発に関する重要な学術的成果が得られている。

平成30年7月20日に実施した博士論文公聴会においても，発表に対して種々の質問がなされ，いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

また，本研究は審査付学術論文4編，学会発表7件等で報告されており，本研究は博士の学位に値すると言える。

以上の審査結果に基づき，本論文は博士(工学)の学位を授与するに値するものと判断され，審査員全員一致で合格と判断した。

学位申請者 MD. AMZAD HOSSAIN 氏に対して，博士論文審査終了後に最終試験および口述試験を行うことを事前に通知し，平成30年7月20日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として，これに関連する内容について行った。スパッタ法について，特にその原理や課題，今後の展望などについて問うたところ，申請者自身の研究成果を踏まえた適切な説明がなされた。さらに申請者は，口述試験からスパッタ法やプラズマに関して十分な知識と理論構成力を有していると判断された。

以上に述べたように，本申請者は博士論文を中心

とした最終試験では、いずれも十分な内容の知見を示し、最終試験の結果は合格であると審査員全員一致で判定した。

氏名(本籍) Nutthachai Prongmanee  
(タイ)  
学位の種類 博士(工学)  
学位記の番号 甲第633号  
学位授与の日付 平成30年9月25日  
学位論文題名 Polymerized bentonites and  
their applications in  
geosynthetic clay liner  
(重合したベントナイト及びジオ  
シンセティックスクレイライナ  
ーへの応用)

#### 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 柴 錦 春  
(副査) " " 日 野 剛 徳  
" " 准教授 坂 井 晃  
" " " 末 次 大 輔  
" 中国上海交通大學 教授 Shuilong Shen

### 論文内容の要旨

ジオシンセティックスクレイライナー(GCL)はその低透水性及び局部損傷に対する自己修復能力を有するため、廃棄物最終処分場の遮水ライナーとして幅広く使われている。しかし、GCL中の天然ベントナイトは、高濃度陽イオン溶液、強酸・強アルカリ性溶液の浸透により膨張性が低下し透水性が増加、自己修復能力が低下する。Nutthachai Prongmanee氏の研究は、まず天然ベントナイトの高分子重合(ポリマライゼーション)による、高膨張、低透水、耐高濃度陽イオン溶液、耐強酸・強アルカリ性溶液のポリマー・ベントナイト複合体(PB)を合成する方法が開発された。次にPBを用いたGCL(PB-GCL)の透水と局部損傷があるPB-GCLの漏水試験により、PB-GCLの優れた遮水性能及び局部損傷に対する自己修復能力が有することが確認され、高陽イオン濃度、あるいは、強酸・強アルカリ性環境で遮水ライナーとして応用できることを明らかにした。

Nutthachai Prongmanee氏の学位論文は5章の構成である。

第1章では、研究の背景と目的を述べている。

第2章はリテラチャーレビューである。まずベントナイトを重合する方法の現状を纏め、高膨張・低透水性を目的とする最適法がないことが分かった。次にGCLの透水・自己修復能力に関する既存研究成果をまとめ、PB-GCLの自己修復能力に関する研究が殆どないことが分かった。従って、PBの重合の最適条件とPB-GCLの自己修復能力を中心に本研究が展開された。

第3章では、PBの重合方法と生成したPBの膨

張・透水性評価に関するものである。高い自由膨張率を指標として、遊離基重合法でアクリル酸をモノマー、ペルオキソ二硫酸カリウムをイニシエータ、重合溶液のpHを7とする最適PB重合条件が確立された。生成したPBに対して、蒸留水、高濃度陽イオン溶液、強酸・強アルカリ性溶液を用いて、透水、膨張、圧密等一連の試験結果により、天然ベントナイト(UB)と比べ、PBの透水性がかなり低く、膨張性が高いことが明らかにされた。

第4章ではPB-GCLの遮水性能及び損傷があるPB-GCLの自己修復能力に関する研究成果を述べている。0.6MのCaCl<sub>2</sub>溶液の場合、UB-GCLの自己修復能力はほぼゼロに対し、PB-GCLは直径20mmの損傷穴の約80%が修復された。また、強酸(pH=1)、強アルカリ(pH=13)の溶液でもUB-GCLに比べPB-GCLは高い自己修復能力を有していることが分かった。特にpH=13の溶液で、UB-GCLは殆ど自己修復能力がなかったが、PB-GCLは蒸留水よりも高い自己修復能力を示した。

第5章は本研究の成果のまとめと将来の展望について述べている。

以上の成果により、本研究は高膨張・低透水を目標とするベントナイトの重合条件の確立、高陽イオン濃度、或いは強酸・強アルカリ性環境に応用できる遮水ライナー、PB-GCLの開発に貢献があり、成果は社会実装面での価値も高い。また、本研究では、審査付学術論文2編が発表された。

### 論文審査結果の要旨

平成30年8月6日に実施した博士論文公聴会において種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。学外審査員は審査レポートで、本博士論文が博士学位の授与に値するものであると承認した。以上の審査結果に基づき、本博士論文は博士(工学)の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員一致で合格と判定した。

氏名(本籍) Phyo Wai Myint (ミャンマー連邦)  
 学位の種類 博士(工学)  
 学位記の番号 甲第 634 号  
 学位授与の日附 平成 30 年 9 月 25 日  
 学位論文題名 Determination of the Values of  
 Critical Ductile Fracture Criteria and  
 Prediction of Fracture Initiation in  
 Shear Punching Processes  
 (臨界延性破壊基準値の決定とせん断打ち抜き加工における破壊開始点の予測)

## 論文審査委員

(主査)	佐賀大学	教授	萩原	世也
(副査)	〃	〃	服部	信祐
〃	〃	〃	張	波樹
〃	〃	准教授	森田	繁樹

## 論文内容の要旨

プレス加工は、自動車部品などを生産する際に同一製品を連続生産により大量生産できるために、生産時間と生産コストを大幅に削減することができる。その中でもせん断力を作用させて切断する打ち抜き加工は、多くのプレス加工品に利用されている。

打ち抜き加工では、切断面にせん断面と破断面が混在し、特に破断面の存在は製品の精度を向上させる上での障害となることがある。金型製造におけるコストダウンや製品精度向上のために、数値解析により切断部の品質を予測することは重要であるが、塑性変形を伴う変形であるため、難しい課題となっている。

これまで、この様な問題に対して切断面の破壊の発生を予測するために様々な研究が行われている。それらの研究内容は、延性破壊条件を有限要素法解析に組み込み、その解析の結果から割れの発生を予測する方法である。

しかしながら、それらの研究による評価方法も実用的に利用されている例は少ない。それは、表面の割れの発生を評価するために必要な延性破壊臨界値は、材料特有の値であるものの、引張試験などの一般的な材料試験だけでその値を得ることは難しく、現在のところ決定法も含め確立されていないことが理由となっている。

本論文では、一般的な簡易打ち抜き実験による切断面性状測定とユーザルーチンによる延性破壊条件式を組み込んだ汎用有限要素法解析プログラムによる解析を行い、その切断面に分布する延性破壊条件値を検討することで、その材料の延性破壊臨界値を求め、破断面の切断面性状の変化する位置(せん断限界点)の推定を行った。

また、これらをファインブランキングに適用する

ことによって、ファインブランキングにおいて、全せん断面が得られることについて考察を行った。

本論文は以下に示す 7 章で構成されている。

第 1 章では、序論として本研究の背景と本論文で扱う問題の意義や研究の目的および論文の構成について述べている。

第 2 章では、金属のせん断打ち抜き加工についての、切断面形成におけるせん断面と破断面生成のメカニズムについて記述している。

第 3 章では、実験対象材料の材料試験の結果および簡易打ち抜き実験と結果について、材料の機械的特性の測定結果と簡易打ち抜き実験におけるせん断面の測定結果について、切断面の画像も示して結果を記述している。

第 4 章では、せん断打ち抜き加工についての、理論的背景および延性破壊条件と延性破壊条件式について、既往の研究で提案されている各種クライテリアについて言及し解説している。

第 5 章では、打ち抜き実験結果から得られた切断面の画像から、せん断面の長さと有限要素法から得られた延性破壊条件式の値との比較により、それぞれの条件での延性破壊条件式による臨界値を求めた。打ち抜き加工の有限要素法解析の結果から得られた切断面に沿った延性破壊条件式の値(C 値)と、打ち抜き実験から得られた切断部のせん断限界点(破壊開始点)との比較により得られた延性破壊臨界条件値 C<sub>cr</sub> 値を SPCC 材、S45C 材について求めている。

SPCC 材については、Oyane 式と Cockcroft-Latham 式において、各々のダイとパンチのクリアランスによって、延性破壊臨界条件値 C<sub>cr</sub> 値が実験-計算式によって推定できることを示している。しかし、S45C については、推定式による臨界値の推定に対する問題点を指摘している。

第 6 章では、せん断打ち抜き加工の一つであるファインブランキングについて、ファインブランキングが、その打ち抜き加工のメカニズムとクリアランスにより、すべての切断面にせん断面が得られることを、延性破壊条件式と延性破壊臨界値で定量的に説明している。したがって、ファインブランキングにおけるクリアランスの推定を行うことができる。

第 7 章では結論を述べ、せん断打ち抜き加工における破壊開始点の推定に関する今後の展開について述べている。

## 論文審査結果の要旨

平成 30 年 7 月 20 日に実施した博士論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。

また本研究は、審査付英文学術論文 2 編、国際学会発表 3 編で報告されており、本研究は博士の学位

に値する。

以上の審査結果に基づき、本論文は博士（工学）の学位を授与するに値すると判断され、審査員全員で合格と判定した。

また、学位申請者、Phyo Wai Myint 氏に対して、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する内容について口述試験をおこなうことを事前に通知し、平成 30 年 7 月 20 日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、材料力学、固体力学、塑性加工学など、これらに関連ある内容について行った。これにより申請者は、口述試験から材料力学、固体力学および塑性加工学に関して十分な知識と理論構成力を有していると判断した。

以上に述べたように、本申請者は博士論文を中心とした最終試験では、いずれも十分な内容の知見を示し、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

氏名(本籍) MUHAMMAD ASAD RAHMAN  
(バングラデシュ人民共和国)

学位の種類 博士(工学)

学位記の番号 甲第635号

学位授与の日附 平成30年9月25日

学位論文題名 Circular Polarization and Reconfigurable Microstrip Antennas for Advanced Wireless Communication Systems  
(無線通信システム高度化のためのマイクロストリップ型円偏波アンテナおよびリコンフィギュラブルアンテナの研究)

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 豊田 一彦  
(副査) " 准教授 佐々木 伸一  
" " " 田中 高行  
" " " 西山 英輔

## 論文内容の要旨

本研究は、次世代無線通信システムの高度化に向けたマイクロストリップアンテナに関するものであり、新しい構成の円偏波アンテナや動作周波数や偏波を切り替えることのできるリコンフィギュラブルアンテナを提案している。これらのアンテナはいずれも、マイクロ波回路とアンテナ素子を一体複合化するというコンセプトに基づくものであり、アンテナ基板の両面に設けた伝送線路を効果的に用いることで非常にシンプルな構成で種々の機能をアンテナに組み込んでいる。

本論文は、全8章で構成されている。

第1章では、本研究の背景について述べるとともに、アンテナ技術の動向や研究目的、手法について示し、本論文の位置付けを明確にしている。

第2章では、本研究で用いるマイクロストリップアンテナについて、その概要と特徴について述べ、円偏波を送受信するためのアンテナ構成や給電回路、ならびに、アレーアンテナの構成法について従来技術をまとめている。

第3章では、新しく提案した直交給電1×2円偏波アレーアンテナについて述べている。マイクロストリップ線路とスロット線路で構成される新しい3分配回路を提案し、試作アンテナによりその特性を明らかにしている。また、多層基板を用いた高性能化の手法についても提案している。さらに、多層基板を用いることで90度ハイブリッド回路などのマイクロ波機能回路をアンテナの裏面に形成することが可能となることを利用して、小型の円偏波切り替え

アンテナを実現し、本構成法の利点を明らかにしている。

第4章では、新しい構成の偏波切り替えアンテナについて述べている。本章で提案しているアンテナは、縮退モード分離型1点給電円偏波アンテナの原理に基づくものであるが、縮退モードを分離するための摂動素子をスイッチングダイオードでON/OFFすることにより円偏波の切り替えを実現している。本章では2つのアンテナを提案しているが、1つ目のアンテナは、2つの摂動素子を切り替えるものであり、同一周波数帯で右旋・左旋の円偏波を切り替えることができる。また2つ目のアンテナは、円偏波の方向を切り替えると同時に、動作周波数帯も切り替えるという機能を有している。

第5章では、マイクロストリップアンテナの接地導体にスロットを設けることでアンテナ素子に摂動を与える円偏波アンテナについて述べるとともに、接地導体上のスロットによる負の摂動をアンテナ素子に正の摂動を与えることによりその効果を打ち消すという新しいコンセプトを提案し、円偏波と直線偏波の切り替えを実現している。

第6章では、アンテナ素子にスロットを設けることにより、2つの周波数帯でそれぞれ円偏波と直線偏波を送受信する2周波偏波共用アンテナを提案している。スロットの長さや幅が2つの周波数帯の特性に与える影響についてシミュレーションによって明らかにし、試作アンテナによりその特性を確認している。

第7章では、45度傾けて配置したアンテナ素子を用いた2×2円偏波アレーアンテナについて述べている。両平面回路技術を用いることによりインピーダンス整合回路が不要となり、従来技術に比べて簡単な設計法で円偏波アレーアンテナが実現できることを示している。

第8章は結論であり、各章を要約し、本提案技術が次世代通信システムや我々の社会にどのようなインパクトを与えるかについて議論することで本論文を総括している。

本論文では、それぞれのアンテナの動作原理を説明するとともに、シミュレーションと試作アンテナの評価によりその特性を詳細に検討している。これらのアンテナは、従来のマイクロストリップアンテナに種々の工夫を施すことにより、その高性能化や高機能化を図ったものである。また、基板の両面に配置したマイクロストリップ線路とスロット線路を有効に活用することで簡易な構造で種々の機能を実現しており新規性に富むものである。近年は、あらゆるものがワイヤレスでインターネットにつながるIoT(Internet of Things)の時代になった。本論文は、このような応用分野のアンテナ技術に対して新しい知見を与えるものであり、学術的にも産業的に

も価値の高いものである。

### 論文審査結果の要旨

学位申請者，MUHAMMAD ASAD RAHMAN 氏に対して，平成 30 年 5 月 15 日に事前審査を実施し，申請者による学位論文内容の発表およびそれに関する質疑応答がなされ，審査対象として十分な内容であることを確認した。また，論文業績・学会での発表経験が所定の要件を満たしていることを確認し，申請者は十分な研究遂行能力と学際的素養を有していると判断した。

平成 30 年 7 月 25 日に実施した博士論文公聴会においても提案技術に関してその特性や課題についての種々の質問がなされ，いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。また，本研究は，審査付き学術論文 3 編，査読付き国際会議論文 5 編などで報告されており，著者は研究者としての十分な能力を有していると言える。

以上の審査結果に基づき，本論文は博士（工学）の学位を授与するに値すると判断され，審査員全員一致で合格と判定した。



氏名(本籍) MD. Sanaul Rabbi  
(バングラデシュ人民共和国)  
学位の種類 博士(工学)  
学位記の番号 乙第93号  
学位授与の日附 平成30年9月25日  
学位論文題名 Subsurface damage detection in CFRP using dynamic shear strain analysis of Lamb wave  
(ラム波の動的せん断ひずみ解析を用いたCFRP中の表面下損傷の検出)

## 論文審査委員

(主査) 佐賀大学 教授 寺本 颯 武  
(副査) // // 上野 直 広  
// // // 辻村 健  
// // // 准教授 イスラム カーン

## 論文内容の要旨

現在、炭素繊維を用いたCFRP薄板は軽量化が必要な構造材に多く使用されつつある。航空機では、翼や胴体など主要な構造材に使用されており、CFRP中に発生する層間剥離や亀裂の発生をいち早く検出することが、安全維持のためにも欠かすことができない。このような検査の場合、従来より超音波探傷法が用いられてきた。しかし、小さな傷や表面近傍あるいは薄板中に発生した欠損を検出するためには、波長の短い超音波を使用しなければならない。そのため、一度に検出する範囲が限定され、検査に要する時間およびコストが高くなり、高い頻度での検査が難しいとされている。これらの欠点の解消を目的として、本研究ではガイド波の一つであるA0モードラム波を用いた非破壊検査を扱っている。ガイド波は薄板内を導波路として進行するためエネルギー減衰が小さく、欠損がなければ非常に遠いところまで伝搬するという特徴をもっている。また導波路中に欠損がある場合は局所的にエネルギーが散逸し、その進行に影響を及ぼすためガイド波の波面を時々刻々解析することで欠損の存在を特定できることが推測される。しかしガイド波の多くは分散性の波であり、音速が周波数と板厚によって変化するため波

面の進行とともに入射パルスの形状が崩れ、亀裂や剥離、腐食箇所からの散乱波を検出することが困難になるという問題点がある。そのため、ガイド波を用いた亀裂の撮像法が研究されつつある。そのうちの 하나가、Pradaらによって提案されている群速度がゼロになるラム波のモードを利用した撮像手法である。非常に面白い現象を利用した手法であるが、材質および板材の厚さによって、ゼロ群速度モードを実現する周波数が異なる。そのため、広帯域で対象を励振しなければならず、また発生した多数のモードから当該モードを抽出する困難を伴っている。これに対し、2011年に寺本らによって提案された「動的せん断ひずみ解析法」は、波長より小さな欠損の近傍の波動場の強度の空間分布に着目したものである。近接場は、放射源の近傍に停留する場であるため、近接場の抽出は、波源の特定を意味する。この手法の特長は、次のようにまとめることができる。(1)検査対象表面の法線方向と検査対象表面に沿う方向に関する、互いに直交する一対の動的面外せん断歪みからなる信号列の分散共分散行列の行列式を利用している。(2)欠損のないところでは、上記の一対の動的面外せん断歪みが互いに線形従属の関係にあるが、欠損近傍では、入射波と散乱波が重畳し、線形性が破綻する。(3)その結果、欠損のないところでは、行列式の値は、ゼロに近い値を示すのに対し、欠損近傍では、ある正の有限値を示す。そこで、行列式の値の分布にもとづき、周波数や伝搬速度とは独立に再放射源の近接場領域の撮像を可能にしている。提出論文では、異方性薄板材を伝搬するラム波の振る舞いを数学モデルを用いて明らかにし、同時に数値モデルを用いた実験により検証している。さらに、異方性薄板材の欠損検出に「動的せん断ひずみ解析法」を適用したときの、欠損検出能力について、前述の数値モデルを用いて解析し、その有効性を明らかにしている。異方性材料では、等方性材料と異なり、波面の伝搬方向によって、その速度が変化するため、従来の探傷法のように、伝搬遅

延時間にもとづく探査法では、欠損の正しい位置を同定することが原理的に困難であった。しかしながら、本手法は、伝搬速度の方向依存性によらずに、欠損の位置を同定できることが、本研究により示された。本論文の7章から構成され、それぞれの内容はずつぎのとおりである。第1章では、現在一般的に用いられている非破壊検査手法についてのサーベイがなされ、本研究の位置づけや背景が記述されている。第2章では、等方性弾性体を伝搬するラム波の振る舞いについて、数理的に示されている。さらに第3章では、異方性弾性体を伝搬するラム波の振る舞いについて考察がなされている。中でも、もっとも簡単な横等方性弾性体については、ラム波の振る舞いが数理的に解析がなされている。第4章では、積層複合材料を伝搬する機械的特性に対する考察がなされ、層に沿って伝搬するガイド波の振る舞いについて解析がなされている。第5章では、動的せん断ひずみ解析法がレビューされている。第6章は、数値実験を用いて、前章での解析結果が妥当であることを示し、さらに「動的せん断ひずみ解析法」が、等方性弾性体ばかりではなく、異方性弾性体に対しても同様に有効であることを明らかにしている。その結果、本手法の普遍性が示された。最後に第7章では、以上の成果が総括されている。

## 論文審査結果の要旨

学位申請者、Md. Sanaul Rabbi 氏に対して、博士論文審査終了後に最終試験を実施すること、および試験の内容は博士論文に関連する内容について口述試験をおこなうことを事前に通知し、平成30年7月20日に実施した。

口述試験は博士論文を中心として、これに関連ある内容について行った。

論文で用いられている「動的せん断ひずみ解析法」の欠損検出原理について質問を投げかけた。その結果、(1)検査対象表面の法線方向と検査対象表面に沿

う方向に関する、互いに直交する一対の動的面外せん断歪みからなる信号列の分散共分散行列の行列式を利用している。(2)欠損のないところでは、上記の一対の動的面外せん断歪みが互いに線形従属の関係にあるが、欠損近傍では、入射波と散乱波が重畳し、線形性が破綻する。(3)その結果、欠損のないところでは、行列式の値は、ゼロに近い値を示すのに対し、欠損近傍では、ある正の有限値を示す。そこで、行列式の値の分布にもとづき、周波数や伝搬速度とは独立に再放射源の近接場領域の撮像を可能にしている。との回答が得られた。

さらに申請者は、「動的せん断ひずみ解析法」を一方方向性繊維強化複合材料に適用した結果についてまとめ、一編が *International Journal of COMADEM* Vol. 21-1 (2018) に掲載された。以上に述べたように、本申請者は博士論文を中心とした最終試験では、いずれも十分な内容の知見を示し、最終試験の結果は合格であると審査員全員で判定した。

平成30年度理工学部  
集報・サイエンテック編集専門委員会

委員長 泉 清 高（機械システム工学学科）  
委員 中 村 健 太 郎（数理科学科）  
山 内 一 宏（物理科学科）  
上 田 俊 （知能情報システム工学科）  
江 良 正 直（機能物質化学科）  
三 沢 達 也（電気電子工学科）  
李 海 峰（都市工学科）

平成30年12月20日 発行

編集兼 〒840-8502 佐賀市本庄町1  
発行者 佐賀大学理工学部

Reports of the Faculty of Science and Engineering,  
Saga University, Vol. 47, No. 2, June, 2018

Contents

Lattice QCD simulations at finite chemical potentials .....Hiroaki KOUNO.....	1
Summary and examination of doctoral thesis.....	5